

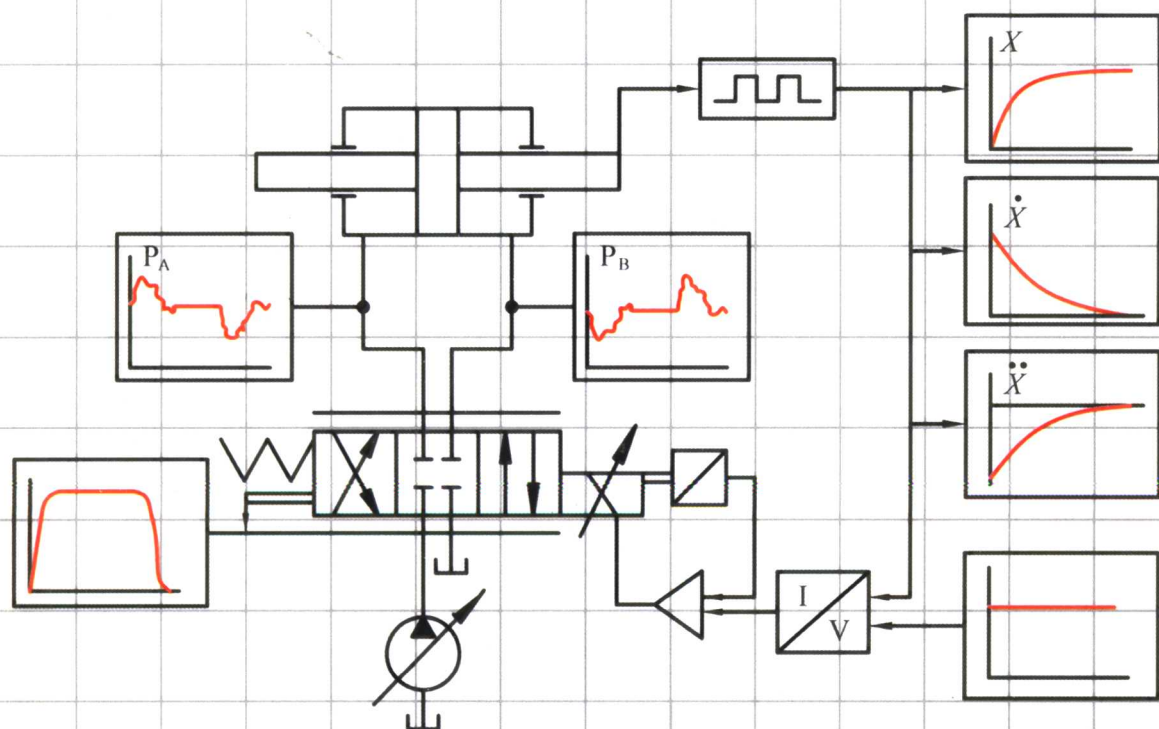
机械工业出版社出版基金资助项目

Analysis and Design of Electro-hydraulic Proportional Control System

电液比例控制系统

分析与设计

许益民 编著



机械工业出版社出版基金资助项目

电液比例控制系统分析与设计

许益民 编著

机械工业出版社

本书详细介绍电液比例控制技术的基本原理和应用方法,注重反映电液比例控制技术发展的最新成果。

全书共 12 章,第 1 章为电液比例控制技术的概述性内容,第 2 章为学习电液比例控制技术的基础知识,第 3~8 章详细介绍了电液比例控制元件的类型、工作原理、结构和性能特点、选用方法和调试要点,第 9 章介绍了电液比例控制系统的分析和设计计算,第 10 章详细介绍了电液比例元件和系统的测试原理和方法,第 11 章介绍了数字比例控制技术,第 12 章举例分析电液比例控制系统。

本书适用于学习和研究电液比例控制技术的读者,可作为高等院校机电一体化专业本科生和研究生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电液比例控制系统分析与设计/许益民编著. —北京:机械工业出版社, 2005.10

ISBN 7-111-17408-9

I. 电… II. 许… III. ①电液伺服系统--比例控制--系统分析
②电液伺服系统--比例控制--系统设计 IV. TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 107828 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2005 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·21 印张·442 千字

0001-5000 册

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

序 言

电液比例控制技术,是在以开环传动为主要特征的传统液压传动技术,和以闭环控制为特征的电液伺服控制技术基础上,为适应一般工程系统对传动与控制特性或有所侧重或兼而有之的特别要求,从20世纪60、70年代开始,逐步发展起来的流体传动与控制领域中一个具有旺盛生命力的新分支。现今,电液比例控制技术已成为工业机械、工程建设机械及国防尖端产品不可或缺的重要手段,引起相关工业界、技术界的格外重视。但由于所具有的一些特点,对这种技术的了解、掌握、运用,不论是理论上,还是实践上,都有很多问题需要研究、探讨、总结、提高,使其逐步像电液伺服控制技术那样,形成相应的科学体系,以更好地推动技术的发展和相关人才的培养。

电液控制技术与传统的以传动为主的液压传动技术,不论从元件结构与原理,到系统构成、功能实现等方面,一方面有着相当的相似性,另一方面又有着重要的差异。对传统液压传动比较了解的,容易看到相似的一面,而忽视其差异的一面。

电液比例技术与比较成熟的电液伺服技术之间,也有相似的情况。由于电液伺服技术比较成熟,在航天、冶金、舰船等领域历来得到广泛应用,这些领域的技术人员,又容易看到比例技术与伺服技术相似的一面,而忽视两者之间的差异。

电液比例技术,本来就是流体传动与控制技术中的一个新的分支,所以,原来一般液压传动技术和电液伺服技术所共有的主要特点(优点与缺点),电液比例技术照样具备。但由于它是新发展起来的技术分支,所以,在应用电子技术、计算机技术、信息技术、自动控制技术、摩擦磨损技术及新工艺、新材料等方面,往往表现出更前卫,这给电液比例技术带来更多新的特点。此外,诸如数字技术、高速开关技术等,也与电液比例技术结合得非常紧密。

最近不到10年期间发展起来的电液比例控制技术新成员——伺服比例阀,实际上是电液比例技术与电液伺服技术进一步“取长补短”式的融合。这是由客观发展需要促成的技术进步,给我们的理论与实践相结合的研究,带来了新的机遇。

许益民老师的新作,是在前人成果基础上,力求理顺、提炼、总结,进而回答上述电液比例控制技术领域一般难于回答的若干主要方面的问题。对这些问题的回答,基本上是与国际上的研究进展同步的。新作有几个特点,是值得读者留意的。新作包含有作者工程实践、特别是在冶金行业长期实践的总结,让人分享了作者十余年的教学经验与体会。

当然,新作不会、也不可能是医治百病的灵丹妙药,但它可以帮助我们去进一步探索、去实践。就我所知,作者期待着与读者进行更广泛、更深入的交流,以促进我国电液比例技术研究水平的提高和这一技术的广泛应用。

浙江大学
流体传动与控制国家重点实验室前主任
吴根茂

2005年9月16日

前 言

电液比例控制技术是一门起步较晚,但发展极为迅速、应用已相当广泛的机电液一体化综合技术。编写本书的目的,一方面是阐述电液比例控制技术的基本概念、基本原理和应用方法,另一方面就是反映该项技术的最新发展。书中有许多内容是作者长期从事电液比例控制技术教学和设计、调试、维护电液比例控制系统的体会和收获。尤其是数字比例技术一章的内容,基本上反映了当前电液比例控制技术发展的最新成就。

电液比例控制系统涉及流体力学、自动控制原理、微电子技术、自动化技术和计算机技术等相关学科,因此,学习电液比例技术的读者应注意优化自身的知识结构。

考虑到不同层次读者的不同需要,本书将理论性较强的内容作为附录安排在相关章节之后。

第1章作为电液比例控制技术的概述性内容,概略性地介绍了电液比例控制技术的形成和发展过程,给出了比例技术的定义,并解答广大工程技术人员关心的比例与伺服的关系问题。

第2章属于学习电液比例控制技术的基础知识,选择性地介绍了比例技术涉及到的重要概念,如滑阀上的作用力、液压桥路和阀系数等。

从第3章到第8章详细介绍了电液比例控制元件的类型、工作原理、结构和性能特点、选用方法和调试要点,注意解答读者在学习电液比例技术过程中容易遇到的困惑。

第9章从工程应用的角度,详细介绍了电液比例控制系统的设计和分析方法。书中给出的方法和一些参数是从大量的工程设计中总结出来的,具有很强的实用性和指导性。

第10章详细介绍了电液比例元件和系统的测试原理和方法。这一部分内容主要取材于国际和国内的相关标准,可用于指导工程实践。

第11章介绍了数字比例控制技术,反映了电液比例控制技术的最新发展。当中介绍的一些问题可作为从事电液比例控制技术科研人员的研究课题。

第12章举例分析电液比例控制系统,有助于读者领略电液比例控制技术特有的优势,掌握分析问题和解决问题的思路。

第2章简要介绍了学习电液比例控制技术需要用到的一些基础知识。学习过液压技术的读者可以跳过这一章。

作者在编写本书的过程中,参阅了国际上各液压元件生产厂的产品资料。由于比例元件种类和规格多,本书选择了应用广泛、结构典型的比例控制元件作为实例。

本书将电液比例控制系统的设计区分为开环和闭环控制系统加以介绍,反映了工程实际中设计比例控制系统的技术路线。

在全书的策划和编写过程中,浙江大学的吴根茂教授提出了许多良好的建议,并对全书进行了认真的审校;张晟为全书绘制了插图,并完成了计算机仿真;余波完成了全书的文字编排,在此一并表示感谢。

作者还感谢多年来合作研究比例技术的单位和同行。

本书获机械工业出版社出版基金资助出版，在此也表示衷心的感谢。

尽管编写此书作者已尽了全力，但由于本人水平有限，书中不妥和错误之处难免。欢迎读者提出宝贵意见，以利再版。意见可用 E-mail 直接反馈到：
xuyimin@vip.sina.com。

编 者

2005 年 9 月 9 日

目 录

序言

前言

第 1 章	电液比例控制技术概述.....	1
1.1	电液比例控制技术的含义与内容.....	1
1.2	比例技术与伺服技术的比较.....	1
1.3	电液比例控制技术的形成和发展.....	4
第 2 章	液压力与液压桥路.....	6
2.1	液体的压缩性分析.....	6
2.1.1	液体的压缩率.....	6
2.1.2	液体压力的形成.....	7
2.2	滑阀的受力分析.....	8
2.2.1	稳态液动力及其补偿方法.....	8
2.2.2	瞬态液动力.....	13
2.2.3	粘性摩擦力.....	14
2.2.4	液压卡紧力及其减弱措施.....	15
2.2.5	惯性力.....	17
2.2.6	弹簧力.....	17
2.2.7	液压力.....	17
2.2.8	滑阀驱动力及其确定方法.....	18
2.3	液压桥路.....	18
2.3.1	液压半桥的特性.....	19
2.3.2	液压半桥的比较.....	22
2.3.3	对先导控制液桥的要求.....	23
2.3.4	液压阻尼.....	23
	参考文献.....	25
第 3 章	比例电磁铁.....	26
3.1	比例电磁铁的技术要求.....	26
3.2	单向比例电磁铁的结构与工作原理.....	26
3.2.1	单向比例电磁铁的典型结构.....	26
3.2.2	单向比例电磁铁的工作原理.....	27
3.3	比例电磁铁的分类与应用.....	28
3.3.1	力控制型比例电磁铁.....	29
3.3.2	行程控制型比例电磁铁.....	30
3.3.3	位置调节型比例电磁铁.....	30

3.3.4 耐高压双向极化式比例电磁铁	32
3.4 比例电磁铁的使用与维护	34
3.5 附录: 单向比例电磁铁的动态数学模型及其分析	35
3.5.1 行程控制型比例电磁铁的动态数学模型及其分析	35
3.5.2 力控制型比例电磁铁的动态数学模型及其分析	40
3.5.3 位置调节型比例电磁铁的动态数学模型及其分析	40
参考文献	42
第4章 比例放大器基本控制电路及其应用	44
4.1 比例放大器概述	44
4.1.1 比例放大器的分类	44
4.1.2 电液比例控制元件对比例放大器的技术要求	44
4.1.3 比例放大器的基本控制电路	45
4.2 比例放大器的电源电路	46
4.2.1 整流电路	46
4.2.2 滤波电路	47
4.2.3 稳压电路	48
4.2.4 电源电路实例	50
4.3 信号处理电路	51
4.4 信号发生电路	59
4.4.1 非周期信号发生电路	59
4.4.2 周期信号发生电路	63
4.5 功率放大电路	64
4.5.1 模拟式功率放大电路	65
4.5.2 脉宽调制(PWM)式功率放大电路	66
4.6 反馈检测电路	67
4.7 比例放大器的使用与调整	71
4.7.1 单通路开环比例放大器	72
4.7.2 单通路闭环比例放大器	76
4.7.3 双路开环比例放大器	76
参考文献	80
第5章 电液比例压力控制阀	81
5.1 电液比例控制阀的分类	81
5.2 比例溢流阀	81
5.2.1 直动式比例溢流阀的典型结构及工作原理	82
5.2.2 压力间接检测型先导式电液比例溢流阀的典型结构及工作原理	85
5.2.3 电液比例溢流阀的特性及其分析	87
5.3 比例减压阀	91
5.3.1 二通直动式比例减压阀的工作原理及存在的问题	91

5.3.2	三通直动式比例减压阀的典型结构及工作原理	92
5.3.3	压力间接检测型先导式比例减压阀	94
5.3.4	比例减压阀的特性及其分析	98
5.4	附录比例压力阀的数学模型与性能分析	99
5.4.1	带位置调节型比例电磁铁的直动式比例溢流阀的数学模型	99
5.4.2	带力控制型比例电磁铁的直动式比例溢流阀的数学模型	102
5.4.3	带行程控制型比例电磁铁的直动式比例溢流阀的数学模型	105
5.4.4	间接测压型先导式比例溢流阀的数学模型及性能分析	105
5.4.5	间接测压型先导式比例减压阀的数学模型及特性分析	111
	参考文献	114
第6章	电液比例流量控制阀	116
6.1	比例流量控制阀概述	116
6.1.1	流量控制的基本原理	116
6.1.2	比例流量阀的分类	116
6.2	电液比例节流阀	117
6.2.1	单级电液比例节流阀	117
6.2.2	二级电液比例节流阀	119
6.2.3	三级电液比例节流阀	121
6.2.4	电液比例节流阀的特性及其分析	124
6.2.5	电液比例节流阀的选用方法	127
6.3	电液比例调速阀	127
6.3.1	采用压差补偿原理的二通单级比例调速阀	127
6.3.2	采用压力适应原理的三通比例流量阀	129
6.3.3	采用流量反馈原理的比例流量阀	133
6.3.4	电液比例调速阀的特性及其分析	138
	参考文献	141
第7章	电液比例方向控制阀	143
7.1	电液比例方向控制阀概述	143
7.2	单级电液比例方向阀	144
7.2.1	带行程控制型比例电磁铁的单级比例方向阀	144
7.2.2	带位置调节型比例电磁铁的单级比例方向阀	145
7.3	二级比例方向阀	144
7.3.1	不带内部反馈闭环的二级比例方向阀	146
7.3.2	带内部反馈闭环的二级比例方向阀	149
7.4	比例方向阀的特性分析和选用方法	153
7.4.1	比例方向阀的节流特性分析	153
7.4.2	比例方向阀的控制特性	154
7.4.3	比例方向阀的内泄漏特性	155

7.4.4 比例方向阀的动态特性	156
7.4.5 比例方向阀的选用方法	156
7.5 比例方向阀的流量控制方法	162
7.5.1 进口压力补偿器及其在比例方向阀控制回路中的应用	162
7.5.2 出口压力补偿器及其在比例方向阀控制回路中的应用	168
7.6 伺服比例阀.....	171
7.6.1 单级伺服比例阀.....	172
7.6.2 二级伺服比例阀.....	174
7.6.3 三级伺服比例阀.....	176
7.6.4 伺服比例阀的性能分析	177
参考文献.....	179
第8章 电液比例控制泵.....	181
8.1 变量泵的分类与控制方式.....	181
8.1.1 变量泵的分类.....	181
8.1.2 变量泵控制系统.....	182
8.2 比例排量控制泵及其控制特性	183
8.2.1 排量控制的基本原理	183
8.2.2 排量控制泵的反馈方式	183
8.2.3 比例排量控制泵及其控制特性分析	184
8.2.4 比例排量控制泵的应用	187
8.3 比例压力控制泵及其控制特性	188
8.3.1 压力直接检测反馈型比例压力控制泵	188
8.3.2 压力-电反馈型比例压力控制泵	190
8.3.3 比例压力控制泵的应用	190
8.4 比例流量控制泵.....	191
8.5 比例复合控制泵.....	192
8.5.1 带公用二级阀的压力-流量复合控制泵及存在问题的分析	192
8.5.2 带功率限制功能的压力-流量电反馈复合控制泵	193
8.6 变量泵变量方式的选择.....	197
参考文献.....	199
第9章 电液比例控制系统的分析与设计计算.....	200
9.1 电液比例控制系统设计的内容与步骤	200
9.2 估算执行元件的参数.....	201
9.2.1 系统压力的估算.....	201
9.2.2 执行元件主要结构参数的估算	202
9.2.3 液压缸-负载系统固有频率的估算	204
9.2.4 固有频率对执行元件加(减)速度过程的制约.....	209
9.3 拟定系统方案.....	211

9.4	建立电液比例控制系统的数学模型与确定系统主要参数	215
9.4.1	开环比例控制系统的数学模型	216
9.4.2	闭环比例控制系统的数学模型	217
9.5	电液比例控制系统的静态性能分析	232
9.5.1	开环系统的误差分析	232
9.5.2	闭环控制系统的误差分析	232
9.6	闭环控制系统的动态性能分析	239
9.6.1	工具软件 MATLAB 在动态仿真中的应用	240
9.6.2	电液比例控制系统的动态特性和稳定性分析	241
9.7	采用比例技术改造伺服系统的方法	253
	参考文献	255
第 10 章	电液比例测试技术	256
10.1	电液比例测试系统的组成和设计原则	256
10.2	电液比例加载装置的设计与分析	259
10.2.1	比例压力加载装置	259
10.2.2	比例流量加载装置	260
10.2.3	恒压差加载装置	261
10.3	二通比例阀液压试验回路及比例压力阀试验方法	262
10.3.1	二通阀液压试验回路及其功能	262
10.3.2	比例压力阀试验方法	263
10.4	四通比例阀液压试验回路及比例方向阀静、动态特性试验方法	267
10.4.1	四通阀静态特性液压试验回路及其功能	268
10.4.2	比例方向阀静态特性试验方法	268
10.4.3	四通比例阀动态特性试验方法	274
10.5	比例控制泵的液压试验回路和试验方法	277
10.5.1	比例控制泵的试验油路	277
10.5.2	比例控制泵的特性与测试方法	279
10.6	比例元件计算机辅助测试系统设计的主要内容	280
10.6.1	硬件设计的主要内容	281
10.6.2	软件设计的主要内容	282
10.6.3	采样频率的选择	284
	参考文献	285
第 11 章	数字比例控制技术	287
11.1	数字比例控制技术的发展与技术优势	287
11.2	数字比例放大器	288
11.2.1	数字式比例放大器的基本功能	288
11.2.2	典型的数字式比例放大器工作原理	289
11.3	电液轴控制器及其主要功能	293

11.4	单轴数字控制器的功能与应用	297
11.4.1	单轴数字控制器的功能	297
11.4.2	基于单轴数字控制器的电液轴控系统的设计方法	297
11.5	多轴数字控制计算机	299
11.5.1	多轴数字控制计算机的结构	299
11.5.2	多轴数字控制计算机与可编程控制器(PLC)的比较	302
11.5.3	多轴数字控制计算机的软件结构	302
11.6	电液轴控比例系统的设计与调试要点	303
	参考文献	304
第12章	电液比例控制系统设计实例分析	305
12.1	塑料注射成型机液压系统分析	305
12.1.1	塑料注射成型机的功用及工艺流程	305
12.1.2	采用液压传动技术的塑机液压系统	307
12.1.3	采用电液比例控制技术的塑机液压系统	309
12.1.4	采用电液比例轴控技术的塑机液压系统	310
12.2	连铸机机械手液压系统分析	312
12.2.1	设备用途及液压系统工作原理分析	312
12.2.2	系统的主要技术参数	314
12.2.3	马达平衡回路的制动特性分析	315
12.3	水平缠绕机液压系统分析与设计	319
12.3.1	水平缠绕机液压系统的工作原理	319
12.3.2	采用电液比例控制技术改造水平缠绕机液压系统	321
	参考文献	323

第 1 章 电液比例控制技术概述

1.1 电液比例控制技术的含义与内容

习惯上，把使用比例控制元件（含比例阀、比例控制泵及比例放大器）的液压系统称为电液比例控制系统。

严格地说，比例控制是实现元件或系统的被控制量（输出）与控制量（输入或指令）之间线性关系的技术手段，依靠这一手段要保证输出量的大小按确定的比例随着输入量的变化而变化。

绝对的线性关系是不存在的，工程上认为，将线性偏差值控制在允许的误差范围内的比例关系就是线性关系。

实现输出量与输入量的线性关系，是线性控制理论的要求。因此，从控制原理的角度看，电液比例控制系统和电液伺服控制系统（也要求是线性系统）没有区别，但由于二者产生的历史背景不同，采用的技术手段不一样，应用场合也有所侧重，使得在液压控制技术领域，人们总是习惯于严格地将比例技术和伺服技术区分开。

刚开始接触比例技术和伺服技术的工程技术人员很容易提出：比例和伺服究竟有什么关系？用什么标准加以区分呢？

1.2 比例技术与伺服技术的比较

一般来说，比例技术与伺服技术的区别主要是液压控制系统中采用的控制元件不同。电液比例控制系统（含开环控制和闭环控制）采用的控制元件为比例阀和比例泵，液压伺服控制系统（只有闭环控制）采用的控制元件为伺服阀。

二者的区别与联系具体表现在以下几个方面：

1. 控制元件的应用范围不同

比例控制元件的控制参数包括单方向的压力、单方向的流量、方向+流量、压力+流量。对应不同的控制参数，比例控制元件包括比例压力阀（比例溢流阀、比例减压阀（含两通和三通））、比例流量阀（只单方向控制液流的比例节流阀和比例流量阀）、比例方向阀（采用节流原理和流量控制原理在两个方向上控制液流）、复合比例控制阀。

伺服控制元件控制的参数包括流量+方向、压力+方向、流量+方向+压力，对应地有流量伺服阀、压力伺服阀和压力流量复合控制阀。这类元件的功率级均采用节流原理实现对流量（含方向）和压力（含方向）的比例控制。

控制元件的上述差别导致比例技术与伺服技术的应用范围不同。比例系统可代替普通的液压系统和部分伺服系统，其中，比例压力阀和比例流量阀可分别代替普通的手调

压力阀和手调流量阀，采用比例压力阀的比例压力控制系统和采用比例流量阀的比例流量控制系统与伺服系统没有可比性，这两类系统的特性主要与普通的液压系统进行比较。比例方向阀既可代替由普通电磁换向阀（开关型）和手调节流阀组成的流量与方向控制单元，又与电液伺服阀十分相似，故比例技术与伺服技术的比较主要在采用比例方向阀的系统与采用伺服阀的系统中进行。

2. 控制元件采用的驱动装置（电—机械转换器）不同

比例控制元件采用的驱动装置为比例电磁铁（动铁式电—机械转换器），它的输入电信号通常为几十到几千毫安，且为了提高运行可靠性和输出力，还有采用大电流的趋势，衔铁输出的电磁力大小为几十至数百牛顿。比例电磁铁的特点是感性负载大，电阻小，电流大，驱动力大，但响应低。

伺服控制元件采用的驱动装置为力马达或力矩马达（动圈式电—机械转换器），其输入电信号一般为十至几百毫安，相对于比例阀而言，其电—机械转换器的输出功率较小，感抗小，驱动力小，但响应快。

不同的驱动装置配用的电放大器采用不同的称呼：驱动比例电磁铁的控制装置称为比例放大器，驱动力马达和力矩马达的控制装置称为伺服放大器。二者的信号调整部分是相似的，主要是功率级输出的电流大小不同。伺服放大器功率级输出的电流为十毫安至几百毫安，比例放大器功率级输出的电流为几十毫安到数安培。

3. 控制元件的性能参数不同

比例阀与伺服阀的性能比较，如表 1-1 所示。

表 1-1 比例阀与伺服阀的性能比较

特 性	伺 服 阀	比 例 阀		
		伺服比例阀	无电反馈比例阀	带电反馈比例阀
滞环（%）	0.1~0.5	0.2~0.5	3~7	0.3~1
中位死区（%）	理论上为零	理论上为零	±5~20	
频宽/Hz	100~500	50~150	10~50	10~70
过滤精度（ISO4406）	13/9~15/11	16/13~18/14	16/13~18/14	16/13~18/14
应用场合	闭环控制系统		开环控制系统及闭环速度控制系统	

由表 1-1 不难看出，伺服阀的性能最优，伺服比例阀的静态特性与伺服阀基本相同，但响应偏低（介于普通比例阀与伺服阀之间），普通比例阀（含无电反馈比例阀和带电反馈比例阀）的死区大，滞环大，动态响应低。由于这一原因，对含有普通比例阀的系统进行分析和仿真时，不能像对伺服阀那样，采用在零位附近简单地进行线性化处理的原则，而应充分考虑大死区及滞环等非线性因素的影响。

4. 应用的侧重点不同

比例方向阀与伺服阀的性能差异导致二者的应用各有侧重（见表 1-1）。

电液伺服阀几乎没有零位死区，通常工作在零位附近，特别强调零位特性只应用在闭环控制系统（含位置控制系统、速度控制系统、力（或压力）控制系统）。这类系统对控制精度和响应速度要求高，在对系统快速性有特别高要求的场合（如军事装备），伺服控制仍然是理想的解决方案。

伺服比例阀基本没有零位死区，既可以在零位附近工作，也可以在大开口（大流量工况）下运行。因此，伺服比例阀要考虑整个阀芯工作行程内的特性。伺服比例阀主要用于对性能要求通常不是特别高的闭环控制系统。

普通的比例方向阀（含比例流量阀）对于零位特性没有特殊要求，它主要工作于开环系统，以及闭环速度控制系统。当应用于速度控制系统（有差控制）中时，必须在比例放大器中采取快速越过死区的措施来减小死区的影响，并使之工作在大开口状态。

5. 阀芯结构及加工精度不同

普通比例换向阀阀芯采用阀芯+阀体的结构，阀体兼作阀套。由于死区大，阀芯与阀套允许的配合间隙较大，阀口台阶之间的尺寸公差也较大，一般具有互换性。伺服阀和伺服比例阀采用阀芯+阀套的结构，二者配做成组件，加工精度要求极高，不具备互换性。比例阀与伺服阀在结构和加工精度上这些区别，直接导致价格上的差异，也是对油液过滤精度要求不同的原因。而过滤精度要求不同，导致系统维护的难易程度和维护成本不同。

6. 中位机能种类不同

比例换向阀具有与普通换向阀极为相似的中位机能，这有利于比例阀适应于更多的设备工况，而伺服阀中位机能只有 O 型（Rexroth 产品的 E 型），适应工况单一。

7. 阀的额定压降不同

阀的额定压降定义为通过额定流量时阀上形成的压力差，是阀中两个阀口（P 到 A，B 到 T）的压降之和。

为了保持电液伺服阀的响应特性，伺服阀需要很高的阀口压降，一般以 $1/3$ 供油压力设计（通常为 7MPa，即单阀口为 3.5 MPa），它的性能指标也是在这种工况下给出的。

伺服比例阀对阀口压差没有严格要求，既能工作于大压差工况，也能在小压差下工作，但性能会有所降低。一般情况下，表征单级伺服比例阀额定流量的单阀口压差与伺服阀一样，为 3.5 MPa，表征多级伺服比例阀额定流量的单阀口压差与一般比例阀相同，为 0.5 MPa 或 1.5 MPa。

普通电液比例方向阀对阀口压差也没有严格要求，既能工作于大压差工况，也能在小压差下工作，表征其额定流量的单阀口压差一般为 0.5 MPa 或 1.5 MPa。

伺服阀和比例方向阀对额定压降的不同要求，导致比例系统的效率较高，伺服系统的效率较低，两种系统的运行成本也不同。

值得指出的是，尽管比例技术与伺服技术各具特点，但随着技术的进步，科研和设

计人员更注重将比例和伺服技术紧密结合起来，二者相互渗透，相互融合。例如，在三级比例方向阀中，就采用喷嘴挡板型伺服阀作为先导阀（二级阀）控制第三级阀的方案，之所以称之为比例方向阀，是因为这种型式的比例方向阀的第三级阀（功率级滑阀）没有采用伺服阀的阀芯+阀套的结构，而是采用比例阀的阀芯+阀体的结构。另外，伺服比例阀是采用比例电磁铁作为电-机械转换器，而功率级滑阀又采用伺服阀的加工工艺的方案。这些都是比例和伺服技术紧密结合的结果。工程设计人员应根据系统设计的具体要求来选择合适的控制元件（阀和泵），制定合理方案，充分发挥各自的技术优势，保证系统获得最好的性价比。

当采用比例阀或伺服比例阀构成闭环控制系统时，它与伺服系统在控制原理、设计内容、调试方法等方面没有区别。

1.3 液比例控制技术的形成和发展

电液比例控制技术从形成至今，大致上可划分为四个阶段：

从 1967 年瑞士 Beringer 公司生产 KL 比例复合阀，到 70 年代初日本油研公司申请压力和流量两项比例阀专利，标志着比例技术的诞生时期。此间，比例技术开始在液压控制领域中作为独立的分支，并以开环控制应用为主。这一阶段的比例阀仅仅是将新型电-机械转换器（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方法几乎没有变化，阀内不含受控参数的反馈闭环，其工作频宽仅在 1~5Hz 之间，滞环在 4%~7% 之间。

从 1975 年到 1980 年，比例技术的发展进入第二阶段。这是比例技术发展最快的时期。此间，采用各种内部反馈原理的比例元件相继问世，耐高压比例电磁铁和比例放大器在技术上已经成熟。比例元件的工作频宽已达 5~15Hz，滞环减小到 3% 左右，其应用领域不断扩大。20 世纪 70 年代后期比例变量泵和比例执行器相继出现，为大功率系统的节能奠定了技术基础。应用领域扩大到闭环控制。

到了 20 世纪 80 年代，比例技术的发展进入第三阶段。这一阶段，比例元件的设计原理进一步完善，采用了压力、流量、位移反馈和动压反馈及电校正等手段，使阀的稳态精度、动态响应和稳定性都有了进一步的提高。除了制造成本的原因，比例阀在中位仍保留死区外，它的稳态和动态特性均已和工业伺服阀相当。这一阶段的另一项重大进展是比例技术开始和插装阀相结合，开发出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。此外，由于传感器和电子器件的小型化，还出现了带集成放大器的电液一体化比例元件。

从 1990 年至今，是比例技术进一步完善的阶段。这一阶段有两项重要的新产品问世。其一是推出了伺服比例阀（又称高性能电液比例方向阀、比例伺服阀、闭环比例阀、高频响比例阀）。这种阀的电-机械转换器采用比例电磁铁，功率级阀芯采用伺服阀的结

构和加工工艺（零遮盖阀口，阀芯与阀套之间的配合精度与伺服阀相当），解决了闭环控制要求死区小的问题。它的性能与价格介于伺服阀与普通比例方向阀之间，但它对油液的清洁度要求低于电液伺服阀，特别适用于各种工业闭环控制。其二是计算机技术与比例元件相结合，开发出了数字式比例元件和数字式比例系统，并形成了不同总线标准的数字比例元件接口。

早期出现的数字比例控制产品采用脉冲控制方式，其输入信号按载频原理工作，控制信号的频宽较模拟器件低。数字式电液控制器件的电—机械转换器主要是步进电动机和按脉宽调制方式工作的动铁或动圈式力马达。数字阀的额定流量很小，只能用于小流量控制的场合，如作为电液控制阀的先导控制级。

随着微电子技术、数字化技术、通信技术和计算机技术的发展，先是在比例放大器中采用数字芯片，部分信号的处理、调整和运算采用编程手段实现。最近，电液数字控制块、大型数字式控制系统相继开发应用，数字比例控制的产品已经由芯片级发展到了系统级，即指令、比较、反馈、PID 调节均由计算机系统实现。数字式电液系统实际上是电液数—模转换系统，这项技术已趋成熟，并形成了系列化的产品。

电液比例控制技术已经相当普遍，在新系统设计和旧设备改造中正成为用户的重要选择方案，对提高企业的技术装备水平和设备的自动化程度，发挥了极为重要的作用。

目前，电液比例控制技术正在与新的控制策略紧密结合，表现出强大的技术优势。