

电液比例控制与 数字控制系统

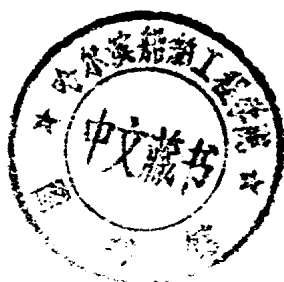
黎啟柏 编著

机械工业出版社

432463

电液比例控制与 数字控制系统

黎啟柏 编著



机械工业出版社

245.11.6

本书对电液比例技术和电液数字控制技术所涉及到的基础理论和基本元件,包括电-机械转换装置、各类比例元件、数字元件和比例放大器的结构原理、性能特点和应用都进行了较系统和较全面的介绍,对元件的静态和动态特性也进行了必要的分析。对电液比例控制系统和电液数字控制系统的理论、设计准则、计算方法也作了相应的综合与分析。本书从实用的角度,提供了大量的基本数据和实用回路。读者可以从中获得大量的信息和有用数据。这将有助于读者切合实际地应用和开发电液比例技术和电液数字控制技术。本书适合于流体传动与控制、机械电子工程以及相关的机械、自动控制行业的工程技术人员阅读与使用。同时也可作为大专院校相关专业师生教学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

电液比例控制与数字控制系统/黎敬柏编著. -北京:
机械工业出版社, 1997.5
ISBN 7-111-05434-2

I. 电… II. 黎… III. ①电液伺服系统-比例控制②电液伺服系统-数字控制 IV. TH137.7

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第20660号

出版人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑: 盛君豪 版式设计: 王颖 责任校对: 张莉娟
韩会民

封面设计: 姚毅 责任印制: 卢子祥

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1997年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·17.25印张·378千字

0 001—3 000册

定价: 28.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

电液比例技术和电液数字控制技术填补了传统开关式液压控制技术与伺服控制之间的空白，已成为流体传动与控制技术中最富生命力的一个分支。它结合了液压能传递较大功率的优越性与电子控制、计算机控制的灵活性、使其本身在最近十年中获得迅猛的发展。其应用领域已渗透到几乎所有的工业部门，并不断创出液压控制新概念。在新的液压控制概念指导下，由计算机控制的电液比例和电液数字控制系统已经和正在使各类流体机械成为机电液一体化的“聪明机械”。了解电液比例、数字控制技术为工业应用提供的种种可能性，已经成为液压工作者的迫切需要，并且是成功地运用和设计现代液压传动机械的基础。

正是在这种需求的鼓舞下，作者以极大的热情和努力编著了本书。作者希望本书能对读者了解和应用电液比例技术有所帮助。这或许能为推广和普及比例技术和数字技术尽一点绵力。

本书引用了作者和华南理工大学流体传动与控制教研室多年的研究成果和工程实践经验，并力求把国内外相关的最新技术成果奉献给读者。从实用的角度出发，本书对电液比例控制技术作了较全面的介绍。较多的篇幅放在各种元件和比例系统的结构原理及其应用上。目的是便于广大工程技术人员和学生的学习和实际应用。而在有些技术上较成熟的地方，也扼要地介绍了动态特性和理论分析，可供有需要的读

者提高和加深理解。

本书深入浅出，图文并茂，实用性强。适合于流体传动与控制、机械电子工程以及相关的机械、自动控制行业的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

本书在收集资料过程中得到广州机床研究所液压室的成国真高级工程师的大力支持，在写作过程中得到华南理工大学刘树道副校长、本教研室的李建藩教授以及各位同事的大力帮助，在此深表谢意！

作者

1996 年 6 月于广州

目 录

前言

1 概 论	1
1.1 电液比例技术发展概况	1
1.2 电液比例控制的概念	3
1.3 电液比例控制系统的工作原理及组成	4
1.3.1 液压开关控制与比例控制系统	4
1.3.2 电液比例系统的组成	7
1.4 电液比例控制系统的分类	9
1.5 电液比例控制的特点及应用	10
2 电-机械转换元件	13
2.1 电-机械转换概述	13
2.1.1 电-机械转换元件的作用及形式	13
2.1.2 电-机械转换元件的要求	14
2.2 电-机械转换的基础	15
2.2.1 法拉第电磁感应定律	15
2.2.2 磁场的能量	17
2.2.3 电磁铁的功能转换分析	22
2.2.4 电磁铁的吸力特性和负载特性	26
2.2.5 电磁铁的弹簧刚度选择	28
2.3 比例电磁铁的吸力特性分析	31
2.3.1 比例电磁铁的结构形式	31
2.3.2 具有平底止座的直流闭式螺管电磁铁	31
2.3.3 锥底止座的直流闭式螺管电磁铁	32
2.3.4 盆底止座结构的比例电磁铁	35

2.4	耐高压直流比例电磁铁	39
2.4.1	基本结构及工作原理	39
2.4.2	比例电磁铁的控制形式	40
2.5	比例电磁铁的初步设计	44
2.5.1	电磁铁的初步计算	44
2.5.2	直流螺管式电磁铁的结构因数 及其在选型上的应用	47
2.5.3	主要参数的确定及合理取值范围	48
2.5.4	比例电磁铁的设计步骤	53
3	电液比例控制阀	55
3.1	概述	55
3.1.1	电液比例控制阀的类型	55
3.1.2	电液比例阀的构成	57
3.2	比例压力控制阀	58
3.2.1	直动式比例溢流阀	59
3.2.2	先导式比例溢流阀	61
3.2.3	直接检测式比例溢流阀	65
3.2.4	先导式比例减压阀	68
3.2.5	三通比例减压阀	72
3.3	电液比例流量控制阀	76
3.3.1	直动式比例节流阀	76
3.3.2	定差减压型比例调速阀	78
3.3.3	比例溢流节流阀	82
3.3.4	先导式位置反馈型比例节流阀	82
3.3.5	先导式流量反馈型电液比例流量阀	90
3.4	电液比例方向阀	95
3.4.1	比例方向阀的结构及控制特点	96
3.4.2	直动式比例方向阀	102
3.4.3	先导式比例方向阀	104

3.4.4	比例方向阀的特性曲线	106
3.5	电液比例复合阀	111
3.5.1	压力补偿型比例复合阀	112
3.5.2	比例压力/流量复合阀 (p-Q 阀)	113
3.6	闭环比例阀和整体式比例方向阀	115
3.6.1	直动式四位四通闭环比例阀	116
3.6.2	先导式闭环比例方向阀	118
3.6.3	二位三通闭环比例节流阀	120
3.6.4	整体式比例方向阀	120
4	电液比例容积控制	122
4.1	容积泵的基本控制方法	124
4.1.1	流量适应控制	124
4.1.2	压力适应控制	130
4.1.3	功率适应控制	132
4.1.4	恒功率控制	135
4.2	比例排量变量泵和变量马达	138
4.2.1	位移直接反馈式比例排量调节	140
4.2.2	位移-力反馈式比例排量调节变量泵	149
4.2.3	位移-电反馈型比例排量调节	154
4.3	电液比例压力调节型变量泵	157
4.3.1	工作原理及结构	157
4.3.2	先导式比例压力调节变量叶片泵 的特性分析	159
4.4	电液比例流量调节型变量泵	167
4.4.1	稳流量调节控制原理	167
4.4.2	泵的特性分析	169
4.4.3	带流量适应的比例流量调节型变量泵	172
4.5	电液比例压力和流量调节型变量泵	175
4.5.1	压力补偿型比例压力和流量调节	178

4.5.2 电反馈型比例压力和流量调节	181
5 电液比例控制基本回路	187
5.1 电液比例压力控制回路	187
5.1.1 比例调压回路	188
5.1.2 比例减压回路	191
5.2 电液比例速度控制回路	193
5.2.1 比例节流调速及其压力补偿	193
5.2.2 比例容积调速回路	196
5.3 比例压力/速度控制回路	198
5.3.1 比例压力/流量复合阀供油回路	198
5.3.2 比例压力/流量调节型变量泵供油回路	199
5.4 电液比例方向及速度控制回路	201
5.4.1 对称执行器的比例方向控制回路	201
5.4.2 非对称执行器的比例方向控制回路	204
5.4.3 比例差动控制回路	205
5.5 比例方向阀的进口节流压力补偿回路	208
5.5.1 进口节流压力补偿阀	209
5.5.2 对称执行器的进口压力补偿回路	213
5.5.3 差动缸的双向压力补偿	214
5.6 比例方向阀的出口节流压力补偿控制回路	219
5.6.1 单向出口节流压力补偿	219
5.6.2 出口节流压力补偿器控制回路	222
5.7 采用插装元件的压力补偿回路	228
5.7.1 减压型进口节流压力补偿	228
5.7.2 减压型出口节流压力补偿	230
5.7.3 溢流型负载压力补偿	232
5.7.4 插装式元件的双向压力补偿回路	234
5.8 其它比例方向阀控制的实用回路	236
5.8.1 重力平衡回路	236

5.8.2	比例同步控制回路	238
6	电液比例电控技术与检测	244
6.1	概述	244
6.1.1	比例放大器的基本技术要求	244
6.1.2	比例阀的电气控制组成	245
6.2	电源电路	247
6.2.1	整流电路	248
6.2.2	滤波电路	249
6.2.3	稳压电路和双电源稳压电路	251
6.2.4	电源电路实例	255
6.3	比例控制放大器	256
6.3.1	比例放大器的分类及基本技术要求	256
6.3.2	比例放大器中的信号处理电路分析	257
6.3.3	信号发生和处理电路	272
6.3.4	功率放大级	279
6.3.5	闭环控制的检测与反馈	285
6.4	编程器电路	291
6.4.1	电位器编程电路	292
6.4.2	模拟式电位器 (Kelvin-Varley 分压器)	295
6.4.3	非周期函数发生器	298
6.5	比例放大器的使用及调整	300
6.5.1	单通道力控制型比例放大器	300
6.5.2	双通道力控制型比例放大器	308
6.5.3	单通道行程控制型比例放大器	312
7	电液比例控制系统的分析与综合	315
7.1	电液比例控制系统的基本类型	315
7.1.1	电液比例控制系统的分类	315
7.1.2	模拟式比例控制系统	316
7.2	比例方向阀的一般分析	317

7.3	电液比例动力机构特性分析	321
7.3.1	对称四通比例阀控制对称液压缸	322
7.3.2	对称四通比例阀控制非对称液压缸	325
7.3.3	非对称阀控制非对称液压缸	328
7.3.4	液压动力机构的自然频率	331
7.3.5	液压马达输出轴的等效负载计算	339
7.4	电液比例压力(力)控制系统	351
7.4.1	比例压力控制系统的类型及特点	351
7.4.2	电液比例调压系统	353
7.4.3	闭环电液比例压力(力)控制系统	356
7.4.4	闭环比例压力(力)控制系统的特性分析	359
7.5	电液比例速度控制系统	368
7.5.1	开环比例速度控制系统	369
7.5.2	电液比例调速的电气补偿	372
7.5.3	闭环比例速度控制系统	378
7.6	电液比例位置控制系统	383
7.6.1	电液比例减速定位位置控制	384
7.6.2	行程末端位置反馈定位控制	388
7.6.3	电液比例闭环位置控制系统	392
8	比例系统的设计及元件选择	403
8.1	概述	403
8.1.1	电液比例控制系统的组成	403
8.1.2	电液比例控制系统的控制形式和选择	404
8.1.3	电液比例控制系统的设计步骤	406
8.2	电液比例往复运动的分析及设计计算	408
8.2.1	电液比例往复运动系统的稳定性、 频宽和最大加速度	408
8.2.2	用四通比例方向阀控制时的加速度、 供油压力及液压缸面积的计算及选择	412

8.2.3 比例方向阀的阀压降计算和通径选择	418
8.3 比例元件的选择原则	424
8.3.1 比例压力阀的选择	424
8.3.2 比例流量元件的选择	426
8.3.3 比例方向阀的选择	427
9 数字式比例控制	431
9.1 数字式比例控制系统的类型	431
9.1.1 采用模拟式比例阀的数模混合控制	432
9.1.2 脉冲调制式数字比例控制	433
9.2 组合式数字元件	437
9.2.1 组合式数字压力阀	437
9.2.2 组合式数字流量阀	440
9.2.3 组合式数字缸	442
9.2.4 二进制数字变量泵及其调速系统	443
9.3 步进电机式数字阀	445
9.3.1 步进式数字溢流阀	446
9.3.2 步进式数字节流阀与流量阀	455
9.3.3 步进式数字方向流量阀	459
9.3.4 步进液压缸与步进液压马达	465
9.3.5 数字式比例排量变量泵	472
9.4 高速开关阀	475
9.4.1 高速开关阀的结构	475
9.4.2 高速开关阀的阀芯运动分析	481
9.4.3 高速开关阀的特性分析	487
9.4.4 螺管电磁铁式开关阀的开关性能	492
9.5 高速开关阀的计算机控制与驱动	495
9.5.1 高速开关阀的控制方式	496
9.5.2 脉宽调制信号的生成方法	499
9.5.3 高速开关阀的驱动	502

9.6 步进式数字阀的控制与驱动	507
9.6.1 步进电机的主要特性和选择	507
9.6.2 步进式数字阀的驱动控制线路	511
9.6.3 步进电机驱动功率放大电路	523
10 电液比例控制系统的工程应用	528
10.1 电液比例多级速度、压力控制系统	528
10.2 电液比例闭环速度控制系统的应用	530
10.3 空间升降平台的比例控制系统	533
参考文献	536

1 概 论

1.1 电液比例技术发展概况

广义上说,电液伺服控制也是一种比例控制技术。这样比例控制就可以认为是从伺服阀的出现就诞生了。40年代因军事上的需要而产生伺服阀。伺服阀的输出量(压力或流量)正比于输入的控制电流或电压。它是电气和液压的接口元件。伺服技术被认为在50年代已日臻完善。由于伺服阀的快速响应及高的控制精度,以其明显的技术优势,迅速在高精度、快速响应的领域中,如航天、航空、轧钢设备及试验设备等中取代了传统的机电控制方式。但人们也很快发现,由于电液伺服器件的价格过于昂贵,对油质要求十分严格,控制损失(阀压降)较大。使伺服技术难以为更广泛的工业应用所接受。在很多工业应用场合,要求有一般的高质量的控制手段,却并不要求太高的控制精度或响应性。现代工业的迅猛发展,要求发展一种廉价、节能、维护方便、适应大功率控制及具有一定控制精度的电液比例控制技术。而现代电子技术和测试技术的发展为工程界提供了可靠而廉价的检测、校正技术。这些为电液比例技术的发展提供了有利的条件。

在此条件下,自60年代以来,为降低比例控制的成本。现代意义下的比例技术从两个方面发展起来。一方面是在高性能的伺服阀的基础上发展了工业伺服技术。其特点是适当

简化伺服阀的结构,降低它的制造精度,增大电-机械转换器的输出功率水平和改善阀的抗污染性能。这虽然降低了制造成本,但因其结构复杂,价格仍然十分可观,使它的应用仍受到限制。另一方面在普通的液压阀的基础上,采用廉价而可靠的比例电磁铁作为电-机械转换元件,取代原来阀内的手动调节器或普通开关式电磁铁。并相应地改进了阀内的设计和引入各种内反馈控制,从而出现了一种价廉的,耐污染与一般工业阀相同,性能又能满足大部分工业控制要求的比例元件。

比例阀自 60 年代后期间世以来,也经历了几个发展阶段。初期只是用比例电磁铁取代手轮调节,其它结构并没有改变,频宽仅 $2\sim 3\text{Hz}$ 。自 80 年代以来,比例元件由于引入受控参数更完善的反馈、校正和优化设计。除了为降低成本所限,仍保留中位死区处,其它性能可以与工业伺服阀相比拟,频宽达 $10\sim 25\text{Hz}$,稳定性也提高了。

利用这一技术出现了很多所谓整体闭环控制,即全程电反馈的电液比例元件。其中有各种比例阀、比例容积控制、恒功率控制、恒流量控制、恒压力控制动力源等。此外,以德国 Bosch 公司为代表推出的高性能闭环比例阀。由于采用了高响应直流比例电磁铁和相应的放大器,含内置位置检测电子装置和反馈闭环,采用零开口四边滑阀,其输出稳态特性中无中位死区,滞环仅 0.3% ,频宽达 200Hz ,其性能与伺服阀无异。

除了模拟式的电液比例元件外,人们也注重于开发出各种数字式的比例元件。数字式液压元件也是今后比例技术发展的一个重要分支。

现在比例阀已有些是把传感器、测量放大器、控制放大

器和阀复合在一起的机电一体化的元件,使得结构更紧凑,性能进一步提高。这种结构有许多优于其它系统的优点。由于电子装置直接装在阀体上,减小了插件和导线,从整体看更简洁,对使用者的要求也更简单。未来的阀可能带有储存器和具有智能,具有自动检测和报警功能。只要接受简单的指令,阀就能完成一系列的工作。

由于比例阀具有上述众多优点,因此它获得远比伺服阀更为广泛的工业应用。预料比例元件将作为普通的液压元件而大量应用,并与传统的液压阀分享工业市场。

1.2 电液比例控制的概念

在液压传动与控制中,能够接受模拟式或数字式信号,使输出的流量或压力连续成比例地受到控制,都可以被称为电液比例控制系统。例如数字控制系统、脉宽调节(PWM)控制系统以及一般意义上的电液比例控制系统。

虽然比例控制与伺服控制都可以用于开环和闭环系统。但就目前来说,前者主要用于开环控制,而后者主要用于闭环控制。理解伺服装置与比例控制装置的差别是有意义的。伺服控制装置总是带有内反馈,任何检测到的误差都会引起系统状态改变,而这种改变正是强迫这个误差为零。误差为零时伺服系统会处于平衡状态,直到新的误差检测出来。比例控制装置是一种有确定增益的转换器。例如,比例阀可以把一个线性运动(手动或电磁铁驱动)转换成比例的油流量或压力,转换常数取决于阀的几何尺寸及它的制造精度。闭环比例阀也可以用于外部反馈闭环系统。在伺服控制系统中,平衡状态控制信号(误差)理论上为零,而比例控制系统却永远不会为零。

在比例控制系统中,主控制元件可以有无限种状态,分别对应于受控对象的无限种运动。与比例控制对应的还有开关控制。由于开关控制中控制元件只有两种状态,即开启或关闭。因此要实现高质量的复杂控制时,必须有足够大量的元件,把各元件调整成某一特殊的状态。必要时选通这一元件,从而实现使受控对象按预定的顺序和要求动作。

比例控制和开关控制都可以是手动或按程序自动进行。不同的是在比例控制中,比例元件根据接收到的控制信号,自动转换状态,因而使系统大为简化。

在工程实际应用中,由于大多数被控对象仅需要有限的几种状态。因而开关控制也有可取之处。开关元件通常简单可靠,不存在系统不稳定的情况。可以利用计算机输出的数字信号经放大后驱动开关元件,省去昂贵的数模转换元件,从而使电气控制变得简单。

在模拟式比例控制中,如果需要用计算机来控制,则必须具有 A/D、D/A 接口元件与计算机联接,这增加了成本和对使用者的要求。近年来,已开发出一些数字式比例元件,其输出量与脉冲数、脉宽或脉冲频率成比例。这类元件实质上是一个电液数模转换器。其优点是抗污染能力强,滞后时间短,重复性好,能与数字计算机直接相联接,是电液比例技术中的一个新领域。

1.3 电液比例控制系统的工作原理及组成

1.3.1 液压开关控制与比例控制系统

图 1-1 所示为一个采用开关控制的液压传动系统,它是一个常见的进口节流调速系统。当 1DT 通电时液压油经换向阀左位进入液压缸的无杆腔,其速度决定于被选中的调速阀