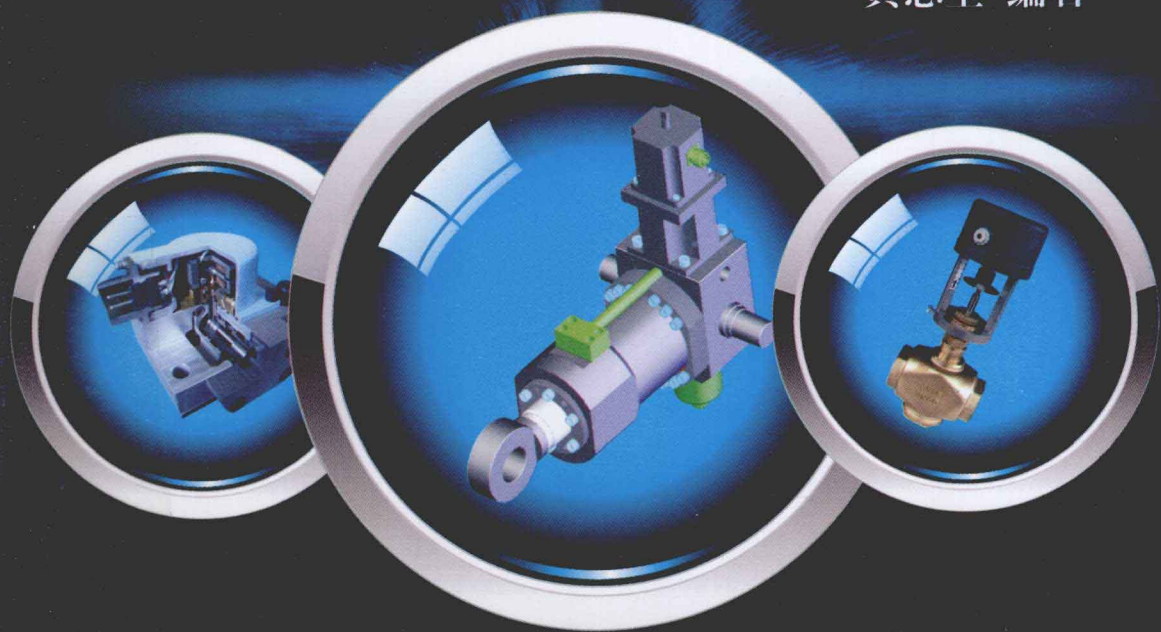


YEYA SIFU YU BILI KONGZHI SHIYONG JISHU

液压伺服与比例控制 实用技术

黄志坚 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

YEYA SIFU YU BILI KONGZHI SHIYONG JISHU

液压伺服与比例控制

实用技术

黄志坚 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合实例深入系统地介绍了电液伺服与比例控制元件和系统的结构原理,以及安装调试、测试实验、维护检查、故障诊断与排除、技术改进方法。

本书共 9 章。第 1 章介绍液压控制系统的发展,第 2~4 章介绍电液伺服系统与元件的使用与维修方法,第 5~7 章介绍电液比例系统与元件的使用与维修方法,第 8 章介绍电液数字控制系统的使用与维修方法,第 9 章介绍电液控制变量泵的使用与维修方法。

本书素材新颖、具体,密切联系电液伺服控制和比例控制系统使用维修实际,有较强的实用性与针对性。

本书的读者主要是液压设备维修人员、液压设备与元件设计开发人员,大专院校相关专业学生、研究生与教师。本书也可作为电液伺服与比例控制系统诊断维修培训班的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压伺服与比例控制实用技术/黄志坚编著. —北京:
中国电力出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5123-3186-0

I. ①液… II. ①黄… III. ①电液伺服系统
IV. ①TH137. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 134089 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月北京第一次印刷

700 毫米×1000 毫米 16 开本 22 印张 494 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

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,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、电力机械、冶金机械、起重机械、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。

由于运行条件的苛刻与结构的复杂性,电液伺服与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。

液压控制系统使用维护要求更加严格,对油的清洁度有较高要求,防止油液污染是设备维护工作中的头等大事,贯穿于设备的整个寿命周期。防高温、防泄漏、防气蚀、防振动与噪声、防事故等也是液压控制系统维护的重点。

故障率高一直是液压控制系统推广使用的瓶颈。液压控制系统结构复杂,与多种专业技术相关,故障机理复杂,涉及因素广泛,故障诊断与排除的难度大,对工程技术人员的要求更高。智能诊断、远程诊断与在线监测是该技术领域的重要发展方向。

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。由于缺乏相应的检测设备,一些地方将电液控制元件视为“不可修复元件”,盲目地进行整体更换,造成人力、物力的极大浪费。当前,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。

电液伺服与比例控制系统具有诸多的优越性,采用电液控制技术对一些液压系统进行改进将取得显著效益。液压控制系统本身不尽合理之处也需要完善,技术改进涉及机、电、液、测控与计算机,往往是一项复杂的系统工程。

应广大读者的需求,本书结合大量实例系统介绍了电液伺服与比例控制元件和系统的使用维修方法,技术内容先进、实用,涉及多个应用领域。

本书的读者主要是液压设备维修人员、液压设备与元件设计开发人员,大学与职业技术学院相关专业学生、研究生与教师。本书也可作为电液伺服与比例控制系统诊断维修培训班的教材。

编者

前言

第一章 液压控制系统及使用维修概述	1
第一节 液压控制技术概述	1
一、液压控制系统的工作原理	1
二、液压控制系统的组成	2
三、液压控制系统的分类	3
第二节 液压控制技术的历史与发展趋势	6
一、电液伺服控制技术的历史与发展趋势	6
二、电液比例控制技术的历史与发展趋势	8
第二章 电液伺服控制技术及应用	11
第一节 电液伺服阀	11
一、工作原理及组成	11
二、电液伺服阀的分类	16
三、典型结构	16
四、新型三级电反馈伺服阀	22
五、主要特性及性能参数	26
六、伺服阀的选用	30
第二节 电液伺服控制器	31
一、电液伺服控制器概述	31
二、电液伺服阀驱动电路	32
三、电液伺服阀电流显示电路	33
四、传感器调理电路	33
五、电液伺服系统嵌入式数字控制器	33
第三节 伺服液压缸与伺服控制系统	36
一、带磁电阻位移传感器的电液伺服缸	36
二、闭环控制数字液压缸及其控制系统	38
三、液压位置伺服系统模糊 PID 控制	43
四、无阀电液伺服系统	46
五、泵控缸位置伺服系统	48
六、火炮电液伺服控制系统	48
第四节 液压马达伺服系统及应用	50

一、液压马达速度伺服系统的种类、原理及特点	50
二、大直径中空电液伺服马达	56
第三章 电液伺服元件测试技术	59
第一节 电液伺服阀测试方法	59
一、静态试验测试	59
二、零漂测试	62
三、频率特性测试	63
第二节 伺服阀测试技术应用实例	66
一、FF-102 电液伺服阀的动态性能测试	66
二、4WS2EE10-45 型电位移反馈电液伺服阀的测试与调整	69
三、电液压力伺服阀的测试	73
四、基于 LabVIEW 的液压伺服阀检测	77
五、轧机液压 AGC 伺服缸的测试	79
第四章 电液伺服阀与伺服系统维修技术	81
第一节 电液伺服阀与伺服系统维修概述	81
一、安装调试要求	81
二、维护要求	82
三、污染度控制	82
第二节 电液伺服阀的维修	84
一、喷嘴挡板式电液伺服阀故障分析	84
二、MOOG D072 伺服阀的检测与调试	86
三、MOOG E760Y 电液伺服阀的使用与维修	87
四、MOOG30 系列伺服阀流量单边输出故障分析	89
五、高频电液伺服阀零偏在线调整	91
第三节 电液伺服系统的现场维修方法	94
一、液压 AGC 的故障判断与排除	94
二、实验台电液伺服系统高频颤振故障分析	96
三、大型汽轮机组 DEH 系统电液伺服阀的维护	97
四、电液伺服阀的内泄漏特性及故障在线分析	98
五、轴流鼓风机液压伺服系统的清洁度控制	101
六、电液伺服系统油液中气泡的危害和预防措施	102
七、液压舵机温升的分析与解决	104
八、伺服系统管路设计与安装	107
第五章 电液比例控制阀及应用	111
第一节 电液比例控制阀概述	111

一、比例控制原理.....	111
二、比例电磁铁.....	112
三、液压放大器及检测反馈机构.....	115
四、电液比例阀的分类.....	116
第二节 电液比例压力阀及应用	116
一、电液比例压力阀概述.....	116
二、电液比例溢流阀在发动机上的应用.....	119
三、电液比例减压阀用于挖掘机液压泵流量电控调节.....	121
第三节 电液比例流量阀及应用	123
一、电液比例流量阀概述.....	123
二、液压同步连续升降的控制.....	123
三、液压顶升同步控制系统.....	126
第四节 比例—压力流量复合阀(P-Q 阀)及应用	128
一、P-Q 阀的稳态控制特性.....	129
二、P-Q 阀构成的液压系统.....	130
三、P-Q 阀的控制.....	131
第五节 电液比例方向阀及应用	131
一、电液比例方向阀概述.....	131
二、电液比例阀的双闭环控制技术及应用.....	133
三、液压数字控制器(HNC)在液压同步系统中的应用	136
四、比例方向控制回路中的压力补偿.....	138
五、比例多路换向阀.....	141
第六节 伺服比例阀及应用	145
一、伺服比例阀概述.....	145
二、伺服比例阀及其在水电站的应用.....	146
三、伺服比例阀在铜带轧机厚度控制系统中的应用.....	148
四、D633 系列直动伺服比例控制阀	151
五、电液伺服比例控制系统在铣耳机组中的应用.....	155
六、伺服比例阀在数控机床的应用.....	156
第七节 比例控制放大器及控制系统	158
一、比例控制放大器概述.....	158
二、比例放大器典型产品.....	161
三、比例控制放大器的正确使用.....	163
四、VT3000 比例放大器在盾构机的应用	168
五、比例放大器在冶金液压系统应用.....	171
六、基于 PROFIBUS-DP 总线的数字电液比例控制器.....	174

第六章	电液比例阀性能参数与测试试验	177
第一节	比例阀主要特性及性能参数	177
一、	静态特性	177
二、	动态特性	178
第二节	比例压力阀测试试验	180
一、	典型试验回路图	180
二、	电液比例阀测控一体化试验系统软件	181
三、	电液比例溢流阀测试试验	181
四、	电液比例减压阀试验	181
第三节	比例流量阀测试试验	182
一、	液压试验回路	182
二、	电液比例节流阀液压试验	182
第四节	比例方向阀测试试验	183
一、	比例方向阀试验回路	183
二、	比例方向阀稳态性能测试试验	183
三、	比例方向阀动态性能试验方法	188
第五节	比例阀测试技术应用实例	190
一、	进口比例阀的测试	190
二、	比例阀虚拟测试系统	193
三、	4WRE6E 型电液比例方向阀特性的测试分析	195
四、	基于 PCI-8333 的电液比例溢流阀性能测试	197
五、	比例控制器的测试	200
第七章	比例阀维修技术	202
第一节	比例阀使用维修要点	202
一、	比例阀的选用	202
二、	污染控制	203
三、	比例阀与放大器的配套及安置	203
四、	控制加速度和减速度的方法	203
五、	常见失效分析	203
第二节	比例压力阀的维修	204
一、	用三合一测试仪检测液压挖掘机主泵比例阀	204
二、	比例阀异常振动的分析与解决	207
三、	数控液压板料折弯机故障分析与处理	208
四、	比例阀应用于油压机液压系统改进	209
五、	电液比例阀在液压缸试验台改造中的应用	212
六、	比例减压阀用于液压工程车辆的技术改进	214

七、提升机液压站的改进·····	216
第三节 比例流量阀的维修 ·····	217
一、液压电磁比例调节阀常见故障处理·····	217
二、注塑机比例调速阀故障诊断·····	219
三、盘式热分散机液压故障分析·····	220
四、步进炉水平液压缸比例控制失效故障排除·····	221
第四节 电液比例压力流量复合阀(P-Q 阀)的维修 ·····	222
一、力士乐 3FRE10-10-12.5L 型 P-Q 阀的特点·····	222
二、P-Q 阀在注塑机上的应用·····	223
三、常见故障及排除·····	224
第五节 比例方向阀的维修 ·····	224
一、比例方向阀的维修调试·····	224
二、比例阀控液压缸制动的调整·····	228
三、液压马达制动回路故障分析与解决·····	230
四、平整定位辊电液比例控制及在线监控·····	232
五、烧结机阀门液压控制系统的改造·····	235
六、WY1.5 型挖掘机液压控制系统的改进·····	237
第六节 伺服比例阀的维修 ·····	240
一、水电厂机组调速器系统溜负荷原因分析·····	240
二、液压伺服比例阀在大型高炉布料控制技改中的应用·····	240
三、5MN 压弯机液压缸颤抖故障分析与排除·····	244
第七节 阀用电磁铁的维修 ·····	246
一、阀用电磁铁分类与技术特点·····	246
二、比例电磁铁的使用与维护·····	247
三、电磁铁故障的分析·····	248
第八章 电液数字控制技术的应用 ·····	249
第一节 电液数字控制概述 ·····	249
一、电液数字控制技术的特点·····	249
二、电液间接与直接数字控制技术·····	249
第二节 增量式数字阀 ·····	250
一、增量式数字阀概述·····	250
二、基于新型数字同步阀的液压同步系统·····	255
三、2D 高频数字阀在电液激振器的应用·····	258
四、数字阀在万能材料试验机的应用·····	261
五、电液数字控制技术在提升装置中的应用·····	263
第三节 高速开关式数字阀 ·····	265
一、高速开关式数字阀概述·····	265

二、数字阀在电控液压动力转向系统中的应用·····	270
三、新型高速数字开关阀为导阀的多路换向阀·····	273
四、数字逻辑插装式水轮机调速器及其应用·····	275
五、比例流量阀的数字化改造·····	280
六、数字阀控制系统在板带跑偏中的应用·····	281
第九章 变量泵电液控制技术 ·····	285
第一节 变量泵控制技术概述 ·····	285
一、变量控制的途径·····	285
二、国外研究现状·····	285
第二节 伺服变量泵及其应用 ·····	287
一、250CKZBB 电液伺服变量泵 ·····	287
二、A4V 伺服变量泵 ·····	288
三、航空变量泵斜盘电液伺服控制系统·····	290
四、变量泵在注塑机液压伺服系统中的应用·····	296
第三节 比例变量泵及其应用 ·····	298
一、电液比例负载敏感控制变量径向柱塞泵·····	298
二、多变量泵比例与恒功率控制及其在盾构机的应用·····	300
三、电液比例变量泵控定量马达·····	306
四、闭环控制轴向柱塞泵·····	310
五、比例变量泵在注塑机上的应用·····	312
六、钻机液压系统中的电控比例变量泵·····	315
七、电控比例泵在液压机的应用·····	318
第四节 电液比例液压泵测试试验 ·····	321
一、比例液压泵测试试验回路·····	321
二、比例液压泵主要性能及测试试验·····	322
第五节 变量泵使用与维修 ·····	326
一、斜盘式轴向柱塞伺服双联变量泵使用维修要点·····	326
二、斜盘式轴向柱塞变量泵常见故障与维护·····	328
三、PC220-5 型挖掘机主泵控制系统的调试 ·····	330
四、比例复合控制泵故障的分析·····	332
五、电液比例控制组合变量泵的节能及故障诊断·····	335
六、轴向双联柱塞泵的维修与调整·····	338

液压控制系统及使用维修概述

液压控制系统具有能容量大、响应速度快、系统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、起重机械、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。

第一节 液压控制技术概述

液压控制系统能够根据装备的要求，对位置、速度、加速度、力等被控制量按一定的精度进行控制，并且能在有外部干扰的情况下，稳定、准确地工作，实现既定的工艺目的。

一、液压控制系统的工作原理

在此以液压伺服系统为例，说明液压控制系统原理。

图 1-1 所示为一机床工作台液压伺服控制系统原理图，系统的能源为液压泵 1，它以恒定的压力（由溢流阀 2 设定）向系统供油。液压动力装置由伺服阀（四通控制滑

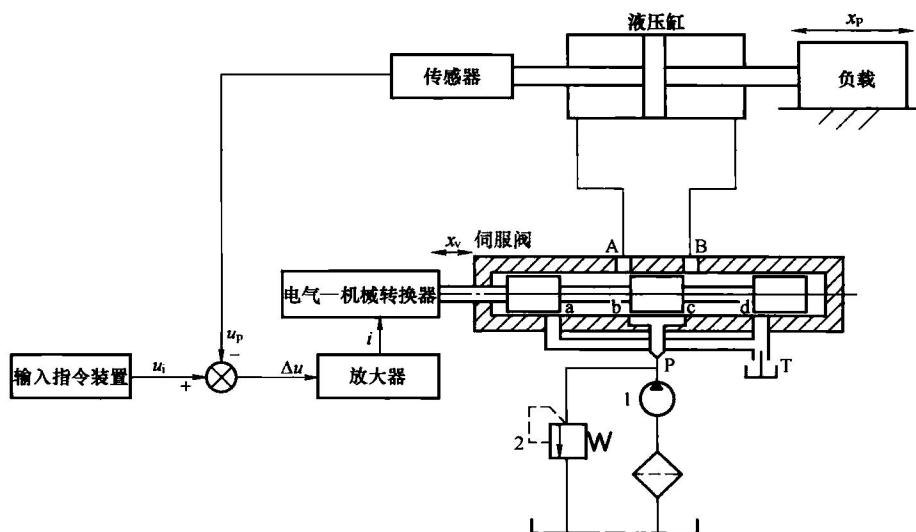


图 1-1 液压伺服控制系统原理图

1—液压泵；2—溢流阀

阀)和液压缸组成。伺服阀是一个转换放大组件,它将电气—机械转换器(力马达或力矩马达)给出的机械信号转换成液压信号(流量、压力)输出并加以功率放大。液压缸为执行器,其输入的是压力油流量,输出的是拖动负载(工作台)运动速度或位移。与液压缸左端相连的传感器用于检测液压缸的位置,从而构成反馈控制。

当电气输入指令装置给出一指令信号 u_i 时,反馈信号 u_p 与指令信号进行比较得出误差信号 Δu , Δu 经放大器放大后得出的电信号(通常为电流 i) 输给电气—机械转换器,从而使电气—机械转换器带动滑阀的阀心移动。不妨设阀心向右移动一个距离 x_v , 则节流窗口 b、d 便有一个相应的开口量, 阀心所移动的距离即节流窗口的开口量(通流面积)与上述误差信号 Δu (或电流 i) 成比例。阀心移动后, 液压泵 1 的压力油由 P 口经节流窗口 b 进入液压缸左腔(右腔油液由 B 口经节流窗口 d 回油), 液压缸的活塞杆推动负载右移 x_p , 同时反馈传感器动作, 使误差及阀的节流窗口开口量减小, 直至反馈传感器的反馈信号与指令信号之间的差别(误差) $\Delta u=0$ 时, 电气—机械转换器又回到中间位置(零位), 于是伺服阀也处于中间位置, 其输出流量等于零, 液压缸停止运动, 此时负载就处于一个合适的平衡位置, 从而完成了液压缸输出位移对指令输入的跟随运动。如果加入反向指令信号, 则滑阀反向运动, 液压缸也反向跟随运动。

二、液压控制系统的组成

图 1-2 所示为液压控制系统的组成。这些基本组件包括输入组件、检测反馈组件、比较组件及转换放大装置(含能源)、执行器和受控对象等部分, 各组成部分及其作用见表 1-1。

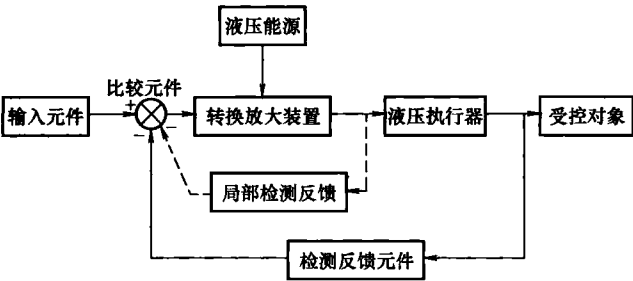


图 1-2 液压控制系统的组成

表 1-1 液压控制系统的组成部分及其作用

序号	名 称	作 用	说 明
1	输入元件 (指令元件)	根据系统动作要求, 给出输入信号(也称指令信号), 加于系统的输入端	机械模板、电位器、信号发生器或程序控制器、计算机都是常见的输入元件。输入信号可以手动设定或程序设定
2	检测反馈元件	用于检测系统的输出量并转换成反馈信号, 加于系统的输入端与输入信号进行比较, 从而构成反馈控制	各类传感器为常见的反馈检测元件

续表

序号	名 称	作 用	说 明
3	比较元件	将反馈信号与输入信号进行比较,产生偏差信号,加于放大装置	比较元件经常不单独存在,而是与输入元件、反馈检测元件或放大装置一起,同时完成比较、反馈或放大
4	转换放大装置	将偏差信号的能量形式进行变换并加以放大,输入到执行机构	各类液压控制放大器、伺服阀、比例阀、数字阀等都是常用的转换放大装置
5	执行器	驱动受控对象动作,实现调节任务	可以是液压缸、液压马达或摆动液压马达
6	受控对象(负载)	和执行器的可动部分相连接并同时运动,在负载运动时所引起的输出量中,可根据需要选择其中某物理量作为系统的控制量	受控对象可以是被控制的主机设备或其中一个机构、装置
7	液压能源	为系统提供驱动负载所需的具有压力的液流,是系统的动力源	液压泵站或液压源即为常见的液压能源

三、液压控制系统的分类

液压控制系统的类型繁杂,可按不同方式进行分类。液压控制系统按使用控制组件的不同,可分为伺服控制系统、比例控制系统和数字控制系统三大类。

1. 位置控制、速度控制、加速度控制、力及压力控制系统

液压控制系统的被控制量有位置(或转角)、速度(或转速)、加速度(或角加速度)、力(或力矩)、压力(或压差)及其他物理量。

为减轻司机的体力劳动,通常在机动车辆上采用转向液压助力器。这种液压助力器是一种位置控制的液压伺服机构。图 1-3 所示为转向液压助力器原理图,它主要由液压缸和控制滑阀两部分组成。液压缸活塞 1 的右端通过铰销固定在汽车底盘上,液压缸缸

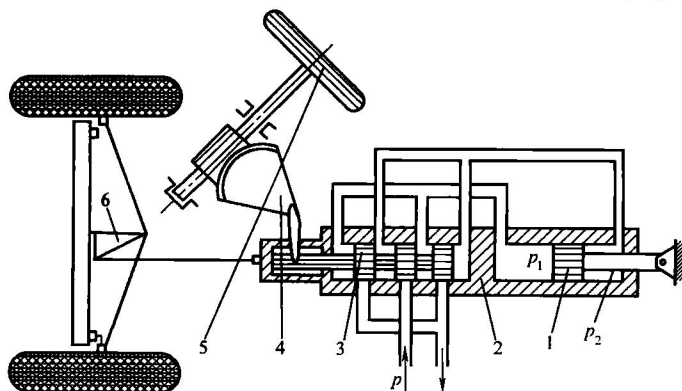


图 1-3 转向液压助力器原理图

1—活塞; 2—缸体; 3—阀心; 4—摆杆; 5—转向盘; 6—转向连杆机构

体 2 和控制滑阀阀体连在一起形成负反馈，由转向盘 5 通过摆杆 4 控制滑阀阀心 3 的移动。当缸体 2 前后移动时，通过转向连杆机构 6 等控制车轮偏转，从而操纵汽车转向。当阀心 3 处于图示位置时，各阀口均关闭，缸体 2 固定不动，汽车保持直线运动。由于控制滑阀采用负开口的形式，故可以防止引起不必要的扰动。当旋转向盘，假设使阀心 3 向右移动时，液压缸中压力 p_1 减小， p_2 增大，缸体也向右移动，带动转向连杆 6 向逆时针方向摆动，使车轮向左偏转，实现左转弯；反之，缸体若向左移就可实现右转弯。

2. 闭环控制系统和开环控制系统

采用反馈的闭环控制系统由于加入了检测反馈，具有抗干扰能力，对系统参数变化不太敏感，控制精度高，响应速度快，但要考虑稳定性问题，而且成本较高，多用于系统性能要求较高的场合（如高精数控机床、冶金、航空、航天设备）。在带钢生产过程中，要求控制带钢的张力，图 1-4 所示为带钢恒张力控制系统，牵引辊 2 牵引带钢移动，加载装置 8 使带钢保持一定的张力。当张力由于某种干扰发生波动，通过设置在转向辊 4' 轴承上的力传感器 5 检测带钢的张力，并和给定值进行比较，得到偏差值，通过电放大器 9 放大后，控制电液伺服阀 7，进而控制输入液压缸 1 的流量，驱动浮动辊 6 来调节张力，使张力回复到原来给定之值。

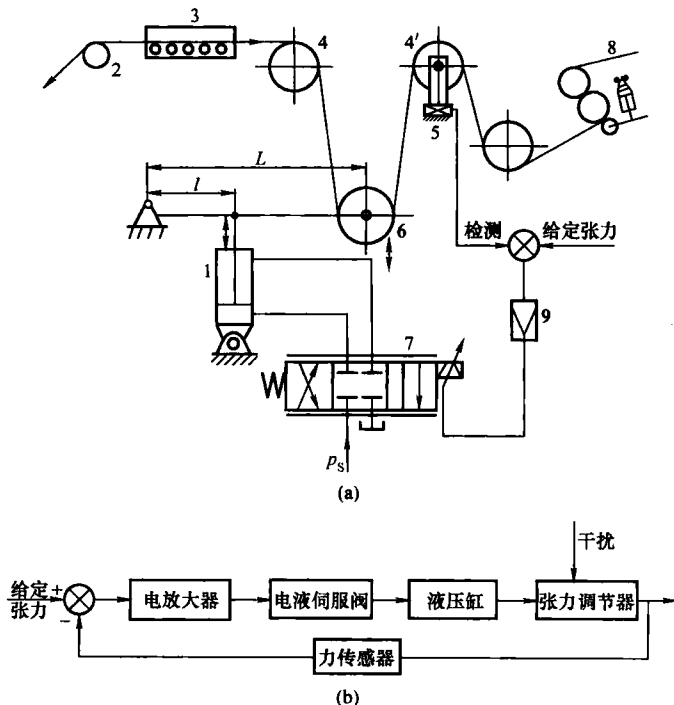


图 1-4 带钢恒张力控制系统

(a) 控制系统；(b) 框图

1—张力调节液压缸；2—牵引辊；3—热处理炉；4、4'—转向辊；5—力传感器；
6—浮动辊；7—电液伺服阀；8—加载装置；9—电放大器

不采用反馈的开环控制系统（见图 1-5）不存在稳定性问题，但不具有抗干扰能力，控制精度低，但成本较低，用于控制精度要求不高的场合。对于闭环稳定性难以解决，响应速度要求较快，控制精度要求不太高，外扰较小，功率较大，要求成本低的场合，可以采用开环或局部闭环的控制系统。

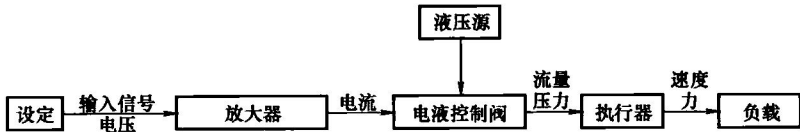


图 1-5 开环控制系统

3. 阀控系统和泵控系统

阀控系统又称节流控制系统，其主要控制组件是液压控制阀，具有响应快、控制精度高的优点，缺点是效率低，特别适合中小功率快速高精度控制系统使用。图 1-6 所示为电液比例阀控制系统的构成框图，图 1-7 所示为采用增量式数字阀控制系统构成框图。

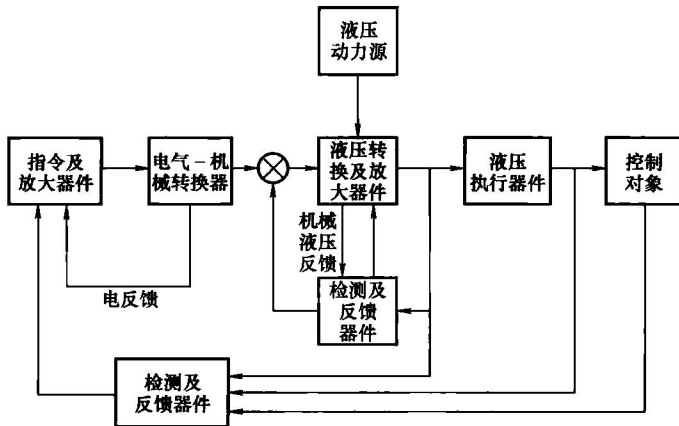


图 1-6 电液比例阀控制系统的构成框图

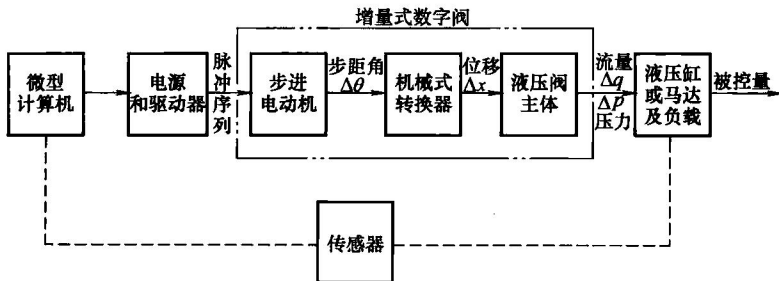


图 1-7 增量式数字阀控制系统构成框图

泵控系统又称容积控制系统，其实质是用控制阀去控制变量液压泵的变量机构，由于无节流和溢流损失，故效率较高且刚性大，但响应速度慢，结构复杂，适用于功率和

响应速度要求不高的控制场合。

泵控系统原理图如图 1-8 所示，它是一个位置控制系统。工作台由双向液压马达与滚珠丝杠来驱动，双向变量液压泵提供液压能源，泵的输出流量控制通过电液控制阀控制变量缸实现，工作台位置由位置传感器检测并与指令信号相比较，其偏差信号经控制放大器放大后送入电液控制阀，从而实现闭环控制。采用这种位置控制的设备有各种跟踪装置、数控机械和飞机等。

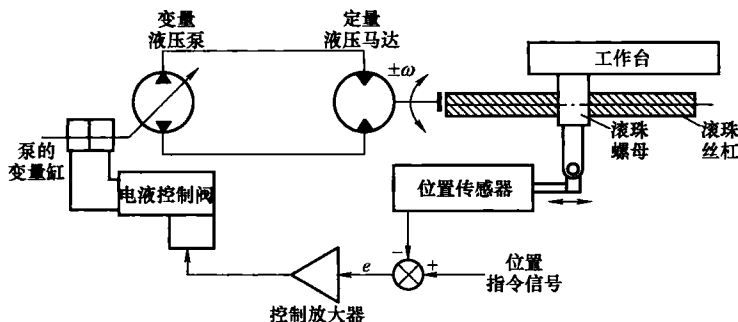


图 1-8 泵控系统原理图

第二节 液压控制技术的历史与发展趋势

液压控制技术的发展史就是一部力图获得速度更快、精度更高、稳定性更好的创新史。

液压技术同电子技术、控制技术的结合日益紧密，电液控制元件和系统的性能有了进一步提高。电液控制系统还在电子设备、控制策略、软件 and 材料方面不断取得突破，将会在各个工程领域得到越来越广泛、深入的应用和发展。

电液伺服控制技术正朝着标准化、虚拟化、智能化、数字化、微型化和绿色化的方向发展。

一、电液伺服控制技术的历史与发展趋势

1. 发展历史

电液伺服控制的发展历程主要分早期、二战期间、二战后三个阶段。

(1) 早期。公元前 247~285 年，生活在亚历山大城的古埃及人 Ktesbios 就发明了很多液压伺服机构。其中最为杰出的就是水钟，他设计的水钟可以显示长达一个月的准确时间。其原理是通过节流孔将浮标显示的液面高度与容器形成一个闭环反馈系统。从某种意义上说，这种浮标已经具备现代液压伺服阀的雏形。1750 年左右，用于控制给水系统和蒸汽锅炉水位的液位控制阀在英国出现。随着工业革命的发展，控制策略的不断改进，进而影响到液压技术的发展。

1795 年，约瑟夫·布拉曼应用帕斯卡原理制作了水压机，1796 年，莫兹利为了使水压机更好地工作，设计了水压机泵的密封装置——皮碗密封。而它是现代密封技术的

锥形。到了18世纪末期,蓄能器在英国出现。19世纪早期,开始采用油液代替水成为液压系统的介质,同时方向控制阀采用电信号进行驱动。

(2) 二战期间。在二战前夕,由于空气动力学的应用要求一种能够实现机械信号与气体信号转换装置。阿斯卡尼亚控制器公司及 Askania-Werke 根据射流原理发明了射流管阀并申请了专利。根据同样的原理,福克斯波罗申请了双喷嘴挡板阀的专利。德国西门子公司发明了永磁式力矩马达,它可以接受通过弹簧输入的机械信号和移动线圈产生的电信号,并开创性地使用在航空领域。在二战末期,伺服阀是采用滑阀阀心在阀套中移动的结构。阀心的运动是直流螺线管产生的电磁力与弹簧产生的压力共同作用的结果,因此,此时的伺服阀还仅仅是一种单级开环控制阀。

(3) 二战后。二次世界大战之后,由于军事的刺激,自动控制理论特别是武器和飞行器控制系统的研究得到进一步发展,这从另一个方面大大刺激了液压伺服阀的研制与创新。1946年,英国的廷斯利发明了两级液压阀,雷神和贝尔飞机公司获得了带反馈两级伺服阀的专利,麻省理工学院采用线性度更好、更节能的力矩马达代替螺线管作为滑阀的驱动装置。

1950年,穆格发明了采用喷嘴节流孔作前置级的两级伺服阀。在此基础上,1953~1955年,卡森发明了机械反馈式两级伺服阀,穆格改进了双喷嘴节流孔结构,沃尔平则将湿式电磁铁改为干式的,消除了原来浸在油液内的力矩马达由油液污染带来的可靠性问题。1957年,阿奇利发明了射流管阀作为前置级的两级电液伺服阀,并于1959年成功研制出了*i*级电信号反馈伺服阀。

此时的电液伺服阀开发研制进入了迅速发展时期,很多结构设计进一步提高了电液伺服阀的性能。特别是1960年的电液伺服阀设计更多地显示出了现代伺服阀的特点。如:两级间形成了闭环反馈控制,力矩马达更轻,移动距离更小,前置级对功率级的压差通常可达到50%以上,前置级无摩擦并且与工作油液相互独立,前置级的机械对称结构减小了温度、压力变化对零位的影响。

在20多年的时间里,电液伺服阀完成了从早期的单级开环控制阀到两级闭环控制伺服阀的转变。可以看出。那时,电液伺服阀的发展更多的是由于军事应用的需要,因此,它的开发是不计成本的,这也造成了当时的电液伺服阀性能优越但价格昂贵。

随后,一些公司开始开发电液伺服阀的工业应用。穆格公司于1963年研制出73系列电液伺服阀,可以满足工业用油的清洁度要求。此后,为了满足现代工业的要求,以1960年的伺服阀为基础的伺服阀结构设计研制仍在继续。如阀的体积变大(与航空用阀相比),材料也不再是锻钢;先导级独立出来,以方便维修和调试;阀的许用压力范围降低至10MPa到20MPa,而不再是原来的30MPa;开始标准化生产,以降低成本和满足通用的要求。

2. 发展趋势

当前电液伺服阀的研究主要集中在结构的改进、材料的使用及测试方法的改变上。

(1) 结构方面。在结构改进方面,针对伺服阀常见故障进行分析,提出改进方案,采用计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)手段,进行结构优化,以满足阀的性能要求,如直驱式伺服阀的产生、压电陶瓷式伺服阀的出现。此外,还有利用