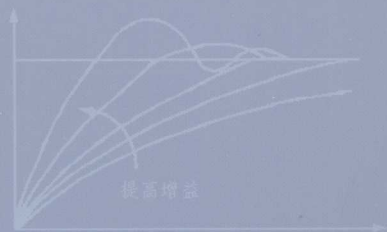
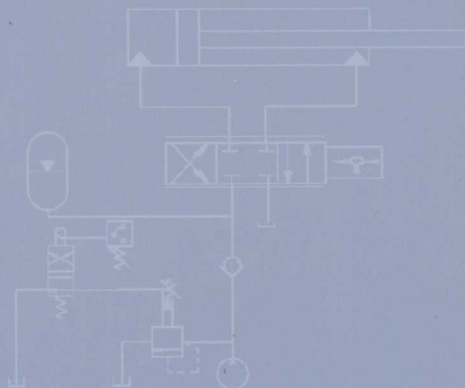


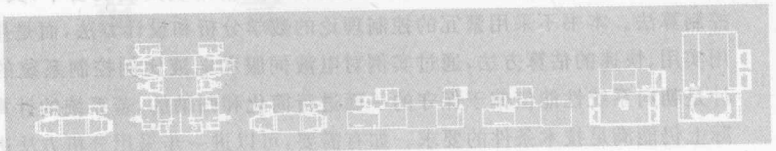
电液伺服与 电液比例控制技术

杨逢瑜 编著



本书将传统的液压伺服控制技术进一步扩展，中普普国大知信特造一各取直尔对插空阔出界由叫组间新中

，引起其至前赴次的新显单前科一



是电液伺服技术的发展和补充，比

电液伺服与电液比例控制技术

杨逢瑜 编著

力、流量和方向阀的基础上改进的

通用化、模块化、集成化方向发

于控制既 [000] 用 [000] 率大

组合集成的电液伺服和电液比

工业发展的主要标志

由于电液伺服和电液比例

的精度和成本较高，因此电液

电液伺服和电液比例控制系统

进行，这是一个矛盾。本书不采

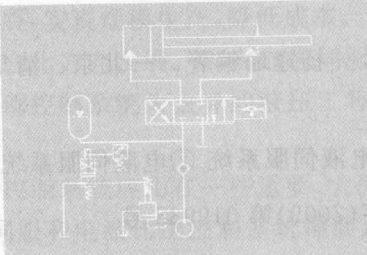
种简单、实用的分析性能的方法

电液伺服、电液比例元件和液压

方法对液压伺服控制

值偏于保守的一面进行简化和

实际上并不意味着实际系统不



电液伺服和电液比例控制系统... 进行，这是一个矛盾。本书不采... 种简单、实用的分析性能的方法... 电液伺服、电液比例元件和液压... 方法对液压伺服控制... 值偏于保守的一面进行简化和... 实际上并不意味着实际系统不... 析方法进行核算。

清华大学出版社
北京

本书在文字内容方面... 010-62770177 3103 03080-01

内 容 简 介

电液伺服和电液比例控制技术应用在一些精密或大型装备中,其设计一般需要用复杂的数学模型和控制算法。本书不采用繁冗的控制理论的数学分析和设计方法,而是用一种简单易懂的方法阐述其理论,用实用、快速的估算方法,通过实例对电液伺服和电液比例控制系统的性能进行分析、估算和设计。该设计是朝向系统性能值偏于保守的一面进行简化和归纳的,若系统的计算性能未能满足所需的技术条件,实际上仍能满足技术条件的要求。如有需要,可以进一步采用分析方法进行校核。

本书可作为大专院校机械电子专业学生的教学参考书,也可供从事机械电子专业液压控制系统相关工作的工程师、技术人员、研究人员以及广大机械电子专业的工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电液伺服与电液比例控制技术 / 杨逢瑜编著. —北京:清华大学出版社, 2009.5
ISBN 978-7-302-19568-9

I. 电… II. 杨… III. ①电液伺服系统 ②电液伺服系统—比例控制 IV. TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第019938号

责任编辑:张秋玲 洪 英

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230

印 张:7.25

字 数:153千字

版 次:2009年5月第1版

印 次:2009年5月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:19.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:032089-01

前 言

电液伺服和电液比例技术是将电信号按比例转换为液压功率输出的电液转换技术。电液伺服系统响应速度快、输出功率大、控制精度高,在许多领域得到了应用。电液比例技术是电液伺服技术的发展和补充,比例阀实际是伺服阀的一种简化,是利用比例电磁铁在压力、流量和方向阀的基础上改进的,以简化结构,提高可靠性,降低成本。

电液伺服和电液比例技术的发展集中地反映在主要基础元件的改进和发展上。电液伺服阀向着简化结构、降低制造成本、提高抗污染能力和提高可靠性方向发展;电液比例阀向通用化、模块化、集成化方向发展,实现规模生产,降低成本。电液伺服和电液比例系统的电子控制器向着专用、高集成、组合化方向发展。以由电液伺服阀、电液比例阀和电子控制器组合集成的电液伺服和电液比例控制系统为主导的液压工程技术,是衡量工业水平和现代工业发展的重要标志。

由于电液伺服和电液比例控制系统应用在一些重要、大型装备中,液压元件和电子设备的精度和成本较高,因此电液伺服和电液比例控制系统需要认真分析、计算和设计,但是对电液伺服和电液比例控制系统性能的计算和设计,通常需用复杂的数学模型和控制算法来进行,这是一个矛盾。本书不采用翔实和艰深的控制理论的数学分析和设计方法,而是用一种简单、实用的分析性能的方法,简明扼要地阐述电液伺服与电液比例控制的基本理论,对电液伺服、电液比例元件和液压控制系统性能提出分析和估算。通过实例,应用简单易学的方法对液压位置控制、速度控制和力(或压力)控制系统进行分析、计算、设计,朝着系统性能值偏于保守的一面进行简化和归纳。如果一个系统的估算性能未能满足所需的技术条件,实际上并不意味着实际系统不能满足技术条件。如有需要,可以进一步考虑采用详细的分析方法进行核算。

本书的对象是从事机械电子专业液压控制系统的工程师、技术人员及研究人员、大专院校机械电子专业的学生以及广大机械电子专业的工程技术人员。

本书存在的错误和缺陷恳请不吝指正。

杨逢瑜

2009年2月于兰州

目 录

第 1 章 控制技术的发展	1	3.2 闭环比例阀	25
1.1 控制理论的发展	1	3.3 伺服阀的闭环系统	26
1.2 电液伺服控制系统	4	3.3.1 流量增益	28
1.3 电液伺服控制技术	4	3.3.2 压力增益	29
1.3.1 电液伺服控制的特点	4	3.3.3 滞环、零偏、线性度、 对称度	30
1.3.2 电液伺服控制的局限	5	3.3.4 分辨率	30
1.4 电液比例控制技术	5	3.3.5 额定流量	31
1.5 电液伺服和电液比例技术的发展	6	3.4 阀的动态特性	33
1.5.1 电液伺服技术的发展	6	3.4.1 阶跃响应	33
1.5.2 电液比例技术的发展	7	3.4.2 频率响应	34
第 2 章 控制方法及控制阀的选择	8	第 4 章 放大器	36
2.1 开环控制与闭环控制	8	4.1 运算放大器	36
2.2 按偏差控制与按扰动控制	10	4.2 功率放大器和电流负反馈 放大器	41
2.3 控制阀的选择	10	4.3 直接耦合式直流放大器	42
2.4 普通开关电磁阀	11	4.4 调制式直流放大器	44
2.5 带阀芯控制的开关电磁阀	12	4.5 交流放大器	44
2.6 不带反馈的比例阀	13	4.6 放大器的调整	44
2.7 带反馈的比例阀	16	4.7 斜坡模块	45
2.8 高性能比例阀	17	第 5 章 传感器	47
2.9 伺服阀	18	5.1 传感器的性能	48
2.10 数字伺服阀	18	5.2 位移传感器	49
2.11 速度控制系统	19	5.2.1 直线位移传感器	49
2.11.1 节流速度控制	19	5.2.2 磁致伸缩传感器	50
2.11.2 带补偿的节流阀的 速度系统	19	5.2.3 磁阻磁尺	50
2.11.3 比例阀和伺服阀速度 控制系统	20	5.2.4 磁通门位移传感器	52
2.12 力控制系统	22	5.2.5 感应同步器	52
第 3 章 闭环控制元件	25	5.3 旋转位移传感器	53
3.1 伺服阀和比例阀的基本结构	25	5.4 速度传感器	54

5.4.1	测速发电机	54	8.6	系统环路增益的确定	80
5.4.2	电磁脉冲发生器	54	8.7	系统性能的估算	81
5.4.3	光电脉冲发生器	55	8.7.1	位置控制系统	83
5.5	流体压力传感器	55	8.7.2	速度控制系统	88
5.6	磁阻编码器式扭矩传感器	56	8.7.3	力控制系统	90
第6章	阀的规格的确定	57	第9章	校正控制技术	94
6.1	从油缸开始设计	57	9.1	比例加微分控制	94
6.2	从马达开始设计	59	9.2	比例加积分控制	96
第7章	影响液压控制系统的因素	62	第10章	电液伺服阀的试验	99
7.1	伺服执行元件控制	62	10.1	伺服阀机械零位调整	99
7.2	伺服变量泵系统	63	10.2	线圈阻抗和电感测量	100
7.3	系统的过滤	64	10.3	伺服阀静态特性试验	101
第8章	闭环控制系统分析	65	10.4	频率特性试验	102
8.1	方框图	65	10.5	温度试验	103
8.2	系统的环路增益	68	10.6	振动试验	104
8.3	系统的响应	70	10.7	伺服阀磨合试验	105
8.4	液压力元件的刚度	72	10.8	电液伺服阀故障及排除	105
8.5	负载的固有频率	77	参考文献		107

控制技术的发展

电液伺服技术是将电信号按比例转换为液压功率输出的电液控制技术;电液比例技术是在电液伺服的基础上降低了控制特性、简化了结构,但提高了控制可靠性的电液控制技术。电液比例阀是利用比例电磁铁技术对电液伺服阀进行简化,在压力、流量、方向阀的基础上发展的一种液压控制阀。电液控制技术集液压、电子和自动控制于一体,具有响应速度快、输出功率大、控制精确性高的特点。伺服阀是伺服系统中的关键元件,直接影响系统的响应速度和稳定性。MTS 公司与 MOOG 联合设计的 MTS-257 伺服阀的频率可达 $500\sim 1000\text{ Hz}$,三级伺服阀流量已达 $13.3\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ 。计算机技术促进了电液伺服技术的提高,如多自由度协调控制、仿真解耦等技术方面的应用。Teststar II 全数字控制器的运算频率可达 5000 Hz ,控制特性在传统的 PID 控制基础上,具有前馈控制、频率反向补偿控制、幅度控制和压差等辅助控制特性。数字控制器运算功能丰富,控制灵活,是模拟控制系统无法比拟的。

1.1 控制理论的发展

控制理论是电液控制技术的基础,是控制系统建模、分析和综合的理论,是控制系统的应用数学分支,其发展经历了 4 个阶段。

1. 经典控制理论

瓦特(J. Watt)于 1788 年发明的飞锤调速器是最早的闭环自动控制装置,20 世纪 40 年代自动控制理论完整形成。荷兰的德勒贝尔(C. Drebbel)使用的温度反馈控制器是最早发明的反馈控制装置,此外还有邓尼斯·帕平(Dennis Papin)发明的蒸汽阀的压力控制器(安全阀)。1868 年麦克斯韦(J. C. Maxwell)用微分方程给出了系统的稳定性条件。1877 年劳斯(E. J. Routh)和 1895 年霍尔维茨(A. Hurwitz)分别给出了高阶线性系统的稳定性判据。1892 年李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)给出了非线性系统的稳定性判据,维什哥热斯基(I. A. Vyshnegreskii)用数学描述了这种理论。1922 年米罗斯基(N. Minorsky)给出了位

置控制系统的分析,并对PID三作用控制给出了控制公式。1931年美国出现了带有线性放大器和积分作用的气动控制器。1934年哈仁(H. L. Hazen)给出了伺服机构的理论。1942年齐格勒(J. G. Zigler)和尼科尔斯(N. B. Nichols)给出了基于时域PID控制器的最优参数整定法。针对负反馈放大器出现的失真,1932年奈奎斯特(Nyquist)提出了负反馈系统的频率域稳定性判据,用频率响应实验数据,而不需求解微分方程。1940年波德(H. Bode)对通信系统频域方法进行研究,提出了频域响应的对数坐标图描述方法。1943年哈尔(A. C. Hall)利用传递函数(复数域模型)和方框图,把通信的频域响应方法和机械的时域方法统一起来(复域方法)。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。1948年伊文斯(W. Evans)提出了经典根轨迹设计法,给出了系统参数变换与时域性能变化之间的关系,使复数域与频率域方法进一步完善。复数域方法以传递函数作为系统数学模型,常利用图表进行分析设计,比求解微分方程简便,可通过实验方法建立数学模型,物理概念清晰,但它只适用于单变量线性定常系统,对系统内部状态缺少了解,且研究时域特性时精确度有限。

2. 现代控制理论

随着航天和计算机技术的发展,20世纪60年代初在经典控制理论的基础上发展了现代控制理论,这是控制技术的一次飞跃。1948年维纳(N. Wiener)的*Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*开创了“控制论”新学科,它研究一个系统各个不同部分之间相互作用的定性性质以及整个系统的运动状态。1954年贝尔曼(R. Bellman)的动态规划理论、1956年庞特里雅金(L. S. Pontryagin)的极大值原理和1960年卡尔曼(R. E. Kalman)的线性系统可控性、可观性、滤波器理论、代数结构、多变量最优控制和最优滤波理论,为现代控制理论状态空间法的建立做出开拓性贡献。频域分析法在第二次世界大战后持续占据主导地位,特别是拉普拉斯变换和傅里叶变换的发展。在20世纪50年代,控制工程发展的重点是复平面和根轨迹。20世纪80年代,计算机在控制技术中的应用使得控制系统精确、迅速。人造卫星和太空技术的发展,使设计复杂、高精度的控制系统成为必需。重量小、控制精度高的系统使最优控制变得重要起来,因此时域手段也发展起来了。状态空间方法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述(实质上是一阶微分或差分方程组)作为数学模型,利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适应于多变量、非线性、时变系统。它不但在航空、航天、制导等军事武器控制中获得成功应用,在工业生产过程控制中也得到了广泛的应用。

3. 大系统控制理论

20世纪70年代出现了以奥斯特隆姆(K. J. Astrom)等为代表的系统辨识、自适应控制理论与方法,以及塞姆斯(G. Zames)的非线性系统稳定性分析、鲁棒控制,塞德(L. Zadeh)于20世纪60年代初创立了模糊集理论和模糊控制。

20世纪70年代,现代控制理论进一步向深度和广度发展,出现了一些新的控制方法和

理论,举例如下。

(1) 现代频域方法:以传递函数矩阵为数学模型,研究线性定常多变量系统。

(2) 自适应控制理论和方法:以系统辨识和参数估计为基础,处理被控对象不确定和缓时变,在实时辨识基础上在线确定最优控制规律。

(3) 鲁棒控制方法:在保证系统稳定性和其他性能的基础上,设计不变的鲁棒控制器,以处理数学模型的不确定性。

(4) 预测控制方法:是一种计算机控制算法,在预测模型的基础上采用滚动优化和反馈校正,以处理多变量系统。

随着控制理论应用范围的扩大,从对个别小系统的控制发展到对由若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域,开始了对大系统理论的研究。大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论基础的动态系统工程理论,具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点,是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。大系统理论目前处于发展和初创阶段。

4. 智能控制理论

机器的性能从开环控制、反馈控制、鲁棒控制到自适应控制的发展是随着参数和干扰的不确定性逐渐加大,而机器的智能化程度要求变高而逐步发展的,如图 1-1 所示。

智能控制是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性,依据人的思维方式和处理问题的技巧解决复杂的控制问题,如被控对象的模型不确定性、高度非线性、分布式传感器和执行元件的动态突变、多时间标度、复杂信息模式、庞大数据量、严格的特性指标以及环境复杂的不确定性和难以辨识。

传统理论建立在精确模型之上;复杂对象要求突破传统的数学语言的分析,采用新的设计方法。传统理论提供处理对象的不确定性、复杂性,如自适应控制和鲁棒控制,以达到优化控制的目的;但由于实际应用中被控对象的严重非线性、不确定性以及工作点的剧烈变化等因素,使得自适应控制和鲁棒控制的应用受到限制,必须采用新的控制技术和方法。传统控制理论输入信息单一;而现代系统要对多种形式的信息进行融合,要求具有自适应、自学习和自组织的功能。智能控制从“仿人”的概念出发,采用模糊控制、神经网络控制和专家控制等方法。

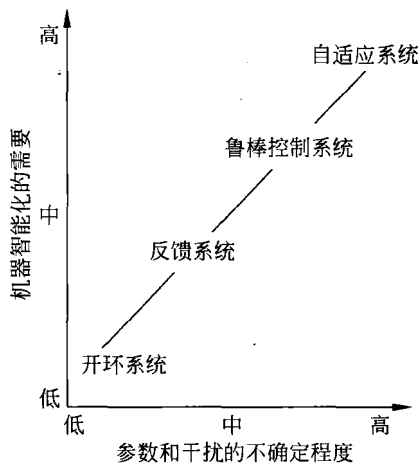


图 1-1 机器智能化程度与参数不确定性之间的关系

1.2 电液伺服控制系统

需要是现代电液控制技术发展的动力。“二战”期间,对武器和飞行器自动控制系统的研究取得了很大进展,喷气式飞行器速度很高,对控制系统的快速性、动态精度和功率重量比都提出了更高要求。1940年在飞机上首先出现了电液伺服系统,其滑阀由伺服电机拖动,伺服电机的大惯量限制了系统的动态特性。20世纪50年代初出现了高响应永磁式力矩马达,50年代后期出现了以喷嘴挡板阀作为前置级的电液伺服阀,使电液伺服系统成为当时响应最快、控制精度最高的伺服控制系统。

1945年麻省理工学院成立了动态分析与控制研究室,对液压控制系统的理论研究取得了关键性的成果。1960年由J. F. Blackburn等人编写的有关液压控制的第一部专著*Fluid Power Control*在麻省理工学院出版。20世纪60年代各种结构的电液伺服阀相继问世,以摩格为代表的采用干式力矩马达和级间力反馈的电液伺服阀的出现和各类电反馈技术的应用进一步提高了电液伺服阀的性能,电液伺服技术日臻成熟。

1958年美国机动车工程师学会制定了电液伺服阀标准,现行标准是1978年修订的。1961年日本成立了控制用液压元件专门委员会,提出了伺服阀的术语、定义、分类和试验规范。标准化生产反映了伺服阀工业发展水平。

20世纪60年代初出现的干式力矩马达解决了金属杂质吸附在磁隙中引起高达38%的故障率的问题。以后各种结构的伺服阀相继出现,性能提高,工艺改善,成本降低,液压伺服控制系统从军用转向民用。60年代后期对伺服阀各类工艺过程进行了深入研究,对其精确的数学模型有了深入了解,对工艺过程控制提出了更高要求。现代微电子和计算机技术为电液伺服控制工程系统提供了充分、廉价的电子装置。各类民用工程对电液控制技术的需求更加迫切,应用更加广泛。

1967年反映液压控制理论和实践的专著*Hydraulic Control Systems*在美国出版。1980年第三部最有影响的专著*Analysis, Synthesis and Design Hydraulic Servosystems and Pipelines*在荷兰德尔夫特技术学院出版。

1.3 电液伺服控制技术

1.3.1 电液伺服控制的特点

(1) 电液伺服控制系统的动力元件的功率重量比和力矩惯量比(或力质量比)大,可组成体积小、重量轻、加速能力强的系统来控制大功率、大负载。而电动元件受有效磁通密度

饱及功率损耗时的发热量的限制,达不到以上条件。液压马达的扭矩惯量比为相当容量电动机的10~20倍,功率重量比为电动机的10倍。

(2) 由液压弹簧和负载质量耦合成的液压固有频率高,液压动力元件起动、加速、制动和反向响应快。加速中等功率电机需一至几秒,而加速同功率的液压马达只需1/10 s左右。

(3) 液压伺服系统抗负载的刚度大,即输出位移受负载变化的影响小,所以它的定位精确,控制精度高。轧机电动压下系统板材厚度只能控制在 $\pm(10\sim 20)\mu\text{m}$,轧机液液压下系统板材厚度可控制在 $\pm 5\mu\text{m}$ 内。典型液压动力元件的控制精度/响应频率比为:

阀控马达: $(2.5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ m}) / (50 \sim 150 \text{ Hz})$;

阀控液缸: $(1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m}) / (30 \sim 50 \text{ Hz})$;

泵控马达: $(2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ m}) / (10 \sim 40 \text{ Hz})$ 。

1.3.2 电液伺服控制的局限

(1) 电液伺服控制阀的工作间隙为几个 μm ,对油液污染敏感。一般液压伺服系统过滤精度为 $10\mu\text{m}$,高性能系统为 $3\sim 5\mu\text{m}$,80%的液压伺服系统故障是由油液污染引起的。

(2) 公差与配合严格,加工精度高,工艺性差,最小间隙为 $2\mu\text{m}$ 。

(3) 混入油中的空气对油液的体积弹性模量影响较大,油液的温升对控制精度影响较大,从而影响控制系统的性能。

(4) 不像电阻和电位的关系可以通过欧姆定律等精确描述,液流受雷诺数(层流和紊流)、液压元件的几何尺寸、摩擦系数、流量系数等一系列因素的影响,状况复杂,理论描述近似,使液压伺服系统理论的成熟程度受到限制,经验和试验显得特别重要。

1.4 电液比例控制技术

电液伺服系统对油液清洁度、元件加工的要求苛刻,制造成本、维护费用较高,系统能耗较大,难以为一般工业用户所接受;而电液开关系统不能满足高性能控制系统的要求。因此,开发一种可靠、价廉的液压控制元件和系统势在必行。从1967年瑞士布林格尔公司生产KL比例复合阀起,到20世纪70年代初日本油研公司申请了压力和流量比例阀两项专利是比例技术的诞生时期。此时的比例阀是将比例型电-机械转换器(如比例电磁铁)用于工业液压阀,以代替开关电磁铁或调节手柄,阀的结构原理和设计准则几乎没有变化,大多不含受控参数的反馈闭环,工作频宽仅为 $1\sim 5\text{ Hz}$,稳态滞环为 $4\%\sim 7\%$,多用于开环控制。

1975—1980年采用各种内反馈原理的比例元件大量问世,耐高压比例电磁铁和比例放

大器在技术上日趋成熟,比例元件的工作频宽已达 $5\sim 15$ Hz,稳态滞环减小到3%左右,其应用领域日渐扩大,不仅用于开环控制,也被应用于闭环控制。20世纪80年代比例元件设计原理进一步完善,采用了压力、流量、位移内反馈和动压反馈及电校正等手段,使阀的稳态精度、动态响应和稳定性进一步提高。因制造成本所限,比例阀除在中位仍保留死区外,它的稳态和动态特性已与工业伺服阀无异。比例技术和插装阀结合开发出的各种不同功能和规格的二通、三通型比例插装阀,形成了电液比例插装技术。传感器和电子器件的微型化使电液比例技术趋于集成化,出现了电液一体比例元件,如电液比例容积元件。各类比例控制泵和执行元件的相继出现为大功率工程控制系统的节能提供了技术基础。60年代开始的数字式或脉冲式比例元件使液压元件对介质污染不敏感,工作可靠,重复精度高,成批产品的性能一致性好;其缺点是由于按载频原理实现控制,故控制信号频宽较模拟器件低。数字式电液比例元件的电-机械转换器主要是步进马达和按脉冲方式工作的动铁或动圈式力马达。数字式电液比例系统实质上是电液数模转换系统或载频调制系统,其控制分辨精度取决于每一脉冲的当量步长或调制精度。

1.5 电液伺服和电液比例技术的发展

电液伺服和电液比例技术的发展体现在主要基础元件的改进和发展上,包括简化结构、降低成本、提高抗污染能力和可靠性,研发大功率永磁直线力马达,研制新型的直接驱动式伺服阀系列。电液伺服阀向着简化结构、降低制造成本、提高抗污染能力和提高可靠性的方向发展,电液比例阀向通用化、模块化、组合化、集成化的方向发展,电子控制器向着专用、高集成、高可靠性的方向发展。

1.5.1 电液伺服技术的发展

(1) 高压、大功率。高压是为使系统的重量更轻,结构尺寸更小。如果压力从21 MPa提高到28 MPa,则系统的总重量可减小约5%;若提高到35 MPa,则系统的总重量可减小10%。航空油泵和液压马达工作压力已达57.1 MPa。大功率是为了解决大惯量、重负载的拖动问题。

(2) 高可靠性。伺服阀的功率增益可达 $10^5\sim 10^7$,频宽200 Hz,最小活动间隙 $2\ \mu\text{m}$,提高伺服阀及其系统的可靠性十分重要。

(3) 性能补偿。随着系统应用目的的多样化,控制对象越来越复杂,大惯量、变参数、非线性及外干扰是经常遇到的,特性补偿显得越来越重要。利用计算机对复杂系统(如多变数液压控制系统)和复杂因数(非线性)进行的仿真研究,主要围绕动态特性进行。

(4) 计算机应用。计算机应用的初期是在伺服回路外侧实施控制,如在数控机床中。

后来把计算机放入控制回路之内进行实时控制,其矛盾是速度。计算机直接和液压数字控制系统结合,需要发展液压数字元件系统。计算机与液压伺服系统构成智能化系统是今后发展的方向。

1.5.2 电液比例技术的发展

(1) 主要零件与标准阀通用,提高比例阀的控制性能和通用性。

(2) 与插装技术相结合形成比例插装技术,通油能力大,流动阻力小,集成度高,结构简单,性能可靠,在大功率控制中能有效节能。

(3) 采用高频响、低功耗比例放大器及高频响比例电磁铁,并含位置反馈的闭环控制比例阀,其流量输出稳态调节特性无中位死区,滞环仅 0.3%,零区压力增益达 3% 额定控制电压,负载腔达 80% 供油压力,其工作频宽和性能已达高性能伺服阀,而成本仅为伺服阀的 1/3;闭环比例阀(伺服比例阀)内装放大器,具有伺服阀的各种特性——零重叠、高精度、高频响,对油液清洁度要求比伺服阀低,工作更可靠。

(4) 计算机对 PID 参数进行最优数字化,并利用试验使实际线路 PID 参数达到最佳匹配。带集成式放大器的位移传感器(200 Hz)为电反馈比例阀小型化、集成化创造了条件;高性能电液比例流量阀是具有伺服阀特性的比例阀,其工作频宽达 40 Hz,可实现机电液一体化,即传感器、测量与控制放大器和阀复合为一体,以提高频宽。

2.1 开环控制与闭环控制

1. 开环控制

控制器与被控对象间只有顺序作用而无反向联系,控制单方向进行,系统的输出量对系统的控制作用不产生影响的系统为开环控制系统(图 2-1)。开环控制系统的控制精度取决于各单元的精度,主要使用在精度要求不高且不存在内外干扰的场合。无反馈环节,系统自身必须精确校准。系统响应于指令输入信号以便相应地改变输出,但系统不能对外部变化或扰动自动地纠正。出现干扰时系统不能完成既定任务。开环控制系统的精度较低,但系统结构简单、稳定、可靠。若组成系统的元件特性和参数值比较稳定,且外界干扰较小时,开环控制能够保持一定的控制精度,而且一般不存在系统的稳定性问题。

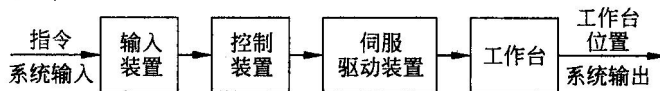


图 2-1 开环控制系统方框图

2. 闭环控制

输出端和输入端之间存在反馈回路,输出量对控制过程有直接影响,系统的输出通过检测反馈单元作用于控制部分,形成闭合回路,称为闭环控制系统或反馈控制系统。闭环的作用是应用反馈减少偏差,其优点是能够自动纠正外部干扰和系统内参数变化引起的偏差。该系统可以采用精度不高、成本较低的元件组成一个精确控制的系统。

液压伺服转向机构是一种机液位置闭环控制的伺服系统(图 2-2)。液缸活塞杆 1 的右端通过铰销固定在汽车底盘上,油缸体 2 和滑阀体连在一起形成机械负反馈,由转向盘 5 通过杆 4 控制滑阀阀芯 3 移动。当缸体 2 前后移动时,通过转向连杆机构 6 控制车轮偏转,从而操纵汽车转向。当各阀口均关闭,缸体 2 固定不动,汽车保持直线运动。当旋转方向盘使阀芯 3 向右移动时,液压缸中压力 p_1 减小, p_2 增大,缸体也向右移动,带动转向连杆 6 向逆

时针方向摆动,使车轮向左偏转,实现左转弯;反之,缸体若向左移就可实现右转弯。为防止扰动,滑阀采用负开口形式。实际操作时,方向盘旋转的方向和汽车转弯的方向是一致的。为使驾驶员在操纵方向盘时能感觉到转向的阻力,在控制滑阀端部增加两个油腔,分别与液压缸前后腔相通,这时移动控制滑阀芯时所需要的力就和液压缸的两腔压力差($\Delta p = p_1 - p_2$)成正比,因而驾驶时更具有真实感。

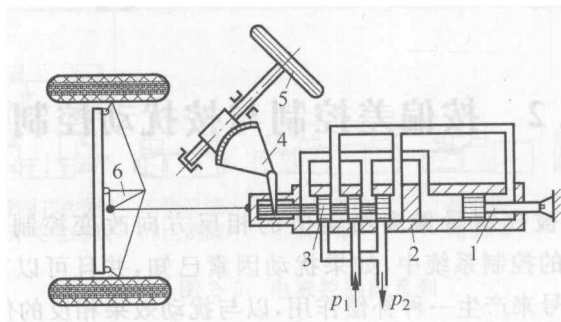


图 2-2 液压转向助力机构

1—活塞杆; 2—油缸体; 3—阀芯; 4—杆; 5—转向盘; 6—转向连杆

由舵机控制的飞机升降的液压伺服控制系统是一个电液闭环控制伺服系统(图 2-3)。飞机的倾角 θ_c 由位置陀螺仪检测到后反馈给加法放大器,进行比较后送到电液伺服阀,以控制执行元件液缸,进而控制飞机的倾角。

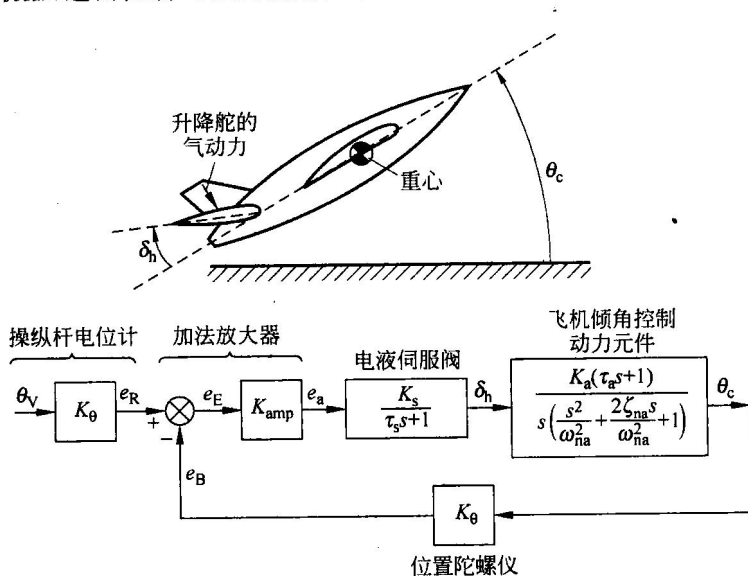


图 2-3 飞机倾角的闭环控制系统

电液闭环控制系统常用3种类型：①位置控制(直线或旋转)；②速度控制(直线或旋转)；③力或压力控制。一个系统也可以是以上类型的组合，例如液压机的油缸在压制工作点以前是位置控制，达到压制工作点后切换成压力(力)控制以实施压制工序。随着系统所要求的刚度和精度提高，其复杂性和成本也将提高，闭环系统应满足系统要求，既保证技术条件的要求，又要使系统的性能优化，即系统控制精度高、响应速度快、性能稳定，系统结构简洁、可靠。

2.2 按偏差控制与按扰动控制

反馈控制就是按照被控制量偏离给定值的相反方向改变控制量，故又称偏差控制(图2-4(a))。在物理量的控制系统中，如果扰动因素已知，并且可以直接地或间接地检测出来，即可以利用扰动信号来产生一种补偿作用，以与扰动效果相反的作用抵消扰动影响，此即为按扰动控制(图2-4(b))。在按扰动进行控制时，是从扰动作用取得信息，而据以改变被控制量。信息和控制作用的传递是单方向的，不是反馈，而是顺馈；不是闭环，而是开环。

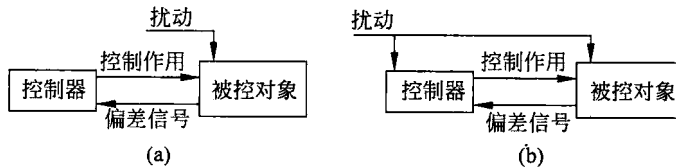


图 2-4 按偏差控制与按扰动控制

(a) 按偏差进行反馈控制；(b) 按扰动进行顺馈控制

按扰动控制在技术上比按偏差控制简单，但是只有在扰动可观测时才可用。如果系统中有多重扰动存在，要为每一种扰动设计一种补偿装置就显得复杂，可靠性也差。此时可以把按偏差控制与按扰动控制结合起来。对于一种主要的扰动，采用适当的补偿装置实现按扰动控制；另外再按闭环负反馈方式实现按偏差控制，以消除其他各种扰动造成的影响。当主要扰动已被补偿或近似被补偿，系统所受到的扰动大大减轻，所以按偏差控制的部分就比较容易设计，可以达到较好的控制效果。按偏差控制与按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制。

2.3 控制阀的选择

系统选用控制阀要根据系统的要求和使系统的结构简单、可靠、经济、高效为原则。如一个位置控制系统的功用是把负载移动到某个位置或移到一系列位置，可以由油缸实现的

直线运动或由马达实现的旋转运动,再通过滚珠丝杠转换成直线运动。精度高时可使用丝杠或滚珠丝杠。如果滚珠丝杠的螺距为 $5 \times 10^{-3} \text{m}$,马达定位到 $\pm 1^\circ$ 的精度时则可实现的直线精度为 $5 \times 10^{-3} / 360 = \pm 1.4 \times 10^{-5} (\text{m})$ 。电液控制系统的控制阀可根据系统性能要求在开关电磁阀、比例阀和伺服阀间进行选择,如图 2-5 所示。

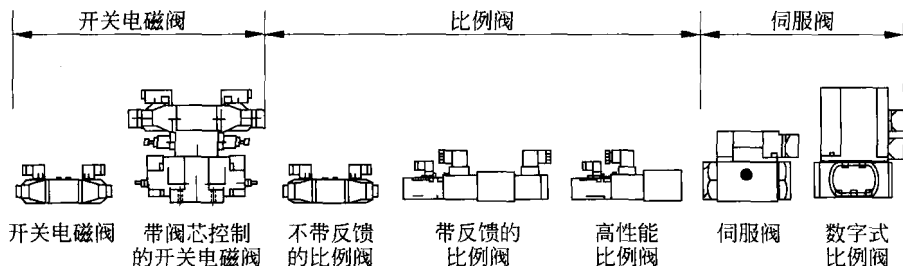


图 2-5 电液控制阀系列

2.4 普通开关电磁阀

普通开关电磁阀通常是二位或三位电磁阀或电液阀(图 2-6),控制到达执行元件的液流通、断或被切换其流动方向,但不能对执行元件的速度、加速度进行控制。电磁阀可由交流或直流电源操作,由普通继电器或换向开关来切换,响应时间为 $20 \sim 100 \text{ms}$ 。典型的位置控制系统与逻辑开关(继电器、固体开关或可编程控制器)合用,油缸可以从静止位置运动到由行程开关或接近开关确定的某个位置。普通开关电磁阀组成的系统简单、廉价,能满足一般需要。但当操作行程开关给出停止信号时,不能马上就停下来。

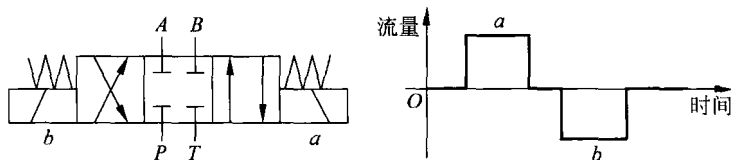


图 2-6 普通电磁阀及其工况

从操作行程开关开始到油缸停止的制动距离将受以下因素影响: ①电磁阀的响应时间; ②油缸的速度; ③负载质量; ④油缸及配套管路中的困油体积; ⑤油液的压缩性; ⑥负载的机械摩擦的大小; ⑦液压元件中的内泄漏; ⑧行程开关的操作时间; ⑨控制继电器的切换时间; ⑩控制可编程控制器的采样时间。

这些因素中有些很难准确界定,而有些在运行期间经常变化,这引起在确定负载停止的