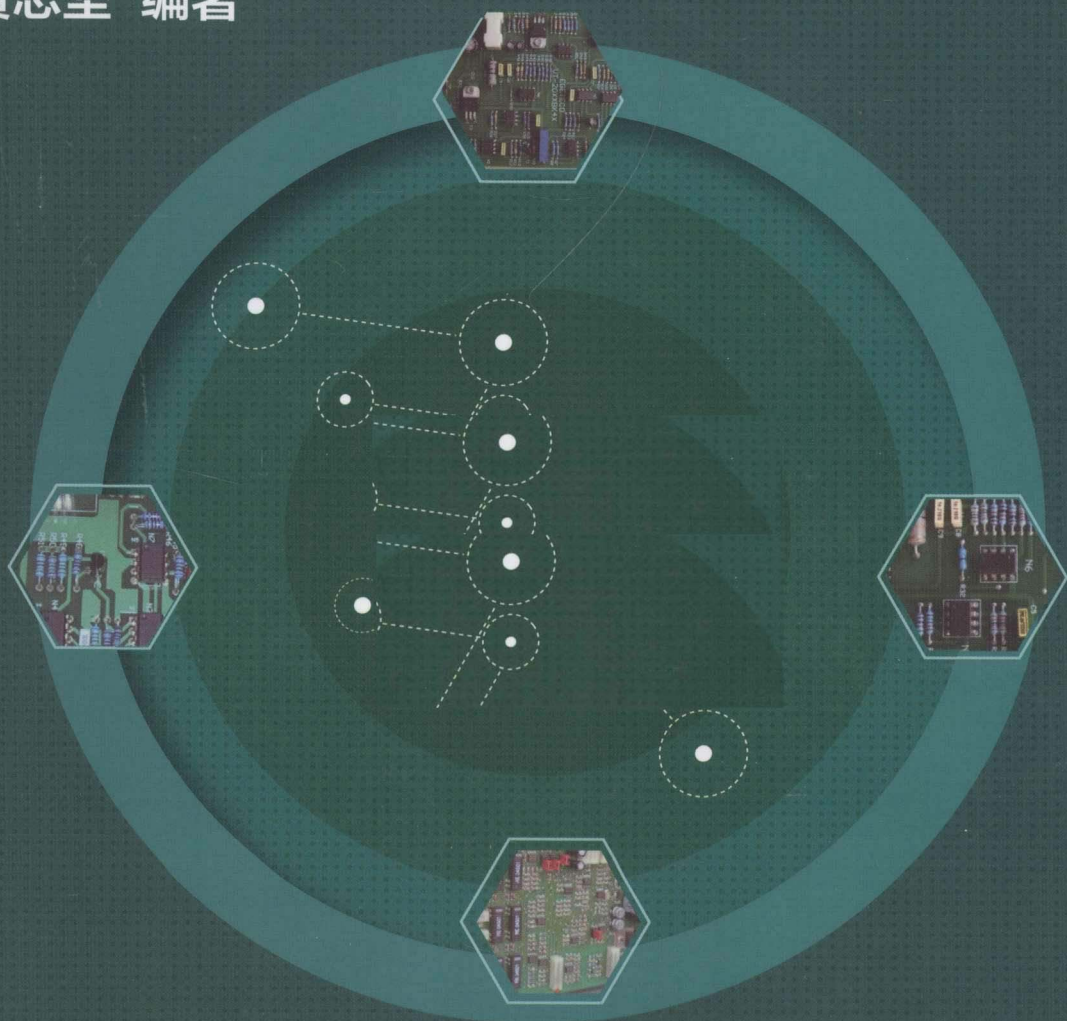


现代液压气动应用技术
丛书

XIANDAI YEYA QIDONG YINGYONG
JISHU CONGSHU

电液比例控制 及应用实例

黄志坚 编著

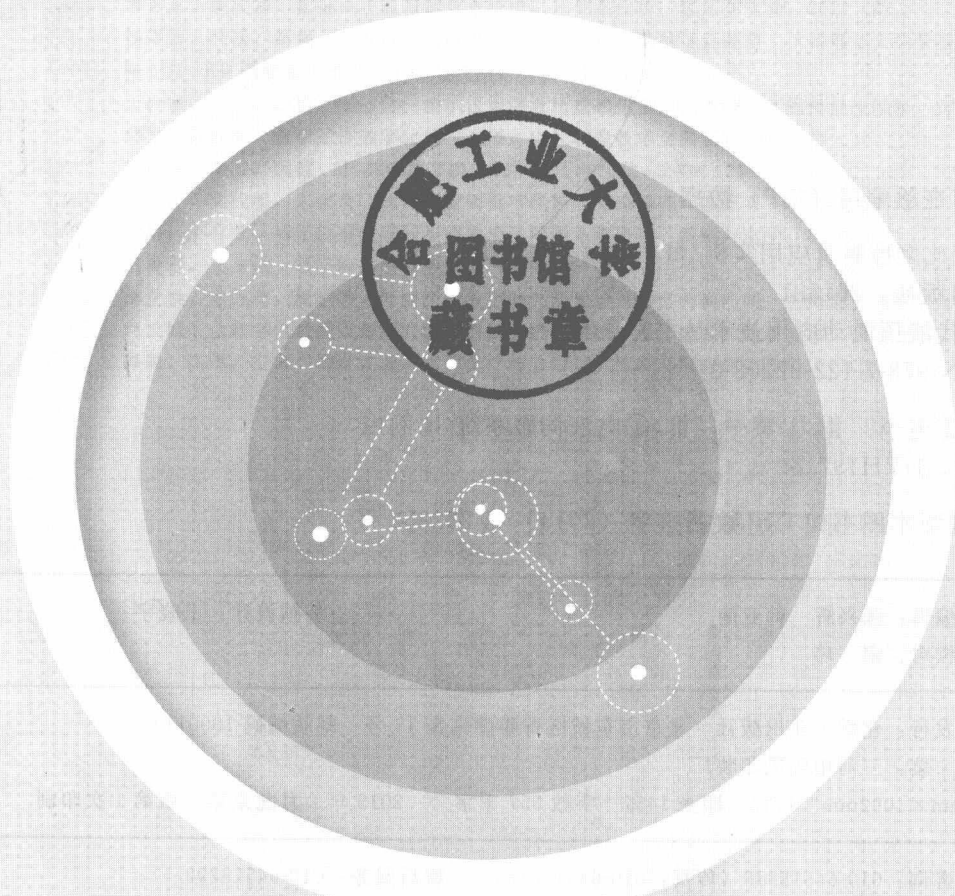


化学工业出版社

现代液压气动应用技术
丛书

电液比例控制 及应用实例

黄志坚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

电液比例控制技术是一种可靠、价廉、节能、控制精度和响应特性均能满足工业控制系统实际需要的控制技术。本书结合大量实例系统介绍比例控制元件、系统及应用。本书共 8 章,分别介绍了电液比例压力阀、电液比例流量阀、电液比例方向阀等相关技术及应用;比例电控装置及应用;电液比例阀性能参数与测试试验;变量泵电液比例控制技术及应用;电液数字比例阀技术及应用。

本书的读者主要是液压设备与元件设计开发人员及使用维修人员,本科院校与职业技术学院相关专业学生、研究生与教师。本书也可作为比例控制技术培训班的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电液比例控制及应用实例/黄志坚编著. —北京:化学工业出版社, 2015. 1
(现代液压气动应用技术丛书)
ISBN 978-7-122-22202-2

I. ①电… II. ①黄… III. ①电液伺服系统-比例控制 IV. ①TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 252352 号

责任编辑:张兴辉 韩亚南
责任校对:宋 玮

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 357 千字 2015 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究



前 言

FOREWORD

比例控制技术是 20 世纪 60 年代末人们开发的一种可靠、价廉、控制精度和响应特性均能满足工业控制系统实际需要的控制技术。电液比例控制系统具有能容量大、响应速度快、刚度大和控制精度高等突出优点，因此在各类机床、轻工机械、重型机械、起重机械、建材建筑机械、汽车、大型试验设备、航空航天、船舶和武器装备等领域获得了广泛应用。

电液比例阀多用于开环液压控制系统中，实现对液压参数的遥控，也可以作为信号转换与放大组件用于闭环控制系统。与手动调节和通断控制的普通液压阀相比，它能显著地简化液压系统，实现复杂程序和运动规律的控制，便于机电一体化，通过电信号实现远距离控制，大大提高液压系统的控制水平；与电液伺服阀相比，尽管其动态、静态性能有些逊色，但在结构与成本上具有明显优势，能够满足多数对动静态性能指标要求不高的场合。

对于比例速度调节，可使用比例泵来实现。比例泵为电气控制变量泵，泵的排量允许无级和可编程设定，排量大小与比例控制阀的比例电磁铁中的电流大小成正比。

电液比例元件向数字化方向发展已成为液压技术领域研究的热点课题之一。数字液压元件与计算机连接不需要 D/A 转换器，省去了模拟量控制要求各环节间的线性和连续性。数字液压元件结构简单、工艺性好、价格低廉，抗污染能力强、可在恶劣的环境下工作。

电液比例控制系统和元件的安装调试、故障诊断与排除是一项不可忽视的工作。测试试验是液压控制系统和元件使用维修及管理的重要内容之一。测试技术、计算机技术、人工智能技术在液压测试领域得到了广泛的应用，液压控制元件的测试试验将有较大变革。电液比例控制系统具有诸多的优越性，采用电液控制技术对液压系统进行改进将取得显著效益。

本书结合大量实例系统介绍比例控制元件和系统及应用。

本书共 8 章。分别介绍了电液比例压力阀、电液比例流量阀、电液比例方向阀等相关技术及应用；比例电控装置及应用；电液比例阀性能参数与测试试验；变量泵电液比例控制技术及应用；电液数字比例阀技术及应用。

本书取材新颖、数据翔实，表达通俗。内容反映了本技术领域发展新动向。

本书的读者主要是液压设备与元件设计开发人员及使用维修人员，大学与职业技术学院相关专业学生与教师。本书也可作为电液比例控制技术培训班的教材。

在本书的编写过程中，广东工业大学机电学院刘哲与赖凤玲同学参与了资料整理工作。

编著者



目 录

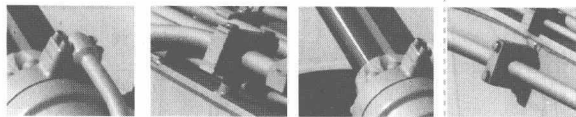
CONTENTS

第 1 章 比例控制技术及应用概述	1
1.1 电液比例控制技术	1
1.1.1 比例控制原理	1
1.1.2 电液比例控制阀的分类	3
1.1.3 电液比例系统应用要点	3
1.2 电液比例控制技术的发展趋势	5
第 2 章 电液比例压力阀及应用	7
2.1 电液比例压力阀概述	7
2.2 电液比例压力阀的应用	9
2.2.1 电液比例溢流阀在发动机上的应用	9
2.2.2 真空铸造生产线液压比例控制系统	10
2.2.3 船用舵机水动力负载模拟液压系统	13
2.2.4 比例阀应用于油压机液压系统改进	15
2.2.5 比例溢流阀在液压油缸试验台上的应用	17
2.2.6 提升机液压站的改进	18
2.2.7 异型坯连铸拉矫机液压系统	19
2.2.8 比例减压阀用于挖掘机液压泵流量调节	21
2.2.9 比例减压阀在车辆液压系统中的应用	23
2.3 比例压力阀的维修	25
2.3.1 用三合一测试仪检测液压挖掘机主泵比例阀	25
2.3.2 比例阀异常振动的分析与解决	27
2.3.3 数控液压板料折弯机故障分析与处理	28
2.3.4 煤气鼓风机调速比例控制系统故障分析与处理	29
第 3 章 电液比例流量阀及应用	31
3.1 电液比例流量阀概述	31
3.2 电液比例流量阀的应用	33
3.2.1 液压同步连续升降的控制	33
3.2.2 基于 MRFAC 的液压双缸同步控制系统	34
3.2.3 液压顶升同步控制系统	36
3.2.4 压蜡机合模电液比例系统	38

3.2.5	注塑机比例调速阀故障诊断	40
3.2.6	盘式热分散机液压故障的分析	40
3.2.7	步进炉水平油缸比例控制失效故障的排除	41
3.3	比例-压力流量复合阀 (P-Q 阀) 及应用	42
3.3.1	P-Q 阀的稳态控制特性	43
3.3.2	P-Q 阀构成的液压系统	44
3.3.3	P-Q 阀的控制	45
3.3.4	力士乐 3FRE10-10-12.5L 型 P-Q 阀的特点	45
3.3.5	P-Q 阀在注塑机上的应用	45
3.3.6	车辆制动能量回收模拟试验系统	47
3.3.7	P-Q 阀常见故障及排除	49
第 4 章 电液比例方向阀及应用		51
4.1	比例换向阀及应用	51
4.1.1	比例换向阀概述	51
4.1.2	挤压机液压比例控制定针系统	52
4.1.3	电液比例阀的双闭环控制技术及应用	55
4.1.4	液压数字控制器 (HNC) 在液压同步系统中应用	57
4.1.5	耙头绞车电液比例系统	59
4.1.6	储油罐清理机器人液压系统	62
4.1.7	比例方向控制回路的压力补偿	64
4.1.8	比例方向阀的维修调试	67
4.1.9	比例阀控液压缸的制动的调整	69
4.1.10	液压马达制动回路故障分析与解决	71
4.1.11	平整定位辊电液比例控制及在线监控	73
4.1.12	烧结机阀门液压控制系统的改造	75
4.1.13	WY1.5 型挖掘机液压控制系统的改进	78
4.1.14	先导式比例换向阀故障分析与排除实例	80
4.2	比例多路换向阀及其应用	80
4.2.1	比例多路换向阀	80
4.2.2	模块钻机负载敏感变量泵与电控比例多路阀的应用	83
4.2.3	汽车起重机负载传感电液比例控制多路阀	85
4.2.4	多路阀电子流量匹配系统	86
4.2.5	流量分配系统及应用	88
4.3	伺服比例阀及应用	90
4.3.1	伺服比例阀概述	90
4.3.2	D633 系列直动伺服比例控制阀	91
4.3.3	水电站调速器机械液压系统	95
4.3.4	铣耳机组电液伺服比例控制系统	98
4.3.5	伺服比例阀在数控机床中的应用	99
4.3.6	5MN 压弯机油缸颤抖故障分析与排除	101
4.3.7	伺服比例阀在铜带轧机厚度控制中的应用	103
4.3.8	伺服比例阀在高炉布料控制中的应用	105

第 5 章 比例电控装置及应用	109
5.1 比例控制放大器及应用	109
5.1.1 比例控制放大器概述	109
5.1.2 比例放大器典型产品	111
5.1.3 比例控制放大器的正确使用	113
5.1.4 VT3000 比例放大器在盾构机上的应用	116
5.1.5 比例放大器在冶金液压系统中的应用	119
5.1.6 工程机械用电液比例阀放大器	121
5.1.7 基于 PROFIBUS-DP 总线的数字电液比例控制器	124
5.2 比例电磁铁及应用	126
5.2.1 阀用电磁铁分类与技术特点	126
5.2.2 比例电磁铁	127
5.2.3 比例电磁铁的使用与维护	130
第 6 章 电液比例阀性能参数与测试试验	132
6.1 比例阀主要特性及性能参数	132
6.1.1 静态特性	132
6.1.2 动态特性	133
6.2 比例压力阀测试试验	135
6.2.1 典型试验回路图	135
6.2.2 电液比例阀测控一体化试验系统软件	135
6.2.3 电液比例溢流阀测试试验	136
6.2.4 电液比例减压阀试验	136
6.2.5 直动式电液比例减压阀动态试验	137
6.3 比例流量阀测试试验	138
6.3.1 液压试验回路	138
6.3.2 电液比例节流阀液压试验	138
6.4 比例方向阀测试试验	139
6.4.1 比例方向阀试验回路	139
6.4.2 比例方向阀稳态性能测试试验	140
6.4.3 比例方向阀动态性能试验方法	144
6.5 比例阀测试系统应用实例	146
6.5.1 进口比例阀的测试	146
6.5.2 比例阀虚拟测试系统	148
6.5.3 4WRE6E 型电液比例方向阀测试分析	150
6.5.4 比例控制器的测试	152
6.5.5 比例电磁铁特性测试系统	153
第 7 章 变量泵电液比例控制技术及应用	156
7.1 比例变量泵及其应用	156
7.1.1 比例变量泵控制原理	156
7.1.2 多变量泵比例与恒功率控制及其在盾构机中的应用	157
7.1.3 闭环控制轴向柱塞泵	161

7.1.4	比例变量泵在注塑机上的应用	163
7.1.5	钻机液压系统中的电控比例变量泵	166
7.1.6	用比例控制技术改进混凝土变量泵	167
7.1.7	强制式混凝土搅拌机液压系统	170
7.1.8	挖掘机正流量电液比例泵	172
7.2	比例泵控马达系统	175
7.2.1	比例变量泵控定量马达在车辆液压系统中的应用	175
7.2.2	电站电液比例泵控马达系统	178
7.2.3	泵控马达脱硫液压系统	181
7.3	电液比例液压泵测试试验	185
7.3.1	比例液压泵测试试验回路	185
7.3.2	比例液压泵主要性能及测试试验	187
7.4	变量泵调整与维修	190
7.4.1	电液比例控制组合变量泵的节能及故障诊断	190
7.4.2	挖掘机变量泵故障的排除	192
7.4.3	用比例压力阀改进恒压式变量柱塞泵	193
第8章	电液数字比例控制技术及应用	195
8.1	电液数字控制概述	195
8.1.1	电液数字控制技术的特点	195
8.1.2	电液间接与直接数字控制技术	195
8.2	增量式数字阀	196
8.2.1	增量式数字阀概述	196
8.2.2	基于新型数字同步阀的液压同步系统	200
8.2.3	2D高频数字阀在电液激振器中的应用	202
8.2.4	数字阀在万能材料试验机中的应用	205
8.3	高速开关式数字阀	206
8.3.1	高速开关式数字阀概述	206
8.3.2	一种增量式数字阀	209
8.3.3	数字阀在电控液压力动力转向系统中的应用	212
8.3.4	新型高速数字开关阀为导阀的多路换向阀	215
8.3.5	高速开关阀控制的注塑机注射液压系统	217
	参考文献	222



第1章

Chapter 01

比例控制技术及应用概述

比例控制技术是 20 世纪 60 年代末人们开发的一种可靠、价廉，控制精度和响应特性均能满足工业控制系统实际需要的控制技术。当时，电液伺服技术已日趋完善，但电液伺服阀成本高、应用和维护条件苛刻，难以被工业界普遍接受。人们希望有一种价廉、控制精度能满足需要的控制技术，这种需求背景导致了比例技术的诞生和发展。

1.1 电液比例控制技术

1.1.1 比例控制原理

电液比例阀多用于开环液压控制系统中，实现对液压参数的遥控，也可以作为信号转换与放大组件用于闭环控制系统。与手动调节和通断控制的普通液压阀相比，它能显著地简化液压系统，实现复杂程序和运动规律的控制，便于机电一体化，通过电信号实现远距离控制，大大提高液压系统的控制水平；与电液伺服阀相比，尽管其动态、静态性能有些逊色，但在结构与成本上具有明显优势，能够满足多数对动态性能指标要求不高的场合。随着电液伺服比例阀的出现，电液比例阀的性能已接近甚至超过了伺服阀。

(1) 基本组成与性能

电液比例阀通常由电气-机械转换器、液压放大器（先导级阀和功率级主阀）和检测反馈机构三部分组成（图 1-1）。若是单级阀，则无先导级阀。

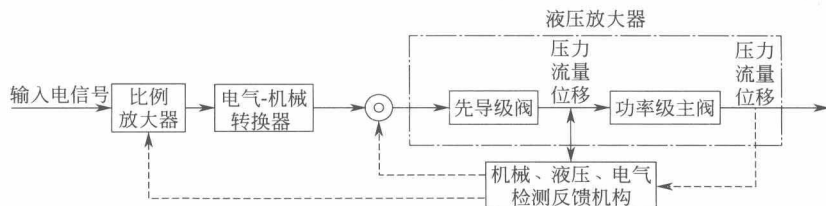


图 1-1 电液比例阀的组成

电液比例阀是比例控制系统中的主要功率放大元件，按输入电信号指令连续地成比例地控制液压系统的压力、流量等参数。与伺服控制系统中的伺服阀相比，在某些方面还有一定

的性能差距（主要性能比较如表 1-1 所示），但它显著的优点是抗污染能力强，大大地减少了由于污染而造成的工作故障，提高了液压系统的工作稳定性和可靠性；另一方面比例阀的成本比伺服阀低，结构也简单，已在许多场合获得广泛应用。

表 1-1 比例阀、伺服阀和开关阀主要性能比较

性能	比例阀	伺服阀	开关阀
过滤精度/ μm	25	3	25~50
阀内压降/MPa	0.5~2	7	0.25~0.5
滞环/%	1~3	1~3	—
重复精度/%	0.5~1	≤ 0.5	—
频宽/(Hz/3dB)	25	20~200	—
中位死区	有	无	有
价格比	1	3	0.5

(2) 比例控制放大器

比例控制放大器是用来对比例电磁铁提供特定性能电流，并对电液比例阀或电液比例控制系统进行开环或闭环调节的电子装置。图 1-2 所示为某型比例控制放大器方框图。

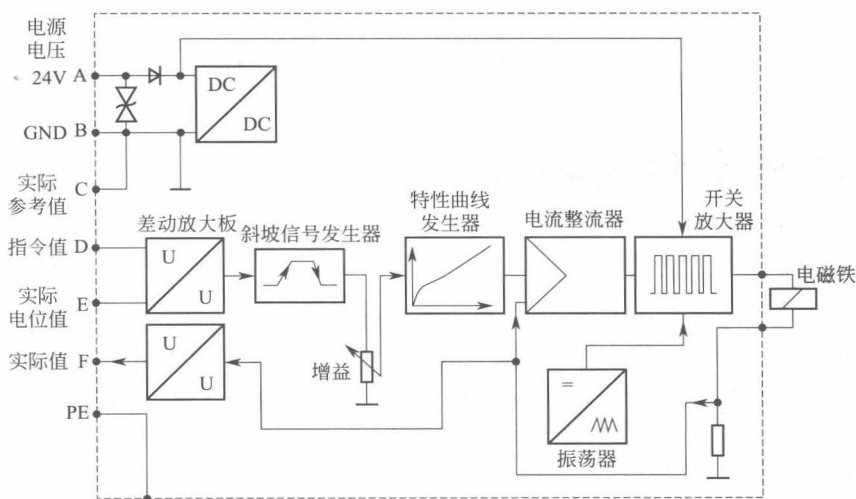


图 1-2 比例控制放大器方框图

(3) 比例电磁铁

比例阀大都采用比例电磁铁。比例电磁铁根据电磁原理设计，能产生的机械量（力或力矩和位移）与输入电信号（电流）的大小成比例，再连续地控制液压阀阀芯的位置，进而实现连续地控制液压系统的压力、方向和流量。图 1-3 所示为某型比例电磁铁。

(4) 先导级阀

电液比例阀的先导级阀用于接收小功率的电气-机械转换器输入的位移或转角信号，将机械量转换为液压力驱动主阀。先导级阀主要有锥阀式、滑阀式、喷嘴挡板式等结构形式，而大多采用锥阀及滑阀。在比例压力控制阀中，大多采用锥阀作先导级。针

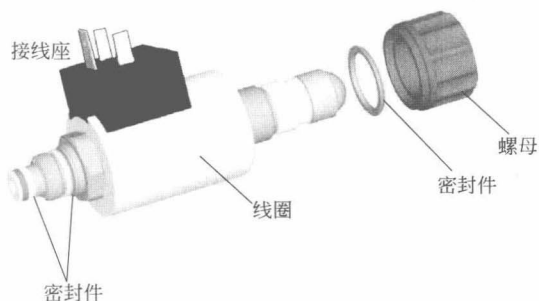


图 1-3 比例电磁铁

式锥阀如图 1-4(a) 所示, 其优点是加工方便, 关闭时密封性好, 效率高, 抗污染能力强。为了改善锥阀阀芯的导向性和阻尼特性或降低噪声等, 有时增加圆柱导向阻尼 [图 1-4(b)] 或减振活塞 [图 1-4(c)] 部分。

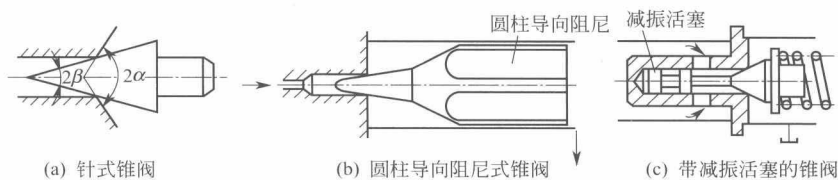


图 1-4 锥阀式先导级阀

(5) 功率级主阀

电液比例阀的功率级主阀用于将先导级阀的液压力转换为流量或压力输出。主阀通常是滑阀式、锥阀式或插装式, 其结构与普通液压阀的滑阀、锥阀或插装阀结构类同。图 1-5 所示为某型比例流量阀, 其主阀为插装式结构。

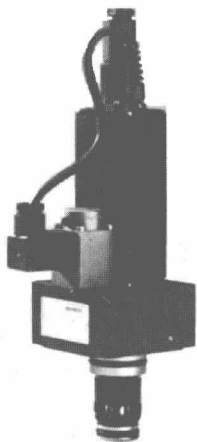


图 1-5 比例流量阀

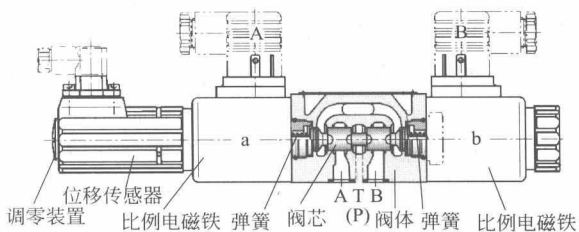


图 1-6 带位移传感器的比例方向阀

(6) 检测反馈机构

设在阀内部的机械、液压及电气式检测反馈机构将主阀控制口或先导级阀口的压力、流量或阀芯的位移反馈到先导级阀的输入端或比例放大器, 实现输入输出平衡。图 1-6 所示为带位移传感器的比例方向阀。

1.1.2 电液比例控制阀的分类

比例阀按主要功能分类, 分为压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀三大类, 每一类又可以分为直接控制和先导控制两种结构形式, 直接控制用在小流量小功率系统中, 先导控制用在大流量大功率系统中。电液比例阀的分类见图 1-7。

1.1.3 电液比例系统应用要点

(1) 比例阀的选用

比例阀选用应注意以下事项。

- ① 根据用途和被控对象选择比例阀的类型。
- ② 正确了解比例阀的动、静态指标, 主要有额定输出流量、起始电流、滞环、重复精



图 1-7 电液比例阀的分类

度、额定压力损失、温飘、响应特性、频率特性等。

③ 根据执行器的工作精度要求选择比例阀的精度，内含反馈闭环阀的稳态性、动态品质好。如果比例阀的固有特性如滞环、非线性等无法使被控系统达到理想的效果时，可以使用软件程序改善系统的性能。

④ 比例阀的通径应按执行器在最高速度时通过的流量来确定，通径选得过大，会使系统的分辨率降低。

⑤ 对于直动式电液比例节流阀，由于作用在阀芯上的液动力与通过阀口的流量及流速（压力）成正比，因此，当电液比例节流阀的工况超出其压降与流量的乘积即功率表示的面积范围（称功率域或工作极限）时 [图 1-8(a)]，作用在阀芯上的液动力可增大到与电磁力相当的程度，使阀芯不可控。类似地，对于直动式电液比例方向阀也有功率域问题。当电液比例方向阀的阀口上的压降增加时，流过阀口的流量增加，与比例电磁铁的电磁力作用方向相反的液动力也相应增加。当阀口的开度及压降达到一定值后，随着阀口压降的增加，液动力的影响将超过电磁力，从而造成阀口的开度减小，最终使得阀口的流量不但没有增加反而减少，最后稳定在一定的数值上，此即为电液比例方向阀的功率域的概念 [图 1-8(b)]。综上所述，在选择比例节流阀或比例方向阀时，一定要注意，不能超过电液比例节流阀或比例方向阀的功率域。

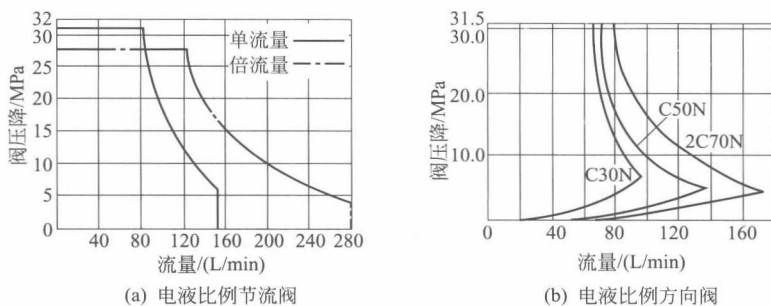


图 1-8 电液比例阀的功率域（工作极限）

(2) 污染控制

比例阀对油液的污染度通常要求为 NAS 1638 的 7~9 级（ISO 的 16/13 级，17/14 级，18/15 级），决定这一指标的主要环节是先导级。虽然电液比例阀较伺服阀的抗污染能力强，但不能因此对油液污染掉以轻心，因为电液比例控制系统的很多故障也是由油液污染所引起的。

如果选择带先导阀的比例阀,要注意先导阀对油液污染度的要求,要在油路上加装过滤精度数值为 $10\mu\text{m}$ 以下的进油过滤器。

(3) 比例阀与放大器的配套及安置

比例阀与放大器必须配套。通常比例放大器能随比例阀配套供应,放大器一般有深度电流负反馈,并在信号电流中叠加着颤振电流。放大器设计成断电时或差动变压器断线时使阀芯处于原始位置或使系统压力最低,以保证安全。放大器中有时设置斜坡信号发生器,以便控制升压、降压时间或运动加速度或减速度。驱动比例方向阀的放大器往往还有函数发生器以便补偿比较大的死区特性。

比例阀与比例放大器安置距离可达60m,信号源与放大器的距离可以是任意的。

(4) 控制加速度和减速度的传统方法

控制加速度和减速度的传统方法有:换向阀切换时间迟延、液压缸缸内端位缓冲、电子控制流量阀和变量泵等。用比例方向阀和斜坡信号发生器可以提供很好的解决方案,这样就可以提高机器的循环速度并防止惯性冲击。

1.2 电液比例控制技术的发展趋势

由于电液比例复合阀具有好的控制特性、抗污染性、可靠性和经济性,已成为液控技术发展势,具有广阔的市场前景。其稳态性能的滞环、重复精度、分辨率、非线性等与一般工业用电液伺服阀几乎相当,但动态响应比伺服阀稍低,在较大的参数调节范围内运行,故控制回路中的非线性因素不能忽略。电液比例控制系统的发展趋势主要集中在两大方面。

(1) 比例阀

① 提高比例阀性能,适应机电液一体化主机的发展;提高电液比例阀及远控多路阀的性能,使之适应野外工作条件;开发低成本比例阀,其主要零件与标准阀通用。

② 比例技术与二通和三通插装技术相结合,形成了比例插装技术,特点是结构简单,性能可靠,流动阻力小,通油能力大,易于集成;此外出现比例容积控制,为中、大功率控制系统节能提供新手段。

③ 由于传感器和电子器件的小型化,出现了传感器、测量放大器、控制放大器和阀复合一体化的元件,极大地提高了比例阀(电反馈)的工作频宽。其主要表现有:a.高频响、低功耗比例放大器及高频响比例电磁铁的研制;b.带集成式放大器的位移传感器(200Hz)的开发,为电反馈比例阀小型化,集成化创造良好的条件;c.伺服比例阀(闭环比例阀)内装放大器,具有伺服阀的各种特性,如零遮盖、高精度、高频响,但其对油液的清洁度要求比伺服阀低,具有更高的工作可靠性。

(2) 比例控制系统

电液比例控制系统属于本质非线性和不确定性系统,如电液伺服阀的压力-流量特性、液压动力机构的摩擦特性和死区特性、负载特性等都是非线性;而不确定性因素则包括外来干扰力、温度变化、油源压力和流量脉动等。因此,比例控制性能的提高还有赖于许多新型的控制技术。

① PID控制 PID控制方法是经典控制理论的代表,它是基于系统误差的现实因素、过去因素、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,在电液伺服系统中广泛应用。但传统的PID控制器采用线性组合方法,难于协调快速性和稳定性之间的矛盾,在具有参数变化和外干扰的情况下其鲁棒性不够好,而电液比例控制系统的参数是随时间变化的,参数呈非线性变化,因此在相当多的情况下,PID不能取得令人满意的效果,近年来吸收智能控制的基本思想并利用计算机的优势,形成了模糊PID、自适应

PID、非线性 PID 等变种控制器。

② 状态反馈控制 电液控制系统的状态反馈控制方法，除了位置信号进行反馈外，执行器的速度和加速度（压力）也反馈回控制器中，由于液压系统阻尼 ξ 一般较低，通过加速度（压力）反馈可大大提高系统的阻尼，从而显著地改善了系统的响应。

③ 自适应控制 针对电液比例控制系统的非线性和不确定性，自适应控制的应用非常广泛，因为自适应控制算法能自动辨识时变系统的参数，相应地改变控制作用，使系统的性能达到最优或次最优。当前应用最成熟的主要有两类：一是自校正控制（STC）；二是模型参考自适应控制（MRAC）。STC 一般适用于慢时变的对象调节，而具有参数突变和突加外负载干扰的电液比例控制系统往往不能满足，因此，液压系统中应用的自适应控制大多为 MRAC 或其变型。自适应控制尽管极大地改善了系统性能，但在使用过程中也带来了一些问题，如对于 STC，由于要进行大量的辨识计算，对于响应很快的系统进行实时控制很难；而对于 MRAC，主要的困难是选择一个合适的参考模型以及要按李雅普诺夫稳定理论或波波夫超稳定理论来设计自适应律。所以吸收其他控制方法的优点，研究算法简便、鲁棒性强的自适应律是近年来发展的方向，如自适应前馈控制、鲁棒自适应控制、非线性自适应控制等。

④ 变结构控制（VSC） 变结构控制是一种根据系统状态偏离滑模的程度来变更控制器的结构，使系统按照滑模规定的规律运行的一种控制方法，其在电液控制系统应用较广泛的是滑模控制。VSC 系统与传统的控制系统相比，具有控制规律简单，可以协调动态和稳态性能间的矛盾，特别是其滑动模态（SM）对系统参数变化和外部干扰具有完全不变性的优点。其主要缺点是由于频繁切换而存在较严重的抖动现象。另外，它也不宜应用于采样周期较长的控制系统。近年来，出现了模糊控制和神经网络控制实现的离散变结构控制。

⑤ 模糊逻辑控制（FLC） FLC 的引入主要是考虑到可不需要建立数学模型，而依靠模糊推理或其他先验知识来调定控制器。模糊控制适用于被控参量无精确的表示方法和被控对象各种参数之间无精确的相互关系的情况。在这种情况下，FLC 比精确控制优越，而电液比例控制系统正属于此类情况（如影响系统动态品质的液压固有频率 ω 和阻尼比 ξ 等，与系统的软量有关，难以精确算出）。FLC 在电液比例系统中的应用主要有两种形式：一是模糊控制器直接驱动对象；二是用来确定状态反馈控制器的反馈增益。

⑥ 神经网络控制（NNC） NNC 是模仿人类的感观和脑细胞的工作原理而工作的，系统中的硬件是模仿神经网络，软件则是模仿神经细胞的工作方式，即每个神经元接收信号按“乘权值后相加”，输出信号按“阈值”大小确定，而“权值”和“阈值”的确定是通过已知输入输出关系和合适的算法使输出的实际值同要求值间的偏差尽量小。

⑦ 可靠性和性能稳定性逐渐提高 可靠性和性能稳定性是涉及面最广的综合指标，它包括元、器、辅、附件的可靠性，系统的可靠性设计、制造以及可靠性维护三大方面。随着诸如工程塑料、复合材料、高强度轻合金等新材料的应用，新工艺、新结构的出现，元器件性能的可靠性得以大大增加。系统可靠性设计理论的成熟与普及，使合理地进行元器件的选配有了理论依据。此外，过滤技术的完善和精度的提高，除了能彻底清除固体杂质外，还能分离油中的气体和水分。在线实时油污检测器和电子报警逻辑系统的应用，使得液压系统的维护从过去的简单拆修发展到主动维护，对可预见的诸因素进行全面分析，最大限度地提前消除诱发故障的潜在因素。

2.1 电液比例压力阀概述

图 2-1 为一种不带电反馈的直动式电液比例压力阀，它由比例电磁铁和直动式压力阀两部分组成。

直动式压力阀的结构与普通压力阀的先导阀相似，所不同的是阀的调压弹簧换为传力弹簧 3，手动调节螺钉部分换为比例电磁铁。锥阀芯 4 与阀座 6 间的防振弹簧 5 主要用于防止阀芯的振动撞击。阀体 7 为方向阀式阀体。当比例电磁铁输入控制电流时，衔铁推杆 2 输出的推力通过传力弹簧 3 作用在锥阀芯 4 上，与作用在锥芯上的液压力相平衡，决定了锥阀芯 4 与阀座 6 之间的开口量。由于开口量变化微小，故传力弹簧 3 变形量的变化也很小，若忽略液动力的影响，则可认为在平衡条件下，所控制的压力与比例电磁铁的输出电磁力成正比，从而与输入比例电磁铁的控制电流近似成正比。这种压力阀除了在小流量场合作为调压组件单独使用外，更多的作为先导阀与普通溢流阀、减压阀的主阀组合，构成不带电反馈的先导式电液比例溢流阀、先导式电液比例减压阀，改变输入电流大小，即可改变电磁力，从而改变导阀前腔（即主阀上腔）压力，实现对主阀的进口或出口压力的控制。

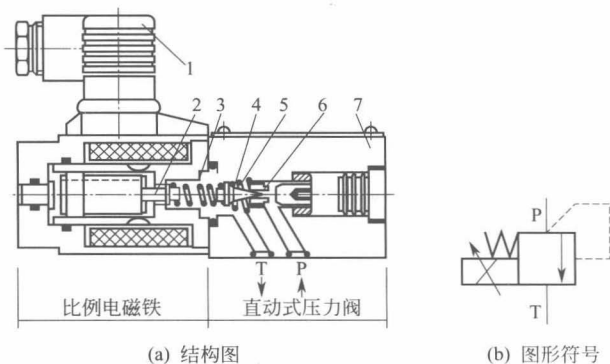


图 2-1 不带电反馈的直动式电液比例压力阀

1—插头；2—衔铁推杆；3—传力弹簧；4—锥阀芯；
5—防振弹簧；6—阀座；7—阀体

图 2-2(a) 为位移电反馈型直动式电液比例压力阀的结构图，它与图 2-1 所示的压力阀所不同的是，此处的比例电磁铁带有位移传感器 1，其详细图形符号见图 2-2(b)。工作时，给定设定值电压，比例放大器输出相应控制电流，比例电磁铁推杆输出与设定值成比例的电磁力，通过传力弹簧 7 作用在锥阀芯 9 上；同时，电感式位移传感器 1 检测电磁铁衔铁推杆的实际位置（即弹簧座 6 的位置），并反馈至比例放大器，利用反馈电压与设

定电压比较的误差信号去控制衔铁的位移，即在阀内形成衔铁位置闭环控制。利用位移闭环控制可以消除摩擦力等干扰的影响，保证弹簧座 6 能有一个与输入信号成正比的确切位置，得到一个精确的弹簧压缩量，从而得到精确的压力阀控制压力。电磁力的大小在最大吸力之内由负载需要决定。当系统对重复精度、滞环等有较高要求时，可采用这种带电反馈的比例压力阀。

图 2-3 为带手调限压阀的先导式电液比例溢流阀。它的上部为先导级，是一个直动式比例压力阀，下部为功率级主阀组件（带锥度的锥阀结构）5，中部配置了手调限压阀 4，用于防止系统过载。图中，A 为压力油口，B 为溢流口，X 为遥控口，使用时其先导控制回油必须单独从外泄油口 2 无压引回油箱。该阀的工作原理，除先导级采用比例压力阀之外与普通先导式溢流阀基本相同。手调限压阀与主阀一起构成一个普通的先导式溢流阀，当电气或液压系统发生意外故障时，它能立即开启使系统泄压，以保证液压系统的安全。

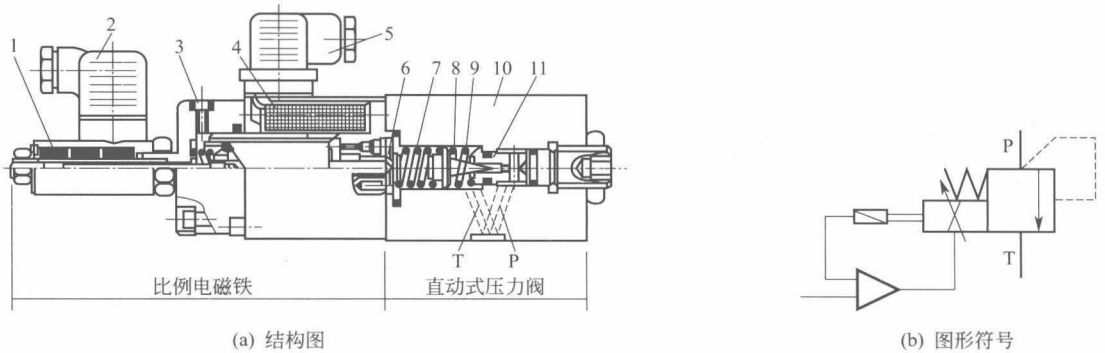


图 2-2 位移电反馈型直动式电液比例压力阀

- 1—位移传感器；2—传感器插头；3—放气螺钉；4—线圈；5—线圈插头；
6—弹簧座；7—传力弹簧；8—防振弹簧；9—锥阀芯；10—阀体；11—阀座

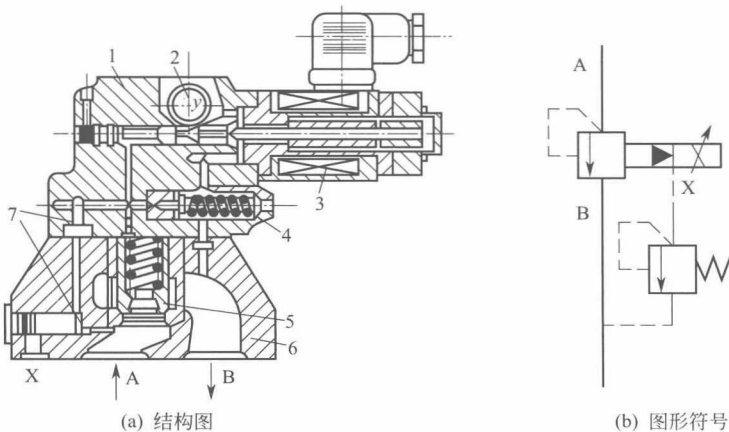


图 2-3 带手调限压阀的先导式电液比例溢流阀

- 1—先导阀体；2—外泄油口；3—比例电磁铁；4—限压阀；5—主阀组件；6—主阀体；7—固定液阻

图 2-4 所示为力士乐单向比例减压阀。与普通单向减压阀相比，比例减压阀用比例电磁铁取代了调压螺栓。

8 电液比例控制及应用实例