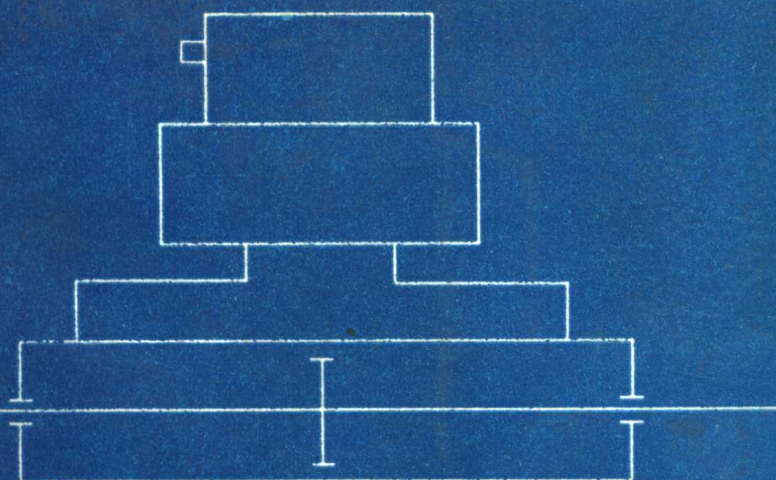


电液控制技术

及其应用

高纪念 蔚长春 编著



石油工业出版社

电液控制技术及其应用

高纪念 蔚长春 编著

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书主要介绍目前国内外电液控制技术的新理论、新元件和新系统的应用。在介绍电液控制技术的基本理论、电子装置、电-机械转换器和液压控制阀的基础上对电液开关控制、电液比例控制和电液伺服控制三种系统进行了分析,对电子计算机在电液控制技术中的应用作了简要地介绍。本书以控制理论为基础,将微电子技术、计算机技术与液压技术有机地结合起来,反映了当前流体传动与控制工程学科的发展趋势。

本书可作为从事液压、机械和机电一体化控制工程的科技人员学习提高的参考资料。也可作为高等工科院校有关专业的选修课教材和研究生教材。

电液控制技术及其应用

高纪念 蔚长春 编著

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京市海淀区东华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 24印张 602千字 印1-2000

1993年6月北京第1版 1993年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0954-4/TE·892

定价: 17.60元

前 言

电液控制技术在20世纪40年代电液伺服系统问世后发展起来的一门比较年轻的应用技术，它是电控与液压两门技术的有机结合，是液压技术的一个重要分支，是机电一体化技术的重要组成部分。微电子技术、计算机技术与液压技术的有机结合已成为当代液压技术的主要发展方向，也是国内外学者当前研究的中心课题。

本书主要着眼于目前国内外电液控制技术的新理论、新元件和新系统的工程应用，加强了基本概念和基础理论的阐述，同时着重分析电液开关控制、电液比例控制和电液伺服控制三种系统。以液压与微电子、计算机技术的结合为基础，在电液控制系统的分析方面提出了一些新的观点和方法。本书将控制理论与工程应用实例融合在一起，深入浅出，有利于具有一定数学、电子和液压基础知识的工程技术人员知识更新和学习参考。

全书共分九章：第一章介绍电液控制系统的组成、分类、工作过程和优缺点。第二章主要介绍与电液控制技术有关的工程控制方面的基本理论；第三章介绍电液控制技术中用到的电子装置；第四、第五章分别讲述电-机械转换器和液压控制阀的功能、原理、结构和特性；第六、第七、第八章分别论述电液开关控制系统、电液比例控制系统和电液伺服控制系统的组成、工作原理和分析方法，并介绍典型应用实例；第九章主要介绍微型计算机和可编程序控制器（PC）在电液控制技术中的应用。

本书由高纪念主编。蔚长春编写第四章；高纪念编写其余八章。

本书由西安交通大学林廷圻教授主审，他对书稿作了认真细致的审阅并提出了许多宝贵的修改意见。王孙安博士对第三章进行了复审并提出了宝贵的意见。

本书编写过程中，赵光理、冯世功等同志给予热情的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

1991年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 电液控制系统的组成.....	(1)
第二节 电液控制系统的分类.....	(2)
第三节 电液控制系统的工作过程.....	(3)
第四节 电液控制系统的优缺点.....	(5)
第二章 电液控制的基本理论	(7)
第一节 概述.....	(7)
一、电液控制系统的动态过程.....	(7)
二、电液控制系统的评价指标.....	(7)
三、术语解释.....	(8)
第二节 数学模型.....	(10)
一、微分方程.....	(10)
二、拉氏变换.....	(16)
三、传递函数.....	(19)
四、函数方块图.....	(25)
五、频率特性.....	(30)
第三节 系统的稳定性.....	(37)
一、稳定性概念.....	(37)
二、系统的稳定条件.....	(38)
三、稳定判据.....	(38)
第四节 系统的稳态误差.....	(42)
一、误差与稳态误差.....	(43)
二、系统的类型与输入信号.....	(44)
三、静态误差系数.....	(45)
第五节 系统的时间响应.....	(47)
一、一阶系统的时间响应.....	(48)
二、二阶系统的时间响应.....	(49)
三、高阶系统的时间响应.....	(56)
第六节 系统的校正.....	(57)
一、串联校正.....	(58)
二、反馈校正.....	(61)
三、复合校正.....	(61)
第七节 状态空间表达式的概念.....	(62)
一、术语解释.....	(62)
二、状态空间表达式及实例.....	(63)
第三章 电液控制中的电子装置	(69)

第一节 电子控制放大器	(69)
一、开关型放大器	(69)
二、比例放大器	(70)
三、伺服放大器	(74)
四、步进电机驱动器	(84)
第二节 传感器	(86)
一、位移传感器	(86)
二、速度传感器	(96)
三、扭矩传感器	(98)
四、力(压力)传感器	(101)
五、流量传感器	(105)
六、温度传感器	(110)
七、传感器选用原则	(112)
第三节 控制信号发生器	(115)
一、手调电位器	(115)
二、非周期函数发生器	(116)
三、周期函数发生器	(117)
第四节 中间转换器	(119)
一、电桥	(120)
二、调制与解调器	(123)
三、滤波器	(126)
四、模拟、数字转换器	(130)
第四章 电-机械转换器	(137)
第一节 开关电磁铁	(137)
第二节 比例电磁铁	(138)
一、比例电磁铁的工作原理	(138)
二、比例电磁铁与开关电磁铁的对比	(141)
第三节 力矩马达	(142)
一、力矩马达的工作原理	(142)
二、力矩马达的种类	(143)
三、极化永磁动铁式力矩马达	(144)
四、动圈式力矩马达	(160)
第四节 步进电机	(163)
一、步进电机的工作原理	(163)
二、步进电机的特性	(165)
第五节 电致伸缩式电-机械转换器	(166)
第五章 液压控制阀	(169)
第一节 滑阀	(169)
一、滑阀的结构、分类和工作原理	(169)
二、滑阀的静特性	(170)

三、滑阀的受力分析·····	(183)
四、滑阀的功率和效率·····	(190)
第二节 喷嘴挡板阀·····	(191)
一、喷嘴挡板阀的分类、结构和工作原理·····	(191)
二、喷嘴挡板阀的静特性·····	(192)
三、喷嘴挡板阀的受力分析·····	(199)
第三节 射流阀·····	(201)
一、射流阀的工作原理·····	(201)
二、射流阀的静特性·····	(202)
三、射流阀的特点·····	(206)
第六章 电液开关控制系统 ·····	(207)
第一节 开关型电液控制元件·····	(207)
一、电磁换向阀·····	(207)
二、电磁球阀·····	(214)
三、电液换向阀·····	(215)
四、换向逻辑阀·····	(217)
第二节 电液开关控制的基本回路·····	(218)
一、电液换向控制回路·····	(218)
二、电液换速控制回路·····	(220)
三、电液换压控制回路·····	(222)
四、电液顺序控制回路·····	(223)
第三节 电液开关控制系统的组成、工作原理及应用·····	(225)
一、电液开关控制系统的组成·····	(225)
二、电液开关控制系统的工作原理·····	(226)
三、电液开关控制系统的应用·····	(227)
第四节 电液开关控制系统的分析·····	(233)
一、基本概念·····	(233)
二、实例分析·····	(235)
第七章 电液比例控制系统 ·····	(241)
第一节 概述·····	(241)
一、电液比例控制系统的构成·····	(241)
二、电液比例控制系统的特点·····	(241)
三、电液比例控制系统的分类·····	(242)
四、电液比例阀的性能指标·····	(242)
第二节 电液比例压力控制系统·····	(245)
一、电液比例压力阀·····	(245)
二、电液比例压力控制系统及应用·····	(249)
第三节 电液比例流量控制系统·····	(253)
一、电液比例流量阀·····	(253)
二、电液比例流量控制系统及应用·····	(259)

第四节 电液比例方向控制系统·····	(261)
一、电液比例换向阀·····	(261)
二、电液比例方向控制系统及应用·····	(264)
第五节 电液比例变量泵控制系统·····	(268)
一、电液比例变量泵·····	(268)
二、电液比例变量泵控制系统及应用·····	(270)
第八章 电液伺服控制系统·····	(272)
第一节 电液伺服阀·····	(272)
一、电液伺服阀的构成·····	(272)
二、电液伺服阀的分类·····	(273)
三、电液伺服阀的工作原理·····	(273)
四、电液伺服阀的分析·····	(274)
五、几种典型的电液伺服阀·····	(289)
六、电液伺服阀的选用原则·····	(300)
第二节 电液步进元件·····	(304)
一、电液步进马达·····	(304)
二、电液步进油缸·····	(307)
第三节 电液伺服控制系统及应用·····	(308)
一、电液伺服控制系统的分类·····	(308)
二、电液位置伺服控制系统·····	(308)
三、电液速度伺服控制系统·····	(330)
四、电液力(压力)伺服控制系统·····	(336)
第九章 计算机在电液控制技术中的应用·····	(351)
第一节 计算机-液压控制系统·····	(351)
一、计算机-液压控制系统的分类·····	(351)
二、计算机-液压控制系统的基本知识·····	(353)
第二节 电液控制元件及系统的计算机仿真·····	(360)
一、仿真技术·····	(360)
二、计算机数字仿真步骤·····	(361)
三、DSH软件系统及应用·····	(362)
第三节 电液控制元件及系统模型辨识·····	(364)
一、模型辨识的原理·····	(364)
二、模型辨识的步骤·····	(365)
第四节 电液控制元件及系统的计算机辅助设计(CAD)·····	(366)
一、计算机辅助绘图·····	(366)
二、优化设计·····	(367)
第五节 电液控制元件及系统的计算机辅助测试(CAT)·····	(368)
一、CAT系统的模式·····	(369)
二、CAT系统计算机配置·····	(369)
三、软件要求·····	(370)

第六节 电液控制系统的故障诊断.....	(373)
主要参考文献	(375)

第一章 绪 论

电液控制技术是一门较为年轻的应用技术。它是机电一体化技术的一个重要组成部分，是电控和液压控制的有机结合。作为连接电子技术和大功率工程控制设备之间的桥梁，电液控制技术已经成为现代控制工程的基本技术构成之一。近年来微电子技术和计算机技术突飞猛进的发展并且不断向液压学科渗透，进而强化了液压控制，促使电液控制技术进入到一个新的发展阶段。

电液控制系统是根据电液控制技术的基础理论建立起来的一种工程控制系统。它早期用于军事工业，后来逐步向民用工业推广，如火炮、雷达、飞机、航海、火箭、导弹、人造卫星等的跟踪和控制系统；机床工业的仿形机床、数控机床、电火花加工机床的控制装置；船舶工业的舵机操纵和消摆系统；冶金工业的电炉电极自动升降恒功率控制系统；试验设备中的振动试验台、材料试验机、轮胎试验机等的控制和加载系统；锻压设备中的挤压速度和液压机位置同步的伺服系统；轧制设备中的轧机液压压下系统、带材连续生产线的跑偏和张力控制系统；钢管自动生产线中的操作和控制系统；石油机械中的可控震源、电液模拟和被动加载系统等。它已占领了相当广泛的工程应用领域并且日渐扩大。

第一节 电液控制系统的组成

工程实际中的电液控制系统有简单的和复杂的，功能和结构也各不相同，但都是由一些基本元件所组成，见图1-1所示。其基本元件是：

①输入元件 它产生指令信号（也称输入信号或控制信号），加于系统的输入端。它可以是人工调节的电位器，也可以是函数发生器、可编程序控制器（PC）或计算机。

②检测、反馈元件 检测系统的输出量，并将其转换成反馈信号。它绘出的反馈信号应同

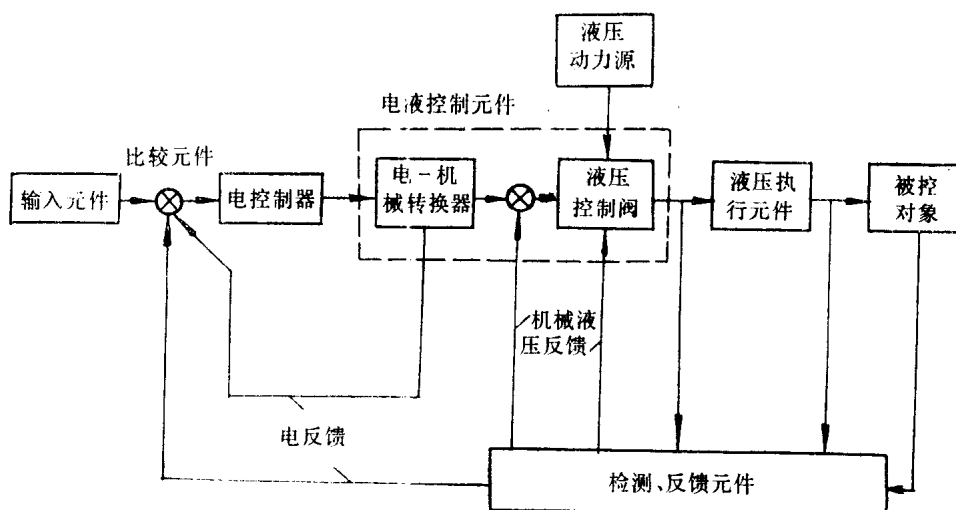


图1-1 电液控制系统的组成

指令信号有相同的形式和量纲,以便进行比较。

③比较元件 把指令信号同反馈信号加以比较,给出偏差信号,其实质是一个减法器。它可以是运算放大器,也可以由计算机实现。

实际工程系统中比较元件并不一定单独存在,有时比较元件与放大元件组合在一起,有时是输入元件、反馈元件和比较元件组合在一起构成误差(或偏差)检测器。

④电控制器 是一个电子放大器,也称电驱动器。其功能是将微弱的偏差信号(或输入信号)放大并转换为电-机械转换器所要求的电信号。它是电液控制系统的重要组成部分,必须具有足够的输出功率和良好的静态和动态特性。

⑤电液控制元件 经常由电-机械转换器和液压控制阀结合而成,常用的有电液换向阀、电液比例阀、电液伺服阀等。其功能是将电信号转换成液压信号(压力和流量)并加以放大,然后再输入给液压执行元件。

⑥液压执行元件 包括液压缸和液压马达,其功能是将液压能(压力和流量)转换成机械能(力和位移或力矩和转角),直接驱动被控对象。为了使驱动特性与被控对象的负载特性相匹配,还可以附加变速机构,如液压马达和齿轮传动的结合等。

⑦被控对象 是为完成一定的工艺过程所需动作的机械装置,如工作台、滚筒等。从力学观点来看,被控对象就是负载力,且可分为惯性力、恒力、弹性力、摩擦力、流体力和随机力等,工程实际中通常都是几种负载力的组合。

⑧液压动力源 主要由液压泵-电机组、液压阀、滤油器、蓄能器、油箱、冷却器等组成,为系统提供压力油。通常使用由定量泵和溢流阀组成的恒压油源,有时也使用由定量泵、溢流阀和其它阀类组成的恒流油源,大功率情况下采用由变量泵组成的变流油源。液压动力源是不包含在控制回路内的。

此外,在电液控制系统中还可能各种校正装置和辅助装置。

第二节 电液控制系统的分类

电液控制系统的种类很多,可按不同的原则进行分类。

按电液控制元件的种类分类

①电液开关控制系统 利用开关型电液阀作控制元件的系统;

②电液比例控制系统 利用电液比例阀或电液比例变量泵作控制元件的系统;

③电液伺服控制系统 主要以电液伺服阀为控制元件的系统。

按被控的物理量分类

①电液位置位移控制系统;

②电液速度(流量)控制系统;

③电液力(压力)控制系统。

按对液压执行元件的控制方式分类

①阀控(节流控制)系统 由电液伺服阀或电液比例阀通过节流原理控制流入液压执行元件的流量和压力的系统;

②泵控(容积控制)系统 利用伺服变量泵或比例变量泵改变排量的办法控制流入液压执行元件的流量和压力的系统。

阀控系统还可进一步分为恒压系统和恒流系统。在恒压系统中油源以恒定的压力向系统供油；在恒流系统中油源以恒定的流量向系统供油。

按系统输入信号的变化规律分类

①伺服控制系统 输入信号是任意变化的系统；

②定值控制系统 输入信号为恒定的常值，当内外干扰不断变化时系统输出量保持不变；

③程序控制系统 输入信号是按程序预先规定好设定值的系统。

按系统输出信号是否反馈分类

①闭环系统 系统输出信号进行反馈且与输入信号进行比较的系统；

②开环系统 系统输出信号不进行反馈的系统。

第三节 电液控制系统的工作过程

本节通过几个典型的工程实例来分析电液控制系统的工作过程。

图1-2所示为工作台往复运动电液开关控制系统。当可编程序控制器PC无指令信号输出时，放大器亦无输出信号，电液换向阀处于中位，液压泵卸荷，液压缸和工作台静止不动。当PC有指令信号时，若放大器发出的驱动信号使电磁铁1DT通电，电液换向阀的阀芯向右移动，压力油通向B口并经单向阀进入液压缸右腔，活塞带动工作台左移。当工作台左移碰到位置开关1k时，1k发出信号给PC，PC发出指令信号，通过放大器同时使电磁铁1DT断电，

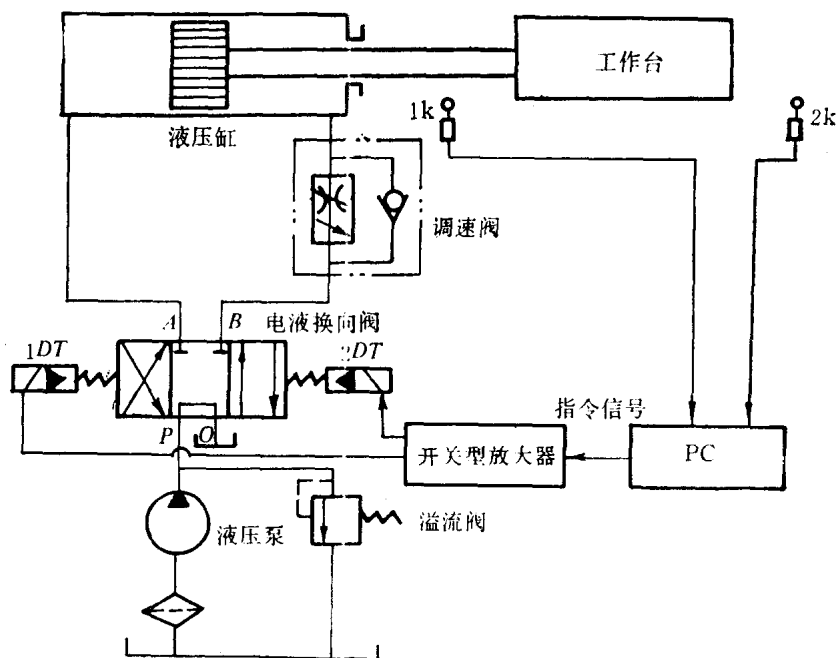


图1-2 工作台往复运动电液开关控制系统

2DT通电，电液换向阀反向动作，压力油通向A口并进入液压缸左腔，活塞带动工作台换向并右移。当工作台右移碰到位置开关2k时，类似上述，活塞带动工作台换向左移。依此循

环，实现工作台的往复运动。

由图可知，工作台向右移动的速度可由调速阀来调节，而工作台向左移动是快速运动，其速度由液压泵的流量决定。系统的最大压力由溢流阀调定。

图1-3所示为工作台往复运动速度电液比例控制系统。往复运动的速度可无级调节，调速范围为1:10以上。电液比例流量阀的输出流量与电控制器供给它的输入电流成正比；液流的流动方向取决于比例电磁铁a和b中哪一个通电，而工作台往复运动速度的大小和方向与电液比例流量阀输出流量的大小和液流方向有关，因此，计算机发出的指令信号通过比例放大器改变电液比例流量阀输入电流的大小和使不同的比例电磁铁通电，就很容易实现工作台往复运动速度大小和方向的控制。

图1-4所示为滚筒转速电液伺服控制系统。当函数发生器的速度指令电压 e_i 为零时，电

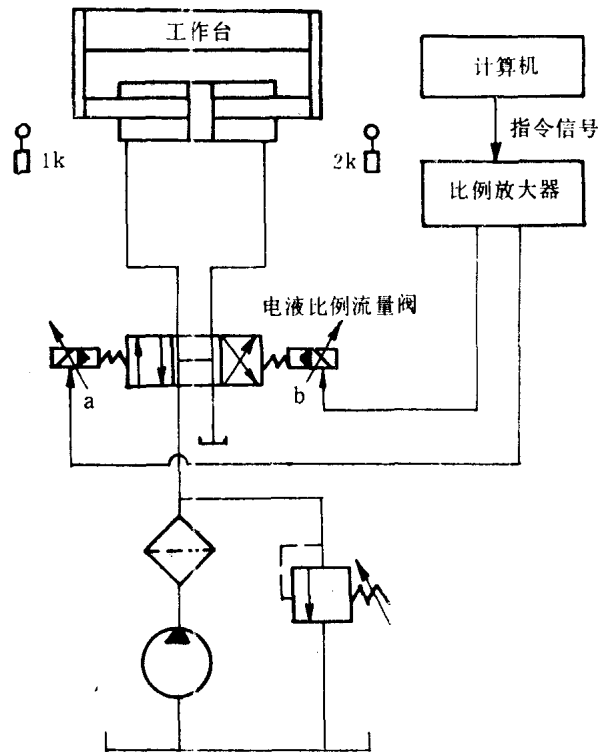


图1-3 工作台往复运动速度电液比例控制系统

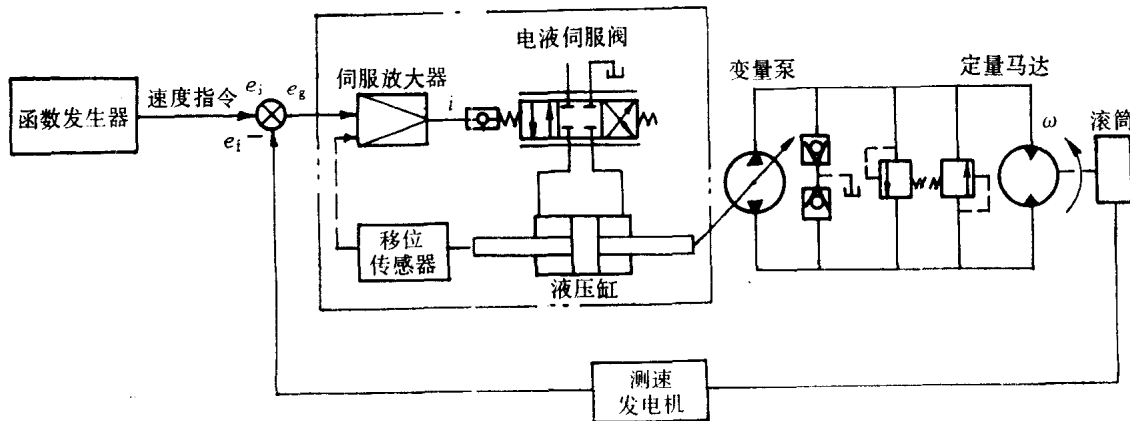


图1-4 滚筒转速电液伺服控制系统

液伺服阀无输入电流,无流量进入液压缸,变量泵亦无输出流量,定量马达静止不转动,滚筒亦不转动。当函数发生器有速度指令电压 e_i 时,通过比较器指令电压 e_i 与反馈电压 e_f 比较,产生偏差电压 $e_g=e_i-e_f$,经过伺服放大器将 e_g 放大并变成电流信号 i ,将 i 输入到电液伺服阀,根据 i 的大小和极性控制电液伺服阀的输出流量和方向,使液压缸输出相应的位移,这个位移通过变量泵的变量机构改变其摆角,调节泵的排量、控制定量马达的转速 ω ,从而达到对滚筒转速的控制。反馈电压 e_f 是通过测速发电机而产生的, e_f 与滚筒转速 ω 成比例。如果指令电压 e_i 不断变化,则滚筒转速 ω 也相应变化,反馈电压 e_f 亦跟着变化,一旦反馈电压 e_f 与指令电压 e_i 相等,即 $e_g=e_i-e_f=0$,则电液伺服阀输出流量为零,液压缸保持一定的位移,变量泵的排量一定,定量马达的转速保持恒定,即滚筒保持恒转速。

比较上述三个实例可知:图1-2是一个带有位置开关反馈的电液开关控制系统;图1-3是一个有位置开关反馈的电液比例控制系统;图1-4是一个具有测速发电机反馈的电液速度伺服控制系统。这三个系统的工作过程具有代表性,是三种典型的电液控制系统,即电液开关控制系统、电液比例控制系统和电液伺服控制系统,这三大系统是电液控制的核心,也是本书讨论的主要内容。

第四节 电液控制系统的优缺点

电液控制系统与其它类型的控制系统相比,具有许多现代工程上所需要的优点,使它获得了广泛的应用。但是它也存在着一些缺点,从而限制了它的应用范围。

一、电液控制系统的主要优点

①电液控制系统兼有电子元件信号处理快速、方便和液压元件功率大、刚度高、动态特性好等特点,为现代工程控制的较佳形式。

②微电子技术的飞速发展为电液控制系统的数字化、计算机(包括可编程序控制器PC)应用以及控制技术的新发展开辟了广阔的前景。

③液压执行元件响应速度快,从而使回路增益提高、频带加宽。如电动机就电压-转速而言,基本上是一个简单的惯性环节;而液压执行元件(液压缸或液压马达)就流量-速度而言,基本上是一个固有频率很高的二阶振荡环节,因而液压执行元件的响应速度快,能高速起动、制动和换向。

④液压执行元件负载刚度大,控制精度高。油液压缩性小,因而负载刚度大。泄漏较小,它引起的速度柔度也较小,从而速度刚度较大,即速度-力矩曲线斜率的倒数较大,用于闭环控制系统,其位置刚度较大,位置误差较小。

此外,还有一些显而易见的优点,如元件润滑性能好,寿命长;低速稳定性好,调速范围大;借助管道动力传输较方便;依靠蓄压器可方便地储存能量;液压执行元件的开环和闭环控制回路都很简单等。

二、电液控制系统的主要缺点

①电与液结合,控制技术的难度较大,要求知识结构较全面。

②液压控制元件要求精度高,因而价格贵。

③油液易受污染,会使元件堵塞或使元件性能受到损害。由于使用者对油液的清洁度重

视不够，有时系统会因油液污染而失效，这就降低了系统的可靠性。

④液体的体积弹性模数随温度和混入油中的空气含量而变，影响系统性能。温度对液体的粘度影响很大：低温时粘度大，液体流动摩擦损失增大；高温时粘度小，泄漏增加。油液中空气含量增加会增大油液的可压缩性降低系统刚度，同时容易产生气穴现象。

由上述电液控制的主要优缺点可知，它的应用具有广泛性，但也有一定的局限，应具体分析使用。

第二章 电液控制的基本理论

电液控制系统是重要的工程控制系统，它是工程控制理论的重要研究对象。特别是在分析和设计闭环电液比例控制系统和电液伺服控制系统时，必须以工程控制理论作为基础来分析研究系统的性能。本章主要介绍电液控制系统中经常用到的工程控制理论的基础知识。

第一节 概 述

一、电液控制系统的动态过程

如果一个电液控制系统的被控量（流量、压力、位移、速度、力等）处在一个相对稳定的平衡状态，将这种状态称为系统的稳态或静态。当系统受到输入信号或干扰信号的作用后，被控量（输出信号）将跟踪输入信号并达到一个新的平衡状态或对干扰信号的影响力图抑制，但由于电液控制系统中总是存在有惯性或贮能元件（如质量、蓄能器、弹簧等），以及油液压缩性的影响，使系统的被控量从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态或对干扰的响应不可能是一个突变而瞬时完成，总是有一个过渡过程，将这个过渡过程称为系统的动态过程，也称为瞬态过程或暂态过程。

系统的动态过程是破坏原有的平衡状态后建立一个新的平衡状态或经过一段历程又回到原有平衡状态时系统运动的全过程。系统的控制作用过程包括稳态（静态）和动态过程，而往往一个系统的稳态性能完全符合要求，但其动态性能不一定就能符合要求，因此在分析和设计电液控制系统时必须全面考虑稳态（静态）和动态两个方面的问题。

二、电液控制系统的评价指标

电液控制系统能不能满足工程使用的要求，系统性能的好坏常常用稳定性、稳态误差、快速性，即稳、准、快三个方面的性能指标进行评价。

1. 稳定性—稳

稳定性是指系统动态过程的振荡倾向或系统在受干扰作用后重新恢复平衡状态的能力。如果系统受到外加作用（输入作用或干扰作用）时，其输出量随时间的增加而衰减且最终达到某一稳定值，这种系统被称为是稳定系统；如果输出量随时间的增长而递增或等幅、增幅振荡，则这种系统被称为是不稳定系统。显然，不稳定系统根本是不能完成控制任务的，因此，对系统稳定性的要求是最基本的。

2. 稳态误差—准

稳态误差也称为静态误差，它是系统达到新的平衡状态或系统受干扰重新恢复平衡状态之后，最终保持的精度。它反映了系统动态过程后期的性能。稳态误差表示系统工作的准确性，应满足系统工作精度的要求。

3. 快速性—快

快速性是指系统动态过程进行时间的长短。实质是系统对外加作用（输入或干扰）响应快慢的特性。如果系统快速性差，即响应慢，则在动态过程中会使系统长久地出现大偏差，

同时说明系统反映迟钝，难以复现快速变化的指令信号。

电液控制系统的稳定性、稳态误差和快速性主要与系统本身结构参数有关，也可能与外加作用有关。它们三者之间是互相联系的，往往相互又有矛盾，如提高系统的快速性，有可能引起系统强烈的振荡，趋向不稳定，即降低了系统的稳定性；如增加稳定性，则系统的响应有可能变慢，即降低快速性，甚至有时会使稳态误差增大。由于受控对象的不同，所用系统对稳、准、快三项要求是有所侧重的，如对电液速度控制系统要求较好的稳定性；对高精度位置控制系统重点要求准确性；对于飞行器姿态控制的电液控制系统首先要求有较好的快速性。

三、术语解释

下面对一些常用的术语进行简要的解释，以便对控制系统及控制理论建立初步概念。

1. 控制系统

将一些元部件以及装置或计划进行组合，使其能完成预定的功能或达到某一目的，称这种组合为控制系统。这个定义的含义是非常广泛的，它不仅包含电子器件、液压阀和液压缸这类实体元件组成的物理系统，而且还包括一些抽象的动态现象，如经济学中的经济运行系统，人口学中的人口变迁系统等都可各目组成控制系统。

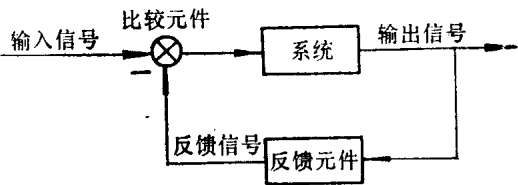


图2-1 反馈控制系统

2. 反馈信号和反馈控制系统

由反馈元件输出并送入比较元件与输入信号进行比较的信号称为反馈信号（如图2-1所示），它是与输入信号具有相同形式的物理量。反馈信号可以是输出信号本身，也可以是输出信号的函数。

当反馈信号与输入信号符号相同时叫正反馈，符号相反时叫负反馈。直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈，否则为局部反馈。局部反馈往往是为了对系统进行补偿、线性化而设的，有些局部反馈是元件所固有的。

具有主反馈回路的系统称为反馈控制系统。主反馈一定是负反馈，因为正反馈会使偏差越来越大，直至系统完全失控。严格地说，反馈控制系统都是负反馈控制系统。

3. 开环控制系统

若系统输出量对系统的控制作用不产生影响，即无反馈的系统称为开环制控系统。在开环控制系统中，通常输入信号是预先确定的，系统的控制精度取决于各元件、部件的精度。如图2-2所示普通洗衣机的控制就是一个开环控制系统，人根据经验设定洗衣时间后，不管衣服洗干净与否，设定时间一到立即自动停止，输出量（衣服的清洁度）对系统的控制作用不产生任何影响。

4. 闭环控制系统

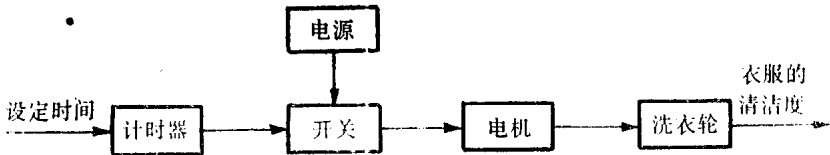


图2-2 普通洗衣机控制原理图