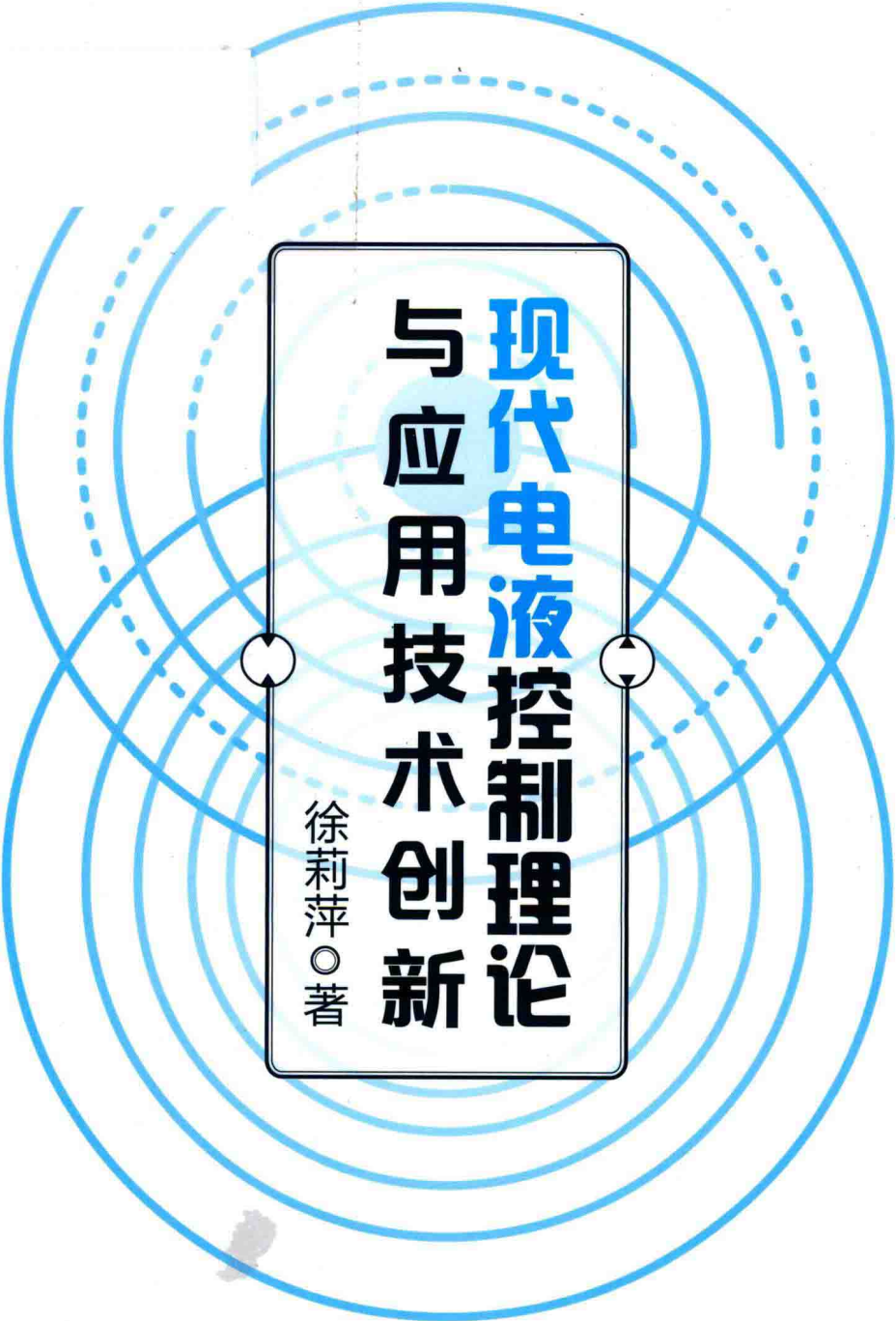




现代电液控制理论 与应用技术创新

徐莉萍◎著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

现代电液控制理论与应用技术创新

徐莉萍 著

北 京
冶金工业出版社
2018

内 容 简 介

本书系统论述了电液比例与伺服控制技术的基础理论、基本组件、系统组成及性能特点。全书共分6章,主要内容包括电液控制系统基础理论、液压放大元件及电液伺服阀和电液比例阀、电液伺服控制系统分析与设计、电液比例控制系统的分析与设计、电液控制系统的相关技术、电液控制创新应用技术。

本书可供机电控制技术、电液自动化技术等领域的工程技术人员阅读,也可供高等院校机电控制及其相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电液控制理论与应用技术创新/徐莉萍著. —
北京:冶金工业出版社,2018.12

ISBN 978-7-5024-7949-7

I. ①现… II. ①徐… III. ①电液伺服系统—研究
IV. ①TH137.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第289463号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 俞跃春 贾怡雯 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹蕊

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7949-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2018年12月第1版,2018年12月第1次印刷

169mm×239mm;12印张;231千字;181页

75.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

电液控制技术是液压技术的一个重要分支，也是现代控制工程的基本技术要素，它融合了液压技术、微电子技术、检测传感技术、计算机控制技术及自动控制理论等实用技术与理论。通常所说的电液控制系统主要是指采用电液伺服阀（伺服变量泵）或电液比例阀（比例变量泵）构成的能实现对被控对象进行连续、实时控制的液压系统。近年来电液比例技术迅猛发展，并与伺服控制技术应用到很多工业部门和航空、航天、军事领域中。它弥补了普通液压传动系统的不足，综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，是一种在大中功率场合具有明显竞争优势的控制模式。

电液比例阀多用于开环液压控制系统，实现对液压参数的遥控，也可以作为信号转换与放大组件用于闭环控制系统。与手动调节和通断控制的普通液压阀相比，它能显著地简化液压系统，实现复杂程序和运动规律的控制，便于机电一体化，通过电信号实现远距离控制，大大提高液压系统的控制水平；与电液伺服阀相比，尽管其动态、静态性能有些逊色，但在结构与成本上具有明显优势，能够满足多数对动静态性能指标要求不高的场合。电液比例元件向数字化方向发展已成为液压技术领域的热点课题之一，数字液压元件与计算机连接不需要D/A转换器，省去了模拟量控制要求各环节间的线性和连续性。

本书论述了电液比例与伺服控制技术的基础理论、基本组件、系统组成及性能特点。全书共分6章，对电液比例与伺服控制中的各种控制元件、动力元件及系统的工作原理、性能特点、分析方法进行了

系统的、循序渐进的阐述，并从实用的角度出发，简要介绍了系统的校正方法、实用基本回路及其应用、电液控制创新应用技术。

本书在撰写过程中，参考或引用了一些参考文献，在此谨向原作者表示诚挚的感谢。鉴于当今信息、通信等技术的发展迅速，有关电液控制技术的知识、理论和实践更新较快，加之作者学识水平和视野有限，书中不足和疏漏之处，敬请各位读者提出宝贵的意见和建议。

河南科技大学 徐莉萍

2018年8月

目 录

1 电液控制系统基础理论	1
1.1 控制类型比较及液压控制的特点	1
1.1.1 控制类型的比较	1
1.1.2 液压控制的特点	2
1.1.3 控制类型的选择	3
1.2 液压控制系统的基本原理、类型与适用场合	3
1.2.1 液压控制系统的基本原理	3
1.2.2 液压控制系统的类型及适用场合	4
1.3 电液控制系统的基本组成及特点	10
1.3.1 电液控制系统的基本组成	10
1.3.2 电液控制系统的特点	11
1.4 电液控制技术的发展和应用研究	13
2 液压放大元件及电液伺服阀和电液比例阀	15
2.1 液压放大元件及其功用特点分析	15
2.2 滑阀静态特性的一般分析、受力分析与输出功率	15
2.2.1 滑阀静态特性的一般分析	15
2.2.2 滑阀受力分析	20
2.2.3 滑阀的输出功率	25
2.3 喷嘴挡板阀的静态特性与结构参数确定	26
2.3.1 结构原理及特点	26
2.3.2 静态特性	27
2.3.3 主要结构参数的确定	32
2.4 射流管阀的结构原理及应用	33
2.4.1 结构原理	33
2.4.2 射流管阀的应用	34
2.5 电液伺服阀的主要性能参数与选择	34
2.5.1 主要特性及性能参数	34
2.5.2 电液伺服阀的选择	41

2.6 电液比例阀的工作原理及应用	44
2.6.1 工作原理	44
2.6.2 电液比例系统应用	48
3 电液伺服控制系统分析与设计	50
3.1 电液伺服控制系统的类型与性能评价指标	50
3.1.1 电液伺服控制系统的类型	50
3.1.2 电液伺服控制系统的性能评价指标	50
3.2 电液位置伺服系统分析	54
3.3 电液速度伺服控制系统分析	55
3.4 电液力控制系统分析	57
3.4.1 稳定性分析	58
3.4.2 系统的响应速度	58
3.4.3 系统的稳态精度	59
4 电液比例控制系统的分析与设计	60
4.1 电液比例控制系统的工作原理与技术优势	60
4.1.1 电液比例控制系统的工作原理	60
4.1.2 电液比例控制系统的技术优势	61
4.2 电液比例控制系统的设计特点	62
4.2.1 开环电液比例控制系统的设计特点及注意事项	62
4.2.2 闭环电液比例控制系统的设计特点及注意事项	63
4.2.3 比例阀的选型原则	64
4.3 电液比例控制基本回路及应用	66
4.3.1 电液比例压力控制回路	66
4.3.2 电液比例速度控制回路	69
4.3.3 比例压力-速度控制回路	76
4.3.4 电液比例方向及速度控制回路	78
4.3.5 比例方向阀的进口节流压力补偿控制回路	82
4.3.6 比例方向阀的出口节流压力补偿控制回路	90
4.3.7 插装元件的压力补偿回路	94
4.4 电液比例控制系统设计工程实例	101
4.4.1 步进式钢坯加热炉简介	101
4.4.2 步进式钢坯加热炉液压系统分析	101

5 电液控制系统的相关技术	106
5.1 液压油源装置	106
5.1.1 液压控制系统对油源的要求	106
5.1.2 液压油源的参数设计	107
5.2 液压介质使用管理与系统污染控制技术	109
5.2.1 油液被污染的危害	110
5.2.2 污染控制措施	112
5.3 液压系统振动和噪声控制技术	114
5.3.1 振动和噪声的基本概念	114
5.3.2 液压系统振动和噪声的来源	120
5.3.3 振动和噪声的测量	123
5.3.4 液压系统的振动与噪声控制	126
6 电液控制创新应用技术	136
6.1 机电液一体化系统设计	136
6.1.1 概述	136
6.1.2 机电液一体化系统结构方案设计	138
6.1.3 机电液一体化系统总体布局与环境设计	142
6.1.4 机电液一体化系统的设计与优化方法	148
6.1.5 液压机械节能控制技术	152
6.2 电液数字比例控制技术的应用	153
6.2.1 电液数字控制概述	153
6.2.2 增量式数字阀	155
6.2.3 高速开关式数字阀	158
6.2.4 基于新型数字同步阀的液压同步系统	161
6.2.5 数字阀在万能材料试验机中的应用	161
6.3 水压控制技术	164
6.3.1 水压控制系统的特点	164
6.3.2 水压比例/伺服控制元件	168
6.3.3 水压控制技术的应用	171
6.4 电/磁流变控制技术	173
6.4.1 电/磁流变流体的特征	173
6.4.2 电/磁流变流体的工作模式	176
6.4.3 电/磁流变流体液压阀及系统	177
参考文献	180

1 电液控制系统基础理论

1.1 控制类型比较及液压控制的特点

1.1.1 控制类型的比较

在没有人直接参与的情况下，使机械设备、生产过程或被控对象的某些物理量准确地按照预期规律变化，即称为自动控制，可简称为控制。例如，数控机床按预先排定的工艺程序自动加工出预期的几何形状；水轮发电机组按照给定电位器的设定通过电液伺服系统对大口径流体管道的流量自动进行连续调节；火炮根据雷达传来的信息自动改变方位角和俯仰角等。

一般情况下，很多传动和控制系统的部件是在调控的状态下运行的，二者不能明确区分开来。传动控制系统涉及的工作介质主要包括机械、电力、气压、液压等多种，这些不同的介质构成了不同种类的传动控制系统。其中，机械传动与控制系统是借助齿轮、链条、蜗杆、蜗轮等部件来达到传递动力和精准调控的目的；电动传统与控制系统则主要是借助电动机等设备完成工作，通过调节对应的电参数实现传递动力和精准调控的过程；气压传统与控制系统，顾名思义，就是以压缩空气为工作媒介；液压传统控制系统，则是以液体作为工作媒介，通过利用封闭环境下的液压能来完成动力、信息的传递和调控。各种传动控制方式的综合比较见表 1-1。

表 1-1 各种传动控制方式的综合比较

综合比较	液压传动与控制	气压传动与控制	机械传动与控制	电气传动与控制
机件或工作介质	有压液体	压缩空气	机械零件（齿轮、齿条等）	电力设备（电动机、电磁铁等）
输出力或转矩	大	稍大	较大	不太大
速度	较高	高	低	高
功率密度	大	中等	较大	中等
响应快速性	高	低	中等	高
定位性	稍好	不良	良好	良好

续表 1-1

综合比较	液压传动与控制	气压传动与控制	机械传动与控制	电气传动与控制
无级调速	良好	较好	较困难	良好
远程操作	良好	良好	困难	特别好
信号变换	困难	较困难	困难	容易
直线运动	容易	容易	较困难	困难
调整	容易	稍困难	稍困难	容易
结构	稍复杂	简单	一般	稍复杂
管线配置	复杂	稍复杂	较简单	不特别复杂
环境适应性	较好，但易燃	好	一般	不太好
危险性	注意防火	几乎无	无特别问题	注意漏电
动力源失效时	可通过蓄能器完成若干动作	有余量	不能工作	不能工作
工作寿命	一般	长	一般	较短
维护要求	高	一般	简单	较高
价格	稍高	低	一般	稍高
应 用	各类响应速度快的大负载场合	小功率场合	在许多场合或逐步被其他传动控制方式所替代，或需其他传动控制方式融合才能满足主机的动作要求	在许多场合，往往与机械、气动或液压传动结合使用，作为各种传动的组成部分

1.1.2 液压控制的特点

液压传动与控制是研究以有压液体为能源介质实现各种机械的传动与控制的学科。通常是以液压油或其他合成液体作为工作介质，并采用各种元件组成所需要的控制回路，再由若干回路有机组合成能完成各种控制功能的传动系统进行能量的转换、传递与控制。液压控制系统响应速度高，由于液压控制系统的压力可以很高，因而执行机构的尺寸小、质量也小；由于液体压缩性小、液压弹簧刚度大，因此液压谐振频率可以很高。这便是大功率下液压控制系统的动态响应比电气控制系统高得多的原因。

但是在液压控制中由于系统本身受到外界的影响较大，因此描述系统的准确模型较为困难，一些文献对此进行了系统辨识以获取较为准确的系统模型，但是，由于外界干扰的情况引起的系统参数的变动，系统模型仍然不能准确得到，给液压系统的控制增加了很多困难。在液压控制系统的设计中，一般外界负载都

被引入到系统的控制传递函数中，而外界负载的变化一般没有规律可循，从严格意义上说，系统是属于随动系统，因此实际设计控制器时需要对外界负载干扰采取具体控制方法处理。液压系统的滞后性使得其整个控制系统的设计增加了难度，必须采用一些先进的控制方法来处理。

1.1.3 控制类型的选择

不同的控制方式在特征、用法及使用范围等方面存在差异。随着现代化机械设备功能越来越多样化、操作越来越复杂，在决定传动控制类型时，要从整体的角度出发，综合被控制装置所处的环境和用处、结构设置、负载情况以及使用维护情况等多个方面，对控制方式的实用性、稳定性、先进性进行评估，而不应牵强地对主机所有工作机构采用某一种传动控制方式。

1.2 液压控制系统的基本原理、类型与适用场合

1.2.1 液压控制系统的基本原理

液压随动系统具有反馈控制作用，其驱动装置由液压动力元件组成，能够根据传入信息对输出量进行调节，并保持一定的精度；而且还能将功率放大，由起到放大功率的作用。

图 1-1 所示是液压伺服控制系统的原理图，液压泵为系统提供能量，通过不变的压力为系统提供油。四通控制滑阀也称伺服阀，它与液压缸组成动力装置。四通控制滑阀其实就是放大器，从力矩马达传出的信息被四通控制滑阀转变成液

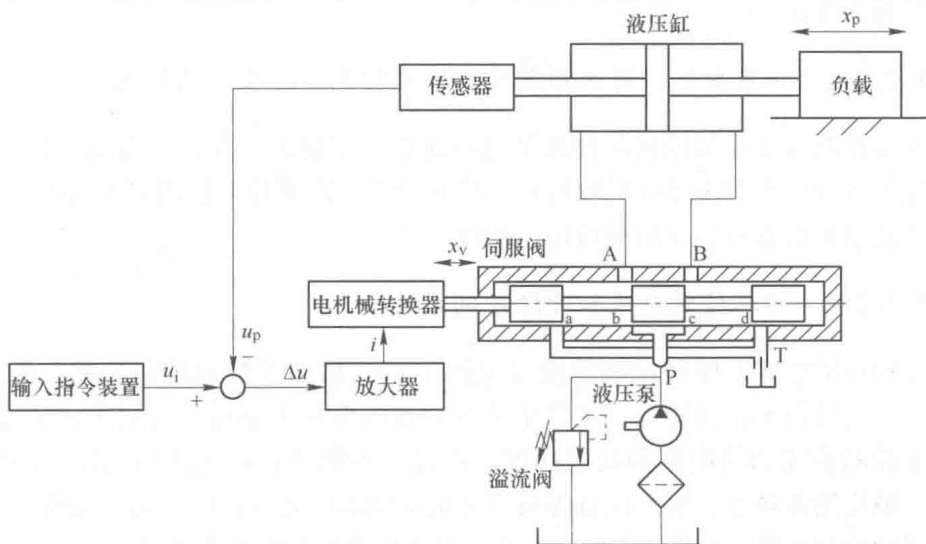


图 1-1 液压伺服控制系统原理图（半结构形式）

压信息并将功率放大,实现输出的目的。压力油的流量以信号的方式传入液压缸,液压缸执行命令,以一定的速度移动工作台形成位移,传感器与其左端相连,能够监测液压缸的位置,根据位置的变化进行反馈。

指令装置发出 u_i 信号时, u_p (反馈信号) 与 u_i 通过比较计算出 Δu (误差信号), 把 Δu 放大的电流 i (电信号) 进一步传给力矩马达, 然后力矩马达通过动力使滑阀的阀芯动起来。在操作时可以向右将阀芯移动一段距离 x_v , 此时, 节流窗口 b、d 会出现一个距离, x_v 和节流窗口的距离与 Δu 或者电流 i 形成比例关系。随着阀芯位移, 压力油通过 P 口经过节流窗口 b 流进液压缸左腔, 液压缸内的活塞杆使负载向右移动 x_p 距离, 并通过反馈传感器调节误差使节流窗口缩小距离, 最终实现反馈信息与指令信息的误差为 0, 即 $\Delta u = 0$; 之后, 力矩马达再次返回零位, 四通控制滑阀也返回到零位, 流量输出为零, 液压缸工作结束, 工作台也保持平衡, 液压缸接受传入信息, 随之移动的工作也结束了。若加入指令信息与上述信息相反, 那么四通控制滑阀就会向相反的方向运动, 液压缸跟随四通控制滑阀向相反的方向运动。

上述系统采用了电气输入指令装置和反馈装置, 指令信号与反馈信号都为电信号。而实际上, 除了采用电气输入指令装置和反馈装置外, 这些装置还可以是机械、液压、气动, 或它们的某种组合。

1.2.2 液压控制系统的类型及适用场合

液压控制系统有很多类型, 根据不同的方式进行分类, 如图 1-2 所示。根据不同的特点来确定分类的方式, 每个类型的液压控制系统具备的特色、实例及应用场合如下所述。

1.2.2.1 位置控制、速度控制及加速度控制和力及压力控制系统

液压控制系统中被控制的物理量包括速度、加速度、位置、力或者压力等。液压控制系统的类型由被控的物理量、控制对象、作用和工艺的需求所决定, 有些液压控制系统能够包含两种被控制的物理量。

1.2.2.2 闭环控制系统和开环控制系统

运用反馈形式的闭环控制系统 (见图 1-1), 增加了检测反馈装置, 使系统具备了一定的抗干扰的能力, 工作中系统参数的变化不会对其造成太大的影响, 提高了控制系统的精确性和反应速度, 不过, 不能忽视稳定性和造价方面的问题, 一般应用在航空、航天设备等对系统精度要求较高的领域。对于没有安装反馈装置的控制系統, 如图 1-3 所示, 不需要考虑系统稳定性的因素, 但是抗干扰能力差, 控制系统的精度和反应速度要受到内部各个组件之间相互作用的影响,

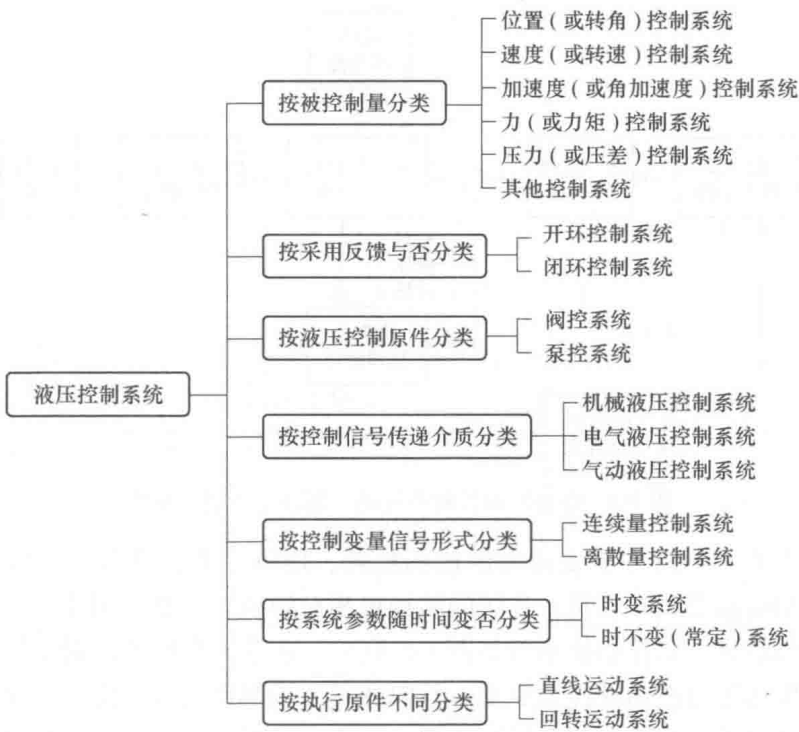


图 1-2 液压系统的分类

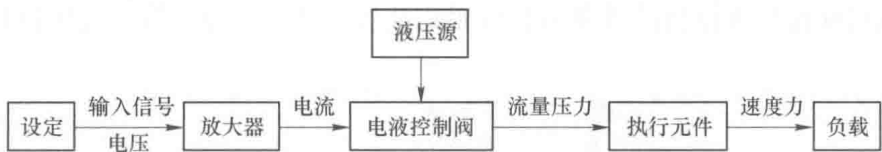


图 1-3 开环控制系统

控制系统的精确性有所降低，造价也相对较低，适用于对系统精度要求不高的领域。对于使用局部闭环或者开环的控制系统，可以应用在精准度要求不高、外界干扰较小、要求速度较高的领域。

1.2.2.3 阀控系统和泵控系统

阀控系统，即节流控制系统，核心部件是液压控制阀，其典型的优势是反应速度快、控制系统精准度高，但是效率不高，主要应用于中小功率的系统或者速度快、精密度高的系统。根据液压控制系统的控制阀的区别，将其分成比例控制系统、数字控制系统和伺服控制系统三类。图 1-1 所示为采用伺服阀的伺服控制系统；图 1-4 所示为电液比例控制系统的一般技术构成方块图，其中液压转换及放大器件可以是比例阀，也可以是比例变量泵。

泵控系统（容积控制系统）的工作原理是通过控制阀实现对变量液压泵的

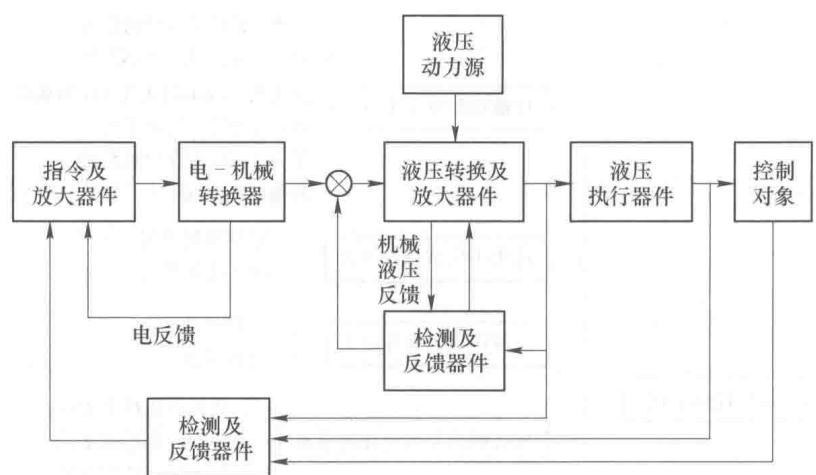


图 1-4 电液比例控制系统的一般技术构成方块图

调控，因为工作时没有节流或者溢流的损耗，能够大大提高效率，而且刚性较大，不过相应速度相对较慢，系统的结构也相对烦琐，主要应用于功率较大和响应速度低的情况。泵控系统示例如图 1-5 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、管道卷压机械及飞机等。

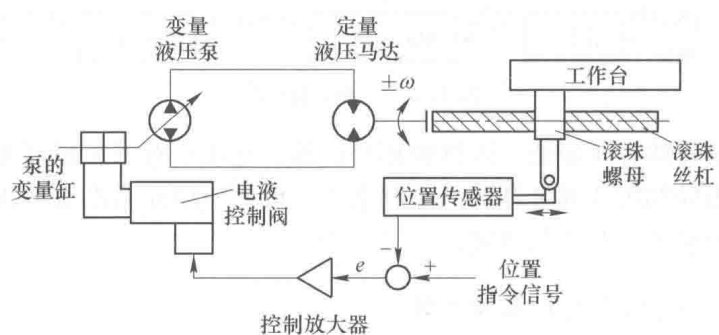


图 1-5 泵控系统原理图

1. 2. 2. 4 机械液压控制系统、电气液压控制系统和气动液压控制系统

图 1-6 所示为机械液压控制系统（又称机液控制系统）的工作原理，液压和机械共同组成机械液压控制系统，机械构件组成了给定、比较和反馈的相关组件。系统简单、可靠性强、价格低、环境的适应性相对较强是其突出的优点；但是校正信号偏差的能力差、调整系统增益的能力不强，而且这两点都不及电气，

不适用于远距离的操作，而且反馈装置的不足对系统工作状态的影响很大。

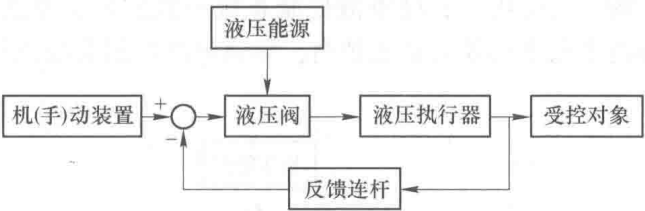


图 1-6 机械液压控制系统原理方块图

图 1-7 所示为一个典型的机械液压控制系统原理图，系统用于控制车床仿形刀架。具有某种形状的模板（俗称靠模）作为系统的输入。模板用一边有预制切口的平板做成，它与输入信号发生装置相连的触头沿着模板的边缘移动。传统的液压仿形刀架，触头直接（或通过机械杠杆）与伺服阀阀芯相连，控制刀架的液压缸也和伺服阀的阀套组成一体，当液压缸把伺服阀移到零位置时，同时移动刀具，使其在工件上切削出和仿形模板的切口一样的形状。为了克服纯机械液压控制系统偏差信号的校正及系统增益的调整不便的缺陷，可以将触头连接到电子信号发生装置上 [如直线位置传感器（LVDT）]，当触头扫过模板时，就产生了与其变化相应的指令信号。位置反馈传感器产生连续的反馈信号，并与指令信号相比较，所产生的误差信号控制伺服阀，伺服阀又操纵执行元件（液压缸）。由于执行元件控制着刀架或工作台，所以零件就被加工成所需的形状了。

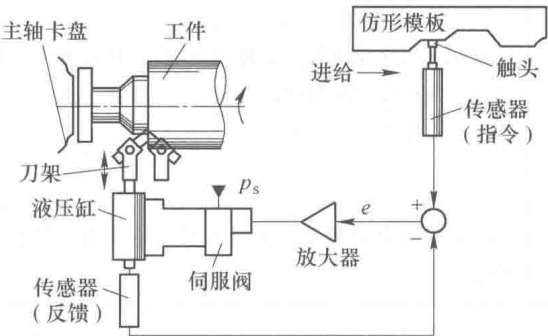


图 1-7 车床仿形刀架机液控制系统原理图

电气液压控制系统如图 1-8 所示，又称为电液控制系统，电气和液压共同组成电气液压控制系统，将电气和电子组件应用于检测信息的偏差、进行校正以及对初始信号的放大等。电液控制阀是电气液压控制系统的核心装置，电气液压控制系统根据电液控制阀种类的区别，又分类成电液伺服、电液比例系统这两大类。它们的详细分类、构成及特点见表 1-2。电液控制系统能够简单易行地测量、校正和放大信号，可以实施远距离操作，与具有快速响应和强大抗刚性的液压动力元件相组合，电气、电子和液压共同组成电液控制系统，其优点是具有普遍的

适应性和灵活性很强。电液控制系统得到广泛的使用得益于电一体化技术迅速发展和计算机技术的广泛应用，其使电液控制系统一跃成为主要的液压控制系统。人们对机械装备技术水平的要求越来越高，导致电液控制系统取代了普通的液压传动系统。

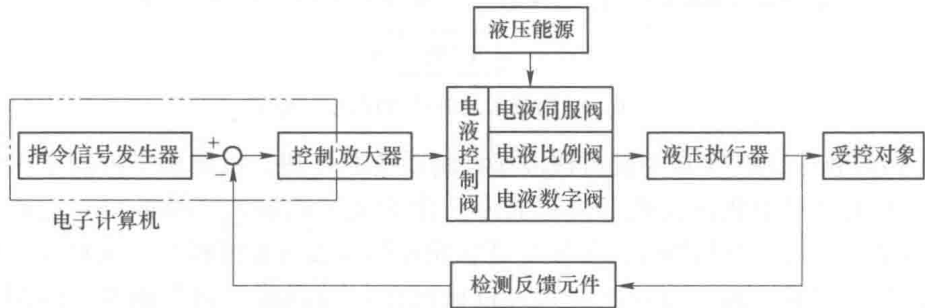


图 1-8 电液控制系统一般构成

表 1-2 电液控制系统的详细分类、构成及特点

类 型		构 成	特 点
电液 伺服 系统	位置系统	控制装置（伺服放大器和电液伺服阀）、执行元件（液压缸、液压马达或摆动液压马达）、反馈检测装置（传感器）、能源装置（定量泵或变量泵）	响应快、精度高。但成本较高，抗干扰能力较差
	速度系统		
	力（压力）系统		
电液 比例 系统	开环	控制装置（比例放大器和比例阀）、执行元件（液压缸、液压马达或摆动液压马达）、能源装置（定量泵、变量泵或比例变量泵）	可明显简化系统，实现复杂程序控制；利用电液结合提高机电一体化水平。但控制精度低
	闭环	除构成开环比例系统的装置外，还包括反馈检测装置	响应较快，精度较高，价格低廉

如图 1-9 所示，气动和液压共同组成了气动液压控制系统（气液控制系统），气动材料能够完成检测和放大系统信号的作用。气液控制系统能够在恶劣的环境中完成作业，如振动、易燃易爆、高温等环境，其结构相对简单、可靠性高；但是工作时，必须具备压力气源等装备。

1.2.2.5 连续量控制系统和离散量控制系统

连续量控制系统中各变量均为时间的连续函数；离散量控制系统中某些变量是用脉冲调制形式表达的。当采用电液数字阀时必然是离散控制系统。用计算机控制电液伺服阀或电液比例阀的控制系统实质上也是离散的控制系统，是采用脉

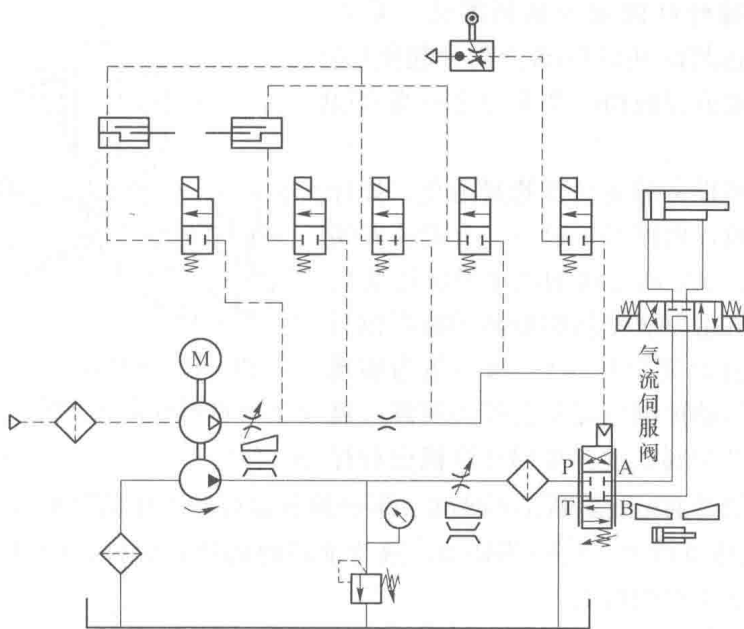


图 1-9 塑膜跑偏气液控制系统

幅调制形式进行控制的系统。

1.2.2.6 时变系统与时不变系统

时变与时不变(定常)系统由控制系统本身决定。时变系统如运行中的导弹由于燃料消耗使自身质量随时间而变化、机械手在运动过程中随着位置不同转矩也随之变化等。这种系统的分析和控制都比较困难,一般情况下可按时不变系统考虑。

1.2.2.7 直线运动控制系统和回转运动控制系统

按照执行元件不同, 液压控制系统可分为直线运动控制系统和回转运动控制系统。前者以液压缸作为执行元件, 后者以液压马达或摆动液压马达作为执行元件。

液压缸是一种实现直线运动常用的执行元件，由于配置方便，不但用于一维控制，还经常用于二维、三维控制。如图 1-10 所示，采用三组伺服阀 2、液压缸 1 及传感器 3，在仿形铣床上， x 及 z 方向的液压缸运动就是工作台的纵向和横向进给， y 方向的液压缸运动即为升降台的升降运动，从而实现立体形状仿形加工。

但进行位置控制、速度控制并不一定都要采用液压缸作为执行元件，为了满足负载力矩和负载速度的要求，或减小负载惯量的影响以提高液压固有频率，或将旋转运动转变为直线运动，经常采用液压马达作为执行元件。工程上许多极精密的系统均是采用液压马达与滚珠丝杠来驱动的。液压马达的控制精度可达几分