

模糊控制及其在液压伺服系统中的应用

余 兵, 彭佑多, 刘繁茂

Fuzzy Control and its Application in Hydraulic Servo System

YU Bing, PENG You-duo, LIU Fan-mao

(湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 液压伺服系统普遍存在非线性、参数时变、外负载干扰、低阻尼和交联耦合等复杂特点而难以精确控制; 模糊控制因不需系统精确数学模型且具有较强鲁棒性等优势而在非线性控制领域特别是在液压伺服系统中得到应用并仍具有广阔应用前景。

文章较全面地论述了模糊控制特点, 综述了国内外对液压伺服系统的模糊控制研究与应用概况。

关键词: 模糊控制; 液压伺服系统; 复合控制; 应用概况

中图分类号: TP273⁺.4; TH137 文献标识码: B 文章编号: 1000-4858(2006)10-0056-09

1 引言

液压伺服控制是起源于 20 世纪 50 年代由液压技术与控制学科综合发展而来的一门新兴的科学技术。随着液压伺服控制的应用领域从传统的机械操纵及助力装置向航空航天、车辆与工程机械、海洋工程和机器人领域等扩展, 系统工作机构的控制精度、响应速度和自动化程度不断提高, 液压伺服控制表现出了若干新特征, 如环境和任务日益复杂, 普遍存在较大参数变化、外负载干扰以及交联耦合的影响; 频宽和动、静态精度要求高; 非线性特别是电液伺服阀节流特性和流量饱和作用引起的非线性影响大; 微机控制与数字化及离散化带来的问题, 如各种直接式数字电液元件的非线性采样特性使得基于传统的离散系统理论的稳定性判据和控制器设计方法难于奏效^[1,2,19,47]。因此液压伺服控制策略应满足系统动、静态精度要求, 能使系统做到快速而无超调; 对于参数变化、外负载干扰和交联耦合以及非线性因素引起的不确定性呈现较强的鲁棒性; 控制律、控制算法简单可行, 实时性强; 同时控制策略还应具有较强的智能, 能使系统有较高的效率, 即控制器给出的最大控制量能使动力机构的拖动力充分发挥^[1,2,6]。

模糊控制是液压控制领域中的一种重要方法。控制理论经历了经典控制、现代控制, 发展到第 3 代即智能控制, 模糊控制是智能控制的重要部分^[4,8]。目前, 液压伺服系统的经典控制理论已经相当成熟, 对于一些频宽不太高(50 Hz 以下)、参数变化和干扰不太

大的液压伺服系统, 采用经典方法进行设计已经能够满足工作需要^[7]。现代控制理论本质上是时域法, 是建立在状态空间基础上的, 它不用传递函数, 而是用状态向量方程作基本工具^[46]。但经典控制和现代控制都需依赖较精确的数学模型、解决不确定性问题的能力不强、计算工作量大而不适于需快速响应的液压伺服系统, 不易解决非线性复杂问题等。所以在液压伺服系统中用经典控制和现代控制的方法有时难以取得满意的效果^[9]。

智能控制针对对象环境和任务的复杂性与不确定性, 能有效自主地实现复杂信息的处理及优化决策与控制功能, 具有很强的处理不确定性的能力, 且不需要系统的精确数学模型^[10]。因而智能控制得到了液压界的广泛重视^[8]。模糊控制作为智能控制的一个重要分支, 除具有上述特点外, 还具有易于实现对具有不确定性和强非线性对象的实时控制; 对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性; 对于对控制系统的干扰具有较强的抑制能力等特点。因此模糊控制能广泛适用于被控对象参数无精确的表示方法和各参数之间无精确的相互关系的系统。

本文较全面地论述了模糊控制特点, 综述了国内外对液压伺服系统的模糊控制研究与应用概况。

收稿日期: 2006-03-03

基金项目: 湖南省教育厅重点科研项目资助 (B30403)

作者简介: 余兵(1981—), 男, 重庆开县人, 硕士研究生, 主要从事液压传动与控制方面的研究工作。

2 模糊控制及其在液压伺服系统中的应用

2.1 普通模糊控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制,其工作原理是把不断测量到的过程输出的精确量转化为模糊量,经过模糊推理,再把推理得到的模糊量转化为精确量去实现控制动作。模糊控制在家用电器、航空航天、工程机械等多个领域的广泛应用显示了其解决非线性、时变、不确定性复杂系统控制问题的巨大优越性^[2];而在具有典型低阻尼、时变性、非线性且难得到系统精确数学模型特征的液压伺服系统中获得了较为广泛的应用。

左健民、王芙蓉研究了液压伺服控制带材“跑偏”系统的模糊控制,经理论分析和实验证明模糊控制器的控制效果明显优于传统的 PID 调节器,能使系统具有较好的动态响应性能和实时性^[12]。郑春歧、高凤阳等研究了挖掘机液压系统模糊控制方法^[13]。宋锦春等研究了车辆无级变速器液压系统的模糊控制,经理论分析和仿真证明了模糊控制方法的可行性,仿真结果表明使用模糊控制方法系统没有超调,但稳态误差较大,指出应采用高精度模糊控制来解决用普通模糊控制有时在设定点会出现振荡的问题^[14]。左健民、王积伟研究设计了泵控系统的模糊控制系统,并经实验研究证明此控制方法较用常规的 PID 控制方法控制精度高、超调量小^[15]。白桦等对模糊控制在液压挖掘机工作装置运动轨迹控制中的应用进行了分析讨论,指出采用此方法进行挖掘机轨迹控制具有较强的适应性和灵活性,但没有对该方法进行实验仿真研究^[16]。杨其华研究了液动拉力实验装置液压流量的模糊控制,其控制方法是一种基于可变化论域范围的模糊控制方法,对其进行了静荷实验,经理论分析与实验研究表明,使用模糊控制较好地满足了批量生产设备对控制鲁棒性的要求,证明了该控制方法的实用性和有效性^[17]。傅星、李梦超等对模糊控制在大载荷高精度液压控制系统中的应用进行了研究分析,经大庆油田 2 年多的实际应用证明,采用模糊控制方法有效地避免了用常规控制方法容易引起控制量的振荡和过冲缺陷且提高了载荷施加精度,解决了大载荷变化时液压系统的高精度控制难题,进而增加了采油工具检验和采油工艺试验研究数据的准确性和可信度,使模糊控制系统成为有实际应用价值的系统^[18]。

J.-C. Renn, C. Tsai 研究设计了一种新型的低成

本的基于模糊逻辑控制的非线性电液比例流量控制阀,并将其应用于液压压力机中,实验结果表明该种比例阀能对压力机压力缸的撞击速度进行较好的控制。由于伺服阀在一定程度上可以看成高精度的比例阀,所以参考文献[54]对基于模糊控制技术的液压伺服阀的研究设计具有较大的参考价值^[54]。

M. T. Yan, H. P. Li, J. F. Liang 研究设计了一种新型的模糊控制器,该控制器包括 2 个控制循环,其中主循环应用模糊逻辑控制规则库对输出量进行实时在线调整控制,辅循环通过调整参考电压以维持控制器的稳定性;并将此模糊控制器应用于液压电火花线切割机的伺服进给控制系统中,经实验表明使用模糊控制控制线切割机伺服进给系统比使用比例控制可行性更强、效率更高^[55]。

M. H. Chiang, L. W. Lee, J. J. Tsai 研究设计了模糊滑动模式控制器,并对其在液压注射成型机中的应用进行了理论分析与实验;实验结果表明使用该模糊控制器能很好地实现注射机高速控制功能和高效率整合控制,能较好地满足目前液压注射成型机液压伺服系统对系统快速响应与高效率需求^[56]。

M. H. Chiang, Y. P. Yeh, F. L. Yang 研究分析了解耦模糊滑动模式控制策略在液压注射成型机液压伺服系统中的应用,经理论分析和实验结果表明使用该模糊控制策略能同时实现注射机锁模力与能量消耗的整合控制,能获得较高的控制精度和较高的效率^[57]。

综上所述,采用模糊控制方法解决了不少采用传统控制方法无法解决的问题,但普通模糊控制自身所固有的缺陷如控制精度较差、易产生稳态误差、易出现极限环振荡等,限制了其在对控制综合性能要求更高的液压伺服系统中更为广泛的应用。大量研究表明对模糊控制进行适当改造,将其与其他控制策略相结合形成的模糊复合控制方法能有效克服普通模糊控制的自身缺陷,这种模糊复合控制方法为模糊控制在液压伺服系统中的应用将开辟新的途径^[1,3,4,9]。

2.2 带修正因子的模糊控制

带修正因子的模糊控制器设计实际上是一种对误差和误差变化率的加权控制方案。对修正因子取不同的值以适应被控对象的不同要求,使模糊控制器具有一定的通用性和适应性。一般的加权关系采用式 $U = E + (1 - \lambda)C$,式中 E 为误差, C 为误差变化率, λ 是加权系数^[2]。改变 λ 的取值大小以实现误差和误差变化率的不同加权。 λ 取值大小有 2 个基本准

则:其一,当被控对象阶次较低时,对误差的加权值应大于对误差变化率的加权值,反之,对误差的加权值取小值;其二,对于响应较慢的系统,对误差的加权值应较小,反之,对误差的加权值较大^[2,20,39]。由上面分析可知,当误差大时,控制系统的主要任务是消除误差,需对误差 E 加权大些;当误差小时,系统主要任务是使系统尽快稳定,避免超调,希望对误差变化率 C 加权大些。但上述一个修正因子无法满足要求,因此提出不同误差等级有不同修正因子, E 小时用 1 , E 大时用 2 。如下式^[2]:

$$U = \begin{cases} 1 E + (1 - 1) C, E = \pm 1 \text{ 级} \\ 2 E + (1 - 2) C, E = \pm 2 \text{ 级或 } \pm 3 \text{ 级} \end{cases}$$

其中 $1, 2$ (0,1)

$1, 2$ 为不同值时可有不同的控制决策表。用 2 个修正因子后可使控制规则变得更加灵活,满足不同状态下的品质改善。

上述 2 种带修正因子的模糊控制在液压伺服系统中得到了一定的应用。张晓俊、穆临平研究了带修正因子的模糊控制在液压防爆提升机的速度控制系统中的应用,对其阶跃响应仿真表明该控制方法能对提升机的速度进行合理有效的控制^[20]。张志、刘淑莲在液压拉伸机模糊控制系统设计中研究设计了带修正因子的模糊控制器,并通过一关系式使 随误差 E 绝对值的变化而相应的改变,实现了修正因子的自调整,进而改善了控制效果^[21]。谭定忠、张铭钧等研究了水下作业液压机械手夹持力模糊控制技术,分析设计了一种带智能权函数的模糊控制规则进行机械手夹持力控制,这种控制规则的修正因子仅是输入变量误差及误差变化率的函数,根据误差及其变化率的大小自动调整其权重,经实验证明使用该控制方法系统响应快、超调小、控制精度高,能够满足机械手爪抓取作业中对夹持力的控制要求^[22]。

但带修正因子的模糊控制也存在局限性,如随着误差及其变化率和控制量论域量化等级的增加,修正因子个数也相应增加,进而增加了设计的复杂度,这样凭借人工经验来调整修正因子显然比较困难,带有盲目性,而且很难得到一组最佳参数值,也就无法获得令人满意的过渡过程动态特性。

2.3 自组织模糊控制

针对带修正因子模糊控制存在的局限性,可进行自组织模糊控制,其中 可根据不同的误差等级分为

0、1、2、3,误差大时选用大的 值,误差小时选用小的 值。在自组织模糊控制器的系统中,以修正因子 为寻优参数,以目标函数 $J = \int |e(t)| dt$ 为寻优目标^[11]。寻优过程针对被控过程的运行状态,根据目标函数 J 不断推出新的修正因子值以逐渐减少 J 值,直到推出使 $J = \min$ 最优修正因子 为止。若运行状态发生新的变化,则重新开始新一轮寻优过程,直到调整出适合于新运行状态的修正因子。寻优算法可采用单纯形算法、黄金分割法等^[5]。

自组织模糊控制在液压伺服系统中得到了一定的应用。盛万兴、王孙安等研究了电液速度控制系统的智能模糊控制,综合运用了参数优化技术和模糊控制理论设计了自组织模糊控制器,其中的寻优算法为黄金分割法,并将此控制方法应用于并联阀控液压马达速度伺服系统,经实验表明采用自组织模糊控制比采用常规模糊控制时系统有较快的响应和较小的超调^[23]。周士昌、何洪等研究了液压系统油温的数字比例式冷却系统及自学习模糊控制,其中提出自学习模糊控制算法能整行修正模糊控制表^[24]。李霞、刘延俊等研究了自组织模糊控制器在一种新型缓冲与定位系统中的应用,经实验表明自组织模糊控制器对不同的工况有较强的适应性,能实现可变的缓冲行程^[25]。

Fei-Lung Yang, Mao-Hsiung Chiang 等研究分析了耦合自组织模糊滑动模式控制器,并将其应用于整合阀控液压缸系统力控制与负载感测控制。该模糊控制器设计结合普通模糊控制、滑动模式控制、自组织修正器及解耦合控制应用于整合系统,其可以减少普通模糊控制器规则库的数目、能在线即时修正模糊规则库、可以补偿二输入二输出系统的耦合影响、能同时进行力控制与负载感测控制。并经实验研究表明运用此模糊控制器的阀控液压缸系统比运用传统控制器的阀控液压缸系统具有更佳的力控制响应,还可以节省整合控制系统 80 % 以上的消耗能量^[53]。

3 复合模糊控制及其在液压伺服系统中的应用

3.1 自适应模糊控制

在设计控制系统时,不完全知道系统的参数或结构,要求一边估计未知参数,一边修正控制作用,这就是自适应控制问题。自适应控制系统的最大特点是被控对象能自动适应工作环境及自身参数在一定范围内变化(即不确定性),使系统始终保持在优化状态下工作。当前,自适应控制在液压伺服系统中应用仍不广泛,主要是由于其自身的缺点,如对被控对象数学模型

要求严格,此外诸如持续激励、慢时变、严格正实和波波夫不等式条件也制约了其具有更强的鲁棒性。基于模糊控制不需要知道精确数学模型和具有较强的鲁棒性,可以与自适应控制,结合形成自适应模糊控制。自适应模糊控制能自动地对控制规则进行修改和完善,以提高控制系统的性能,对于那些具有非线性、大时滞、高阶的复杂系统有着更好的控制性能。因而,各种形式的自适应模糊控制被广泛应用于液压伺服系统中。由于自适应控制有自校正控制和模型参考自适应控制两种,相应地自适应模糊控制也主要有自校正模糊控制和模型参考自适应模糊控制两种类型。下面就他们在液压伺服系统中的应用进行概述。

李军伟、赵克定进行了双电液伺服马达同步模糊控制系统研究,在分析说明了模糊控制器用来补偿同步通道的非线性和时变性所导致的同步误差的可行性基础上,设计了可以按照同步误差大小自动在线调整模糊控制规则的模糊自适应控制器,并针对某一型号液压仿真转台中框电液位置伺服系统进行了仿真实验,其结果表明采用此模糊控制器能有效克服双电液伺服马达同步系统的非线性和参数的不稳定性以及外干扰对同步系统性能的影响,具有较高的同步控制精度和鲁棒性能^[26]。

王如明、杨建刚研究了自适应模糊控制器在液压电梯中的应用,采用了一种建立在连续输入输出论域上的模糊控制器,避免了普通模糊控制器由于论域的离散化而存在的量化误差,并设计了通过自适应控制算法来调整模糊规则的自适应模糊控制器,将其应用于典型非线性时变系统——VVVF 液压电梯的实时控制,结果表明这种控制器鲁棒性好、其控制精度高、自适应能力强,具有很高的实用价值^[27]。

左健民、王芙蓉针对由于液压调速系统要求的转速变化范围较大使转速误差在小于 41 r/min (即量化误差小于 0.5) 时,计算机作零处理不进行调节,而出现的“盲区”,研究设计了一种不仅具有量化因子和比例因子,还具有调整因子的模糊参数自适应控制器。在误差和误差变化率较大时,只调节量化、比例因子,使系统响应加速;误差和误差变化率较小时,改变量化、比例因子大小,以增加对误差及其变化的分辨率,减小系统超调和稳态误差,同时根据参数调整因子取值规则表选择调整因子对变量 E 、 EC 进行调整,进而确定实际控制量,达到抑制或减小“盲区”的目的^[28,29]。

方一鸣、黄镇海针对液压伺服位置系统的被控对象提出了用模型参考模糊自适应机构对 PID 控制器的比例系数进行在线调节,以减小液压伺服位置系统中参数摄动等引起的超调和振荡,同时提出用变积分系数的方法来消除负载扰动给系统带来的稳态误差,经理论分析和仿真研究表明该控制器使系统有较高的稳态精度和较快的动态响应,整个系统具有很好的鲁棒性^[30]。

3.2 自调整模糊控制

模糊控制表格的规则是人们对某个过程认识的模糊信息的归纳,然而对控制对象的各种非线性、参数时变或随机干扰就很难有正确、完整的归纳。此时控制规则可能很粗糙、不完全正确,影响控制效果,这就需要采用自调整模糊控制。自调整模糊控制有 3 种基本形式:自调整自修正模糊控制、自调整专家模糊控制、量化与比例因子的参数自调整模糊控制^[10]。单一的自调整模糊控制在液压伺服系统中应用较少,但在结合其他控制策略后其应用范围就大大扩展,如参数自调整模糊 PID,其应用将在模糊 PID 章节介绍。

3.3 模糊 PID 控制

与经典控制理论相应而发展起来的控制策略以 PID 控制为代表。PID 控制基于系统误差的现实因素、过去因素和未来因素进行线性组合来确定控制量,具有结构简单易于实现等特点,但传统的 PID 控制在具有参数变化和外干扰的情况下存在参数难以整定、鲁棒性不够好的缺点,并且难以解决动态品质和稳态精度之间的矛盾。随着液压伺服系统对控制精度和动态性能要求的提高,采用传统 PID 控制往往不能满足要求。在这种情况下,综合考虑模糊控制与 PID 控制各自存在的优缺点,将两者结合起来的模糊 PID 控制既具有模糊控制灵活、适应性强的特点,又有 PID 控制精度高的特点^[31,32]。大量研究表明,模糊 PID 控制对复杂控制系统和高精度伺服系统具有良好的控制效果。下面介绍几种主要的模糊 PID 控制及其在液压伺服系统中的应用情况。

3.3.1 Fuzzy—PI (或 PID) 复合控制

普通模糊控制器以误差和误差变化作为变量,具有模糊比例—微分控制作用,但缺少模糊积分控制作用,致使系统稳态性能较差,而 PI 调节器的积分作用有着很好的消除稳态误差的作用。因此,把 PI 控制策略引入模糊控制构成 Fuzzy—PI (或 PID) 复合控制,这样可以改善普通模糊控制器的稳态性能。Fuzzy—PI

(或 PID) 复合控制有 2 种结构: 其一是开关切换 Fuzzy—PI(或 PID) 控制, 在大误差范围内只采用模糊控制, 在小误差范围内切换成 PI(或 PID) 控制; 其二是混合型 Fuzzy—PI(或 PID) 控制, 在大误差范围内, 模糊控制器和 PID 控制器的输出同时作用于被控对象, 使之有较强的驱动作用, 进而使系统快速响应, 在小误差范围内, 模糊控制器断开, 发挥 PID 控制稳态精度高的优势^[11]。在液压伺服系统中应用较多的是第二种控制形式。

丁宏元进行了混合型 Fuzzy—PID 控制在济钢中板轧机液压 APC(Automatic Position Control) 系统中的应用研究, 经理论分析和仿真实验表明: 采用混合型 Fuzzy—PID 控制的动态响应能力和抗干扰能力优于采用 PID 控制, 解决了传统 PID 控制由于液压 APC 的数学模型难以建立、系统的参数时变、非线性等因素使 PID 参数不易整定的问题, 并且提出 Fuzzy—PID 控制策略为今后中厚板轧机液压 APC 系统技术改造、提高 APC 的投运率开辟了一条新途径^[33]。

管杨新、胡大邦等研究了电液位置同步伺服系统的混合型 Fuzzy—PID 控制, 经理论分析和仿真实验表明: 用该模糊 PID 控制器能明显改善系统稳态性能, 使稳态误差很小且调整时间短, 解决了用普通模糊控制器在系统误差趋向于零时可能出现振荡的问题^[34]。

黄茹楠、高英杰研究了 300 四辊可逆冷轧机的电液压力控制系统的混合型 Fuzzy—PID 控制, 并基于 PI 控制和 Fuzzy—PID 控制对系统进行了对比模拟实验, 研究表明采用 Fuzzy—PID 控制与用 PI 控制和普通模糊控制相比, 系统的响应更快、超调明显降低、系统适应能力更强、动态性能更好^[35]。

Fuzzy—PI(或 PID) 复合控制在液压伺服系统中得到了较为广泛的应用, 但也存在一些缺点。混合型 Fuzzy—PI(或 PID) 控制是把模糊控制与积分控制同时作用于被控对象, 使得两种控制相互影响, 不利于充分发挥这两种控制的特点; 而开关切换 Fuzzy—PI(或 PID) 控制在进行切换时, 相当于给系统一种干扰影响了系统的调节过程。李军伟、赵克定针对前两种控制方式的不足, 提出了一种模糊控制与局部积分控制相结合的控制方式, 并应用于液压仿真转台, 经理论研究与实验表明: 采用该控制方法能有效地克服液压伺服系统的非线性、参数的不稳定性及外干扰对系统的影响, 使系统具有较高的控制精度和鲁棒性能^[58]。

3.3.2 模糊—积分混合控制

模糊—积分混合控制是引入积分并直接加在模糊决策后的模拟输出, 能消除稳态误差, 且简单易行。其积分引入是对误差的精确量积分并乘以积分系数再与模糊控制器输出控制作用叠加后构成总的控制作用。此控制方法是一种值得参考的方案, 当前在液压伺服系统中的应用还比较少。

张泽友、王孙安研究了液压并联机器人轨迹跟踪的改进模糊控制, 该控制方法是在普通模糊控制器中引入智能积分环节, 解决了普通模糊控制器无法消除稳态余差、易产生小范围的持续振荡和积分饱和等问题。经仿真研究表明采用该控制器可以提高系统跟踪精度, 该控制方法对于并联机器人的参数摄动和外界干扰有较强的鲁棒性^[36]。

3.3.3 参数自整定模糊 PID 控制

参数自整定模糊 PID 控制器包括模糊参数整定器和变参数 PID 控制器两部分。模糊参数整定器根据误差及其变化率利用模糊规则对 PID 控制器的 3 个参数进行调整, 以实现 PID 控制器对对象的控制^[39]。此控制方法能够实现 PID 参数的在线自调整, 被广泛应用于液压伺服系统中。

吴振顺、姚建均等以液压伺服控制系统为研究对象, 设计了模糊自整定 PID 控制器, 并对其与常规 PID 控制器进行了系统响应、抗干扰特性的对比仿真实验。经理论分析和仿真结果表明: 模糊自整定 PID 控制器参数在线自整定能力强、能有效抑制干扰和噪声、具有较强的自适应能力和鲁棒性^[37]。

权龙、邢向丰研究一种新型的模糊自调整 PID 控制器在车辆液压悬架主动控制中的应用, 经理论分析和仿真研究表明: 采用此控制器较常规 PID 控制器系统减振性好, 能有效改善车辆的乘坐舒适性及操作稳定性^[38]。

牛巍、黄效国等对轧机液压厚度控制(HAGC)系统中的模糊 PID 应用进行了研究, 其控制策略采用参数模糊自整定 PID 控制, 将其与传统 PID 控制进行对比仿真实验, 结果表明采用模糊 PID 控制方法系统的调节精度较高、稳态性能较好、没有超调和振荡、具有较强的鲁棒性^[40]。

由上述可知, 模糊 PID 控制在液压伺服系统中取得了广泛的应用, 但目前对模糊 PID 控制的研究进展较慢, 一定程度上阻碍其应用领域的扩展。如由于模糊 PID 控制结构形式很多, 目前模糊 PID 控制器结构设计欠合理以至于工程上不能根据控制要求方便地选

择相应的控制器;未完整建立模糊 PID 控制器各参数与常规 PID 控制器参数间的等效转换关系,以至于不能方便准确地调节参数;目前对模糊 PID 控制器的稳定性研究往往只针对特定的对象,缺乏通用性^[31,32]。

3.4 模糊神经网络控制

神经网络控制是模仿人类的感官器官和脑细胞的工作原理而工作的,它是一种基本不依赖于模型的控制方法,适用于具有不确定性、时变的对象系统,它具有较强的自适应能力、学习能力、非线性映射能力、鲁棒性和容错能力。这些优点正是液压伺服系统所迫切需要的。近年来,流体控制界对神经网络控制的研究与应用做了大量工作。但神经网络控制存在的不足阻碍了其进一步应用,主要不足有:内部知识表达方式不明确、不能利用必要的初始经验知识、权值的收敛速度慢易陷入局部极值^[7]。大量研究分析表明,模糊神经网络控制可以综合模糊控制与神经网络控制的优点,克服它们的缺点,以使连接权的物理意义明确、可以利用初始的模糊模型给网络赋初值、改善收敛速度、提高泛化能力,弥补模糊控制缺乏学习能力不能根据积累的经验自动地改善系统性能的缺陷等^[41]。目前,对于模糊神经网络的研究与应用成为了一个热点,其在液压伺服系统中的应用也在逐渐增多。

陈丽、李建更等研究了 UC 轧机板形控制中间辊弯辊回路的模糊神经网络控制,解决了 UC 轧机中间辊弯辊回路的非线性过程精确控制问题,通过仿真实验表明:此控制方法能对中间辊弯辊回路进行快速有效的控制、能准确地跟踪目标二次板行的设定值,系统响应快、超调小、鲁棒性强,对参数时变有很好的自适应能力^[42]。

左健民研究了基于对象传播网络(CP)的模糊控制(以下简称 CPFC),并对液压控制系统中阶跃负载(压力突变)条件下的压力调节过程进行了 PID 控制、普通模糊控制、CPFC 的对比实验。实验结果表明:采用 CPFC 较其他两种控制方法使控制性能有很大改善,解决了普通模糊控制在控制过程中具有过渡过程时间长、压力振荡较大的问题,说明了 CPFC 比较适用于时滞、非线性系统;并指出由于 CPFC 的控制规则构成仍需要有控制对象的实验知识,因而控制对象的变化会影响控制性能,可通过自组织方式或进行离线学习和训练来克服^[43]。

燕山大学的裴福俊在项目“结晶器非正弦振动的研究”中对液压伺服驱动连铸结晶器振动模拟装置的

控制方法进行了研究,基于其液压伺服系统的非线性机理模型设计了模糊神经网络滑模控制器,经理论分析和仿真研究表明:该控制器能使液压伺服位置系统有较好的动静态性能和较高的跟踪精度,能有效解决该液压伺服系统的非线性问题^[44]。

陈志旺、杨景明等针对液压弯辊板形控制复杂系统,提出了模糊神经网络板形控制方案,在模糊神经网络辨识被控对象模型基础上,设计了模糊神经网络控制器。采用此控制方法避免了普通模糊控制不具备学习能力和神经网络权值无意义的缺点,同时指出该控制方法为其他复杂工业对象的辨识与控制提供了新的思路^[45]。

模糊神经网络控制在液压伺服系统中得到了一些成功的应用,但对连续生产过程中出现干扰大、可变因素多的复杂性工业过程,模糊神经网络处理系统问题仍有不足之处:在连续生产过程中很难达到真正的实时性要求,实现真正的实时自学习、自调整;离线学习时抗干扰能力强,但在实时过程中,相关软硬件的限制往往会削弱其抗干扰能力;其工程化的实用开发平台还不成熟,目前的开发平台中,很多组态软件都只对传统 PID 控制提供了很方便的应用^[41]。这些不足限制了其在液压伺服系统中的进一步应用。

3.5 双模/多模模糊控制

双模模糊控制,当误差绝对值大于某一误差设定值时,采用 Bang-Bang 控制;反之,小于时,采用模糊控制^[2]。此控制策略由于减少了误差的论域,分档可小些。但误差设定值的选择要适当:选小了,大范围内都是 Bang-Bang 控制,输出上升快,但超调可能大些;选大了,可以减小超调,但输出上升慢。误差设定指适当时,这种控制器具有结构形式简单、快速准确、超调小及对参数不敏感的特点。目前,这种控制方法在液压伺服系统中的应用不多。

赵国军、杨华勇研究了多模式模糊控制在速度反馈式液压电梯系统中的应用,根据液压电梯运行速度曲线设计了带修正因子的模糊控制器,并在此基础上引入 Bang-Bang 控制,形成了多模模糊控制,以解决误差及其变化率的分档次数多少可能引起系统滞后的问题。经实验研究表明该控制器对系统参数变化不敏感,有很强的鲁棒性和抑制随机干扰的能力^[48]。需说明的是,参考文献^[48]的液压系统采用的是比例阀,由于伺服阀在一定程度上可以看成高精度的比例阀,所以参考文献^[48]对多模模糊控制在液压伺服系统中

的应用具有较大的参考价值和启发意义。

3.6 模糊变结构控制

变结构控制实质是一种继电型(开关)断续控制,它要求频繁、快速地切换系统的控制状态。这种控制方式使系统的状态向量进入开关面后就被约束在开关面的领域内滑动至零。在切换面附近领域,由于惯性与滞后等影响,在滑动运动上通常有一个抖动的叠加分量;另外,切换开关的非线性也将引起振动^[2]。将其与模糊控制结合而成的模糊变结构控制可以消除变结构控制的抖振。模糊变结构控制在液压伺服系统中有一定的应用。

李军伟、赵克定进行了仿真转台液压伺服系统自适应模型跟踪模糊变结构控制的研究。提出了一种自适应模糊滑模变结构模型跟踪控制的设计方法。理论分析和仿真研究表明:模糊变结构控制可减缓滑模状态下的颤振、能保持对参数的不确定性与负载干扰以及非线性因素的鲁棒性^[49]。

3.7 多维模糊控制

在一般的模糊控制系统中,考虑到模糊控制器实现的简易性和快速性,通常采用二维模糊控制器的结构形式。采用二维模糊控制器的系统有可能获得良好的动态特性,但静态特性不好,且在工作点附近易于产生小范围的振荡,这是由于误差及误差变化率被量化环节离散分档后,丢失部分信息,形成不连续而造成调节死区所致。基于此,增加模糊控制器的维数,即3个输入量分别为位置误差、速度误差和加速度误差,便形成了三维模糊控制器,其控制精度有所提高,但由于维数变多控制算法的实现也更困难。目前,三维模糊控制器在液压伺服系统中的应用还不多。

徐兆红、迟毅林等研究了三维模糊控制在电液位置伺服系统中的应用,采用三输入—单输出模糊控制结构,设计了三维模糊控制器。经理论分析表明三维模糊控制器的实质是一个变结构的自适应PID控制器,仿真结果表明此控制器改善了电液位置伺服系统的稳动态性能,提高了工作精度^[50]。参考文献[50]对三维模糊控制器的分析为研究多输入—多输出模糊控制提供了可行的思路和研究方法。

3.8 智能控制

模糊控制能够较好地描述并运用人类语言中含有模糊概念的经验和知识,但其存在缺陷,特别是在工作点附近不宜采用模糊控制;PI控制能够消除偏差;Bang-Bang控制能实现对给定值的快速跟踪。综合以

上3种控制律的优点设计一种智能控制,其在液压伺服系统中有一定应用。

杨进波等研究了非线性多变量液压系统的智能控制^[51]。黎启柏、陈刚等针对二次调节液压系统转速控制中存在的复杂性和不确定性,研究设计了开关—模糊—PID复合控制方法,经实验表明采用此模糊控制大大改善了系统的动静特性,极大提高了系统抗外部干扰和适应内部参数变化的鲁棒性^[52]。

4 结束语

应用以模糊控制为基础综合经典控制、现代控制及神经网络控制的复合控制方法,能更好地解决液压伺服控制系统的高响应、高精度要求,以及系统的非线性、时变等复杂问题,能更好地提高液压伺服控制系统的综合性能,必将进一步推动液压伺服控制学科的发展。

参考文献:

- [1] 李运华,史维祥,等. 近代液压伺服系统控制策略的现状与发展[J]. 液压与气动,1995(1):3-6.
- [2] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] 崔涛,赵莉. 模糊控制理论和应用的发展概况[J]. 自动化仪表,2002,23(7):1-3.
- [4] 李俊,刘小宁. 智能控制中模糊控制的应用与发展[J]. 自动化与仪表,2000,15(1):1-3.
- [5] 罗公亮,卢强. 智能控制与常规控制[J]. 自动化学报,1994,20(3):324-332.
- [6] 史维祥. 流体控制发展的一些动向[J]. 液压气动与密封,2001(1):10-12.
- [7] 李运华,王占林. 神经网络控制及其在液压伺服系统中的应用[J]. 机床与液压,1996(3):3-7.
- [8] 张洪涛,安瑞生. 智能控制技术在电液伺服控制中的应用[J]. 液压与气动,1998(6):6-7.
- [9] 孙新学,周玉平,等. 非连续控制在液压伺服控制中的应用[J]. 机床与液压,2003(1):16-19.
- [10] 张化光,孟祥萍. 智能控制基础理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [12] 左健民,王芙蓉. 液压伺服控制带材“跑偏”系统的模糊控制研究[J]. 江苏理工大学学报,1999,20(5):54-57.
- [13] 郑春歧,高凤阳,等. 挖掘机液压系统模糊控制方法的研究[J]. 工程机械,1999(11):8-10.
- [14] 宋锦春,周生浩,等. 车辆无级变速器液压系统的模糊控

- 制[J]. 中国机械工程, 2003, 14(8): 644 - 645.
- [15] 左键民, 王积伟. 泵控系统的模糊控制系统设计[J]. 电气传动, 1997(2): 13 - 16, 33.
- [16] 白桦, 陆念力, 等. 液压挖掘机工作装置运动轨迹的智能化模糊控制[J]. 建筑机械, 2000(1): 39 - 41.
- [17] 杨其华. 液压拉力试验装置液压流量的模糊控制[J]. 机电工程, 1999(3): 12 - 13.
- [18] 傅星, 李梦超, 等. 模糊控制在大载荷高精度液压控制系统中的应用[J]. 天津大学学报, 2004, 37(8): 750 - 752.
- [19] 毕涛. 模糊控制器在液压控制系统中的应用[J]. 唐山高等专科学校学报, 1999, 12(2): 25 - 30.
- [20] 张晓俊, 穆临平. 液压防爆提升机速度控制系统的模糊控制[J]. 机械管理开发, 2003(4): 6.
- [21] 张志, 刘淑莲, 等. 液压拉伸机模糊控制系统设计中的问题研究[J]. 武汉科技大学学报, 2000, 23(3): 267 - 271.
- [22] 谭定忠, 张铭钧, 等. 水下作业液压机械手夹持力模糊控制技术的研究[J]. 机床与液压, 2001(1): 24 - 25, 46.
- [23] 盛万兴, 王孙安, 等. 电液速度控制系统的智能模糊控制[J]. 机床与液压, 1994(4): 201 - 204.
- [24] 周士昌, 何洪, 等. 液压系统油温的数字比例式冷却系统及自学习模糊控制[J]. 液压与气动, 1995(1): 24 - 26.
- [25] 李霞, 刘延俊, 等. 一种新型缓冲与定位系统[J]. 自动化仪表, 1999, 20(7): 21 - 22.
- [26] 李军伟, 赵克定, 等. 双电液伺服马达同步模糊控制系统的研究[J]. 机床与液压, 2003(1): 115 - 116.
- [27] 王如明, 杨建刚. 自适应模糊控制器在液压电梯中的应用[J]. 计算机工程, 1999, 25(6): 23 - 24.
- [28] 左键民. 模糊参数自适应控制技术在液压调速系统中的应用研究[J]. 机床与液压, 1998(2): 9 - 11.
- [29] 王芙蓉. 模糊参数自适应控制技术在液压调速系统中的应用研究[J]. 机械设计与制造工程, 1997, 26(5): 25 - 28.
- [30] 方一鸣, 黄镇海, 等. 液压伺服位置系统模型参考模糊自适应 PID 控制器的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(3): 6 - 8, 11.
- [31] 夏红, 宋建成. 模糊 PID 控制器的发展[J]. 化工时刊, 2003, 17(1): 1 - 5.
- [32] 卢艳军, 田方. 模糊 PID 控制技术及应用中的问题分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2004, 6(4): 48 - 50.
- [33] 丁宏元. 模糊控制在济钢中板轧机液压 APC 系统中的应用研究[J]. 山东冶金, 2000, 22(4): 42 - 43.
- [34] 管杨新, 胡大邦, 等. 电液位置同步伺服系统的模糊控制研究[J]. 机床与液压, 2002(1): 83 - 85.
- [35] 黄茹楠, 高英杰. 电液压力控制系统的模糊智能控制[J]. 燕山大学学报, 2001, 25(4): 368 - 370.
- [36] 张泽友, 王孙安. 并联机器人轨迹跟踪改进模糊控制研究[J]. 机床与液压, 2004(8): 97 - 98, 134.
- [37] 吴振顺, 姚建均, 等. 模糊自整定 PID 控制器的设计及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1578 - 1580.
- [38] 权龙, 邢向丰, 等. 一种模糊自调整 PID 在车辆液压悬架主动控制中的应用[J]. 机床与液压, 2000(6): 29 - 30, 14.
- [39] 占自才. PID 智能模糊自整定控制器设计及其应用[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(4): 78 - 81.
- [40] 牛巍, 黄效国, 等. 轧机液压厚度控制系统中的模糊 PID 应用[J]. 冶金自动化, 2005 年增刊: 251 - 253.
- [41] 刘良江, 侯拥和. 模糊神经网络技术的发展与应用[J]. 矿冶工程, 2002, 22(1): 66 - 68.
- [42] 陈丽, 李建更, 等. UC 轧机二次型板形缺陷模糊神经网络控制[J]. 控制工程, 2005, 12(5): 438 - 441.
- [43] 左键民. 基于对象传播网络(CP)的模糊控制研究[J]. 机床与液压, 2003(1): 220 - 221.
- [44] 裴福俊. 液压伺服驱动位置系统的智能控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [45] 陈志旺, 杨景明, 等. 基于模糊神经网络的液压弯辊板形控制系统设计[J]. 中南大学学报, 2005, 36(Special 1): 861 - 866.
- [46] 王划一, 杨西侠, 等. 现代控制理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [47] 王春行. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [48] 赵国军, 杨华勇. 多模式模糊控制理论在速度反馈式液压电梯系统中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 1997(1): 6 - 10.
- [49] 李军伟, 赵克定. 仿真转台液压伺服系统自适应模型跟踪模糊变结构控制的研究[J]. 机床与液压, 2005(1): 98 - 100.
- [50] 徐兆红, 迟毅林, 等. 三维模糊控制在电液位置伺服系统中的应用[J]. 液压与气动, 2005(1): 45 - 47.
- [51] 杨进波, 等. 非线性多变量液压系统的智能控制[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(9): 72 - 76.
- [52] 黎启柏, 陈刚, 等. 二次调节液压系统的开关—模糊—PID 控制[J]. 机床与液压, 2003(5): 90 - 91, 32.
- [53] Fei-Lung Yang, Mao-Hsiung Chiang, Jenn-Hwa Guo. Study on force control and load sensing control of a hydraulic valve-controlled cylinder system with decoupling self-organizing fuzzy sliding-mode controller[J]. Taiwan University of the College of Engineering, 2004(92): 57 - 70.
- [54] J.-C. Renn, C. Tsai. Development of an unconventional electrohydraulic proportional valve with fuzzy-logic controller for hydraulic presses[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(1 - 2): 10 - 16.

电液比例控制在混凝土泵中的应用

容一鸣, 尹腾飞

Application of Electro-hydraulic Proportional Control Technology in the Concrete Pump

RONG Yi-ming, YIN Teng-fei

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要:提出了采用电液比例控制技术,实现对混凝土泵主缸换向过程控制的新方式,其中比例控制采用 S7-200 型 PLC 实现。该方案的实施消除了混凝土泵在主缸换向时所产生的液压冲击,具有实际的应用价值,也为进一步研究混凝土泵计算机控制和微机监控打下基础。

关键词:电液比例控制技术;混凝土泵;液压冲击;PLC

中图分类号:TH137 文献标识码:B 文章编号:1000-4858(2006)10-0064-03

近年来,我国液压活塞式混凝土输送泵取得了飞速发展,极大地提高了混凝土施工的效率及施工质量。混凝土泵是利用 2 个主缸交替地推动混凝土输送活塞,从而将混凝土加压后用管道进行输送的机械设备。

由于泵送系统流量较大,运动速度又快,在换向时会引起很大的换向冲击。不仅引起很高噪声,而且对整机结构十分不利。按传统方式采取各种方式的缓冲,效果都不尽人意。本文应用电液比例容积控制技术,采用比例控制泵,在主缸换向时,先将液压泵的排量逐渐减小,使主缸平稳减速,当主缸速度接近于零时,换向阀换向,然后控制主泵排量逐渐增大,使主缸的速度平稳上升。控制主泵排量变化的梯度,就能实现主缸平稳而又迅速的换向过程。

1 工作原理

混凝土输送泵的工作原理如图 1 所示,两主缸串联工作,一主缸前进时,另一缸后退,主缸上设有信号

口,在当主缸前接接近终点时,从信号口出来的油压信号通过转换器转换成电信号送给 PLC,PLC 根据这一信号控制液压泵变量并进行换向,其过程可用图 2 来表示。由于换向过程控制精度要求并不很高,所以系统采用开环控制。由于液压泵及换向阀的响应速度限制,整个换向过程时间在 500 ms 以上,这是为了获得平稳换向的时间代价。

2 控制方式

传统的电液比例控制大多通过放大器采用模拟信号控制,由于计算机控制技术的发展,计算机控制的功能日益强大,获得了广泛的工业应用,在此例中的比例控制采用 S7-200 型 PLC 进行控制。

收稿日期:2006-03-05

作者简介:容一鸣(1946—),男,湖北武汉人,副教授,主要从事机电液一体化及系统控制应用技术等方面的研究工作。

- [55] M. T. Yan, H. P. Li, J. F. Liang. The application of fuzzy control strategy in servo feed control of wire electrical discharge machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15 (11): 780 - 784.
- [56] M. H. Chiang, L. W. Lee, J. J. Tsai. The concurrent implementation of high velocity control performance and high energy efficiency for hydraulic injection moulding machines [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, 2004, 23 (3): 256 - 262.

- [57] M. H. Chiang, Y. P. Yeh, F. L. Yang. Integrated control of clamping force and energy-saving in hydraulic injection moulding machines using decoupling fuzzy sliding-mode control [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27 (1): 53 - 62.
- [58] 李军伟,赵克定. 一种自适应模糊 PID 复合控制在液压仿真转台中的应用 [J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11 (3): 65 - 67, 72.