

靳宝全 ○ 著

# 基于模糊滑模的 电液位置伺服控制系统

JIYU MOH  
DE DIAN  
CIFU KONGZHIXITONG



國防工業出版社

National Defense Industry Press

# 基于模糊滑模的电液 位置伺服控制系统

靳宝全 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

基于模糊滑模的电液位置伺服控制系统 / 靳宝全著.  
—北京:国防工业出版社,2011.4  
ISBN 978-7-118-07324-9

I. ①基... II. ①靳... III. ①电液伺服系统-伺服控制-高等学校-教材 IV. ①TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033556 号

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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 字数 200 千字

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

近年来,随着科技的发展,采用电液伺服控制的机械系统越来越复杂,并且受非线性、参数不确定性、机械谐振、未建模动态特性、传感器动力学特性、外负载干扰等因素影响,对控制系统的精度、响应能力、稳定性及鲁棒性的要求则越来越高,系统的复杂性与苛刻的控制性能要求之间形成了尖锐的矛盾。

滑模变结构控制系统是一种非线性控制器,当系统状态穿越状态空间的不同区域时,反馈控制器的结构按照一定的规律发生变化,使得控制系统对被控对象的内在参数变化和外部扰动具有一定的适应能力,保证系统的性能达到期望的品质。滑模变结构控制系统的鲁棒性要比一般常规连续控制系统强。但是,对于一个实际的滑模变结构控制系统,控制力受限、系统惯性、切换开关的时间与空间滞后、检测误差及离散化形成的准滑模等,都会造成抖振。抖振给变结构控制在实际系统中的应用带来了困难,因此,对其控制信号抖振的消弱成为变结构研究的热点问题。在解决抖振问题的研究上,国内外研究者提出了许多方法,这些方法要么在消弱抖振的同时也降低了系统鲁棒性;要么系统过于复杂,无法应用到实际工程领域。因此,设计一种满足实时性、鲁棒性要求,并有效抑制抖振的先进滑模变结构控制策略,具有重要的理论意义与工程应用价值。

滑模变结构控制和模糊控制是各自独立发展起来的两类控制方法,二者都是对不确定系统进行控制的有效方法,它们的结合会进一步提高控制效果。本书针对滑模变结构控制存在的问题,设计模糊滑模变结构控制器,通过控制特性的互补来获得满意的控

制性能。作者提出按照系统的实时性和鲁棒性的要求设计模糊滑模控制算法,对提出的方法进行理论分析、混合仿真以及系统的试验验证,从而为可靠的工程应用奠定理论和方法基础。

电液控制系统影响因素复杂,不能用精确模型来描述其所有特性,所以,在控制系统的分析和设计中,往往采用简化模型。设计中被忽略的因素可能会引起控制系统品质的恶化、甚至导致不稳定。为提高建模精度,在对阀控缸电液位置伺服系统分析的基础上,考虑系统参数不确定性,建立了基于位置变量与偏差变量的系统状态空间模型,通过数字仿真初步确定控制器参数。为更接近实际系统,使用实际的液压—机械系统物理模型和数字控制器模型,实现阀控缸电液位置控制系统的混合仿真,从而建立一个更加接近实际控制状态的模型。

分析了滑模变结构控制器设计的基本问题及其 Lyapunov 稳定性,阐述了模糊控制器的设计及其稳定性分析问题,并探讨了模糊理论与滑模变结构理论的几种结合方案。针对现有模糊滑模变结构控制策略的缺陷,提出对模糊滑模变结构控制进行更深入的研究,以满足实际工程应用要求。

针对固定参数的趋近律滑模变结构算法无法根据系统参数的变化和干扰的变化进行实时调整的缺点,提出模糊控制器来调整趋近律参数的方法。基于模糊自适应指数趋近律函数切换滑模控制,对非线性、扰动和参数不确定性有较好的鲁棒性,并且克服了常规滑模抖振大和控制力频繁切换的缺点,且实时性强、控制精度高。将这种方法应用于某大型钢铁集团公司硅钢厂电液单辊 CPC 控制系统,并以其物理模型与模糊自适应指数趋近律函数切换滑模控制器模型,进行混合仿真。研究表明,系统在综合考虑非线性、扰动及各种参数不确定性的情况下,模糊自适应指数趋近律函数切换滑模控制能够稳定工作,有效地抑制了抖振。

比例滑模策略保留了线性控制的某些优点,但抖振的存在不仅会降低控制精度,甚至会激发系统的未建模动态或引起机械谐振,这些不足严重制约了比例滑模变结构控制在大负载高精度电

液位置系统中的应用。为避免抖振对系统精度与稳定性影响,提出了采用模糊模型,根据切换函数及其导数的状态自调整比例滑模切换增益,以柔化控制信号。研制大型钢铁集团公司液压 EPC 大负载高精度位置伺服系统的混合仿真结果表明,通过模糊理论实现增益自调整,有效降低抖振,既实现了高精度控制,又保留了滑模策略抗参数扰动及抗扰动能力强的特点。

最后以 DSPACE 平台设计了电液伺服综合试验系统,实现了基于模糊滑模控制策略的快速原型试验。构建了电液伺服综合试验系统的硬件,设计了基于结构不变性原理的电液位置系统加载策略。针对电液位置系统的非线性、参数不确定性及外力扰动,采用提出的基于模糊自适应趋近律函数切换滑模及模糊自调整增益比例滑模方法,进行了实时控制试验,通过与常规控制策略的比较,验证了所提策略的有效性。

在本书写作过程中得到太原理工大学博士生导师熊诗波教授与博士生导师杨洁明教授的大力支持与悉心指导,在此深表谢意。本书还借鉴了许多国内外学者的研究成果,在参考文献中均予以列出,在此也谨向他们致以深切的谢意。若有遗漏不全或引用不当,敬请批评指正。由于水平有限,书中难免存在一些问题和不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2010 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 电液伺服控制系统研究概述 .....	1
1.1.1 电液伺服控制系统的历史、现状及发展趋势 .....	1
1.1.2 影响电液伺服控制系统控制性能的因素 .....	2
1.1.3 先进控制策略在电液伺服系统中的应用 .....	6
1.2 模糊控制理论 .....	9
1.2.1 模糊控制理论的研究意义 .....	9
1.2.2 模糊控制理论的研究进展 .....	10
1.2.3 模糊控制与其它控制策略结合构成的 新理论研究进展 .....	11
1.3 滑模变结构控制 .....	16
1.3.1 滑模变结构控制基本理论 .....	16
1.3.2 滑模变结构控制理论的发展概况 .....	19
1.3.3 电液伺服系统滑模变结构控制的国内外 研究进展 .....	23
1.4 研究意义 .....	25
1.5 主要研究内容 .....	26
<b>第 2 章 阀控缸电液位置伺服系统建模</b> .....	29
2.1 引言 .....	29
2.2 阀控缸电液位置伺服控制系统动态特性 .....	29
2.2.1 电液伺服阀特性分析 .....	29
2.2.2 阀控缸电液位置伺服系统动态特性方程 .....	32
2.3 阀控缸电液位置伺服系统的状态空间模型 .....	37

2.3.1	基于位置变量的阀控缸电液位置系统 状态空间模型 .....	38
2.3.2	基于偏差变量的阀控缸电液位置系统 状态空间模型 .....	39
2.4	阀控缸电液位置系统的混合仿真模型 .....	40
2.5	小结 .....	42
<b>第3章</b>	<b>模糊滑模变结构控制器 .....</b>	<b>43</b>
3.1	引言 .....	43
3.2	滑模变结构控制器设计 .....	44
3.2.1	切换函数的设计 .....	44
3.2.2	控制策略的选择 .....	45
3.2.3	抖振的产生及抑制 .....	48
3.2.4	滑模变结构的 Lyapunov 稳定性分析 .....	52
3.3	模糊控制器 .....	56
3.3.1	模糊控制器的设计 .....	56
3.3.2	模糊控制器的稳定性分析 .....	59
3.4	模糊理论与滑模变结构理论结合方案的选择 .....	61
3.4.1	基于模糊规则的滑模控制量优化 .....	61
3.4.2	模糊自适应调整边界层的滑模控制 .....	63
3.4.3	模糊等效滑模控制 .....	65
3.4.4	自适应模糊滑模控制 .....	66
3.5	小结 .....	68
<b>第4章</b>	<b>基于模糊自适应趋近律的电液位置系统函数     切换滑模控制应用 .....</b>	<b>69</b>
4.1	引言 .....	69
4.2	基于趋近律的电液位置系统函数切换控制 .....	70
4.2.1	趋近律及滑模运动的数学模型 .....	70
4.2.2	不同趋近律模式的电液位置系统函数 切换控制 .....	73
4.2.3	基于指数趋近律的电液位置系统函数	



切换控制分析 .....	76
4.3 基于模糊自适应指数趋近律的电液位置 系统函数切换控制 .....	78
4.3.1 模糊自适应指数趋近律函数切换滑模 控制器 .....	79
4.3.2 冷轧硅钢片退火涂层机组电液单辊 CPC 系统 .....	86
4.3.3 混合仿真研究 .....	89
4.4 小结 .....	100
<b>第5章 大负载高精度电液位置系统模糊自调整增益     比例滑模控制应用 .....</b>	<b>100</b>
5.1 引言 .....	100
5.2 滑模变结构策略实现大负载高精度电液位置 控制的影响因素 .....	100
5.2.1 抖振本身对位置控制精度的影响 .....	100
5.2.2 抖振对考虑结构柔度的高精度电液位置 系统的影响 .....	103
5.3 比例切换滑模变结构控制器设计 .....	107
5.3.1 比例切换滑模变结构控制的相变量 .....	108
5.3.2 电液位置系统主反馈比例切换滑模变 结构控制 .....	110
5.4 液压 EPC 系统模糊自调整增益比例滑模控制 .....	114
5.4.1 液压 EPC 系统 .....	114
5.4.2 模糊自调整增益比例滑模控制器设计 .....	117
5.4.3 混合仿真研究 .....	121
5.5 小结 .....	131
<b>第6章 电液位置系统的模糊滑模控制试验研究 .....</b>	<b>132</b>
6.1 引言 .....	132
6.2 电液位置伺服综合试验系统 .....	132
6.2.1 电液伺服综合试验系统硬件组成 .....	132

6.2.2	半实物仿真试验 DSPACE 平台及试验 步骤 .....	135
6.2.3	基于 DSPACE 平台的电液位置控制总体 方案 .....	137
6.2.4	电液位置伺服试验系统加载方法 .....	139
6.3	基于 DSPACE 平台的控制器设计 .....	142
6.3.1	输入/输出变量的配置及信号变换 .....	142
6.3.2	位置控制器的设计 .....	146
6.3.3	加载控制器设计 .....	148
6.4	试验研究与数据分析 .....	151
6.4.1	加载系统减小多余力试验研究 .....	151
6.4.2	比例滑模与模糊自调整增益比例滑模试验 ..	152
6.4.3	指数趋近律滑模与模糊自适应指数趋近 律滑模试验 .....	160
6.4.4	试验结果比较与结论 .....	162
6.5	小结 .....	168
<b>第 7 章</b>	<b>总结与展望</b> .....	169
7.1	总结 .....	169
7.2	可能创新之处 .....	170
7.3	工作展望 .....	171
<b>参考文献</b>	.....	173

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电液伺服控制系统研究概述

### 1.1.1 电液伺服控制系统的历史、现状及发展趋势

液压控制系统具有许多显著的优点:如构成的大功率电液伺服系统具有结构紧凑、体积小、质量轻、加速性好的特点,其功率—质量比和力矩—惯量比大;液压系统因其体积弹性模量大,可形成较大的液压弹簧刚度,该刚度与负载惯量耦合形成的液压固有频率较高,响应速度快,而相同压力和负载的气动系统,其响应速度仅为液压系统的  $1/50$ ;因为液压伺服系统油液的压缩性很小,故液压伺服系统抗负载的刚度大,气动系统的刚度仅为液压系统的  $1/400$ ;另外液压控制系统还具有润滑性好、寿命长、调速范围宽、低速稳定性好、动力传输方便、储存能量方便等优点。但电液伺服控制系统也存在电液伺服阀抗污染能力差、液压油易受污染,并可能造成执行机构的堵塞、对工作油液的清洁度要求高、油温的变化对系统性能影响很大、液压元件的制造精度要求及成本高、噪声大、泄漏、液压能源的获得和远距离传输不如电气系统方便等缺点。

科学界对电液伺服控制的兴趣最初起源于舰艇的操舵控制。在第二次世界大战期间,由于先进武器装备对大功率、高精度及快速响应的需要,促使液压伺服控制技术迅速发展。特别是反馈控制在液压控制系统中的应用、液压技术与电子技术的日益结合,使得电液伺服控制系统从元件、系统、理论及应用方面都日趋完善。到 20 世纪 50 年代末期和 60 年代初,液压伺服控制已广

泛应用到冶金、武器、机械、航空及船舶等领域。目前,电液伺服控制在自动化领域占有重要位置,在某些需要大功率、快速、精确反应的场合,大都采用了液压伺服控制。如飞机的控制系统和操纵机构、武器系统中的雷达与炮塔的跟踪控制、高精度轧机、中程及远程导弹的控制、人造卫星与宇航飞船的飞行控制、负载模拟器、疲劳试验机及大功率模拟振动台等都几乎全部采用了液压伺服及液压传动机构。因此,无论是国防工业还是民用工业都大量采用了电液伺服控制。到20世纪80年代,现代控制理论的成熟、微电子技术和计算机技术的发展,极大地丰富了电液伺服控制的应用范围,并且提高了对复杂系统控制的能力。

液压伺服控制的未来发展可以概括为以下几个方面:高压及大功率、高可靠性、理论解析与特性补偿、与计算机的结合等。现代电液伺服控制需要考虑:环境和任务复杂,存在参数变化、外负载干扰及其他不确定性问题;非线性的影响;高的频宽及动静态精度要求;计算机控制与离散化带来的问题;通过“软件伺服”达到简化系统及部件的结构。针对上述特点,对电液伺服系统的控制策略提出要求:满足动态与静态精度要求,进行优化设计确保系统快速且无超调;对参数变化、扰动、非线性及耦合等不确定性应实现强的鲁棒性;采用智能控制算法;控制算法应满足实时性强,简单可靠。因此,研究通过计算机,借助软件来实现先进控制策略,构成新型智能电液控制系统具有重要的理论与现实意义。

### 1.1.2 影响电液伺服控制系统控制性能的因素

电液伺服系统存在许多不利于系统性能提高的因素,如:

#### 1. 液压伺服系统的本质非线性

液压伺服系统中的非线性主要有以下几种:

(1) 阀的流量—压力非线性。阀的流量—压力特性呈现高度非线性的特点,其  $K_Q$ 、 $K_C$  随工作点和输入幅值变化。

(2) 饱和特性。当输入信号超出其线性范围后,输出信号不再随输入信号变化而保持在某一常值上。具有饱和特性的元件如

伺服放大器等。当输入信号较小而工作在线性区,可看作线性元件;当输入信号较大而工作在饱和区时,就必须作为非线性元件来处理。

(3)死区特性。滑阀的正重叠量、系统的库伦摩擦及内漏等因素将引起死区特性。死区特性对系统静差有影响,对稳定性影响不大。当死区很小时,或对系统的性能不会产生不良影响时,可将它作为线性特征处理;当死区较大时,将使系统静态误差增加,甚至造成系统出现低速不平滑性。

(4)滞环特性。主要由铁磁元件的磁滞引起。主要影响系统的灵敏度及静差,对系统的动态特性的影响主要是相位滞后。

(5)摩擦。摩擦对系统的影响比较复杂,在某些情况下会严重影响系统稳定性。如果在考虑摩擦非线性的同时,考虑惯性、阻尼及弹性力的话,问题将变得非常复杂,摩擦可造成具有游隙的非线性特性,使系统极易产生极限环振荡;在只考虑弹性负载时考虑摩擦,此时从活塞杆或马达轴取出反馈信号时,摩擦非线性处在回路之外,系统是稳定的,但往往会引起爬行现象及附加的位置误差。

(6)游隙。如齿轮传动间隙、库伦摩擦造成的游隙。这一特性使元件输入/输出之间具有多值关系。

非线性控制系统的形成基于两类原因:一是被控系统中包含有不能忽略的非线性因素;二是为提高控制性能或简化控制系统结构而人为地采用非线性元件。液压伺服系统中包含着许多非线性因素,因此,本质上液压伺服系统是非线性伺服系统。非线性因素可能引起系统的静差及自激振荡。自激振荡,会严重影响系统的精度,而且消耗功率,使机件产生磨损和变形,缩短系统寿命。非线性系统的分析远比线性系统复杂,缺乏能统一处理的有效数学工具。在许多工程应用中,由于难以求解出系统的精确输出过程,通常只限于考虑:系统是否稳定;系统是否产生自激振荡及其振幅和频率的测算方法;如何限制自激振荡的幅值以至消除它。

## 2. 液压伺服系统的参数不确定性

(1) 对称阀控非对称液压缸。非对称液压缸控制的液压系统由于其结构的不对称,造成往复运动时速度特性差异很大,在  $dx_p/dt = 0$  附近(运动的换向瞬间)会出现巨大的压力跃变。

(2) 通常  $\beta_e$  取 700MPa,但当空气混入系统或采用软管时, $\beta_e$  将大为降低。

(3) 负载变化带来的惯性负载变化及转动惯量变化。

(4) 负载类型的变化。例如,当系统负载由弹性负载转入空载时,增益由  $K_Q A_p / KK_{ee}$  增加到  $K_Q / A_p$ ,瞬间增益的提高,易造成原来稳定的系统不稳定。

(5) 温度变化导致的参数漂移。温度变化引起的液压油弹性模量和粘性的变化;温度变化引起的功率器件、检测器件及控制器参数的变化。

(6) 干扰。包括力干扰、噪声干扰。干扰通过机电耦合的途径进入到系统中,会造成系统精度降低,甚至引发系统不稳定。

## 3. 液压伺服系统的机械谐振

机械谐振频率对系统的性能起着至关重要的作用,不仅影响系统的频率响应、动态特性,而且直接关系到系统的稳定性、快速性及系统的精度。在大功率液压伺服系统中,有时会遇到机械结构谐振的问题,这主要是由于传动链的柔性、负载的惯量、结构的柔度等因素造成的。它和液压系统耦合构成一个液压—机械综合谐振系统。在伺服系统的固有频率特性中,通常阀控或泵控负载系统的综合谐振,是其中频率最低的环节,严重影响系统的性能,在许多情况下,甚至是左右整个系统性能的主要因素。在许多情况下高精度伺服系统要求伺服带宽的增加和大质量整机结构固有频率的降低,使二者带宽逐渐靠近,在这种情况下,伺服系统中的噪声很容易激起系统的谐振,造成系统的不稳定。因此,改善系统整机结构的谐振频率,消除机械谐振的影响,确保系统的稳定性、快速性、及精确性,是倍受研究者关注的问题。

#### 4. 液压伺服系统的未建模动态

电液控制系统影响因素复杂,不能用精确模型来描述其所有特性,所以,在控制系统的分析和设计中,往往采用简化模型。因此,在所有基于模型的液压控制系统当中都几乎不可避免地存在未建模动态。推导液压动力元件系统方程时,现作如下假设:零开口四边滑阀的四个节流窗口匹配和对称;供油压力恒定;对阀的流量方程进行线性化;忽略管道中的压力损失和管道动态;油温和体积弹性模量为常数;不考虑库伦摩擦等。未建模动态与简化假设对系统的稳定性和性能具有重要的影响,为了提高系统的鲁棒性,在控制器的设计中有必要考虑未建模动态。

#### 5. 传感器响应特性的影响

构造闭环反馈控制系统是通过引入反馈来改善控制系统的性能,通常可以使用输出反馈或状态反馈。无论哪种反馈都需要测量传感器。传感器给出的信息可以直接或间接给出状态向量或输出向量值。在整个控制环节中,传感器中发生的过程是动态的而不是静态的,通常情况下这类动态过程速度很快,但有些情况下形成的时间滞后对系统有不利影响,甚至造成系统的不稳定。对于变结构控制系统,传感器的响应特性可能对抖振的产生和强度,产生重要影响。

综上所述,电液伺服系统建模过程做一系列的假设和简化,获得的标称模型是一个模型不确定性方面的描述。不确定性的参数导致了特殊类型的对象模型。这些不确定性表现为传递函数的不确定性。

由于上述因素的存在,建立精确的数学模型是很困难的,只能建立一个近似的数学模型。在建模时,要作合理的近似处理,要忽略对象中的不确定因素,例如参数误差,未建模动态、测量噪声及不确定的外干扰等。根据近似模型开发设计的控制器,设计中被忽略的不确定因素会引起控制系统品质的恶化、甚至导致不稳定。对不确定性与参数变化系统的控制,需要设计一个确定的控制器来控制一族系统。即不管系统中的动力学参数取什么值,系统在

这个固定不变的控制器作用下,都能正常工作。因此,考虑对象的不确定性,使所设计的控制器在不确定性对系统品质的破坏最严重时也能满足要求,具有一定的理论与工程实际意义。

### 1.1.3 先进控制策略在电液伺服系统中的应用

20 世纪 50 年代与 60 年代,对于伺服机构本身的理论分析已经比较完善。近年来随着应用对象的复杂化,变参数、时变负载、大惯性、非线性及干扰等是经常遇到的,同时利用微机控制带来的实时性和离散化等问题,也会对系统提出更高的要求。要获得满意的控制性能,需要研究性能改善及补偿措施,新型控制策略成为解决这一类问题的一种有效工具。

在经典控制理论中最常用的控制律就是比例、积分和微分 (PID) 控制,它是一种线性控制器,根据给定值与输出值构成偏差,将偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 线性组合构成控制量,对被控对象进行控制,具有简单,易于以模拟或数字方式实现的特点,因此在电液伺服系统控制中获得了广泛的应用。虽然用 PID 调节器进行控制具有很好的稳态精度,但往往动静特性不能兼顾,二者常常发生互相矛盾的现象。且当被控对象机理复杂、具有高度非线性、时变不确定性和纯滞后等特点时,很难找到一组合适的 PID 参数适用于整个系统的宽范围调控。另外,在噪声、负载扰动等因素的影响下,过程参数甚至模型结构均会随时间和工作环境的变化而变化。这就要求在 PID 控制中,不仅 PID 参数的整定不依赖于对象数学模型,并且 PID 参数能够在线调整,以满足实时控制的要求。PID 参数的自调整或自适应可通过改进或其它先进控制策略的融合获得。

Heinrichs 等设计了一种与非线性误差积分相结合的改进型 PI 控制器,对位置伺服和低频变化的力跟踪控制取得了好的控制性能。王幼民等利用稳定性确定系统临界开环增益后,进行正交试验,分析得出最优 PID 参数,表明该方法能使系统性能达到最佳,且试验次数较少。对传统 PID 的局部改进,可在一定程度上提



高其控制性能,但要获得在复杂特性下的具有更强适应能力的控制器仍然值得研究。

神经网络理论、模糊理论、自适应理论、学习控制理论、预测理论及遗传算法等也在电液系统控制获得了广泛的应用。Newton D A研究神经网络与PID控制在阀控电机与阀控缸系统的应用,并比较了其控制结果。Xu Zibin 等针对电液伺服系统的不确定性,设计了自适应反演神经网络控制器逼近系统。Azimian H 等设计了神经网络控制器并应用到电液伺服电机速度控制中。Istif 等设计了两种控制器:一是神经网络预测控制器,其原理为利用神经网络预测模型预测系统输出;二是为非线性自回归滑动平均控制,其原理为将非线性系统动态转换为线性系统,通过在电液伺服阀控缸系统中的研究,分析了各自的特点。Zhao Hong 等针对受恒定干扰和时变干扰的电液位置伺服系统设计了一种在线神经网络控制器,仿真表明这种非线性控制器具有良好的鲁棒性和跟踪性能。王益群等设计了PID神经网络控制器并应用到板形控制电液弯辊伺服系统。王军等分析了电液供油提前器的工作特性和控制要求,引入神经网络结构PID方法,自动实现PID的参数整定,通过对供油提前角器的活塞位移闭环控制,提出了供油提前器的不灵敏角度补偿机械硬件误差,实现了对供油提前角的控制。模糊PID控制策略在非线性和不确定性电液伺服系统中也获得了广泛的应用。Zhao Chunyu 等针对火箭设备材料试验试件在试验过程中刚度与阻尼时变的特性,设计了模糊神经网络控制器。信号输入为位置误差及其微分,通过仿真与试验证明了所提策略的有效性。张福波等针对电液伺服疲劳试验机对试件进行疲劳性能测试时,随着试验信号频率的增加,试验机所施加到试件上的实际载荷与设定载荷相比会出现幅值衰减的现象,直接影响试验结果的准确性。通过对实际输出波形幅值的检测,将设定幅值与检测幅值的偏差及其偏差变化率作为模糊控制器的输入,经模糊推理得出补偿因子。应用补偿因子对波形的幅值进行实时修正,提高了试验结果的准确性。Huang Y J 等针对考虑非线性摩擦的电液伺服