

YEYA SIFU BILI KONGZHI
JI PLC YINGYONG

液压伺服比例控制 及 PLC 应用



第二版

黄志坚 编著



PLC



化学工业出版社

YEYA SIFU BILI KONGZHI
JI PLC YINGYONG

液压伺服比例控制 及 PLC 应用



第二版

黄志坚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合大量工程应用实例,系统介绍了液压伺服与比例系统 PLC 控制技术。主要包括:液压伺服与比例元件及系统的结构原理、控制技术和应用(涵盖电液伺服阀及控制器、电液比例控制阀、电液数字元件与智能元件、变量泵电液控制技术);PLC 基本原理及应用(PLC 结构原理与编程、三菱和西门子新型 PLC 控制应用);液压伺服与比例-PLC 控制系统(压力控制系统、速度控制系统、位置控制系统、同步控制系统、机器人控制系统、能源监控系统等),以及液压伺服与比例-PLC 控制系统中的传感器、人机界面和现场总线。

本书取材新颖、技术先进实用、案例丰富,涉及液压与 PLC 两个专业和多个应用领域。本书可供液压与 PLC 设计开发、设备使用与维修人员使用,也可作为高校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液压伺服比例控制及 PLC 应用/黄志坚编著. —2 版.

北京:化学工业出版社,2018.10

ISBN 978-7-122-32923-3

I. ①液… II. ①黄… III. ①PLC 技术-应用-电液
伺服系统-比例控制-研究 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 199153 号

责任编辑:张兴辉

责任校对:边涛

文字编辑:陈喆

装帧设计:王明

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:三河市延风印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 572 千字 2019 年 1 月北京第 2 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:98.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

液压控制系统主要包括电液伺服控制系统和电液比例控制系统,这类控制系统具有容量大、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、重型机械、工程机械、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。与一般液压系统相比,液压伺服/比例控制系统结构复杂、与多种专业技术相关,对工程技术人员的要求更高。

PLC 控制的液压系统克服了采用继电器控制系统必须是手工接线、安装、改动所需要花费大量时间及人力和物力的缺点,也克服了继电器控制系统的可靠性差、控制不方便、响应速度慢等不足。将 PLC 应用到液压系统,能较好地满足控制系统的要求,并且测试精确,运行高速、可靠,提高了生产效率,延长了设备使用寿命。目前,在大多数情况下,液压系统均采用 PLC 控制。

本书结合大量实例,系统介绍了液压伺服/比例系统 PLC 控制技术。

本书自 2014 年出版以来,受到读者的欢迎。这些年,我国正积极实施“中国制造 2025”规划,液压伺服/比例系统 PLC 控制技术正在向着智能化、网络化方向迈进。第二版根据技术的进步,主要增加了数字元件、智能元件、新型 PLC、机器人液压控制等内容。

本书第 1~4 章介绍液压伺服元件、比例元件及数字元件的结构原理和应用。第 5 章介绍 PLC 基本原理及应用注意事项。第 6 章介绍 PLC-液压伺服/比例控制系统,包括压力控制系统、速度控制系统、位置控制系统、同步控制系统、能源监控系统等,这是本书的中心内容。第 7~9 章分别介绍液压伺服/比例-PLC 控制系统中的传感器、人机界面和现场总线。

本书取材新颖、技术先进实用、案例丰富,涉及液压与 PLC 两个专业和多个应用领域。在实际应用中,设备电、液两部分既相对独立又密切相关,一些问题的处理需要电、液两方面专业人员的合作,只有同时掌握两方面的专业知识,相互间才能顺畅地沟通与协作,才能顺利地解决实际问题。本书将液压伺服/比例技术与 PLC 技术的专业知识结合起来,形成了一个较独立完整的电-液控制知识体系。这样,既有利于液压专业人员读者扩充 PLC 专业知识,也有利于 PLC 专业人员读者扩充液压专业知识。在控制技术飞速发展、机电技术高度渗透的今天,这种探索和处理的积极意义是显而易见的。

本书的读者对象主要是液压与 PLC 设计开发、使用维修人员,大学及职业技术学院相关专业师生。

由于水平有限,不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编著者

第 1 章 电液伺服控制技术及应用 / 1

1.1 电液伺服阀 / 1

- 1.1.1 工作原理及组成 / 1
- 1.1.2 电液伺服阀的分类 / 5
- 1.1.3 典型结构 / 5
- 1.1.4 主要特性及性能参数 / 9
- 1.1.5 伺服阀的使用与维修 / 13

1.2 电液伺服控制器 / 14

- 1.2.1 电液伺服控制器概述 / 14
- 1.2.2 电液伺服阀驱动电路 / 15
- 1.2.3 电液伺服阀电流显示电路 / 16
- 1.2.4 传感器调理电路 / 16
- 1.2.5 基于 DSP 的电液伺服驱动器 / 16
- 1.2.6 电液伺服系统嵌入式数字控制器 / 22

1.3 伺服液压缸及其伺服控制系统 / 25

- 1.3.1 伺服液压缸概述 / 25
- 1.3.2 闭环控制数字液压缸及其控制系统 / 26
- 1.3.3 机器人液压伺服系统 / 29
- 1.3.4 数字泵控缸位置伺服系统 / 34

1.4 液压马达速度伺服系统及应用 / 35

- 1.4.1 液压马达速度伺服系统的种类、原理及特点 / 35
- 1.4.2 电液伺服马达控制系统的应用 / 39

第 2 章 电液比例控制阀及应用 / 42

2.1 电液比例控制阀概述 / 42

- 2.1.1 比例控制原理 / 42
- 2.1.2 比例电磁铁 / 43
- 2.1.3 液压放大器及检测反馈机构 / 45
- 2.1.4 电液比例阀的分类 / 46

2.2 电液比例压力阀及应用 / 46

- 2.2.1 电液比例压力阀概述 / 46
- 2.2.2 电液比例溢流阀在发动机上的应用 / 48
- 2.2.3 船用舵机水动力负载模拟装置的比例控制系统 / 50
- 2.2.4 电液比例减压阀用于挖掘机液压泵流量电控调节 / 52

2.3 电液比例流量阀及应用 / 54

- 2.3.1 电液比例流量阀概述 / 54
- 2.3.2 液压同步连续升降的控制 / 55
- 2.3.3 液压顶升同步控制系统 / 57

2.4 比例压力-流量复合阀 (P-Q 阀) 及应用 / 59

- 2.4.1 P-Q 阀的稳态控制特性 / 59
- 2.4.2 P-Q 阀构成的液压系统 / 60
- 2.4.3 P-Q 阀的控制 / 61

2.5 电液比例方向阀及应用 / 61

- 2.5.1 电液比例方向阀概述 / 61
- 2.5.2 挤压机液压定针比例控制系统 / 62
- 2.5.3 液压数字控制器 (HNC) 在液压同步系统中应用 / 66
- 2.5.4 带恒压模块的比例同步控制系统 / 67
- 2.5.5 比例方向控制回路中的压力补偿 / 69
- 2.5.6 比例多路换向阀 / 71

2.6 伺服比例阀及应用 / 75

- 2.6.1 伺服比例阀概述 / 75
- 2.6.2 伺服比例阀在水电站的应用 / 77
- 2.6.3 伺服比例阀在铜带轧机厚度控制中的应用 / 78
- 2.6.4 D633 系列直动伺服比例控制阀 / 80

2.7 比例控制放大器及控制系统 / 83

- 2.7.1 比例控制放大器概述 / 83
- 2.7.2 比例放大器典型产品 / 86
- 2.7.3 比例控制放大器的正确使用 / 90
- 2.7.4 工程机械用新型电液比例阀放大器 / 91
- 2.7.5 基于 PROFIBUS-DP 总线的数字电液比例控制器 / 95

2.8 比例阀故障分析与排除 / 97

- 2.8.1 比例电磁铁故障 / 97
- 2.8.2 比例压力阀故障分析与排除 / 97
- 2.8.3 比例流量阀的故障分析与排除 / 98

第 3 章 电液数字元件与智能元件及应用 / 99

3.1 数字液压元件及应用 / 99

- 3.1.1 数字液压阀现状与发展历程 / 99
- 3.1.2 数字阀控制技术 / 104
- 3.1.3 可编程阀控单元 / 105
- 3.1.4 数字液压阀发展展望 / 106
- 3.1.5 基于数字流量阀的负载口独立控制 / 107
- 3.1.6 电液比例数字控制 / 110
- 3.1.7 电液伺服数字控制 / 114
- 3.1.8 2D 高频数字阀在电液激振器的应用 / 115
- 3.1.9 内循环数字液压缸 / 118

3.2 智能液压元件及应用 / 120

- 3.2.1 智能液压元件的特点 / 120
- 3.2.2 智能元件应用的效益 / 122
- 3.2.3 DSV 数字智能阀 / 123

- 3.2.4 新型与智能型伺服阀 / 124
- 3.2.5 基于双阀芯控制技术的智能液压元件 / 128

第 4 章 变量泵电液控制技术 / 131

4.1 变量泵控制方式及其应用 / 131

- 4.1.1 压力切断控制 / 131
- 4.1.2 功率控制 / 131
- 4.1.3 排量控制 / 132
- 4.1.4 LS (负载敏感) 控制 / 133
- 4.1.5 基本控制方式的组合及其应用 / 134

4.2 伺服变量泵及其应用 / 135

- 4.2.1 250CKZBB 电液伺服变量泵 / 135
- 4.2.2 A4V 伺服变量泵 / 136
- 4.2.3 伺服变量泵在一体化电动静液作动器中的应用 / 137
- 4.2.4 变量泵在注塑机液压伺服系统中的应用 / 139

4.3 比例变量泵及其应用 / 140

- 4.3.1 电液比例负载敏感控制变量径向柱塞泵 / 140
- 4.3.2 多变量泵比例与恒功率控制及其在盾构机的应用 / 143
- 4.3.3 电液比例变量泵控定量马达 / 146
- 4.3.4 闭环控制轴向柱塞泵 / 147
- 4.3.5 比例变量泵在注塑机上的应用 / 148
- 4.3.6 钻机液压系统中的电控比例变量泵 / 151
- 4.3.7 TBM 刀盘电液驱动系统 / 153
- 4.3.8 比例泵在 RH 精炼炉的应用 / 155

4.4 液压泵变频容积调速技术及应用 / 157

- 4.4.1 交流电动机变频调速原理 / 157
- 4.4.2 变频技术与液压技术的结合及其优点 / 158
- 4.4.3 液压系统的变频容积调速 / 159
- 4.4.4 电梯液压变频调速系统 / 163
- 4.4.5 绞车液压变频调速系统 / 165
- 4.4.6 抽油机二次调节静液传动-变频回馈系统 / 166

4.5 智能液压泵及应用 / 169

- 4.5.1 军用机载智能泵源 / 169
- 4.5.2 大型客机液压泵系统 / 173

第 5 章 可编程控制器及应用 / 181

5.1 PLC 的结构与工作原理 / 181

- 5.1.1 可编程控制器的结构形式 / 181
- 5.1.2 PLC 的工作过程与等效电路 / 181
- 5.1.3 PLC 的组成及指标 / 181
- 5.1.4 PLC 控制系统 / 183

5.2 PLC 的编程语言 / 183

5.2.1 逻辑部件 / 183

5.2.2 编程语言 / 184

5.3 新型 PLC / 185

5.3.1 三菱 FX3U/FX5U 系列 PLC / 185

5.3.2 西门子 S7-200SMART 型 PLC / 191

5.4 提高 PLC 控制系统可靠性的措施 / 194

5.4.1 适合的工作环境 / 194

5.4.2 合理的安装与布线 / 195

5.4.3 正确的接地与必需的安全保护环节 / 196

5.4.4 必要的软件措施 / 196

5.4.5 采用冗余系统或热备用系统 / 198

5.5 PLC 控制系统的维护和故障诊断 / 199

5.5.1 PLC 控制系统的维护 / 199

5.5.2 根据 LED 指示灯诊断 PLC 故障 / 199

5.5.3 PLC 系统故障检查与处理 / 200

第 6 章 PLC-液压伺服/比例系统应用 / 202

6.1 PLC 在液压系统压力控制中的应用 / 202

6.1.1 PLC 控制的四柱式万能液压机 / 202

6.1.2 MPS 型中速磨煤机自动加载系统 / 205

6.1.3 海洋石油钻井平台称重系统 / 207

6.2 PLC 在液压系统速度控制中的应用 / 211

6.2.1 磨蚀系数实验台电液比例速度控制系统 / 211

6.2.2 PLC 控制的机械手液压系统 / 214

6.2.3 PLC 控制的电液数字伺服系统 / 216

6.3 PLC 在液压系统位置控制中的应用 / 219

6.3.1 电液比例位置控制数字 PID 系统 / 219

6.3.2 基于 PLC 的油罐清洗机器人控制系统 / 221

6.3.3 基于 OPC Server 的液压伺服精确定位系统 / 224

6.3.4 装胎机液压伺服-PLC 控制系统 / 227

6.4 PLC 在液压同步控制中的应用 / 231

6.4.1 爬模机液压比例同步控制 / 231

6.4.2 桥梁施工中的液压同步顶推顶升技术 / 234

6.4.3 基于 PROFIBUS 的 PLC 分布式液压同步系统 / 238

6.5 PLC 在泵站监控中的应用 / 244

6.5.1 PLC 在液压实验台能源系统中的应用 / 244

6.5.2 大型定量泵液压油源有级变量节能系统 / 245

6.5.3 PROFIBUS 现场总线在液压泵站控制中的应用 / 247

第 7 章 液压控制系统中的传感器及应用 / 250

7.1 压力传感器及应用 / 250

7.1.1 压力传感器概述 / 250

7.1.2 压力传感器的应用 / 252

7.2 流量传感器及应用 / 254

7.2.1 流量传感器概述 / 254

7.2.2 超声波流量监测技术在车辆液压监测中的应用 / 256

7.2.3 LUGB-II 涡街流量传感器 / 258

7.3 温度传感器及应用 / 260

7.3.1 温度传感器概述 / 260

7.3.2 DS18B20 型温度传感器在液压温度测控中的应用 / 262

7.3.3 高响应热电偶温度传感器及应用 / 264

7.4 位移传感器及应用 / 265

7.4.1 位移传感器概述 / 265

7.4.2 磁电阻 (MR) 传感器及应用 / 267

7.4.3 磁致伸缩位移传感器及应用 / 269

7.4.4 结晶体振动系统位移控制故障分析与治理 / 270

7.5 污染传感器及应用 / 272

7.5.1 光散射法在液压油污染检测中的应用 / 272

7.5.2 光电传感器应用于液压油污染度监测 / 275

7.6 液压系统传感器综合应用 / 278

7.6.1 工程机械液压系统三位一体传感器 / 278

7.6.2 大型工程机械液压油污染与温度在线监测 / 280

7.6.3 传感器在新型数字化压力机的应用 / 282

7.6.4 液压设备故障诊断中的多传感器信息融合技术 / 283

7.6.5 基于 IEEE1451_2 标准的智能液压传感器模块 / 286

第 8 章 液压控制系统中的触摸屏及应用 / 291

8.1 触摸屏技术概述 / 291

8.1.1 触摸屏 / 291

8.1.2 触摸屏工作原理及应用 / 291

8.2 触摸屏技术在液压控制中的应用 / 293

8.2.1 触摸屏-PLC 在液压摆式剪板机中的应用 / 294

8.2.2 触摸屏-PLC 在恒力压力机电液伺服控制中的应用 / 297

8.2.3 触摸屏-PLC 在液压弯管机控制中的应用 / 298

8.2.4 触摸屏-PLC 在液压同步顶升控制中的应用 / 301

8.2.5 触摸屏-PLC 在气-液压实验台控制中的应用 / 304

8.2.6 触摸屏-PLC 在液压缸综合实验台控制中的应用 / 307

第 9 章 现场总线在液压控制中的应用 / 313

9.1 现场总线概论 / 313

- 9.1.1 现场总线的概念 / 313
- 9.1.2 发展历史 / 313
- 9.1.3 技术特点 / 314
- 9.1.4 技术优点 / 314
- 9.1.5 网络拓扑结构 / 315

9.2 CAN 总线在液压控制中的应用 / 318

- 9.2.1 CAN 总线 / 318
- 9.2.2 CAN 总线在平地机液压控制系统中的应用 / 319
- 9.2.3 基于 CAN 总线的运梁车分布式控制系统 / 322
- 9.2.4 CAN 在拉深筋实验台电液控制系统中的应用 / 325

9.3 PROFIBUS 现场总线在液压控制中的应用 / 328

- 9.3.1 PROFIBUS 现场总线 / 328
- 9.3.2 PROFIBUS 总线在电液伺服控制系统中的应用 / 329
- 9.3.3 PROFIBUS 现场总线在海洋平台桩腿液压升降控制中的应用 / 333

9.4 CC-Link 现场总线在液压控制中的应用 / 335

- 9.4.1 CC-Link 现场总线 / 336
- 9.4.2 CC-Link 在盾构推进液压系统控制中的应用 / 337

9.5 PXI 总线在液压控制中的应用 / 341

- 9.5.1 PXI 总线 / 341
- 9.5.2 PXI 总线在飞机舵机泵站测试中的应用 / 343
- 9.5.3 PXI 总线在车辆液压测试中的应用 / 346

9.6 MODBUS 总线在液压控制中的应用 / 349

- 9.6.1 MODBUS 总线 / 349
- 9.6.2 MODBUS 总线在液压变频控制中的应用 (1) / 352
- 9.6.3 MODBUS 总线在液压变频控制中的应用 (2) / 355

参考文献 / 359

第 1 章 电液伺服控制技术的应用

电液伺服系统是一种采用电液伺服机构，根据液压传动原理建立起来的自动控制系统。在这种系统中，执行元件的运动随着控制信号的改变而改变。

1.1 电液伺服阀

伺服阀通过改变输入信号，连续的、成比例地控制液压系统的流量或压力。电液伺服阀输入信号功率很小（通常仅有几十毫瓦），功率放大系数高；能够对输出流量和压力进行连续双向控制。其突出特点是：体积小、结构紧凑、直线性好、动态响应好、死区小、精度高，符合高精度伺服控制系统的要求。电液伺服阀是现代电液控制系统中的关键部件，它能用于诸如位置控制、速度控制、加速度控制、力控制等各方面。因此，伺服阀在各种工业自动控制系统中得到了越来越多的应用。

1.1.1 工作原理及组成

(1) 基本组成与控制机理

电液伺服阀是一种自动控制阀，它既是电液转换组件，又是功率放大组件，其功用是将小功率的模拟量电信号输入转换为随电信号大小和极性变化且快速响应的大功率液压能〔流量（或）和压力〕输出，从而实现对液压执行器位移（或转速）、速度（或角速度）、加速度（或角加速度）和力（或转矩）的控制。电液伺服阀通常是由电气-机械转换器、液压放大器（先导级阀和功率级主阀）和检测反馈机构组成的（见图 1-1）。

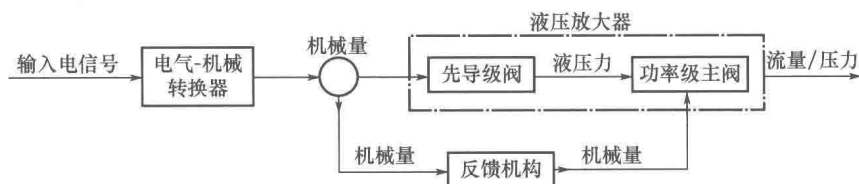


图 1-1 电液伺服阀的组成

(2) 电气-机械转换器

电气-机械转换器包括电流-力转换和力-位移转换两个功能。

典型的电气-机械转换器为力马达或力矩马达。力马达是一种直线运动电气-机械转换器，而力矩马达则是旋转运动的电气-机械转换器。力马达和力矩马达的功用是将输入的控制电流信号转换为与电流成比例的输出力或力矩，再经弹性组件（弹簧管、弹簧片等）转换为驱动先导级阀运动的直线位移或转角，使先导级阀定位、回零。通常力马达的输入电流为 150~300mA，输出力为 3~5N。力矩马达的输入电流为 10~30mA，输出力矩为 0.02~0.06N·m。

伺服阀中所用的电气-机械转换器有动圈式和动铁式两种结构。

① 动圈式电气-机械转换器 动圈式电气-机械转换器产生运动的部分是控制线圈，故称为“动圈式”。输入电流信号后，产生相应大小和方向的力信号，再通过反馈弹簧（复位弹簧）转化为相应的位移量输出，故简称为动圈式“力马达”（平动式）或“力矩马达”（转动式）。动圈式力马达和力矩马达的工作原理是位于磁场中的载流导体（即动圈）受力作用。

动圈式力马达的结构原理如图 1-2 所示，永久磁铁 1 及内、外导磁体 2、3 构成闭合磁路，在环状工作气隙中安放可移动的控制线圈 4，它通常绕制在线圈架上，以提高结构强度，并采用弹簧 5 悬挂。当线圈中通入控制电流时，按照载流导线在磁场中受力的原理移动并带动阀芯（图中未画出）移动，此力的大小与磁场强度、导线长度及电流大小成比例，力的方向由电流方向及固定磁通方向按电磁学中的左手定则确定。图 1-3 为动圈式力矩马达，与力马达所不同的是采用扭力弹簧或轴承加盘圈扭力弹簧悬挂控制线圈。当线圈中通入控制电流时，按照载流导线在磁场中受力的原理使转子转动。

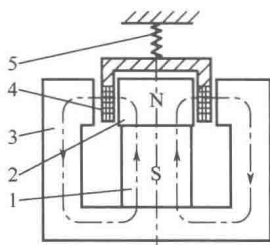


图 1-2 动圈式力马达

1—永久磁铁；2—内导磁体；3—外导磁体；
4—线圈；5—弹簧

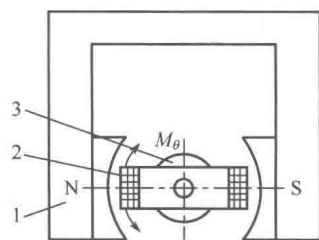


图 1-3 动圈式力矩马达

1—永久磁铁；2—线圈；3—转子

磁场的励磁方式有永磁式和电磁式两种，工程上多采用永磁式结构，其尺寸紧凑。

动圈式力马达和力矩马达的控制电流较大（可达几百毫安至几安培），输出行程也较大 [$\pm(2\sim4)\text{mm}$]，而且稳态特性线性度较好，滞环小，故应用较多。但其体积较大，且由于动圈受油的阻尼较大，其动态响应不如动铁式力矩马达快。多用于控制工业伺服阀，也有用于控制高频伺服阀的特殊结构动圈式力马达。

② 动铁式力矩马达 动铁式力矩马达输入为电信号，输出为力矩。图 1-4 为动铁式力矩马达的结构原理。

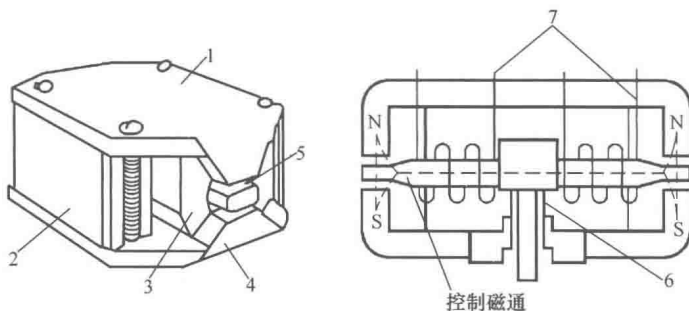


图 1-4 动铁式力矩马达的结构原理

1—上导磁体；2—永久磁铁；3—线圈；4—下导磁体；5—衔铁；6—弹簧管；7—线圈引出线

它由左右两块永久磁铁、上下两块导磁体 1 及 4、带扭轴（弹簧管）6 的衔铁 5 及套在线圈上的两个控制线圈 3 组成，衔铁悬挂在弹簧管上，可以绕弹簧管在 4 个气隙中摆动。左右两块永久磁铁使上下导磁体的气隙中产生相同方向的极化磁场。没有输入信号时，衔铁与

上下导磁体之间的4个气隙距离相等,衔铁受到的电磁力相互抵消而使衔铁处于中间平衡状态。当输入控制电流时,产生相应的控制磁场,它在上下气隙中的方向相反,因此打破了原有的平衡,使衔铁产生与控制电流大小和方向相对应的转矩,并且使衔铁转动,直至电磁力矩与负载力矩和弹簧反力矩等相平衡。但转角是很小的,可以看成是微小的直线位移。

动铁式力矩马达输出力矩较小,适合控制喷嘴挡板之类的先导级阀。其优点是自振频率较高,动态响应快,功率、重量比较大,抗加速度零漂性好。缺点是:限于气隙的形式,其转角和工作行程很小(通常小于0.2mm),材料性能及制造精度要求高,价格昂贵;此外,它的控制电流较小(仅几十毫安),故抗干扰能力较差。

(3) 先导级阀

先导级阀又称前置级,用于接受小功率的电气-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功率级主阀,犹如一对称四通阀控制的液压缸;主阀多为滑阀,它将先导级阀的液压力转换为流量或压力输出。电液伺服阀先导级主要有喷嘴挡板式和射流管式两种。

① 喷嘴挡板式先导级阀 它的结构及组成原理如图1-5所示[图1-5(a)为单喷嘴,图1-5(b)为双喷嘴],它是通过改变喷嘴与挡板之间的相对位移来改变液流通路开度的大小以实现控制的,具有体积小、运动部件惯量小、无摩擦、所需驱动力小、灵敏度高优点,特别适用于小信号工作,因此常用作二级伺服阀的前置放大级。其缺点主要是中位泄漏量大,负载刚性差,输出流量小,节流孔及喷嘴的间隙小(0.02~0.06mm),易堵塞,抗污染能力差。

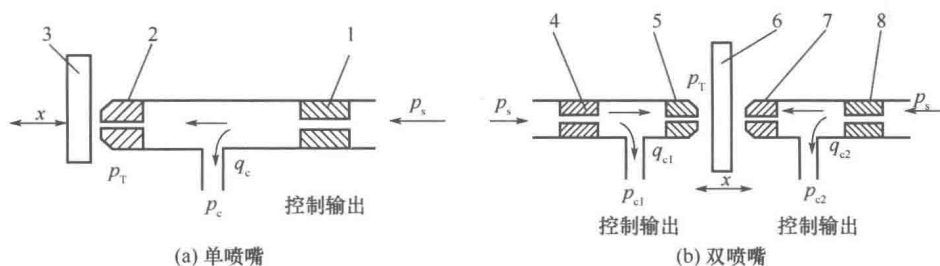


图 1-5 喷嘴挡板式先导级阀

1,4,8—固定节流孔;2,5,7—喷嘴;3,6—挡板; p_s —输入压力;

p_T —喷嘴处油液压力; p_c, q_c —控制输出压力、流量

② 射流管式先导级阀 如图1-6所示,射流管阀由射流管3、接收板2和液压缸1组成,射流管3由垂直于图面的轴c支撑并可绕轴左右摆动一个不大的角度。接收板上的两个小孔a和b分别和液压缸1的两腔相通。当射流管3处于两个接受孔道a、b的中间位置时,两个收受孔道a、b内的油液的压力相等,液压缸1不动;如有输入信号使射流管3向左偏转一个很小的角度时,两个接收孔道a、b内的压力不相等,液压缸1左腔的压力大于右腔,液压缸1向右移动,反之亦然。

射流管的优点是结构简单、加工精度低、抗污染能力强。缺点是惯性大;响应速度低、功率损耗大。因此这种阀只适用于低压及功率较小的伺服系统。

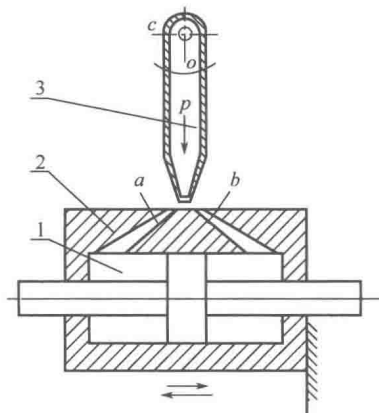


图 1-6 射流管式先导级阀

1—液压缸;2—接收板;3—射流管

(4) 功率级主阀（滑阀）

电液伺服阀中的功率级主阀是靠节流原理进行工作，即借助阀芯与阀体（套）的相对运动改变节流口通流面积的大小，对液体流量或压力进行控制。滑阀的结构及特点如下。

① 控制边数 根据控制边数的不同，滑阀有单边控制、双边控制和四边控制三种类型（见图 1-7）。单边控制滑阀仅有一个控制边，控制边的开口量 x 控制了执行器（此处为单杆液压缸）中的压力和流量，从而改变了缸的运动速度和方向。双边控制滑阀有两个控制边，压力油一路进入单杆液压缸有杆腔，另一路经滑阀控制边 x_1 的开口和无杆腔相通，并经控制边 x_2 的开口流回油箱；当滑阀移动时， x_1 增大， x_2 减小，或相反，从而控制液压缸无杆腔的回油阻力，故改变了液压缸的运动速度和方向。四边控制滑阀有 4 个控制边， x_1 和 x_2 是用于控制压力油进入双杆液压缸的左、右腔， x_3 和 x_4 用于控制左、右腔通向油箱；当滑阀移动时， x_3 和 x_4 增大， x_2 和 x_3 减小，或相反，这样控制了进入液压缸左、右腔的油液压力和流量，从而控制了液压缸的运动速度和方向。

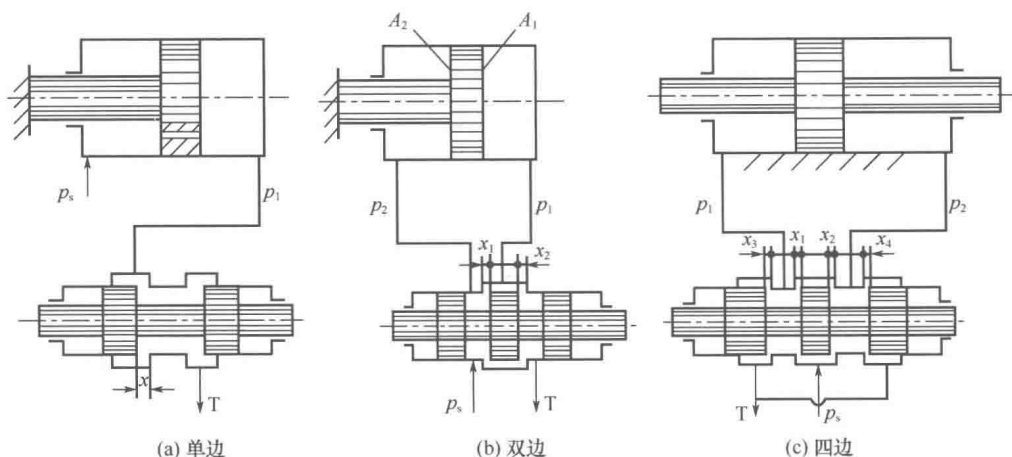


图 1-7 单边、双边和四边控制滑阀

单边、双边和四边控制滑阀的控制作用相同。单边和双边滑阀用于控制单杆液压缸；四边控制滑阀既可以控制双杆缸，也可以控制单杆缸。四边控制滑阀的控制质量好，双边控制滑阀居中，单边控制滑阀最差。但是，单边滑阀无关键性的轴向尺寸，双边滑阀有一个关键性的轴向尺寸，而四边滑阀有 3 个关键性的轴向尺寸，所以单边滑阀易于制造、成本较低，而四边滑阀制造困难、成本较高。通常，单边和双边滑阀用于一般控制精度的液压系统，而四边滑阀则用于控制精度及稳定性要求较高的液压系统。

② 零位开口形式 滑阀在零位（平衡位置）时，有正开口、零开口和负开口三种开口形式（见图 1-8）。正开口（又称负重叠）的滑阀，阀芯的凸肩宽度（也称凸肩宽，下同） t 小于阀套（体）的阀口宽度 h ；零开口（又称零重叠）的滑阀，阀芯的凸肩宽度 t 与阀套（体）的阀口宽度 h 相等；负开口（又称正重叠）的滑阀，阀芯的凸肩宽度 t 大于阀套（体）的阀口宽度 h 。滑阀的开口形式对其零位附近（零区）的特性具有很大影响，零开口滑阀的特性较好，应用最多，但加工比较困难，价格昂贵。

③ 通路数、凸肩数与阀口形状 按通路数，滑阀有二通、三通和四通等几种。二通滑阀（单边阀）[见图 1-7(a)] 只有一个可变节流口（可变液阻），使用时必须和一个固定节流口配合，才能控制一腔的压力，用来控制差动液压缸。三通滑阀 [见图 1-7(b)] 只有一个控制口，故只能用来控制差动液压缸，为实现液压缸反向运动，需在有杆腔设置固定偏压（可由供油压力产生）。四通滑阀 [见图 1-7(c)] 有 4 个控制口，故能控制各种液压执行器。

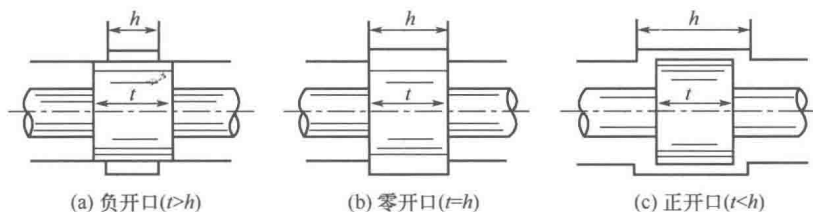


图 1-8 滑阀的零位开口形式

阀芯上的凸肩数与阀的通路数、供油及回油密封、控制边的布置等因素有关。二通阀一般为 2 个凸肩，三通阀为 2 个或 3 个凸肩，四通阀为 3 个或 4 个凸肩。三凸肩滑阀为最常用的结构形式。凸肩数过多将加大阀的结构复杂程度、长度和摩擦力，影响阀的成本和性能。

滑阀的阀口形状有矩形、圆形等多种形式，矩形阀口又有全周开口和部分开口之分。矩形阀口的开口面积与阀芯位移成正比，具有线性流量增益，故应用较多。

(5) 检测反馈机构

设在阀内部的检测反馈机构将先导阀或主阀控制口的压力、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的输入端，实现输入输出的比较，解决功率级主阀的定位问题，并获得所需的伺服阀压力-流量性能。常用的反馈形式有机械反馈（位移反馈、力反馈）、液压反馈（压力反馈、微分压力反馈等）和电气反馈。

1.1.2 电液伺服阀的分类

电液伺服阀的分类见图 1-9。



图 1-9 电液伺服阀的分类

1.1.3 典型结构

(1) 动圈式力马达型单级电液伺服阀

单级电液伺服阀没有先导级阀，由电气-机械转换器和一级液压阀构成，其结构和原理均较简单。

图 1-10(a) 所示为动圈式力马达型单级电液伺服阀的结构图，它由力马达和带液动力补偿结构的一级滑阀两部分组成。永久磁铁 1 产生一固定磁场，可动线圈 2 通电后在磁场内产生力，从而驱动滑阀阀芯 4 运动，并由右端弹簧 8 作力反馈。阀左端的位移传感器 5，可提供控制所需的补偿信号。因阀芯带有液动力补偿结构，故控制流量较大，响应快。额定流量为 90~100L/min 的阀在±40%输入幅值条件下，对应相位滞后 90°时，频响为 200Hz，常用于冶金机械的高速大流量控制。

动圈式力马达型单级电液伺服阀的原理方块图如图 1-10(b) 所示。

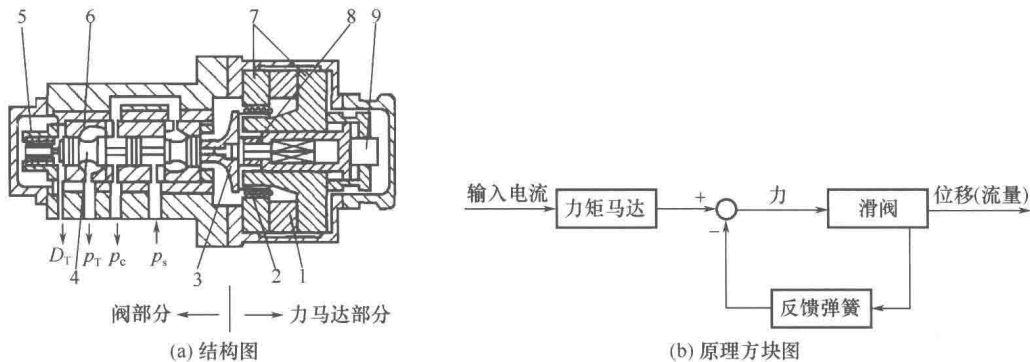


图 1-10 动圈式力马达型单级电液伺服阀

1—永久磁铁；2—可动线圈；3—线圈架；4—阀芯（滑阀）；5—位移传感器；
6—阀套；7—导磁体；8—弹簧；9—零位调节螺钉

(2) 喷嘴挡板式力反馈型两级电液伺服阀

两级电液伺服阀多用于控制流量较大（80~250L/min）的场合。两级电液伺服阀由电气-机械转换器、先导级阀和功率级主阀组成，种类较多。喷嘴挡板式力反馈电液伺服阀是使用量大、适用面广的两级电液伺服阀。

图 1-11(a) 所示为电液伺服阀结构，它由力矩马达、喷嘴挡板式液压前置放大级和四边滑阀功率放大级等三部分组成。衔铁 3 与挡板 5 连接在一起，由固定在阀体 11 上的弹簧管 10 支撑着。挡板 5 下端为一球头，嵌放在滑阀 9 的凹槽内，永久磁铁 1 和导磁体 2、4 形成一个固定磁场，当线圈 12 中没有电流通过时，导磁体 2、4 和衔铁 3 间 4 个气隙中的磁通都是 Φ_g ，且方向相同，衔铁 3 处于中间位置。当有控制电流通入线圈 12 时，一组对角方向的气隙中的磁通增加，另一组对角方向的气隙中的磁通减小，于是衔铁 3 就在磁力作用下克服弹簧管 10 的弹性反作用力而偏转一角度，并偏转到磁力所产生的转矩与弹性反作用力所产生的反转矩平衡时为止。同时，挡板 5 因随衔铁 3 偏转而发生挠曲，改变了它与两个喷嘴 6 间的间隙，一个间隙减小，另一个间隙加大。

通入伺服阀的压力油经过滤器 8、两个对称的节流孔 7 和左右喷嘴 6 流出，通向回油。当挡板 5 挠曲，出现上述喷嘴-挡板的两个间隙不相等的情况时，两喷嘴后侧的压力就不相等，它们作用在滑阀 9 的左、右端面上，使滑阀 9 向相应方向移动一段距离，压力油就通过滑阀 9 上的一个阀口输向液压执行机构，由液压执行机构回来的油则经滑阀 9 上的另一个阀口通向回油。滑阀 9 移动时，挡板 5 下端球头跟着移动。在衔铁挡板组件上产生了一个转矩，使衔铁 3 向相应方向偏转，并使挡板 5 在两喷嘴 6 间的偏移量减少，这就是反馈作用。反馈作用的后果是使滑阀 9 两端的压差减小。当滑阀 9 上的液压作用力和挡板 5 下端球头因移动而产生的弹性反作用力达到平衡时，滑阀 9 便不再移动，并一直使其阀口保持在这一开度上。

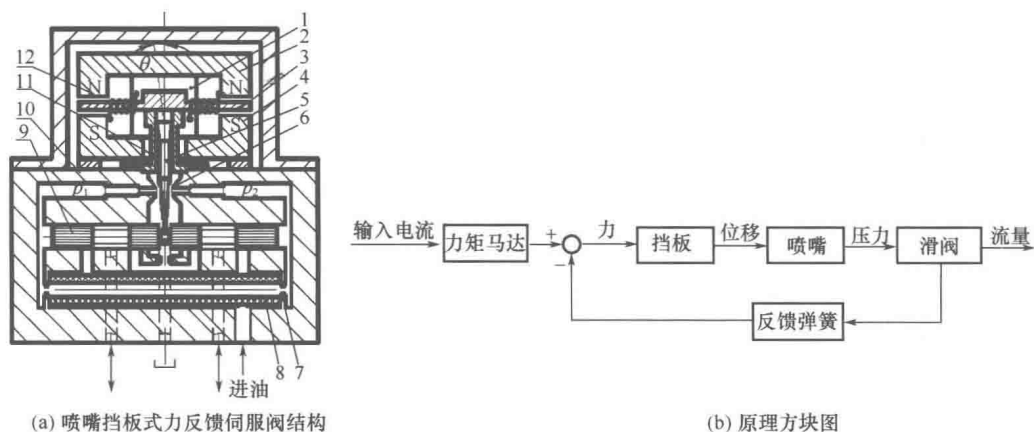


图 1-11 喷嘴挡板式力反馈型两级电液伺服阀

1—永久磁铁；2、4—导磁体；3—衔铁；5—挡板；6—喷嘴；7—固定节流孔；
8—过滤油器；9—滑阀；10—弹簧管；11—阀体；12—线圈

通入线圈 12 的控制电流越大，使衔铁 3 偏转的转矩、挡板 5 挠曲变形、滑阀 9 两端的压差以及滑阀 9 的偏移量就越大，伺服阀输出的流量也越大。由于滑阀 9 的位移、喷嘴 6 与挡板 5 之间的间隙、衔铁 3 的转角都依次和输入电流成正比，因此这种阀的输出流量也和电流成正比。输入电流反向时，输出流量也反向。

喷嘴挡板式力反馈电液伺服阀的原理方块图如图 1-11(b) 所示。

双喷嘴挡板式电液伺服阀具有线性度好、动态响应快、压力灵敏度高、阀芯基本处于浮动、不易卡阻、温度和压力零漂小等优点，其缺点是抗污染能力差 [喷嘴挡板级间隙较小 (仅 0.02~0.06mm)，阀易堵塞]，内泄漏较大、功率损失大、效率低，力反馈回路包围力矩马达，流量大时提高阀的频宽受到限制。

(3) 直接位置反馈型电液伺服阀

直接位置反馈型电液伺服阀的主阀芯与先导阀芯构成直接位置比较和反馈，其工作原理如图 1-12 所示。图中，先导阀直径较小，直接由动圈式力马达的线圈驱动，力马达的输入电流为 $0 \sim \pm 300\text{mA}$ 。当输入电流 $I=0$ 时，力马达线圈的驱动力 $F_i=0$ ，先导阀芯位于主阀零位没有运动；当输入电流逐步加大到 $I=300\text{mA}$ 时，力马达线圈的驱动力也逐步加大到约为 40N，压缩力马达弹簧后，使先导阀芯产生位移约为 4mm；当输入电流改变方向， $I=300\text{mA}$ 时，力马达线圈的驱动力也变成约 40N，带动先导阀芯产生反向位移约 4mm。上述过程说明先导阀芯的位移 $X_{\text{芯}}$ 与输入电流 I 成比例，运动方向与电流方向保持一致。先导阀芯直径小，无法控制系统中的大流量；主阀芯的阻力很大，力马达的推力又不足以驱动主阀芯。解决的办法是，先用力马达比例地驱动直径小的导阀芯，再用位置随动（直接位置反馈）的办法让主阀芯等量跟随先导阀运动，最后达到用小信号比例地控制系统中的大流量之目的。

主阀芯两端容腔为驱动主阀芯的对称双作用液压缸，该缸由先导阀供油，以控制主阀芯上下运动。由于先导阀芯直径小，加工困难，为了降低加工难度，可将先导阀上用于控制主阀芯上下两腔的进油阀口由两个固定节流孔代替，这样先导阀可看成是由两个带固定节流孔的半桥组成的全桥。为了实现直接位置反馈，将主阀芯、驱动油缸、先导阀阀套三者做成一体，因此主阀芯位移 X_p （被控位移）反馈到先导阀上，与先导阀套位移 $X_{\text{套}}$ 相等。当导阀芯在力马达的驱动下向上运动产生位移 $X_{\text{芯}}$ 时，导阀芯与阀套之间产生开口量 $X_{\text{芯}} - X_{\text{套}}$ ，主阀芯上腔的回油口打开，压差驱动主阀芯自下而上运动，同时先导阀口在反馈的作用下逐