

电液集成块液路设计

陈维书 著

国防工业出版社

194996

电液集成块液路设计

陈城书 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电液集成块液路设计/陈城书著. —北京:国防工业出版社, 1997. 1

ISBN 7-118 01601-2

I. 电… II. 陈… III. 液压集成化-管道 设计 IV. TH
137.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05165 号

0451/18

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5½ 139 千字

1997 年 1 月第 1 版 1997 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1 1500 册 定价:12.30 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾 铎

秘书长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前 言

计算机的迅猛发展,加速了各行各业的科技进步,液压技术也不例外。众所周知,传统的液压阀在价格和技术上远不能适应现代传动装置方面的要求,已成为影响液压技术发展的一个主要矛盾。为了改变这种状况,笔者经过多年的刻苦钻研,终于成功地将电子学原理移植到液压技术中来,发明了电液集成块,创建了电液集成块液压技术,开拓了液压技术全新的发展道路——廉价的机电液一体化技术。经过几年的努力,电液集成块液压技术已越来越多地为人们所认识,获得了迅速的发展。日前迫切需要有一本阐述电液集成块液压技术的理论书籍,以满足液压界同行对电液集成块液压技术在理论上的深入了解。1990年曾由华中理工大学出版社出版了笔者写的《电液集成块液路》一书,但该书只是粗略地介绍了电液集成块液压技术理论的概貌,不能满足同行们的需求。为了建立起较详细而完整的电液集成块液压技术理论,特撰写了本书,以飨读者。

在此,特别要衷心感谢原国家计委科技局严谷良高级工程师对电液集成块研究和开发工作的无私支持和帮助,同时,非常感谢“国防科技图书出版基金”对本书的出版给予资助。

陈城书

1995年6月

目 录

第 1 章 电液集成块液压技术的发展	1
1.1 液压技术的基础元件	1
1.2 电液集成块液压技术	6
1.3 电液集成块液压技术的发展	10
第 2 章 电液集成块	19
2.1 电液集成块的组成	19
2.1.1 液管	20
2.1.2 电液管	24
2.2 电液转换液路	29
2.2.1 液阻的串并联	29
2.2.2 电液转换液路的实现	32
2.2.3 信息利用率	35
2.3 液管的控制	41
2.3.1 液管的控制方式	43
2.3.2 特征式	46
2.3.3 比函数的分配	51
2.3.4 混频	57
第 3 章 液动机的驱动	63
3.1 驱动液路	64
3.1.1 压力驱动液路	64
3.1.2 流量驱动液路	83
3.1.3 桥式驱动液路	89
3.2 液动机的驱动	100
3.2.1 液动机的流量驱动	103
3.2.2 液动机的压力驱动	106

3.3 爬行	107
第4章 电液集成块液压系统	117
4.1 过压保护液路	117
4.1.1 限压液路	118
4.1.2 稳压液路	123
4.2 液路总成	125
4.2.1 功能块	126
4.2.2 标准功能块	134
4.2.3 界面设计	147
4.2.4 液路总成的设计	148
4.3 液源	156
4.4 应用实例	158
4.4.1 组合机床的液路总成	158
4.4.2 车床的电液集成块液压系统	160
4.4.3 电液集成块液压驱动汽车	162

第1章 电液集成块液压技术的发展

当今,世界正面临着—场技术革命,它的主要基础是电子计算机。这场技术革命旨在改变传统工业的生产方式,促进传统产业的更新换代,使之进入高新技术时代。电子计算机的出现,使人—机“对话”成为可能。人—机“对话”的媒介称为人—机界面。当要改变工作机的动作时,人只要通过界面将控制某—动作的信息输入机器中,机器就能完成某—动作。也就是说,控制部分的硬件可不做任何变更,只要装入不同的软件就能操作机器做不同的动作,即工业机械的智能化。这是工业发展的总趋势——机电一体化技术。电液集成块液压技术,就是在这种形势下发展起来的。

1.1 液压技术的基础元件

液压系统的数学模型能准确地、数值地表示液压系统所服从的物理规律。所有液压系统的数学模型都是由几个简单的数学式组成的。

在液压技术中,基本物理量是压力和流量,分别用 P 和 Q 来表示。压力 P 和流量 Q 之间的简单数学关系式有:

$$\begin{array}{ll}\text{代数型: } P = P(t) & \text{微分型: } P = L \frac{dQ}{dt} \\ Q = Q(t) & \\ R = P/Q & Q = C \frac{dP}{dt} \\ K = Q/P & \end{array}$$

如果这几个简单数学式在液压领域中的物理意义存在,就称它们为数元。如果液压物理元件(实际上能做出的元件)就是数元,

那当然它具有最大的通用性。

$P=P(t)$, 表示数元上的压力与流量无关。它在液压领域中的物理意义, 是指蓄能器在一定的工作范围内, 其输出压力与流量近似无关。

$Q=Q(t)$, 表示数元上的流量与压力无关。它在液压领域中的物理意义, 是指液压泵的输出流量与压力无关。

$R=P/Q$, 表示数元上的压降正比于通过其上的流量。它在液压领域中的物理意义, 是指油液通过小孔会产生阻力。该小孔称为液阻, R 为液阻的阻值。在一个直径为 5.5mm, 厚度为 0.1mm 的金属圆片上, 开有一个小孔, 如图 1-1 所示。小孔直径为 d_0 , $d_0=0.1\sim 0.5\text{mm}$ 。这个小孔就构成一个液阻, 通过其上的流量与压降关系为:

$$R = \frac{P}{Q} = \frac{\sqrt{P}}{K_r d_0^2} \quad \text{或} \quad R = \frac{P}{Q} = \frac{Q}{K_r^2 d_0^4} \quad (1-1)$$

式中 K_r ——常数。

$K=Q/P$, 表示通过该数元的流量受压力的控制。它在液压领域中的物理意义, 是指恒压油流通过受压力控制的开口时, 开口 a 受 h 和 e 端的压力差 P_{h-e} 控制, 如图 1-2 所示。称 h 和 e 为输入端或控制端, P 和 O 称为输出端。显然有:

$$Q = K P_{h-e} \quad (1-2)$$

式中 K ——常数。

这时的物理元件称液压放大元件。

$P=L \frac{dQ}{dt}$, 表示该数元上的压降正比于通过其上的流量变化

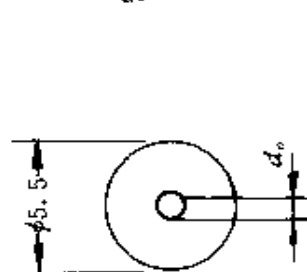


图 1-1

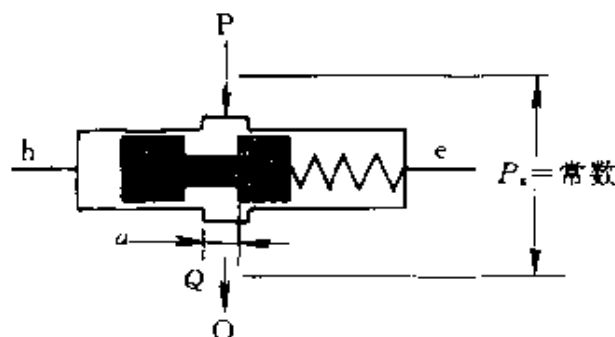


图 1-2

率。比例系数 L 称为液感, 它是由液压系统中运动物体的惯性引起的。在图 1-3 中, 液压缸驱动一个质量为 M 的物体, 当液压缸加速物体运动时, 液压缸作用腔所需之压力为 P , 则有:

$$P = \frac{aM}{A} = \frac{M}{A^2} \times \frac{dQ}{dt} = L \frac{dQ}{dt} \quad (1-3)$$

$$L = \frac{M}{A^2} \quad (1-4)$$

式中 A ——活塞的有效作用面积;

M ——被加速物体的质量;

L ——液感;

a ——加速度。

$Q = C \frac{dP}{dt}$, 表示通过该数元上的流量正比于其上压降的变化率。比例系数 C 称为液容, 它是由液压系统中的弹性体引起的。

图 1-4 是一个充满油液的密闭容器, 随着压力的增高, 容器中的油液被压缩, 则有:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V}{E} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta t} = C \frac{dP}{dt} \quad (1-5)$$

$$C = \frac{V}{E} \quad (1-6)$$

式中 V ——初始体积;

ΔV ——被压缩的体积;

ΔP ——增加的压力;

C ——液容;

E ——油液的弹性模量。

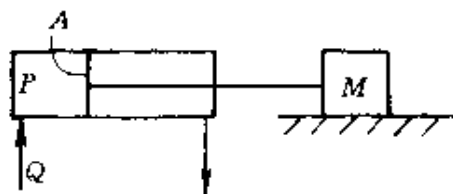


图 1-3

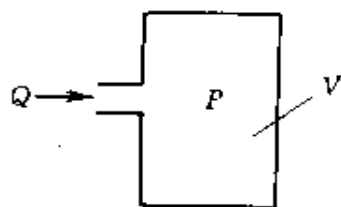


图 1-4

在图 1-5 中,当液压缸活塞克服弹簧力而动作时,则有:

$$Q = A \frac{dx}{dt} = A^2 \left(\frac{1}{A} \times \frac{dx}{dP} \right) \frac{dP}{dt}$$

$$= \frac{A^2}{k} \times \frac{dP}{dt} = C \frac{dP}{dt} \quad (1.7)$$

$$C = \frac{A^2}{k} \quad (1.8)$$

式中 Q ——流入液压缸作用腔的流量;

P ——液压缸作用腔的压力;

A ——活塞的有效作用面积;

x ——弹簧的压缩量;

C ——液容;

k ——弹簧刚度。

在上述数元中,能找到相应的物理元件有蓄能器、液压泵、液阻和液管(液压放大元件),再加上液动机和与计算机相连接的电液转换元件——电液管。由这些元件组成了液压系统的基础元件。其中只有液管和电液管为控制元件。

液压系统的控制部分有两种形式:一种形式是将电液管、液管和液阻作为基础控制元件;另一种形式是将电液管、液管和液阻的组合体作为基础控制元件。前者称为电液集成块液压技术,后者即为传统的阀类液压技术。

在液压传动中,流量是主宰一切的,没有流量就没有压力,因此控制元件主要是对流量的控制。流量控制元件的最简单结构如图 1-6 所示。它是由管芯、管套和复位弹簧所组成。在管套上开有

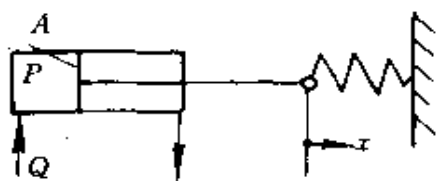


图 1-5

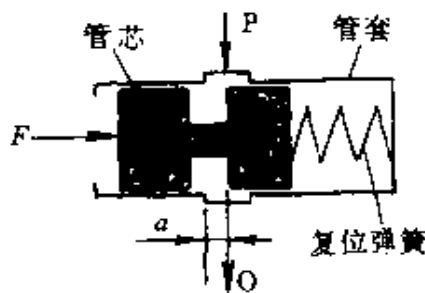


图 1-6

通流口 P 和 O 。当管芯左端不作用有轴向力 F 时,管芯在复位弹簧的作用下移向最左端,通流口被管芯遮盖,油流不能通过,这种状态称为截止状态。当管芯左端作用有轴向力 F 时,此力克服复位弹簧的力而使管芯右移,通流口被接通,油流就能通过,这种状态称为导通状态,其导通程度与力 F 成正比。

为要控制液压缸的动作,可用图 1-7 所示的液路来完成。液压

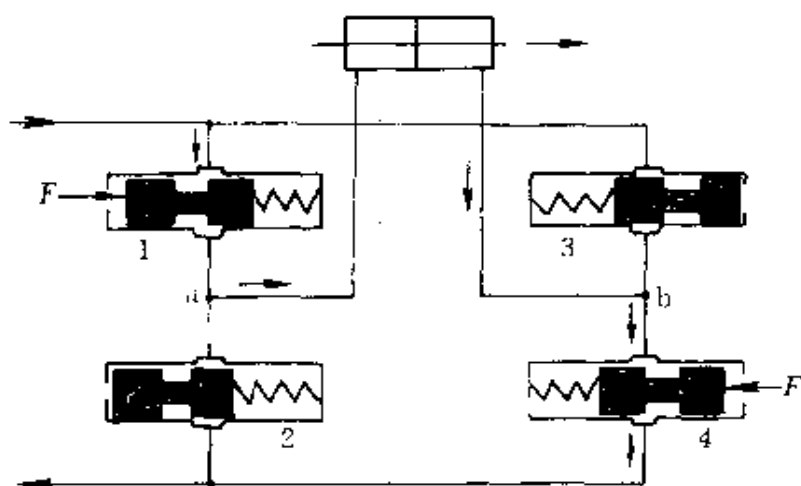


图 1 7

缸的动作受 a 、 b 两点的压力差 $P_{a,b}(=P_a-P_b)$ 控制。当四个流量控制元件都截止时, $P_{a,b}=0$, 活塞停止不动; 当流量控制元件 1 和 4 导通、2 和 3 截止时, $P_{a,b}>0$, 活塞右移; 当流量控制元件 1 和 4 截止、2 和 3 导通时, $P_{a,b}<0$, 活塞左移。 $P_{a,b}$ 的绝对值越大, 活塞移动速度越快。最初技术尚不发达, 流量控制元件都由人工手动操作, 因此要求控制元件具有尽可能简单的一次性操作。也就是说, 要使液动机从一种状态变化到另一种状态, 人工只要操作一次即可完成。这种对控制元件的一次性操作要求, 就使得控制元件必须具有一定功能, 为此出现了各种各样的、具有一定功能的阀类液压控制元件。在手动操作时, 要使液压缸从一种状态改变到另一种状态, 按图 1 7 所示之液路, 一次操作是不能完成的。为要使控制元件具有一次性操作, 则必须将四个流量控制元件组合成一体, 如图 1-8 所示。这种组合体称为液压阀。组合体的组合形式不同, 就形成具

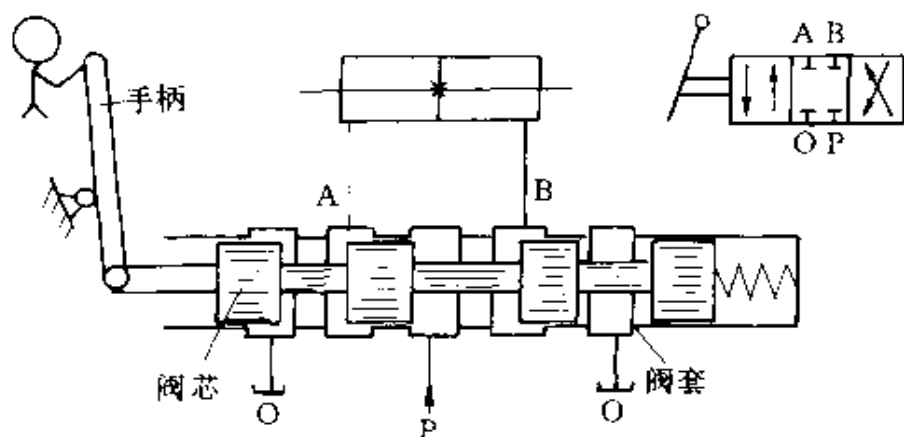


图 1-8

有一定功能的各种传统的液压阀。阀类液压技术就是由传统液压阀作为基础控制元件而建立起来的液压技术。

1.2 电液集成块液压技术

电液管的作用是将计算机输出的低压小电流的弱电信号转换成低压小流量的弱液信号。它仅仅完成电液转换,因此电液管(电液转换元件)的结构小而简单。液管是液压放大元件,由电液管转换而成的低压小流量的弱液信号,经过液管后放大成高压大流量的液压信号,去驱动液动机动作。电液管和液管用图 1-9 所示的符号表示。图中的脚标说明如下:

电液管: P 和 O 为通油口的两端, a a 为弱电控制信号输入引线。通过电液管的流量正比于通过 a - a 引线上的电流, b - b 引线上

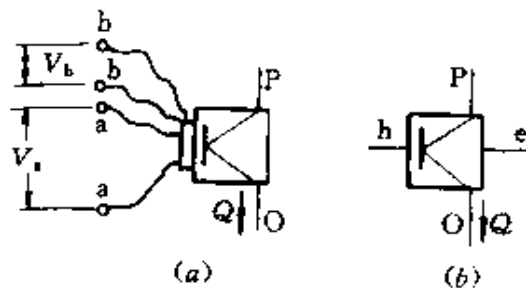


图 1-9

(a)电液管;(b)液管; Q ——输出流量。

通过的电流称为抖动电流,它为改善电液管性能之用。

液管:P和O为通油口的两端,h和e为控制端油口。当h端的压力大于e端的压力时,液管就导通,通过流量的大小和两端的压力差 P_{h-e} 成正比。

用电液管、液管和液阻就可组成各种电液控制回路(简称液路)。图1-10所示为最简单的电液集成块液压系统。液压缸活塞的

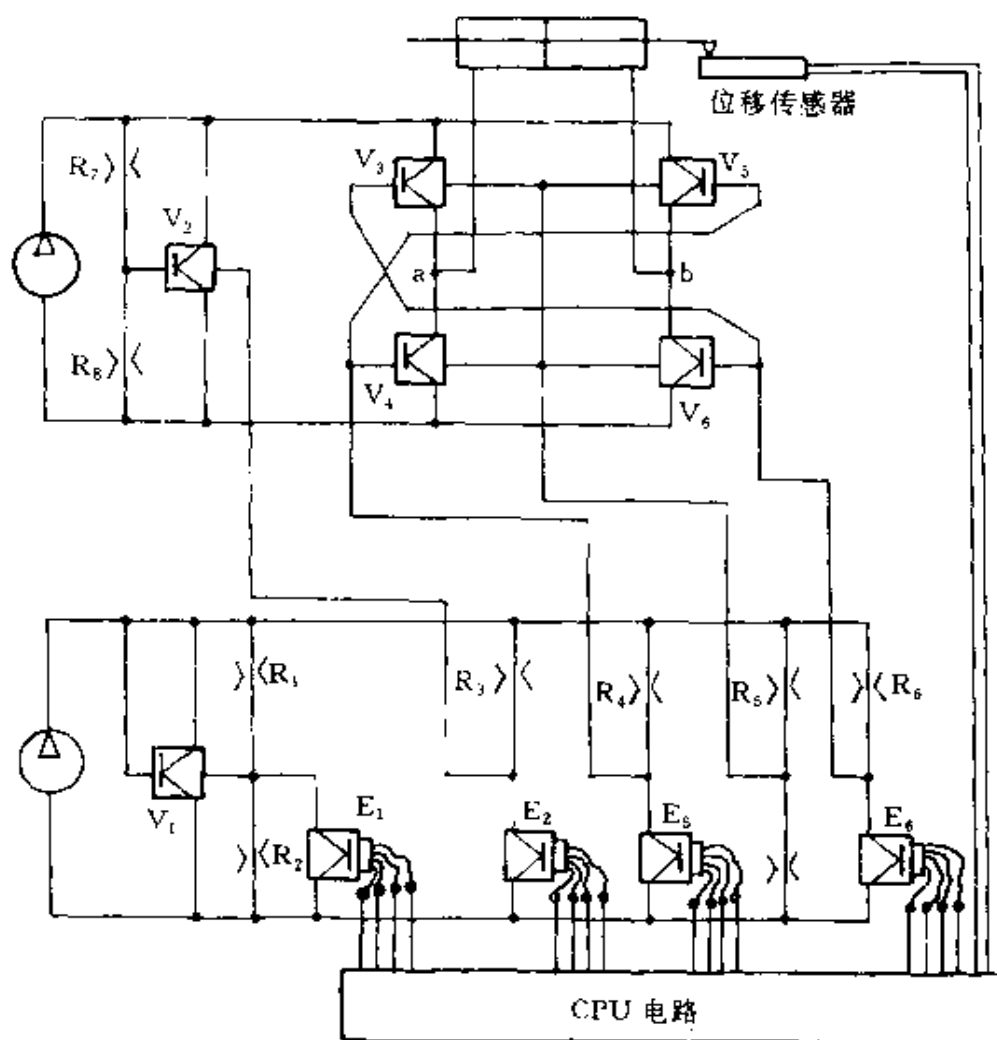


图 1-10

运行速度和方向受a、b两点的压力差 P_{a-b} ($=P_a-P_b$)的控制。当四个液管 $V_3\sim V_6$ 都截止时,则 $P_a=0$ 、 $P_b=0$,活塞静止不动;当液管 V_3 和 V_6 导通,而 V_4 和 V_5 截止时, $P_{a-b}>0$,活塞右移;当液管 V_2 和 V_5 截止,而 V_4 和 V_5 导通时, $P_{a-b}<0$,活塞左移;当四个液管都导通时, P_{a-b} 的绝对值越大,活塞移动速度越快。液管 V_1 和液阻 R_1 、 R_2

组成稳压液路,液管 V_2 和液阻 R_7 、 R_8 组成过压保护液路。液管是受电液管控制,电液管是受 CPU 电路控制。CPU 电路实际上是一个微型计算机,其规模较单板机小,比单片机大。为了与单片机和单板机相区别,取名为 CPU 电路。只要更换 CPU 电路中的程序(固化在 EPROM 中),液压缸就能获得不同的动作。

将电液管和液管集成在一个直径为 125mm,高为 35mm 的圆柱形块中,就构成了电液集成块,如图 1-11 所示,其质量仅为

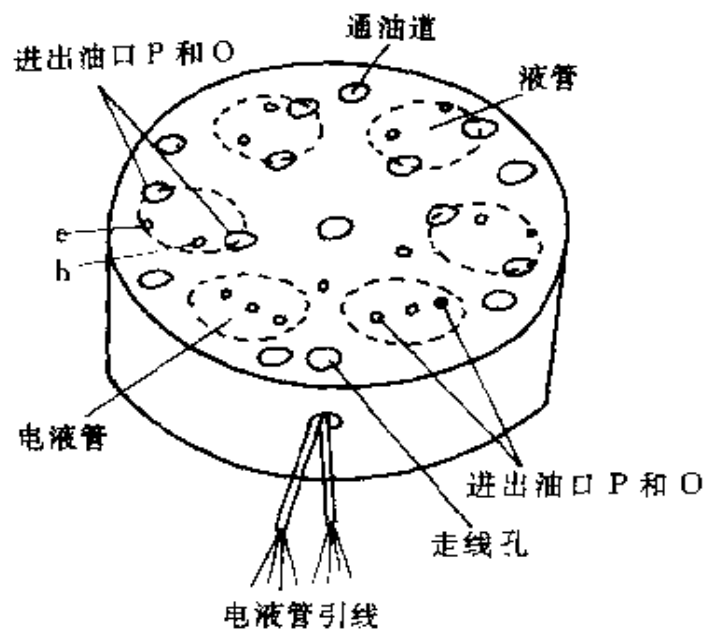


图 1-11

2.8kg。在电液集成块中,有两个电液管和四个液管。CPU 电路输出的弱电信号从引线进入电液集成块内,控制两个电液管,再由电液管去控制液管。电液管和液管之间的连接油路和液阻设置在液路板上,如图 1-12 所示。液阻在液路板上的设置方法,如图 1-13 所示。将电液集成块和液路板用连接器紧密地叠加在一起,就构成电液集成块液压系统中的控制部分,如第 4 章图 4-51 所示,所有电液集成块和液路板都被封闭在封闭筒内,既美观又清洁。流量大于 60L/min 时,要加设功放块,其流量为 100~2000L/min。

固化有控制程序的 EPROM 用冠方框的 EPROM 表示,即 $\square$ EPROM。方框中填入的数码表示各种不同控制程序的编号。将

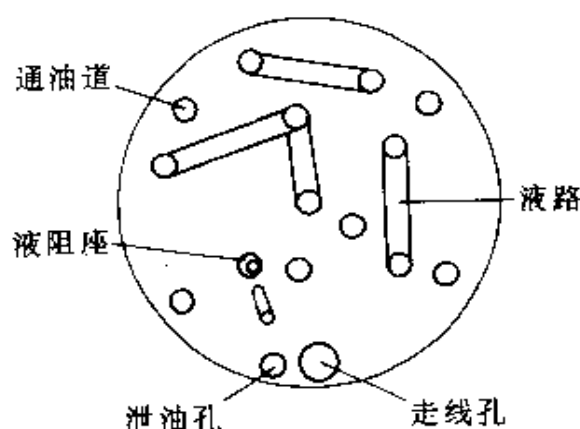


图 1-12

将 EPROM 插入 CPU 电路中, CPU 就按照 EPROM 中的固化程序, 对由传感器反馈来的信号做不同的处理并输出各种控制信号, 控制电液集成块液路, 推动液动机动作, 从而使液压机械完成特定的工作。

人通过界面来影响液压机械, 也就能间接地操作了液压机械, 如图 1-14 所示。液压机械的人—机界面是由有编号的 EPROM

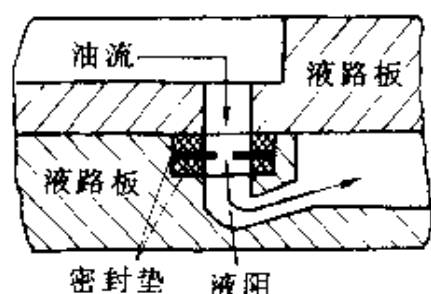


图 1-13

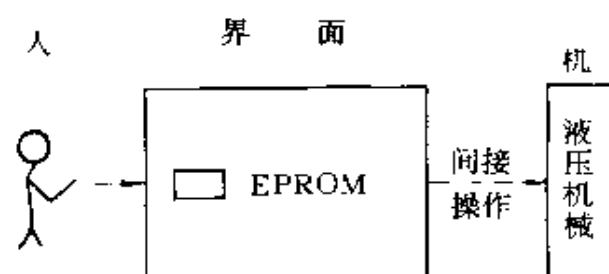


图 1-14

(EPROM) 构成, 人通过有编号的 EPROM 间接操作着液压机械, 也就是说, 液压机械的工作精度是建立在闭环控制的基础上, 而不是一味去追求电液集成块本身的高精度。这样就用软件的精度来代替硬件的精度, 成本降低了, 而性能却提高了, 即以低廉价获得高性能。它的示意框图如图 1-15 所示。将固化有控制程序的 EPROM 编上号, 用户根据需要从市场上选购某号的 EPROM, 将其插入 CPU 电路中, CPU 电路就自动地控制电液集成块液路操作液压机械动作, 这就构成了一个柔性系统。而 EPROM 是由市场提供的, 因此称这种柔性系统为市场柔性系统。也就是说, 用户可

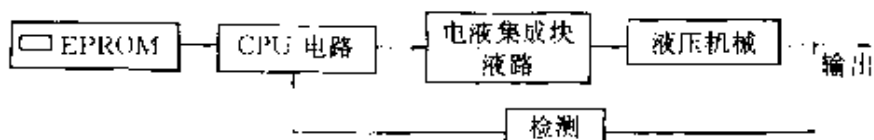


图 1-15

以花很少的钱,从市场上买到液压机械的一个动作,这对用户(液压机械的拥有者)来说,实在太方便了。

由上述可知,电液集成块液压技术的控制部分是由三部分组成:电液集成块、电液集成块液路和 CPU 电路。

1.3 电液集成块液压技术的发展

一个系统是由很多元件串联组成,如果不使系统构成闭环控制形式,如图 1-16 所示,那么其中只要有一个串联元件的精度差,

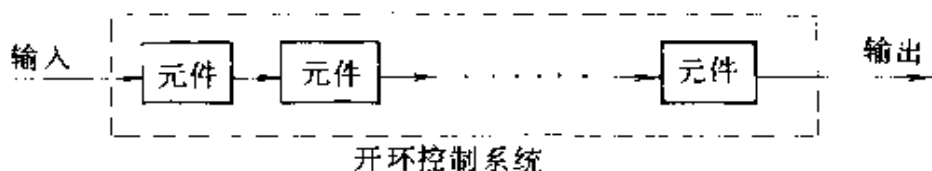


图 1-16

则系统的精度就差,而且这时的系统误差是各串联元件误差之和。所以为确保系统的精度,就要求每个串联元件的精度都要高出系统精度好几倍才行。串联元件越多(系统越复杂),则各串联元件的精度要求越高,系统的价格就越高。如要获得既有低的价格,又有高的系统精度,只有采用闭环控制系统才能达到,如图 1-17 所示。在闭环控制液压系统中,系统控制的精度基本上取决于检测元件和 CPU 电路运算速度及其软件。在这样的情况下,对元件的精度要求就不那么高了,于是系统价格就大大降低,而系统精度又可得到保证,这是一条正确的机电一体化道路。可是在液压行业中,目前都在努力发展电子和液压相结合的闭环控制元件,热衷于搞液电一体化液压元件,而忽视了机电液一体化系统(电子和液压相

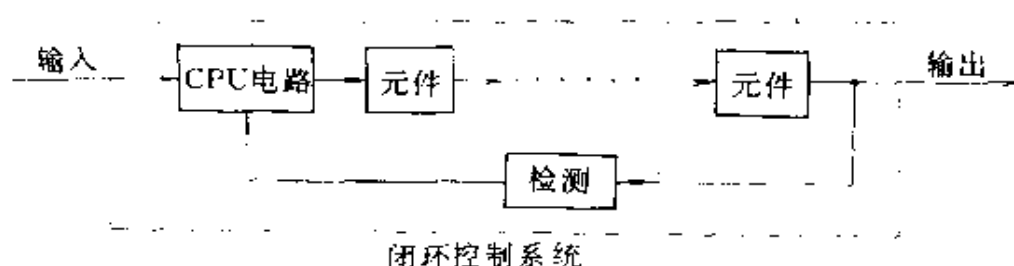


图 1-17

结合的闭环控制液压系统)的研究,使液压技术陷于困境之中。

液压传动与机械传动相比有很多优点,但是近 10 年来,交直流伺服电马达的发展很快,已在某些领域(特别是在数控机床行业)中取代了阀类液压技术。出现这种形势的主要原因是,阀类液压技术中的基础控制元件在价格和技术上不能同迅速发展着的计算机技术相适应。

电液伺服阀的价格太贵,大多数用户用不起,这里就不去谈它了,就从电液比例阀的情况来看,目前也不乐观。电液比例阀是沿用了手动阀的结构而制造的,这种结构使电液比例阀具有如下特点:(1)一次性操作;(2)电液转换和功率放大合一;(3)具有一定的功能。

计算机控制的特点是信息处理迅速且量大,但其输出功率小,一般在 3W 左右。如果液压技术中的电液转换元件,仍采用电液比例阀,那就不能与之相匹配了。电液比例阀的“一次性操作”、“电液转换和功率放大合一”的特点,使其操作功率较大,一般在 15VA 以上,最大可达 40VA 左右。这种“一次性”、“大功率”操作只适合于较落后的技术,它与计算机的特点不吻合。计算机控制希望以多次性、小功率操作与其相匹配。

另外,“电液转换和功率放大合一”使电液比例阀输出的是大功率,既然是大功率,那么流量就大,也就是说阀芯的位移较大。在大位移情况下,阀芯的平衡只能采用螺管弹簧。而要使普通电磁铁和螺管弹簧组成一对平衡副是不容易的,因为普通电磁铁的磁场

是非线性的,即衔铁的位移和电磁铁对衔铁的吸力之间的关系是非线性的,成平方关系,而螺管弹簧对衔铁的作用力和衔铁的位移成线性关系。因此,普通电磁铁只要一吸动衔铁,衔铁就一直移动到终端位置,而不能停留在任意的中间位置,就像电磁换向阀那样。为了使阀芯能停留在任意中间位置,设计师们就要将非线性的电磁铁设法做成线性的,即比例电磁铁,并同螺管弹簧组成一对平衡副。这样一来,势必使电液比例阀的结构复杂化了。

再者,现有的液压阀,包括电液比例阀,都是具有一定功能的,不是基础元件,它们是由基础元件组合而成的组合件。为此,现有的传统液压阀不具有二次式产品生产方式。所谓二次式生产方式,以电子技术为例,它的一次产品是光电管、晶体管、电阻等最简单的物理实体,它们是电子技术的基础件。二次产品是对一次产品的再生产,即将基础件组装成各种电子器件,如稳压电源、示波器、收音机和电视机等组装件。高精度的一次产品一般由几个高技术、大规模、自动化生产的大型骨干厂生产,这样才能使产品既具有高质量,又具有低廉的价格。一般这种二次式产品的生产方式发挥了工业生产的综合能力,使电子技术产品具有高质量、低价格和广泛的应用领域,给电子技术带来了欣欣向荣的局面。这是一种成功的产品生产方式。

传统的液压阀不是基础元件,而是基础元件的组合件。它们可由液管、电液管和液阻组成。也就是说,传统的液压阀是属二次产品类。可是在市场上又无相应的一次产品提供,于是这些星罗棋布的中小型液压阀生产厂就不得不自己设法来生产高精度的一次产品了,各厂又根据自身的产情况,将一次产品“溶化”在二次产品中,使传统液压阀的生产陷入一次式生产方式之中,这就要求所有星罗棋布的中小型液压阀厂,都应具有高精度的加工手段,给二次产品生产厂提出了更高的要求,随之也就带来了极大的困难。另外液压技术的应用领域极其广泛,液压阀生产厂为了求得销售市场,不得不将液压阀做成各种类型,以满足用户的需要。由于液压阀的品种繁多,厂家无力进行大规模自动化生产。液压技术的优势被如

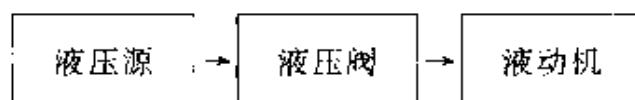
此繁多品种的液压阀所淹没了。于是就形成了这样的局面:液压阀要么就是质量低劣,要么就是价格高,不能做到两者兼而有之,使传统的阀类液压技术处于困难之中。

液压技术必须改变走机电一体化液压元件的道路,要大力研究和发展机电一体化的液压系统,即机电液一体化技术——电液集成块液压技术。

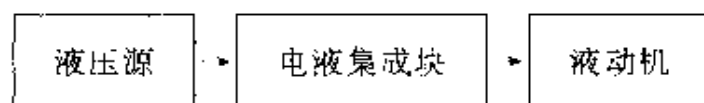
电液集成块液压技术的产品生产是二次式的。电液集成块是一次产品,它是由几个高技术、大规模、自动化高的电液集成块厂生产。星罗棋布的中小型液压成套设备厂是二次产品生产厂,它们从市场上购得电液集成块将其组装成各种液压系统。其结果将使电液集成块液压技术具有高质量、低价格和广泛的应用领域,使液压技术充分发挥其优势。

由于在功率传递中,液压方式与机械方式相比,具有很多优点,再加上液压技术的革命性发展——电液集成块液压技术的诞生,使智能液压系统的价格大大降低了。因此,液压传动与机械传动相比,具有很大的优势。

传统液压系统基本上是由三部分组成:



电液集成块液压技术只是将液压阀用电液集成块来代替,变成:



原来只要是液压机械,就可用电液集成块来改造,使其成为数控机械。所以用电液集成块液压技术来对老产品和老企业进行技术改造,实在太方便了。因此电液集成块液压技术在国家的技术改造中有着强大的生命力。

电液集成块液压技术的硬件都是标准的,通用性极强,用在机床上的一套电液集成块液压系统,可以直接搬到汽车上用,其不同的只是软件(程序)。再加上它的结构合理和二次式生产方式,使其能进行大规模自动化生产,因此它的价格低廉,且能同 CPU 电路

直接连接,易于实现工业机电液一体化。电液集成块是计算机和工业实体之间的一个理想的媒介。

电液集成块的试制是从 1988 年开始的,它经历了一个艰难的历程。在整个实验中,证明液管的工作是可靠的,从未发生任何故障,因此电液集成块的试验工作主要是放在电液管方面。

对电液管的动态性能实验,其情况于下:动态实验的液路为图 1-18 所示,将电液管和液阻 R_{ep} 相串联,当在电液管的引线上施加电压时,压力 P_e 就会发生变化。在抖动引线上施加 10V100Hz 时的脉动电压(V_b),在控制引线上施加控制电压(V_a),将 P_e 通过压力传感器变成弱电压,经动态应变仪放大后,在示波器上显示,其图形为图 1-19 所示。图 1-20 为开关信号的波形。图 1-21 为响应时间。图 1-22 为 100Hz 时的实测输出波形,输入信号为正弦波。图 1-23 为电液管滞环情况,有的电液管的滞后可达零值。

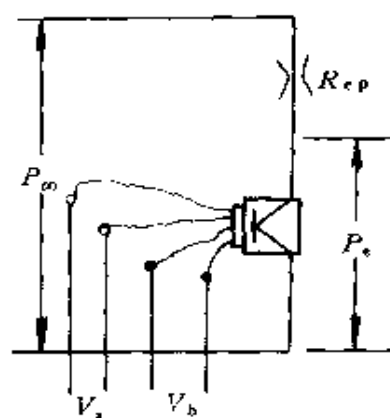


图 1-18

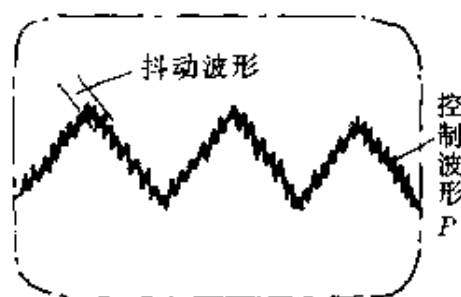


图 1-19

上述的实验结果表明,电液集成块的思路是可行的,电液集成块的设计是成功的。实践证明,电液集成块可以取代传统的液压阀。

从 1990~1993 年做了如下应用性试验:

在实验室中,用电液集成块改装了一台 CG6125 手动液压车床。该车床的小刀架是由液压马达驱动,大刀架是由液压缸驱动。经测试大小刀架的定位精度列于表 1-1 中。表中的数据是在控制

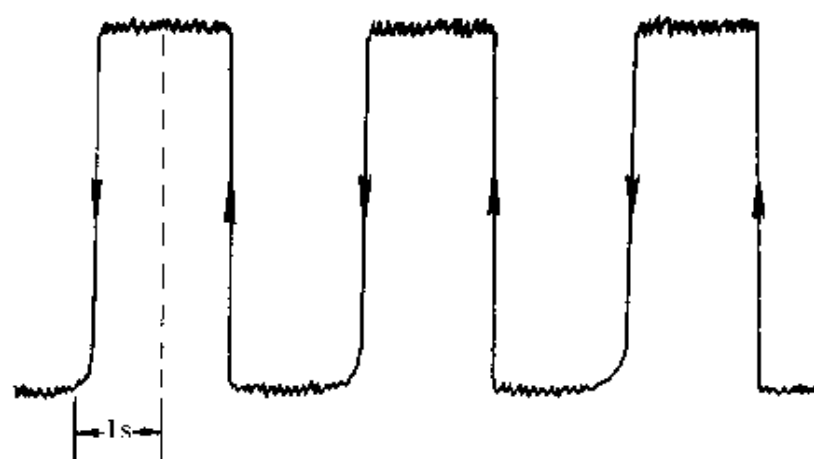


图 1-20

测试日期: 1990. 1. 5; 编号: 电液管 17-2; 液阻 R_{ep} 孔径: 0.5mm;
 $U_a = 15V$; $U_b = 0$; $P_{co} = 3MPa$ 。

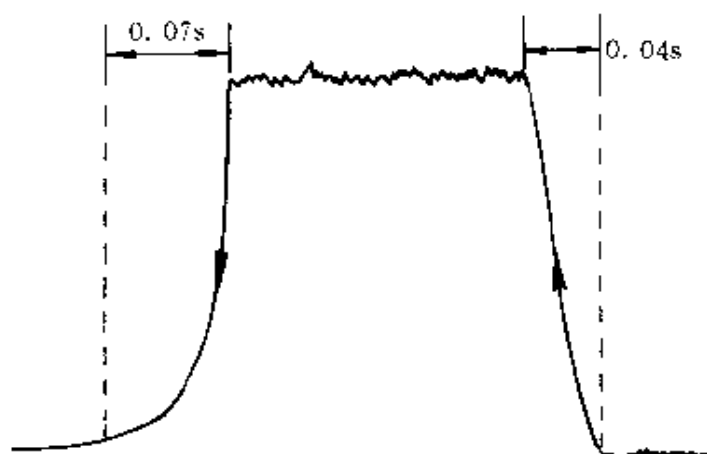


图 1-21

测试日期: 1990. 1. 5; 编号: 电液管 17-2; 液阻 R_{ep} 孔径: 0.5mm;
 $U_a(+)=15V$; $U_b(+)=20V$; $P_{co}=3MPa$ 。

程序中无消除前冲量程序的情况下获得的, 因此其前冲量较大, 定位偏差也就较大。加入消除前冲量程序后, 其定位精度可控制在 0.003mm, 因为位置信号采样仪器是数字显示器, 其本身精度为 0.002mm。图 1-24 为大、小刀架在各工位处的滞后时间和响应时间, 其值为:

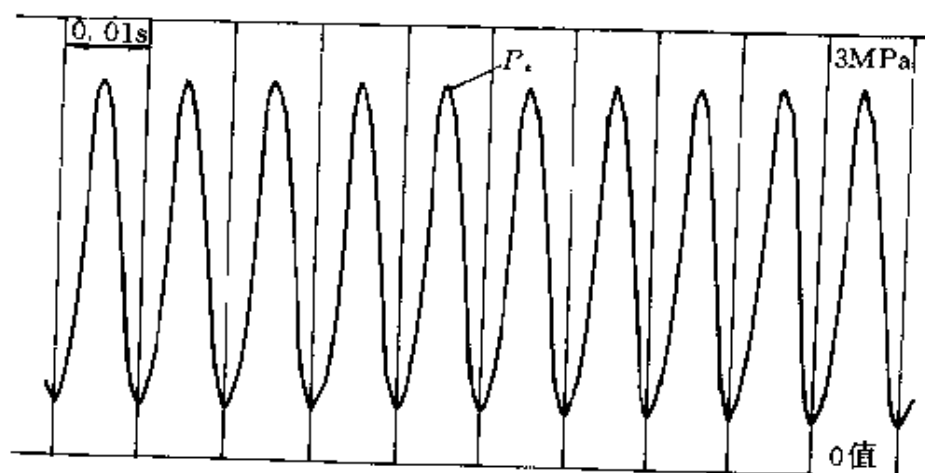


图 1-22

测试日期:1990.12.16;编号:电液管14-2;液阻 R_{ep} 孔径:0.4mm; $P_s = 3\text{MPa}$ 。

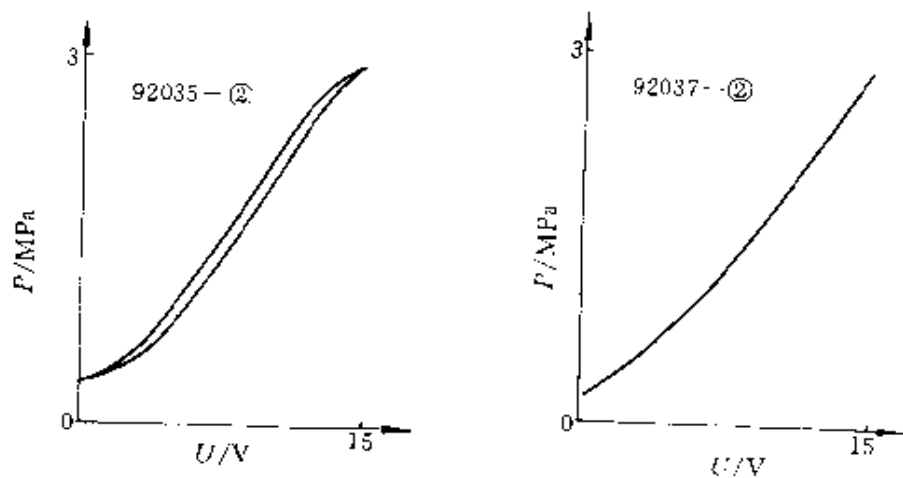


图 1-23

表 1-1

	动作	定位前冲量平均值/mm	定位偏差范围/mm
小刀架	快进	0.115	0.020
	慢进	0.003	0.002
	快退	0.120	0.200
	慢退	0.003	0.002
大刀架	快进	6.3	0.4
	慢进	0.010	0.015
	快退	7.4	0.5
	慢退	0.022	0.015

注:大刀架快速为 330mm/min,慢速为 3mm/min;小刀架快速为 6mm/min,慢速为 2mm/min。

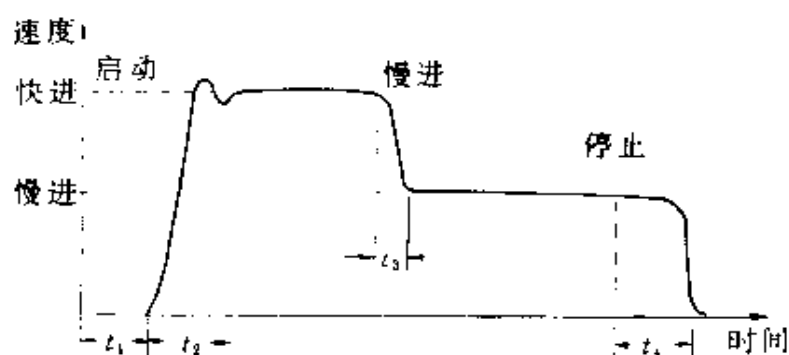


图 1-24

小刀架: $t_1 = 0.6\text{s}$, $t_2 = 0.1\text{s}$, $t_3 = 0.06\text{s}$, $t_4 = 0.3\text{s}$ 。

大刀架: $t_1 = 0.5\text{s}$, $t_2 = 0.25\text{s}$, $t_3 = 0.09\text{s}$, $t_4 = 0.35\text{s}$ 。

控制该车床的 CPU 电路是自制的, CPU 芯片为 Z80, 做到了编一个程序车一个零件, 零件的形状如图 1-25 所示。



图 1-25

武汉工业大学机械系用电液集成块构成了液压变速器, 在该液压变速器的研究论文中指出: 采用电液集成块这一新型电液集成元件组成的液压变速器, 即电液集成变量泵—定量电动机速度控制系统, 具有设计新颖、调速范围大、系统效率高、速度控制精确、动态性能好、换向灵敏、系统造价低等优点。

在湖北拖拉机厂用电液集成块改装了在线工作的一台传动箱体双面钻孔专机, 做在线试验, 加工了 3000 多个箱体。厂方在应用实践的总结报告中指出, 电液集成块有如下优点: 可编程控制操作方便, 工作温度范围宽, 维修方便, 费用低廉, 噪声小。

湖北省科委重点项目“电液集成块系统在磨床上的应用”通过了省级鉴定。经专家评定的鉴定意见指出: 电液集成块液压系统具有结构紧凑、原理新颖、通用性强、适应计算机控制等优点。用电液集成块改造的 MG1432 外圆磨床, 不仅具有当前一般经济型数控机床的优点, 而且具有液压驱动功率大, 运动平稳、精度高、操作方

便等特点,它是一种新型的机电液一体化机械加工设备。改造后的磨床,达到了高精度机床的精度要求,定位精度可达 $1\mu\text{m}$ 。

电液集成块液压技术已趋成熟,电液集成块及其系统作为商品已可在市场上购到。

第2章 电液集成块

2.1 电液集成块的组成

电液集成块是由 2 个电液管和 4 个液管封装在一个直径为 125mm、高 35mm 的圆柱形块内而构成。电液管和液管的油口全部在电液集成块的一个面上,此面称为有效面,另一面称为非有效面。

图 2-1 为电液集成块有效面的结构图。图中孔 5、8、11、14、

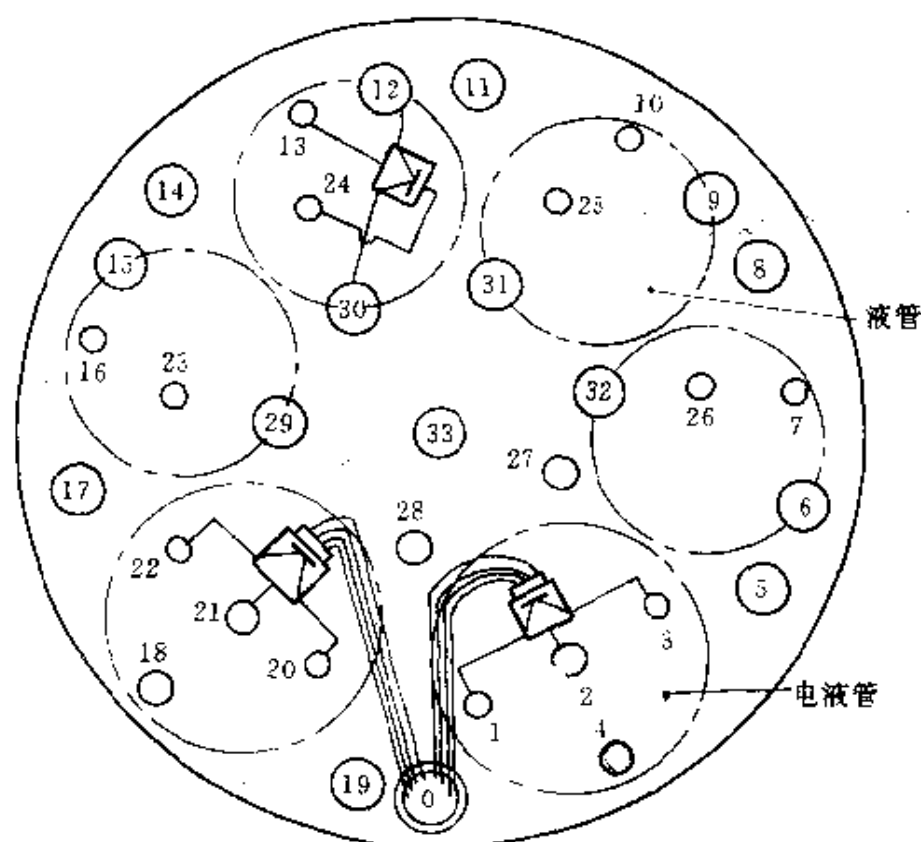


图 2-1

17、19、27、28、33 都为穿通电液集成块的通孔,称为通道,除了 27 和 28 号通道的通径是 5mm 外,其余通道的通径都为 10mm,这些通道是作为块与块之间的连接油路用的。0(零)号孔也是通孔,其孔径为 10mm,作走引线用,电液管的引线就从此孔中引出。0 号孔的两端(在有效面和非有效面上)各有一个沉孔,孔径为 12mm,孔深为 5mm,沉孔是作为电液集成块叠加在一起时的定位孔。孔 6 和 32、9 和 31、12 和 30、15 和 29 为液管的进出油口,它们可以互换,通径为 10mm。孔 7 和 26、10 和 25、13 和 24、16 和 23 是液管的控制油口,它们是不可互换的,其中孔 7、10、13 和 16 是液管的 c 端(反控孔),孔 26、25、24 和 23 是液管的 h 端(正控孔)。孔 1 和 3、20 和 22 是电液管的进出油口,通径为 3mm,可互换。孔 4、18、19 和 0 号孔在块的内部是相通的,孔 4 和 18 是电液管的泄油口,孔 19 只能作为块的泄油通道,直接同油箱相通。孔 2 和 21 也是电液管的泄油孔,2 和 4、21 和 18 孔必须在块的外部加以连通。在电液集成块的非有效面上(图 2-2),除了有通道外,还有两个电液管的电液转换系数调节螺钉,在出厂时调节螺钉被胶固在最佳位置。

液管是一个液压放大元件,它的额定工作压力为 30MPa,额定工作流量为 40L/min。当大于 60L/min 时,要加设功放块。液管的截止流量,在 5MPa 压差下,为 1mL/min。电液管是一个电液转换元件,它通常工作在 5MPa 以下,在此压差下,其最大流量为 1500mL/min,截止流量小于 10mL/min。

规定,在本书的讨论中,流量的单位为 L/min,压力的单位为 MPa,液阻孔径的单位为 mm。

2.1.1 液管

液管是一个液压放大元件,它接受压力信号的控制,它输出的是流量。对液管的实验结果表明,液管的输出流量正比于输出端压力差的平方根,如图 2-3 所示;液管的输出流量正比于输入压力控制信号 P_v ,这个实验结果用数学形式表示为:

$$Q_{ov} = K_v P_v \sqrt{P_{ov}} \quad (2-1)$$

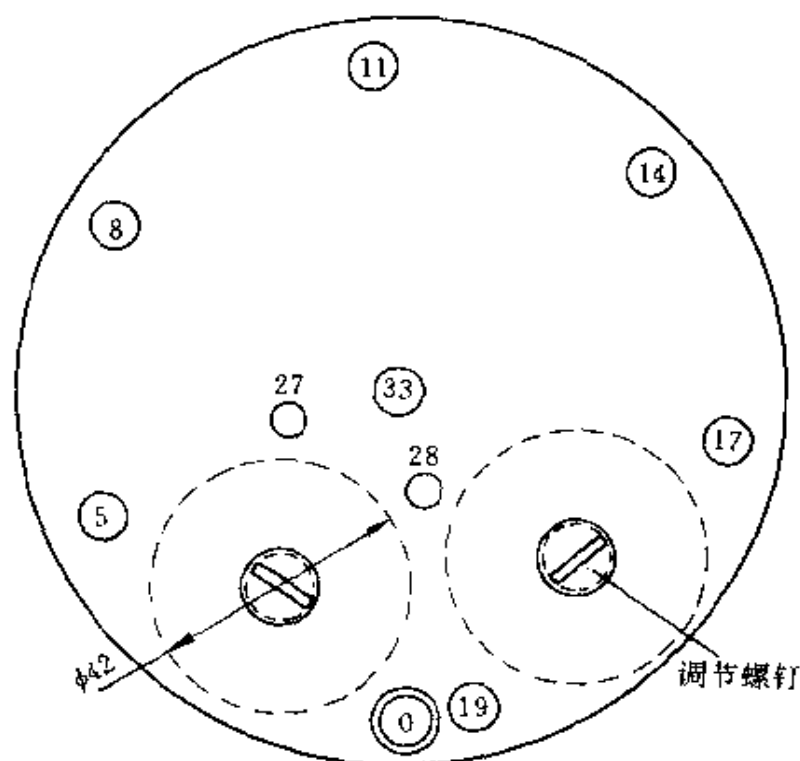


图 2-2

式中 Q_{ov} ——液管的输出流量；

P_{ov} ——液管输出端油口上的压差；

P_{iv} ——液管输入控制压力；

K_v ——比例系数。

当液管 h 端和 e 端的压差 P_{he} 大于某一值 ($P_{iv} = 0.3\text{MPa}$) 时, 液管开始导通, P_{iv} 称为液管的开启压力; 当 P_{he} 大于某一值 ($P_{op} = 0.8\text{MPa}$) 时, 液管的导通程度不再随 P_{he} 的增加而增加, 液管进入饱和状态, P_{op} 称为液管的饱和压力。显然, P_{iv} 的变化范围为:

$$P_{iv} = 0 \sim (P_{op} - P_{iv}) = 0 \sim 0.5\text{MPa} \quad (2-2)$$

当 $P_{iv} = 0.5\text{MPa}$ 时, 这时的 P_{iv} 值称为液管控制压力的饱和值。液管的比例系数 K_v 随 P_{iv} 的变化而变化的实验结果如图 2-4 所示。由图可以看出, 在 $P_{iv} = 0.1 \sim 0.5\text{MPa}$ 的范围内变化时, K_v 值可以近似看作为一个常数, 即

$$K_v \approx 105 \quad (2-3)$$

在 $P_{iv} = 0 \sim 0.1\text{MPa}$ 范围内变化时, K_v 有很大的变化:

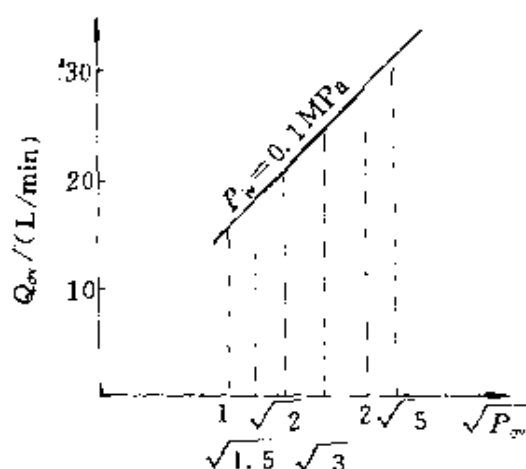


图 2-3

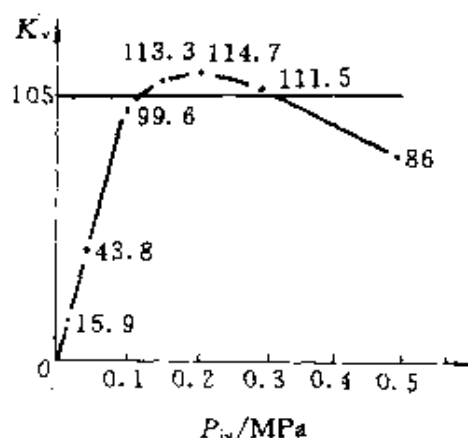


图 2-4

$$K_v = 0 \sim 105 \quad (2-4)$$

液管最大开口的当量孔径为 10mm, 这时液管输入端控制压力为 $P_v = 0.5 \text{ MPa}$; 当控制压力 P_v 为任意值时, 则下式成立:

$$\frac{\pi}{4} \times 10^2 : 0.5 = \frac{\pi}{4} \times d_v^2 : P_v$$

整理后得:

$$P_v = \frac{0.5}{100} d_v^2 = 0.005 d_v^2 \quad (2-5)$$

或

$$d_v = 14.142 \sqrt{P_v} \quad (2-6)$$

式中 d_v —— 液管的当量孔径。

将式(2-5)代入式(2-1)中, 得:

$$Q_{ov} = 0.005 K_v d_v^2 \sqrt{P_{ov}} = K_d d_v^2 \sqrt{P_{ov}} \quad (2-7)$$

$$K_d = 0.005 K_v \quad (2-8)$$

将式(2-3)代入式(2-8)中, 得:

$$K_d = 0.005 K_v = 0.525 \quad (2-9)$$

将式(2-6)用图形来表示, 并考虑到式(2-4), 则液管当量孔径随控制压力 P_v 的变化如图 2-5 所示。由图 2-5 中可以看出, 液管当量孔

径由两部分构成: 直线 $\overline{c0}$ 和弧线 $\widehat{ab}$ 。 $\overline{c0}$ 直线的方程式为

$$d_v = \frac{1.287}{0.063} P_v = 20.429 P_v \quad (d_v < 1.287 \text{ 时}) \quad (2-10)$$

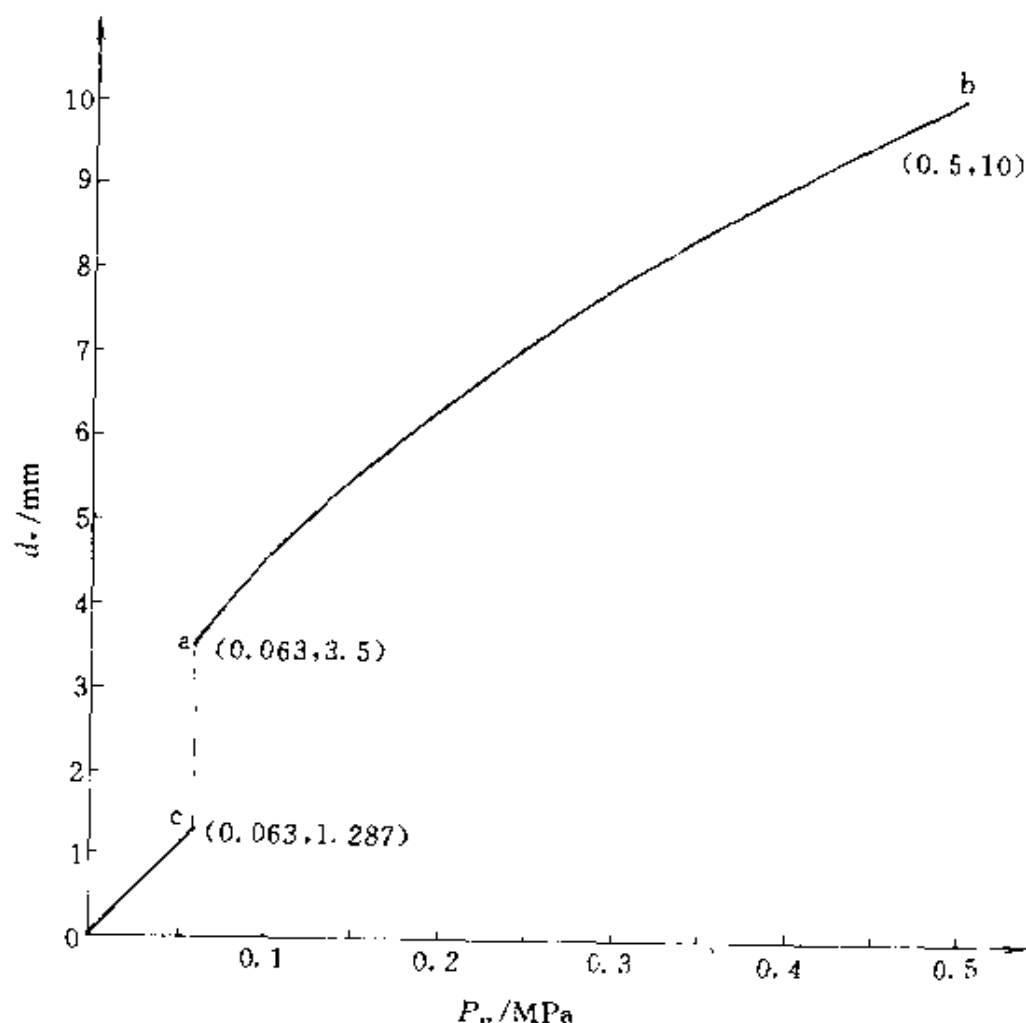


图 2-5

弧线 $\widehat{ab}$ 由式(2-6)表示。

液管的输出阻抗 R_{ov} 为：

$$R_{ov} = \frac{P_{ov}}{Q_{ov}} = \frac{\sqrt{P_{ov}}}{K_d d_v^2} \quad (2.11)$$

$$R_{ov} = \frac{P_{ov}}{Q_{ov}} = \frac{Q_{ov}}{K_d^2 d_v^4} \quad (2.12)$$

在实验中可以看到,当输入控制压力信号的频率增加到一定值后,液管的输出流量 Q_{ov} 随输入压力控制信号频率的增加而减小,这一定值称为液管的固有频率,用 ω_{nv} 表示。图 2-6 中 ω 是输入压力控制信号的频率。频率低于液管固有频率 ω_{nv} 的输入压力控制信号称为低频控制信号;高于液管固有频率 ω_{nv} 的控制信号称为高

频控制信号。液管的输入控制信号可以由低频和高频两种信号叠加而成,即

$$P_{iv} = (P_{iv})_{lw} + (P_{iv})_{hw} \quad (2-13)$$

将式(2-13)代入式(2-1)中,得:

$$\begin{aligned} Q_{ov} &= K_v \sqrt{P_{ov}} P_{iv} \\ &= K_v \sqrt{P_{ov}} [(P_{iv})_{lw} + (P_{iv})_{hw}] \\ &= (Q_{ov})_{lw} + (Q_{ov})_{hw} \end{aligned} \quad (2-14)$$

$$\left. \begin{aligned} (Q_{ov})_{lw} &= K_v \sqrt{P_{ov}} (P_{iv})_{lw} \\ (Q_{ov})_{hw} &= K_v \sqrt{P_{ov}} (P_{iv})_{hw} \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

式中 $(Q_{ov})_{lw}$ ——液管在低频下的输出流量;
 $(P_{iv})_{lw}$ ——液管的低频输入压力控制信号;
 $(Q_{ov})_{hw}$ ——液管在高频下的输出流量;
 $(P_{iv})_{hw}$ ——液管的高频输入压力控制信号。

2.1.2 电液管

电液管是将弱电信号转换成弱液信号的电液转换元件。电液管是常开的,当电液管输入端引线上无电流通过时(失电状态),电液管输出端具有最大输出流量 $Q_{c \max}$ 。当施加于电液管输出端上的压力差为定值时,电液管输出的流量随输入端引线上的输入电流的变化而变化。在电液管的输入端有两组引线:控制线和抖动线,如图 2-7 所示。施加在这两组引线上的电流分别称为控制电流和

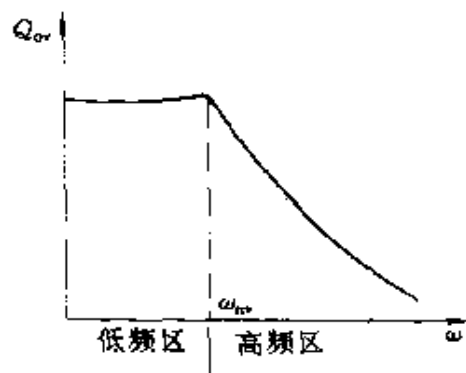


图 2-6

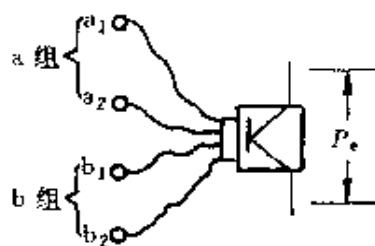


图 2-7

抖动电流,用 I_a 和 I_b 表示。控制引线(或称 a 组线)的两端分别用 a_1 和 a_2 表示;抖动引线(或称 b 组线)的两端分别用 b_1 和 b_2 表示。两组线中的 a_1 和 b_1 、 a_2 和 b_2 称为同名端。所谓同名端是说,在同名端施加电压的极性相同时,两者产生的效果(使通过电液管的流量增加或减小)是一致的。规定以抖动引线上加的电极性为准,当控制引线上加的电极性与抖动引线上加的极性相同时,称为正向加电,用带括号的“+”号表示,即 $I_a(+)$;当控制引线上加的电极性与抖动引线加上的极性相反时,称为反向加电,用带括号的“-”号表示,即 $I_a(-)$ 。由于抖动电流的作用,使电液管的输入输出特性曲线的性能得到很大改善,实验的结果如图 2-8 所示。由图中可以看出,加抖动电流后,电液管的输入输出特性曲线的线性度和滞后都得到了很大的改善。

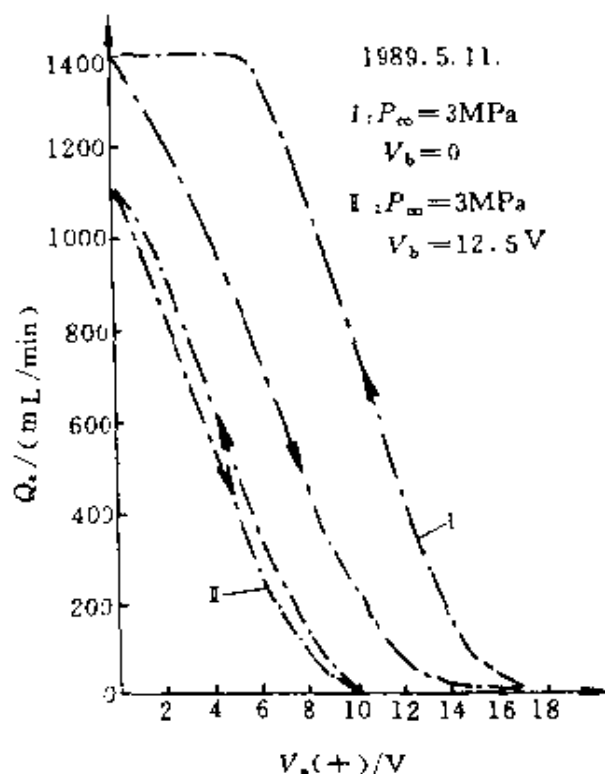


图 2-8

当 $I_a = 0$ 时,电液管的工作状态称为零点工作状态。在零点工作状态,通过电液管的流量为 Q_0 ,称为电液管的零点工作流量,这时在 I_a-Q_e 坐标中的点,称为电液管的零点工作点。也就是说,在电

液管的零点工作点处,控制电流为零,其流量由抖动电流确定之。

电液管的工作状态有三种情况:

(1)正向加电。零点工作点设在最大工作流量处,电液管的工作流量 Q_e 随着控制电流 I_a 的增加而减小。两组引线上的加电状态为正向加电, $I_a \neq 0$ 。这时,电液管输入输出特性 $I_a(+)-Q_e$ (控制电信号和通过电液管流量的关系)如图 2-9 所示。

(2)反向加电。零点工作点设在最小工作流量处,电液管的工作流量 Q_e 随控制电流 I_a 的增加而增加。两组引线上的加电状态为反向加电, $I_a(-) \neq 0$,其输入输出特性曲线如图 2-10 所示。

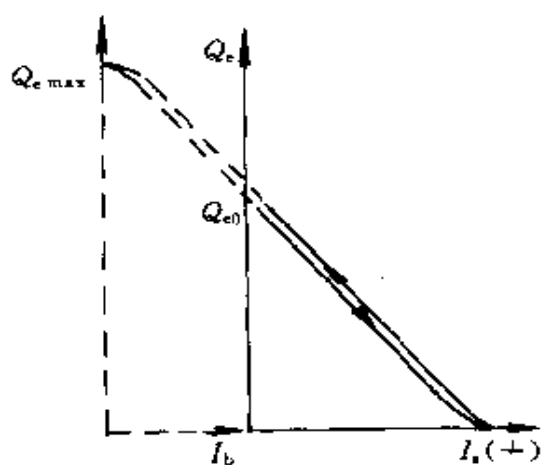


图 2-9

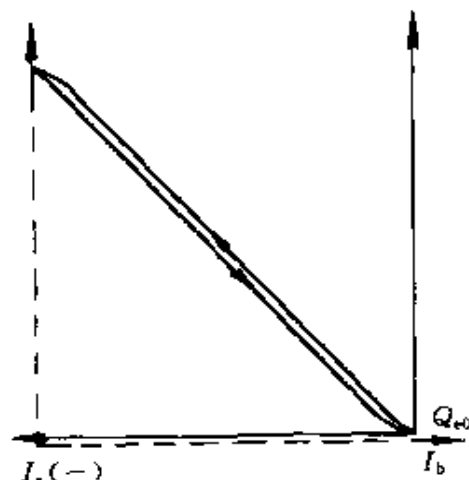


图 2-10

(3)联合加电。零点工作点设在中间,通过电液管的流量随控制线上正向加电的增加而减小,随反向加电的增加而增加。两组引线上的加电状态为 $I_a(\pm) \neq 0$,正向加电和反向加电联合使用,称为联合加电,其输入输出特性曲线如图 2-11 所示。这些加电状态可用图 2-12 所示符号来表示。一般情况下抖动电流是必须加的,因此图中就不必表示出来。在本书中,都采用正向加电,为简便起见, $I_a(+)$ 在后面的图中将不再标出。

用实验测试获得的电液管最大流量 $Q_{e,max}$ 值,用图 2-13 中的点划线 I 表示,图中的实线 II 为薄壁小孔的理论值。从图 2-13 中可以看出,实验和理论值很接近,因此可以近似把电液管的输出端的通油口看作为一个可变的薄壁小孔液阻,该液阻的孔径值称为电

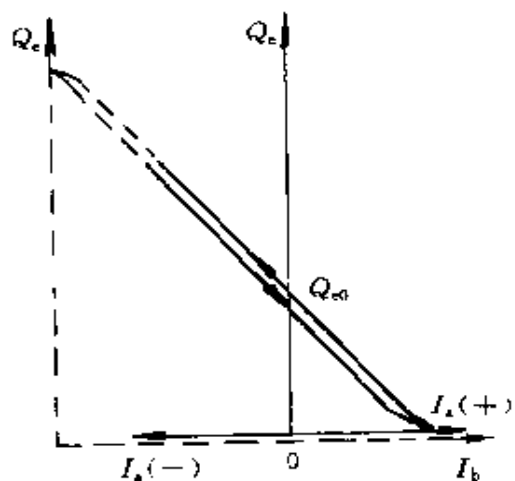


图 2-11

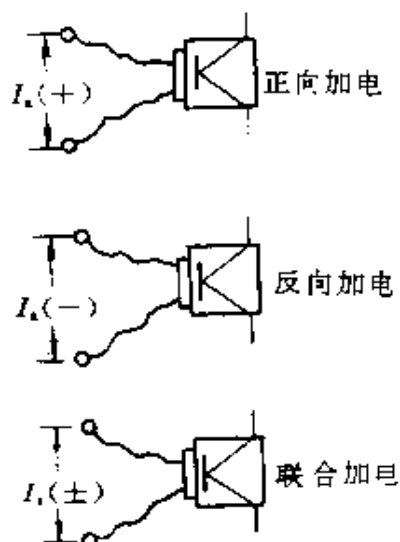


图 2-12

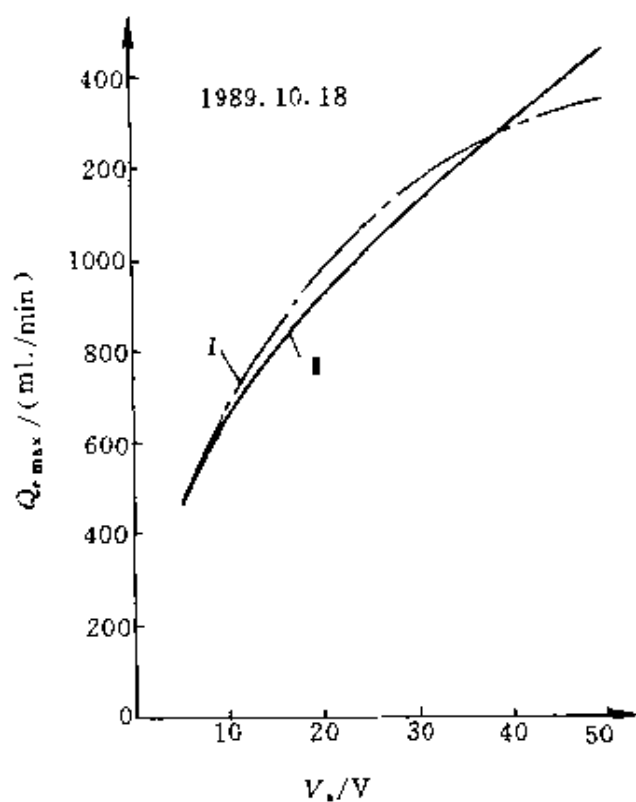


图 2-13

液管的当量孔径。电液管的当量孔径是指电液管通油口的通流面积用圆形面积表示时的圆形面积的直径,用 d_e 表示。电液管输出端流量压力公式可用如下数学公式表示:

$$Q_e = K_{et} d_e^2 \sqrt{P_e} \quad (2-16)$$

式中 Q_e ——电液管的输出流量；

P_e ——电液管输出端的压力差；

K_{et} ——电液管当量孔径流量系数；

d_e ——电液管通油口的当量孔径。

电液管当量孔径的变化范围为：

$$d_e = 0.05 \sim 0.7 \text{mm} \quad (2-17)$$

电液管的当量孔径 d_e 随控制电流(电压)的变化,可用如下公式表示：

$$d_e = \sqrt{d_{e0}^2 - K_{et} I_a} = \sqrt{d_{e0}^2 - K_{ev} U_a \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{ne}} \right)} \quad (2-18)$$

式中 K_{et} ——系数；

K_{ev} ——系数；

d_{e0} ——零点的当量孔径。

将式(2-18)代入式(2-16)中,得：

$$\begin{aligned} Q_e &= -K_{et} K_{ev} U_a \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{ne}} \right) \sqrt{P_e} + K_{et} d_{e0}^2 \sqrt{P_e} \\ &= K_e U_a \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{ne}} \right) \sqrt{P_e} + Q_{e0} \end{aligned} \quad (2-19)$$

式中 Q_{e0} ——电液管的零点工作流量；

U_a ——加在控制线 a-a 上的电压, $U_a = 0 \sim 15\text{V}$, 这时的电流为 $I_a = 0 \sim 200\text{mA}$ 。

K_e ——电液管的电液转换系数。当正向加电时, K_e 为负值, 即通过电液管的流量 Q_e 随控制电压 $U_a(+)$ 的增加而减少；当反向加电时, K_e 为正值, 即通过电液管的流量 Q_e 随控制电压 $U_a(-)$ 的增加而增加；当联合加电时, 控制电压的正半周 $U_a(+)$, K_e 为负值, 负半周 $U_a(-)$, K_e 为正值；

ω_{ne} ——电液管的固有频率；

ω ——输入电信号的频率；

$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{nc}}\right)$ ——电液管的频函数,可由实验确定之。

当 $\omega < \omega_{nc}$ 时, $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{nc}}\right) \approx 1$, 则式(2-19)为:

$$Q_c = K_c U_a \sqrt{P_c} + Q_{c0} \quad (2-20)$$

2.2 电液转换液路

电液管只能将电流转换成流量,而液管只能接受压力的控制,因此必须将电液管输出的流量转换成压力,去控制液管动作。将流量转换成压力可通过液阻来进行,由电液管、液阻组成的将电信号转换成压力信号的液路,称为电液转换液路。电液转换液路的含义,除了将 CPU 电路输出的弱电控制信号转换成弱液信号外,还包括有满足对液管控制的要求。

在电液集成块液路中,最常遇到的液阻是薄壁小孔液阻,其结构如图 1-1 所示。

2.2.1 液阻的串并联

通过液阻的流量与液阻上的压降有如下关系存在:

$$Q = K d^2 \sqrt{P} \quad (2-21)$$

式中 Q ——通过液阻的流量;

d ——液阻的孔径;

P ——液阻上的压降;

K ——液阻的流量系数。

液阻的阻值 R 为:

$$R = \frac{P}{Q} = \frac{P}{K d^2 \sqrt{P}} = \frac{1}{K d^2} \sqrt{P} \quad (2-22)$$

或

$$R = \frac{P}{Q} = \frac{Q^2}{Q K^2 d^4} = \frac{1}{K^2 d^4} Q \quad (2-23)$$

在液路的设计中,经常遇到用液阻的串并联来进行分压。如图 2-14 所示,两串联液阻的等效液阻阻值 R_{1+2} 为:

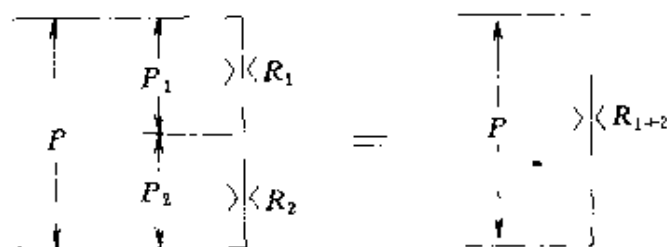


图 2-14

$$R_{1+2} = R_1 + R_2 \quad (2-24)$$

将式(2-23)代入式(2-24)中,则有:

$$\frac{Q}{K^2 d_{1+2}^4} = \frac{Q}{K^2 d_1^4} + \frac{Q}{K^2 d_2^4} = \frac{Q}{K^2} \left(\frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4} \right)$$

或

$$\frac{1}{d_{1+2}^4} = \frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4}$$

即

$$\begin{aligned} d_{1+2} &= \left[\frac{(d_1 d_2)^4}{d_1^4 + d_2^4} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{1}{1 + (d_2/d_1)^4} \right]^{\frac{1}{4}} d_2 \\ &= \left[\frac{1}{1 + (d_1/d_2)^4} \right]^{\frac{1}{4}} d_1 \end{aligned} \quad (2-25)$$

式中 d_{1+2} ——液阻 R_1 和 R_2 串联后的等效液阻孔径。

设

$$\left. \begin{aligned} \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \\ \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4} \end{aligned} \right\} \quad (2-26)$$

将式(2-26)代入式(2-25)中,得:

$$d_{1+2} = \left[\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \right]^{\frac{1}{4}} d_2 = \left[\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \right]^{\frac{1}{4}} d_1 \quad (2-27)$$

用串联液阻进行分压时,通过两液阻的流量是相等的,如图2-14所示,则有:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1 Q}{R_2 Q} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2-28)$$

将式(2-23)代入式(2-28),得:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{d_2^4}{d_1^4} \quad (2-29)$$

又

$$\frac{P_1}{P_2} + 1 = \frac{d_2^4}{d_1^4} + 1$$

整理后得:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4} P = \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) P \quad (2-30)$$

$$P_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} P = \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) P \quad (2-31)$$

两个液阻 R_1 和 R_2 并联,如图 2-15 所示,它的等效液阻为 $R_{1//2}$,则有:

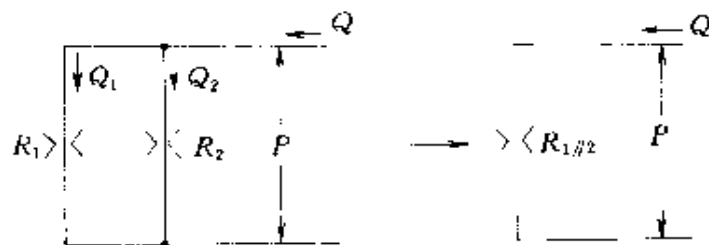


图 2-15

$$\frac{1}{R_{1//2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2-32)$$

将式(2-22)代入式(2-32)中,得:

$$\frac{K d_{1//2}^2}{\sqrt{P}} = \frac{K d_1^2}{\sqrt{P}} + \frac{K d_2^2}{\sqrt{P}}$$

则有:

$$d_{1//2}^2 = d_1^2 + d_2^2$$

或

$$d_{1//2} = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (2-33)$$

2.2.2 电液转换液路的实现

要将通过电液管的流量变成压力是通过电液转换液路中的液阻 R_{ep} 实现的,如图 2-16 所示。CPU 电路输出的弱电控制信号 U_e 输

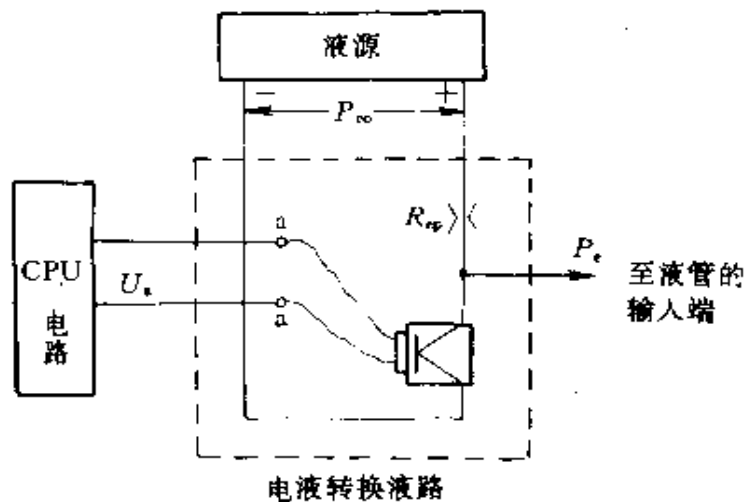


图 2-16

到电液转换液路中的电液管输入端,电液转换液路就输出一个压力信号 P_e ,用此压力去控制液管,从而实现 CPU 电路对液路的控制。用数学式表示这种输入和输出的关系有:

$$P_e(t) = K_{en} U_e(t) \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{ne}} \right) \quad (2-34)$$

式中 K_{en} ——电液转换液路的电液转换系数。

将图 2-16 中的电液管通油口处液阻用 R_e 来表示, R_e 的当量孔径为 d_e ,则图 2-16 可改为图 2-17 所示。由式(2-31)得:

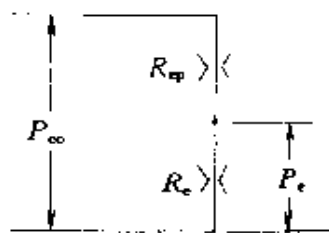


图 2-17

$$P_e = \phi \left(\frac{d_e}{d_{ep}} \right) P_{\infty} \quad (2-35)$$

式中

$$\phi \left(\frac{d_e}{d_{ep}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_e}{d_{ep}} \right)^4}$$

写成一般形式,有:

$$\phi(x) = \frac{1}{1+x^4} \quad (2-36)$$

式中 x ——分压液阻孔径的比值,简称孔径比;

$\phi(x)$ ——电液转换液路的输出比函数,简称比函数。

于是式(2-35)写成一般形式,有:

$$P_s = \phi(x)P_{co} \quad (2-37)$$

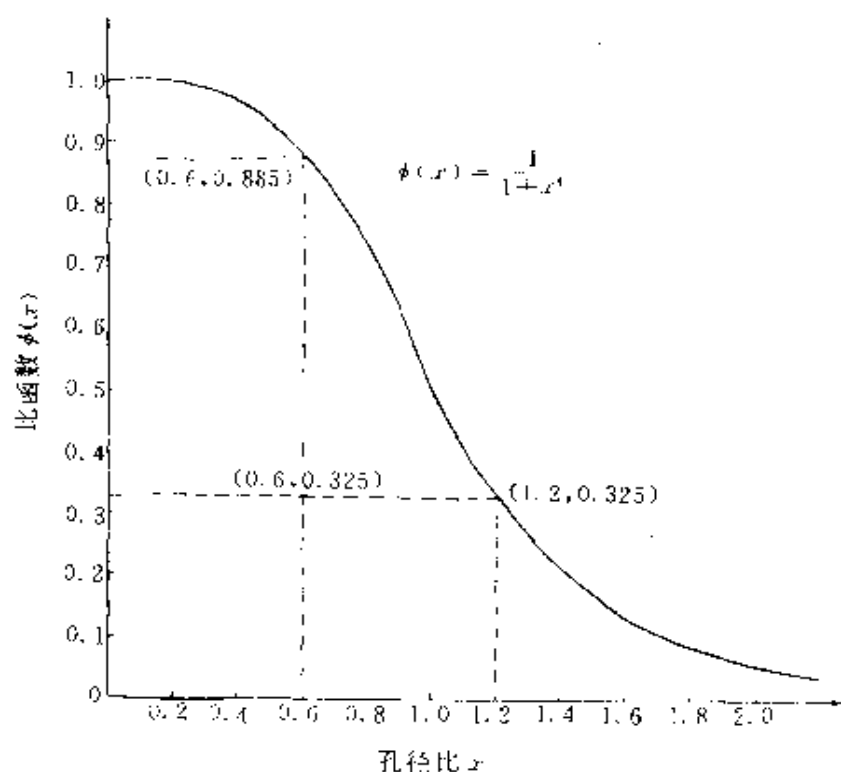


图 2-18

比函数用图形表示,如图 2-18 所示。由图 2-18 可以看出, $\phi(x)$ 在如下范围内变化时,

$$0.325 \leq \phi(x) \leq 0.885 \quad (2-38)$$

比函数 $\phi(x)$ 基本上为一线性函数,也就是说,在这区域内,电液转换液路的输入和输出呈线性关系。

已知比函数的值为 y ,可求孔径比。这种运算用如下符号表示:

$$x = \phi^{-1}(y) \quad (2-39)$$

将式(2-38)代入式(2-39)中,由图 2-18 查得线性区域的孔径比为:

$$x = \phi^{-1}(0.325 \sim 0.885) = 1.2 \sim 0.6$$

图 2-18 中,曲线上的点(0.6,0.885)至点(1.2,0.325)之间的曲线近似为一条直线,该直线的方程式由下式求得:

$$\frac{\phi(x) - 0.325}{x - 1.2} = \frac{0.885 - 0.325}{0.6 - 1.2} = -0.933$$

整理后,得:

$$\phi(x) = -0.933(x - 1.2) + 0.325 = -0.933x + 1.445 \quad (2-40)$$

图 2-19 为电液转换液路的输入输出特性曲线。在满足式(2-38)的条件下,相应于 d_{ep} 不同值的电液管的当量孔径 d_e 值列于表 2-1 中。例如在表 2-1 中,取 $d_{ep} = 0.3\text{mm}$ 时,则满足式(2-38)条件的相应的电液管当量孔径 $d_e = 0.18 \sim 0.36\text{mm}$ 。

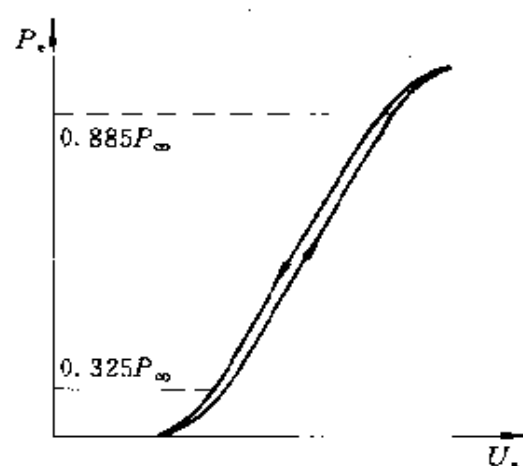


图 2-19

表 2-1

d_{ep}/mm	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
d_e/mm	0.06	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
	~	~	~	~	~	~	~	~
	0.12	0.24	0.3	0.36	0.42	0.48	0.54	0.6

2.2.3 信息利用率

在前面说过,电液转换液路不仅仅完成电液的转换,还要满足某些对液管控制的要求。信息利用率 η 是液管的饱和压力 P_{op} 减去液管的开启压力 P_{kv} 之后除以液管控制压力 P_{iv} 的变化值,用公式表示为:

$$\eta = \frac{P_{op} - P_{kv}}{P_{c \max} - P_{c \min}} \quad (2-41)$$

当 $\eta > 1$ 时,称为弱控制; $\eta < 1$ 时,称为强控制。信息利用率的理论最佳值为 $\eta = 1$, 这时有:

$$P_{c \max} = P_{op}, P_{c \min} = P_{kv} \quad (2-42)$$

为了确保液管控制的可靠性,往往使 $P_{c \max}$ 稍大于 P_{op} , $P_{c \min}$ 稍小于 P_{kv} , 于是有:

$$P_{c \max} = a_x P_{op}, P_{c \min} = a_n P_{kv} \quad (2-43)$$

式(2-43)中的 a_x 和 a_n 的取值,应考虑到各电液管之间参数的误差,一般取

$$a_x = 1.3, a_n = 0.8 \quad (2-44)$$

将式(2-43)和式(2-44)代入式(2-41),得

$$\eta = \frac{P_{op} - P_{kv}}{P_{c \max} - P_{c \min}} = \frac{1 - (P_{kv}/P_{op})}{1.3 - 0.8(P_{kv}/P_{op})} \quad (2-45)$$

而

$$\frac{P_{kv}}{P_{op}} = \frac{3}{8} = 0.375 \quad (2-46)$$

将式(2-46)代入式(2-45),得:

$$\eta = \frac{1 - 0.375}{1.3 - 0.8 \times 0.375} = 0.625 \quad (2-47)$$

如果取 η 为黄金分割最佳值,即 $\eta = 0.618$, 则应取 $a_x = 1.31$ 。在设计电液转换液路时,必须考虑到信息利用的合理性。

图 2-16 所示的电液转换液路,要求其比函数 $\phi(x)$ 满足式(2-38),即输入和输出之间的关系呈线性关系,则其输入输出特性曲线为图 2-20 所示。从图 2-20 可看出图 2-16 所示电液转换液路的

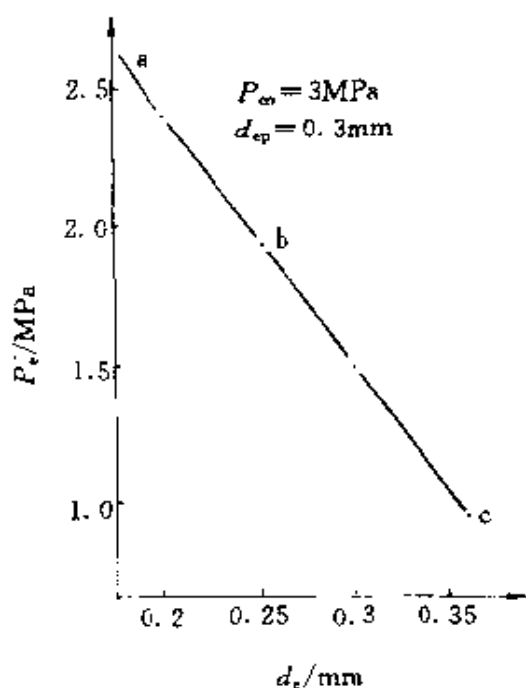


图 2-20

输出压力信号 P_e 为:

$$P_e = 0.98 \sim 2.66 \text{ MPa}$$

如果用它来作为液管的控制信号,则其信息利用率为:

$$\eta = \frac{P_{op} - P_{kv}}{P_{e \max} - P_{e \min}} = \frac{0.5}{2.66 - 0.98} = 0.298 \quad (2-18)$$

这样的信息利用率太低了。为了提高电液转换液路输出信息的信息利用率,必须从电液转换液路的结构和参数来调整其输出信息的信息利用率。

图 2-21 所示的电液转换液路是用来调整图 2-16 所示电液转换液路输入输出特性曲线(图 2-20)低值段(bc 段)的特性。电液管和液阻 R_2 并联组成的等效液阻用 $R_{2//}$ 表示,其当量孔径为:

$$d_{2//} = \sqrt{d_2^2 + d_e^2}$$

$d_{2//}$ 随 d_e 的变化如图 2-22 所示。随着 d_e 的变化,电液转换液路(图 2-21)输出压力 P_e 的变化如图 2-23 所示。由图 2-23 可以看出,图 2-21 所示的电液转换液路的输出压力 P_e 为:

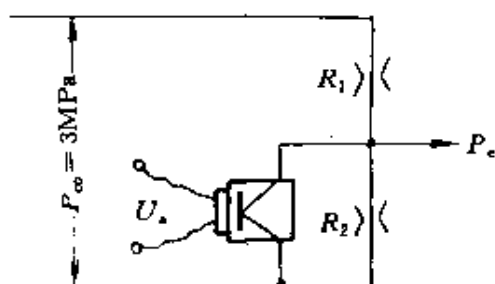


图 2-21

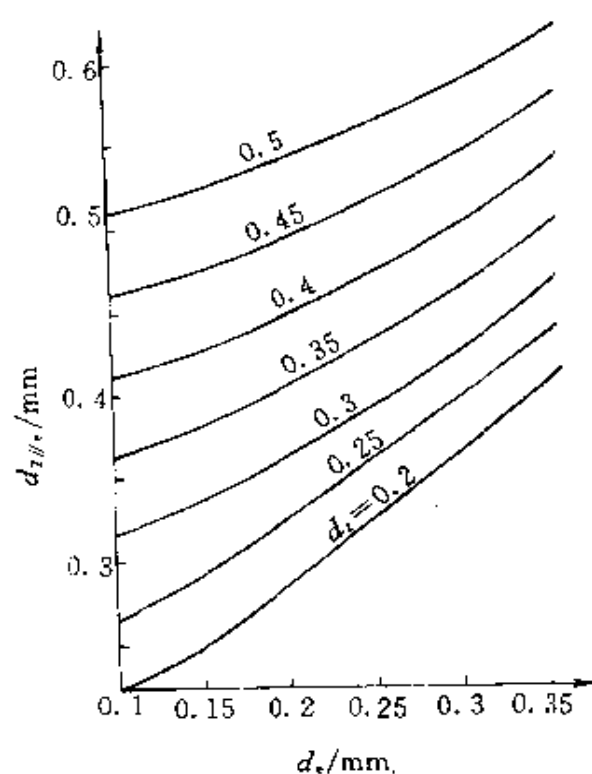


图 2-22

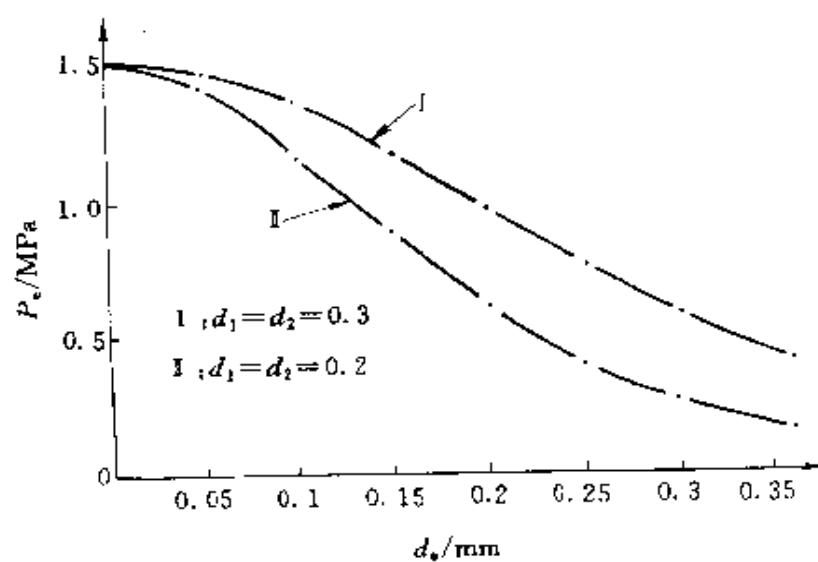


图 2-23

$$P_e = 0.4 \sim 1.5 \text{ MPa} \quad (2-49)$$

其信息利用率为:

$$\eta = \frac{0.5}{1.5 - 0.4} = 0.455 \quad (2-50)$$

图 2-24 所示的电液转换液路是用来调整图 2-16 所示电液转换液路输入输出特性曲线(图 2-20)高值段(ab 段)的特性。电液管和液阻 R_1 并联组成的等效液阻用 $R_{1\text{等}}$ 表示。当 d_e 的变化范围为 $d_e = 0 \sim 0.36\text{mm}$ 时,电液转换液路(图

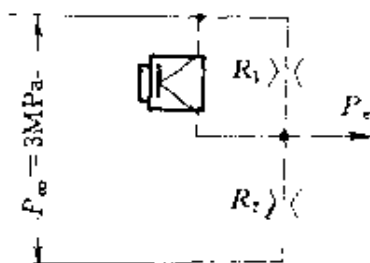


图 2-24

2-24)输出压力 P_e 的变化如图 2-25 所示。由图 2-25 可看出,图

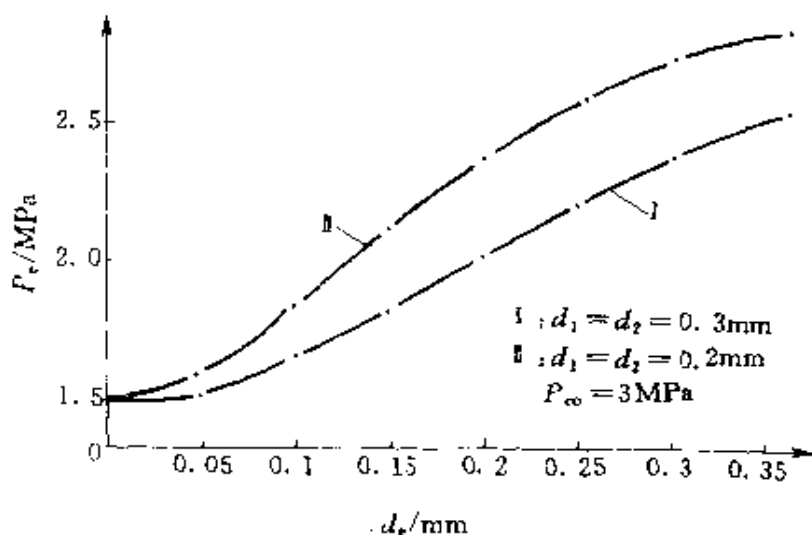


图 2-25

2-24所示的电液转换液路的输出压力为:

$$P_e = 1.5 \sim 2.55 \text{ MPa} \quad (2-51)$$

其信息利用率为

$$\eta = \frac{0.5}{2.55 - 1.5} = 0.476 \quad (2-52)$$

图 2-26 所示的电液转换液路是用来调整图 2-16 所示电液转换液路输入输出特性曲线中值段(b 点附近)的特性。若希望在 $1 \sim 1.8\text{MPa}$ 的范围内对 P_e 值进行调整,当 $P_{e\text{min}} = 1\text{MPa}$ 时,电液管的当量孔径有最大值($d_e = 0.7$),这时的比函数为:

$$\phi(x) = \frac{P_{e\text{min}}}{P_{e0}} = \frac{1}{3} = 0.333 \quad (2-53)$$

当 $P_{e\max} = 1.8\text{MPa}$ 时, 电液管当量孔径有最小值 ($d_e = 0$), 这时的比函数为:

$$\phi(x) = \frac{P_{e\max}}{P_{uo}} = \frac{1.8}{3} = 0.6 \quad (2-54)$$

这两个比函数值处的孔径比 (x) 由图 2.18 查得为:

$$x_{\max} = \phi^{-1}(0.333) = 1.195 \quad (2-55)$$

$$x_{\min} = \phi^{-1}(0.6) = 0.9 \quad (2-56)$$

用 d_{2+3} 表示由液阻 R_2 和 R_3 串联组成的液阻 R_{2+3} ($=R_2+R_3$) 的当量孔径。由式(2-27)可得:

$$d_{2+3} = \left[\phi \left(\frac{d_3}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} d_3 \quad (2-57)$$

当 $\phi(x) = 0.6$ 时, 参照式(2-56)可得:

$$x_{\min} = \frac{d_{2+3}}{d_1} = 0.9$$

或

$$d_{2+3} = 0.9d_1 \quad (2-58)$$

将式(2-57)代入式(2-58), 得:

$$\left[\phi \left(\frac{d_3}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} d_3 = 0.9d_1$$

或

$$\phi \left(\frac{d_3}{d_2} \right) = \left(0.9 \frac{d_1}{d_3} \right)^3 \quad (2-59)$$

当 $\phi(x) = 0.333$ 时, 参照式(2-55), 则有:

$$x_{\max} = \frac{d_3}{d_1} = 1.195 \quad (2-60)$$

将式(2-60)代入式(2-59)中, 得:

$$\phi \left(\frac{d_3}{d_2} \right) = \left(\frac{0.9}{1.195} \right)^3 = 0.322 \quad (2-61)$$

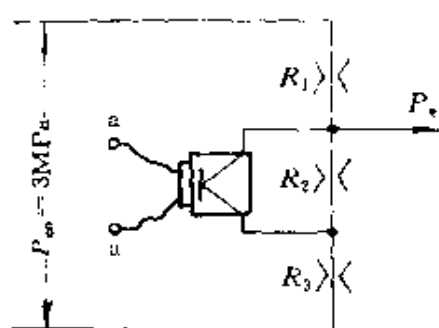


图 2-26

由图 2-18 查得:

$$\frac{d_3}{d_2} = \phi^{-1}(0.322) = 1.205 \quad (2-62)$$

取 $d_1 = 0.25$, 则由式 (2-60) 得:

$$d_3 = 1.195d_1 = 1.195 \times 0.25 \approx 0.3 \quad (2-63)$$

将式 (2-63) 代入式 (2-62), 得:

$$d_2 = \frac{d_3}{1.205} = \frac{0.3}{1.205} \approx 0.25 \quad (2-64)$$

由计算得图 2-26 所示电液转换液路输出的控制压力 P_c 随 d_e 的变化如图 2-27 所示。当电液管当量孔径的变化范围为:

$$d_e = 0 \sim 0.6 \quad (2-65)$$

时, 则

$$P_c = 1.8 \sim 1.0 \quad (2-66)$$

其信息利用率为:

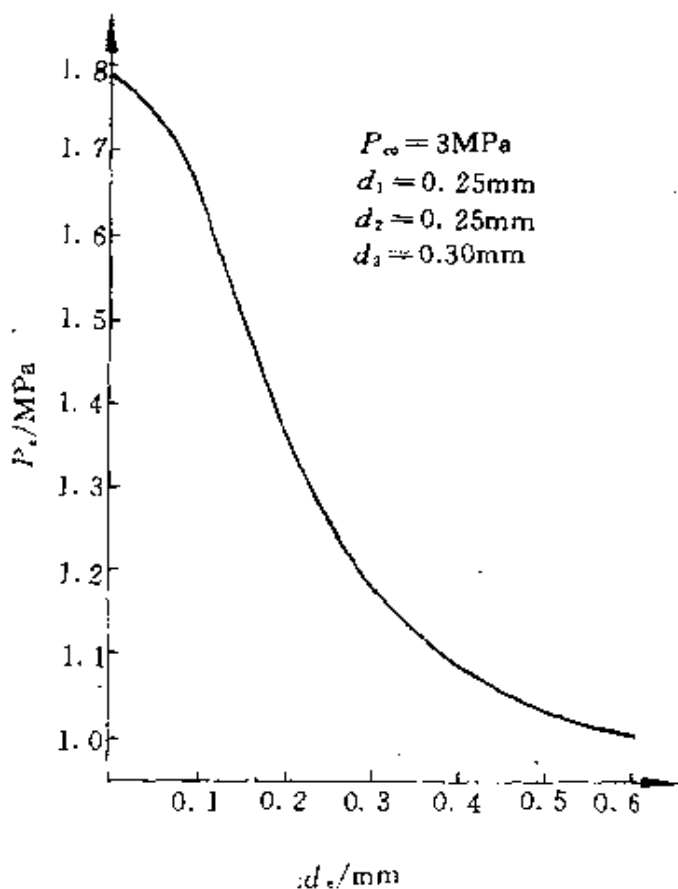


图 2-27

$$\eta = \frac{0.5}{1.8 - 1.0} = 0.625 \quad (2-67)$$

将上述一组值列于表 2-2 中。

表 2-2

d_1	d_2	d_3	$P_{e \min}$	$P_{e \max}$	η
0.25	0.25	0.30	1.0	1.8	0.625

由上述可知,通过电液管和液阻的串并联连接,可使电液转换液路输入输出特性曲线的某一区段性能得到调整。现将图 2-16、图 2-21、图 2-24 和图 2-26 所示电液转换液路的输出压力和信息利用率列于表 2-3,以资比较。

表 2-3

	图 2-16	图 2-21	图 2-24	图 2-26
$P_{e \max}$	2.66	1.5	2.55	1.8
$P_{e \min}$	0.98	0.40	1.50	1.0
η	0.298	0.455	0.476	0.625

2.3 液管的控制

液管的工作状态如图 2-28 所示。要求液管输出的低频流量为 $[Q_{ov}]$,称为设定值。要使液管的输出流量达到设定值,给液管输入一个低频控制信号 $(P_{iv})_{lo}$,由于某种原因,液管的输出流量 $(Q_{ov})_{lo}$ 和设定值 $[Q_{ov}]$ 之间有一定的误差 e_v 存在,即

$$(Q_{ov})_{lo} - [Q_{ov}] = e_v \quad (2-68)$$

设允许误差为 $[e_v]$,当

$$|e_v| > [e_v] \quad (2-69)$$

时,则必须施加高频校正信号 $(P_{iv})_{hc}$,这时在液管的输出端就增加一个高频输出流量 $(Q_{ov})_{hc}$,使

$$|(Q_{ov})_{lo} + (Q_{ov})_{hc} - [Q_{ov}]| \leq [e_v] \quad (2-70)$$

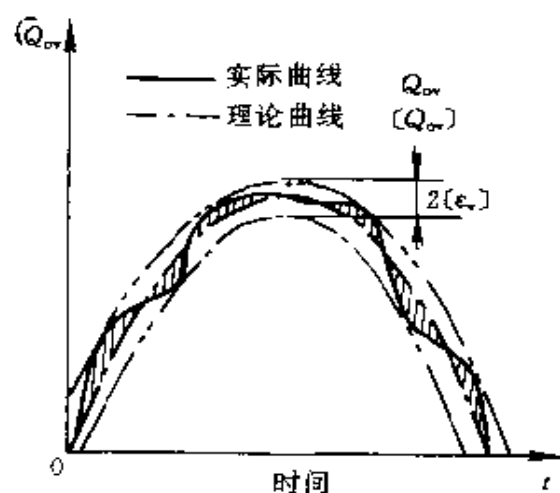


图 2-28

要完成这样一个控制过程,其框图如图 2-29 所示。人们可根据液管输出流量设定值 $[Q_{ov}]$ 的要求,编制一个控制程序,并将此控制程序输入 CPU 电路中。CPU 电路按照输入的控制程序,输出一个

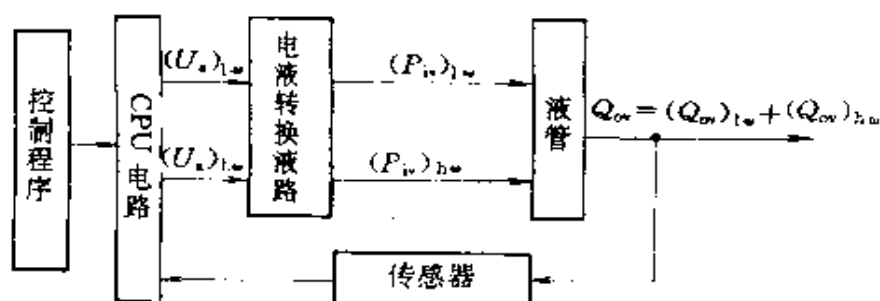


图 2-29

低频控制信号 $(U_s)_{lv}$,经电液转换液路将此控制电信号转换成低频压力控制信号 $(P_{lv})_{lv}$,去控制液管,使其输出流量 $(Q_{ov})_{lv}$,通过传感器将液管的输出流量转换成电信号,并放大后反馈到 CPU 电路。CPU 电路收到此反馈信号,按照控制程序对此反馈信号进行处理,当 $(Q_{ov})_{lv}$ 和 $[Q_{ov}]$ 之间有误差 e_v 存在,且其值大于允许误差 $[e_v]$ 时,即

$$|(Q_{ov})_{lv} - [Q_{ov}]| > [e_v] \quad (2-71)$$

就输出高频校正信号 $(U_s)_{hv}$,此校正信号使液管输出一个高频校正流量 $(Q_{ov})_{hv}$,使液管的输出满足所要求,即

$$|(Q_{uv})_{h,u} \pm (Q_{uv})_{h,u} - [Q_{uv}]| \leq [\varepsilon_v] \quad (2-72)$$

由于 CPU 电路以高速周期地监视着液管的输出流量,因此校正信号的频率远高于控制信号的频率。在液管的控制中,将前者称为高频校正信号,简称校正信号;后者称为工频控制信号,简称控制信号。控制信号和校正信号在液管输入端混合,联合对液管进行控制,这种联合控制称为混频。

2.3.1 液管的控制方式

液管的受控条件是:

$$P_{kv} \leq P_{hv} - P_{ev} \leq P_{op} \quad (2-73)$$

式中 P_{kv} ——液管的开启压力;

P_{hv} ——液管 h 端的压力;

P_{ev} ——液管 e 端的压力;

P_{op} ——液管的饱和压力。

在满足式(2-73)条件的情况下,根据液管输入端控制信号所施加的可能情况,液管的控制方式有如下几种,如图 2-30 所示。

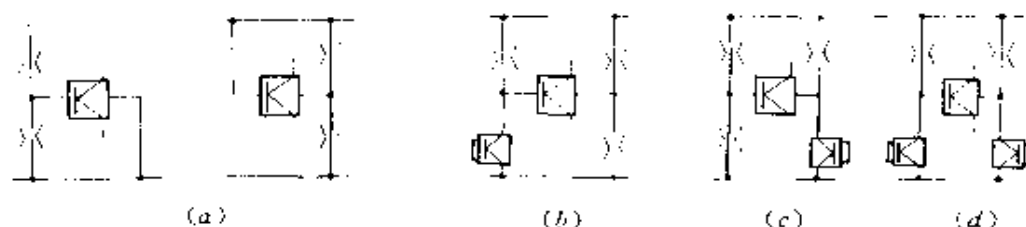


图 2-30

(a)常压控制: $P_{hv} = \text{常数}, P_{ev} = \text{常数};$

(b)单臂正向控制: $P_{hv} \neq \text{常数}, P_{ev} = \text{常数};$

(c)单臂反向控制: $P_{hv} = \text{常数}, P_{ev} \neq \text{常数};$

(d)双臂控制: $P_{hv} \neq \text{常数}, P_{ev} \neq \text{常数}。$

所谓常压控制,是指这种控制不是由电液管来实现的,而是通过其他方式,如分压液阻等,向液管提供一个不变的控制压力信号进行控制。这种控制是非编程控制,在工作过程中是不可改变的。

所谓单臂正向控制,是指电液转换液路的输出压力接到液管

的 h 端的控制。在这种情况下,当液管的 e 端直接接回油路时,有时电液转换液路的输出压力不能降至低于液管的开启压力 P_{kv} ,即 $P_{hymin} > P_{kv}$,液管无法自动处于截止状态。当电液转换液路的输出压力处于低压状态时,为要使液管能处于截止状态,只有在液管的 e 端施加一个分压 P_b ,使

$$P_{hymin} < P_{kv} + P_b \quad (2-74)$$

当电液转换液路的输出压力与液管的 e 端相连时,则称为单臂反向控制,这时必须在液管的 h 端预置压力 P_p 。

液管的初始状态,在特性曲线上用 0 点表示,如图 2-31 所示。

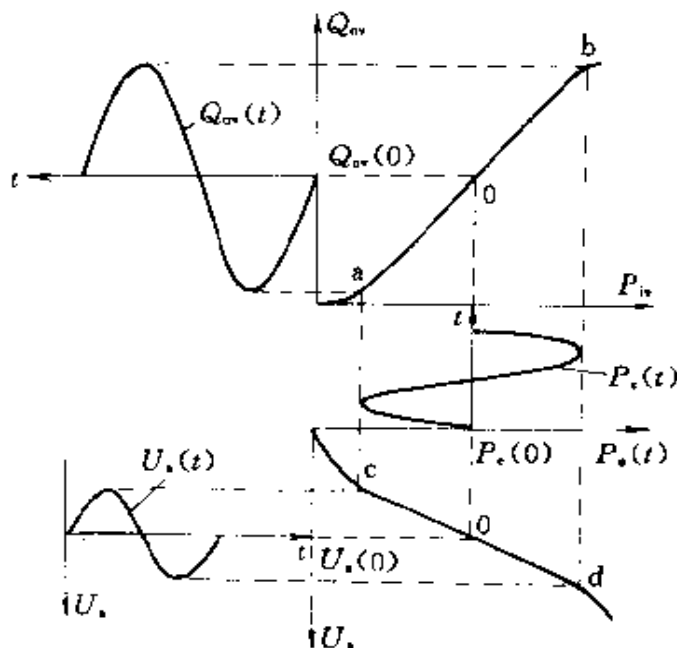


图 2-31

0 点称为液管的静态工作点。在静态工作点处,CPU 电路输出并施加于电液管控制线(a 组线)上的电压用 $U_s(0)$ 表示,电液转换液路输出的压力用 $P_s(0)$ 表示,液管输出的流量用 $Q_{mv}(0)$ 表示。当 CPU 电路输出一个控制电压 $U_s(t)$ 时,电液转换液路的输出压力 $P_s(t)$ 就沿着线性段 cd 变化,将此压力输入到液管的输入端,作为液管的控制信号 $P_h(t)$,液管的输出流量就沿着其输入输出特性曲线的相应区段 ab 变化,这时液管的输出流量为放大的、不畸变的一

个完整的流量信号 $Q_{ov}(t)$ 。液管静态工作点的确定,称为液管静态工作点的设置。液管静态工作点的设置有两种情况:图 2-31 所示为甲类设置情况,其静态工作点设置在输入输出特性曲线线性段的中段。图 2-32 所示为乙类设置状态,静态工作点设置在输入输

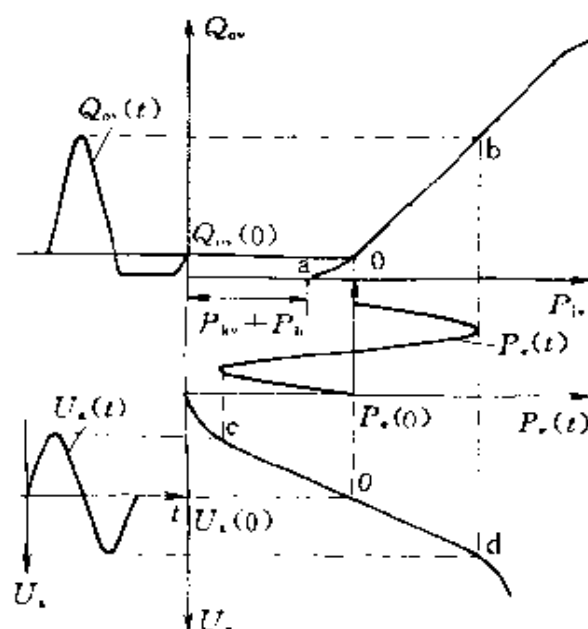


图 2-32

出特性曲线线性段的低值段,这时当 CPU 电路输出一个控制电压信号 U_i 正半周时,电液转换液路的输出压力 P_o 就沿着线性段 $0d$ 变化,液管输出一个放大的、不畸变的完整的流量信号 $Q_{ov}(t)$;当 CPU 电路输出一个控制电压信号负半周时,电液转换液路的输出压力 P_o 就沿着线性段 $0c$ 变化,液管输出一个发生很大畸变的流量信号 $Q_{ov}(t)$ 。静态工作点的两种不同情况的比较列于表 2-4 中。

表 2-4

	输出信号	静态工作点流量 $Q_{ov}(0)$	静态工作点功率损失
甲类	真实	大	大
乙类	畸变	小	小

2.3.2 特征式

在液管控制中,液管输入端会出现如下信号:

控制信号 $(P_{iv})_{iw}$:控制液管当量孔径的大小;

分压 P_b :当液管的 e 端直接连回油路时,有时电液转换液路的输出压力不能降至低于液管的开启压力 P_{kv} ,液管无法自动回到截止状态。这时,为要使液管在电液转换液路的输出压力处于低压状态,保证处于截止状态,只有在液管的 e 端施加一个分压 P_b ;

静态工作点设定压力 $P_e(0)$:使液管处于静态工作点处所需要加在液管输入端施加的压力;

正向预置压力 P_p :反向控制时,在液管的 h 端需预置一个压力 P_p ,此压力使液管能导通。

上述在液管输入端会出现的压力信号与比函数之间的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} (P_{iv})_{iw} &= \phi(x_{iv})_{iw} P_{co} \\ P_b &= \phi(x_b) P_{co} \\ P_e(0) &= \phi(x_0) P_{co} \\ P_p &= \phi(x_p) P_{co} \end{aligned} \right\} \quad (2-75)$$

式中只有 $(P_{iv})_{iw}$ 是控制信号,完成对液管的控制,其他信号是为要完成对液管控制所需的辅助信号。这些信号都是由电液转换液路提供的,它们相互之间的关系,可用数学式表示如下:

正向甲类控制(图 2-31):作用在液管 h 端上各压力之间的关系为:

$$P_e(t) = \pm \frac{1}{2} (P_{iv})_{iw} + P_e(0) \quad (2-76)$$

式中

$$P_e(0) \geq \frac{1}{2} (P_{iv})_{iw} + P_b + P_{kv} \quad (2-77)$$

正向乙类控制(图 2-32):作用在液管 h 端上各压力之间的关系为:

$$P_e(t) = (P_{iv})_{lv} + P_e(0) \quad (2-78)$$

式中

$$P_e(0) \geq P_b + P_{kv} \quad (2-79)$$

反向甲类控制(图 2-33):作用在液管 e 端上各压力之间的关系为:

$$P_e(t) = \pm \frac{1}{2} (P_{iv})_{lv} + P_e(0) \quad (2-80)$$

又

$$P_p = P_{e \max}(t) + P_{kv} = \frac{1}{2} (P_{iv})_{lv} + P_e(0) + P_{kv}$$

或者写成:

$$P_e(0) = -\frac{1}{2} (P_{iv})_{lv} + P_p - P_{kv} \quad (2-81)$$

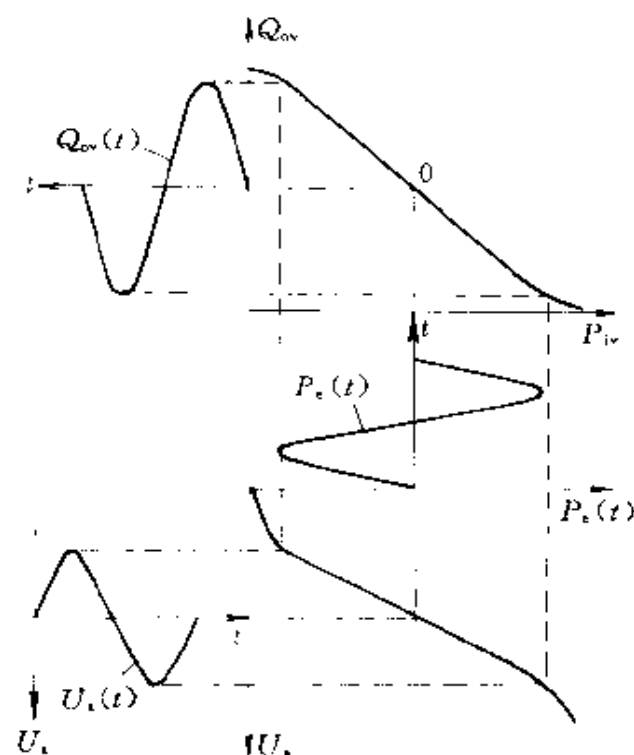


图 2-33

反向乙类控制(图 2-34):作用在液管 e 端上各压力之间的关系为:

$$P_e(t) = (P_{iv})_{lv} + P_e(0) \quad (2-82)$$

又

$$P_p = P_{e \max}(t) + P_{kv} = (P_{iv})_{\max} + P_e(0) + P_{kv}$$

或者写成:

$$P_e(0) = (P_{iv})_{\max} + P_p - P_{kv} \quad (2-83)$$

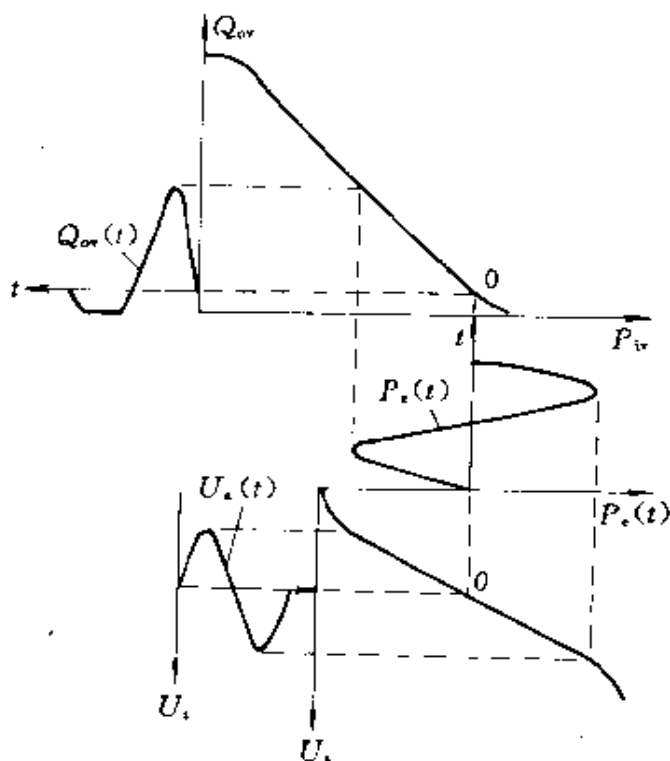


图 2-34

将式(2-75)代入式(2-76)~式(2-83)中,得到用比函数表示的这些关系式,有:

正向甲类控制:

$$P_e(t) = \left[\pm \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{\max} + \phi(x_0) \right] P_{eo} \quad (2-84)$$

$$\phi(x_0) \geq \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{\max} + \phi(x_b) + \frac{P_{kv}}{P_{eo}} \quad (2-85)$$

正向乙类控制:

$$P_e(t) = \left[\phi(x_{iv})_{\max} + \phi(x_0) \right] P_{eo} \quad (2-86)$$

$$\phi(x_0) \geq \phi(x_b) + \frac{P_{kv}}{P_{eo}} \quad (2-87)$$

反向甲类控制:

$$P_e(t) = \left[\pm \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \right] P_{co} \quad (2-88)$$

$$\phi(x_0) = -\frac{1}{2} \phi(x_{iv}) + \phi(x_p) - \frac{P_{kv}}{P_{co}} \quad (2-89)$$

反向乙类控制:

$$P_e(t) = [\phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0)] P_{co} \quad (2-90)$$

$$\phi(x_0) = -\phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_p) - \frac{P_{kv}}{P_{co}} \quad (2-91)$$

在满足式(2-38)的条件下,电液转换液路需输出的压力 P_e 为:

正向甲类控制:

$$P_e(t) = \left[0.325 + \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \right] P_{co} \leq 0.885 P_{co}$$

或

$$\phi_e(t) = 0.325 + \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \leq 0.885 \quad (2-92)$$

正向乙类控制:

$$P_e(t) = [0.325 + \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0)] P_{co} \leq 0.885 P_{co}$$

或

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \leq 0.885 \quad (2-93)$$

反向甲类控制:

$$P_e(t) = \left[0.325 + \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \right] P_{co} \leq 0.885 P_{co}$$

或

$$\phi_e(t) = 0.325 + \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \leq 0.885 \quad (2-94)$$

反向乙类控制:

$$P_e(t) = [0.325 + \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0)] P_{co} \leq 0.885 P_{co}$$

或

$$\phi_e(t) = 0.325 - \phi(x_{iv})_{lv} + \phi(x_0) \leq 0.885 \quad (2-95)$$

式(2-92)、式(2-93)、式(2-94)和式(2-95)统称为液管控制的输入方程,简称输入方程,其中:

$$\phi_e(t) = \frac{P_e(t)}{P_{co}} \quad (2-96)$$

设：

$$\left. \begin{aligned} \psi_0 &= \frac{0.885}{\phi(x_0)}, \psi_1 = \frac{\phi(x_0)}{\phi(x_0)} \\ \psi_2 &= \frac{\phi(x_p)}{\phi(x_0)}, \psi_3 = \frac{\phi(x_{iv})}{\phi(x_0)} \\ \psi_4 &= \frac{0.325}{\phi(x_0)}, \psi_5 = \frac{\phi_e(t)}{\phi(x_0)} \end{aligned} \right\} \quad (2-97)$$

将式(2-97)代入式(2-92)~(2-95),得输入方程为：

$$\text{正向甲类控制: } \psi_5 = 1 \pm \frac{1}{2}\psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-98)$$

$$\text{正向乙类控制: } \psi_5 = 1 + \psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-99)$$

$$\text{反向甲类控制: } \psi_5 = 1 \pm \frac{1}{2}\psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-100)$$

$$\text{反向乙类控制: } \psi_5 = 1 + \psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-101)$$

由式(2-98)~式(2-101)可知：

对于甲类控制有：

$$\psi_5 = 1 + \frac{1}{2}\psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-102)$$

对于乙类控制有：

$$\psi_5 = 1 + \psi_3 + \psi_4 \leq \psi_0 \quad (2-103)$$

对于所有的控制有：

$$P_{cu} = \frac{P_{kv}}{\psi\phi(x_0)}$$

或

$$P_{co} = \xi \frac{P_{kv}}{\psi\phi(x_0)} \quad (2-104)$$

式中 ξ ——可靠性系数，一般取

$$\xi = 1.4 \sim 1.5 \quad (2-105)$$

式(2-104)中的 ψ 值为：

正向甲类控制(参照式(2-85)):

$$\psi = 1 - \psi_1 - \frac{1}{2} \psi_3$$

正向乙类控制(参照式(2-87)):

$$\psi = 1 - \psi_1$$

反向甲类控制(参照式(2-89)):

$$\psi = -1 + \psi_2 - \frac{1}{2} \psi_3$$

反向乙类控制(参照式(2-91)):

$$\psi = -1 + \psi_2 - \psi_3$$

(2-106)

写成矩阵形式有:

$$\psi = [a \quad b \quad c \quad d] \begin{bmatrix} 1 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \psi(\psi_1, \psi_2, \psi_3) \quad (2-107)$$

式(2-107)对于所有的液管控制方式都适用,故称其为液管控制的特征式,简称特征式。特征式中的 ψ 称为无因次函数,无因次函数中(式(2-107))的矩阵 $[a \quad b \quad c \quad d]$ 称为液管控制的权,简称权。权中的 a, b, c, d 称为权的元,权的元列于表2-5中。 $\psi_1 \sim \psi_4$ 统称为无因次元,其对所有的 P_{co} 值都是相同的,因此可以通过一个具体的 P_{co} 值(-3MPa)来求得 $\psi_1 \sim \psi_4$ 的值。

表 2-5

控制方式	静态工作点设置情况	
	甲类	乙类
正向控制	$[1 \quad -1 \quad 0 \quad \frac{1}{2}]$	$[1 \quad -1 \quad 0 \quad 0]$
反向控制	$[-1 \quad 0 \quad 1 \quad \frac{1}{2}]$	$[-1 \quad 0 \quad 1 \quad -1]$

2.3.3 比函数的分配

控制液管的已知压力信号值有:

$$\left. \begin{aligned} P_{kv} &= 0.3 \text{ MPa}, (P_{iv})_{lw} = 0.5 \text{ MPa} \\ P_{co} &= 3 \text{ MPa}, \phi_e(t) = 0.8 < 0.885 \end{aligned} \right\} \quad (2-108)$$

由式(2-108)中的值,可计算出:

$$\phi(x_{iv})_{lw} = \frac{(P_{iv})_{lw}}{P_{co}} = \frac{0.5}{3} = 0.167 \quad (2-109)$$

对于正向甲类控制(式(2-92))有:

$$\begin{aligned} \phi_e(t) &= 0.325 + \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{lw} - \phi(x_0) \\ &= 0.325 + \frac{0.167}{2} + \phi(x_0) = 0.8 \end{aligned}$$

或

$$\phi(x_0) = 0.8 - 0.325 - \frac{0.167}{2} = 0.392 \quad (2-110)$$

将式(2-109)和式(2-110)代入式(2-97),得:

$$\left. \begin{aligned} \psi_0 &= \frac{0.885}{\phi(x_0)} = \frac{0.885}{0.392} = 2.258 \\ \psi_3 &= \frac{\phi(x_{iv})_{lw}}{\phi(x_0)} = \frac{0.167}{0.392} = 0.426 \\ \psi_4 &= \frac{0.325}{\phi(x_0)} = \frac{0.325}{0.392} = 0.829 \\ \psi_5 &= \frac{\phi_e(t)}{\phi(x_0)} = \frac{0.8}{0.392} = 2.041 \end{aligned} \right\} \quad (2-111)$$

由式(2-104)得:

$$\psi = \xi \frac{P_{kv}}{\phi(x_0)P_{co}} = 1.4 \frac{0.3}{0.392 \times 3} = 0.357 \quad (2-112)$$

由式(2-107)和表 2-5 得:

$$\psi = \begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} \\
&= 1 - \psi_1 - \frac{1}{2}\psi_3 \quad (2-113)
\end{aligned}$$

将式(2-113)代入式(2-112),得:

$$1 - \psi_1 - \frac{1}{2}\psi_3 = 0.357$$

或

$$\psi_1 = 1 - \frac{1}{2}\psi_3 - 0.357 \quad (2-114)$$

将式(2-111)的值代入式(2-114),得:

$$\psi_1 = 1 - \frac{0.426}{2} - 0.357 = 0.43 \quad (2-115)$$

由式(2-97)和式(2-110)得:

$$\begin{aligned}
\phi(x_b) &= \psi_1 \phi(x_0) \\
&= 0.43 \times 0.392 = 0.169 \quad (2-116)
\end{aligned}$$

于是得到正向甲类控制的一组比函数分配值:

$$\phi(x_b) = 0.169, \phi(x_{iv}) = 0.167, \phi(x_0) = 0.392$$

与此相应的一组无因次元值为:

$$\psi_0 = 2.258, \psi_1 = 0.43, \psi_2 = 0$$

$$\psi_3 = 0.426, \psi_4 = 0.829, \psi_5 = 2.041$$

用相同的方法,可以求得其他控制方式的这些值,并将这些值列于表 2-6 和表 2-7 中。

表 2-6

	$\phi(x_b)$	$\phi(x_p)$	$\phi(x_{iv})_{\text{av}}$	$\phi(x_0)$	$P_{\text{con}}(\text{MPa})$
正向甲类	0.169	0	0.167	0.392	3
反向甲类	0	0.615	0.167	0.392	3
正向乙类	0.168	0	0.167	0.308	3
反向乙类	0	0.615	0.167	0.308	3

表 2-7

	ψ_0	ϕ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	ψ_5	ψ
正向甲类	2.258	0.43	0	0.426	0.829	2.041	0.357
反向甲类	2.258	0	1.57	0.426	0.829	2.041	0.357
正向乙类	2.873	0.545	0	0.542	1.055	2.597	0.455
反向乙类	2.873	0	1.997	0.542	1.055	2.597	0.455

对于正向乙类控制(式(2-93))有:

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_{kv})_{kv} + \phi(x_0) - 0.8$$

则

$$\phi(x_0) = 0.8 - 0.325 - 0.167 = 0.308$$

于是有:

$$\psi_0 = \frac{0.885}{\phi(x_0)} = \frac{0.885}{0.308} = 2.873$$

$$\psi_3 = \frac{\phi(x_{kv})_{kv}}{\phi(x_0)} = \frac{0.167}{0.308} = 0.542$$

$$\psi_4 = \frac{0.325}{\phi(x_0)} = \frac{0.325}{0.308} = 1.055$$

$$\psi_5 = \frac{\phi_e(t)}{\phi(x_0)} = \frac{0.8}{0.308} = 2.597$$

$$\psi = \xi \frac{P_{kv}}{\phi(x_0)P_{co}} = 1.4 \frac{0.3}{0.308 \times 3} = 0.455$$

又

$$\psi = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \phi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = 1 - \phi_1 = 0.455$$

则

$$\phi_1 = 1 - 0.455 = 0.545$$

$$\phi(x_0) = \phi_1 \phi(x_0) = 0.545 \times 0.308 = 0.168$$

于是得到正向乙类控制的一组值为:

$$\phi(x_b) = 0.168, \phi(x_{iv})_{\text{low}} = 0.167, \phi(x_0) = 0.308$$

$$\psi_0 = 2.873, \psi_1 = 0.545, \psi_2 = 0, \psi_3 = 0.542,$$

$$\psi_4 = 1.055, \psi_5 = 2.597, \psi = 0.455$$

对于反向甲类控制(式(2-94))有:

$$\phi_c(t) = 0.325 + \frac{1}{2}\phi(x_{iv})_{\text{low}} + \phi(x_0) = 0.8$$

则

$$\phi(x_0) = 0.8 - 0.325 - \frac{0.167}{2} = 0.392$$

于是有:

$$\psi_0 = \frac{0.885}{\phi(x_0)} = \frac{0.885}{0.392} = 2.258$$

$$\psi_3 = \frac{\phi(x_{iv})_{\text{low}}}{\phi(x_0)} = \frac{0.167}{0.392} = 0.426$$

$$\psi_4 = \frac{0.325}{\phi(x_0)} = \frac{0.325}{0.392} = 0.829$$

$$\psi_5 = \frac{\phi_c(t)}{\phi(x_0)} = \frac{0.8}{0.392} = 2.041$$

由式(2-111)得:

$$\psi = \xi \frac{P_{kv}}{\phi(x_0)P_{co}} = 1.4 \frac{0.3}{0.392 \times 3} = 0.357$$

由式(2-107)和表 2-5 得:

$$\begin{aligned} \psi &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} \\ &= -1 + \psi_2 - \frac{1}{2}\psi_3 = 0.357 \end{aligned}$$

则

$$\psi_2 = 0.357 + 1 + \frac{0.426}{2} = 1.57$$

$$\phi(x_p) = \psi_2\phi(x_0) = 1.57 \times 0.392 = 0.615$$

于是得到反向甲类控制的一组值为:

$$\phi(x_p) = 0.615, \phi(x_{iv})_{lo} = 0.167, \phi(x_0) = 0.392$$

$$\psi_0 = 2.258, \psi_1 = 0, \psi_2 = 1.57, \psi_3 = 0.426$$

$$\psi_4 = 0.829, \psi_5 = 2.041, \psi = 0.357$$

对于反向乙类控制(式(2-95))有:

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_{iv})_{lo} + \phi(x_0) = 0.8$$

则

$$\begin{aligned}\phi(x_0) &= 0.8 - 0.325 - \phi(x_{iv})_{lo} \\ &= 0.8 - 0.325 - 0.167 = 0.308\end{aligned}$$

于是有:

$$\psi_0 = \frac{0.885}{\phi(x_0)} = \frac{0.885}{0.308} = 2.873$$

$$\psi_3 = \frac{\phi(x_{iv})_{lo}}{\phi(x_0)} = \frac{0.167}{0.308} = 0.542$$

$$\psi_4 = \frac{0.325}{\phi(x_0)} = \frac{0.325}{0.308} = 1.055$$

$$\psi_5 = \frac{\phi_e(t)}{\phi(x_0)} = \frac{0.8}{0.308} = 2.597$$

$$\psi = \xi \frac{P_{kv}}{\phi(x_0) P_{co}} = 1.4 \frac{0.3}{0.308 \times 3} = 0.455$$

由式(2-107)和表 2-5 得:

$$\begin{aligned}\psi &= [-1 \quad 0 \quad 1 \quad -1] \begin{bmatrix} 1 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} \\ &= -1 - \psi_2 - \psi_3 = -1 + \psi_2 - 0.542 = 0.455\end{aligned}$$

则

$$\psi_2 = 0.455 + 1 + 0.542 = 1.997$$

$$\phi(x_p) = \psi_2 \phi(x_0) = 1.997 \times 0.308 = 0.615$$

于是得到反向乙类控制的一组值为:

$$\phi(x_p) = 0.615, \phi(x_{iv})_{lo} = 0.167, \phi(x_0) = 0.308$$

$$\psi_0 = 2.873, \psi_1 = 0, \psi_2 = 1.997, \psi_3 = -0.542$$

$$\psi_4 = 1.055, \psi_5 = 2.597, \psi_6 = 0.455$$

上述对比函数的求值过程,称为比函数的分配;对比函数所求得值,称为比函数的分配值。

2.3.4 混频

两种不同频率的信号同时作用在液管的输入端时,液管输出一个两者联合控制的流量,这种工况称为混频。工频(低频)控制信号和高频校正信号同时作用在液管输入端时,由于高频校正信号的频率远比工频控制信号的频率高,且幅值也较小,这时液管输入端的波形是工频控制信号上载着一个高频校正信号,如图 2-35 所示。由图中可以看出,工频信号的工作点就是高频校正信号的静态工作点。也就是说,高频校正信号的静态工作点值是一个变量,它随着工频信号的变化而变化,而工频信号的静态工作点值是一个常量。由此可见,高频校正信号只是它的静态工作点同液管的工作点有关,而它的校正过程同液管的工作点无关。换句话说,可近似认为液管输出的高频流量 $(Q_{ov})_{hw}$ 与液管输出端的压力差变化无关,这相当于受控变量泵的特性。于是可以将混频工况下的液管输出端看成为如图 2-36 所示的网络。图中受控变量泵是由高频校正

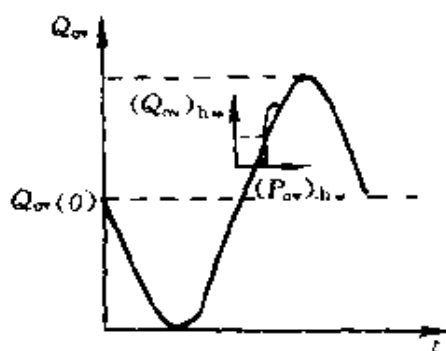


图 2-35

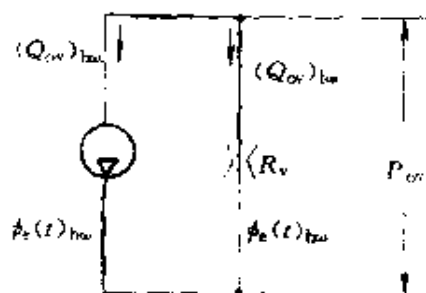


图 2-36

信号控制,可变液阻是受工频信号的控制。为了书写的方便,规定在以后的书写中,低频信号脚标“lw”将不再出现,只书写高频信号脚标“hw”。这样,工频控制信号和高频校正信号之间的关系

用如下数学公式来表示:

$$\phi_c(x_0)_{\text{hw}} = \phi_c(t) \quad (2-117)$$

式中 $\phi_c(x_0)_{\text{hw}}$ ——高频校正信号的静态工作点处的比函数;

$\phi_c(t)$ ——工频控制信号的任一工作点处的比函数。

上一小节讲述了比函数的分配过程和分配值。在讲述的过程中,都是在低频的含义下进行的。比函数的分配值指的是低频情况下的比函数值。在高频情况下要使液管输出一个驱动信号,这时电液转换液路必须对液管输出一个相应的控制信号,该控制信号的比函数值为 $\phi_c(t)_{\text{hw}}$ 。也就是说,要使液管的输出信号具有一定的值,必须向液管输入端“注入”足够的比函数值,或者说液管必须消耗足够的比函数值,故称此值为比函数的消耗值。比函数的消耗值是随着控制信号频率的增加而增加的。由上述可知,比函数的分配值是一个设计值,此设计过程是在低频情况下进行的;消耗值是一个实际值,它是在任何情况(高频和低频)下都适用的。分配值和消耗值之间的关系用下式表示:

$$\phi_c(t) = \varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right) \phi_c(t)_{\text{hw}} \quad (2-118)$$

式中 $\phi_c(t)$ ——比函数的分配值;

$\phi_c(t)_{\text{hw}}$ ——比函数在高频情况下的消耗值;

$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right)$ ——频函数;

$$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right)^2 + j \frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}} B} \quad (2-119)$$

ω ——控制信号的频率;

ω_{nv} ——液管的固有频率。

频函数的幅值为:

$$\left| \varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{nv}}} B\right)^2}} \quad (2-120)$$

① 参阅陈城书著《电液集成块液路》,华中理工大学出版社,1990.5。

其相位差为:

$$\theta_s = \arctg \left[\frac{B \frac{\omega}{\omega_{nv}}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nv}} \right)^2} \right] \quad (2-121)$$

频函数的幅值和相位差随频比 ω/ω_{nv} 值变化的曲线如图 2-37 所示。在低频 ($\omega \ll \omega_{nv}$) 时, 近似有:

$$\varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{nv}} \right) \approx 1 \quad (2-122)$$

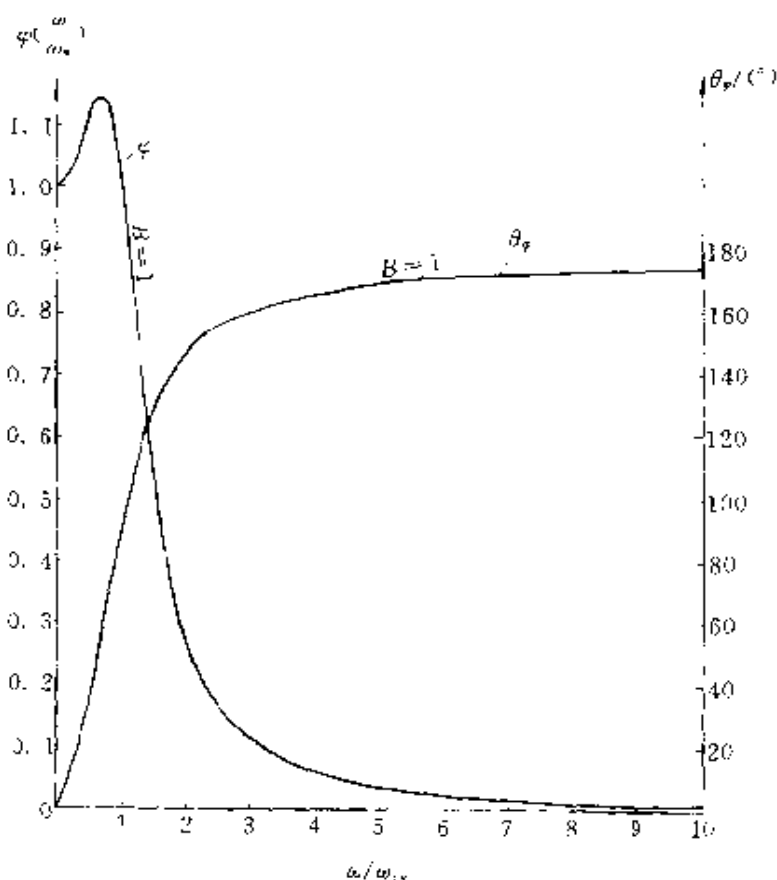


图 2-37

也就是说, 在低频情况下, 比函数的消耗值等于分配值。因此消耗值的概念也就只出现在高频情况下。

混频可以有电路混频和液路混频两种。在单臂控制中, 混频是在 CPU 电路中进行(图 2-38)。在双臂控制中, 混频可在液路中进行(图 2-39)。前者称为电路混频, 后者称为液路混频。在使用中,

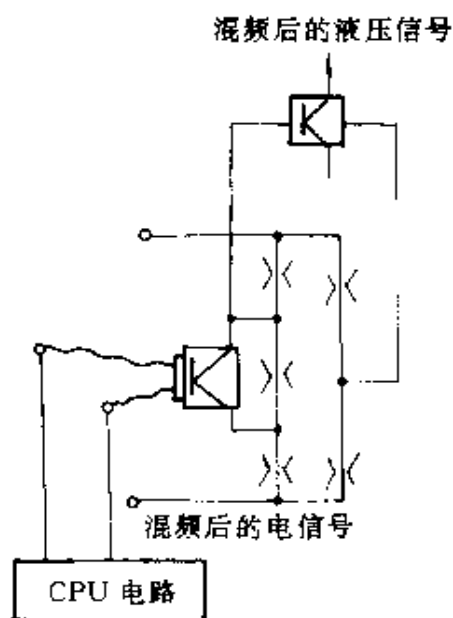


图 2-38

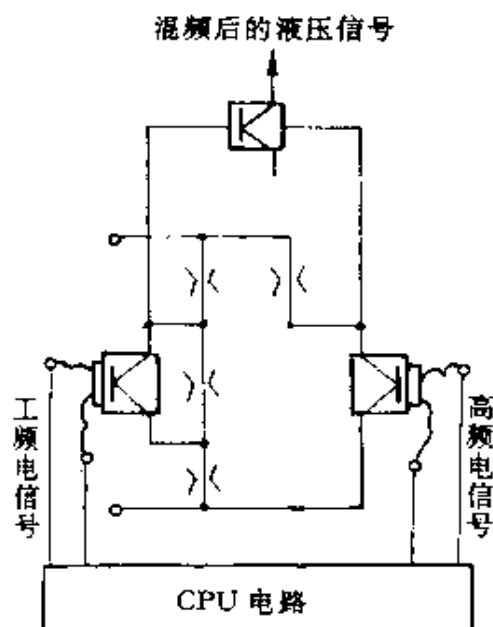


图 2-39

工频控制时,希望电液转换液路的电液转换系数 K_{eh} 小些,以提高信息利用率;而在高频控制中,希望电液转换系数 K_{eh} 大些,以提高其灵敏度。如果采用 CPU 电路混频,则两者(信息利用率和灵敏度)的矛盾无法解决。为此可采用液路混频,即用液管来进行混频。在液管输入端,用作工频控制的那一臂,其电液转换系数 K_{eh} 可小些,而用作高频校正信号的那一臂,其电液转换系数 K_{eh} 可大些,这样在混频时,可获得既有高的信息利用率,又有高的灵敏度。电路混频一般用在同级频率(同是低频或同是高频)的两个信号的混频。

高频校正信号的频比 ω/ω_{nv} 一般为:

$$\omega/\omega_{nv} = 4 \quad (2-123)$$

由图 2-37 查得,这时频函数的值为:

$$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{nv}}\right) = \varphi(4) = 0.06 \quad (2-124)$$

设高频校正信号分配值为工频控制信号分配值的四分之一,由式 (2-109) 得工频控制信号的比函数分配值为 0.167,于是可得高频校正信号比函数的分配值为:

$$\phi(x_{iv}) = \frac{0.167}{4} = 0.04 \quad (2-125)$$

由式(2-118)得高频校正信号的比函数消耗值为:

$$\phi(x_{iv})_{hw} = \frac{\phi(x_{iv})}{\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{nv}}\right)} = \frac{0.04}{0.06} = 0.667 \quad (2-126)$$

高频校正信号的比函数消耗值为:

$$\phi_e(t)_{hw} = \pm \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{hw} + \phi(x_0)_{hw} \quad (2-127)$$

对于校正信号来说,它的静态工作点就是工频控制信号的任意工作点,则有 $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_{nv}}\right) = 1$, 因此有:

$$\phi(x_0)_{hw} = \phi_e(t) \quad (2-128)$$

将式(2-128)代入式(2-127),得:

$$\phi_e(t)_{hw} = \pm \frac{1}{2} \phi(x_{iv})_{hw} + \phi_e(t) \quad (2-129)$$

将式(2-126)代入式(2-129),并取 $\phi_e(t)$ 的最大值,即 $\phi_e(t) = 0.8$, 得:

$$\phi_e(t)_{hw} = \pm 0.334 + 0.8 = 0.466 \sim 1.134 \quad (2-130)$$

$\phi_e(t)_{hw}$ 的值超出了式(2-38)的条件范围。为使校正臂的比函数 $\phi_e(t)_{hw}$ 的值满足式(2-38)条件,必须重新选择高频信号电液转换液路液源的压力 $P_{co\ hw}$, 即对比函数进行重新分配。

要降低比函数的值,就要增加电液转换液路液源的压力,于是可以得到重新选择电液转换液路液源压力的式子如下:

$$P_{co\ hw} = \eta_p P_{co} \quad (2-131)$$

设

$$\phi_e(t)_{hw} = 0.325 \sim 0.8 \quad (2-132)$$

则得:

$$\phi_e(t)_{hw} = \frac{1}{\eta_p} (0.466 \sim 1.134) = 0.325 \sim 0.8$$

求得:

$$\eta_p = \frac{0.466}{0.325} \sim \frac{1.134}{0.8} = 1.434 \sim 1.418$$

取

$$\eta_p = 1.4 \quad (2-133)$$

则有:

$$\phi_e(t)_{hw} = \frac{1}{\eta_p} (0.466 \sim 1.134) = 0.333 \sim 0.810 \quad (2-134)$$

将式(2-133)代入式(2-131),得:

$$P_{cu\ hw} = \eta_p P_{co} = 1.4 \times 3 = 4.2 \quad (2-135)$$

由式(2-134)和式(2-135)可知,当取高频校正信号的电液转换液路液源的压力 $P_{co\ hw} = 4.2\text{MPa}$ 时,其比函数消耗值满足式(2-38)条件,也就是说,这时高频校正信号是工作在线性区。其液路图如图 2-40 所示。

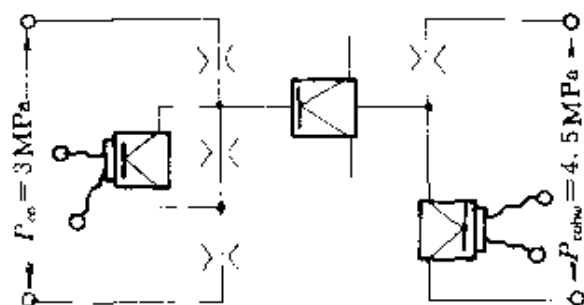


图 2-40

第 3 章 液动机的驱动

在电液集成块液压技术中,液动机的动作完全受电信号的控制。人们将液动机驱动程序送入 CPU 电路中,CPU 根据驱动程序中的指令输出弱电信号,通过电液转换液路,转换成弱小的压力信号,去控制驱动液路,来驱动液动机动作。传感器将液动机的动作转化为弱电信号,反馈给 CPU 电路。CPU 电路根据反馈信号来校正液动机的动作,以获得液动机的高精度运行,其框图如图 3-1 所示。驱动液动机的能量是由液源提供,液源包括有液压泵、油箱、滤油器等。液压泵将机械能转换成液压能,液压能受液路的控制,液动机将液压能转化为机械能,完成流体的传动。驱动液路是直接操作液动机动作的所有液路的泛称。

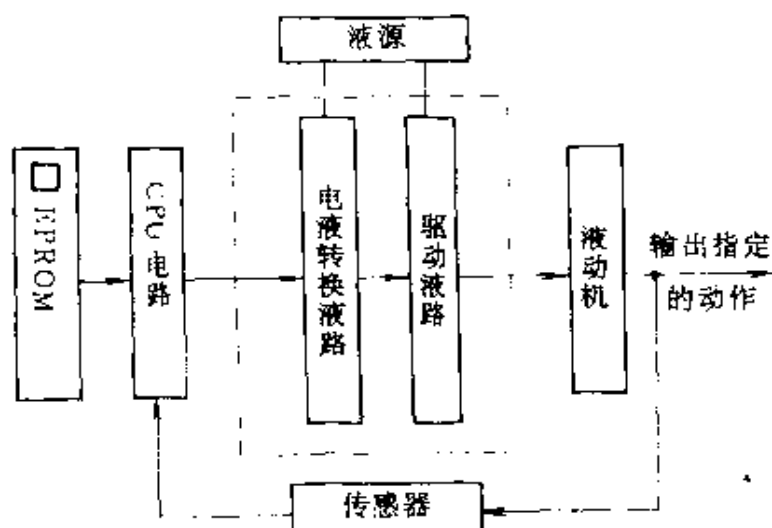


图 3-1

3.1 驱动液路

驱动液路对液动机的输出有两个参数,压力 P_z 和流量 Q_z 。在液动机驱动中, P_z 和 Q_z 可以被选择控制,它们的组合可以有如下几种:

压力驱动: P_z 为受控量, Q_z 为非控量;

流量驱动: P_z 为非控量, Q_z 为受控量;

混合驱动: P_z 和 Q_z 都为受控量;

非控驱动: P_z 和 Q_z 都为非控量。

所谓受控量是指该物理量(压力或流量)由电液集成块液压系统自身控制;所谓非控量是指该物理量不受电液集成块液压系统的自身控制(当然可以是用人工手动控制)。

3.1.1 压力驱动液路

在压力驱动液路中,驱动液路输出的压力是受控量,驱动液路输出的流量是非控量,因此在压力驱动中,人们所关心的只是驱动液路输出的压力。

图 3-2 是最基本的压力驱动液路,称为单液管压力放大液路,简称压力放大液路。 P_z 是该液路的输出压力。液阻 R_p 称为液管的负载液阻。由图 3-2 可得:

$$Q_s = Q_z + Q_{ov} \quad (3-1)$$

$$P_s = R_p Q_s + P_z \quad (3-2)$$

式中 Q_s ——液源输出的流量;

Q_z ——压力放大液路输出的流量;

Q_{ov} ——通过液管的流量;

P_s ——液源的输出压力。

将式(3-1)代入式(3-2),得:

$$\begin{aligned} P_s &= R_p Q_s + P_z \\ &= R_p (Q_z + Q_{ov}) + P_z \end{aligned}$$

整理后得:

$$Q_s = -\frac{1}{R_r} P_z + \left(\frac{P_s}{R_p} - Q_{ov} \right) \quad (3-3)$$

$$P_z = R_v Q_{ov} \quad (3-4)$$

式中 R_v ——液管开口处的液阻。

将式(3-4)代入式(3-3),得:

$$Q_s = -\frac{1}{R_p} P_z + \left(\frac{P_s}{R_p} - \frac{P_z}{R_v} \right)$$

整理后得:

$$\begin{aligned} Q_s &= -\left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_v} \right) P_z + \frac{P_s}{R_p} \\ &= -\frac{1}{R_z} P_z + \frac{P_s}{R_p} \end{aligned} \quad (3-5)$$

式(3-5)称为压力放大液路的输出方程。

$$R_z = \frac{R_p R_v}{R_p + R_v} \quad (3-6)$$

当 $P_z = 0$ 时,由式(3-5)得:

$$Q_s = \frac{1}{R_p} P_s \quad (3-7)$$

当 $Q_s = 0$ 时,由式(3-5)得:

$$P_z = \frac{R_z}{R_p} P_s = \frac{R_v}{R_p + R_v} P_s = \phi \left(\frac{d_v}{d_p} \right) P_s \quad (3-8)$$

式中 d_v ——液管开口处的当量孔径。

在图 2-18 中,在比函数曲线 $\phi(x)$ 的线性区段内,式(2-40)成立。取

$$P_{s0} = 3 \quad (3-9)$$

将式(2-40)代入式(3-8)中,得:

$$P_z = \phi \left[\frac{d_v}{d_p} \right] P_s = \left[-0.933 \frac{d_v}{d_p} + 1.445 \right] P_s \quad (3-10)$$

将式(3-9)和式(2-10)代入式(3-10),得:

$$P_z = \left[-0.933 \frac{d_v}{d_p} + 1.445 \right] P_s$$

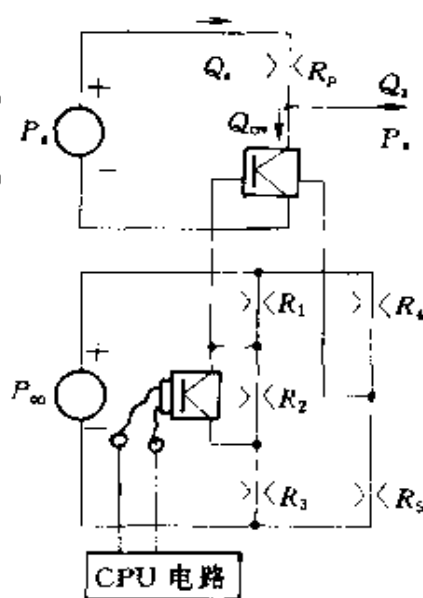


图 3-2

$$\begin{aligned}
&= \left[-0.933 \frac{20.429 P_{iv}}{d_p} + 1.445 \right] P_s \\
&= \left[-19.06 \frac{P_{co}}{d_p} \cdot \frac{P_{iv}}{P_{co}} + 1.445 \right] P_s \\
&= \left[-57.18 \frac{\phi(x_{iv})}{d_p} + 1.445 \right] P_s \quad (3-11)
\end{aligned}$$

式(3-11)称为压力放大液路的输入输出方程。当比函数 $\phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right)$ 在线性区段内变化时,则其比元的变化为:

$$\frac{d_v}{d_p} = 0.6 \sim 1.2 \quad (3-12)$$

取 $d_p = 1\text{mm}$, 则有:

$$d_v = 0.6 \sim 1.2(\text{mm}) \quad (3-13)$$

由式(2-10)得:

$$P_{iv} = d_v / 20.429 = \frac{0.6 \sim 1.2}{20.429} = 0.0294 \sim 0.0587 \quad (3-14)$$

则有:

$$\phi(x_{iv}) = \frac{P_{iv}}{P_{co}} = \frac{0.0294 \sim 0.0587}{3} = 0.0098 \sim 0.0196 \quad (3-15)$$

将式(3-15)代入式(3-11),得输出压力 P_z 在线性区段内的值为:

$$\begin{aligned}
P_z &= [-57.18(0.0098 \sim 0.0196) + 1.445] P_s \\
&= [0.324 \sim 0.885] P_s \quad (3-16)
\end{aligned}$$

图 3-3 是压力放大液路在甲类控制下的输入输出特性曲线,0(零)点为它的静态工作点。在 0 点处,电液转换液路的输出比函数为:

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_0) \quad (3-17)$$

当输出比函数在 0 点附近增加 $\frac{1}{2}\phi(x_{iv})$, 即

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_0) + \frac{1}{2}\phi(x_{iv}) \quad (3-18)$$

这时液管导通程度增加,压力放大液路的输出压力 P_z 减小,工作

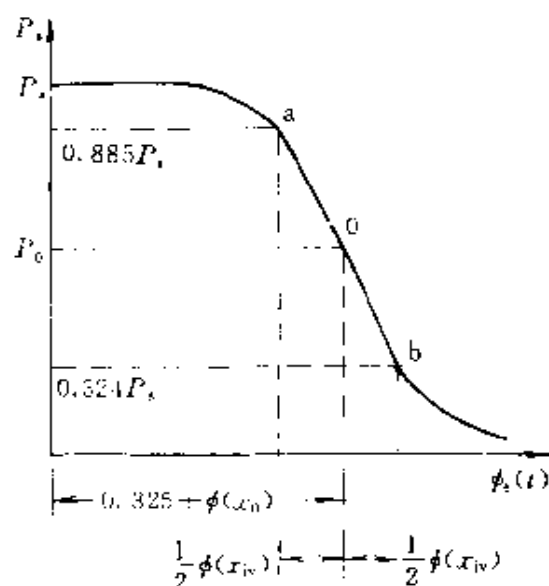


图 3-3

点就从 0 点移向 b 点。当电液转换液路输出比函数从 0 点减小 $\frac{1}{2}\phi(x_{iv})$, 即

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_0) - \frac{1}{2}\phi(x_{iv}) \quad (3-19)$$

这时液管导通程度减小、压力放大液路的输出压力 P_e 增大, 工作点从 0 点移向 a 点。压力放大液路的输出压力 P_e 随输入比函数 $\phi_e(t)$ 的增加而减小, 减小而增加。

由式(3-5)可知, 压力放大液路的输出流量 Q_e 随输出压力 P_e 的变化, 在

$$Q_e = 0 \sim P_s/R_p$$

范围内, 其变化较大。

由图 3-2 可得压力放大液路输出端的网络图为图 3-4(a) 所示。由网络变换原理(参阅《电液集成块液路》一书), 图 3-4 中网络(a)可等效变换成网络(b)。由图 3-4(b)可知, 这时压力放大液路的输出阻抗为:

$$R_e = R_p // R_v$$

其当量孔径为:

$$d_z = \sqrt{d_v^2 + d_p^2} = d_p \sqrt{1 + \left(\frac{d_v}{d_p}\right)^2} \quad (3-20)$$

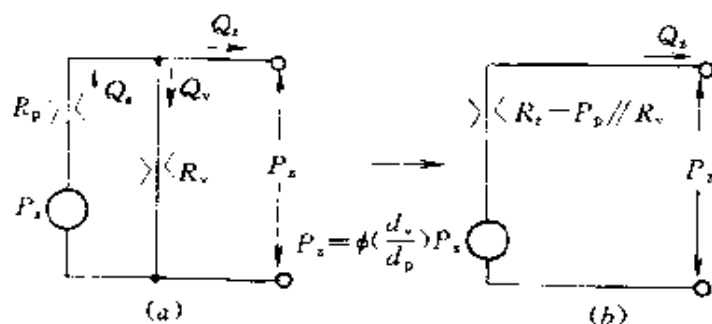


图 3-4

为要获得稳定的输出压力,需将压力放大液路的输出压力 P_z 通过分压液阻 R_1 和 R_2 反馈到液管的输入端,如图 3-5 所示。当变化电液管的输入电压时,就可改变压力放大液路的输出压力 P_o 。当电液管的输入电压一定时,由于某种原因 P_z 发生了变化,当 P_z 增加时, P_o 也随之增加,这时液管导通程度增加,于是 P_z 就下降;

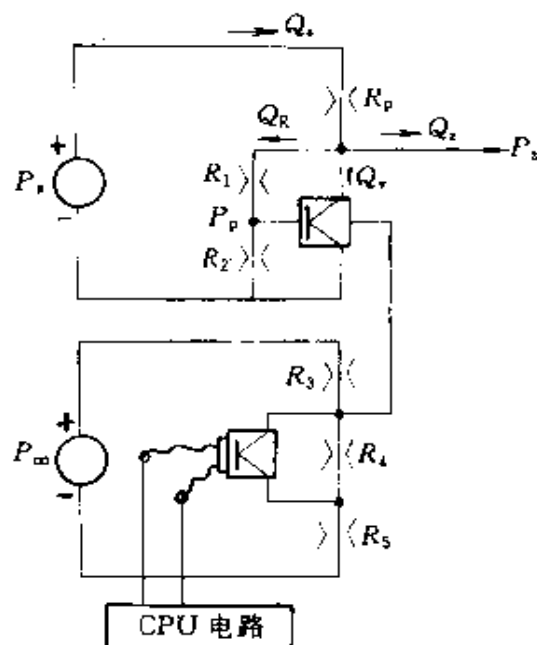


图 3-5

反之,则 P_z 就上升,使压力放大液路的输出压力 P_z 基本保持恒定不变。图 3-5 所示的驱动液路称为降压式压力驱动液路。在降压式

压力驱动液路中,液管是处在反向乙类控制中,由输入方程得:

$$\begin{aligned}\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)P_z &= \phi_e(t)P_{co} + P_{kv} \\ &= [0.325 + \phi(x_0)]P_{co} + P_{kv}\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}P_z &= \frac{[0.325 + \phi(x_0)]P_{co} + P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} + \phi(x_{iv}) \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\ &= P_{zk} + \Delta P_z\end{aligned}\quad (3-21)$$

$$\begin{aligned}P_{zk} &= \frac{[0.325 + \phi(x_0)]P_{co} + P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\ &= \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[0.325 + \phi(x_0) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right]\end{aligned}\quad (3-22)$$

$$\Delta P_z = \phi(x_{iv}) \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}\quad (3-23)$$

在式(3-22)中不包含有控制比函数 $\phi(x_{iv})$,而控制比函数是存在于式(3-23)中,也就是说,控制比函数不是由电液转换液路提供,或者说控制比函数不受 CPU 电路操作,而是由输出压力来操作。于是可将式(3-22)改写成:

$$P_{zk} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}\phi_e(t) + \frac{P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}\quad (3-24)$$

式(3-24)称为降压式压力驱动液路的输入输出方程。由图 3-5 可知, $\phi_e(t)$ 的变化范围为:

$$\phi_e(t) = \phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) \sim \phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right)\quad (3-25)$$

将式(3-25)代入式(3-24),得:

$$P_{zk} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\left(\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) \sim \phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) \right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right]$$

$$P_{zk \min} \sim P_{zk \max} \quad (3-26)$$

$$P_{zk \min} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-27)$$

$$P_{zk \max} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-28)$$

图 3-6 为降压式压力驱动液路的输入输出特性曲线。当调定 $\phi_e(t)$ 为一定值后, P_{zk} 就被确定, P_{zk} 称为降压式压力驱动液路的启控压力。当由于某种原因, 降压式压力驱动液路的输出压力有一个波动 ΔP_{zk} , 其值经 R_1 和 R_2 分压后, 将 R_2 上的压降反馈到液管的 h 端, 使液管导通, 这时控制比函数为 $\phi(x_v)$ 。由于 $\phi(x_v)$ 的存在, 使输出压力从 $P_{zk} + \Delta P_{zk}$ 降至 $P_{zk} + \Delta P_z$, 其中 ΔP_z 为降压式压力驱动液路输出压力的波动值。

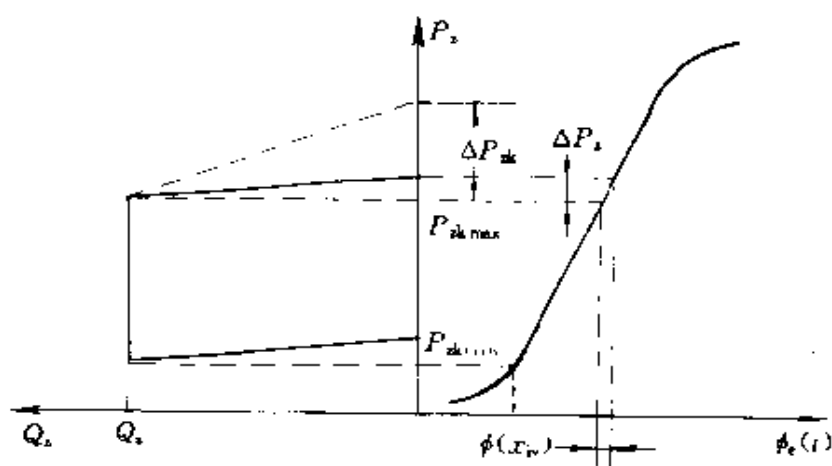


图 3-6

由图 3-5 可知, P_z 是随着 $\phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right)$ 的变化而变化, 有:

$$P_z = \phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right) P_s \quad (3-29)$$

当 $\phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right)$ 在线性区段内变化时, 式(2-40)成立; 当 $d_v < 1.287$ 时, 式(2-10)成立。将式(2-40)和式(2-10)代入式(3-29), 得:

$$\begin{aligned}
 P_z = \phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right) P_s &= \left[-0.933 \frac{d_v}{d_p} + 1.445\right] P_s \\
 &= \left[-0.933 \times 20.429 \frac{P_{co}}{d_p} \phi(x_{iv}) + 1.445\right] P_s \quad (3-30)
 \end{aligned}$$

将式(3-21)代入式(3-30),得:

$$\begin{aligned}
 P_z &= P_{zk} + \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \phi(x_{iv}) \\
 &= \left[-19.06 \frac{P_{co}}{d_p} \phi(x_{iv}) + 1.445\right] P_s
 \end{aligned}$$

整理后可得:

$$\begin{aligned}
 \phi(x_{iv}) &= -\frac{1.445 P_s - P_{zk}}{P_{co} \left[\frac{1}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} + 19.06 \frac{P_s}{d_p} \right]} \\
 &= -\frac{P_{zk}}{P_{co}} \cdot \frac{1.445 \frac{P_s}{P_{zk}} - 1}{\frac{1}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} + 19.06 \frac{P_s}{d_p}} \quad (3-31)
 \end{aligned}$$

将式(3-31)代入式(3-23),得:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_z &= \phi(x_{iv}) \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\
 &= -\frac{P_{zk}}{P_{co}} \cdot \frac{1.445 \frac{P_s}{P_{zk}} - 1}{\frac{1}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} + 19.06 \frac{P_s}{d_p}} \cdot \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\
 &\approx -\frac{\left(1.445 \frac{P_s}{P_{zk}} - 1\right) d_p}{19.06 \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \cdot \frac{P_{zk}}{P_s}
 \end{aligned}$$

一般取 $\frac{P_{zk}}{P_s} = \frac{2}{3} = 0.667$, 则有:

$$\begin{aligned}\Delta P_z &= \frac{1.445 \times \frac{3}{2} - 1}{19.06 \times \frac{3}{2}} \cdot \frac{d_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\ &= \frac{1.168}{28.59} \cdot \frac{d_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} = 0.041 \frac{d_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}\end{aligned}\quad (3-32)$$

由式(3-32)可知,要减小降压式压力驱动液路输出压力的波动量 ΔP_z ,就必须减小 d_p 值和增加 $\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$ 值。

将式(2-10)代入式(3-24),得:

$$\begin{aligned}P_{zk} &= \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi_e(t) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \\ &= \frac{1}{1.445 - 0.933 \frac{d_2}{d_1}} [\phi_e(t) P_{co} + P_{kv}]\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}\phi_e(t) &= \left(1.445 - 0.933 \frac{d_2}{d_1} \right) \frac{P_{zk}}{P_{co}} - \frac{P_{kv}}{P_{co}} \\ &= \left[\left(1.445 - 0.933 \frac{d_2}{d_1} \right) P_{zk} - P_{kv} \right] \frac{1}{P_{co}}\end{aligned}\quad (3-33)$$

$\phi_e(t)$ 允许的变化范围为:

$$1 \geq \phi_e(t) > 0 \quad (3-34)$$

$\phi_e(t)$ 随 $\frac{d_1}{d_2}$ 的变化而变化的曲线如图 3-7 所示。由图 3-7 可以看出,当取

$$P_{zk} = 5 \sim 30$$

时,只有

$$\frac{d_1}{d_2} = 0.7$$

时, $\phi_e(t)$ 的值为:

$$\phi_e(t) = 0.085 \sim 1.01$$

才最接近式(3-34)中的允许值。取

$$\phi_e(t) = 0.1 \sim 0.95$$

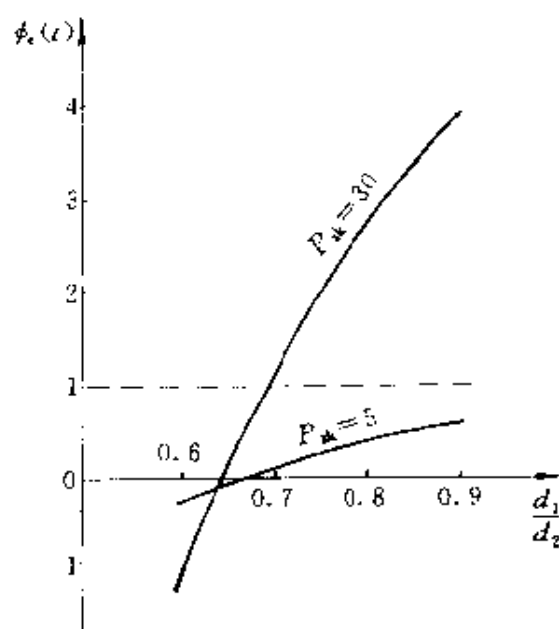


图 3-7

此时

$$\begin{aligned}
 P_{zk} &= \frac{1}{1.445 - 0.933 \times \frac{1}{0.7}} [(0.1 \sim 0.9)3 + 0.3] \\
 &= 5.35 \sim 26.75 \\
 &\approx 5 \sim 27
 \end{aligned} \tag{3-35}$$

当 $\phi_e(t)$ 在线性段内变化时, 即

$$\phi_e(t) = 0.325 \sim 0.885$$

则

$$P_{zk} = 11.37 \sim 26.35$$

由图 3-5 得:

$$Q_s = Q_R + Q_v + Q_z \tag{3-36}$$

而

$$Q_s = \frac{P_s - P_z}{R_p}, \quad Q_R = \frac{P_z}{R_1 + R_2}, \quad Q_v = \frac{P_z}{R_v} \tag{3-37}$$

将式(3-37)代入式(3-36), 得:

$$\frac{P_s - P_z}{R_p} = \frac{P_z}{R_1 + R_2} + \frac{P_z}{R_v} + Q_z$$

整理后可得：

$$\begin{aligned}
 Q_z &= - \left[- \frac{\left(\frac{P_s}{P_z} - 1 \right)}{R_p} + \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_v} \right] P_z \\
 &\approx - \left[- \frac{\left(\frac{P_s}{P_z} - 1 \right)}{R_p} + \frac{1}{R_v} \right] P_z
 \end{aligned} \quad (3-38)$$

将式(2-6)代入式(2-11),得：

$$\begin{aligned}
 R_v &= \frac{\sqrt{P_z}}{K_d d_v^2} = \frac{\sqrt{P_z}}{K_d (14.142)^2 P_{iv}} \\
 &= \frac{\sqrt{P_z}}{K_d (14.142)^2 \phi(x_{iv}) P_{co}}
 \end{aligned} \quad (3-39)$$

将式(3-39)代入式(3-38),得：

$$\begin{aligned}
 Q_z &= - \left[- \frac{\left(\frac{P_s}{P_z} - 1 \right)}{R_p} + \frac{K_d (14.142)^2 \phi(x_{iv}) P_{co}}{\sqrt{P_z}} \right] P_z \\
 &= - \left[\frac{- K_d d_p^2 \left(\frac{P_s}{P_z} - 1 \right)}{\sqrt{P_s - P_z}} + \frac{K_d (14.142)^2 \phi(x_{iv}) P_{co}}{\sqrt{P_z}} \right] P_z \\
 &\approx - K_d \left[- d_p \sqrt{\frac{P_s}{P_z} - 1} + 200 \phi(x_{iv}) P_{co} \right] \sqrt{P_{zk}}
 \end{aligned} \quad (3-40)$$

由图 3-6 可知,其输出阻抗为：

$$R_z = \frac{\Delta P_z}{Q_z} \quad (3-41)$$

将式(3-23)和式(3-40)代入式(3-41),得：

$$\begin{aligned}
 R_z &= \frac{\Delta P_z}{Q_z} = - \frac{\phi(x_{iv}) P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) K_d \left[- d_p^2 \sqrt{\frac{P_s}{P_z} - 1} + 200 \phi(x_{iv}) P_{co} \right] \sqrt{P_{zk}}} \\
 &\approx - \frac{\phi(x_{iv}) P_{co}}{200 K_d \phi(x_{iv}) P_{co} \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \sqrt{P_{zk}}}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{200K_d \phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{P_{zk}}} = \frac{0.00952}{\phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{P_{zk}}} \quad (3-42)$$

对于降压式压力驱动液路来说, 希望其输出阻抗 R_z 越小越好。由式(3-42)可知, 当 P_{zk} 和 $\phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$ 大时, 则 R_z 就小。

将式(3-32)和式(3-42)代入式(3-41), 得

$$Q_z = \frac{\Delta P_z}{R_z} = - \frac{0.041 d_p \phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{P_{zk}}}{\phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \times 0.00952} = 4.307 d_p \sqrt{P_{zk}} \quad (3-43)$$

当 $d_p = 1, P_{zk} = 5$ 时, 则有:

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= 4.307 \sqrt{5} = 9.63 \\ \text{当 } d_p &= 1, P_{zk} = 27 \text{ 时, 则有:} \\ Q_z &= 4.307 \sqrt{27} = 22.38 \end{aligned} \right\} \quad (3-44)$$

由此可见, 降压式压力驱动液路的输出流量(Q_z)较小。在输出流量(Q_z)较大的情况下, 一般压力驱动都采用如图 3-8 所示之限压式压力驱动液路, 其液源是一个流量源, 即液压泵。液压泵排出的油流受到阻碍时, 便产生压力 P_z , 去克服阻碍而输出流量 Q_z 。压力 P_z 被液阻 R_1 和 R_2 分压, 分压后的压力 P_p 被反馈到液管的输入端 h。液管的 e 端压力受电液转换液路的控制, 当改变电液管的输入电压时, 压力 P_e 就会发生变化, 其输出压力 P_z 也就随之发生变化。当

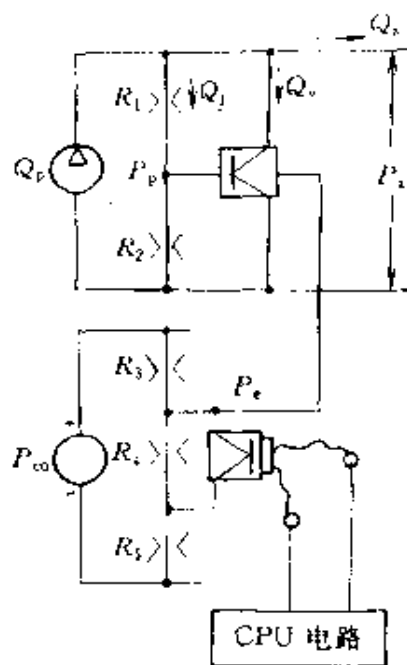


图 3-8

$$P_p \leq P_c + P_{kv} \quad (3-45)$$

时,即液管截止时,液路的输出压力 P_z 和输出流量 Q_z 之间无一定的关系,不管 P_z 如何变化,如下等式始终成立:

$$Q_z = Q_p \quad (3-46)$$

当

$$P_p > P_c + P_{kv} \quad (3-47)$$

时,即液管导通时,由输入方程(反向乙类控制)得:

$$P_z = [0.325 + \phi(x_0) + \phi(x_{iv})]P_{co} + P_{kv} \quad (3-48)$$

又

$$P_p = \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)P_z \quad (3-49)$$

将式(3-49)代入式(3-48),得:

$$\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)P_z = [0.325 + \phi(x_0) + \phi(x_{iv})]P_{co} + P_{kv} \quad (3-50)$$

整理后得:

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{[0.325 + \phi(x_0)]P_{co} + P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} + \frac{P_{co}\phi(x_{iv})}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\ &= P_{zk} + \Delta P_z \end{aligned} \quad (3-51)$$

$$\begin{aligned} P_{zk} &= \frac{[0.325 + \phi(x_0)]P_{co} + P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \\ &= \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left(0.325 + \phi(x_0) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right) \end{aligned} \quad (3-52)$$

$$\Delta P_z = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \phi(x_{iv}) \quad (3-53)$$

当 $\phi(x_0)$ 调定后,限压式压力驱动液路的输出压力就被确定,也就是说, P_{zk} 是液管刚刚开启时的输出压力,称为启控压力,在这之前(即 $P_z \leq P_{zk}$)输出压力是非控的。当 $P_z > P_{zk}$ 时,液管开始导通,液管的导通是由反馈信号引起的,这时 $P_z = P_{zk} + \Delta P_z$, 其中 ΔP_z 称为压

力波动值。于是可以引出如下等式:

$$\phi_e(t) = 0.325 + \phi(x_0) \quad (3-54)$$

将式(3-54)代入式(3-52),得:

$$P_{zk} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi_e(t) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-55)$$

由图 3-8 可知, $\phi_e(t)$ 的变化范围为:

$$\phi_e(t) = \phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) \sim \phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) \quad (3-56)$$

将式(3-56)代入式(3-55),得到限压式压力驱动液路输出压力的调节范围为:

$$P_{zk} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\left(\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) \sim \phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) \right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-57)$$

$$= P_{zk \min} \sim P_{zk \max}$$

$$P_{zk \min} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-58)$$

$$P_{zk \max} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \quad (3-59)$$

由式(3-58)和式(3-59),得:

$$\begin{aligned} P_{zk \min} &= \frac{\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right) \frac{P_{co}}{P_{kv}} + 1}{\phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right) \frac{P_{co}}{P_{kv}} + 1} P_{zk \max} \\ &\approx \frac{\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right)}{\phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right)} P_{zk \max} \end{aligned} \quad (3-60)$$

将表 2-2 中的值代入式(3-60),得:

$$P_{zk \min} = \frac{\phi\left(\frac{d_5}{d_3}\right)}{\phi\left(\frac{d_{4+5}}{d_3}\right)} P_{zk \max} = \frac{\phi(x)_{\min}}{\phi(x)_{\max}} P_{zk \max}$$

$$= \frac{P_{e \min}}{P_{e \max}} P_{zk \max} = \frac{1}{1.8} P_{zk \max} \approx 0.556 P_{zk \max} \quad (3-61)$$

即图 3-8 所示限压式压力驱动液路的最低输出压力近似为最高输出压力的一半。为要扩大输出压力 P_z 的调节范围,可适当选择分压三液阻中的液阻 R_4 和 R_5 的孔径。当 $R_5=0$ 时, $\phi_e(t)$ 的值将不受式(3-56)的限制,由式(3-55)可知,当 $\phi_e(t)=0$ 时, P_{zk} 有最小值:

$$P_{zk \min} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left(0 + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right) = \frac{P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (3-62)$$

当 $\phi_e(t)=0.8$ 时, P_{zk} 有最大值:

$$P_{zk \max} = \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left(0.8 + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right) \quad (3-63)$$

当 P_{co} 和 $P_{zk \max}$ 已知后,则 $\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$ 就可求得。取:

$$P_{zk \max} = 30\text{MPa}, P_{co} = 3\text{MPa}, P_{kv} = 0.3\text{MPa} \quad (3-64)$$

将式(3-64)代入式(3-63),得:

$$\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{3}{30}(0.8 + 0.1) = 0.09$$

由图 2-18 查得:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1.78$$

取 $d_1=0.2$,则有:

$$d_2 = 1.78d_1 = 1.78 \times 0.2 = 0.356$$

取 $d_2=0.35$,这时

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{0.35}{0.2} = 1.75$$

由图 2-18 查得:

$$\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \phi(1.75) = 0.095 \quad (3-65)$$

将式(3-65)代入式(3-62),得:

$$P_{zk \min} = \frac{P_{kv}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} = \frac{0.3}{0.095} = 3.158\text{MPa} \quad (3-66)$$

将式(3-64)和式(3-65)代入式(3-55),得:

$$\begin{aligned} P_{zk} &= \frac{P_{co}}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \left[\phi_c(t) + \frac{P_{kv}}{P_{co}} \right] \\ &= \frac{3}{0.095} \left[\phi_c(t) + \frac{0.3}{3} \right] \\ &= 31.579\phi_c(t) + 3.158 \end{aligned} \quad (3-67)$$

由式(3-67)得:

$$\begin{aligned} \phi_c(t) &= \frac{P_{zk\max} - 3.158}{31.579} = \frac{30 - 3.158}{31.579} \\ &\approx 0.85 \end{aligned} \quad (3-68)$$

即当 $\phi_c(t)$ 为 0.85 时,限压式压力驱动液路有最大输出压力为:

$$P_{zk\max} = 30\text{MPa}$$

又

$$P_{zk\max} = Q_p R_v = \frac{Q_p^2}{K_d^2 d_v^4}$$

或

$$d_v = \left[\frac{Q_p^2}{K_d^2 P_{zk\max}} \right]^{\frac{1}{4}} \approx \left[\frac{Q_p^2}{K_d^2 P_{zk}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3-69)$$

将式(2-6)代入式(3-69),得:

$$P_{iv} = \frac{1}{(14.142)^2} \cdot \frac{Q_p}{K_c} \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} \quad (3-70)$$

将式(3-70)代入式(3-53),得:

$$\begin{aligned} \Delta P_z &= \frac{1}{(14.142)^2 \times 0.525} \cdot \frac{Q_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} \\ &= 0.0095 \frac{Q_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} \end{aligned} \quad (3-71)$$

设

$$Q_p = 40\text{L/min}, P_{zk} = 30\text{MPa}, \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 0.095 \quad (3-72)$$

将式(3-72)代入式(3-71),得:

$$\Delta P_z = 4 \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} = 4 \sqrt{\frac{1}{30}} = 0.73 \quad (3-73)$$

各种不同 P_{zk} 对应的波动值 ΔP_z 如图 3-9 所示。由图 3-9 可以看出, 随限压式压力驱动液路输出压力 P_A 的减小, 其压力波动值随之增大。为要减小限压式压力驱动液路输出压力的波动值 ΔP_z , 可以采用图 3-10 所示之限压式压力驱动液路。

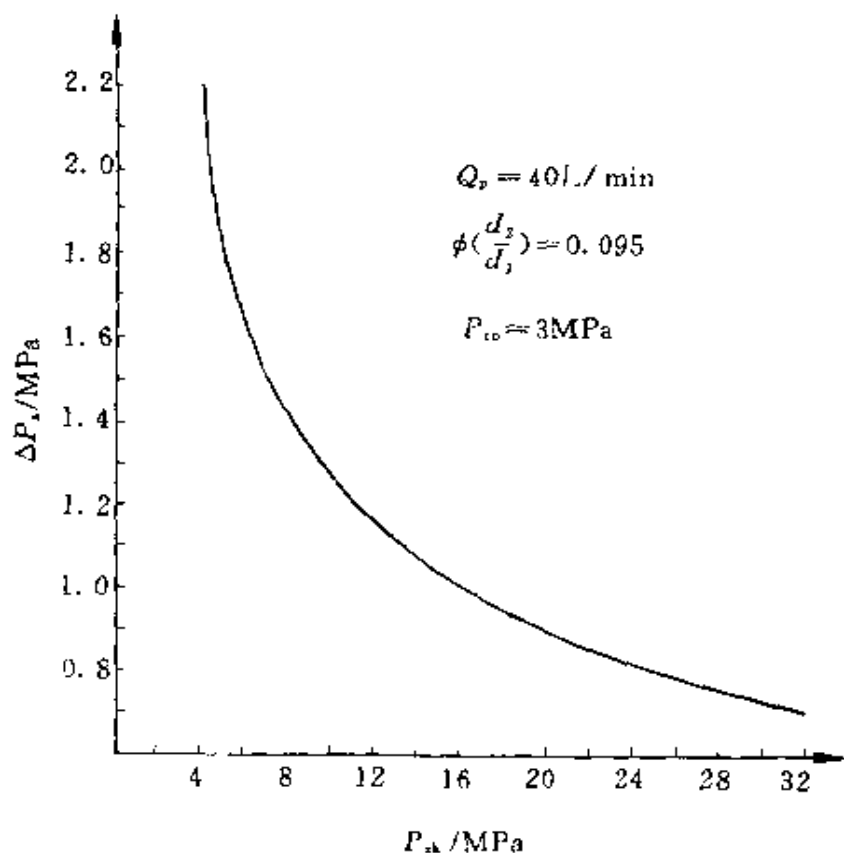


图 3-9

设图 3-8 所示限压式压力驱动液路的液管当量孔径为 d_v , 图 3-10 所示限压式压力驱动液路的二液管并联的当量孔径为 $d_{v(1//2)}$, 而 $d_{v1} = d_{v2}$, 则有:

$$d_{v(1//2)} = \sqrt{d_{v1}^2 + d_{v2}^2} = \sqrt{2} d_{v1} \quad (3-74)$$

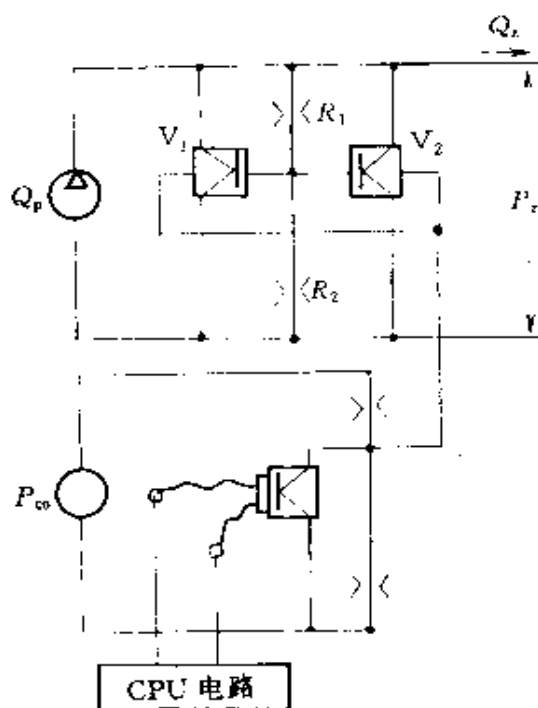


图 3-10

如果两者的当量孔径相等,即

$$d_{v(1//2)} = d_v \quad (3-75)$$

则有:

$$\sqrt{2} d_{v1} = d_v$$

或

$$d_{v1} = \frac{1}{\sqrt{2}} d_v \quad (3-76)$$

设 $d_{v(1//2)}$ 的控制压力信号为 $P_{iv(1//2)}$, d_v 的控制压力信号为 P_{iv} , 参见式(2-5)则有:

$$\begin{aligned} P_{iv(1//2)} &= 0.005 d_{v1}^2 = 0.005 \left(\frac{d_v}{\sqrt{2}} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} (0.005 d_v^2) = \frac{1}{2} P_{iv} \end{aligned}$$

或

$$\phi(x_{iv})_{(1//2)} = \frac{1}{2} \phi(x_{iv}) \quad (3-77)$$

也就是说,当两驱动液路的电液转换液路液源的压力相等时,则图

3-10 所示限压式压力驱动液路液管所需消耗的比函数 $\phi(x_{iv})_{(1//2)}$ 的值为图 3-8 所示限压式压力驱动液路液管所需消耗的比函数 $\phi(x_{iv})$ 值的一半。因此可以将式(3-71)改写成:

$$\Delta P_z = \frac{0.0095}{n_a} \cdot \frac{Q_p}{\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} \quad (3-78)$$

式中 n_a ——并联液管的个数。

图 3-11 是图 3-8 所示限压式压力驱动液路的输入输出特性曲线。当液动机受阻所引起的输出压力超过启控压力 $(P_{zk})_a$ 时,液管开始导通,使驱动液路的输出压力 P_z 沿 a-d 线缓慢上升,输出流量很快减小,到达 d 点时,泵排出的全部流量通过液管流回油箱,驱动液路输出的流量等于零, $Q_z = 0$, 其输出压力为 $P_z = P_{zk} + \Delta P_z$ 。当 $\phi_e(t)$ 分别为 ϕ_a 、 ϕ_b 和 ϕ_c 时,则限压式压力驱动液路的启控压力分别为 $(P_{zk})_a$ 、 $(P_{zk})_b$ 和 $(P_{zk})_c$ 。当液动机受阻所引起的压力 P_H 为:

$$P_H = (P_{zk})_a \quad (3-79)$$

时,调节电液转换液路输出比函数值,则有:

$$\phi_e(t) = \phi_a \text{ 时, } Q_z = Q_A = Q_p \quad (3-80)$$

$$\phi_e(t) = \phi_b \text{ 时, } Q_z = Q_B \quad (3-81)$$

$$\phi_e(t) = \phi_c \text{ 时, } Q_z = Q_C = 0 \quad (3-82)$$

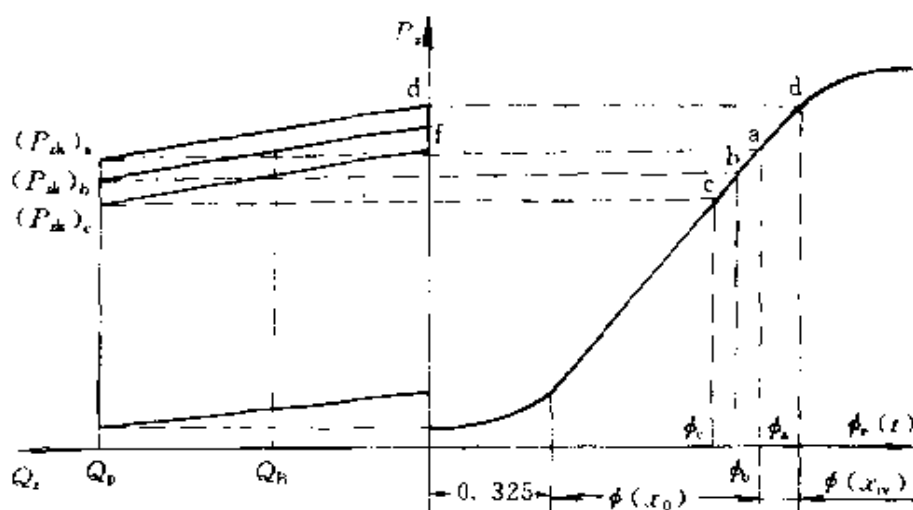


图 3-11

由此可见,只要调节电液转换液路的输出比函数值,就可得到不同的输出流量 Q_2 。在限压式压力驱动液路中,受控量是液路的输出压力 P_2 ,而输出流量 Q_2 为非控量,因此 Q_2 将随着外载的变化有较大的变化。所以限压式压力驱动液路一般用于液动机外载较稳定的情况下。

由图 3-11 和式(3-78)可得:

$$R_L = \frac{\Delta P_L}{Q_2} = \frac{0.0095}{n_s \phi \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} \sqrt{\frac{1}{P_{zk}}} \quad (3-83)$$

3.1.2 流量驱动液路

在流量驱动液路中,驱动液路的输出流量 Q_2 是受控量,而输出压力 P_2 为非控量,因此,人们所关心的只是驱动液路的输出流量。图 3-12 所示的液路是在图 3-2 所示的压力放大液路的输出端串联一个液阻 R_L ,通过 R_L 上的流量 Q_2 是该液路输出的受控量。由液阻 R_L 上的流量可确定液阻 R_L 上的压差 P_L :

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (3-84)$$

当 P_2 不变时,只要改变压力放大液路的输出压力 P_1 ,通过液阻 R_L 上的流量 Q_2 也随之发生变化;当 P_1 不变而 P_2 发生变化时,则通过液阻 R_L 上的流量 Q_2 也发生变化,也就是说,驱动液路输出的流量 Q_2 将随其外载压力 P_2 的变化而变化,不能获得稳定的输出流量。为要获得稳定的输出流量,可将液阻 R_L 上的压降作为控制信号反馈到液管的输入端,构成输出流量的反馈信号,来控制压力 P_1 和 P_2 同步升降,使

$$P_1 = P_2 + P_L$$

保持近似不变,即 $P_1 \approx$ 常数,这时通过液阻 R_L 的流量也就保持近似不变, $Q_2 \approx$ 常数。图 3-13 所示的液路称为稳流驱动液路。

液阻 R_L 上的压降 P_L 为:

$$P_L = R_L Q_2 \quad (3-85)$$

当液阻 R_L 上的压降 P_L 小于液管的开启压力 P_{kv} 时,即

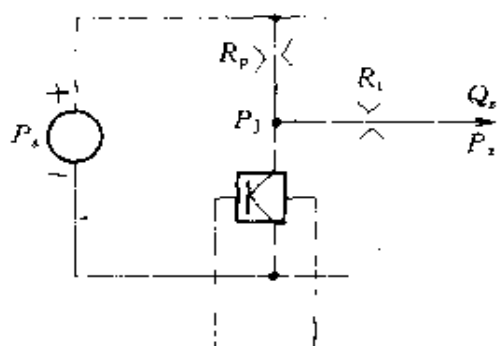


图 3-12

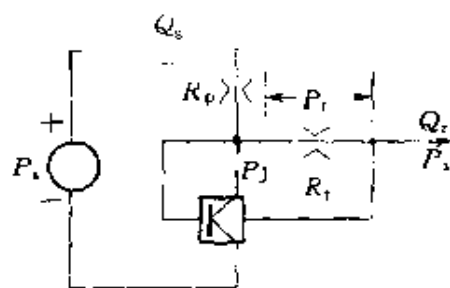


图 3-13

$$P_t < P_{kv} \quad (3-86)$$

则有:

$$R_t Q_z < P_{kv} \quad (3-87)$$

也就是说,当驱动液路输出的流量 Q_z 很小,或是液阻 R_t 的阻值很小,使驱动液路输出的流量 Q_z 通过液阻 R_t 时,在 R_t 上产生的压降 P_t 小于液管的开启压力。这时液管是截止的,通过液阻 R_p 的流量 Q_s 全部通过液阻 R_t ,即

$$Q_z = Q_s \quad (3-88)$$

这时的输出流量 Q_z 为:

$$Q_z = \frac{P_s - P_z}{R_p + R_t} = -\frac{1}{R_p + R_t} P_z + \frac{P_s}{R_p + R_t} \quad (3-89)$$

在式(3-89)中, P_s 、 R_p 和 R_t 为定值,而 P_z 为变值,因此驱动液路输出的流量 Q_z 随驱动液路输出端负载压力 P_z 的变化而有较大的变化,驱动液路处于失控状态。稳流驱动液路必须满足如下条件:

$$P_t > P_{kv} \text{ 或 } Q_z R_t > P_{kv} \quad (3-90)$$

液管的输入方程为:

$$P_J = P_{iv} + P_z + P_{kv} \quad (3-91)$$

整理后得:

$$P_J - P_z = P_{iv} + P_{kv} = P_t \quad (3-92)$$

将式(3-85)代入式(3-92),得:

$$R_t Q_z = P_{iv} + P_{kv} \quad (3-93)$$

或

$$Q_z = -\frac{P_{kz}}{R_t} + \frac{P_{iv}}{R_t}$$

$$= Q_{zk} + \Delta Q_z \quad (3-94)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{zk} &= \frac{P_{kz}}{R_t} \\ \Delta Q_z &= \frac{P_{iv}}{R_t} \end{aligned} \right\} \quad (3-95)$$

以下来求 P_{iv} 的值。由图 3-13 可得：

$$P_i = \phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right) P_s \quad (3-96)$$

将式(3-96)代入式(3-91),得：

$$\phi\left(\frac{d_v}{d_p}\right) = \frac{P_{iv} + P_z + P_{kv}}{P_s} \quad (3-97)$$

取 $d_v = 0.5$ 时,将式(2-10)和式(2-10)代入式(3-97),得：

$$= 0.933 \frac{20.429 P_{iv}}{d_p} + 1.445 = \frac{P_{iv} + P_z + P_{kv}}{P_s}$$

当取 $d_p = 1.5$ 时,应将式(2-10)改为式(2-6),整理后得：

$$P_{iv} = \frac{-\frac{P_z}{P_s} - \frac{P_{kv}}{P_s} + 1.445}{\frac{1}{P_s} + \frac{19.06}{d_p}} \quad (3-98)$$

式中 $\frac{P_{kv}}{P_s}$ 和 $\frac{1}{P_s}$ 都是很小的值,可忽略不计,则有：

$$P_{iv} = \frac{1.445 - \frac{P_z}{P_s}}{19.06} d_p \quad (3-99)$$

而

$$R_t = \frac{1}{k_t d_t^2} \sqrt{P_t}, P_t \approx P_{kv} = 0.3 \quad (3-100)$$

式中 K_t 由实验来确定, $K_t = 0.529$ 。

将式(3-99)和式(3-100)代入式(3-95),得：

$$\Delta Q_z = \frac{P_{iv}}{R_t} = \frac{1.445 - \frac{P_z}{P_s}}{19.06 \sqrt{P_t}} K_t d_p d_t^2$$

$$= \frac{1.445 - \frac{P_z}{P_s}}{10.44} k_t d_p d_t^2 \quad (3-101)$$

$$\begin{aligned} Q_{zk} &= \frac{P_{kv}}{R_t} = \frac{P_{kv} k_t d_t^2}{\sqrt{P_t}} = \sqrt{P_{kv}} k_t d_t^2 \\ &= 0.548 k_t d_t^2 \end{aligned} \quad (3-102)$$

由上述可知,要使稳流驱动液路输出的流量波动值 ΔQ_z 小,则希望 d_p 和 d_t 都小,特别是 d_t 要小,或者说,当液路输出的流量 Q_{zk} 小(即 d_t 小)时,其波动值 ΔQ_z 也小;反之,当液路输出的流量 Q_{zk} 大(即 d_t 大)时,其波动值 ΔQ_z 也大。在讨论中,都取流量波动的最大值,即 $P_z=0$ 处,由式(3-101)得:

$$\begin{aligned} \Delta Q_z &= \frac{1.445}{10.44} k_t d_p d_t^2 \\ &= 0.138 k_t d_p d_t^2 \end{aligned} \quad (3-103)$$

一般 d_p 和 d_t 之间必须满足条件:

$$d_p > d_t \quad (3-104)$$

d_p 值取得过小,会引起自激振荡,这是所不希望出现的。一般取

$$d_p = 0.5 \sim 1.5 \quad (3-105)$$

由上述讨论可以画出稳流驱动液路的输出特性曲线如图 3-14 所示。开始 $P_z=0$,这时 $P_t > P_{kv}$,稳流驱动液路有最大输出流量

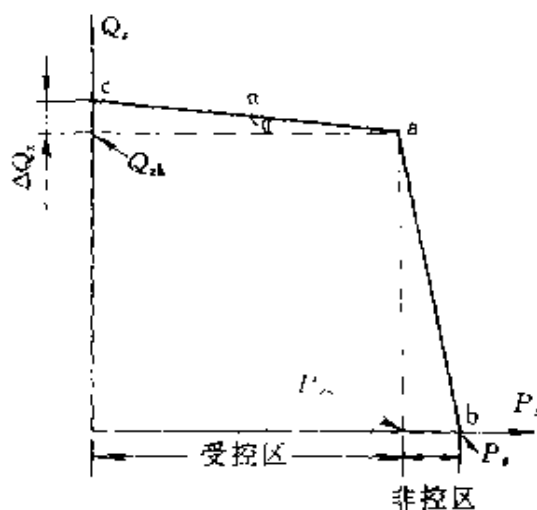


图 3-14

为:

$$Q_z = Q_{zk} + \Delta Q_z \quad (3-106)$$

随着输出压力 P_z 的增加, 工作点由 c 点移向 a 点。当到达 a 点时, 这时液管刚刚截止, $P_z = P_{zk}$, 驱动液路输出的流量为:

$$Q_z = Q_{zk} \quad (3-107)$$

随着 P_z 继续增加, 工作点就从 a 点向 b 点移动, 这时液管处于截止状态, $P_z < P_{zk}$, 驱动液路输出的流量为:

$$0 \leq Q_z < Q_{zk} \quad (3-108)$$

当工作点到达 b 点时, $P_z = P_s$, 驱动液路输出的流量为零, 即

$$Q_z = 0 \quad (3-109)$$

稳流驱动液路在 ac 区段内运行时, 处于受控状态; 在 ab 区段内运行时, 处于非控状态。在受控区段内, P_z 的变化范围为:

$$P_z = 0 \sim P_{zk} \quad (3-110)$$

在非控区内, P_z 的变化范围为:

$$P_z = P_{zk} \sim P_s \quad (3-111)$$

在此只讨论在受控区内的输出阻抗 R_z , 由图 3-14 得:

$$R_z = - \frac{P_{z1}}{\Delta Q_z} \quad (3-112)$$

又

$$R_z = - \frac{\sqrt{P_{zk}}}{k_z d_z^2} \quad (3-113)$$

将式(3-112)代入式(3-113), 得:

$$\frac{\sqrt{P_{zk}}}{k_z d_z^2} = \frac{P_{zk}}{\Delta Q_z}$$

整理后得:

$$d_z = \sqrt{\frac{\Delta Q_z}{k_z \sqrt{P_{zk}}}} \quad (3-114)$$

将式(3-103)代入式(3-114), 得:

$$d_z = d_1 \sqrt{\frac{0.138 d_g}{\sqrt{P_{zk}}}} \quad (3-115)$$

取

$$d_p = 0.5, P_{zk} = 20, d_t = 0.2, k_t = 0.529 \quad (3-116)$$

将式(3-116)代入式(3-115),得:

$$\begin{aligned} d_z &= d_t \sqrt{\frac{0.138 d_p}{\sqrt{P_{zk}}}} = 0.372 \sqrt{\frac{0.5}{\sqrt{20}}} d_t \\ &= 0.124 d_t = 0.0248 \end{aligned} \quad (3-117)$$

将式(3-117)和式(3-116)代入式(3-113),得:

$$\begin{aligned} R_z &= - \frac{\sqrt{P_{zk}}}{k_t d_z^2} = - \frac{\sqrt{20}}{0.529 (0.0248)^2} \\ &= -13745 \end{aligned} \quad (3-118)$$

将式(3-116)和式(3-118)代入式(3-112),得:

$$\Delta Q_z = \frac{P_{zk}}{R_z} = \frac{20}{-13745} = -0.00146 \quad (3-119)$$

式中负号表示流量波动值随外载 P_z 的增加而减小。将式(3-116)代入式(3-102),得:

$$\begin{aligned} Q_{zk} &= 0.548 k_t d_t^2 = 0.548 \times 0.529 \times 0.04 \\ &= 0.0116 \end{aligned} \quad (3-120)$$

其相对波动值为:

$$\Delta_q = \frac{|\Delta Q_z|}{Q_{zk}} = \frac{0.00146}{0.0116} = 12.6\% \quad (3-121)$$

R_z 也可用下式来表示:

$$R_z = -k_z \frac{P_{zk}}{d_p d_t^2} \quad (3-122)$$

$$\text{式中} \quad k_z \approx 13 \quad (3-123)$$

上述的 R_z 是稳流驱动液路的输出阻抗。稳流驱动液路的输出网络如图 3-15 所示。由于 R_z 很大,因此在图 3-15 中被忽略不计。

要使稳流驱动液路输出的流量可变,则可用液管来代替液阻 R_t 和 R_p ,如图 3-16

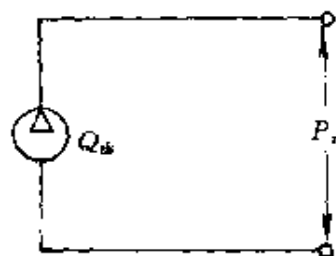


图 3-15

所示。图中用液管 V_3 来取代 R_p 的目的是为了保证满足条件式 (3-104), 即要满足:

$$\frac{dV_3}{dV_2} \geq 1 \quad (3-124)$$

只要改变液管 V_2 的 b 端压力控制信号 (即改变输入电液管 E_2 的电压), 就可获得不同的输出流量。

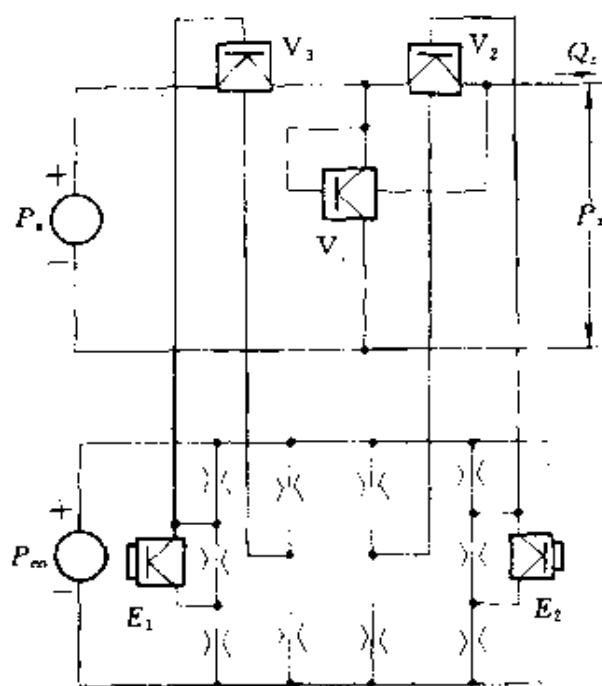


图 3-16

由上述的讨论可以看出, 稳流驱动液路的液路自动稳流调节是有差调节。为要消除这种误差, 可采用如图 3-17 所示的稳流驱动液路, 其输出流量 Q_2 通过传感器反馈到 CPU 电路, 来控制液管 V_1 , 以消除 P_2 的波动。它是采用了 CPU 电路来编程控制, 达到无差调节。它的输出特性曲线如图 3-18 所示。

3.1.3 桥式驱动液路

桥式驱动液路如图 3-19 所示。它是由 A、B 两臂组成, A 臂是由液管 V_1 和 V_2 组成, B 臂是由液管 V_3 和 V_4 组成。每一臂相当于两个压力放大液路的叠加。以 A 臂为例, 其中液管 V_1 的液阻 R_{V1} 为

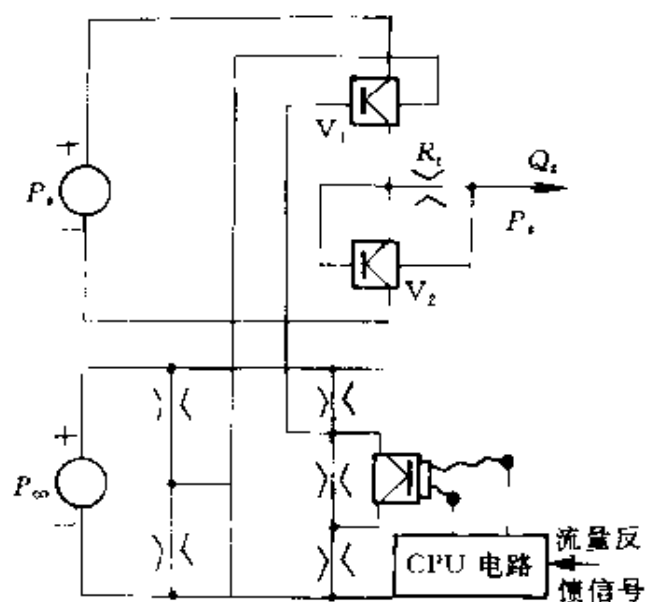


图 3-17

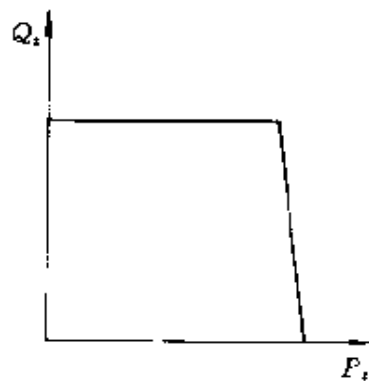


图 3-18

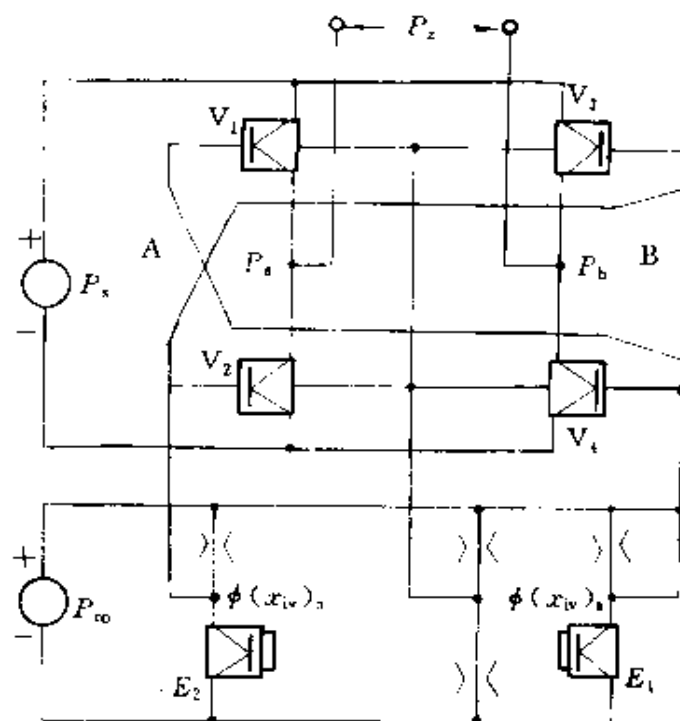


图 3-19

液管 V_2 的负载液阻 (R_p), 而液管 V_2 的液阻 R_{v2} 为液管 V_1 的负载液阻。当液管 V_1 的导通程度增加(减小)的同时液管 V_2 的导通程度减小(增加), 且增加和减小的程度相等, 这样的液路称为推挽液

路。推挽液路在甲类控制情况下,两个液管都对整个输入信号进行放大,两者的叠加就形成输出信号 P_a ,其幅值为两者输出信号的幅值之和,其输出特性曲线如图 3-20 所示。推挽液路在乙类控制情况下,输入信号的正半周是由液管 V_1 放大后输出压力, $P_a > 0$, 输入信号的负半周是由液管 V_2 放大后输出压力, $P_a < 0$ 。两者的输出信号有一段重叠,以保证两输出信号能很好地衔接在一起,形成一个完整的输出信号,如图 3-21 所示。

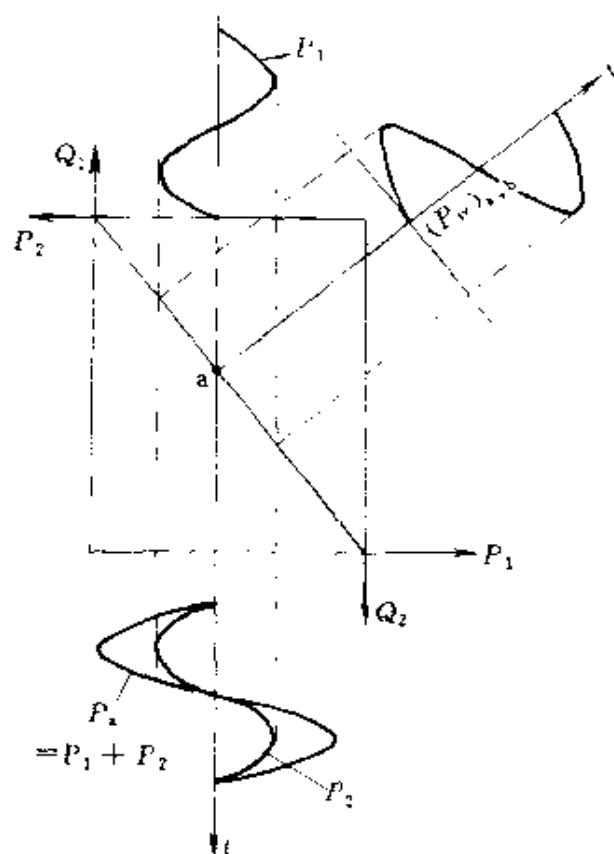


图 3-20

桥式驱动液路的每臂实际上就是一个推挽液路,也就是说,桥式驱动液路由两个相同的推挽液路组成。桥式驱动液路的输出量是 A 和 B 推挽液路的输出压力之差,即:

$$P_r = P_a - P_b \quad (3-125)$$

式中 P_r ——桥式驱动液路的输出压力;

P_a ——A 臂推挽液路的输出压力;

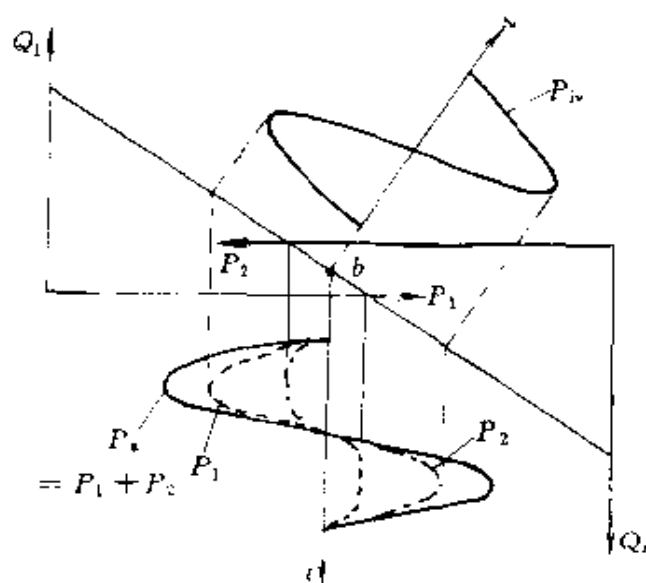


图 3-21

P_b ——B臂推挽液路的输出压力。

桥式驱动液路可用作液动机的换向、节流和伺服驱动用。

在换向驱动中,液管所接受的是开关压力控制信号:

$$\left. \begin{aligned} \phi(x_{iv})_a &= 0 \text{ 或 } 1 \\ \phi(x_{iv})_b &= 1 \text{ 或 } 0 \end{aligned} \right\} \quad (3-126)$$

两者的组合有四种情况:

当 $\phi(x_{iv})_a = 1$ 和 $\phi(x_{iv})_b = 0$ 时,液管 V_1 和 V_4 全导通,液管 V_2 和 V_3 截止,这时 $P_a = P_s, P_b = 0$, 则

$$P_z = P_a - P_b = P_s \quad (3-127)$$

当 $\phi(x_{iv})_a = 0$ 和 $\phi(x_{iv})_b = 1$ 时,液管 V_1 和 V_3 截止,液管 V_2 和 V_4 全导通,这时 $P_a = 0, P_b = P_s$, 则

$$P_z = P_a - P_b = -P_s \quad (3-128)$$

当 $\phi(x_{iv})_a = 0$, 和 $\phi(x_{iv})_b = 0$ 时,四个液管都截止,这时 $P_a = 0, P_b = 0$, 则

$$P_z = P_a - P_b = 0 \quad (3-129)$$

当 $\phi(x_{iv})_a = 1$ 和 $\phi(x_{iv})_b = 1$ 时,四个液管全都导通,液源被卸压, $P_s = 0$, 这时 $P_a = 0, P_b = 0$, 则

$$P_z = P_a - P_b = 0 \quad (3-130)$$

在伺服驱动中,桥式驱动液路中推挽液路两臂所接受的是模拟量压力控制信号,且为正向甲类控制。这时的输出方程为:

$$P_z = P_s - P_b \\ = \left[\phi \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}} \right) - \phi \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}} \right) \right] P_s \quad (3-131)$$

将式(2-40)代入式(3-131),得:

$$P_z = \left[-0.933 \frac{d_{v2}}{d_{v1}} + 1.445 + 0.933 \frac{d_{v4}}{d_{v3}} - 1.445 \right] P_s \\ = 0.933 \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}} - \frac{d_{v2}}{d_{v1}} \right) P_s \quad (3-132)$$

式(3-132)中的 d_{v1} 和 d_{v4} 是由控制比函数 $\phi(x_{iv})_a$ 控制,且 $d_{v1} = d_{v4}$; d_{v2} 和 d_{v3} 是由控制比函数 $\phi(x_{iv})_b$ 控制,且 $d_{v2} = d_{v3}$ 。由此可得:

$$\frac{d_{v2}}{d_{v1}} = \frac{d_{v3}}{d_{v4}} = \frac{d_{v3}}{d_{v1}} \quad (3-133)$$

将式(3-133)代入式(3-132),得

$$P_z = 0.933 \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}} - \frac{d_{v2}}{d_{v1}} \right) P_s \\ = 0.933 \frac{d_{v1}}{d_{v2}} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{d_{v1}}{d_{v2}} \right)^2} \right] P_s \quad (3-134)$$

参考式(2-6)得:

$$\frac{d_{v1}}{d_{v2}} = \frac{14.142}{14.142} \frac{\sqrt{(P_{iv})_a}}{\sqrt{(P_{iv})_b}} = \sqrt{\frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b}} = \sqrt{\phi_{ab}} \quad (3-135)$$

$$\phi_{ab} = \frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b} \quad (3-136)$$

式中 ϕ_{ab} 称为桥式驱动液路的臂控比。将式(3-135)代入式(3-134),得:

$$P_z = 0.933 \sqrt{\frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b}} \left[1 - \frac{1}{\frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b}} \right] P_s \\ = 0.933 \sqrt{\phi_{ab}} \left[1 - \frac{1}{\phi_{ab}} \right] P_s \quad (3-137)$$

当 $\phi_{ab}=1$ 时,四个液管都处在正向甲类控制的零点工作点处, $P_a=P_b$, 液路的输出压力 P_z 为:

$$P_z = P_a - P_b = 0 \quad (3-138)$$

当 $\phi_{ab}>1$ 时, $P_a>P_b$, 这时

$$P_z = P_a - P_b > 0 \quad (3-139)$$

当 $\phi_{ab}<1$ 时, $P_a<P_b$, 这时

$$P_z = P_a - P_b < 0 \quad (3-140)$$

桥式驱动液路的输出压力值的变化范围为:

$$P_z = (0.885 \sim -0.885)P_s \quad (3-141)$$

当 $P_z=0.885P_s$ 时, 则有:

$$0.933 \sqrt{\phi_{ab}} \left[1 - \frac{1}{\phi_{ab}} \right] = 0.885$$

整理后得:

$$\phi_{ab} - 0.949 \sqrt{\phi_{ab}} - 1 = 0 \quad (3-142)$$

解方程式(3-142)得:

$$\begin{aligned} \sqrt{\phi_{ab}} &= \frac{0.949 \pm \sqrt{(0.949)^2 + 4}}{2} \\ &= -0.6324, 1.5814 \end{aligned}$$

取

$$\phi_{ab} = 2.5 \quad (3-143)$$

当 $P_z=-0.885P_s$ 时, 则有

$$0.933 \sqrt{\phi_{ab}} \left[1 - \frac{1}{\phi_{ab}} \right] = -0.885$$

整理后得:

$$\phi_{ab} + 0.949 \sqrt{\phi_{ab}} - 1 = 0 \quad (3-144)$$

解方程式(3-144)得:

$$\begin{aligned} \sqrt{\phi_{ab}} &= \frac{-0.949 \pm \sqrt{(0.949)^2 + 4}}{2} \\ &= 0.6324, -1.5814 \end{aligned}$$

取

$$\phi_{ab} = 0.4 \quad (3-145)$$

由上述讨论可知,当 P_z 从 $-0.885P_s$ 变化到 $+0.885P_s$ 时,其臂控比 ϕ_{ab} 的变化范围为:

$$\phi_{ab} = 0.4 \sim 2.5 \quad (3-146)$$

式(3-146)中 ϕ_{ab} 的二值分别用 $\phi_{ab}(=0.4)$ 和 $\phi_{ab}(=2.5)$ 表示。于是式(3-146)可改写成:

$$\phi_{ab} = \phi_{ab}(=0.4) \sim \phi_{ab}(=2.5) \quad (3-147)$$

设 $\phi(x_{iv})_0$ 为控制比函数的零点工作点处值,也就是说,在零点工作点处有:

$$\phi(x_{iv})_a = \phi(x_{iv})_b = \phi(x_0) \quad (3-148)$$

设 x_a 为控制比函数的增加量(或减小量)。在操作中,当 $\phi(x_{iv})_a$ 增加(减小)时,则 $\phi(x_{iv})_b$ 作相应的减小(增加),并且它们的增加量和减小量是相等的,即当 $\phi(x_{iv})_a$ 增加 x_a 的同时, $\phi(x_{iv})_b$ 相应地减小 x_a 。于是有:

$$\phi_{ab}(=0.4) = \frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b} = \frac{\phi(x_0) + x_a}{\phi(x_0) - x_a} \quad (3-149)$$

$$\text{和} \quad \phi_{ab}(=2.5) = \frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b} = \frac{\phi(x_0) + x_a}{\phi(x_0) - x_a} \quad (3-150)$$

由式(3-149)和式(3-150)可得:

$$\phi_{ab}(=2.5) = \frac{1}{\phi_{ab}(=0.4)} \quad (3-151)$$

将式(3-149)改写成:

$$\frac{\phi(x_0) + (-x_a)}{\phi(x_0) - (-x_a)} = \phi_{ab}(=0.4) \quad (3-152)$$

可以将式(3-152)和式(3-150)合并成一个式子,即

$$\frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_b} = \frac{\phi(x_0) + x_a}{\phi(x_0) - x_a} = \phi_{ab} \quad (3-153)$$

式中 x_a 可以为正也可以为负。解式(3-153)得:

$$x_a = \frac{\phi_{ab} - 1}{\phi_{ab} + 1} \phi(x_0) \quad (3-154)$$

当 $\phi_{ab} = 0.4$ 时,则有:

$$\begin{aligned}
 x_{\phi} &= \frac{\phi_{ab}(=0.4) - 1}{\phi_{ab}(=0.4) + 1} \phi(x_0) = \frac{0.4 - 1}{0.4 + 1} \phi(x_0) \\
 &= -0.429 \phi(x_0)
 \end{aligned} \quad (3-155)$$

当 $\phi_{ab}=2.5$ 时, 则有:

$$\begin{aligned}
 x_{\phi} &= \frac{\phi_{ab}(=2.5) - 1}{\phi_{ab}(=2.5) + 1} \phi(x_0) = \frac{\frac{1}{\phi_{ab}(=0.4)} - 1}{\frac{1}{\phi_{ab}(=0.4)} + 1} \phi(x_0) \\
 &= \frac{1 - 0.4}{1 + 0.4} \phi(x_0) = 0.429 \phi(x_0)
 \end{aligned} \quad (3-156)$$

将式(3-155)和式(3-156)合并得:

$$x_{\phi} = (-0.429 \sim +0.429) \phi(x_0) \quad (3-157)$$

由式(3-157)求得 x_{ϕ} 值后, 就可求得 $\phi(x_{iv})_s$ 。然后由式(3-137)就可求得 P_z 值。取 $\phi(x_0)=0.6$, 将求得的输入($\phi(x_{iv})_s$)和输出(P_z)绘成图 3-22。由图可以看出, 输入和输出之间基本上是线性的。取 $\phi(x_0)=0.5$, 由式(3-157)得:

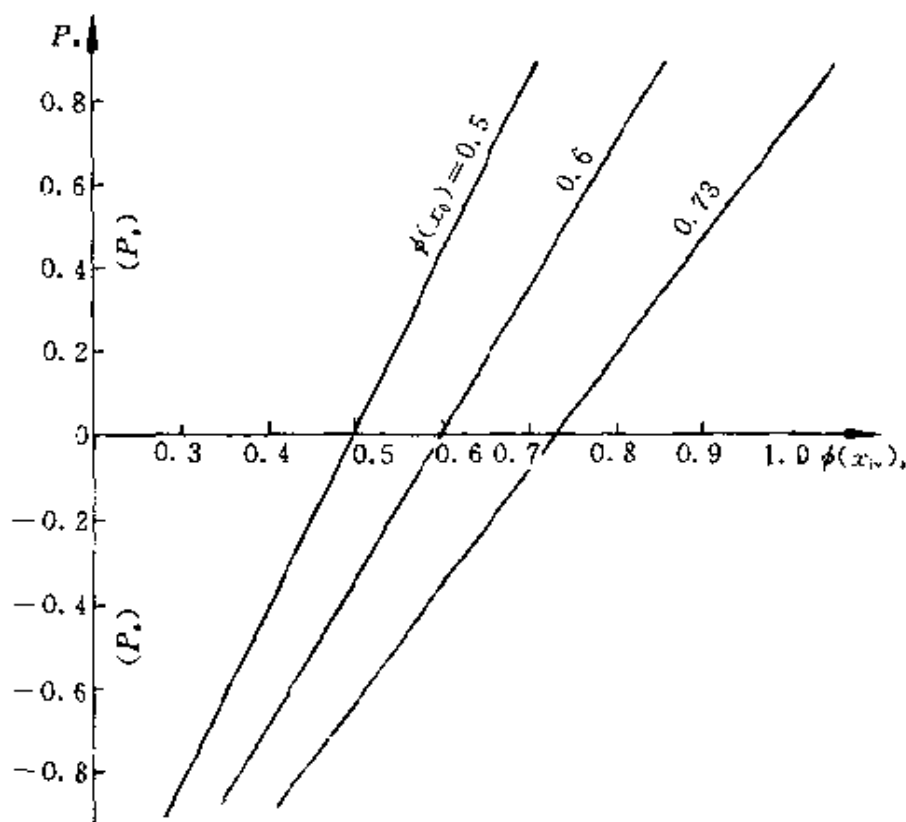


图 3-22

$$\begin{aligned}
 x_0 &= -0.429\phi(x_0) \sim 0.429\phi(x_0) \\
 &= -0.215 \sim 0.215
 \end{aligned}
 \quad (3-158)$$

则

$$\begin{aligned}
 \phi(x_{iv})_a &= [\phi(x_0) - x_0] \sim [\phi(x_0) + x_0] \\
 &= 0.285 \sim 0.715
 \end{aligned}
 \quad (3-159)$$

于是在图 3-22 中,可以得到三个点:

$$\phi(x_{iv})_a - \phi(x_0) = 0.5 \text{ 时, } P_z = 0$$

$$\phi(x_{iv})_a = 0.285 \text{ 时, } P_z = -0.885P_s$$

$$\phi(x_{iv})_a = 0.715 \text{ 时, } P_z = 0.885P_s$$

将这三个点连起来即成为一条标有 $\phi(x_{iv})_a = 0.5$ 的直线……。由图 3-22 中可以看出, $\phi(x_0)$ 越小, 其控制灵敏度越高, 也就是说, 当 $\phi(x_0)$ 小时, 则当 P_z 从 $-0.885P_s$ 变到 $+0.885P_s$ 时, 其消耗的控制比函数值 $\phi(x_{iv})_a$ 小。另外 $\phi(x_0)$ 小时, 在零点工作点处的无用功消耗也少。

桥式驱动液路在作伺服驱动情况下, 其输出端网络为图 3-23

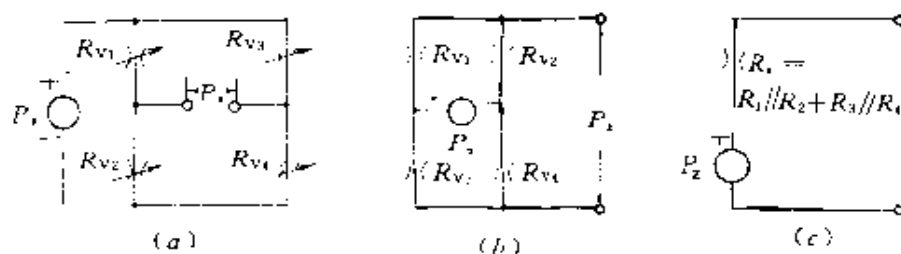


图 3-23

(a) 所示。图 3-23(a) 所示网络可等效变换成图 3-23(c) 所示网络。由图 3-23(c) 可得 P_z 为:

$$R_e = R_v1 // R_v2 + R_v3 // R_v4 \quad (3-160)$$

参照式(2-27)和式(2-33)可得:

$$d_z = \left| \phi \left[\frac{\sqrt{d_{v1}^2 + d_{v2}^2}}{\sqrt{d_{v3}^2 + d_{v4}^2}} \right] \right|^{\frac{1}{4}} \sqrt{d_{v1}^2 + d_{v2}^2}$$

$$= d_{v1} \sqrt{1 + \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}}\right)^2} \left[\phi \left[\frac{d_{v1}}{d_{v3}} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}}\right)^2}} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3-161)$$

又根据式(3-135)、式(3-133)和式(2-6)得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_{v2}}{d_{v1}} &= \frac{1}{\sqrt{\phi_{ab}}}, \frac{d_{v1}}{d_{v2}} = \frac{d_{v4}}{d_{v3}} = \sqrt{\phi_{ab}} \\ d_{v1} &= 14.142 \sqrt{\phi(x_{iv})_a} \sqrt{P_{co}} \end{aligned} \right\} \quad (3-162)$$

将式(3-162)代入式(3-161),得:

$$\begin{aligned} d_c &= d_{v1} \sqrt{1 + \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}}\right)^2} \left[\phi \left[\frac{d_{v1}}{d_{v3}} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}}\right)^2}} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= d_{v1} \sqrt{1 + \frac{1}{\phi_{ab}}} \left[\phi \left[\sqrt{\phi_{ab}} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{d_{v2}}{d_{v1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_{v4}}{d_{v3}}\right)^2}} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= d_{v1} \sqrt{1 + \frac{1}{\phi_{ab}}} \left[\phi \left[\sqrt{\phi_{ab}} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\phi_{ab}}}{1 + \phi_{ab}}} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= d_{v1} \sqrt{1 + \frac{1}{\phi_{ab}}} \left[\phi \left[\sqrt{\phi_{ab}} \sqrt{\frac{\phi_{ab} + 1}{1 + \phi_{ab}} \cdot \frac{1}{\phi_{ab}}} \right] \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= 14.142 \sqrt{\phi(x_{iv})_a} \sqrt{P_{co}} \sqrt{\frac{\phi(x_{iv})_a}{\phi(x_{iv})_a} + \frac{\phi(x_{iv})_b}{\phi(x_{iv})_a} [\phi(1)]^{\frac{1}{4}}} \\ &= 14.142 \sqrt{P_{co}} \sqrt{\phi(x_{iv})_a + \phi(x_{iv})_b [\phi(1)]^{\frac{1}{4}}} \\ &= 14.142 \sqrt{P_{co}} \sqrt{\phi(x_0) \pm x_b + \phi(x_0) \mp x_b [\phi(1)]^{\frac{1}{4}}} \\ &= 14.142 \sqrt{P_{co}} \sqrt{2\phi(x_0) [\phi(1)]^{\frac{1}{4}}} \end{aligned}$$

$$\approx 14.142 \sqrt{P_{\infty}} \sqrt{\phi(x_0)} = d_{v0} \quad (3-163)$$

由式(3-163)得知, d_z 是一个常数, 它等于在零点工作点处的液管当量孔径 d_{v0} , 也就是说, 桥式驱动液路在甲类控制下, 其输出阻抗 R_z 为在

$$d_{v1} = d_{v2} = d_{v3} = d_{v4} = d_{v0} \quad (3-164)$$

时的桥式驱动液路的输出阻抗。

桥式驱动液路在乙类控制情况下, 其所起的作用为流量驱动中的节流驱动。当有控制信号输入时, 其输出方程为:

$$Q_z = \frac{P_s - P_z}{2R_v} \quad (3-165)$$

式中 R_v —— 导通液管开口处的液阻值。

将式(2-6)和式(2-11)代入式(3-165), 得:

$$\begin{aligned} Q_z &= \frac{P_s - P_z}{2 \times \frac{\sqrt{P_s - P_z}}{K_d (14.142 \sqrt{P_{iv}})^2}} \\ &= \frac{1}{2} \times K_d \times 200 \times P_{iv} \sqrt{P_s - P_z} \\ &= 52.5 \sqrt{1 - \frac{P_z}{P_s}} \sqrt{P_s} \phi(x_{iv}) P_{\infty} \end{aligned} \quad (3-166)$$

设

$$P_{\infty} = 3\text{PMa}, \frac{P_z}{P_s} = 0 \sim \frac{2}{3} \quad (3-167)$$

则有:

$$\begin{aligned} Q_z &= 3 \times 52.5 \sqrt{1 - (0 \sim 2/3)} \sqrt{P_s} \phi(x_{iv}) \\ &= (157.5 \sim 90.933) \sqrt{P_s} \phi(x_{iv}) \end{aligned} \quad (3-168)$$

其中 $\phi(x_{iv})$ 为:

$$\text{当正信号时,} \quad \phi(x_{iv}) = \phi(x_{iv})_e \quad (3-169)$$

$$\text{当负信号时,} \quad \phi(x_{iv}) = \phi(x_{iv})_b \quad (3-170)$$

其输出端网络如图 3-24 所示。

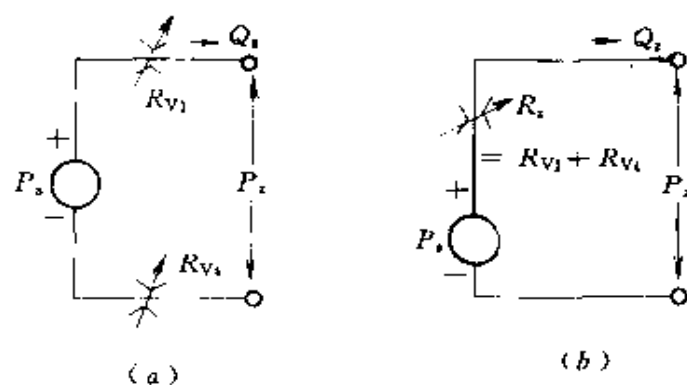


图 3-24

3.2 液动机的驱动

液动机的网络如图 3-25 所示(参阅《电液集成块液路》一书), 图中:

R_2 ——活塞同缸筒间的间隙处,液体摩擦所形成的液阻;

C_2 ——液压缸作用腔油液形成的液容;

L_1 ——活塞驱动物体时,惯性形成的液感;

R_1 ——活塞驱动物体时,液体摩擦形成的液阻;

C_1 ——活塞压缩弹性体(如弹簧)引起的液容;

P_F ——液势;

P_T ——外作用力液源。

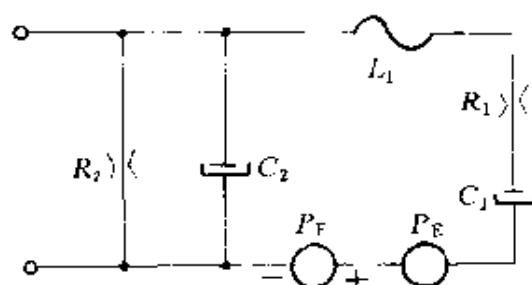


图 3-25

液势是由固体干摩擦所致,它的特性是,只产生反向压力,不产生流量。

摩擦副的两相对运动着的摩擦面,严格地说,总是高低不平的,使两摩擦面处在点接触状态,真实的接触面积是很小的,因此,即使在负载很小时,真实接触面积上也会产生很大的压力。在很大的压力下,金属会发生塑性变形,这时如果两摩擦面再作相对运动,则接触点就会产生瞬时高温,引起两摩擦面发生瞬时粘着(冷焊)。随着相对运动的发生,“粘着点”被切断,接着又发生瞬时粘着,之后又被切断,两摩擦面就这样进行粘着—切断—粘着的相对运动,这就是摩擦。粘着会产生一个力,阻止两面的相对运动,这力称为摩擦力,而粘着点的破坏就造成磨损。摩擦力使机器的效率降低,而磨损决定着机器的寿命。上述这种无润滑下的摩擦称为干摩擦。为了降低摩擦力与磨损,可人为地在两摩擦面间加入润滑油。摩擦面之间由润滑油膜隔开,这种润滑下的摩擦称为液体摩擦。液体摩擦形成液阻,而干摩擦形成液势。当为液体摩擦时,其摩擦系数只有 0.005 左右,甚至更小;而在干摩擦下,其摩擦系数在 0.3 以上。由此可见,液体摩擦所形成的液阻,其上压降是较小的,而液势上的压降往往是较大的。

在有润滑油润滑的情况下,摩擦的物理过程如图 3-26 所示。开始两物体处于金属接触干摩擦状态,形成一个液势,如图 3-26(a)所示。当运动开始后,由于油有粘性,顽固地附着在下壁上,因此相对于运动着的物体 A 来说,油就钻入到物体 A 的下面,如图 3-26(b)所示,这称为油液的楔子作用,简称油楔作用。这时物体 A 和下壁之间完全被油膜隔离,处于液体摩擦状态,如图 3-26(c)所示,形成一个液阻。当物体 A 停止运动后,在力 W 的作用下,经过一定时间 t_k ,物体 A 下面的油液被全部挤出,又处于干摩擦状态,这称之为卸油。时间 t_k 称为卸油时间。由此可见,在稳定的运动状态,只存在液阻;液势只存在于液动机启动的初始时刻,即只存在于暂态过程中。

在一般情况下,在图 3-25 中, R_2 是很大的,可以视为断路,而

C_1 是不存在的, 可视为短路, 于是液动机的网络成为图 3-27 所示。液动机输出的速度决定于液感 L 上的流量 Q_L , 当液动机在驱动液路的作用下作强迫匀速运动时, 液容 C 上的压降是固定不变的,

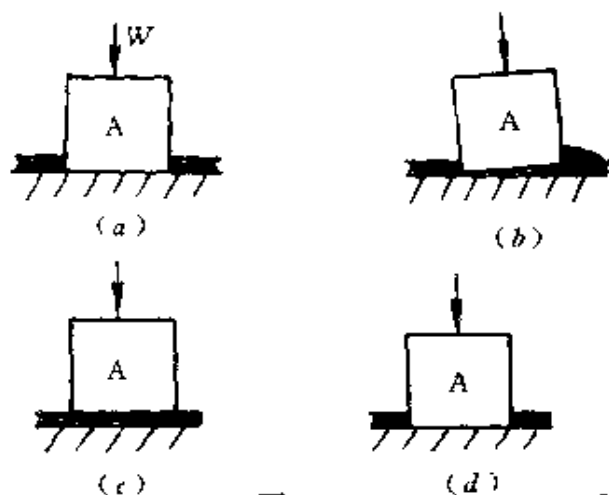


图 3-26

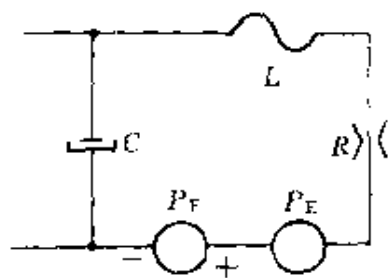


图 3-27

液势 P_E 为零, 这时的液动机网络可简化如图 3-28(a) 所示, 当液动机无驱动压力 P_i 作用时, 其输出端网络如图 3-28(b) 所示, 构成一个 RCL (液阻、液容、液感) 自由阻尼振荡回路。于是液动机的网络 (图 3-27) 可分解成两个网络, 一个是液动机在驱动液路的作用下作受迫运动时的网络, 称为液动机的受迫网络, 如图 3-28(a) 所示, 通过该网络液感 L 的流量为 Q_L ; 另一个是液动机的自由阻尼振荡网络, 该网络使液动机作自由阻尼振荡运动, 通过该网络液感 L 上的流量为 Q'_L 。则有:

$$Q_L = Q_L + Q'_L \quad (3-171)$$

也就是说, 液动机的运动是由受迫网络和自由网络联合作用的结

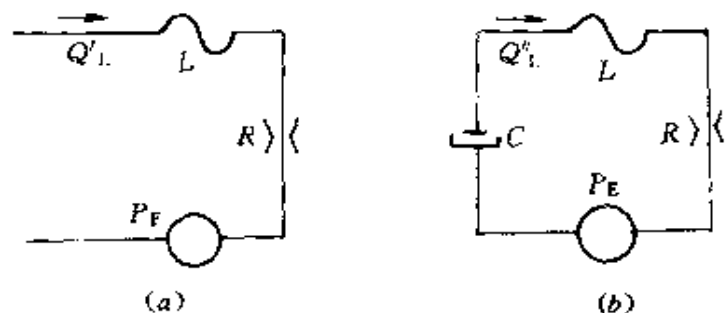


图 3-28

果。

在前面曾讲过,液势只存在于静止状态,一旦液动机启动后,液势就消失,因此液势只能作为一种初始条件来考虑,于是自由网络就可进一步简化为图 3-29 所示。液动机是由驱动液路驱动,当液动机为压力驱动和流量驱动时,其驱动网络如图 3-30 和图 3-31 所示,其中 R_s 为驱动液路的输出阻抗。

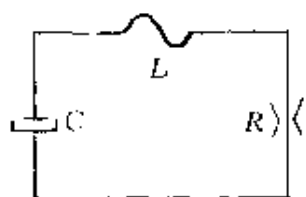


图 3-29

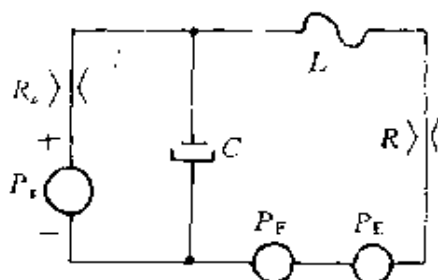


图 3-30

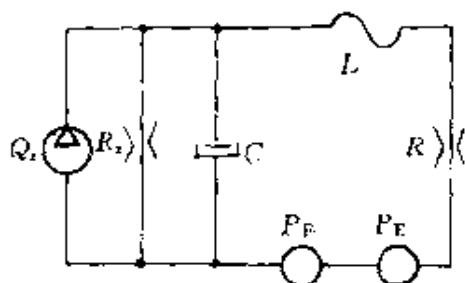


图 3-31

3.2.1 液动机的流量驱动

液动机在流量驱动情况下,驱动源为流量源。流量源的输出阻抗比起液动机的阻抗来说是很大的,因此可视为断路,于是其网络如图 3-32 所示。由图可得:

$$Q_s = Q_c + Q_L \quad (3-172)$$

$$\begin{aligned} P_c &= P_L + RQ_L + P_F + P_E \\ &= L \frac{dQ_L}{dt} + RQ_L + P_F + P_E \end{aligned} \quad (3-173)$$

而

$$Q_c = C \frac{dP_c}{dt} \quad (3-174)$$

将式(3-173)和式(3-174)代入式(3-172),得:

$$LC \frac{d^2 Q_L}{dt^2} + RC \frac{dQ_L}{dt} + C \frac{dP_F}{dt} + C \frac{dP_E}{dt} + Q_L = Q_z \quad (3-175)$$

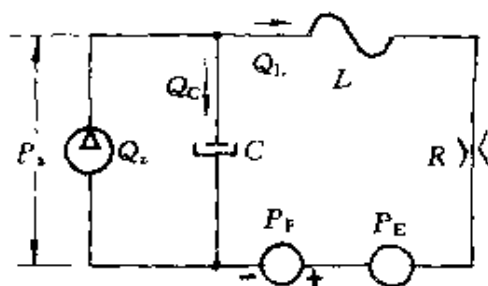


图 3-32

为了讨论方便起见,设 $P_F = 0$, 这不影响对问题的讨论,则式(3-175)成为:

$$\frac{d^2 Q_L}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ_L}{dt} + \frac{1}{LC} Q_L = \frac{1}{LC} Q_z - \frac{1}{L} \frac{dP_E}{dt} \quad (3-176)$$

式(3-176)表示的微分方程的解为下列两个独立方程的解之和:

$$\frac{d^2 Q_L}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ_L}{dt} + \frac{1}{LC} Q_L = \frac{1}{LC} Q_z - \frac{1}{L} \frac{dP_E}{dt} \quad (3-177)$$

$$\frac{d^2 Q_L'}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ_L'}{dt} + \frac{1}{LC} Q_L' = 0 \quad (3-178)$$

即

$$Q_L = Q_L + Q_L' \quad (3-179)$$

式中 Q_L ——稳态流量,指在流量源 Q_z 的作用下,液感上所产生的流量;

Q_L' ——无外作用液源情况下,液感上的自由流量。

式(3-178)是液动机的自由振荡的方程式,其网络(自由网络)如图 3-29 所示。式(3-177)是液动机在驱动液路作用下作受迫运动的方程式。在恒定流量驱动的情况下,有:

$$\frac{d^2 Q_L'}{dt^2} = 0, \frac{dQ_L'}{dt} = 0, P_F = 0 \quad (3-180)$$

则式(3-177)的解为:

$$Q_L' = Q_L \quad (3-181)$$

这时的受迫网络如图 3-33 所示。

设方程(3-178)的解为:

$$Q_L' = Q_a e^{\alpha t} \quad (3-182)$$

则

$$\frac{dQ_L'}{dt} = \alpha Q_a e^{\alpha t} \quad (3-183)$$

$$\frac{d^2 Q_L'}{dt^2} = \alpha^2 Q_a e^{\alpha t} \quad (3-184)$$

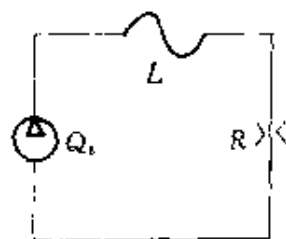


图 3-33

将式(3-182)~(3-184)代入方程(3-178)并消去公因子,便得到下列二次代数方程:

$$\alpha^2 + \frac{R}{L}\alpha + \frac{1}{LC} = 0 \quad (3-185)$$

满足式(3-185)的 α , 应同时使函数 $Q_a e^{\alpha t}$ 满足微分方程(3-178)。解方程得:

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \\ &= -\frac{1}{2T} \pm j\omega_n \end{aligned} \quad (3-186)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (3-187)$$

$$T = \frac{L}{R} \quad (3-188)$$

近似取 $\omega_n = \sqrt{1/LC}$, 那么, ω_n 是一个实数, 称为液动机的固有频率, 因而 α 是一对共轭复数。于是式(3-182)中的指数函数 $e^{\alpha t}$ 可以写为下列形式:

$$\begin{aligned} e^{\alpha t} &= e^{-\frac{1}{2T}t} \cdot e^{\pm j\omega_n t} \\ &= e^{-\frac{1}{2T}t} (\cos \omega_n t \pm j \sin \omega_n t) \end{aligned} \quad (3-189)$$

因而式(3-178)的解为:

$$\begin{aligned} Q_L' &= Q_a e^{-\frac{1}{2T}t} (Q_1 \cos \omega_n t + Q_2 \sin \omega_n t) \\ &= Q_0 e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \end{aligned} \quad (3-190)$$

式中幅值 Q_0 和起始相角 γ , 起着两个积分常数的作用, 它们应由具体问题的起始条件所决定。由式(3-190)可知, 自由流量的幅值是

按指数律减小的调和振荡,如图 3-34 所示。

将式(3-190)与式(3-181)代入式(3-179),得式(3-176)的解为:

$$\begin{aligned} Q_L &= Q'_L + Q''_L \\ &= Q_z + Q_0 e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \end{aligned} \quad (3-191)$$

式(3-191)称为流量驱动方程。

3.2.2 液动机的压力驱动

液动机在压力驱动下,驱动源为压力源。当采用限压式压力驱动液路时,其输出阻抗 R_z 比起液动机的阻抗来讲是很小的,因此可忽略不计,于是其受迫网络如图 3-35 所示。但当采用桥式驱动液路时,其输出阻抗不能被忽略,这时在 R 中应包含有 R_z ,压力驱动的受迫方程为:

$$L \frac{dQ'_L}{dt} + RQ'_L = P_z \quad (3-192)$$

当 $Q'_L = \text{常数}$ 时,

$$\frac{dQ'_L}{dt} = 0 \quad (3-193)$$

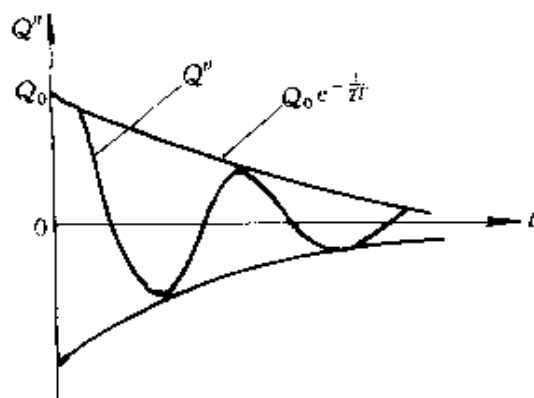


图 3-34

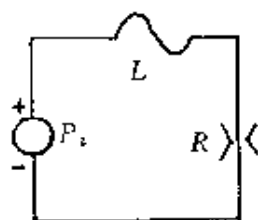


图 3-35

则有:

$$Q'_L = \frac{P_z}{R} \quad (3-194)$$

其自由方程为:

$$\frac{d^2 Q_L}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ_L}{dt} + \frac{1}{LC} Q_L = 0 \quad (3-195)$$

将式(3-190)和式(3-194)代入式(3-179),得液感 L 上的流量为:

$$Q_L = Q_L + Q_L'' \\ = \frac{P_z}{R} + Q_0 e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \varphi) \quad (3-196)$$

式(3-196)称为压力驱动方程。

3.3 爬 行

在液动机的低速驱动中,经常会出现停停走走,走走停停的“爬行”现象,严重影响着液动机驱动的精度。

图 3-36 示出了液动机爬行的物理过程。对图中的各状态说明如下:

a 状态:物体 A 与平台之间为干摩擦接触,这时作用腔压力 P_z

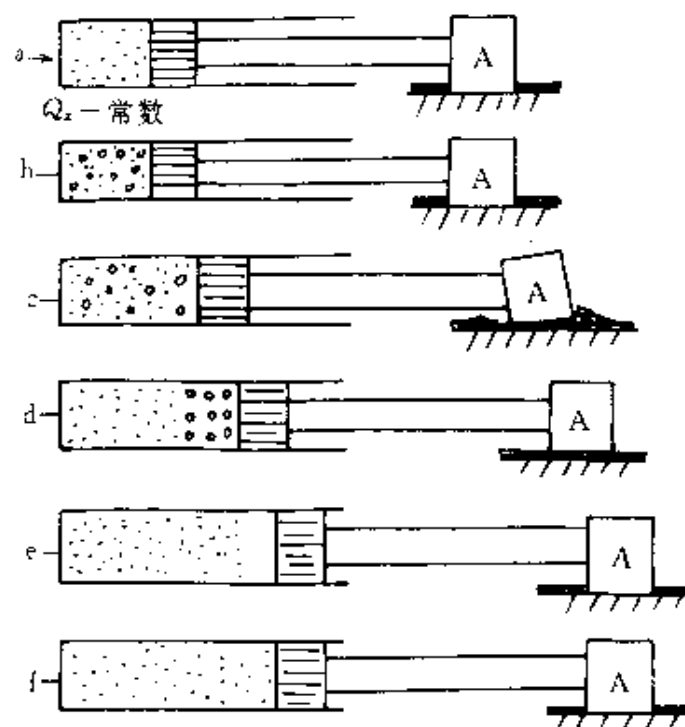


图 3-36

$< P_k$ (液势), 压力油不能克服干摩擦力形成的液势, 故不能推动物体 A 移动。

b 状态: 随着作用腔油液的压缩 (液容 C 充液), 作用腔的压力迅速升高, 直至 $P_z = P_k$ 。物体 A 处于要动又未动的时刻。图中以“()”示意由压缩而增加的油液量。

c 状态: $P_z > P_k$, 物体 A 开始运动。由于油楔作用, 油液进入了物体 A 的下面, 使干摩擦变成了液体摩擦, 液势消失。

d 状态: 液势的消失, 引起液压缸负载迅速下降, 作用腔油液膨胀 (液容 C 放液), 使作用腔压力 P_z 迅速下降。由于液容 C 的放液, 使物体 A 进一步被加速。

e 状态, 这时物体 A 的速度所需之流量, 大于液源供给的流量 Q_z , 于是在作用腔内形成暂时的真空 (液容 C 上出现负压)。

f 状态: 在液容 C 的负压作用下, 物体 A 被制动而停止运动。这时液源的全部流量 Q_z 用来向液容充液, 以消除其负压。当充液所需的时间 t_f 大于卸油时间 t_k 时, 即 $t_f > t_k$, 则物体 A 与平台之间又成为干摩擦接触, 使消失了的液势重新出现, 又回到 a 状态, 暂态过程又重新开始。

于是暂态过程就以周期为 t_k 周而复始地循环进行着, 不能进入稳定的常态。液动机就处于走走停停, 停停走走的爬行运动状态之中, 如图 3-37 所示。爬行是液动机驱动暂态过程中的一种现象。

由上述可知, 产生液动机驱动的爬行, 是液容 C 上产生负压。液容 C 上的压降 P_c 为:

$$P_c = P_L + RQ_L \quad (3-197)$$

液感上的压降为:

$$P_L = L \frac{dQ_L}{dt}$$

将式(3-191)代入上式, 得:

$$\begin{aligned} P_L = & -Q_0 L \omega_n e^{-\frac{1}{2T}t} \sin(\omega_n t + \gamma) \\ & - Q_0 \frac{L}{2T} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \end{aligned} \quad (3-198)$$

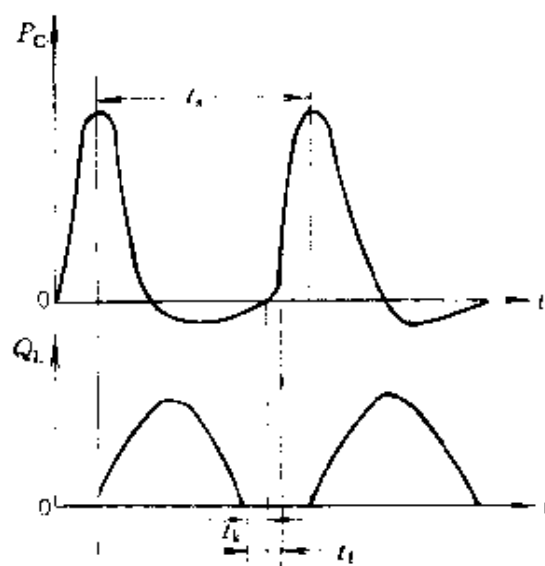


图 3-37

在流量驱动情况下,将式(3-198)和式(3-191)代入式(3-197),得:

$$\begin{aligned}
 P_c &= RQ_2 + RQ_0 e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \\
 &\quad - Q_0 L \omega_n e^{-\frac{1}{2T}t} \sin(\omega_n t + \gamma) \\
 &= Q_0 \frac{L}{2T} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \\
 &= RQ_2 - Q_0 L \omega_n e^{-\frac{1}{2T}t} \sin(\omega_n t + \gamma) \\
 &\quad + Q_0 \frac{R}{2} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \\
 &= RQ_2 + Q_0 \frac{R}{2} e^{-\frac{1}{2T}t} \left[\cos(\omega_n t + \gamma) - \frac{2}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\omega_n t + \gamma) \right] \\
 &= RQ_2 + Q_0 \frac{R}{2} \sqrt{\left[\frac{2}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \right]^2 + 1} \cdot e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma + \delta)
 \end{aligned} \tag{3-199}$$

式中的 δ 由下式确定:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3-200}$$

设 $\theta = \gamma + \delta$, 则式(3-199)成为:

$$P_c \approx RQ_z + Q_0 R e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \theta) \quad (3-201)$$

其初始条件为:

$$t = 0 \text{ 时, } P_c = P_E \quad (3-202)$$

式中 P_E — 液动机负载中的液势。

将式(3-202)代入式(3-201),得:

$$P_E = RQ_z + Q_0 R \cos \theta$$

即

$$Q_0 = - \frac{RQ_z - P_E}{R \cos \theta} \quad (3-203)$$

将式(3-203)代入式(3-201),得:

$$P_c = RQ_z - \frac{RQ_z - P_E}{\cos \theta} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \theta) \quad (3-204)$$

当 P_c 出现负值时($t=t_r$),则有(不考虑起始相角 θ):

$$RQ_{zr} - (RQ_{zr} - P_E) e^{-\frac{1}{2T}t_r} \cos \omega_n t_r < 0 \quad (3-205)$$

整理后得:

$$\left(1 - \frac{P_E}{RQ_{zr}} \right) e^{-\frac{1}{2T}t_r} \cos \omega_n t_r > 1$$

$$1 - \frac{e^{-\frac{1}{2T}t_r}}{\cos \omega_n t_r} > \frac{P_E}{RQ_{zr}}$$

则有:

$$Q_{zr} > \frac{1}{1 - \frac{e^{-\frac{1}{2T}t_r}}{\cos \omega_n t_r}} \cdot \frac{P_E}{R}$$

或者可以写成如下形式:

$$Q_{zr} = a \cdot \frac{P_E}{R}, 0 < a < 1 \quad (3-206)$$

式中 Q_{zr} — 当液势消失的瞬间液动机前冲的速度所需之流量。

当 Q_{zr} 和液动机正常运行的速度所需之流量比小于或等于 1 时,即

$$\frac{Q_{zr}}{Q_z} \leq 1 \quad (3-207)$$

液动机液容 C 上就不会产生负压,即不会出现爬行。当

$$\frac{Q_z}{Q_z} > 1$$

时,液动机液容 C 上就会产生负压,即会出现爬行。

$$Q_z \geq [Q_z]_{\min} \quad (3-208)$$

将式(3-206)代入式(3-207),得:

$$[Q_z]_{\min} = a_1 \frac{P_r}{R} \quad (3-209)$$

式中 $[Q_z]_{\min}$ ——不产生爬行时最小允许流量;

a_1 ——常数,可由实验(经验)来确定。

在设计中尽可能满足式(3-208),不然液动机的驱动就会产生爬行。为要获得 $[Q_z]_{\min}$ 值,由式(3-209)可知,就要增大 R 的值和减小 P_r 的值。另外,消除液容 C 上负压的时间(液容 C 充液时间)越长,则越易产生爬行。

$$P_c = \frac{1}{C} \int Q_c dt = \frac{1}{C} \int Q_z dt = \frac{Q_z}{C} t_t$$

或

$$t_t = \frac{C}{Q_z} P_c \quad (3-210)$$

由此可知, Q_z 越小, C 越大,则充液时间 t_t 越长,就越易产生爬行。因此,减小液容 C 值是有利的。

当爬行一旦产生,为消除爬行,可加设背压 P_n 。这时式(3-204)成为(不考虑起始相角 θ):

$$P_c = RQ_z - (RQ_z - P_r)e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t + P_n \quad (3-211)$$

只要在任何情况下 $P_c > 0$,就不会产生爬行,即

$$RQ_z - (RQ_z - P_r)e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t + P_n > 0$$

或

$$P_n > P_r \left[\frac{Q_z}{P_r/R} - 1 \right] e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t - RQ_z \quad (3-212)$$

将式(3-209)代入式(3-212),得:

$$P_n > P_E \left(a, \frac{Q_z}{[Q_z]_{\max}} - 1 \right) e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t - RQ_z$$

当 $\frac{[Q_z]_{\min}}{Q_z} > 1$ 时, 近似取

$$P_n > -P_E e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t - RQ_z$$

当 R 很小而 L 很大时(最易产生爬行的工况), 近似取

$$P_n > -P_E e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t$$

使不等式右边具有最大值, 即

$$-\frac{\cos \omega_n t}{e^{\frac{1}{2T}t}} = 1$$

则有:

$$P_n > P_E \quad (3-213)$$

也就是说, 所加的背压大于液动机驱动的液势时, 液动机的驱动就不会产生爬行, 如图 3-38 所示。其液路如图 3-39 和图 3-40 所示。图 3-39 中, 液阻 R_1 就是为了增加液动机背压而设置的。图 3-40 是将稳流液路放在液动机的回油路上, 形成背压, 这种方式称为回油调节, 相应的图 3-39 称为进油调节。

当液动机有外载力时, 则液动机液容 C 上的压力, 除式(3-204)所示的压力外, 还要加上由外载力引起的压力 P_F , 即成为(不考虑起始相角 θ):

$$P_C = RQ_z - (Q_z R - P_E) e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_n t + P_F \quad (3-214)$$

比较式(3-211)和式(3-214)可知, P_F 和 P_n 所起的作用是相同的, 只要 P_F 足够大($P_F > P_E$)时, 则 P_C 就不会出现负值, 也就是说, 不会产生爬行。

为要从根本上消除爬行, 可采用压力驱动。在压力驱动情况下, 液感 L 上的压降为:

$$P_L = L \frac{dQ_L}{dt}$$

将式(3-196)代入上式, 得:

$$P_L = -Q_0 L \omega_n e^{-\frac{1}{2T}t} \sin(\omega_n t + \gamma)$$

$$= Q_0 \frac{L}{2T} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma) \quad (3-215)$$

将式(3-196)和式(3-215)代入式(3-197),并整理后得:

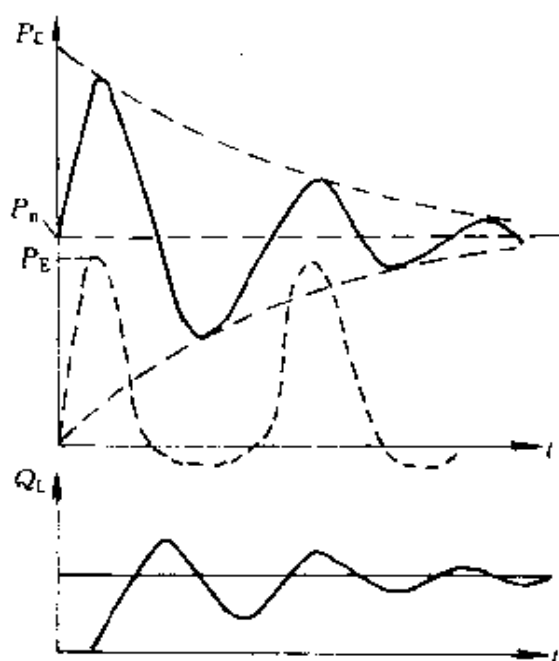


图 3-38

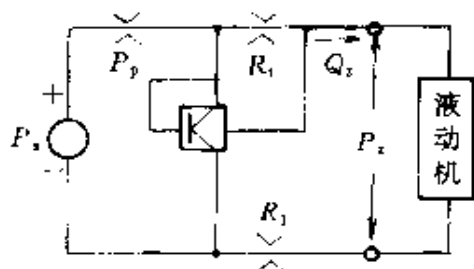


图 3-39

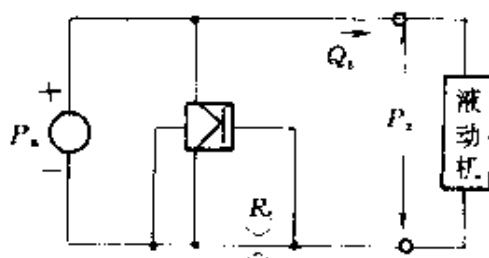


图 3-40

$$P_c = P_z - Q_0 L \omega_n e^{-\frac{1}{2T}t} \sin(\omega_n t + \gamma) \\ + Q_0 \frac{R}{2} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma)$$

$$= P_z + Q_0 \frac{R}{2} \sqrt{\left[\frac{2}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \right]^2 + 1} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_n t + \gamma + \delta)$$

$$(3-216)$$

式中的 δ 由下式确定:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

设 $\theta = \gamma + \delta$, 当 R 的值近似等于波阻 $\sqrt{L/C}$ 时, 则式(3-216)成为:

$$P_c \approx P_z + Q_0 R e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (3-217)$$

其初始条件为:

$$t = 0 \text{ 时, } P_c = P_K \quad (3-218)$$

将式(3-218)代入式(3-217), 得:

$$P_K = P_z + Q_0 R \cos \theta$$

即

$$Q_0 = -\frac{P_z - P_K}{R \cos \theta} \quad (3-219)$$

将式(3-219)代入式(3-217), 得:

$$\begin{aligned} P_c &= P_z - \frac{P_z - P_K}{\cos \theta} e^{-\frac{1}{2T}t} \cos(\omega_0 t + \theta) \\ &\approx P_z \left[1 - \left(1 - \frac{P_K}{P_z} \right) e^{-\frac{1}{2T}t} \cos \omega_0 t \right] \end{aligned} \quad (3-220)$$

$$\text{而} \quad P_K/P_z < 1, e^{-\frac{1}{2T}t} \leq 1, \cos \omega_0 t \leq 1 \quad (3-221)$$

则由式(3-220)可知, P_c 的变化范围为:

$$P_c \geq P_c \geq 0 \quad (3-222)$$

也就是说, P_c 不可能出现负值, 如图 3-41 所示。

压力驱动暂态过程的物理机制如图 3-42 所示。

a 状态: 物体 A 与平台之间为干摩擦接触, 这时作用腔压力 $P_z < P_K$, 压力油不能克服干摩擦力形成的液势, 故不能推动物体 A 移动;

b 状态: 随着作用腔油液的压缩(液容充液), 作用腔的压力迅速升高, 直至 $P_z = P_K$ 。物体 A 处于要动又未动的时刻;

c 状态: $P_z > P_K$, 使物体 A 开始运动。由于油楔作用, 油液进入了物体 A 的下面, 使干摩擦变成了液体摩擦, 液势消失。

d 状态: 液势的消失, 引起液压缸负载迅速下降, 作用腔油液

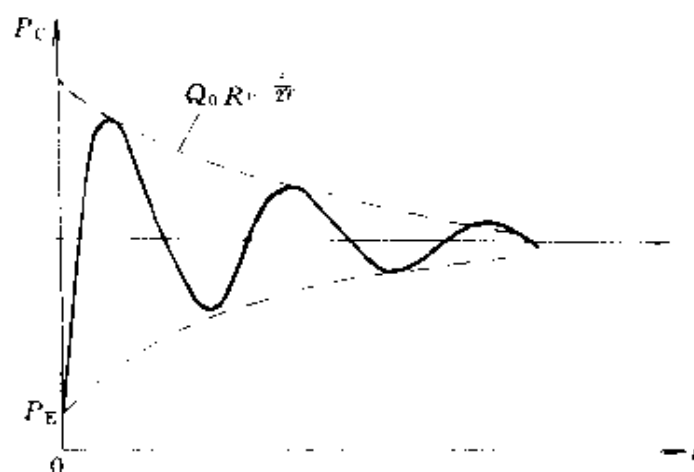


图 3-41

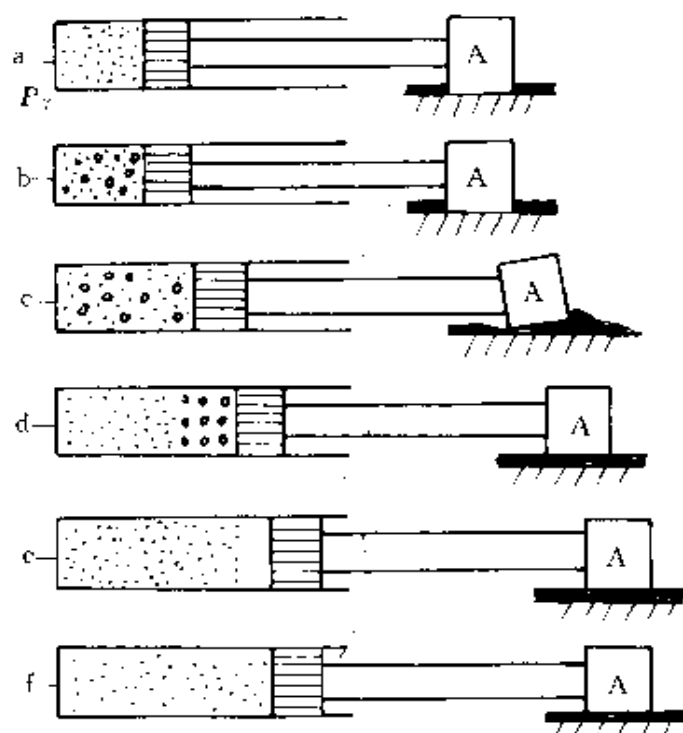


图 3-42

膨胀(液容 C 放液),使作用腔压力 P_1 迅速下降。由于液容 C 的放液,使物体 A 进一步被加速。

e 状态:液容 C 放液的结果,物体 A 被加速到一定速度;

f 状态:流入液压缸作用腔的流量增加,使物体保持在这一定的速度运行,暂态过程结束,开始进入稳定状态。

在超低速驱动时, P_z 非常接近 P_x , 这时有可能出现爬行, 为消除爬行要加设背压 P_b , 可采用如图 3-43 所示之压力驱动液路, 其输出压力是液阻桥输出的一个压差, 即

$$P_z = P_x - P_b \quad (3-223)$$

式中

$$P_x = \phi\left(\frac{d_6}{d_5}\right) P_s, P_b = \phi\left(\frac{d_4}{d_3}\right) P_s \quad (3-224)$$

将式(3-224)代入式(3-223), 得:

$$P_z = P_x - P_b = \left[\phi\left(\frac{d_6}{d_5}\right) - \phi\left(\frac{d_4}{d_3}\right) \right] P_s \quad (3-225)$$

只要通过电液管调节 P_s , 就可获得足够小的 P_z 值, 如图 3-44 所示。由于输出端背压 P_b 足够高, 因此在超低速压力驱动液动机时, 仍可产生爬行。

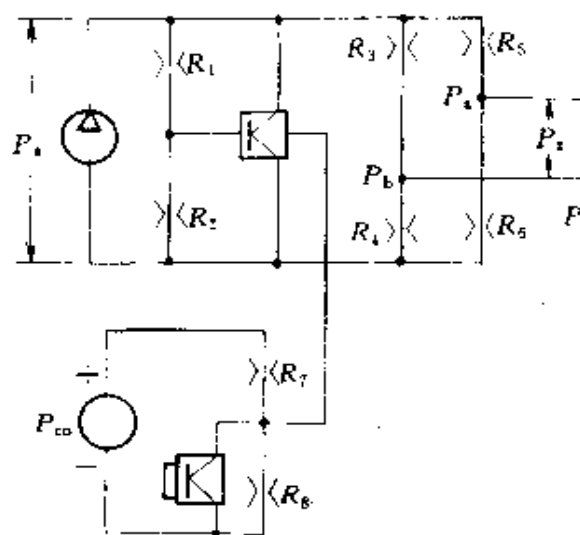


图 3-43

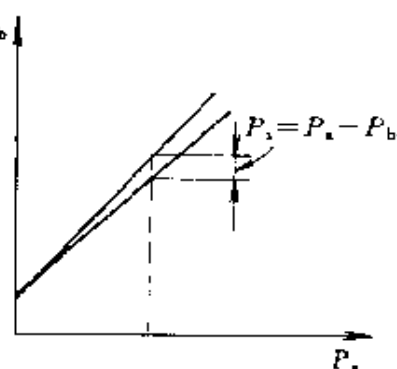


图 3-44

第 4 章 电液集成块液压系统

电液集成块液压系统的框图如图 4-1 所示。它由以下部分组成:液源;编号的 EPROM (□EPROM);CPU 电路;液路总成;液动机;传感器。

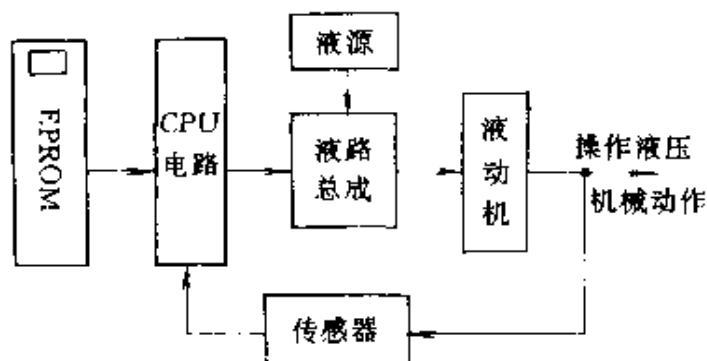


图 4-1

人们将自己的意愿,通过程序的形式,存于□EPROM 中,CPU 按照□EPROM 中的程序,通过液路总成来驱动液动机动作。传感器将液动机输出的被控物理量信号反馈到 CPU 电路,CPU 根据□EPROM 中制定好的方案来处理反馈信号,校正液动机的输出量,以满足一定精度的要求。液路由电液集成块和液路板组成,它们之间的连接是由连接器来完成,将液路用连接器连接在一起就构成系统中的液路总成。

4.1 过压保护液路

液源输出的是流量,其压力是由外界液路阻力引起的。不管外界阻力如何变化,其输出的流量是一定的,但其输出油液的压力是

随外界阻力的变化而变化。遇到的外界阻力越大,液源输出油液的压力越高,会使系统的硬件遭到破坏。因此对于液源必须进行过压保护。过压保护有两种形式:限压过压保护和稳压过压保护。

4.1.1 限压液路

图 4-2 中,液管和液阻 R_1 、 R_2 构成限压过压保护液路,简称限压液路,它的作用是使液压系统的压力 P_s 不超过一定值,不致使系统遭受破坏。比较图 3-8 和图 4-2,两者的差别仅是,前者的输出压力为可变,后者的输出压力为不可变。由图 3-11 所示之限压式压力驱动液路的输出特性曲线可得限压液路的输出特性曲线如图 4-3 所示。

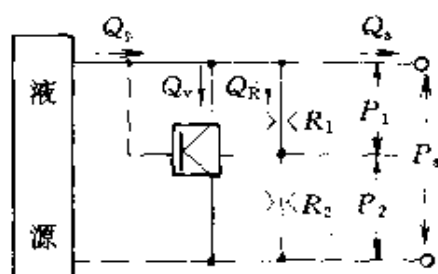


图 4-2

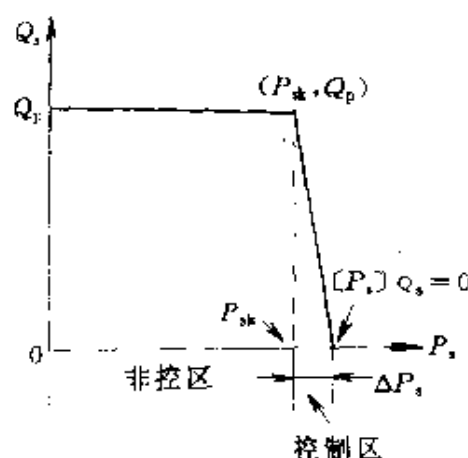


图 4-3

当 $P_1 < P_{kv}$ 时,液管是截止的,系统压力随外界压力的升高而升高。

当 $P_1 = P_{kv}$ 时,液路输出的压力为 P_{sk} ,它称为限压液路的启控压力。液路输出压力 P_s 继续升高时,

$$P_1 > P_{kv}$$

液管开始导通,对液源排出的油液进行旁路,系统压力随外界压力的升高而略有升高,此升高量 ΔP_s 称为限压液路输出压力的波动值。在设计中, P_{sk} 是作为限压液路输出压力的设计值, ΔP_s 是它的

误差。

由图 4-3 可得:

$$P_s = P_{sk} + \Delta P_s \quad (4-1)$$

又由图 4-2 得:

$$P_s = P_1 + P_2, P_1 = \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) P_s, P_2 = \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) P_s \quad (4-2)$$

将式(2-40)代入式(4-2)中,得:

$$P_s = \phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) P_s - \left(-0.933 \frac{d_2}{d_1} + 1.445\right) P_s$$

$$P_s = P_1 + P_2 = \left[\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) - 0.933 \frac{d_2}{d_1} + 1.445\right] P_s$$

或

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) - 0.933 \frac{d_2}{d_1} + 0.445 = 0 \quad (4-3)$$

由比函数 $\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)$ 所获得的压降 P_1 是被反馈到液管的输入端,当

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) P_s = P_{kv} \\ P_s &= P_{sk} \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

时,则有

$$\text{即} \quad \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{P_{kv}}{P_{sk}} \quad (4-5)$$

由式(4-5)可知,限压液路的启控压力 P_{sk} 与比函数 $\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)$ 成反比,也就是说, P_{sk} 与孔径比 $\frac{d_1}{d_2}$ 成正比。当孔径比 $\frac{d_1}{d_2}$ 增加时, P_{sk} 就增加;

当孔径比 $\frac{d_1}{d_2}$ 减小时, P_{sk} 也就减小。

将式(4-5)代入式(4-3),得

$$\frac{P_{kv}}{P_{sk}} - 0.933 \frac{d_2}{d_1} + 0.445 = 0 \quad (4-6)$$

整理后得

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{0.933}{\frac{P_{kv}}{P_{sk}} + 0.445} \quad (4-7)$$

取 $P_{sk} = 30$ 时, 则有

$$\frac{d_1}{d_2} \approx 2$$

当 $P_1 = \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)P_s > P_{kv}$ 时, 则有

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)P_s = P_{iv} + P_{kv}$$

或

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}P_{iv} + \frac{1}{\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}P_{kv} \\ &= P_{sk} + \Delta P_s \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中

$$P_{sk} = \frac{1}{\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}P_{kv} \quad (4-9)$$

$$\Delta P_s = \frac{1}{\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}P_{iv} \quad (4-10)$$

又由图 4-2 得:

$$Q_p = Q_v + Q_R + Q_s \quad (4-11)$$

而

$$Q_v = \frac{P_s}{R_v}, \quad Q_R = \frac{P_s}{R_1 + R_2} \quad (4-12)$$

将式(4-12)代入式(4-11)中, 得:

$$Q_p = \frac{P_s}{R_v} + \frac{P_s}{R_1 + R_2} + Q_s$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_1 + R_2} \right) P_s + Q_s \\
&= \frac{1}{R_z} P_s + Q_s
\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}
Q_s &= - \frac{1}{R_z} P_s + Q_p \\
&= - K_d d_v^2 \sqrt{P_s} + Q_p
\end{aligned} \tag{4-13}$$

$$R_z = R_v // (R_1 + R_2) \tag{4-14}$$

设 $R_{1+2} = R_1 + R_2$, 参考式(2-27), 则有:

$$d_{1+2} = \left[\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{4}} d_1$$

参考式(2-33)和式(4-14), 得

$$\begin{aligned}
d_z &= \sqrt{d_v^2 + d_{1+2}^2} \\
&= \sqrt{d_v^2 + \left[\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} d_1^2} \\
&= d_1 \sqrt{\left(\frac{d_v}{d_1} \right)^2 + \left[\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}
\end{aligned} \tag{4-15}$$

将式(4-15)代入式(4-13), 得:

$$Q_s = - K_d d_1^2 \left[\left(\frac{d_v}{d_1} \right)^2 + \left[\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right] \sqrt{P_s} + Q_p \tag{4-16}$$

当

$$Q_s = 0, \frac{d_v}{d_1} \gg 1, P_s = P_{sk} + \Delta P_s \tag{4-17}$$

时, ΔP_s 有最大值。将式(4-17)代入式(4-16)中, 近似有:

$$- K_d d_v^2 \sqrt{P_{sk} + \Delta P_s} + Q_p = 0$$

或

$$d_v = \sqrt{\frac{Q_p}{K_c \sqrt{P_{sk} + \Delta P_s}}} = \sqrt{\frac{Q_p}{K_d \sqrt{P_{sk} \left(1 + \frac{\Delta P_s}{P_{sk}}\right)}}} \quad (4-18)$$

将式(2-6)代入式(4-18)中,得:

$$\sqrt{P_{iv}} = \frac{1}{14.142} \sqrt{\frac{Q_p}{K_d \sqrt{P_{sk} \left(1 + \frac{\Delta P_s}{P_{sk}}\right)}}}$$

或

$$\begin{aligned} P_{iv} &= \frac{1}{(14.142)^2 K_d} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk} \left(1 + \frac{\Delta P_s}{P_{sk}}\right)}} \\ &\approx \frac{1}{(14.142)^2 \times 0.525} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \\ &= 0.00952 \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \\ &\approx 0.01 \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \end{aligned}$$

将上式代入式(4-10),得:

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \frac{1}{\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} P_{iv} \\ &= \frac{0.01}{\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \end{aligned} \quad (4-19)$$

将式(4-5)代入上式,得:

$$\Delta P_s = \frac{0.01}{\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.01}{P_{kv}} Q_p \sqrt{P_{sk}} \\
 &\approx 0.033 Q_p \sqrt{P_{sk}}
 \end{aligned} \quad (4-20)$$

由图 4-3 知,限压液路的输出阻抗为:

$$R_s = \frac{\Delta P_s}{Q_p}$$

将式(4-20)代入上式,得:

$$R_s = \frac{\Delta P_s}{Q_p} = 0.03 \sqrt{P_{sk}} \quad (4-21)$$

由式(4-21)可知,限压液路的输出阻抗随 P_{sk} 的增加而增加,减少而减少。

4.1.2 稳压液路

由上述可知,对于限压液路,其工作在非控区,即 $P_s \leq P_*$,而供电液转换液路用的液源输出压力要求稳定性好,这时液路是工作在控制区,即

$$P_{sk} \leq P_s \leq [P_s]_{Q_p=0}$$

这样的液路称为稳压过压保护液路,简称稳压液路。对于稳压液路要求其输出的压力波动很小,一般 ΔP_s 小于 0.2MPa。在工频情况下,一般电液转换液路液源输出的压力为 5MPa 以下。当 $P_{sk} = 3\text{MPa}$ 和 $Q_p = 15\text{L/min}$,按式(4-21)则有:

$$\Delta P_s = Q_p R_s = 15 \times 0.03 \sqrt{P_{sk}} = 0.8 \quad (4-22)$$

这样的液源压力波动,对于电液转换液路来说是大了。

对于稳压液路来说,应该有以下式成立:

$$P_{sk} = \frac{1}{\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} P_{kv} \quad (4-23)$$

$$\Delta P_s = \frac{0.01}{K_o \phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \quad (4-24)$$

也就是说, 当 $P_1 \leq P_{kv}$ 时, 则式 (4-23) 成立; 当 $P_1 > P_{kv}$ 时, 则式 (4-24) 成立。这样既可获得大的 P_{sk} 值, 又可得到小的 ΔP_s 值。满足式 (4-23) 和式 (4-24) 的液路为图 4-4 所示。

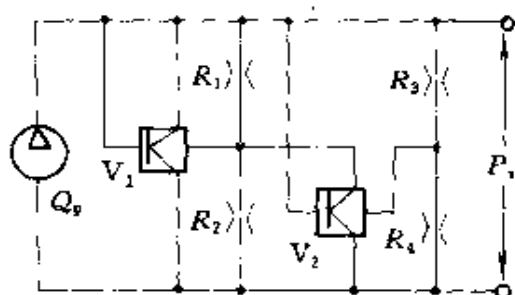


图 4-4

$$\text{当} \quad P_1 = \phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right) P_s = P_{kv} \quad (4-25)$$

时, 则下式成立 (液管 V_2 是截止的):

$$P_s = P_{sk} = \frac{P_{kv}}{\phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \quad (4-26)$$

当 $P_s > P_{sk}$ 时, 液管 V_2 是导通的, 此时下式成立:

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \frac{0.01}{K_s \phi \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \\ &\approx \frac{0.01}{\phi \left(\frac{d_1}{d_{v2}} \right)} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \end{aligned} \quad (4-27)$$

由式 (2-10) 得:

$$\begin{aligned} d_{v2} &= 20.429 P_{kv} \\ &= 20.429 \times \left[\phi \left(\frac{d_3}{d_4} \right) P_s - P_{kv} \right] \end{aligned} \quad (4-28)$$

由式 (4-27) 和式 (4-28) 可知, 只要适当选择 d_3 和 d_4 就可使 ΔP_s 在允许的范围内。

$$\Delta P_s \leq [\Delta P_s] (= 0.2 \text{ MPa}) \quad (4-29)$$

将式 (4-29) 代入式 (4-27), 得:

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_{v2}}\right) = \frac{0.01}{[\Delta P_s]} \cdot \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}}$$

取 $[\Delta P_s] = 0.1 \text{ MPa}$ 则

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_{v2}}\right) = 0.1 \frac{Q_p}{\sqrt{P_{sk}}} \quad (4-30)$$

取 $Q_p = 15 \text{ L/min}$, $P_{sk} = 3 \text{ MPa}$, 将此值代入式(4-30), 得:

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_{v2}}\right) = 0.1 \frac{15}{\sqrt{3}} = 0.866$$

由图 2-18 查得:

$$\frac{d_1}{d_{v2}} = 0.635$$

取 $d_1 = 0.5$, 则

$$d_{v2} = 0.787 (< 1.287) \quad (4-31)$$

因此式(4-28)成立。由式(4-28)得:

$$\begin{aligned} \phi\left(\frac{d_3}{d_4}\right) &= \frac{d_{v2} + 20.429 P_{kv}}{20.429 P_s} \approx \frac{P_{kv}}{P_s} \approx \frac{P_{kv}}{P_{sk}} \\ &= \frac{0.3}{3} = 0.1 \end{aligned}$$

由图 2-18 查得:

$$\frac{d_3}{d_4} = 1.725$$

取 $d_4 = 0.2$, 则有:

$$d_3 = 1.725 \times 0.2 = 0.345$$

取 $d_3 = 0.35$ 。

4.2 液路总成

图 4-5 是一个简单的电液集成块液压系统图。在图中,除了液源、液动机、传感器、CPU 电路和 EPROM 之外,剩下的部分称为液路总成,它是由电液集成块和液路板叠加在一起构成的。当然,

这种叠加不是任意的,而是有规律的。这种有规律的叠加称为功能块及其界面的设计。

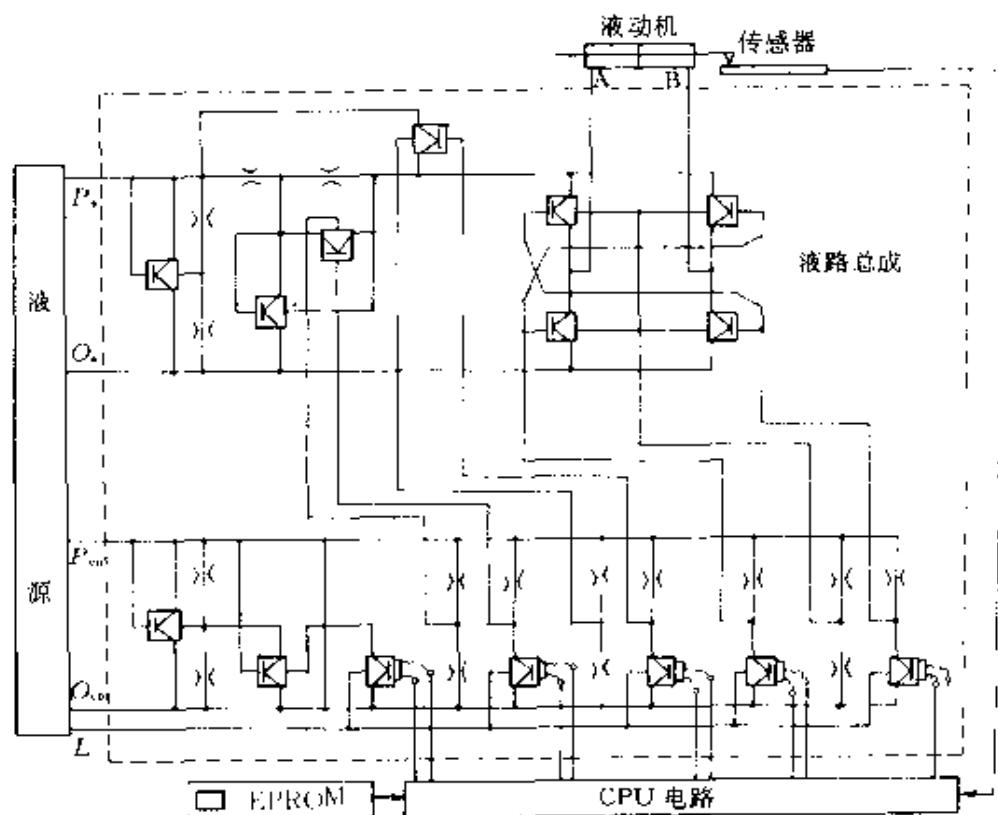


图 4 5

4.2.1 功能块

电液集成块只提供了控制元件,其本身是不具有功能的。只有当电液集成块中的控制元件,按照一定的液路连接起来后,才具有一定的功能。液路是制作在与电液集成块相分离的液路板上。液路板有两个面——有效面和非有效面。液路板的有效面上设有油槽和液阻座,液阻座的结构如图 4-6 所示。油槽将电液集成块中的元件按功能块液路图连接起来,并同一块电液集成块叠加后,就形成功能块的内部结构。

现以图 4-7 所示之液路图为例,其液路板的设计过程为如下:

1. 元件分配。将液路图中的液管和电液管,按电液集成块上

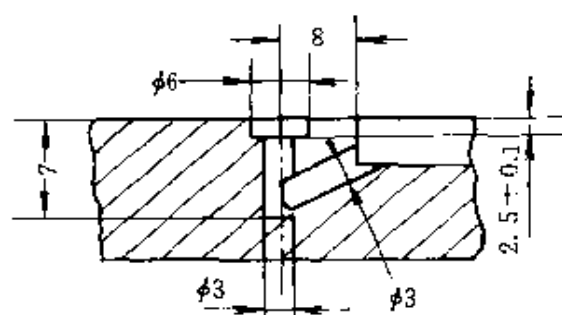


图 4-6

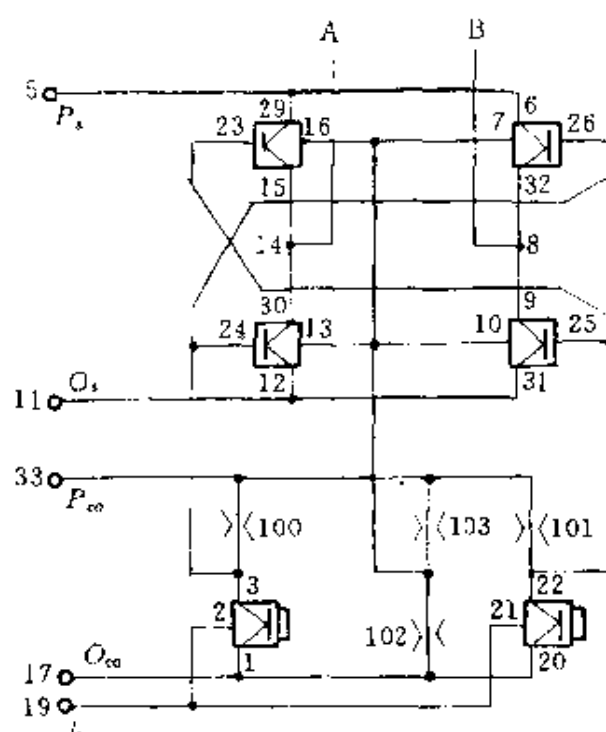


图 4-7

孔的编号(图 4-11),注上端脚号(见图 4-7);

2. 画出液路板总草图。在液路板草图上,将这些端脚,按液路图(图 4-7)用连线连接起来(见图 4-8),此图称为液路板总草图;

3. 拆图。将液路板总草图拆成几个液路板分草图,供每个液路板分草图上没有连线的十字交叉,如图 4-9 所示。

4. 画出液路板制作图纸。液路板制作图纸是根据液路板分草图画出的,如图 4-10 所示。在液路板上有很多孔,孔的编号在 100 以下者为标准孔,其标准孔的位置尺寸见图 4-11 和图 4-12。图 4-11

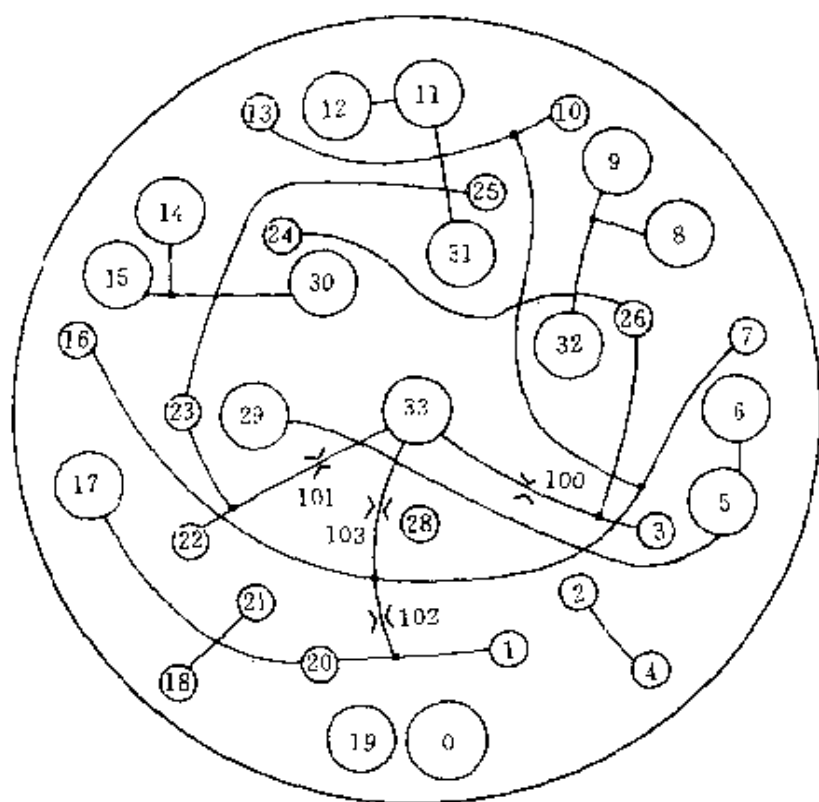


图 4-8

是电液集成块有效面上孔的位置尺寸,图 4-12 是液路总成座上标准孔的位置尺寸。孔的编号在 100 以上者为非标准孔,由设计者设定,但相同编号的孔必须对准在同一位置上。编号为 33 和 0 号的孔,可作为制作液路板时的定位孔。

液路板的制作尺寸和精度要求,如图 4-13 所示,其制作时应注意以下几点:

1. 油槽与油槽、孔与油槽、孔与孔之间的间隔(密封面)不得小于 5mm;
2. 与电液集成块非有效面相接触的液路板有效面上,在两个 A 圆(见图 4-14 所示)区域内,不得有油槽通过;
3. 液路板上所有棱边不得倒角,要保持锐边,但要去毛刺。

液路板的叠加秩序为图 4-15 所示。图 4-10(a)液路板的非有效面叠加于电液集成块的有效面上,b 液路板的非有效面叠加于 a 液路板的有效面上,c 液路板的非有效面叠加于 b 液路板的有效

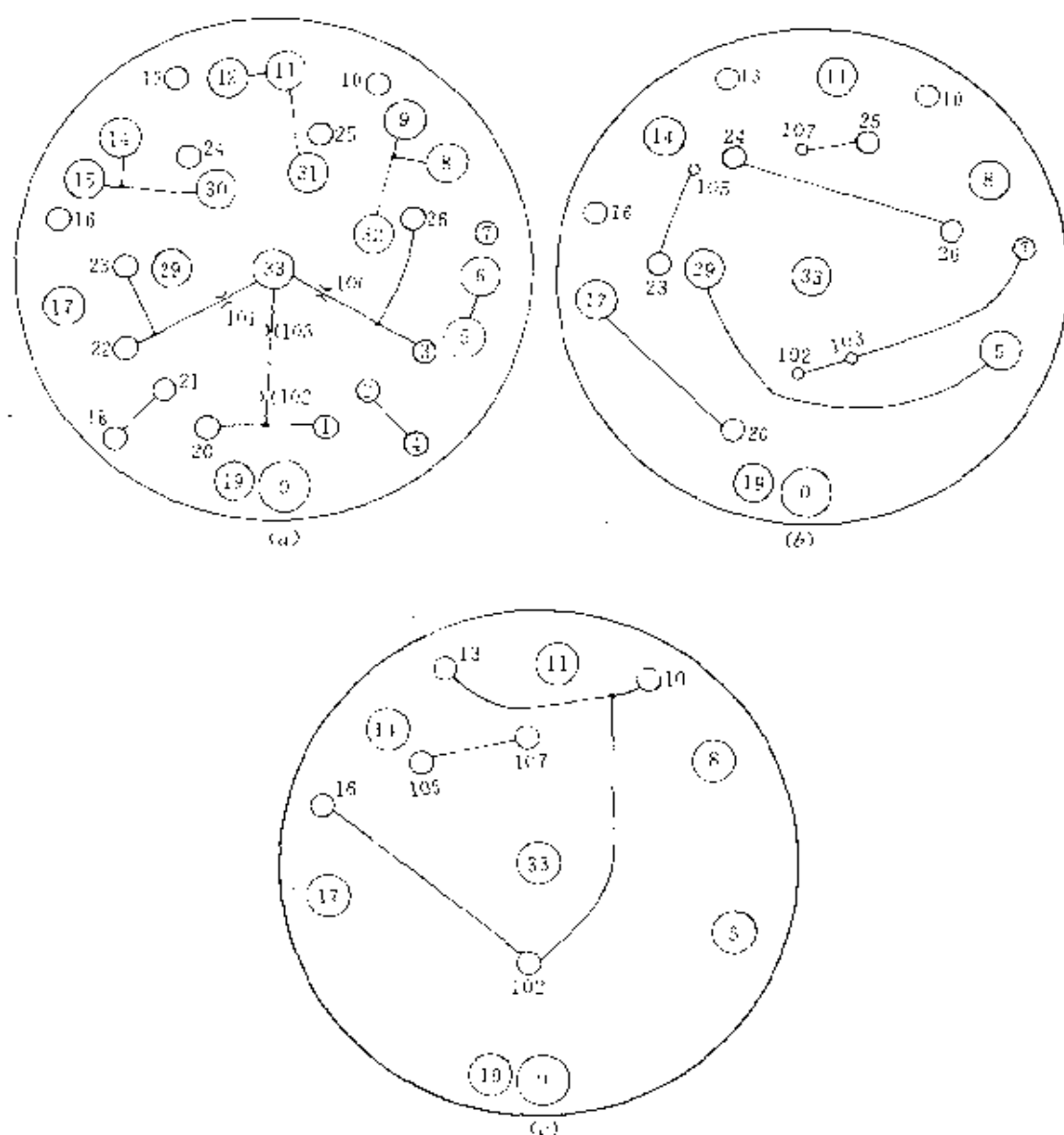


图 4-9

面上。一块电液集成块和图 4-10 所示的三片支持液路板叠加在一起,就构成一个功能块。该功能块具有桥式驱动液路的功能。

综上所述,在叠加时,液路板的非有效面同电液集成块的有效面相结合,因此,在一个功能块内,液路板一定叠加在电液集成块的有效面上。在液路板之间叠加时,一片液路板的有效面同另一片液路板的非有效面相结合。一个电液集成块,也只能是一个电液集成块,和其支持液路板,构成功能块的内部结构。电液集成块与其

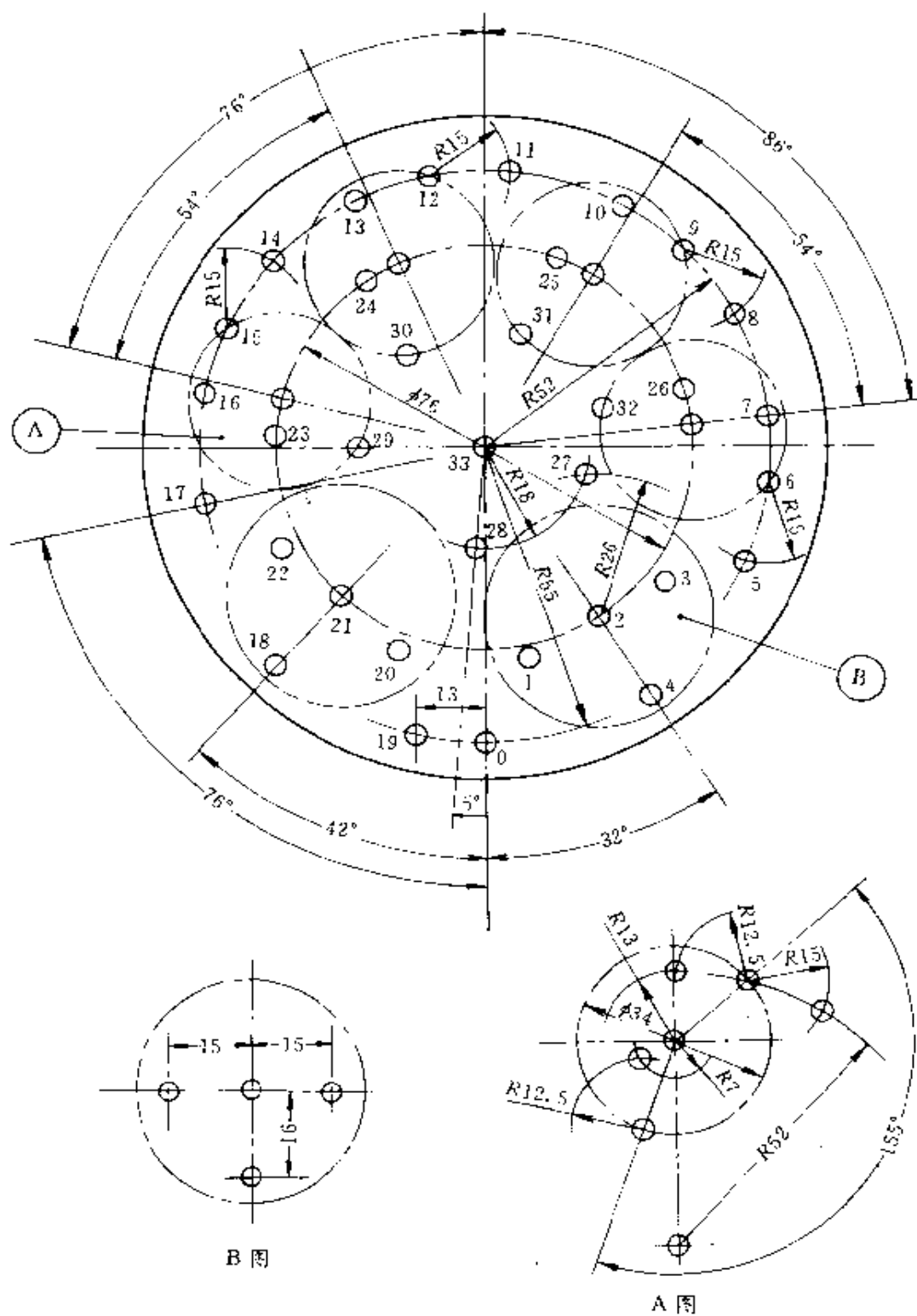


图 4-11

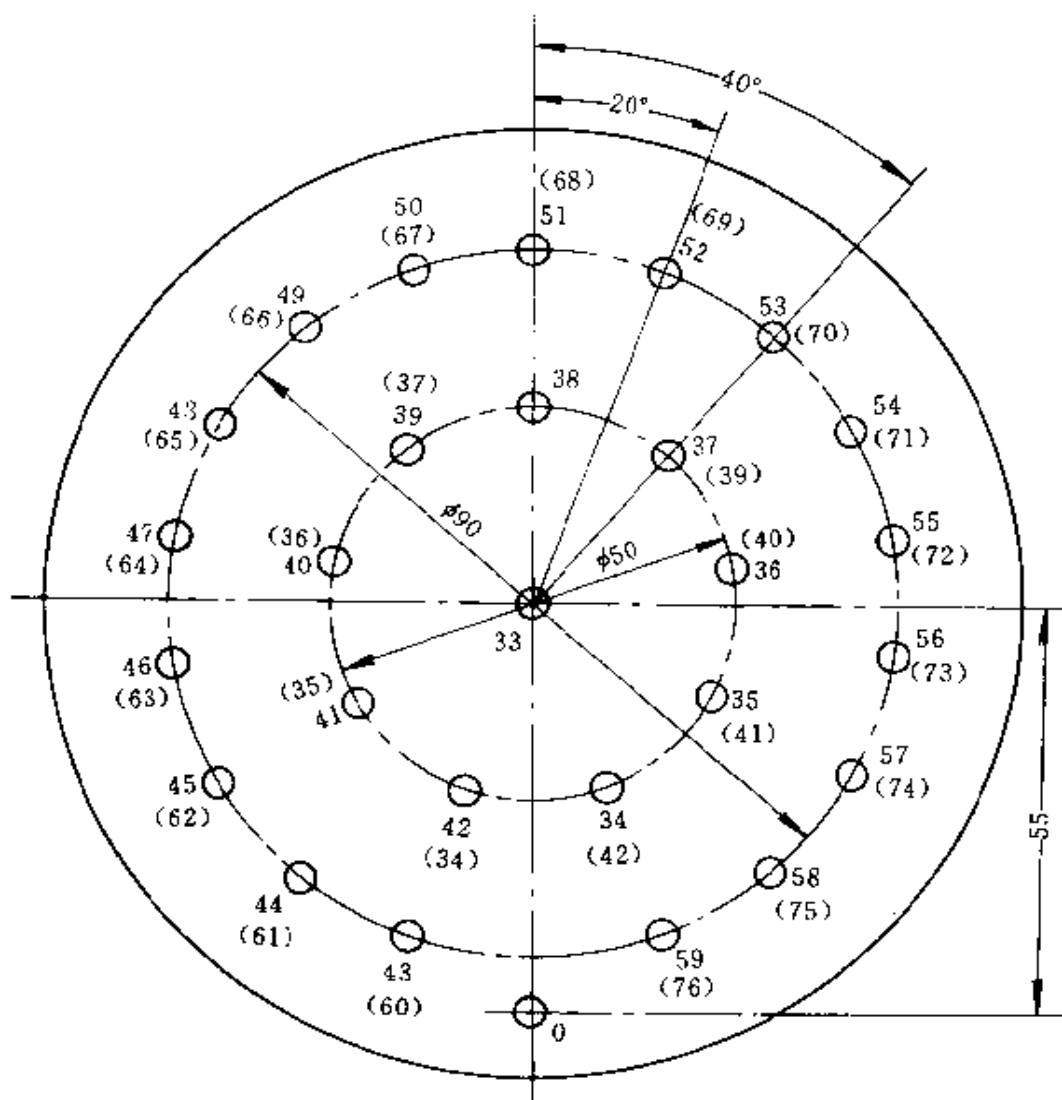


图 4-12

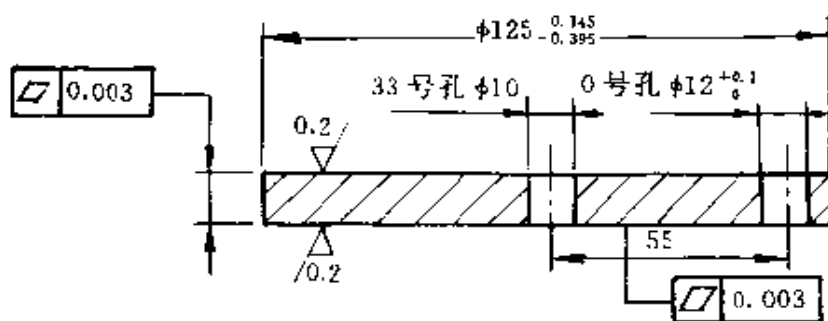


图 4-13

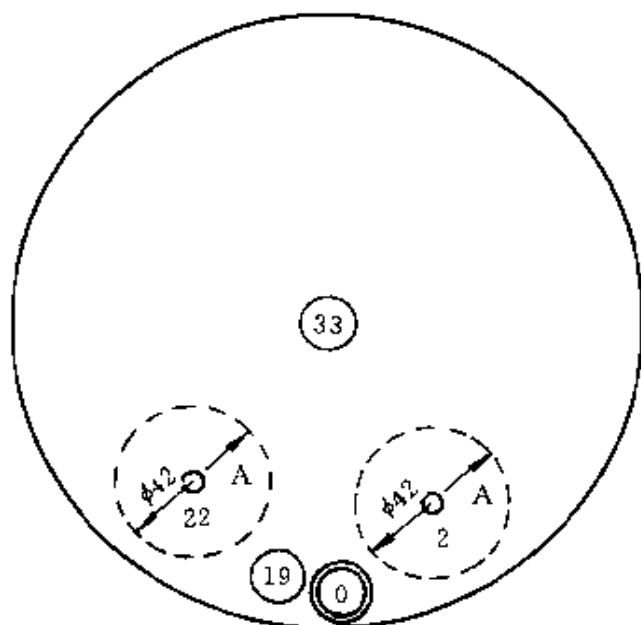


图 4-14

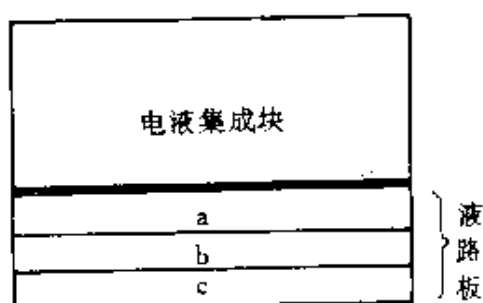


图 4-15

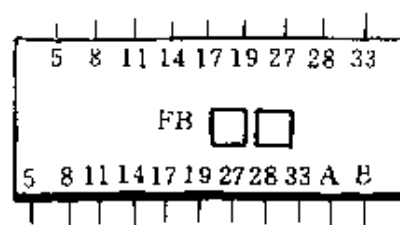


图 4-16

受限制。由这些界面通道、功能块有效面和非有效面形成功能块的外部结构。

不同的电液集成块液压系统可以由为数不多的几个常用的功能块组成,这些功能块称为标准功能块。标准功能块之外的非标准功能块,称为用户功能块。也就是说,标准功能块可以在市场上买到,当这些标准功能块不能满足用户的要求时,用户可自行设计功能块。用户自行设计的功能块用图 4 17 所示符号来表示,方框中的数码是用户功能块的编号,由用户自行编排。

4.2.2 标准功能块

在标准功能块内部,对于同一功能块来说,相同脚标的通道是相通的。脚标的数码就是电液集成块有效面上标准孔的编号。对于标准功能块内部的非标准孔输出信号的通道用英文字母(A, B...)编号。标准功能块的编号冠有“FB”字母,紧跟“FB”后面的第一位数码有1、2、3称为控制码,其表示的意义是:

“1”——压力控制液路;

“2”——流量控制液路;

“3”——桥式液路。

第二位数码表示某控制液路中具有不同功能的分类码。

现对标准功能块分别介绍如下:

1. FB10

(1) 外部结构及其功能

FB10 功能块的外部结构如图 4-18 所示。图中:

5、8、14、27——备用通道;

11——压力驱动液路的回油端 O_1 ;

17——稳压液路的回油端 O_{∞} ;

19——内部泄油,直接接油箱;

28——稳压液路的高压输出端 P_{∞} ;

33——压力驱动液路的高压输出端 P_1 。

该功能块有一个压力驱动液路和一个可调稳压液路。

(2) 内部结构及其原理

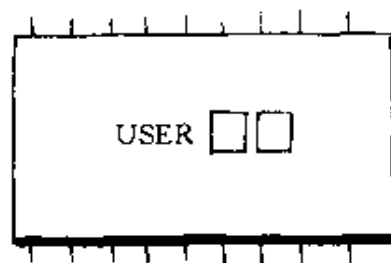


图 4-17

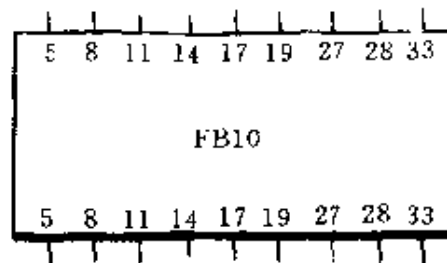


图 4-18

FB10 功能块的内部结构如图 4-19 所示。可调稳压液路由液管 V_1 和 V_2 , 液阻 R_1 、 R_2 、 R_3 以及电液管 E_1 组成。压力驱动液路由液管 V_3 和 V_4 , 液阻 R_5 、 R_6 、 R_4 、 R_7 以及电液管 E_2 组成。适当选择 R_4 和 R_5 的当量孔径, 可限制压力驱动液路的最大输出压力, 起到过压保护的作用。

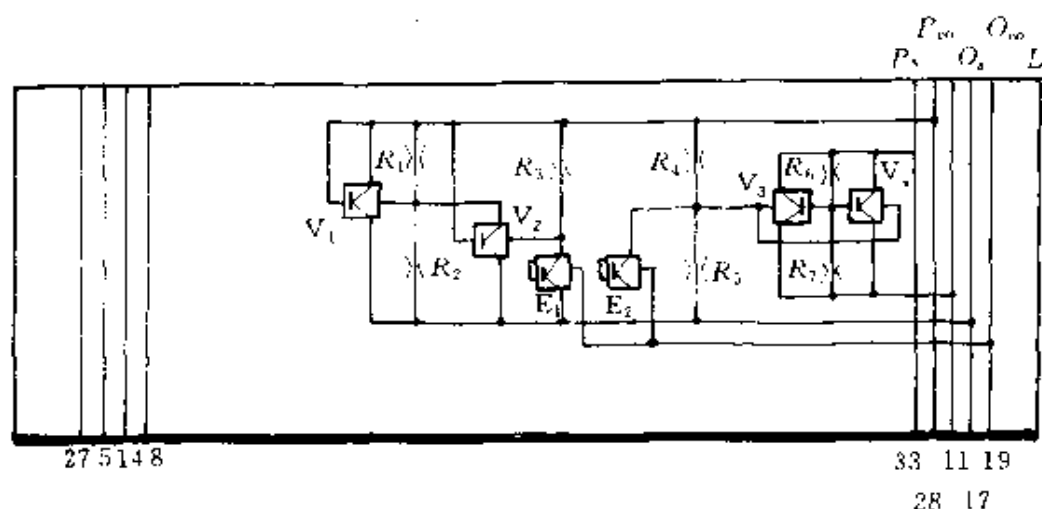


图 4-19

(3) 用途

稳压液路输出的稳定压力, 供电液转换液路使用。压力驱动液路输出的压力, 用来驱动液动机。其同液源的连接如图 4-20 所示, 一般都采用双泵液源, 也可用单泵液源, 如图 4-21 所示。但这时稳压液路输出的稳定压力 P_o 易受驱动压力波动的影响。为减小这种影响, 必须加设液阻 R_o 和 R_i 。因此, 只有在控制精度要求不很高的情况下, 才采用单泵液源与其相配。

2. FB11

(1) 外部结构及其功能

FB11 功能块的外部结构如图 4-22 所示, 图中:

A——甲压力驱动液路的回油端 O_{s1} ;

B——甲压力驱动液路的高压输出端 P_{s1} ;

5、8、14、27——备用通道;

11——乙压力驱动液路的回油端 O_{s2} ;

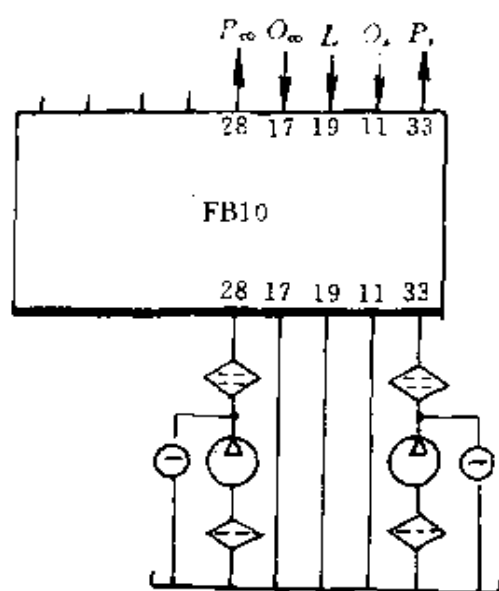


图 4-20

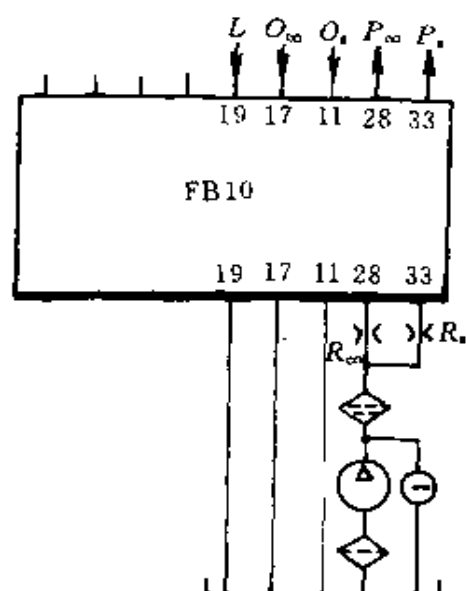


图 4-21

- 17——稳压液路的回油端 O_{∞} ;
 19——内部泄油, 直接接油箱;
 28——稳压液路高压供油端 P_{∞} ;
 33——乙压力驱动液路的高压输出端 P_{s2} 。
 该功能块有两个相同的压力驱动液路。

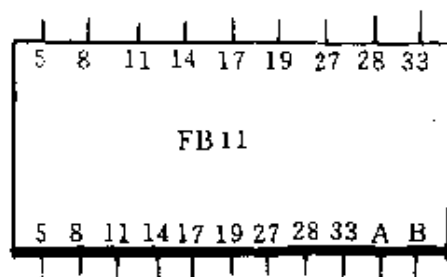


图 4-22

(2) 内部结构及其原理

FB11 功能块的内部结构如图 4-23 所示。

由液管 V_1 、 V_2 , 液阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和电液管 E_1 组成一个压力驱动液路; 另一个压力驱动液路是由液管 V_3 、 V_4 , 液阻 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 和电液管 E_2 组成。它们是两个独立的压力驱动液路, 分别由两个液压泵提供流量。其电液转换液路的压力源 P_{∞} 则由别的功能块提

供。

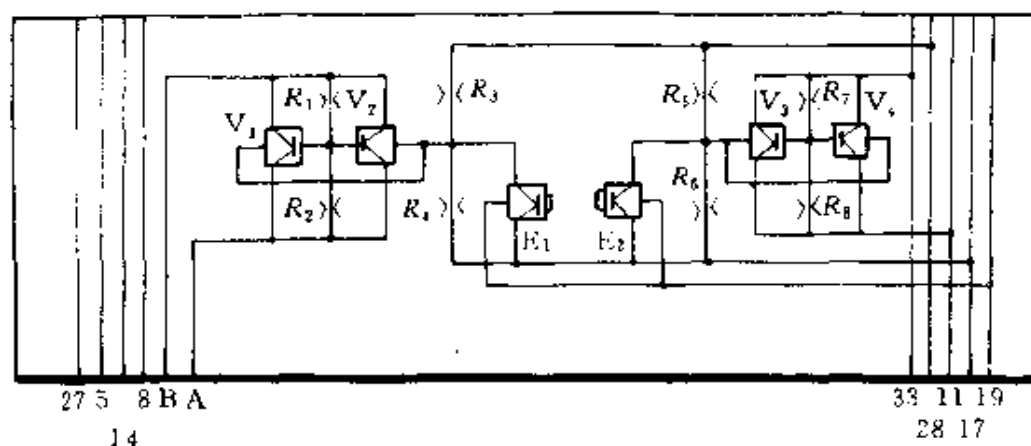


图 4-23

(3) 用途

FB11 功能块用于多液动机,且为控制精度要求较高的液压系统。这时每个液动机由一个独立的压力驱动液路来驱动。图 4-24 中的 P_{s1} 和 P_{s2} 分别独立地驱动两个液动机动作。

3. FB12

(1) 外部结构及其功能

FB12 功能块的外部结构如图 4-25 所示,图中:

A——补油液路的回油端;

5、8、14、27——备用通道;

11——压力驱动液路的回油端 O_s ;

17——稳压液路的回油端 O_{ss} ;

19——内部泄油,直接接油箱;

28——稳压液路的高压输出端 P_{ss} ;

33——压力驱动液路的高压输出端 P_s 。

该功能块用于液动机的闭路驱动中。它有一个补油液路、一个驱动液路和一个稳压液路。

(2) 内部结构及其原理

FB12 功能块的内部结构如图 4-26 所示。

在闭路驱动中,液动机的回油直接进入液压泵的吸油口,形成

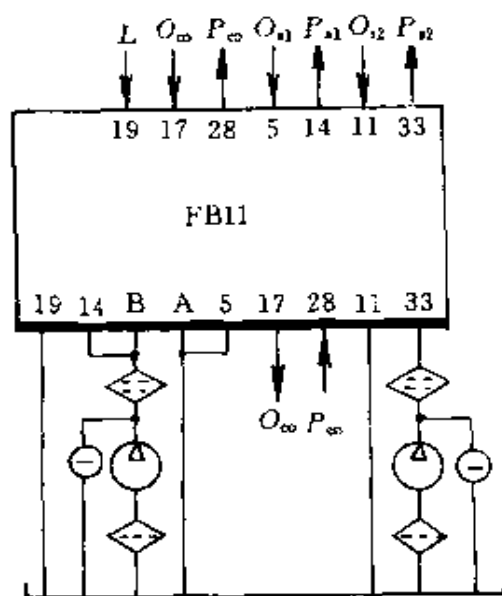


图 4-24

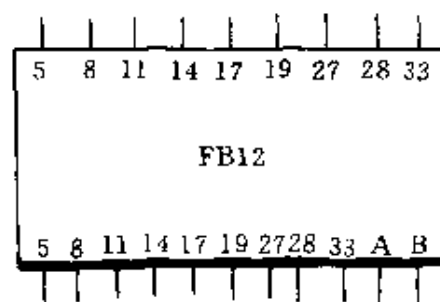


图 4-25

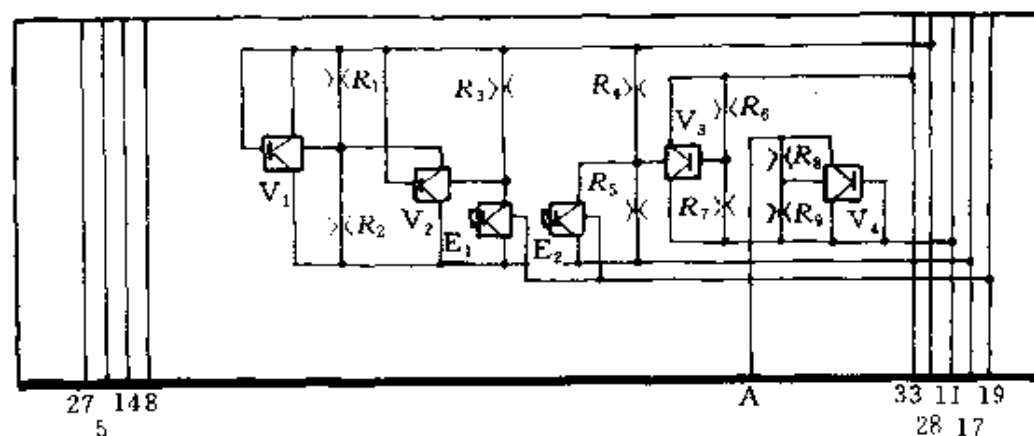


图 4-26

一个闭路。由于液机(液压泵和液动机)的内部泄油,闭路中需要补油。补油液路是由液管 V_4 和液阻 R_8 、 R_9 组成。压力驱动液路是由液管 V_3 、液阻 R_1 、 R_5 、 R_6 、 R_7 和电液管 E_2 组成。液压泵输出的油液进入压力驱动液路的高压端 33 通道,去推动液动机动作。液动机的回油进入 11 通道而流回液压泵的吸油口。补油液路的压力油直接进入 11 通道进行补油。当 11 通道的压力超过一定值后(一般为 1MPa 以下),液管 V_4 就导通,进行溢流,实现限压过压保护。

(3) 用途

主要用于闭路的压力驱动,作为补油和液源输出油液的压力控制用,如图 4-27 所示。

4. FB13

(1) 外部结构及其功能

FB13 功能块的外部结构如图 4-28 所示,图中:

A、B——甲压力放大液路的输出端 P_1 ;

C、D——乙压力放大液路的输出端 P_2 ;

5、8、14、27——备用通道;

11——压力放大液路和减压液路共用的回油端,也是液源的高压回油端 O_1 ;

17——液源的稳压回油端 O_{co} ;

28——液源的稳压供油端 P_{co} ;

33——液源的高压供油端 P_s 。

该功能块有两个减压液路和两个压力放大液路。

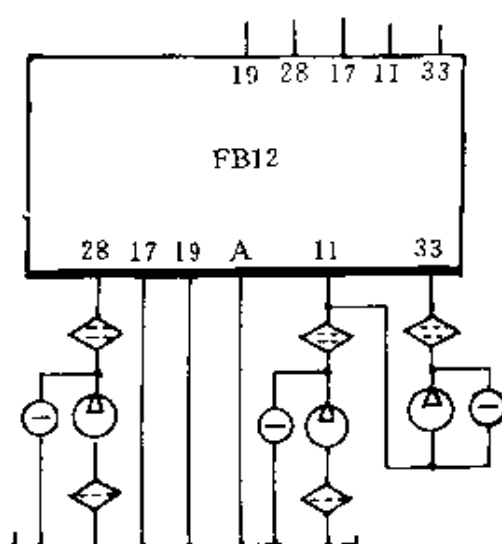


图 4-27

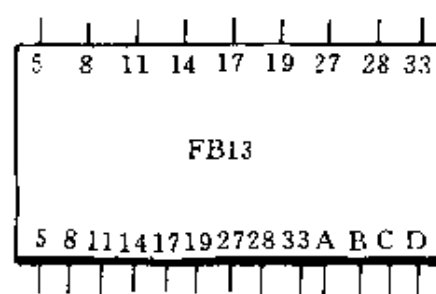


图 4-28

(2) 内部结构及其原理

FB13 功能块的内部结构如图 4-29 所示。

两个减压液路分别由液管 V_2 、液阻 R_5 、 R_6 、 R_7 和液管 V_3 、液阻

R_8 、 R_9 、 R_{10} 组成。两个减压液路输出的压力,供两个压力放大液路使用。两个压力放大液路分别由液管 V_1 、液阻 R_4 和液管 V_4 、液阻 R_{11} 组成。液管 V_1 和 V_4 分别受由电液管 E_1 、液阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和电液管 E_2 、液阻 R_{14} 、 R_{13} 、 R_{12} 组成的电液转换液路控制。减压液路和电液转换液路的液源压力,由外界提供。

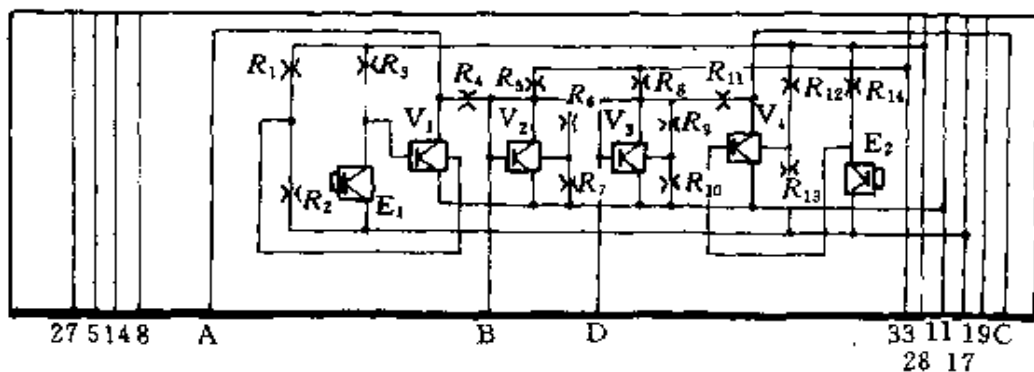


图 4-29

(3) 用途

FB13 功能块主要用于组合机床上的定位夹紧油缸的控制,如图 4-30 所示。

5. FB20

(1) 外部结构及其功能

FB20 功能块的外部结构如图 4-31 所示,图中:

A——稳流液路和快速液路的公共输出端 Q_s ;

B——背压液路的进油端;

5、8、14、27——备用通道;

11——稳流液路和背压液路的公共回油端 O_s ;

17——稳压液源的回油端 O_{co} ;

19——内部泄油,直接接油箱;

28——液源的稳压供油端 P_{co} ;

33——液源的高压供油端 P_s 。

该功能块有一个两级低速稳流液路,一个快速液路和一个背压液路。

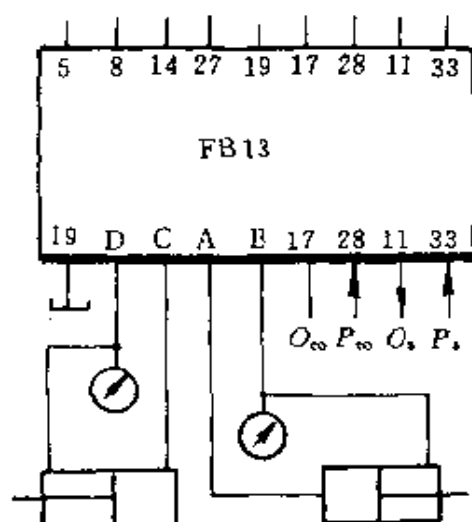


图 4-30

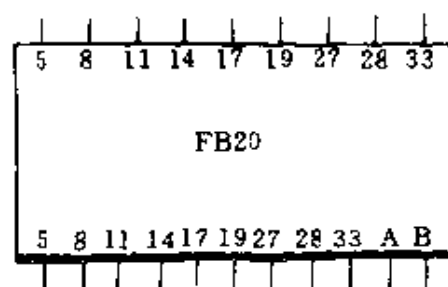


图 4-31

(2) 内部结构及其原理

FB20 功能块的内部结构如图 4-32 所示。

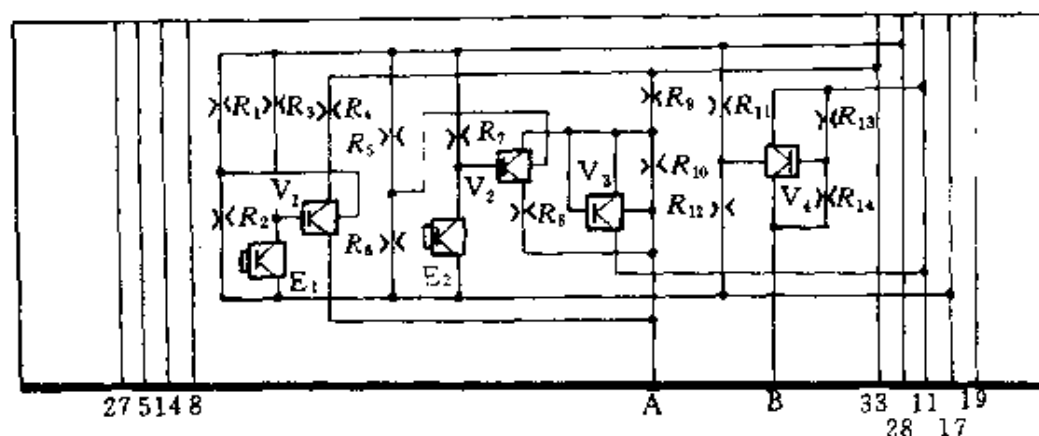


图 4-32

二级低速稳流液路是由液管 V_2 、 V_3 和液阻 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 、 R_{10} 组成。其中 V_3 是起稳流作用的液管。当液管 V_2 截止时, 输出流量由液阻 R_{10} 来确定; 当液管 V_2 导通时, 输出流量由液阻 R_2 和 R_{10} 并联来确定。电液管 E_2 和液阻 R_7 组成电液转换液路, 其输出压力控制液管 V_2 的导通和截止。液动机在低速运行时易产生爬行。为了防止爬行必须加背压, 背压的加载是由液管 V_4 和液阻 R_{11} 、 R_{12} 、

R_{13} 、 R_{14} 组成。液动机的回油路接B通道。液动机的背压被液阻 R_{13} 和 R_{14} 分压后,部分背压被反馈到液管 V_4 的h端,只要适当选择液阻 R_{13} 和 R_{14} ,即可获得所需之背压。当不需要加载背压时,可将液阻 R_{12} 和 R_{14} 取掉,这时液管 V_4 就处于常开状态。快速液路是由液管 V_1 和液阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 以及电液管 E_1 组成。当液管 V_1 导通时,就为快速液路输出;当液管 V_1 截止时,为低速稳流液路输出。液管 V_1 由电液管 E_1 控制。液阻 R_4 是在多液动机共用一个液源时,为减小互相干扰而设置的。

(3)用途

FB20 功能块常用于运行精度较高的、二工进的组合机床上,如图 4-33 所示。

6. FB21

(1)外部结构及其功能

FB21 功能块的外部结构如图 4-34 所示,图中:

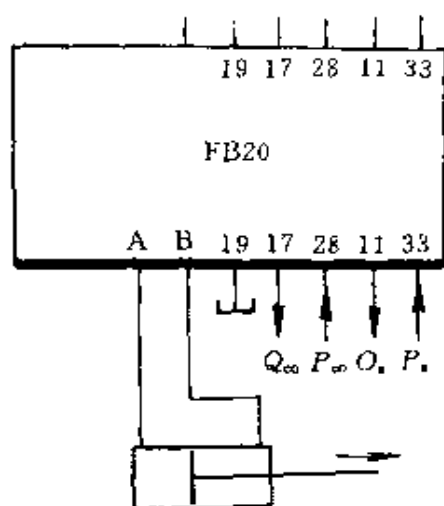


图 4-33

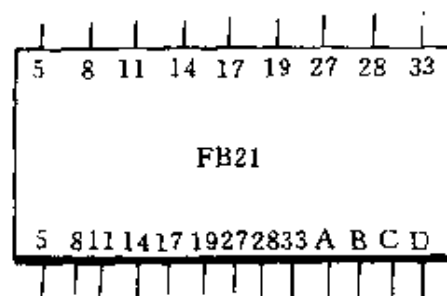


图 4-34

- A——控制端,可输出一个控制信号;
- B——一级稳流液路的稳流输出端 Q_s ;
- C——背压液路的进油端;
- D——背压卸载控制信号输入端;
- 5、8、14、27——备用通道;

- 11——稳流液路和快速液路的公共回油端,也是液源的高压回油端 O_s ;
 17——液源的稳压回油端 O_{co} ;
 19——内部泄油,直接接油箱;
 28——液源的稳压供油端 P_{co} ;
 33——液源的高压供油端 P_s 。

该功能块有一个一级稳流液路,一个快速液路,一个背压加载卸载液路和一个控制端。

(2) 内部结构及其原理

FB21 功能块的内部结构如图 4-35 所示。

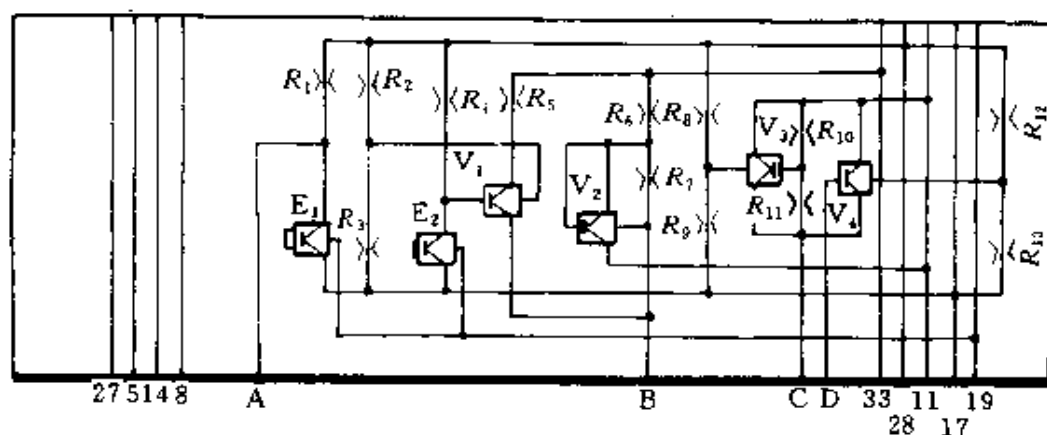


图 4-35

液管 V_1 、液阻 R_4 和电磁阀 E_2 组成快进液路。在液管 V_1 上串联着一个液阻 R_5 , 其作用是当几个快进液路共用一个液源时, 可减少快进液路之间的互相干扰。液管 V_2 和液阻 R_6 、 R_7 组成一级稳流液路。背压加载液路是由液管 V_3 和液阻 R_8 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 组成。液压机的回油由 C 通道进入, 通过 V_3 进入 11 通道而流回油箱。适当选择液阻 R_{10} 和 R_{11} 就可获得不同的背压。在快进中不需要背压时, 可以打开液管 V_4 来实现。

(3) 用途

将 A 通道和 D 通道连通, 液管 V_4 就受电磁阀 E_1 的控制。油缸快进时, 电磁阀 E_1 得电, 液管 V_4 导通; 油缸工进时, 电磁阀 E_1 失

电,液管 V_1 截止。当在整个工作过程中都不需要加载背压时,可将液阻 R_{11} 和 R_9 取掉,或是将 D 和 33 相连。这时, A 通道是一个控制信号的输出端,可作他用。例如,将其同 FB30 功能块的 E 通道相连时,可以实现 FB30 功能块中桥式液路的差动控制。

7. FB30

(1) 外部结构及其功能

FB30 功能块的外部结构如图 4-37 所示,图中:

A——桥式驱动液路的高压输入端;

B——桥式驱动液路的回油端;

C、D——桥式驱动液路的输出端,接液动机,可互换;

E——差动运行时的控制信号的输入端;

F——液源的稳压液阻分压输出压力;

5、8、14、27——备用通道;

11——液源的高压回油端 O_s ;

17——液源的稳压回油端 O_{∞} ;

19——内部泄油,直接接油箱;

28——液源的稳压供油端 P_{∞} ;

33——液源的高压供油端 P_s 。

该功能块有一个桥式驱动液路。

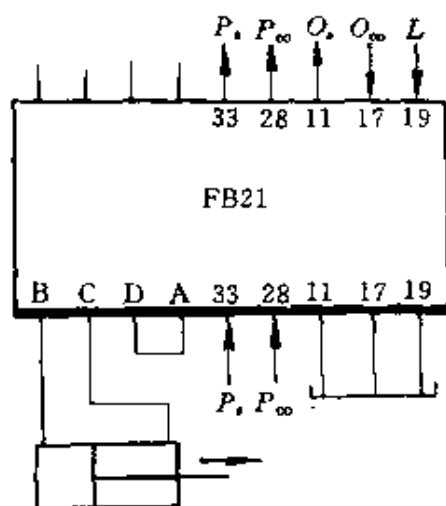


图 4-36

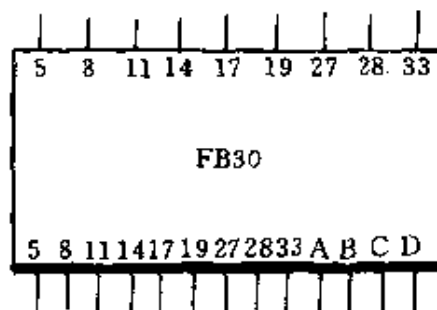


图 4-37

(2) 内部结构及其原理

FB31 功能块的内部结构如图 4-38 所示。本功能块原理在桥式驱动液路一节中已有详述,在此不再讲了。

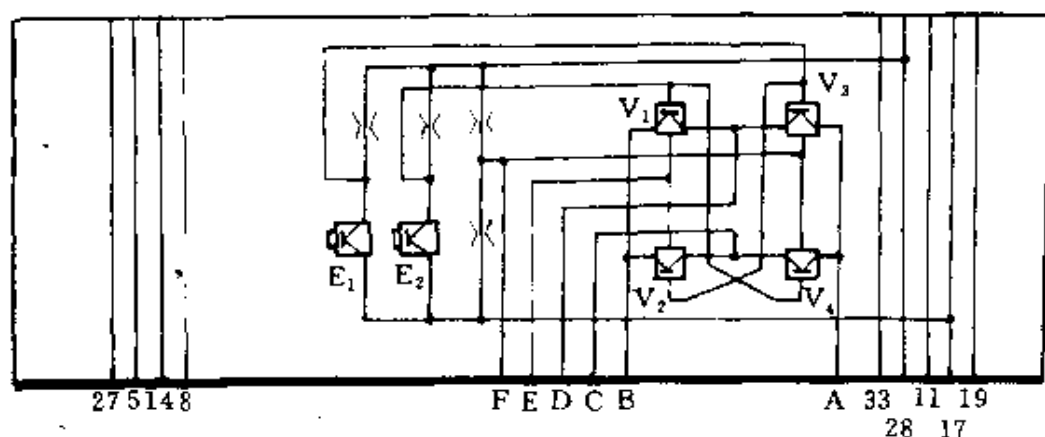


图 4-38

(3) 用途

FB30 功能块有如下几种用法:

1) 一个液源供一个桥式驱动液路使用,且不需要差动运行。这时只需将 E 和 F、A 和 33、B 和 11 相连即可,C 和 D 接液动机,如图 4-39 所示。

2) 几个桥式驱动液路共用一个液源,这时为了减少相互之间的干扰,在桥式驱动液路的进油口要加设液阻,如图 4-40 所示。

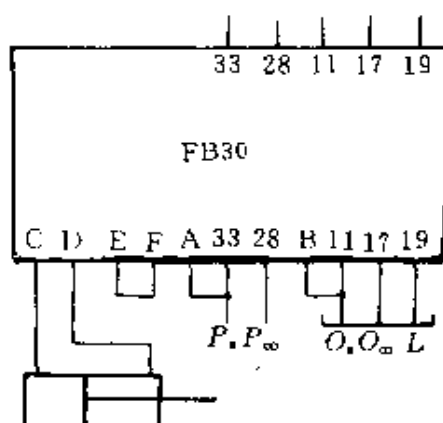


图 4-39

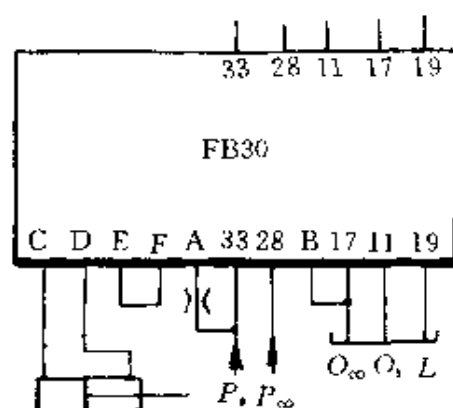


图 4-40

3) 差动运行, 这时 E 端要有一个控制信号 P_1 来控制 (图 4-41)。当电液管 E_1 和 E_2 都得电时, 且输入 P_1 控制信号, 使液管 V_1 和 V_2 截止, 液压缸工作腔的压力相等, 液动机就实现差动运行。

8. FB31

(1) 外部结构及其功能

FB31 功能块的外部结构如图 4-42 所示, 图中:

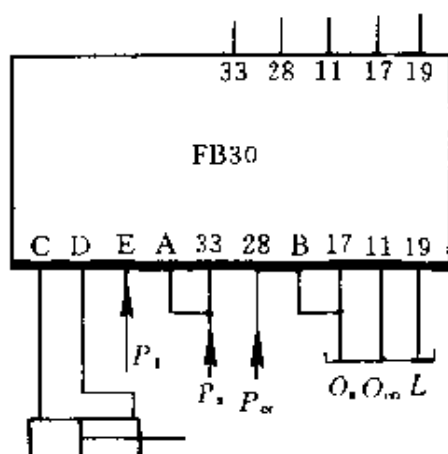


图 4-41

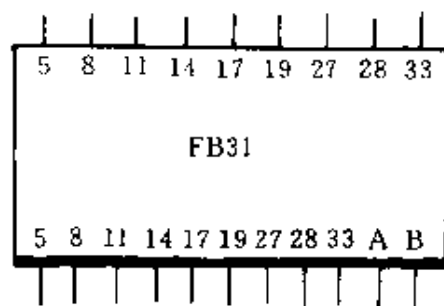


图 4-42

A、B——功能块的输出, 接液动机, 可互换;

5、8、14、27——备用通道;

11——液源的高压回油端 O_1 ;

17——液源的稳压回油端 O_{∞} ;

19——内部泄油, 直接接油箱;

28——液源的稳压供油端 P_{∞} ;

33——液源的高压供油端 P_1 。

本功能块提供一个液管桥式开关液路和一个液阻桥。

(2) 内部结构及其原理

FB31 功能块的内部结构如图 4-43 所示。

液管桥式开关液路由四个液管、液阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和两个电液管组成。四个液阻 R_5 、 R_6 、 R_7 和 R_8 组成液阻桥。液管开关桥式液路是用来切换同液源的高压和液阻桥的连接, 以实现一般的压力驱

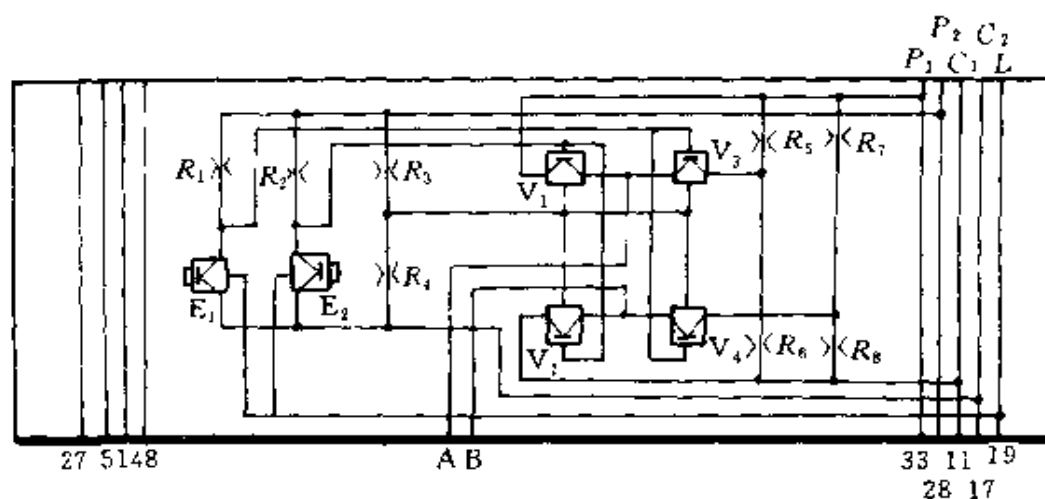


图 4-43

动和超低速驱动。压力驱动源将由别的功能块提供。

(3) 用途

FB31 功能块用在要求超低速运行的情况下,如图 4-44 所示。

4.2.3 界面设计

一个液压系统由若干个功能块构成。把一个液压系统的功能分解成各功能块的功能,称为液路分配。这样就可确定功能块,随后把这些功能块叠加在一起,就形成一个液路总成。把液路分配和确定功能块的过程,称为功能块(包括用户功能块)的选择。在功能块的叠加中,必须考虑功能块之间的通信,这就是功能块的界面设计。功能块与功能块之间发生联系(信息交换)时,就形成功能块界面。功能块界面的结构,包含一个功能块的有效面和另一个功能块的非有效面及两面上需要交换信息的通油道(简称通道)。包含在界面内的通道称为界面通道。界面通道有两种:只涉及本界面的界面通道,称为围界面通道;涉及界面外(另一界面或另一功能块内部)的界面通道,称为泛界面通道。界面用图 4-45 所示的符号来表示。上方粗线边为一功能块的有效面,下方细线边是另一功能块的非有效面,两边之间的连线为界面通道。Ⅰ所指的通道是围通道,Ⅱ所指的通道是泛通道。功能块有效面上的通道数是不定的,而非有效面上的通道是有限的,其最多数用 N_o 来表示,则有:

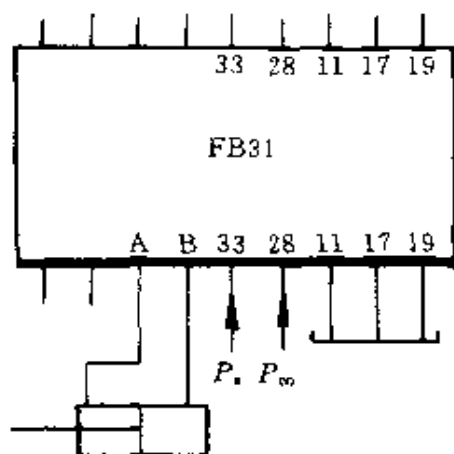


图 4-44

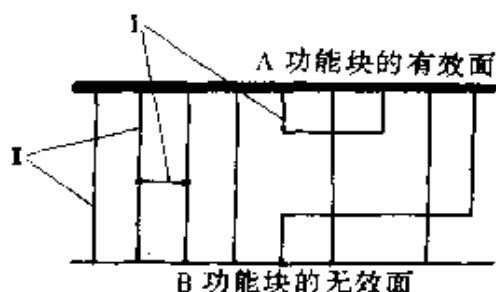


图 4-45

$$N_b = 9 \quad (4-32)$$

这几个通道用 5、8、11、14、17、19、27、28 和 33 来表示,它们是穿通电液集成块的通油道。要使信息从电液集成块的一面(如非有效面)到达另一面(如有效面),则必须通过这几个通道。泛通道数用 N 来表示,当

$$N \leq N_b (= 9) \quad (4-33)$$

时,该界面称为有效界面;当

$$N > N_b (= 9) \quad (4-34)$$

时,该界面称为无效界面。也就是说,界面能正常传递信息群,使信息群不失真地从一个功能块传递到另一个功能块,这样的界面称为有效界面。界面不能正常传递信息群,信息群中的某些信息,通过界面后消失,使信息群的全貌发生畸变(失真),操作动作将出现故障(失效),这样的界面称为无效界面。在一个电液集成块液压系统中,一旦出现无效界面,则此液压系统就不能正常工作,严重的甚至不能工作。

4.2.4 液路总成的设计

液路总成的设计,包含着功能块的选择(设计)及其界面设计。液路总成是由若干个功能块和若干个界面,按一定的顺序叠加在一起构成的。液路总成是一个封闭的构件,它同外界的联系有两个

方面：一是智力的交换；一是动力的交换。因此液路总成是智力和动力之间发生联系的媒体，如图 4-46 所示。这是现代工业的最简技术框图。液路总成的外貌如图 4-47 所示，它的控制引线连接电

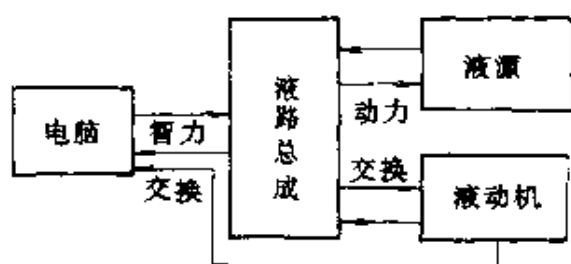


图 4-46

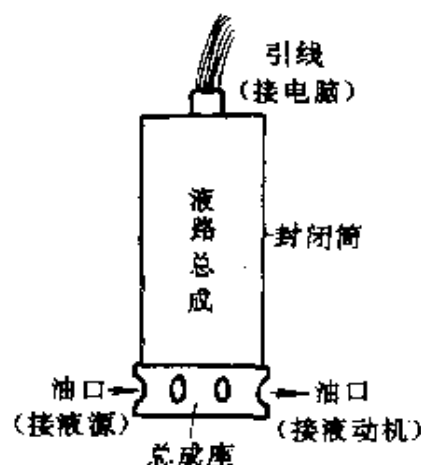


图 4-47

脑，进行智力交换；它的总成座（油口）连接液机（液压泵和液动机），进行动力交换。封闭筒的内部封装着电液集成块及支持液路板，实现信息的传递，使之对动力实行控制。整个液路总成的外貌，美观清洁，就像一枚工艺制品。电液集成块是标准的，用户只需从市场购得即可，而液路板用户要自制。实际上，液路总成的设计主要是成套液路板的设计。

一个液路总成的设计步骤如下：

- (1) 确定液压系统方案，画出电液集成块液压系统图；
- (2) 对电液集成块液压系统进行液路分配；
- (3) 功能块选择、设计及界面设计；
- (4) 画出液路板装配图；
- (5) 给出液路总成接线表；
- (6) 调试和修改（包括液阻孔径的确定）。

以下通过控制一个液压缸的例子，来说明液路总成的设计过程。

- (1) 确定液压系统方案，画出电液集成块液压系统图。液压缸

推动滑台动作,如果对滑台要求有较高的定位精度,则可以采用图 4-48 所示的液压系统。

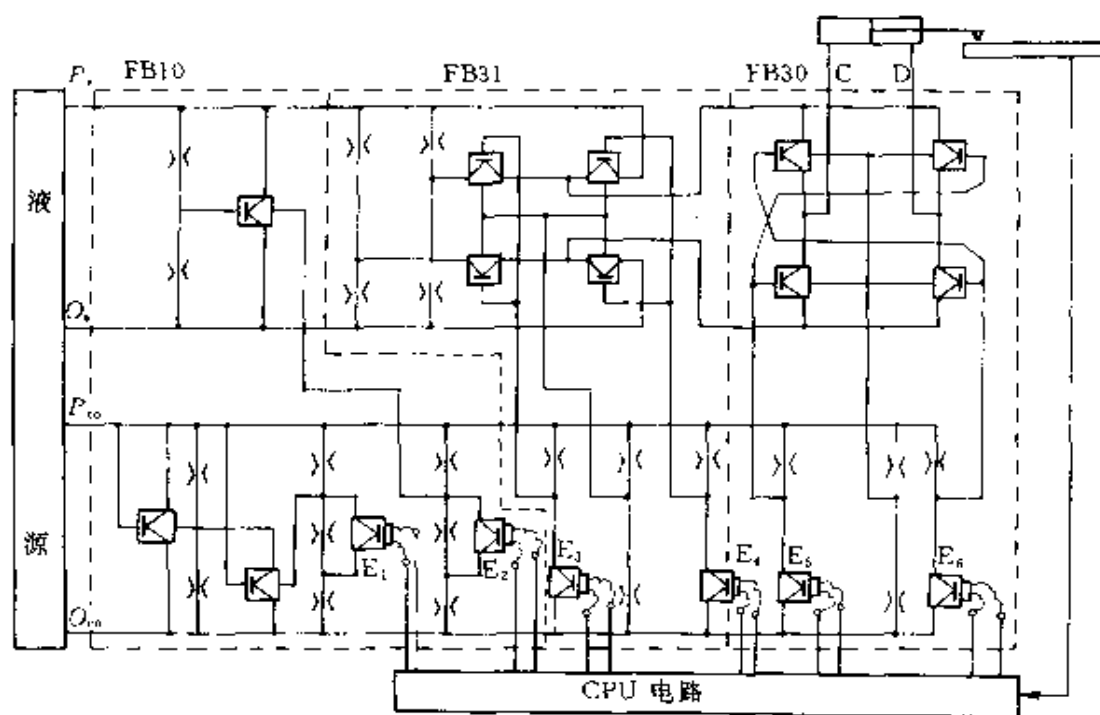


图 4-48

(2)对电液集成块液压系统进行液路分配。对照标准功能块液路图,将电液集成块液压系统图划分成几个与标准功能块相同的液路,用虚线框出,并注明相应的标准功能块编号(见图 4-48)。如果在电液集成块液压系统图中,尚有未被框入标准功能块的部分液路,则这些液路将由用户自行设计 USER 功能块来补充,并自行编号。在本例中,全部液路被框入标准功能块之中,因此无需另外设计 USER 功能块。最后选择满足功能需要的标准功能块是 FB10、FB30 和 FB31。

(3)将电液集成块液压系统图转换成功能块液压系统图。其任务主要是设计界面,如图 4-49 所示。从此图中可以看出,在本功能块液压系统图中,没有无效界面。图中界面用 FC 表示。

(4)画出界面液路板图纸。

(5)画出液路板装配图。在液路板装配图中,要表明装配时需

要的电液集成块有效面的方向、液路板的叠加顺序和功能块的叠加顺序,如图 4-50 所示。

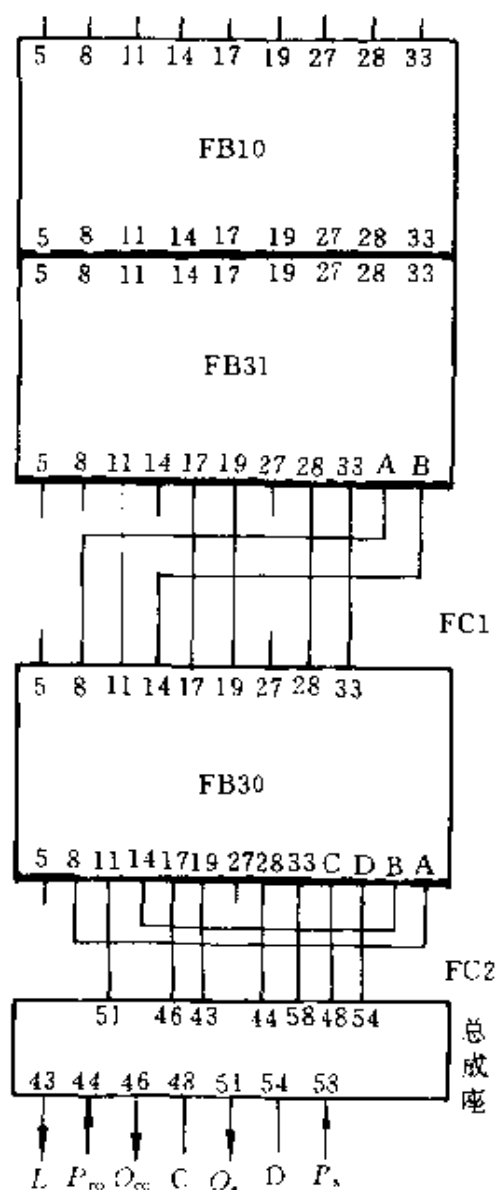


图 4-49

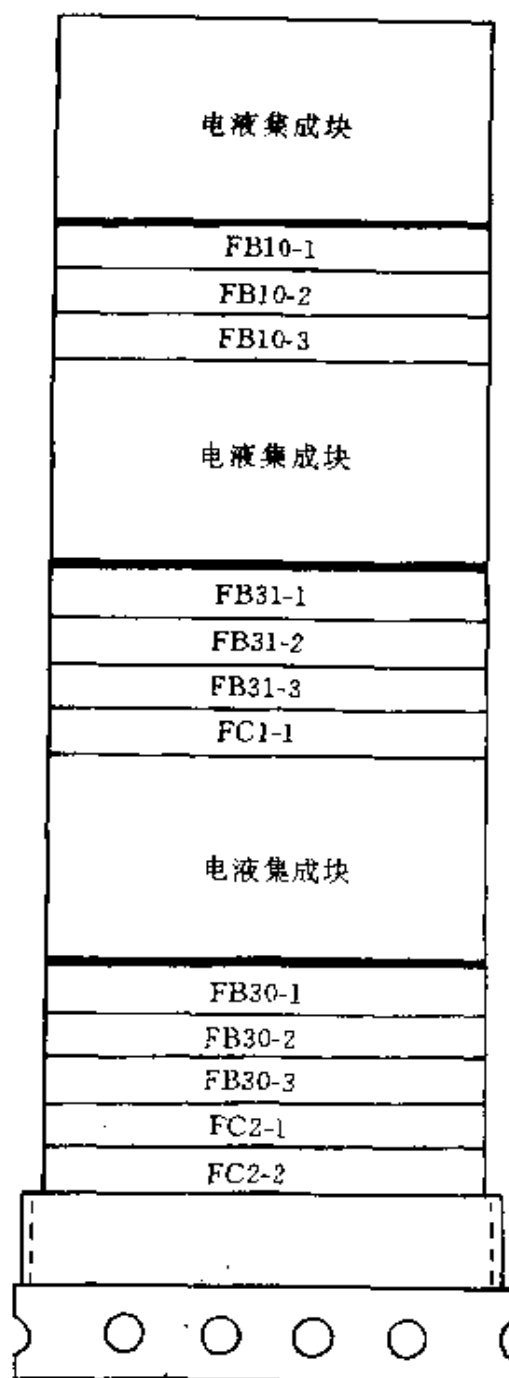


图 4-50

(6) 给出液路总成的引线接线表。每块电液集成块有八根引线,其中有四根黑色线,另外的 4 根分别为红色、黄色、蓝色和白

色。黑色线为接地线,同 CPU 电路的地线相连。红色线为 A 电液管(标准孔为 1、2、3 和 4)的控制线,黄色线是 B 电液管(标准孔为 18、20、21 和 22)的控制线。当控制信号为开关信号时,控制线同 CPU 电路的数据线相接;当控制信号为模拟信号时,控制线同 CPU 电路的模拟信号(A/D)输出端相接。蓝、白线分别为 A、B 电液管的抖动线,同 CPU 电路的 50Hz 方波抖动信号输出端相接。

在图 4-48 中,用了三个功能块(三个电液集成块),其中 FB10 和 FB30 功能块中的四个电液管的控制信号为模拟信号,其他两个电液管的控制信号都为开关信号。图 4-48 所示的电液集成块液路总成的接线情况如表 4-1 所示。

表 4-1 接 线 表

插座 脚号	电液管 编 号	线 色	CPU 电路	插座 脚号	电液管 编 号	线 色	CPU 电路
1	E ₁	红	电位器输出端	13	E ₄	蓝	开关数据线 2D ₁
2		黑	地	14		黑	地
3		黄	抖动数据线 1D ₀	15		白	抖动数据线 1D ₃
4		黑	地	16		黑	地
5	E ₂	蓝	D/A 输出端 1	17	E ₅	红	D/A 输出端 2
6		黑	地	18		黑	地
7		白	抖动数据线 1D ₁	19		黄	抖动数据线 1D ₄
8		黑	地	20		黑	地
9	E ₃	红	开关数据线 2D ₀	21	E ₆	蓝	D/A 输出端 3
10		黑	地	22		黑	地
11		黄	抖动数据线 1D ₂	23		白	抖动数据线 1D ₅
12		黑	地	24		黑	地

(7)调试和修改。在设计中,液阻值是由计算确定的,但必须经过调试才能最后确定。另外,液路的设计是否合理,也要通过调试才能知道。如不合理,则要进行修改,随后再进行调试,直到设计者感到满意为止。

液路总成的装配是从总成座开始的,按功能块将电液集成块和液路板进行分组,然后一组一组地叠加在总成座上。电液集成块和液路板是通过 0 号孔上的定位套来定位的(图 4-51)。电液集成

块的引线,通过压板的引线孔,从压板的顶部引出后,被连接在插座上。将电液集成块和液路板,按外圆对齐后,套入封闭筒。封闭筒内径和电液集成块的外径之间有 0.5mm 的间隙,装封闭筒时要轻轻放入。封闭筒和总成座之间是用螺纹连接在一起,为了防止漏油,可在螺纹连接处,缠上密封用的生胶带。压板、电液集成块、液路板和总成座之间的密封,是靠紧密压紧后互相接触处的平面密封。这种压紧是由紧固圈来实现的。紧固圈的外圆有螺纹,将紧固圈从封闭筒的顶部旋入,直到接触压板。为了将压板、电液集成块、液路板和总成座紧密压紧在一起,必须将紧固圈上的九个压紧埋头螺钉拧紧。压紧螺钉压紧后,其压紧力是均匀的。为了将液路总成的顶部密封住,在紧固圈上放有密封圈,再加上插座板,随后拧紧九个密封螺钉,将密封圈紧压在紧固圈上,以达到良好的密封效果。至此液路总成全部装配完毕。

液路总成有两种外形结构,图 4-51 所示的液路总成为 A 型,另一种外形结构如图 4-52 所示,称为 B 型。A 型和 B 型结构的总成座分别为图 4-53 和图 4-54 所示,分别称为单面总成座和双面总成座。一般一个单面总成座上最多能叠加五个功能块。当一个液压系统较复杂时,其功能块超过了五个,一般就用双面总成座。单面总成座面上的孔同侧面的油口相通,液路总成的内部油流就可通过这些油口同外界发生交往。在双面总成座上,有两圈 $\phi 10$ 的圆孔,外面一圈孔是实现液路总成内部同外部的交往,而中间一圈孔是串通两总成座面的,以实现液路总成内位于总成座两面功能块之间的交往。总成座面上的 O 孔是插定位套用的,为液路板和总成座之间的定位用。

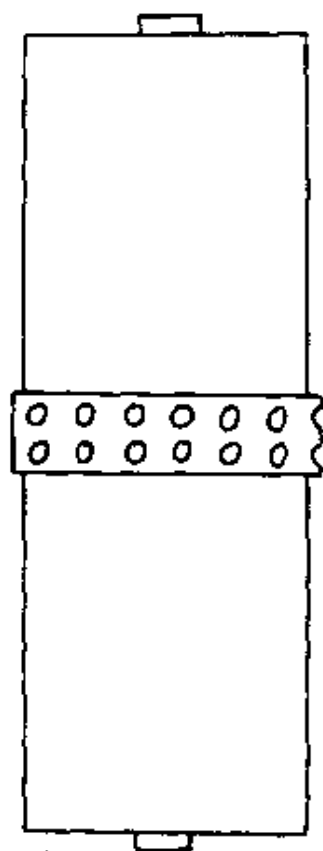


图 4-52

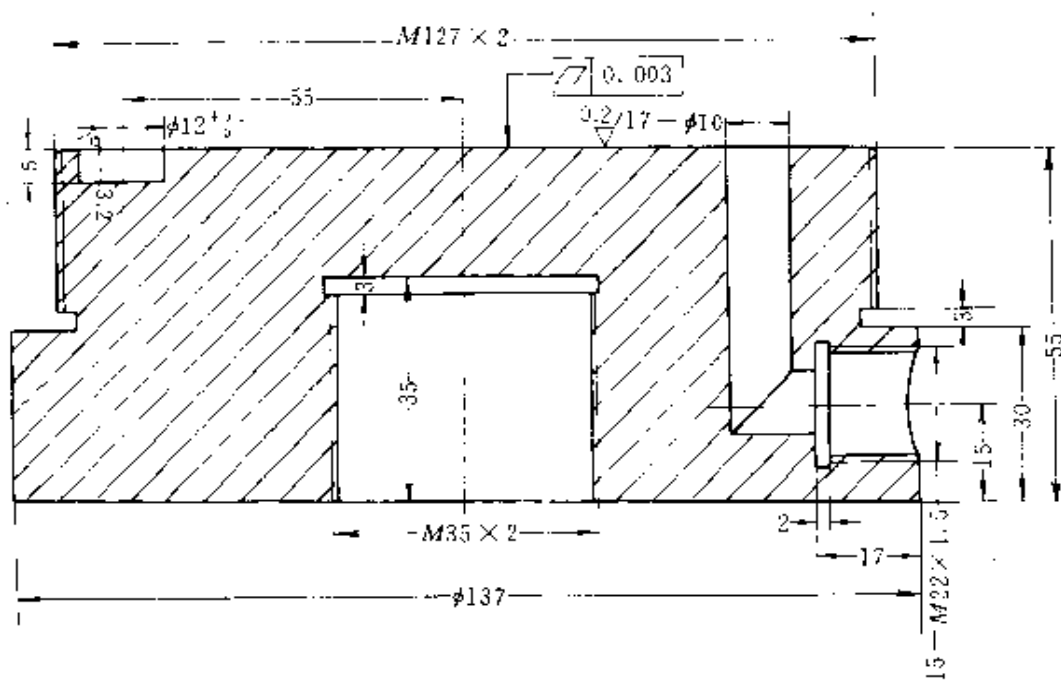


图 4-53

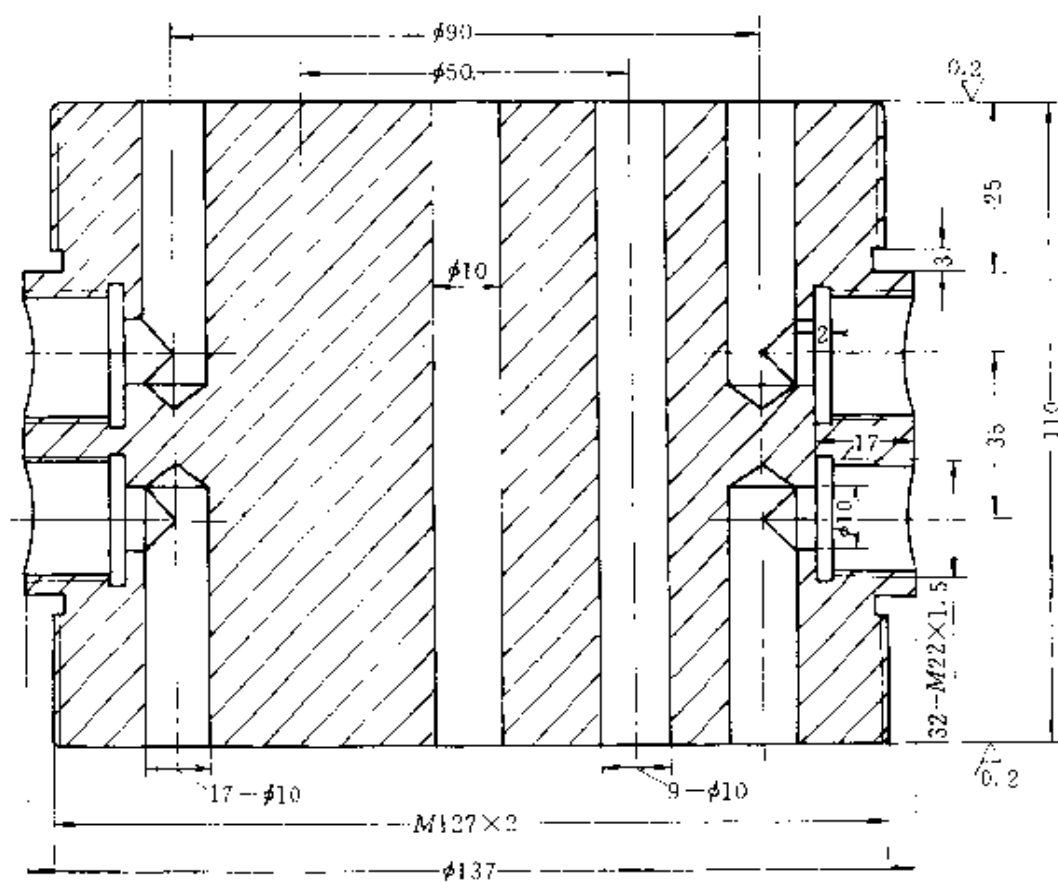


图 4-54

4.3 液 源

液源包含电动机、液压泵、压力表、滤油器、保险栓、呼吸器和密封油箱。油箱的大小,同液压泵是采用闭式供油还是开式供油有关。所谓闭式供油,是指驱动液路的回油直接接到泵的吸油口的供油方式,如图 4-55 所示。所谓开式供油,是指驱动液路的回油直接流回油箱,液压泵从油箱吸取油液,如图 4-56 所示。在闭式供油

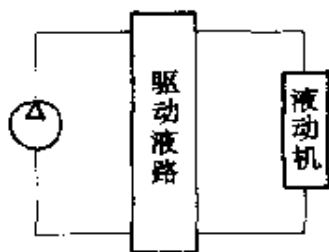


图 4-55

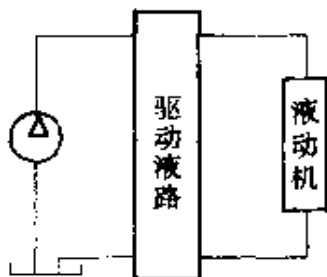


图 4-56

中,由于液路和液机(液压泵和液动机)有泄漏,因此液压泵的排油量要大于驱动液路的回油量,这样就在液压泵的吸油口造成真空。为了避免真空的出现,要进行补油,补油是由补油泵提供(见 FB12 功能块)。

闭式供油和开式供油的利弊如下:

(1)闭式供油要求液动机的进油腔和回油腔的有效面积应相等,而开式供油无此要求;

(2)闭式供油时,油箱只保证提供泄漏的油液,因此油箱容积就很小;

(3)闭式供油时,由于油液被循环使用,而不流入油箱,因此其散热性差,温升较高;

(4)闭式供油时,由于油箱容积较小,因此易于被密封,防尘性好。

图 4-57 是开式供油液源的液路,图 4-58 是闭式供油液源的液路。图中的保险栓结构如图 4-59 所示。保险座上有两个孔,一个

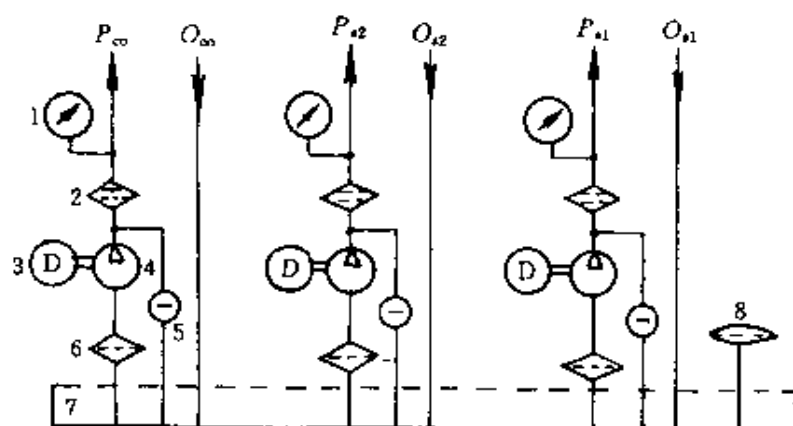


图 4-57

1—压力表; 2—精滤油器; 3—电动机; 4—液压泵; 5—保险栓;
6—粗滤油器; 7—密封油箱; 8—呼吸器。

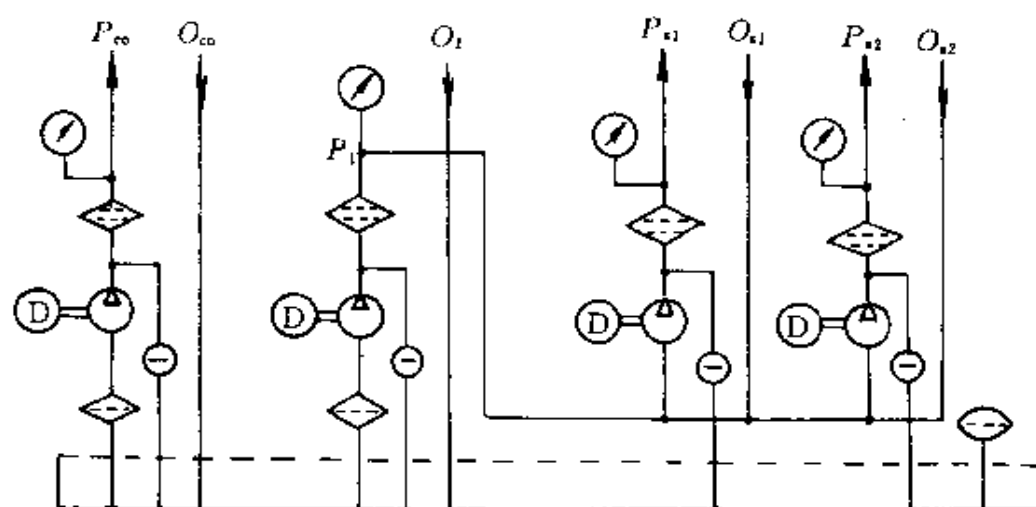


图 4-58

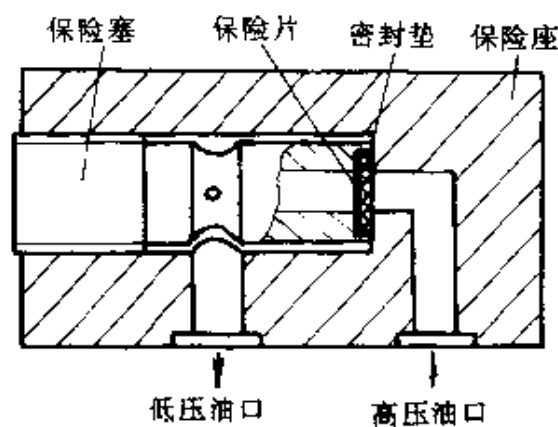


图 4-59

通高压油；一个通低压油。保险座内装有密封垫圈、保险片和保险塞。当高压油口的压力超过保险片的保险值时，高压油将保险片穿通，而流回油箱，使系统压力不超过一定值，不会使液压系统的构件遭到破坏，起到保险的作用。

装油液的箱子称为油箱，油箱是全密封的，以保持油液的清洁。当油箱中的油面发生变化时，油箱中的空气要同外界发生交换，这种交换称为油箱的呼吸。为了保持油箱中油液的清洁，油箱的呼吸要经过呼吸器，以保持吸入油箱中的空气是清洁的。呼吸器可以是空气滤清器，也可以是皮囊。

4.4 应用实例

本节中只介绍几个最基本而典型的应用实例。

4.4.1 组合机床的液路总成

在组合机床上，一般要求有三个液动机，一个液动机作为主进给运动；其他两个液动机作为定位夹紧之用。对于主运动来说，其要求较高，有快进、工进，外载的变化也较大，定位精度要求较高。因此主运动液动机的驱动应用稳流驱动，且加载背压。一般可选用功能块 FB21 和 FB30。FB30 可用于运动精度要求不高的控制，如换向和一般的变速。定位夹紧采用 FB13。组合机床的液路总成液路图如图 4-60 所示。

将电液集成块中的两个电液管用 E_1 和 E_2 表示。 E_1 表示由标准孔 1、2、3 和 4 组成的电液管， E_2 表示由标准孔 18、20、21 和 22 组成的电液管。用 E_1 (FB10) 表示功能块 FB10 中的 E_1 电液管， E_2 (FB10) 表示功能块 FB10 中的 E_2 电液管，则要完成①定位→②夹紧→③快进→④工进→⑤快退→⑥松夹→⑦拔销→⑧停止的工序过程。电液管的接线情况如表 4-2 所示，电液管的控制信息情况如表 4-3 所示。

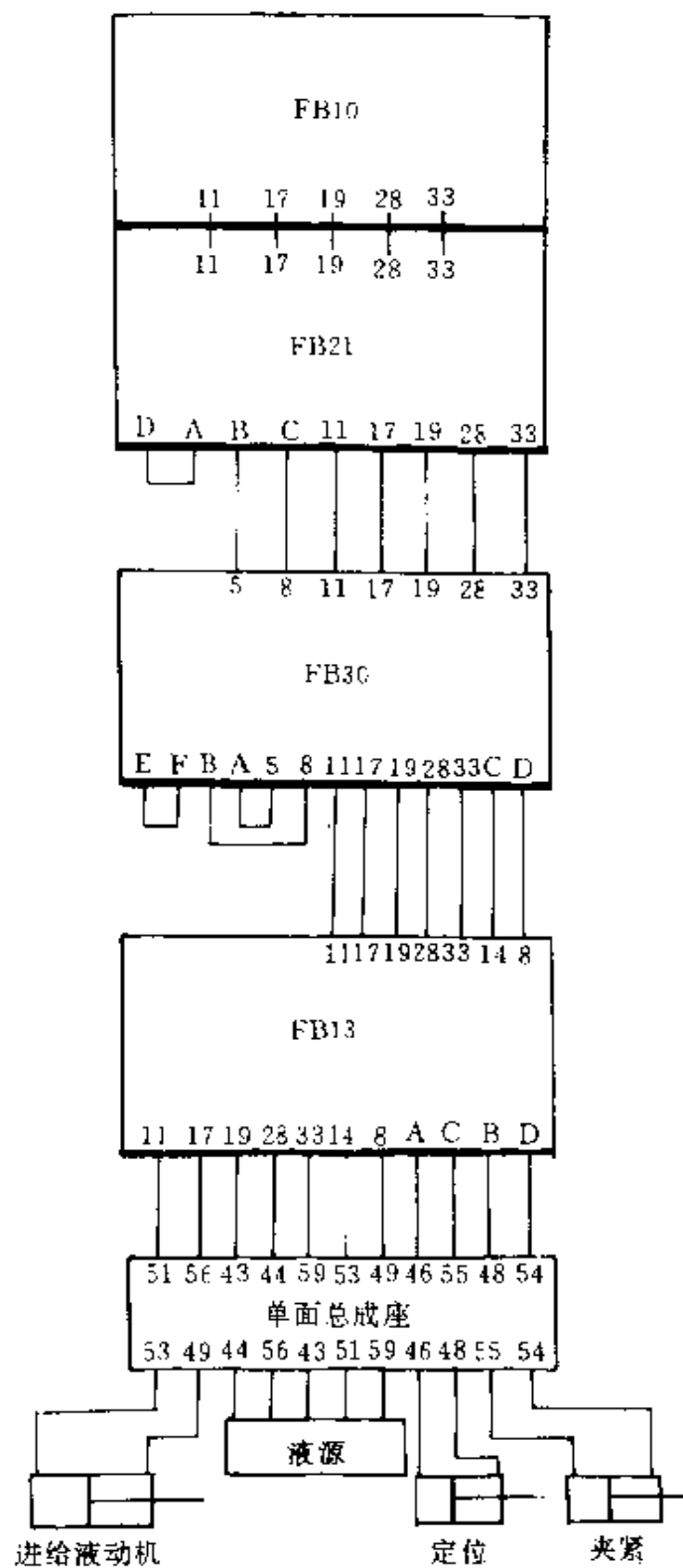


图 4-60

表 4-2 接 线 表

插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路	插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路
1	E ₁ (FB10)	红	电位器	17	E ₁ (FB30)	红	2D ₂
2		黑	地	18		黑	地
3		黄	1D ₀	19		黄	1D ₄
4		黑	地	20		黑	地
5	E ₂ (FB10)	蓝	D/A 1	21	E ₂ (FB30)	蓝	2D ₃
6		黑	地	22		黑	地
7		白	1D ₁	23		白	1D ₅
8		黑	地	24		黑	地
9	E ₁ (FB21)	红	2D ₀	25	E ₁ (FB13)	红	2D ₄
10		黑	地	26		黑	地
11		黄	1D ₂	27		黄	1D ₆
12		黑	地	28		黑	地
13	E ₂ (FB21)	蓝	2D ₁	29	E ₂ (FB13)	蓝	2D ₅
14		黑	地	30		黑	地
15		白	1D ₃	31		白	1D ₇
16		黑	地	32		黑	地

表 4-3 CPU 信息表

工 序	操 作	CPU 信息									
		数据线 2D ₀₋₇								数 模 线	
		D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	数码	D/A
1	定位	0	0	1	0	0	0	0	0	20	10V
2	夹紧	0	0	0	0	0	0	0	0	00	10V
3	快进	0	0	0	0	1	0	1	1	08	10V
4	工进	0	0	0	0	1	0	0	0	08	10V
5	快退	0	0	0	0	0	1	1	1	07	10V
6	慢靠	0	0	0	0	0	1	0	0	04	10V
7	松夹	0	0	1	0	0	1	0	0	24	10V
8	拔销	0	0	1	1	0	1	0	0	34	10V
9	停止	0	0	1	1	0	0	0	0	30	10V

4.4.2 车床的电液集成块液压系统

在车床上加工的零件是一个回转体,它是由车刀的纵向和横

向两个运动的合成加工而成的。被加工零件的表面有直线形的,有曲线形的,前者的加工程序比较简单,后者的加工程序比较复杂。加工不同的零件时,其纵向运动是相同的,而横向运动是不同的。也就是说,零件表面的形成是由横向运动控制程序来完成的。因此,在车床的电液集成块液压系统中,纵向进给液动机是采用 FB21 和 FB30 功能块来驱动,横向进给液动机是采用 FB31 和 FB30 功能块来驱动,如图 4-61 所示。在图 4-61 中,有两个液压电动机和一个液压缸,液压缸是完成纵向进给运动,横向进给运动是由一个液压马达带动丝杠来实现;另一个液压马达是用来完成主轴的旋转。完成一个零件的加工工步一般如下:①主轴旋转→②纵向快进→③纵向定位→④横向快进→⑤横向定位→⑥执行加工程序→⑦横向快退→⑧纵向快退→⑨停止。完成这样一个顺序动作的电液管的接线情况如表 4-4 所示,电液管的控制信息情况见表 4-5 所示。

表 4-4 接 线 表

插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路	插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路
1	E ₁ (FB10)	红	电位器	29	E ₂ (FB31)	蓝	3D ₅
2		黑	地	30		黑	地
3		黄	1D ₀	31		白	1D ₇
4		黑	地	32		黑	地
5	E ₂ (FB10)	蓝	D/A 1	33	E ₁ (FB30②)	红	3D ₆
6		黑	地	34		黑	地
7		白	1D ₁	35		黄	2D ₀
8		黑	地	36		黑	地
9	E ₁ (FB30①)	红	3D ₀	37	E ₂ (FB30②)	蓝	3D ₇
10		黑	地	38		黑	地
11		黄	1D ₂	39		白	2D ₁
12		黑	地	40		黑	地
13	E ₂ (FB30①)	蓝	3D ₁	41	E ₁ (FB30③)	红	4D ₀
14		黑	地	42		黑	地
15		白	1D ₃	43		黄	2D ₂
16		黑	地	44		黑	地

(续)

插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路	插座脚号	电液管编号	线色	CPU 电路
17	E ₁ (FB21)	红	3D ₂	45	E ₂ (FB30③)	蓝	4D ₁
18		黑	地	46		黑	地
19		黄	1D ₄	47		白	2D ₃
20		黑	地	48		黑	地
21	F ₂ (FB21)	蓝	3D ₃	49	E ₁ (FB11)	红	D/A 2
22		黑	地	50		黑	地
23		白	1D ₅	51		黄	2D ₄
24		黑	地	52		黑	地
25	F ₁ (FB31)	红	3D ₁	53	E ₂ (FB11)	蓝	D/A 3
26		黑	地	54		黑	地
27		黄	1D ₆	55		白	2D ₅
28		黑	地	56		黑	地

表 4-5 CPU 信息表

序	操 作	CPU 信息																					
		数据线 3D ₀₋₇								数据线 4D ₀₋₇								数模线					
		D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	数码	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	数码	D/A1	D/A2	D/A3	
1	主轴旋转	1	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	00	0	10V	0		
2	纵向快进	1	0	0	0	1	1	1	0	87	0	0	0	0	0	0	0	00	10V	10V	0		
3	纵向定位	1	0	0	0	0	0	1	0	82	0	0	0	0	0	0	0	00	10V	10V	0		
4	横向快进	1	0	1	0	0	0	0	0	A0	0	0	0	0	0	0	1	02	0	10V	10V		
5	横向定位	1	0	0	1	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	1	02	0	10V	5V		
6	加工	执行加工程序																					
7	横向快退	0	0	1	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	1	01	0	0	10V		
8	纵向快退	0	0	0	0	1	1	0	1	0D	0	0	0	0	0	0	0	00	10V	0	0		
9	纵向慢靠	0	0	0	0	0	0	0	1	01	0	0	0	0	0	0	0	00	10V	0	0		
10	停止	1	1	0	0	0	0	0	0	C0	0	0	0	0	0	0	0	00	10V	0	0		

4.4.3 电液集成块液压驱动汽车

电液集成块液压驱动汽车的驱动系统如图 4-62 所示。发动机主轴直接带动液压泵, 液压泵排出的压力油, 通过液路总成的控

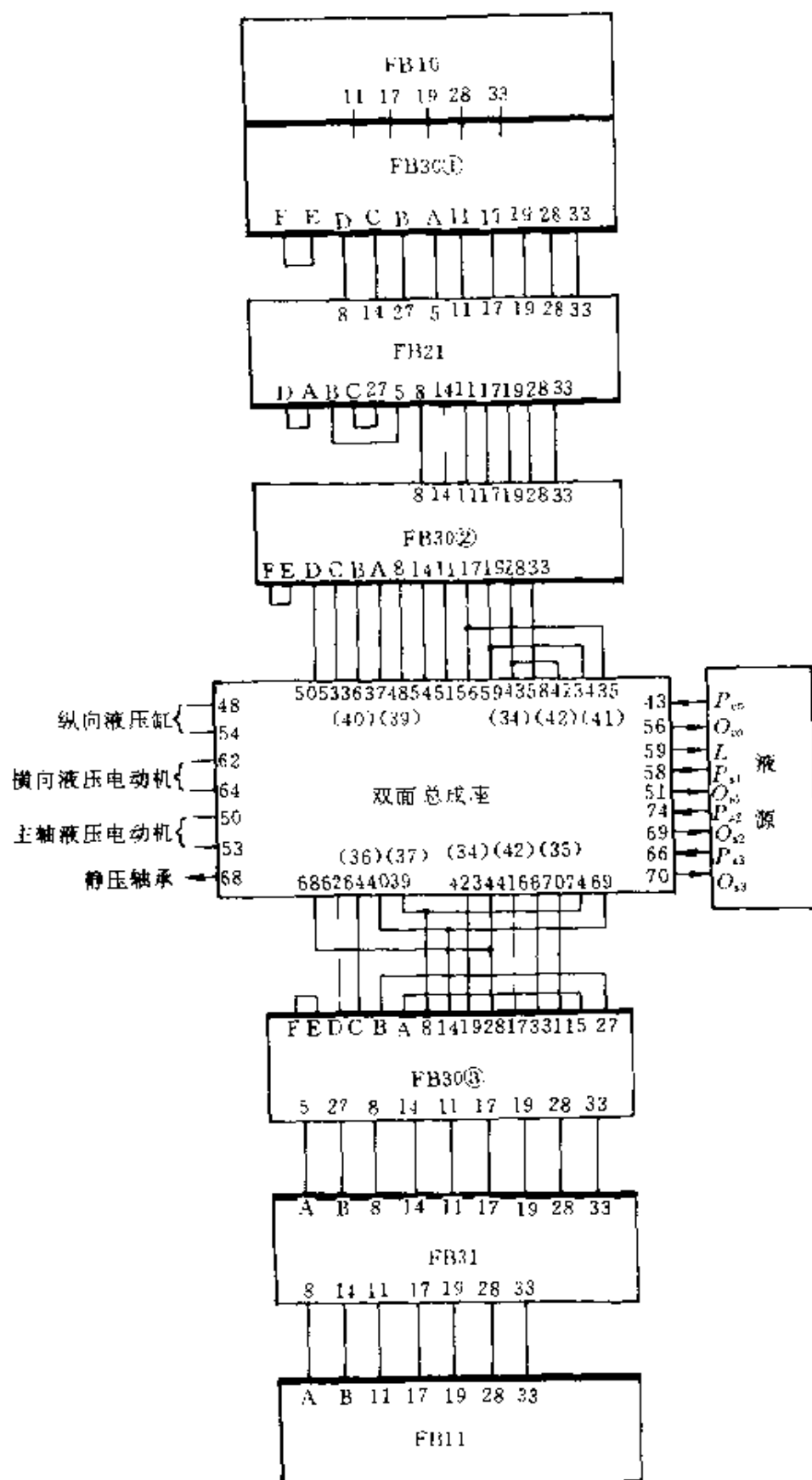


图 4-61

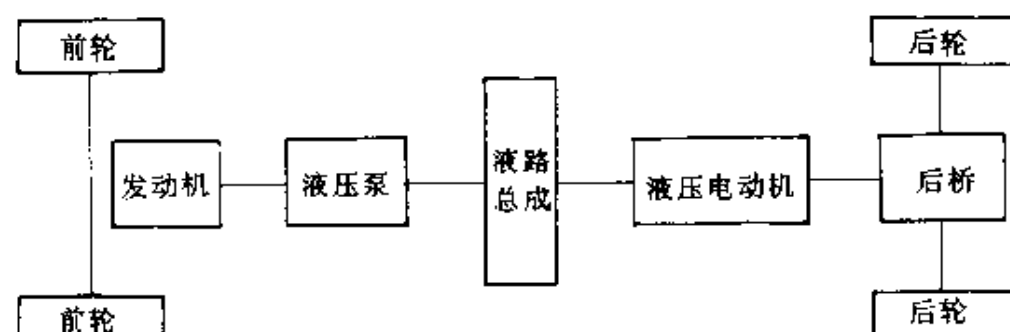


图 4-62

制,来驱动液压马达。液压电动机的输出轴,直接同后桥的行星差速机构的输入轴相连,于是液压马达的旋转就可带动后轮转动,推动汽车运行。在电液集成块液压驱动汽车上,常规汽车上必备的通用件,如离合器、变速箱、传动轴和刹车器等再也看不见了。

液路总成的内部结构如图 4-63 所示。这时汽车的起动过程和制动过程,都由微电脑来辅助操作,使起动过程和制动过程都处于最佳状态。如果将计算机辅助操作的电液集成块液压随动系统,引入汽车的悬挂系统和转向系统,则汽车的性能将会提高一个档次,成为世界上领先的高级汽车。

从以上三个例子中可以看出,只要将电液集成块液压技

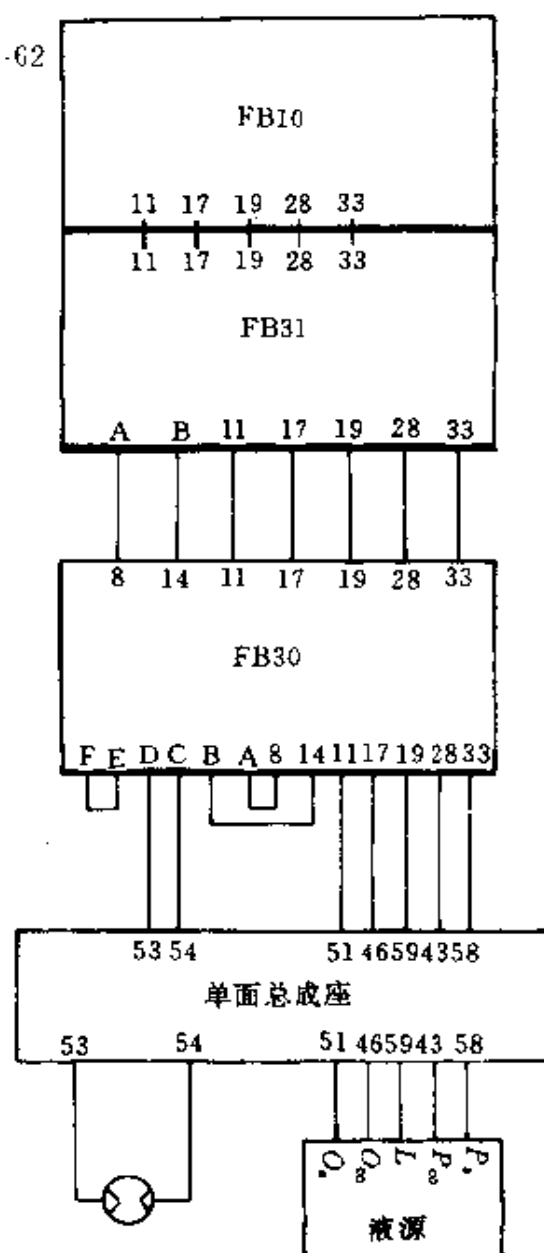


图 4-63

术应用于某机械,则该机械就成为微机控制。液压在工业领域中的应用范围极广,几乎涉及到整个工业。如果能应用液压技术的工业领域,都用上电液集成块液压技术,那么整个工业将进入微机控制的年代,电液集成块液压技术具有广阔的应用前景。

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元

内 容 简 介

电液集成块是一种全新的液压控制元件,它能取代所有的传统液压阀,能同计算机直接相连,使用方便,价格便宜,为液压技术的发展开拓一条全新的道路。

本书较详细地介绍了电液集成块的液路设计,内容包括:电液集成块液压技术发展概况;电液集成块的液管、电液管、电液转换液路和液管的控制;液动机的各种驱动液路;电液集成块液压系统的液路过压保护、液路总成、液源和应用实例。

可供机械专业的科技人员和大专院校的师生参阅,并可用作研究生的教材。

ISBN 7-118-01601-2/TH·114

定价:12.30 元