

几种典型液压阀口过流面积分析及计算*

冀宏, 傅新, 杨华勇

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

摘要: 解析推导了三种典型复杂阀口过流面积及等效阀口面积特性, 提出并分析了阀芯移动过程中发生的阀口迁移现象, 并与用试验测量和流场计算得出的等效阀口面积进行了比较。本文对于液压复杂阀口研究及设计计算以及阀噪声机理研究具有一定的参考价值。

关键词: 阀口迁移; 等效阀口面积; 过流面积解析

中图分类号: TH 137.52; **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2003)5-014-3

Analysis and Calculation on Typical Shape Orifice areas in Hydraulic Valves

Ji Hong, Fu Xin, Yang Hua-yong

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission & Control, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027, China)

Abstract: The orifice area characteristics and the equivalent orifice area of three typical shape orifice valves are analyzed. And the phenomenon of shift of orifice location in hydraulic valve is presented and analyzed. The equivalent orifice areas calculated are compared with the results acquired by experiment and flow field simulation. This study has some value for the valve design with complicated orifices and valve noise study.

Keywords: Shift of orifice location; Equivalent orifice area; Orifice area analysis

0 前言

液压控制元件的阀口形式很多, 可分为全周和非全周开口形式。除少数阀口面积与阀芯位移存在准确的函数表达式外, 大部分由于复杂的非线性关系难于获得解析式, 一般给出近似函数。更为复杂的阀口结构未有现成的公式可以参考^[1-3], 而非全周阀口在阀芯移动过程中, 由于阀口存在着多个狭小过流面积(简称节流面)的串联会造成阀口位置变迁(本文定义为阀口迁移)和阀口面积改变, 这给液压阀性能预测和设计带来一定困难。等效阀口面积是把复杂阀口流道等效为一个薄壁孔口, 液压阀进出口压差集中于此, 这有利于液压阀过流特性的计算和预测。本文对三种部分开口形式的阀口进行了过流面积分析, 推导了过流面积函数并给出了数值解, 用多项式进行拟合得出计算公式, 经过一定的假设计算出等效阀口过流面积; 并与由试验测量和流场仿真计算所得的压力流量关系计算出的等效阀口面积进行了比较, 由等效面积和过流面积数值计算结果可以清楚地看出阀口面积的变化和迁移, 此项研究对于复杂阀口优化设计及阀噪声机理研究具有一定的参考价值。

1 典型阀口过流面积解析

(1) L形阀口的过流面积

如图1所示, 阀口是由小圆柱横向铣切阀芯凸肩形成, 阀口面积是圆柱相贯线和阀座边在阀芯圆柱面所围成的部分圆柱面积。在某一阀口开度 x_1 下, 建立如图1所示的直角坐标系, 其相贯线方程为:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ (y - R)^2 + z^2 = R^2 \end{cases} \quad (1)$$

阀口微元面积为:

$$dA = 2\beta R \cdot dx = 2R \cdot \arcsin \frac{z}{R} dx \quad (2)$$

由方程(1)导出 $z(x)$, 并代入式(2), 积分得:

$$A = n \int_h^r 2R \cdot \arcsin \frac{\sqrt{2R\sqrt{r^2 - x^2} - r^2 - x^2}}{R} dx \quad (3)$$

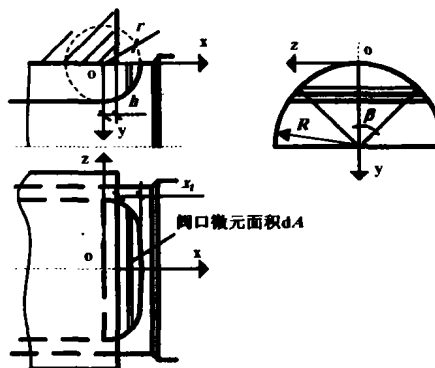


图1 L形阀口面积推导

式中: $h \in [0, r]$, $x_1 = (r - h)$ 为阀口开度(见图1)。式(3)即为阀口面积的积分表达式, 被积函数是复杂的非线性函数。带入具体参数: 阀芯凸肩半径 $R = 20 \text{ mm}$, 阀芯节流口处半径 $r = 9 \text{ mm}$, 节流槽个数 n 为3。采用8样条 Newton-Cotes 公式数值积分得出阀口开度所对应的阀口面积, 如图2所示。

用三阶多项式对曲线进行拟合, 可以得出阀口面积近似表达式(4):

$$A = -5.71 + 64.02x_1 + 7.58x_1^2 - 0.358x_1^3 \quad (4)$$

(2) U形阀口的过流面积

U形阀口结构简图如图3所示, 节流槽前端有半圆槽, 后部为等截面流道, 等截面面积设为 A_{10} 。建

立图3所示的直角坐标, x_1 表示阀口开度。

其圆柱面相贯线方程为:

$$\begin{cases} (x-r)^2 + z^2 = r^2 \\ y^2 + z^2 = R^2 \end{cases} \quad (5)$$

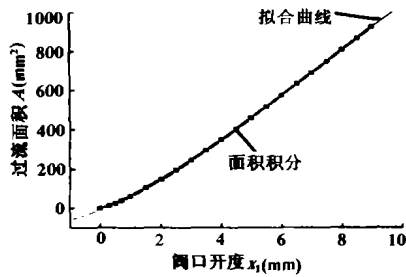


图2 L形阀口面积计算曲线

$x_1 < r$ 时微元面积为:

$$dA_2 = 2\beta R \cdot dx = 2R \cdot a \sin \frac{z}{R} dx \quad (6)$$

式中: 阀芯凸肩半径 $R = 8 \text{ mm}$, 阀芯节流口处半径 $r = 1 \text{ mm}$, 槽深 $h = 1 \text{ mm}$, n 为节流槽个数, 此处 $n = 2$, 由方程 (5) 导出 $y(x)$, 并代入式 (6), 积分得:

$$A_2 = 2n \int_0^{x_1} R \cdot a \sin \frac{\sqrt{r^2 - (x-r)^2}}{R} \cdot dx \quad (7)$$

$$A_1 = n [2z(y - (R-h)) + \frac{1}{2} R^2 (2 \arcsin \frac{z}{R}) - yz] \quad (8)$$

由式 (5) 导出 $z = \sqrt{r^2 - (x-r)^2}$
 $y = \sqrt{R^2 - r^2 + (x-r)^2}$ 并代入式 (7)、(8)

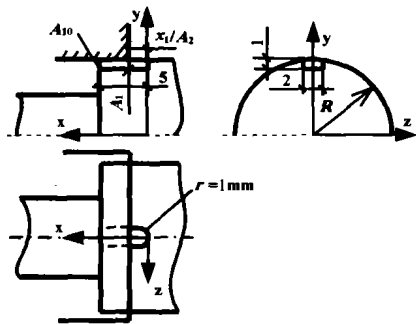


图3 U型阀口面积计算简图

$$x_1 > r \text{ 时: } A_2 = A_{20} + (x-r) \times 2nR \cdot \arcsin \frac{r}{8} \quad (9)$$

式中: A_{20} 等于式 (7) 在 $x_1 = 1 \text{ mm}$ 时 A_2 值

$$A_{10} = 2 \arcsin \frac{r}{8} \times R^2 + 2 \times \sqrt{R^2 - 1} - 4 \times (R-1)$$

U形阀口过流面积的计算曲线如图4所示。

(3) V形阀口的过流面积

如图5所示, 在阀芯凸肩上用90度的成型铣刀加工V形节流槽, 可以看作圆锥面(刀具运动轨迹)与圆柱面(阀芯凸肩)相贯而成。建立如图5所示的直角坐标系推导过流面积, x_1 表示阀口开度。

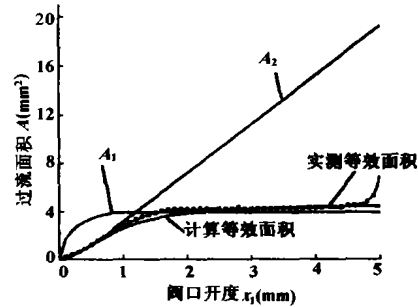


图4 U形阀口过流面积特性

节流槽相贯线方程为:

$$\begin{cases} z^2 + y^2 = R^2 \\ (x-a)^2 + (y-b)^2 = (r-|z|)^2 \end{cases} \quad (10)$$

V型槽的底线方程为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, z=0$$

A_2 面积为相贯线在阀芯凸肩圆柱面所围成的面积。

其面积微元为:

$$dA_2 = (2 \arcsin \frac{z}{R}) \cdot dx$$

$$A_2 = n \int_h^{x_1} R (2 \arcsin \frac{z}{R}) dx \quad (11)$$

$$A_1 = n (2 \times \frac{1}{2} \arcsin \frac{z}{R} \cdot R^2 - z \cdot y) \quad (12)$$

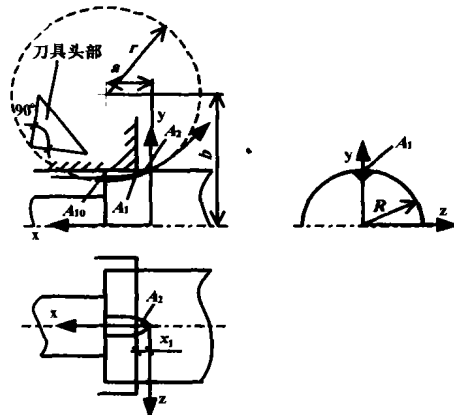


图5 V形阀口面积计算简图

由式 (10) 可以导出 $x = f(z)$, 这是一个复杂非线性函数, 拟合出 $z = f'(x)$ 代入式 (11)、(12), 式 (12) 中的 y 由底线方程导出后, 代入式 (12)。以上即为V形节流槽过流面积的普遍适用的计算公式。代入具体数值: $R = 8 \text{ mm}$, $r = 12.5 \text{ mm}$, $a = 5.88 \text{ mm}$, $b = 19.03 \text{ mm}$ 。其过流面积曲线如图6。

2 等效阀口面积分析及试验测量

(1) 等效阀口面积的计算

等效阀口面积是把阀口作为一个薄壁孔口来看待, 阀进出口压力全部施加在这个薄壁孔上。由于阀口过流部有一定长度, 有若干节流面, 分析时假设节流面(薄壁孔口)在流动方向上相串联。对上面的U

型、V型阀口进行分析。

设有二个节流面为 A_1 、 A_2 ，设等效阀口面积为 A ，流态为紊流，则有：

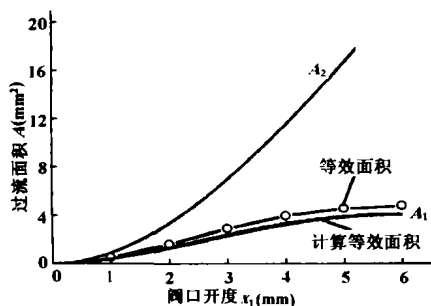


图6 V形阀口过流面积特性

$$q = c_d A \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}$$

$$q = c_{d1} A_1 \sqrt{2 \cdot \Delta p_1 / \rho} ; q = c_{d2} A_2 \sqrt{2 \cdot \Delta p_2 / \rho}$$

节流面串连则有： $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$

$$\text{可得：} \frac{1}{c_d^2 A^2} = \frac{1}{c_{d1}^2 A_1^2} + \frac{1}{c_{d2}^2 A_2^2}$$

$$A = \frac{c_{d1} c_{d2} A_1 A_2}{c_d \sqrt{c_{d1}^2 A_1^2 + c_{d2}^2 A_2^2}} \quad (13)$$

锐边薄壁孔口取： $c_{d1} = c_{d2} = 0.62$ ；而节流面 A_1 具有一定长度，流量系数取为： $c_{d1} = 0.72$ 。

对U、V形阀口进行了过流面积和等效面积的计算，编制了MATLAB程序，计算结果如图4和图6所示。由图4可以看出，U形阀口等效阀口面积位于两个狭小截面的折线下方，随着阀口开度增加，阀口位置由 A_2 向 A_1 转移，阀口压差也随之转移，这就是阀口迁移现象。由图6可以看出V形阀口的特点， A_1 在阀口全开度范围中始终是最小截面，计算等效阀口面积与其非常接近，比 A_1 略小，这说明压差集中在 A_1 两端，面积 A_2 随阀口开度增加迅速，始终大于 A_1 ，基本不起节流作用。

(2) 等效阀口面积的实验测量计算

对U形阀口的进出口压力、流量进行了实测，由下式计算出阀口等效面积：

$$A = q / (c_d \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho})$$

其中： $c_d = 0.62$ ， $\rho = 889 \text{ kg/m}^3$ 。由图4可以看出实测等效面积与最小截面折线接近，随着阀口开大 ($x > 1.7 \text{ mm}$) 等效面积近似不变，比最小截面大7% (0.28 mm^2)，在最大开口处，阀口面积突然陡增这是由于实验中阀口此时已经全开。

对V形阀口的等效面积采用流场计算的方法，获得系列阀口开度下的流量压力特性，依据上式计算出等效阀口面积特性，见图6。流场仿真所得等效面积比 A_1 稍大。由图4和图6可以看出，阀口等效

面积与实测及流场仿真的结果存在误差，这是由于等效阀口计算中假设阀口过流部位由几个集中的节流面简单串联所致，在几个狭小截面距离很近时，压力并非集中分布在这几个狭小截面中，实际使用中可以引入修正系数。

3 结论

(1) 多数液压阀口面积难有解析表达式，可通过建立阀口相贯线函数，采用数值积分或解复杂非线性函数计算过流面积，通过函数拟合得出近似表达式。

(2) 随着液压阀结构优化改进，阀口形式趋于复杂。阀口存在多个节流面时，可以近似看作多个阀口的串联。随着阀芯的移动，阀口位置可能会发生迁移，阀口局部的压力降分布会发生相应变化。

(3) 由数值解析和试验可知最小截面和等效阀口面积比较相近，实际中可以从狭小截面的连线来近似代替等效阀口面积。

(4) 阀口部位的多个狭小截面的串联，可以起到分配压差的作用，对于降低高压差引起的液压控制元件噪声振动是很有前途的解决方案。

参考文献

- [1] 林建亚，何存兴. 液压元件. 北京：机械工业出版社，1988
- [2] 雷天觉. 液压工程手册 [M]. 北京：机械工业出版社，1990
- [3] 路甬祥，胡大绥. 电液比例控制技术. 北京：机械工业出版社，1988

作者简介：冀宏，1971年生，男，浙江大学流体传动及控制在读博士生，甘肃工业大学讲师，主要从事液压元件流体振动及噪声控制方面的研究。电话：0571-87951665-24，E-mail: jhxy@zjuem.zju.edu.cn

收稿日期：2002-10-08

清华大学研制成功激光器测尺

清华大学最近宣布研制成功了纳米激光器测尺，并已通过了中国计量科学研究所的严格测试。据清华大学张书练教授介绍，这种纳米量级的激光器测尺可广泛用于机械零件、部件的位移测量和量块标定以及桥梁、水坝、建筑物的变形测量等，未来还可能在很大程度上代替现在广泛使用的电感测微仪。经查询，目前国内外尚无同类产品的先例。

该纳米激光器测尺的神奇之处在于振荡的激光束自身就能感知外界物体移动大小，一旦推动圆筒形激光器一头伸出的测量杆，它立即就显示推动了多少距离。

这种产品除了测量范围大、精度高之外，另一个优点就是能够自行校准自己的刻度，直接读出它的测量对象位移了多少，而不像其它测量位移的传感器，它们都需要用另外的仪器标定，然后才能用于测量。

胡正隆