

DIANYE SIFUFA YEYAGANG
JIQI XITONG

电液伺服阀/液压缸 及其系统

唐颖达 刘尧 编著



化学工业出版社

DIANYE SIFUFA YEYAGANG
JIQI XITONG

电液伺服阀/液压缸 及其系统

唐颖达 刘尧 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是编著者三十多年液压传动及控制技术尤其是电液伺服控制技术和经验的总结。本书按照标准、全面、准确、实用、新颖的原则编写，主要包括：摘录了电液伺服控制技术现行相关标准中界定的名词、术语、词汇和定义，并有所辨正；根据电液伺服控制技术理论和对电液伺服阀/液压缸及其系统的静态、动态特性分析，给出了电液伺服阀/液压缸及其系统包括主要零部件的技术要求；根据编著者的实践经验并参照现行相关标准及有关文献编写了电液伺服阀/液压缸及其系统的加工工艺、装配工艺，试验（调试）方法、使用和维护方法；电液伺服阀控制液压缸系列等内容。

本书是一部电液伺服控制技术专著，注重理论与工程实践相结合，具有在理论指导下总结经验的特点。可供从事液压传动及控制或机、电、液一体化的工程技术人员，高等院校相关专业教师、学生等参考和使用；对从事航天航空乃至军工领域液压系统及元件设计、制造、使用和维护等工作的工程技术人员也具有一定参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电液伺服阀/液压缸及其系统/唐颖达, 刘尧编著. —北京: 化学工业出版社, 2018. 10
ISBN 978-7-122-32732-1

I. ①电… II. ①唐…②刘… III. ①电-液伺服阀-研究②液压缸-研究 IV. ①TH134②TH137.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 170451 号

责任编辑: 张兴辉
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 陈 喆
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 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 26½ 字数 712 千字 2019 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 138.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

在液压传动系统或液压传动及控制系统中，如其含有电液伺服阀或/和电液伺服液压泵这些典型元件，则可将其称为电液伺服（控制）系统。而本书没有采用所列参考文献中使用的“液压控制系统”这一词汇，因为作者认为将“液压传动系统”与“液压控制系统”断然分开值得商榷。

电液伺服系统因综合了电气和液压等两个主要方面的特长，具有控制精度高、响应速度快、输出功率大、信号处理灵活、易于实现各种参量的反馈控制（闭环控制）等优点，所以在负载（质量）大又要求响应速度快的场合使用最为合适。现在，其应用已遍及国民经济包括军事工业在内的各个工程技术领域。

虽然电液伺服阀控制液压缸或马达系统和电液伺服变量泵控制液压缸或马达系统同属于电液伺服（控制）系统，但因电液伺服阀（控制）系统的动态响应可以更快，所以本书主要研究电液伺服阀、电液伺服阀控制液压缸和电液伺服阀控制液压缸系统。

常见的电液伺服阀是一种电调制液压连续控制阀，其作为电液伺服系统中的核心元件，非常精密而又复杂，阀本身质量（品质）对整个系统的静态、动态性能影响很大，且使用、维护要求也非常严格。到目前为止，电液伺服阀在设计、加工、装配、试验、使用和维护等方面仍存在着一些技术难题，其中在“参数不确定性”、“数模非线性”、“零部件互换性”、“质量一致性”和“可靠性”等方面存在的问题尤为突出。

电液伺服控制液压缸现在已经被现行标准所定义，即“用于伺服控制，有动态特性要求的液压缸”。一般包括活塞式液压缸和柱塞式液压缸。然而，本书所述主要是指电液伺服阀控制的液压缸，而非是电液伺服变量泵控制的液压缸。

但根据对现在可见的相关标准、文献的研究及实验验证，本书作者认为现行标准中不仅电液伺服阀控制液压缸的定义存在问题，而且（伺服液压缸）技术条件（要求）和试验方法也有很多地方值得商榷。

本书根据作者给出的电液伺服阀控制液压缸技术要求和试验方法，设计了电液伺服（阀）控制液压缸系列，包括分类、标记、基本参数、型式与尺寸等，力争能为我国电液伺服阀控制液压缸的标准化、系列化和模块化设计做一点工作。

电液伺服阀控制液压缸系统一般采用反馈控制，其设计需要全面、准确地把握设计（技术）要求、正确制定系统控制方案、按相关标准绘制液压原理图和元件及管路布置图，其中必须重点考虑控制精度要求和各元器件性能的匹配以及稳定性、随动性、抗干扰性、可靠性和使用寿命（或概述为稳定性、精确性和快速性），而这些恰恰也是当前电液伺服阀控制液压缸系统设计的难题。

为了解决上述各项难题，完成一种新型高性能电液伺服阀设计与制造，促进电液伺服阀控制

液压缸的标准化、系列化和模块化设计,提高电液伺服阀控制液压缸系统的设计、制造、使用和维护水平,本书作者通过所从事的一种新型高性能电液伺服阀、电液伺服阀控制液压缸标准化、系列化和模块化设计、材料及零部件疲劳寿命试验机通用电液伺服阀控制液压缸系统等研制工作,较为全面、系统、深入地研究了电液伺服控制技术所涉及的主要问题,并将液压系统设计与电控系统设计结合在一起,力求体现新技术、新方法、新思路,由此实现液压传动及控制技术的创新与进步。

这是一部力求精准且能解决工程技术问题的电液伺服控制技术方面的专著。因作者学识、水平有限,恳请专家、读者批评指正。

最后,衷心感谢哈尔滨工业大学姜继海、燕山大学姜万录两位老师在本书编著出版过程中给予的多方面指导和帮助!

编著者

目录

Contents

第 1 章 电液伺服控制技术基础	1
1.1 电液伺服控制技术概论	1
1.1.1 电液伺服控制系统的分类与组成	1
1.1.2 电液伺服阀控制液压缸系统的工作原理及特点	5
1.1.3 电液伺服控制技术的发展趋势与关键技术	8
1.1.4 电液伺服阀控制液压缸系统的建模与仿真	11
1.2 电液伺服控制技术理论基础	13
1.2.1 反馈控制	13
1.2.2 数学模型	18
1.2.3 典型环节	30
1.2.4 控制系统的稳定性	34
1.2.5 控制系统的精确性	36
1.2.6 控制系统的快速性	40
1.2.7 控制系统的校正	44
1.3 电液伺服控制技术相关术语与辨正	52
1.3.1 常用术语和定义	52
1.3.2 一些术语和定义的辨正	66
第 2 章 电液伺服阀设计与制造	78
2.1 电液伺服阀的组成	78
2.1.1 电液伺服阀放大器	79
2.1.2 电气-机械转换器	79
2.1.3 液压前置级放大器	81
2.1.4 输出级液压放大器 (液压主控制阀)	84
2.1.5 电液伺服阀反馈或平衡机构	86
2.2 电液伺服阀的分类	86
2.3 电液伺服阀的一般技术要求	93
2.3.1 电液伺服阀的型式、主要参数、型号编制方法及接口	93
2.3.2 电液伺服阀的机械设计要求	94
2.3.3 电液伺服阀的电气设计要求	98

2.3.4	电液伺服阀的液压设计要求	99
2.3.5	电液伺服阀的性能要求	100
2.3.6	电液伺服阀的环境要求	101
2.3.7	电液伺服阀的耐久性要求	102
2.3.8	电液伺服阀的质量保证规定	102
2.3.9	电液伺服阀的交货准备	106
2.4	电液伺服阀的特殊(详细)技术要求	106
2.4.1	电液伺服阀接口	106
2.4.2	电液伺服阀的机械设计要求	107
2.4.3	电液伺服阀的电气设计要求	109
2.4.4	电液伺服阀的液压设计要求	109
2.4.5	电液伺服阀的性能要求	110
2.4.6	电液伺服阀的环境要求	111
2.4.7	电液伺服阀的耐久性要求	114
2.5	电液伺服阀放大器技术要求	115
2.5.1	电液伺服放大器选型	115
2.5.2	电液伺服阀放大器技术要求	116
2.6	喷嘴-挡板式液压放大器设计	118
2.7	射流管式液压放大器设计	119
2.8	液压主控制阀设计	120
2.9	常用电液伺服阀	122
2.9.1	力反馈式电液伺服阀	122
2.9.2	电反馈式电液伺服阀	126
2.9.3	直接驱动式电液伺服阀	128
2.9.4	压力控制电液伺服阀	130
2.10	电液伺服阀制造	130
2.10.1	电液伺服阀制造工艺的特点	131
2.10.2	电液伺服阀材料	133
2.10.3	电液伺服阀零部件的机械加工	134
2.10.4	电液伺服阀零部件的热加工、热处理、表面处理及无损探伤	136
2.10.5	电液伺服阀主要阀零件的加工工艺	137
2.10.6	电液伺服阀的装配工艺	143
2.10.7	电液伺服阀的试验方法	146

第3章 电液伺服阀控制液压缸设计与制造 174

3.1	电液伺服控制液压缸概论	174
3.1.1	电液伺服控制液压缸的定义及特点	174

3.1.2	电液伺服控制液压缸的组成与分类	175
3.2	零遮盖四边滑阀（四通阀）控制双（出）杆缸	180
3.2.1	基本假设	181
3.2.2	基本方程	181
3.2.3	方块图和传递函数	182
3.2.4	液压刚度与液压固有频率及传递函数简化	184
3.2.5	主要性能参数分析	190
3.3	电液伺服阀控制液压缸技术要求	193
3.3.1	电液伺服阀控制液压缸通用技术要求	193
3.3.2	集成了电液伺服阀的液压缸技术要求	197
3.4	液压缸缸体（筒）的技术要求	198
3.5	液压缸活塞的技术要求	203
3.6	液压缸活塞杆的技术要求	205
3.7	液压缸缸盖的技术要求	208
3.8	液压缸缸底的技术要求	211
3.9	液压缸导向套的技术要求	213
3.10	液压缸密封的技术要求	216
3.10.1	密封制品质量的一般技术要求	216
3.10.2	液压缸密封装置的一般技术要求	222
3.10.3	液压缸密封技术要求比较与分析 and 密封件选择	225
3.11	液压缸活塞杆静压支承结构技术要求	230
3.12	液压缸缓冲装置的技术要求	232
3.12.1	固定式缓冲装置技术要求	233
3.12.2	缓冲阀缓冲装置技术要求	233
3.13	液压缸用传感器（开关）的技术要求	234
3.13.1	液压缸用传感器的技术要求	234
3.13.2	液压缸用接近开关的技术要求	243
3.13.3	几种液压缸常用传感器产品	244
3.14	液压缸排放气、锁紧与防松及其他装置技术要求	258
3.14.1	排气装置的技术要求	258
3.14.2	防松措施的技术要求	259
3.14.3	其他装置的技术要求	259
3.15	液压缸安装和连接的技术要求	260
3.15.1	安装尺寸和安装型式的标识代号	260
3.15.2	国内外几种安装型式的伺服液压缸的安装尺寸	261
3.15.3	缸装配用双头螺柱及拧紧力矩	268
3.16	液压缸装配技术要求	271

3. 16. 1	液压缸装配一般技术要求	271
3. 16. 2	液压缸装配具体技术要求	275
3. 17	液压缸运行的技术要求	278
3. 18	电液伺服阀控制液压缸标准化、系列化和模块化设计	279
3. 18. 1	几种缸零件标准化、系列化和模块化设计	279
3. 18. 2	一组标准化、系列化和模块化电液伺服阀控制液压缸设计	284
3. 19	电液伺服阀控制液压缸制造	289
3. 19. 1	电液伺服液压缸主要缸零件的加工工艺	289
3. 19. 2	电液伺服液压缸的装配工艺	294
3. 19. 3	电液伺服液压缸的试验方法	295
第 4 章	液压伺服阀控制系统设计与制造	304
4. 1	电液伺服阀控制系统设计	304
4. 1. 1	电液伺服阀控制系统设计一般流程	304
4. 1. 2	电液伺服阀控制系统静态设计	305
4. 1. 3	电液伺服阀控制系统动态设计	307
4. 1. 4	电液伺服阀控制系统液压动力源设计	311
4. 2	电液伺服阀控制系统通用规则和安全技术要求	324
4. 2. 1	总则	324
4. 2. 2	对液压系统设计和技术规范的基本要求	324
4. 2. 3	附加要求	326
4. 2. 4	对于元件和控制的特定要求	327
4. 3	几种电液伺服阀控制系统分析与设计	336
4. 3. 1	带材纠偏控制装置电液伺服阀控制系统	337
4. 3. 2	四（六）辊轧机液压压下装置电液伺服阀控制系统	339
4. 3. 3	疲劳寿命试验机电液伺服阀控制系统	345
4. 3. 4	液压伺服振动试验设备	347
4. 4	电液伺服阀控制系统安装工艺	356
4. 5	电液伺服阀控制系统冲洗工艺	357
4. 6	电液伺服阀控制系统调试方法	359
第 5 章	电液伺服阀控制系统使用与维护	362
5. 1	电液伺服阀控制系统工作介质的使用与维护	362
5. 1. 1	电液伺服阀控制系统工作介质的选择与使用	362
5. 1. 2	电液伺服阀控制系统及元件要求的清洁度指标	367
5. 1. 3	电液伺服阀控制系统工作介质的检（监）测与维护	369
5. 2	电液伺服阀的使用与维护	372

5.2.1	电液伺服阀的选择与使用	372
5.2.2	电液伺服阀的常见故障及其排除	373
5.2.3	电液伺服阀的维护	377
5.3	电液伺服阀控制液压缸的使用与维护	378
5.3.1	伺服液压缸的使用	378
5.3.2	伺服液压缸的失效模式与风险评价	381
5.3.3	伺服液压缸的在线检(监)测与故障诊断	382
5.3.4	伺服液压缸的维修与保养	387
5.4	电液伺服阀控制系统的使用与维护	389
5.4.1	电液伺服阀控制系统的故障分析	389
5.4.2	电液伺服阀控制系统的自动诊断监控	391
5.4.3	电液伺服阀控制系统的维护与保养	392

附录 **395**

附录 A	电液伺服控制技术现行相关标准目录	395
附录 B	各标准中规定的量、符号和单位	405
附录 C	重大危险一览表(资料性附录)	411

参考文献 **413**

1.1.1.1 电液伺服控制系统的分类

电液伺服系统或电液伺服控制系统可以按选定的属性（或概念）进行分类，将具有某种共同属性（或特征）液压系统集合在一起，而其每一种分类都代表液压系统一定的特点（征）。

（1）按系统输入信号的变化规律分类

根据参考文献 [46]：“液压伺服控制系统按输入信号的变化规律不同可分为：定值控制系统、程序控制系统和伺服控制系统。当系统输入信号为定值时，称为定值控制系统。对定值控制系统，基本任务是提高系统的抗干扰性，将系统的实际输出量保持在希望值上。当系统的输入信号按预先给定的规律变化时，称为程序控制系统。伺服系统也称随动系统，其输入信号是时间的未知函数，而输出量能够准确、快速地复现输入量的变化规律。对伺服系统来说，能否获得快速响应往往是它的主要矛盾。”这段话，作者认为其涉及如下一些问题。

① 经各标准定义的定值控制系统、程序控制系统和伺服控制系统是否与上文相符。

② 液压伺服控制系统与伺服控制系统是否有区别，且前者能否包括后者。

③ 液压伺服控制系统能否简称为伺服控制系统，甚至伺服系统。

④ 伺服系统或伺服控制系统或液压伺服控制系统的输入信号是否是时间的未知函数。

⑤ 将系统的实际输出量保持在希望值上，不但涉及是量还是值的问题，而且还涉及其是否只是定值控制系统的基本任务问题。

“定值控制”和“随动控制”这两个术语在 GB/T 17212—1998《工业过程测量和控制术语和定义》中都有定义。经比对，上文内容还是与此标准中的定义有一些出入，具体请见第 1.3.1 节及相关标准。但在上述标准中未见“程序控制”或“程序控制系统”。

在 GB/T 2900.56—2008《电工术语控制技术》中定义的“程序控制”是由预先输入程序决定功能的控制。

程序控制系统的输入量不是常值，但其变化规律是预先知道的和确定的。可以预先将输入量的变化规律编成程序，由该程序发出控制指令，在输入装置中再将控制指令转换为控制信号，经过全系统的作用，使控制对象按控制指令的要求而运动。

研究“程序控制”这一定义的意义很重要，其直接关系到控制及控制系统的一些根本性问题，如输入控制信号的性质、控制系统的分类、控制器及全系统的技术要求等问题。

究竟伺服系统输入信号是“时间的未知函数”，还是“时间的函数”、“输入量的变化规律是不能预先确定的”或“时变函数”，在本书所列参考文献中说法不一，且存在同一位作者在不同著作中或有相反的说法。如参考文献 [29]“按输入信号的不同，液压控制系统可分为伺服控制系统和定值调节系统。其中伺服控制系统的输入信号是时间的函数，系统的输出以一定的控制精度跟随输入信号变化的控制系统”和参考文献 [35]“随动系统在工业部门又称伺服系统。这种系统的输入量的变化规律是不能预先确定的。当输入量发生变化时，则要求输出量迅速而平稳地跟随着变化，且能排除各种干扰因素的影响，准确地复现控制信号的变化规律（此即伺服的含义）。控制指令可以由操作者根据需要随时发出，也可以由目标物或相应的测量装置发出”。

作者认为：伺服控制系统的输入（控制）信号既可以是“时间的未知函数”，亦可是“时间的函数”，前者是伺服控制的原意，而后者是现在常用伺服控制系统的输入（控制）信号的主要型式，亦即现在常用伺服控制系统采用的是程序控制。

上述作者提出的其他问题，因在本书其他地方已有论述，此处不再赘述。

（2）按采用的液压控制元件分类

在液压传动系统或液压传动及控制系统中，如其含有电液伺服阀或/和电液伺服变量泵

这些典型元件,则可将其称为电液伺服系统或电液伺服控制系统。

按所采用的液压控制元件不同,电液伺服控制系统可分为阀控电液伺服控制系统和泵控电液伺服控制系统。进一步根据采用的液压执行元件的不同,还可分为阀控液压缸、阀控液压马达、泵控液压缸和泵控液压马达电液伺服控制系统。但是实践中却有电液伺服变量泵和电液伺服阀这种组合的电液伺服控制系统,因此只能讲阀控电液伺服控制系统一般是节流控制,泵控电液伺服控制系统一般是容积控制。

伺服阀是一种连续控制阀,而连续控制阀是响应连续的输入信号以连续方式控制系统能量流的阀,其包括所有类型的伺服阀和比例控制阀。

电调制液压控制阀主要包括电调制液压(方向)流量控制阀和电调制压力控制阀两大类。因目前普通工业领域较少采用电调制压力控制阀,所以,如不加特别说明,在本书中电液伺服阀均指电调制液压(方向)流量控制阀或电调制液压流量控制阀。

电调制液压流量控制阀是随连续不断变化的电输入信号而提供成比例的流量控制的液压阀。

液压变量泵(马达)的变量型式多种多样,按照操纵方式不同,有手动、机动、电动、液动、气动、比例、伺服及它们的组合等;按变量控制方式可分为压力控制、流量控制、功率控制、负载(荷)敏感(传感)控制、功率限制控制、转矩限制控制及它们的组合;还可分为开环控制和闭环控制,其中闭环控制又有恒压、恒流、恒功率和负载敏感的适应性控制等。

电液伺服变量泵只是液压变量泵中的一种,且本身应是闭环控制,其变量机构亦是一种电液伺服控制系统。

在大部分参考文献中都将液压控制元件与液压执行元件的组合称为“液压动力元件”,但此术语在 GB/T 17446—2012《流体传动系统及元件 词汇》中没有定义,所以本书也没有采用。

注:参考文献[77]指出:“液压动力机构”的概念是由李洪人先生在1976年科学出版社出版的《液压控制系统》一书中提出的。

(3) 按控制信号类型分类

按控制系统中控制信号类型来分,电液伺服控制系统可分模拟信号、离散(数字)信号和混合信号三种。

因在实际中很难见到纯数字控制系统,作者倾向于将混合信号控制系统归类到离散(数字)信号控制系统,在其他参考文献中也有如此分类。

因此,如在系统中某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统即可称为离散(数字)控制系统,亦即分为电液数字伺服控制系统。在离散控制系统中,数字测量、放大、比较、给定等一般均由微处理机实现。计算机的输出经 D/A 转换加给电液伺服阀放大器,然后再去驱动液压执行元件;或由(数字)计算机直接输出数字信号,经数字放大器后驱动数字式液压执行元件。

在系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统,亦即可分为电液模拟伺服控制系统。连续控制系统又有线性系统和非线性系统之分。用线性微分方程描述的系统称为线性系统,不能用线性微分方程描述、存在着非线性部件的系统称为非线性系统。

在连续控制系统中,其所传递的控制信号、反馈信号、偏差信号等都是连续时间的函数。而在离散控制系统中,上述这些信号都是以数字的型式给出的,这些信号都是离散的时间函数。

因连续控制系统和离散控制系统的信号型式有较大差别,所以在系统分析方法上也有明

显不同。连续控制系统用微分方程来描述系统的运行状态，并用拉氏变换法求解微分方程；而离散控制系统则用差分方程来描述系统的运行状态，用Z变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。

(4) 按被控物理量分类

按被控物理量的不同，电液伺服控制系统可分为位置（或转角）控制电液伺服控制系统、速度（或转速）控制电液伺服控制系统、力（或力矩）控制系统、压力控制系统和其他物理量〔温度、加速度（或角加速度）等〕控制系统等。

在被控对象是机械平动（直线）运动时，位置控制电液伺服控制系统的被控物理量还可为位移。

在被控对象是机械转动（旋转）运动时，转角控制电液伺服控制系统的被控物理量还可（表述）为角位置或角位移。

(5) 按系统的控制方式分类

按控制方式来分，电液伺服控制系统可分为开环控制和闭环控制两种。开环控制是输出变量不持久影响其本身具有的控制作用的控制；闭环控制或反馈控制是使控制作用持久地取决于被控变量测量结果的控制。开环控制系统结构简单、操作方便、一般不存在稳定性问题，但系统的控制精度易受内、外部干扰的影响，因此常用于对于控制精度要求一般的场合。闭环控制系统不仅能使被控（输出）变量随参比变量的变化而变化，而且还能将输出变量反馈到输入端，用以与输入变量进行比较，再将比较后的偏差信号经过功率放大，推动执行元（部）件，从而实现了以偏差来消除误差，或将误差控制在所要求的精度范围内。闭环控制系统因此具有一定的抗干扰能力，但却存在一个稳定性问题，控制调节也比较复杂，所以一般用于精度要求较高的重要场合。

从原理上讲，开环控制和闭环控制均可以用于电液伺服控制系统，但就目前大多数情况而言，开环控制主要用于比例控制，闭环控制主要用于伺服控制。因此，一些参考文献包括手册指出：电液伺服控制系统是闭环控制系统。

随着闭环比例阀和伺服比例阀的出现，电液比例控制系统中采用闭环控制的也在增加，这是比例控制技术和伺服控制技术相互融合、发展的结果。实际上，现在的伺服控制与比例控制已越来越难以区分。

1.1.1.2 电液伺服控制系统的组成

图 1-1 所示为典型的液压伺服控制系统组成方块图，亦即工作原理方块图。

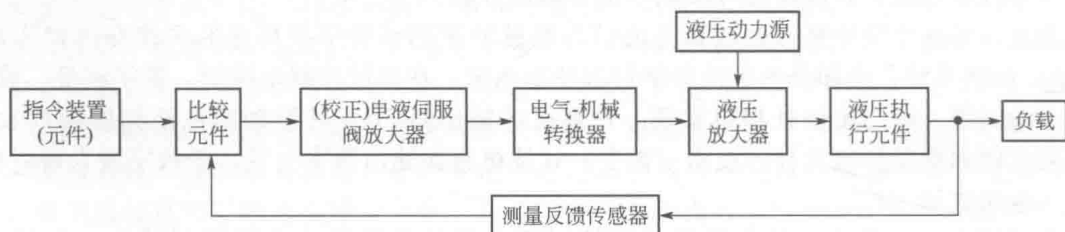


图 1-1 液压伺服控制系统组成方块图

液压伺服控制系统通常由指令装置（元件）、比较元件、电液伺服阀放大器（电气放大器或控制放大器——电气放大元件或装置或器件）、液压动力源、电气-机械转换器、液压放大器（液压前置级放大器、输出级液压放大器——液压主控制阀）、液压执行元件、测量反馈传感器和/或校正元件及负载组成。下面简要介绍各组成元器件作用。

① 指令元件 主要用于产生给定信号或输入信号（统称为指令信号），并将此指令信号施加给系统输入端的元件，所以也可将指令元件或装置称为给定元件、输入元件或装置。通

常采用的指令元件或装置有指令电位器（计）、信号发生器、程序控制器、（数字）计算机等。

② 比较元件 用于接收输入信号与反馈信号并进行比较，产生反映两者差值的偏差信号，并将此偏差信号施加给系统输入端的元件。如差运算电路、计算机软件的差运算等。

③ 测量反馈元件 用于检测被控制量并将其转换成反馈信号，施加在比较元件上与输入信号相比较，从而构成反馈控制。如位移、速度、力（压力或拉力）等各类传感器等。

④ 电气放大元件 用于增大偏差（对电液伺服阀而言，即为其输入信号）信号的振幅和功率，其输出信号一般直接施加给电液伺服阀的电气-机械转换装置，如电液伺服阀放大器等。

⑤ 液压动力源 为液压放大器提供具有一定压力和（足够）流量的液压油液。

⑥ 液压放大元件 亦即液压放大器、电液伺服阀，是起放大器作用的液压元件。常见的喷嘴挡板（式）双（二、两）级电液伺服阀，其液压前置级放大器是由永磁动铁式力矩马达和喷嘴挡板组成的喷嘴挡板阀，输出级液压放大器（液压主控制阀）为四通滑阀。

⑦ 液压执行元件 产生可调节动作，施加于控制对象（负载）上，实现调节任务，如液压缸和液压马达等。

⑧ 控制对象 被控制的元件或其组成（部件、组件、装置或装备等实体单元），亦即负载。

⑨ 校正元件 校正元件又称校正装置。串联在系统前向通路上的称为串联校正装置，并接在反馈回路上的称为并联校正装置。

作者注：关于校正装置更加具体的描述请见第1.2.7节控制系统的校正。

1.1.2 电液伺服阀控制液压缸系统的工作原理及特点

1.1.2.1 电液伺服阀控制液压缸系统的工作原理

图1-2所示为电液伺服阀控制液压缸系统的数控加工中心工作台液压原理。

该电液伺服阀控制液压缸系统由液压动力源、电液伺服阀、电液伺服阀控制（的）液压缸、工作台以及测量液压缸（或工作台）位置（和/或速度）的位置（和/或速度）传感器、指令元件、比较元件、电液伺服阀放大器等组成。

当操作者通过指令元件给出指令信号 u_i 时，指令信号 u_i 与反馈信号 u_f 同时输入比较元件并进行比较后，产生偏差信号 Δu 输出，通过电液伺服阀放大器产生电流信号 i 控制电液伺服阀。控制信号 i 的极性和大小可控制电液伺服阀阀芯的换向和阀口开度，因此可控制电液伺服阀输出液压油液的液流方向和大小（流量及液压能、液压功率），进而使电液伺服阀控制的液压缸将液压能转换成直线机械功，通过工作台（往复）运动输出。

电液伺服阀阀芯换向由控制信号 i 的正负极性决定，进而控制液压缸及工作台往复运动。电液伺服阀阀口开度与控制信号 i 以及偏差信号 Δu 的大小成比例，当液压缸及工作台趋近并达到操作者设定的位置时，指令信号 u_i 与反馈信号 u_f 比较后的偏差信号 Δu 趋近于零并等于零，此时电液伺服阀停止输出液压油液，液压缸及工作台停止于期望位置上。

如果电液伺服阀控制液压缸系统受到外部干扰（图1-2中扰动信号未示出），液压缸及工作台没能停止在期望位置上，则位置偏差信号 Δu 不为零；电液伺服阀仍有输出液压油液，液压缸及工作台始终向期望位置趋近，直至达到期望位置，亦即位置偏差信号 Δu 为零，液压缸及工作台最终停止于期望位置上。

该系统只要液压缸及工作台位置的实际值与期望值之间存在误差值，则指令信号与反馈信号比较后的偏差信号即对其实施控制，亦即以偏差来消除误差，这就是反馈（闭环）控制的工作原理。

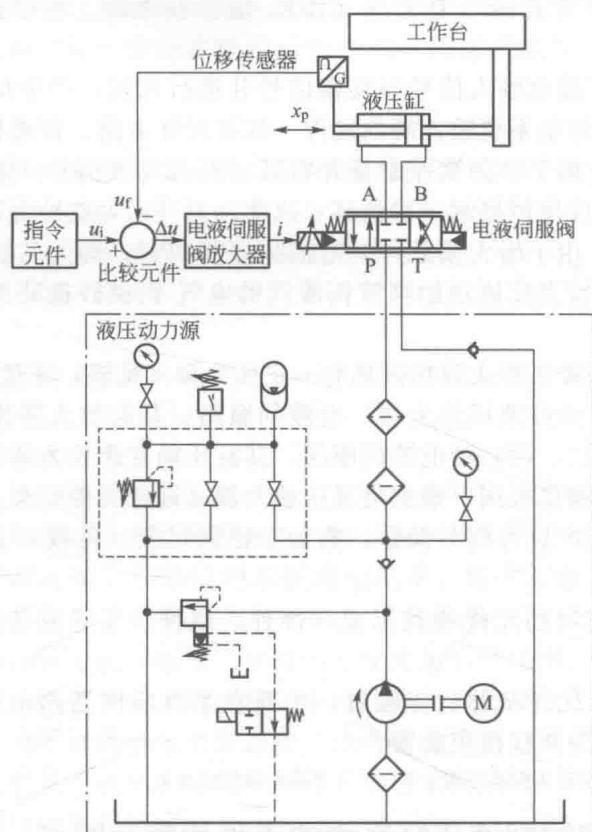


图 1-2 电液伺服阀控制液压缸系统液压原理

需要说明的是图 1-2 所示反馈（闭环）控制系统将用于检测位置的位置传感器安装在液压缸上，当然也可安装在工作台（负载）上，同样可以检测位置并将信号反馈到比较元件上。一般比较元件和控制元件一起集成在控制器中，图 1-2 所示只是为了说明反馈（闭环）控制的工作原理。另外，通过电液伺服阀输出的液压油液（或液压能）全部来源于液动力源，应正确理解“液压放大器”这一概念。还有，指令元件给出的指令信号可以只包含指定某一位置的信息，也可以既包含指定某一位置信息，也包含到达该位置过程中所期望的运动速度信息，但如果没有对液压缸及工作台的运动速度进行检测并将此信号反馈到比较元件上，则对此运动速度的控制只能是开环控制，亦即上述系统仅是电液伺服阀位置控制系统。

作者注：还可参考本书所列参考文献 [65] 第 74 页第 2.2.13 节伺服动力滑台液压控制系统，但其电气和液压回路图及叙述中有多处值得商榷。

参考文献 [65] 在“伺服动力滑台液压控制系统技术特点推广”中指出：

“① 组合机床液动力滑台采用阀控伺服缸控制，能够实现低速运动时高精度定位（可达 0.99mm）。

② 电液伺服阀系统采用“定量泵+蓄能器+电磁溢流阀”恒压能源。可保证液压泵有一定的卸载时间，供油压力在一定的范围内变动。结构简单、能量损失少、效率高。

③ 采用蓄能器形成的动压反馈装置，增大了闭环控制系统的阻尼比，提高了系统的相对稳定性。

④ 滑台的线性滑轨具有承受大负载、低摩擦的能力；液压缸密封圈材料采用四氟乙烯复合材料（PTFE），改变了缸的摩擦特性。

⑤ 该电液伺服控制系统可解决精密组合机床的高精度要求，并可供数控机床的滑台借鉴。”

1.1.2.2 电液伺服阀控制液压缸系统的特点

(1) 电液伺服阀控制液压缸系统的优点

从工作原理上讲，电液伺服阀控制液压缸系统有如下优点。

① 液压元件具有单位功率的质量小,力-质量比大的优点,因此电液伺服阀控制液压缸系统可以传递及控制的功率密度较大。在相同工况下,可以组成结构更加紧凑,体积、质量、惯性更小,加速性更好的传动及控制系统。其对于中、大功率的传动及控制系统而言,这一优点尤为突出。

作者注:有资料介绍,优质的电磁铁能产生的最大推力大致为 $175\text{N}/\text{cm}^2$,使用昂贵的坡莫合金制造的电磁铁所产生的力也不超过 $215.7\text{N}/\text{cm}^2$,而液压缸的最大工作压力可达 $3200\text{N}/\text{cm}^2$,甚至更高。

② 响应速度快,动态特性优异。由于液压元件的力-质量比大,因此电液伺服阀控制液压缸系统加速能力强,能够安全、可靠地带动负载启动、制动与换向。液压弹簧刚度大,其与惯性负载构成的液压系统的固有频率高,使液压系统的频带宽、响应快,非常适用于对动态特性要求较高的场合。

③ 负载刚度大、控制精度高。由于电液伺服阀控制液压缸系统的输出位移受负载变化影响小,即具有较大的速度-负载刚度;液压系统所使用的工作介质——液压油的体积弹性模量大,压缩性和泄漏量很小,因此液压系统的静态刚度很大,组成的闭环控制系统也可以提供更大的动态刚度,控制精度高,定位准确,不易受外界扰动。

④ 易于实现直线运动和变速运动,适合重载直接驱动。电液伺服阀控制液压缸系统很容易实现负载的直线运动和变速运动,而且结构简单,调速范围宽,传动效率高。在相同工况下,液压执行元件更适合直接驱动负载。

⑤ 电液伺服阀控制液压缸系统润滑性好,利于散热和延长使用寿命;利用液压蓄能器易于实现能量存储及压力消振。

⑥ 电液伺服阀控制液压缸系统易于设置压力过载保护装置,如设置一个或多个起安全作用的溢流阀(卸压阀)。

(2) 电液伺服阀控制液压缸系统的缺点

总体而言,电液伺服阀控制液压缸系统技术较为复杂、制造成本较高,其缺点主要表现在以下几个方面。

① 能源供给不方便、噪声较大、效率不高。具有压力的液压油液不宜长距离传输,所以一般需要为电液伺服阀控制液压缸系统配备专用的液压力源。因此液压能源的获得不像电能那样方便,储存也不像(压缩)空气那样容易,且将液压力源的噪声控制在一个较低水平仍存在一定困难。

对于电液伺服阀控制液压缸系统这种阀控式(节流式)控制系统而言,其与泵控式(容积式)控制系统或一些其他型的控制系统比较,能量的转换效率不高。

② 对工作介质的清洁度要求高。电液伺服阀对工作介质的清洁度要求高,对工作介质的污染较为敏感。因此要求系统在设计、制造、使用和维护等各个环境必须保证系统及元件的清洁度指标。

污染的液压油液会使电液伺服阀磨损加剧并降低其性能,甚至会使其堵塞而不能正常工作,这也是电液伺服阀控制液压缸系统发生故障的主要原因。

③ 工作稳定性易受温度影响。环境温度及工作介质温度变化会导致工作介质黏度变化,工作介质黏度变化对液压系统的(动态)性能影响很大。

在电液伺服阀控制液压缸系统中,液压油液的流体体积弹性模量会随温度高低(黏度大小)和空气的混入(量)多少而发生变化,其直接影响控制系统的稳定性。

④ 系统分析、设计较为复杂。在电液伺服阀控制液压缸系统中存在着各类非线性和建模不确定性,因此,系统的分析与设计比较复杂。同时,液压信号(压力、流量等)的传输、检测和处理不及电气信号便利。

参考文献 [72] 指出:“(因为)系统的分析、设计、调整和维护需要高技术,(所以需

要)请专业厂或公司设计、制造和安装调试,(同时还需要)加强维护,使用人员的技术培训。”正因为如此,掌握这门技术的专业公司以及工程技术人员才可能在一定时期内有工作可做。

⑤ 制造精度高,经济性较差。至今电液伺服阀尤其是高品质的电液伺服阀的制造精度高仍然是业内共识,其中的若干项关键技术依然不被大多数液压工作者所熟知和掌握。高精度直接导致了高成本,因此使得构建电液伺服阀控制液压缸系统的投入较大,经济性较差。

⑥ 存在环境污染风险。同其他液压系统一样,如果系统及元件设计、制造、使用和维修不当,则容易造成液压油液外泄漏,污染工作环境。现在报废的液压油液处理也是一个问题,存在着进一步环境污染的风险。

1.1.3 电液伺服控制技术的发展趋势与关键技术

21世纪是一个信息化、网络化、知识化和全球化的时代。参考文献[60]指出:“液压控制技术的发展方向可以概括为集成化、数字化、微型化、超大型化和超重型化发展。”

电液伺服控制技术必将依托机械制造、材料工程、微电子、计算机、数学、力学及控制科学等方面的研究成果,进一步探索新理论、引入新技术,发挥自身优势、弥补现行不足,扬长避短,不断进取。新技术往往都率先在军用装备上,尤其在航空航天领域内应用。

1.1.3.1 电液伺服控制技术的发展趋势

(1) 液压动力源智能化技术

参考文献[77]介绍:目前,飞机液压系统液压动力源中的主泵(EDP)和辅助泵(EMP)多采用恒压变量泵,其供给压力是根据负载的最大值设定的且为恒值。而飞机在整个飞行过程中,经常会经历中断、起飞、起飞爬升、复飞等大流量飞行工作剖面,也有起飞滑跑、巡航、下降等小流量工作需求,并且小流量飞行工作剖面占据飞机完整飞行剖面的90%以上。“由于恒压变量泵只能输出一种压力,飞机液压系统大部分时间处于输出压力过大的状态,存在大量的节流功率损失,导致系统出现发热量大,散热困难等问题”。

作者注:参考文献[77]中上述这段由引号标出的论述是有问题的,查其引用文献也没有此段文字。

智能液压动力源利用负载敏感性原理,反馈系统的工作压力,结合飞机的工作状态对液压动力源进行调节,根据负载工况调整液压动力源的工作状态,输出与负载匹配的工作压力,亦即智能液压动力源可以与负载实现最佳匹配。

总的来说,从原理上智能液压动力源能够完成流量调节、压力控制、功率匹配和负载敏感的(四种)工作方式,还具有故障工作模式和状态检测功能。但是,根据参考文献[77]的介绍,由于其响应慢,“因而目前压力流量匹配性好的飞机智能泵源还没有在飞机上很好地应用”。

(2) 电液伺服控制系统高压化技术

研究表明,高压化是减轻液压系统重量和缩小其体积的最有效途径。进入21世纪,A380、B787实现了5000psi(每平方英寸受到多少磅的压力,1MPa \approx 145psi)成功应用,其中A380采用了5000psi后,实现了减重1.4t,并提高了飞控系统的响应速度。

目前国外已经成功地解决了5000psi,甚至8000psi的高压化技术,而我国还没有完全掌握飞机液压系统的高压化技术。这是因为飞机高压化涉及很多问题,首先需要解决元件及配管的强度和密封问题,保证液压系统具有高的可靠性。

(3) 电液伺服控制系统模块化设计技术

据参考资料介绍,Parker公司在为B787配置液压系统时,提出了一种模块化设计技术,即将飞机上的某液压系统中的60个液压元件,包括辅助泵(EMP)、过滤器、配管等预先安装在一个特定的安装支架上,完成功能测试和可靠性测试后,将该模块化部分安装在