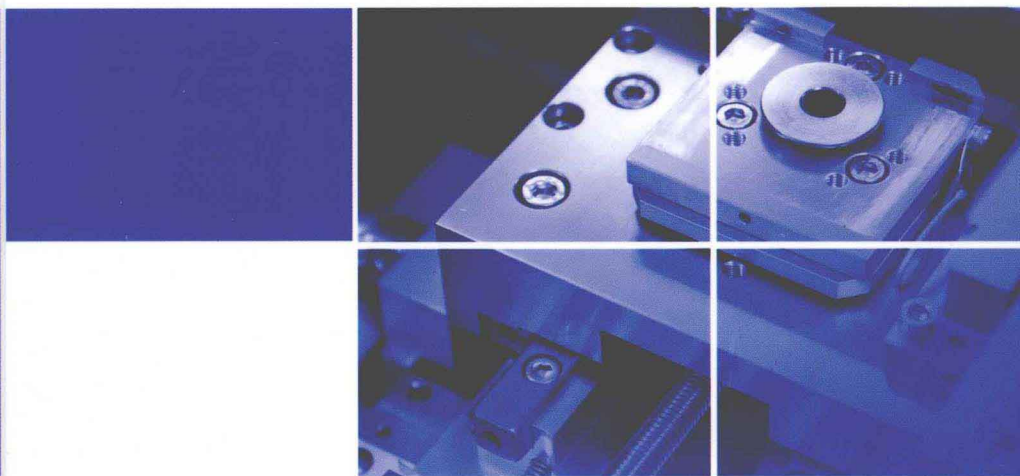


普通高等教育“十二五”规划教材



机电控制基础

尚雅层 侯志敏 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

机电控制基础

尚雅层 侯志敏 编
卢京潮 主 审



机械工业出版社

本书以经典控制理论为基本内容,主要讨论机电控制系统的分析和综合方法。内容主要包括:机电控制系统的结构及基本组成、控制系统数学模型的概念及类型、机电系统的动态建模、系统的时域分析、系统的根轨迹分析、系统的频域分析、系统的综合与校正以及线性离散控制系统的概念、分析与校正。

本书的特点是以机电控制系统中的控制问题为主导,力求在讲清基本概念及基本分析方法的前提下,更多地结合实际,多举实例,突出了用控制理论处理实际问题的思想和方法。本书既重视控制理论的基础知识介绍,又加强了根据实际机电控制系统的工作原理建立数学模型的方法;在实际系统中验证理论,用所学的理论分析、设计所需要的控制系统;对基本理论和分析方法的阐述,淡化了繁冗的理论推导,内容精炼,重点突出。

本书可作为高等工科学校本科机械设计制造及其自动化、电气自动化和机电一体化等专业的“控制工程基础”课程教材,也可作为相关专业的教学参考书,同时还可供从事控制工程的教师与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制基础/尚雅层,侯志敏编. —北京:机械工业出版社,
2013.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-42395-9

I. ①机… II. ①尚… ②侯… III. ①机电一体化—控制系统—
高等学校—教材 IV. ①TH—39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第092285号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:舒恬 责任编辑:舒恬 苑文环 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:丁丽丽

封面设计:张静 责任印制:张楠

高教社(天津)印务有限公司印刷

2013年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·460千字

标准书号:ISBN 978-7-111-42395-9

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工微博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的发展,机械制造越来越密切地依赖于电子技术、检测技术、自动控制技术及计算机技术等现代科学技术,形成了以产品或系统整体最优化为目标,以自动控制为核心的高性能、多功能的设计和生 产模式,这是制造业的一场深刻变革。教育部于 2007 年 1 月颁布了《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,同年 2 月又颁布了《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》,其核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,进一步转变人才培养模式,改革教学内容和方 法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。“机电控制基础”是机械设计制造及其自动化专业的一门专业基础课。它主要用于培养学生利用控制理论的思想和方法分析、解决工程领域中出现的控制问题的能力:一方面要加强控制理论的基础知识,另一方面要与本专业的实际问题相结合,能够根据机电控制系统的工作原理建立其数学模型,对系统的性能进行分析和校正,同时能根据系统的性能指标要求设计出满意的控制系统。基于以上思想,本书从阐述经典控制理论的基本概念、基本原理入手,结合机电控制系统的工作原理,介绍了机械和电气控制系统常用典型环节的动态建模方法,深入浅出地介绍了控制系统的时域和频域分析方法以及常用的系统校正方法等内容。本书具有以下几个特点:

1) 从机电控制系统的实例出发,通过介绍其工作原理,引出机电控制系统的基本控制问题。要解决控制问题,就需要理论指导,因此,接着介绍控制理论的基本内容,并在讲解理论的过程中不断引入实例。这样从实际到理论再到实际的过程,便于读者对抽象理论的理解,提高了学习效率。

2) 对基本理论和分析方法的阐述,淡化了繁冗的理论推导,内容精炼、重点突出,强调理论的实际应用。

3) 复杂的机电控制系统是由简单的环节组成的,因此,重点介绍了机械和电气控制系统常用典型环节的动态数学模型的建立。这样,根据基本的控制理论及系统的组成,就可以很容易得到整个系统的数学模型,提高读者对实际机电控制问题的处理能力。

4) 为了便于读者自学和更好地掌握基本的理论知识,培养分析、综合和解决实际问题的能力,各章均有适当的例题和习题供读者学习使用。

本书第 2 章由侯志敏编写,其余各章节均由尚雅层编写,并负责全书的统稿。西北工业大学卢京潮教授仔细审阅了书稿并提出了不少宝贵的修改意见。西北工业大学贾秋玲副教授也审阅了书稿,并提出了修改意见。在此,谨向上述老师们一并表示衷心感谢!

由于编者的水平有限,对书中存在的错误与不妥之处,恳请广大读者和同行批评指正。

尚雅层

目 录

前言		指标	136
第一章 绪论	1	习题	139
第一节 自动控制系统的基本概念	1	第六章 线性系统的频域分析	140
第二节 自动控制系统示例	10	第一节 引言	140
习题	13	第二节 频率特性的概念及几何表示	140
第二章 控制系统的数学模型	16	第三节 幅相频率特性曲线	145
第一节 数学模型的概念	16	第四节 对数频率特性曲线	155
第二节 系统的微分方程	18	第五节 频域稳定判据	168
第三节 拉普拉斯变换	20	第六节 控制系统的相对稳定性—— 稳定裕度	180
第四节 传递函数	26	第七节 利用开环对数幅频特性分析 系统的性能	183
第五节 系统的结构图及其简化	35	第八节 利用闭环频率特性分析系统的 性能	186
第六节 信号流程图	43	习题	188
习题	49	第七章 控制系统的综合与校正	192
第三章 机电系统的动态建模	52	第一节 系统综合与校正的基本概念	192
第一节 机械系统数学模型的建立	52	第二节 串联校正	200
第二节 信号放大与驱动系统数学 模型的建立	65	第三节 反馈校正	216
第三节 闭环直流调速系统数学模型的 建立	77	第四节 复合校正	219
习题	81	习题	222
第四章 线性系统的时域分析	84	第八章 离散控制系统	223
第一节 时域分析概述	84	第一节 离散系统的基本概念	223
第二节 一阶系统的时域响应	86	第二节 采样过程与采样定理	225
第三节 二阶系统的时域响应	89	第三节 z 变换	231
第四节 高阶系统的阶跃响应	97	第四节 离散系统的数学模型	241
第五节 线性系统的稳定性分析	100	第五节 离散系统的稳定性	249
第六节 控制系统的稳态误差分析和计算	107	第六节 离散系统的稳态误差	252
习题	117	第七节 离散系统的动态性能分析	254
第五章 根轨迹法	121	第八节 离散系统的数字校正	258
第一节 根轨迹法的基本概念	121	习题	262
第二节 绘制根轨迹的基本法则	126	参考文献	265
第三节 系统闭环零、极点的分布与性能			

第一章 绪 论

第一节 自动控制系统的基本概念

一、自动控制的定义与发展

“控制”一词，如今已相当广泛地应用在各行各业，如温度控制、微机控制、液压控制及人口控制等。所谓控制，就是为达到某种目的，对某一对象施加所需的操作。在工程上，控制是指使一个对象（或过程）按一定的规律运行或变化。

自动控制的定义就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象的某些物理量（或工作状态）自动地按照预定的规律变化。例如，数控机床按照预定程序自动地切削工件；化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定；无人驾驶飞机按照预定航线自动升降和飞行；人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等。这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

所谓“自动控制系统”，就是为了实现各种复杂的控制任务，将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成一个有机整体。其中的控制装置可以对被控对象施加控制作用，而被控对象的输出量，即被控量，是需要严格加以控制的物理量。可以要求被控对象的输出量保持为某一恒定值，如温度、压力及液位等，也可以要求被控对象按照某个给定规律运行，如飞行航线、加工工件等控制。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理，主要用于工业控制。控制论的奠基人美国科学家维纳（Wiener N.）从1919年开始萌发了控制论的思想，1940年提出了数字电子计算机设计的5点建议。第二次世界大战期间，维纳参加了火炮自动控制的研究工作，他把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为作了对比，并且提炼出了控制论中最基本和最重要的反馈概念。他提出，准确控制的方法可以把运动结果所决定的量作为信息再反馈回控制仪器中，这就是著名的负反馈概念。例如，驾驶车辆也是由人参与的负反馈调节，人们不是盲目地按照预定不变的模式来操纵车上的方向盘，而是发现行驶靠左了，就向右做一个修正；反之亦然。火炮自动控制的研制获得成功是控制论萌芽的重要实物标志。1948年，维纳所著的《控制论》的出版，标志着这门学科的正式诞生。

20世纪50年代以后，一方面在控制论的指导下，火炮及导弹控制技术得到了极大地发展，数控、电力及冶金自动化技术突飞猛进；另一方面，在自动控制装备的需求和发展的基础上，控制论也不断向纵深发展。1954年，我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法，出版了英文版的《工程控制论》，首先把控制论推广到了工程技术领域。接着的几十年里，在各国科学家的努力下，又相继出现了生物控制论、经济控制论等。控制论已经渗透到各个领域，并伴随着其他科学技术的发展，极大地改变了整个世界。

自动控制理论是工程控制论的一个分支，是自动控制学科的基础理论，分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论的内容是以传递函数为基础，以频率法和根轨迹法作为分析和综合系统的基本方法。主要研究单输入、单输出控制系统的分析和设计问题。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上,于20世纪60年代以后发展起来的。它的主要内容是以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数及非线性等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最优滤波、系统辨识及自适应控制等理论都是这一领域的重要分支。

二、自动控制系统的工作原理

实现自动控制的一种最基本的方法是采用反馈原理,下面举例说明如何将一个系统由人工控制系统变为自动控制系统。

图1-1所示为一台直流发电机1向负载供电。由于负载的变化和其他原因,发电机的端电压 U 时时都在波动。为了把电压波动限制到尽量小的范围内,由一名操作工人监视电压表3。当发现 U 偏离规定的数值(称为整定值) U_0 时,就调节变阻器4,以改变通过励磁绕组2的电流 I_f ,从而改变发电机的电动势 E ,使端电压 U 恢复为整定值。这样就能实现物理量 U 以某种精度按照指定规律变化(在本例是保持其等于整定值 U_0)了,也就实现了对发电机端电压的控制。

在本例中,发电机是被控对象,其端电压 U 是被控量。控制过程可以这样表述:检测被控量的值并与它的整定值相比较,根据二者之差(称为误差或偏差)而改变被控对象的某个物理量(本例是励磁电流 I_f),通过它来影响被控量,使之不断接近整定值。

从被控对象获取被控量的信息,据此作出控制的决策,把调节作用施加到被控对象,这就是反馈控制。信息的传送途径是从被控对象经过控制器又回到被控对象,形成了一个自身闭合的环。反馈控制就是通过这个由被控对象和控制器组成的闭环实现的。它们二者互相作用,互相制约,构成一个整体,称为闭环控制系统。该系统有其自身的运动规律,比单一控制器或单一被控对象的运动规律更复杂。

既然反馈控制的目的是要消除(至少是要减小)被控量与其整定值之间的偏差,不言而喻,控制作用的方向就必须与偏差的方向相反。在本例中,当端电压高于整定值时,调节变阻器的方向必须是使发电机的电动势降低;反之,当端电压偏低时,则必须使电动势升高。这样的反馈称为负反馈。注意:这里的“负”字是指控制作用的方向与偏差的方向相反这一性质,而不是指某一物理量的极性为负。

在图1-1所示的控制系统中,控制作用是由人工实现的,它不是自动控制系统。要把它改为自动控制系统,应当做到以下几点。

首先,要把由人调节变阻器大小的任务改由机械完成。可以按照图1-2a那样采用一台小电动机5和适当的减速传动机构6与变阻器相连接。

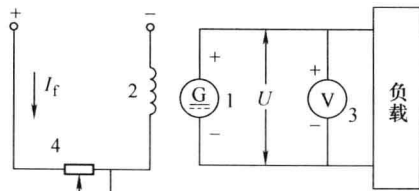


图 1-1 直流发电机端电压的控制

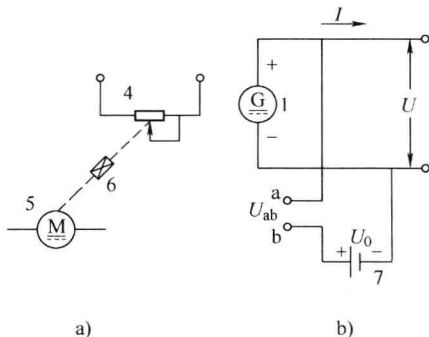


图 1-2 用控制装置代替人工的操作

其次,把由操作工人观察电压表并判断电压偏差的工作改由图1-2b的电路完成。图中使用

了稳压电源 7，其电压等于端电压的整定值 U_0 ，因此，图 1-2b 中的电压 U_{ab} 就等于偏差电压，即 $U_{ab} = U - U_0$ 。当电压 U 比整定值 U_0 高时，电压 U_{ab} 为某一极性；而当 U 比 U_0 低时，电压 U_{ab} 的极性则与此相反。

从理论上讲，可以把偏差电压 U_{ab} 与执行电动机 5 连接起来，用 U_{ab} 驱动执行电动机旋转。旋转的方法应当是：当端电压 U 高于整定值 U_0 时， U_{ab} 的极性使执行电动机的旋转方向实现增大变阻器 4 的电阻值，从而减小励磁电流，使 U 降低；而当 U 低于 U_0 时则相反。这样就代替了图 1-1 中的人工操作。

但是，偏差电压 U_{ab} 的值可能很小，不足以驱动执行电动机。因此需要在 U_{ab} 与执行电动机之间连接放大器，这样就构成了图 1-3 所示的系统。图中的 8 就是放大器，它的输出电压极性应随输入电压 U_{ab} 的极性而变，并且其幅度和功率应足以驱动执行电动机 5，这样就可以实现自动控制了。

图 1-3 就是一个完整的自动控制系统。如果设计得当，它可以不需要人的直接参与而以一定的精度把端电压 U 近似维持为 U_0 。当发电机的负载变化或由于其他原因而使 U 偏离 U_0 时，执行电动机 5 就会自动调节变阻器 4，使 U 返回 U_0 。

利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。实现自动控制的装置可能各不相同，但反馈控制的原理都是相同的。因此，可以说，反馈控制是实现自动控制的最基本方法。

三、自动控制系统的基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外，还有开环控制和复合控制方式，它们都有各自的特点和适用场合。随着电子计算机的发展，新的控制方式也有了很大发展，如最优控制、自适应控制及模糊控制等。

1. 开环控制方式

所谓开环控制，是指控制器与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系的控制。这类控制系统的控制作用直接由系统的输入量产生，输出量并不影响其控制作用。图 1-4 所示的电加热炉系统就是一个开环控制系统，图中被控对象为电加热炉，被控量（输出量）是炉温 θ ，控制装置是开关 S 和电阻丝（开关 S 受时间继电器控制）。

由于开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入信号对被控对象进行单向控制，而不对被控量进行测量并反向影响控制作用，这样，当炉温偏离希望值时，开关 S 的接通或断开时间 t 不会相应改变，因此，这种开环控制系统不具有修正由于扰动而出现的被控量与希望值之间偏差的能力。开环控制精度低，抗干扰能力差，但是结构简单，价格便宜，容易维修。开环炉温控制系统的结构图如图 1-5 所示。

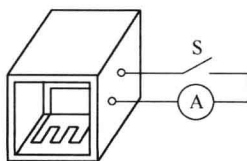


图 1-4 炉温控制系统

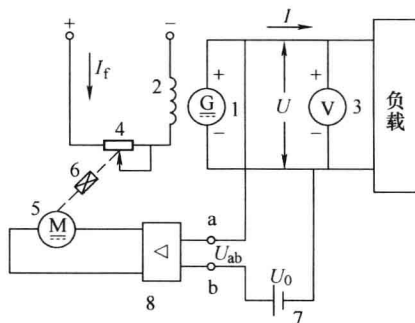


图 1-3 直流发电机端电压的简单自动控制系统

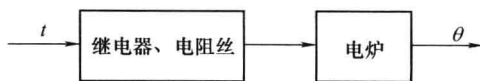


图 1-5 开环炉温控制结构图

开环控制系统的典型结构图如图 1-6 所示。

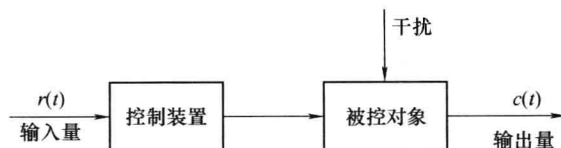


图 1-6 开环控制系统结构图

2. 闭环控制方式

闭环控制又称为反馈控制。闭环控制系统是在开环控制系统中把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端与给定值（参考输入）进行比较（相减），并利用比较后的偏差信号以一定的控制规律产生控制作用，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现要求的控制性能。

例如，在前面的电加热炉中插入接触式水银温度计，水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中，从而随水银柱的升降使继电器的触点接通或断开，以便接通或切断电阻丝电源。这样使得炉温实际值在希望值的附近以一定的精度上下波动。这样就把炉温的开环控制变为闭环控制，其系统的结构图如图 1-7 所示。

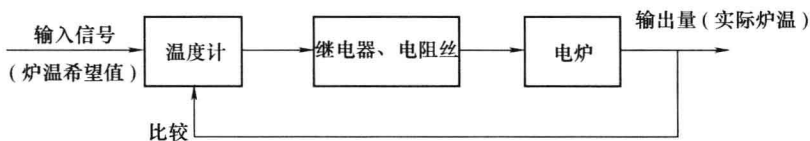


图 1-7 闭环炉温控制结构图

为了实现对被控对象的闭环控制，系统中必须配置一些用来对被控量进行连续测量和反馈的装置，这些装置分别称为测量装置、比较装置、放大装置和执行机构等。因此，一般来说，典型的闭环控制系统的结构图如图 1-8 所示。

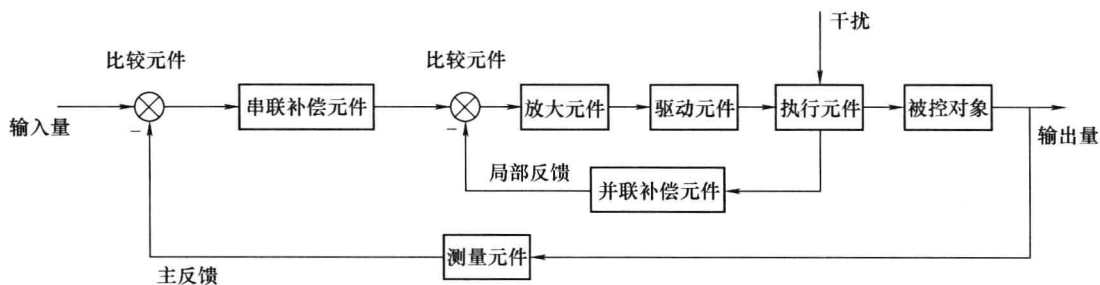


图 1-8 典型的闭环控制系统结构图

组成闭环控制系统的元件及各部分的功能如下：

1) 测量元件：用于检测被控的物理量，产生主反馈信号，如执行机构的运动参数、加工状况等。如果这个物理量是非电量，一般应再转换为电量。

2) 比较元件：把测量元件检测的被控量实际值与给定元件的输入量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械式差动装置、电桥电路及旋转变压器等。

3) 放大元件：用于对偏差信号进行放大，以利于执行机构动作，分为前置放大和功率放

大。前置放大是放大信号的幅值，功率放大是进行系统的信号能量放大。

4) 驱动元件：给执行机构提供动力，完成能量的供给和转换，并控制执行机构起动、停止和换向。

5) 执行元件：直接对控制对象进行操作，完成加工任务，如执行电动机、液压马达等。

6) 补偿元件：也称为校正元件。它是结构或参数便于调整的元件，以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的校正元件则由 STD 总线工业控制机、PC 及单片机组成。

7) 控制对象：即控制系统所要操纵的对象，它的输出量即为系统的被控量，如机床、工作台等。

闭环控制系统具有很强的纠偏功能，对于干扰具有良好的适应性，因此，其控制精度高。但由于系统组成元件较多，结构复杂，如果配合不当，将会引起系统振荡，从而使系统不能稳定工作。精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环控制系统存在的主要矛盾。

3. 复合控制方式

当对控制系统提出很高要求，单独采用开环或闭环控制实现起来有困难时，可以设计一种开环控制和闭环控制相结合的复合控制系统，其结构如图 1-9 所示。在这种系统中，带有负反馈的闭环控制起主要的调节作用，而带有前馈的开环控制在扰动量影响输出量之前进行补偿，起辅助补偿作用。这样就能使系统达到很高的控制精度，并且获得满意的综合系统性能。

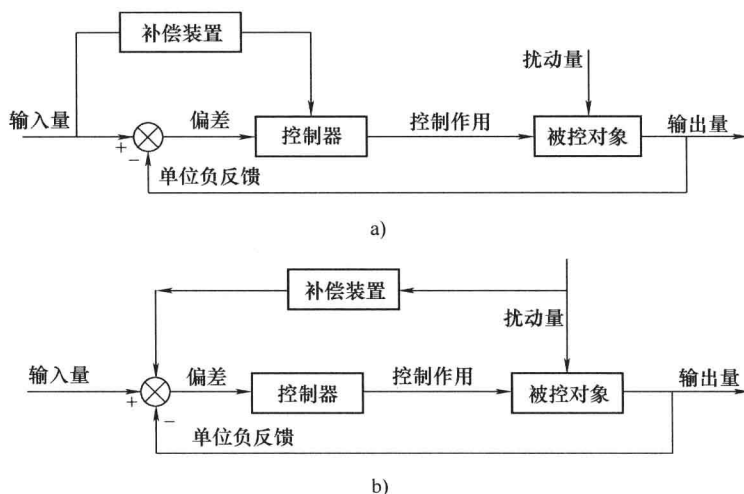


图 1-9 复合控制示意图

a) 按输入作用补偿 b) 按扰动作用补偿

仍以前述所举的发电机端电压控制为例。假设已知造成该发电机端电压波动的主要因素是负载电流 I 的变化，即 I 是该控制系统的主要扰动。如果先测出 I 每增大 1A 所引起的端电压 U 下降的量 ΔU ，就可以设计一个装置，当 I 每增大 1A，该装置就自动将发电机的励磁电流增大若干，使发电机的电动势相应地升高 ΔE ，正好补偿 I 增大所造成的端电压下降量。这样，当负载电流波动时，端电压就可以保持恒定。图 1-10a 就是按照以上思路设计的控制方案。图中的小电阻 r 是用来取得一个与 I 成正比的电压信号。图 1-10b 是改进的方案，利用发电机的串联励磁绕组 W_s 实现同一目的。

按扰动控制时，信息来自扰动，而作用于被控量，所以不构成闭环，而是开环；不是反馈，

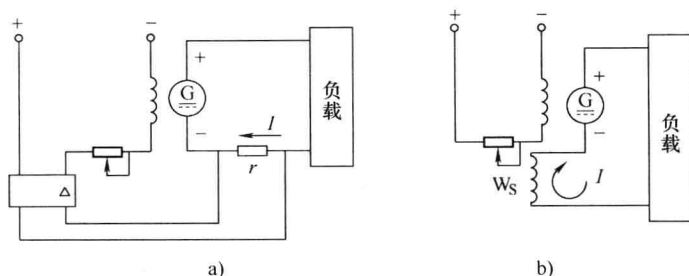


图 1-10 按扰动控制

而是顺馈控制，也可以说是按扰动进行补偿。

按扰动控制有时比按偏差控制简单易行，但只有在扰动是可测量的情形下才能使用。如果系统可能受到多种扰动的作用（这是常见的），就不得不为每一种扰动配备一个补偿装置，这将使系统既复杂又降低可靠性。不仅如此，各种补偿装置之间还可能有矛盾。

鉴于此，一种常用的做法是把按扰动控制与按偏差控制结合起来：既采用补偿装置抑制某一种主要扰动的影响，又采用闭环控制方式消除其他各种扰动造成的偏差。由于主要扰动已经被补偿或被近似补偿，剩余的扰动大大减轻，闭环控制的部分就比较容易设计，因而可以获得更好的效果。这种方法即为复合控制。

四、自动控制系统的分类

随着控制技术的发展，产生了各种各样的自动控制系统，相应地也就有了自动控制系统不同的分类方法。例如，按照描述系统数学模型的不同，可分为线性系统和非线性系统，或者分为定常系统和时变系统；按照系统传递信号性质的不同，可分为连续时间系统和离散时间系统，其中连续时间系统又分为线性控制系统和非线性控制系统等。

从研究控制原理，特别是研究控制系统设计方法的角度来看，可以把自动控制系统分为恒值控制系统与随动系统两大类。应当指出，妨碍物理量按照特定规律变化的因素有两类，即被控对象的惰性和环境的扰动。惰性与扰动存在于一切控制系统中。由于各个特定控制系统的运行方式和环境彼此不同，这两类因素造成的结果对系统的重要程度也不同。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的主要特征是给定量不变，系统的基本任务是保证系统在任何扰动作用下，输出量以一定精度接近给定值，而给定值一般不变或变化缓慢。例如，对温度、压力、流量、湿度及粘度等的恒值控制。

该类系统分析和设计的重点是研究各种干扰对被控对象的制约，从克服扰动影响的角度进行分析和设计。克服各种能使被控量偏离给定值的扰动是恒值控制系统面对的主要矛盾。在运行过程中，虽不可避免地会产生误差，但设计良好的恒值控制系统应使误差尽量小。

2. 随动系统

随动系统的主要特征是给定量是变化的，系统的基本任务是保证被控量以一定的精度跟随给定量变化。这类系统又可分为两类：一类的给定量的变化是任意的，如火炮瞄准控制、雷达跟踪系统等；另一类的给定量是按照一定的时间函数变化的，这类系统通常称为程序控制系统，如仿形机床、程序控制机床等。随动系统分析和设计的重点是保证系统跟随的快速性、准确性。由于被控对象的惰性，在跟随过程中不可避免地会产生误差，因此，克服被控对象的惰性是随动系统面对的主要矛盾。

随动系统和恒值控制系统都是闭环控制系统，由于这两类系统的主要任务不同，因此，在设计系统时应当区分哪一个主要矛盾。主要矛盾不同，设计时的侧重点也不同。

五、对自动控制系统的基本要求

自动控制系统用于不同的控制目的，对系统的具体要求往往不一样。但无论是哪一类自动控制系统，都有一些共同的要求，一般可归结为稳定、快速和准确。

1. 稳定性

由于控制系统中一般含有储能元件或惯性元件，储能元件的能量不可能突变，因此，当系统受到扰动或有输入量时，控制过程不会立即完成，这就使得被控量恢复到期望值有一个时间过程。例如，在反馈控制系统中，由于被控对象的惯性，会使控制动作不能瞬时纠正被控量的偏差；控制装置的惯性则会使偏差信号不能及时转换为控制动作。这样，在控制过程中，当被控量已经回到期望值而使偏差为零时，执行机构本应立即停止工作，但由于控制装置的惯性，控制动作仍继续向原来的方向进行，致使被控量超过期望值又产生相反的偏差，导致执行机构向相反方向动作，以减小这个新的偏差；同时，当控制动作已经到位时，又由于被控对象的惯性，偏差并未减小为零，因而执行机构继续向原来方向运动，使被控量又产生符号相反的偏差；如此反复进行，致使被控量在期望值附近来回摆动，过渡过程呈现振荡形式。

稳定性就是指系统动态过程的振荡趋向和系统能够恢复到平衡状态的能力。对控制系统的要求是：输出量在受到扰动信号作用后偏离了平衡状态，但应该随着时间的推移振荡收敛，最后回到初始的平衡状态。这样的系统称为稳定的控制系统。稳定性是对控制系统的最基本要求，也是系统能够正常工作的基本前提。

2. 快速性

这是对控制系统动态性能的要求，是在控制系统处于稳定的前提下提出的。系统因受到扰动信号作用后，其输出量与输入量之间产生了偏差，快速性是指消除输出量与输入量之间偏差的快速程度。

3. 准确性

这是对系统稳态性能的要求。由于实际系统的结构、外作用形式及系统中的摩擦等非线性因素的影响，被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在，称之为稳态误差。准确性是指系统在调节过程结束后，输出量与输入量之间的偏差，或称为稳态精度。这也是衡量控制系统性能的重要指标之一。

在同一控制系统中，稳、准、快有时是相互制约的。快速性好，可能会有强烈的振荡；改善平稳性，控制过程又可能过于迟缓，精度也可能降低。分析和解决这些矛盾是机电控制领域研究的重要内容。

六、自动控制系统的典型外作用

自动控制系统外作用的形式多种多样，既有确定性外作用，又有随机性外作用。对于不同形式的外作用，系统被控量的变化情况（即响应）各不相同，为了便于用统一的方法研究和比较控制系统的性能，通常选用几种确定性函数作为典型外作用。可选作典型外作用的函数应具备以下条件：

- 1) 这种函数在现场或实验室中容易得到。
- 2) 控制系统在这种函数作用下的性能应代表在实际条件下的性能。
- 3) 这种函数的数学表达式简单，便于理论计算。

分析控制系统动态性能时,通常都是给系统输入一个典型外作用,研究其过渡过程的变化规律,并由此确定系统性能。目前,在工程设计中常用的典型外作用函数有阶跃函数、斜坡函数、加速度函数、脉冲函数及正弦函数。它们都是确定性函数。

1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ R, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

式(1-1)表示一个在 $t=0$ 时出现的幅值为 R 的阶跃变化函数,其图像如图1-11所示。在实际系统中,这意味着一个大小不变的作用在 $t=0$ 时突然加到系统上。当 $R=1$ 时称为单位阶跃函数,用 $r(t) = 1(t)$ 表示,幅值为 R 的阶跃函数可表示为 $r(t) = R \cdot 1(t)$ 。

$r(t-t_0)$ 表示在 $t=t_0$ 时刻出现的阶跃函数,即

$$r(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ R, & t \geq t_0 \end{cases}$$

其图像如图1-12所示。

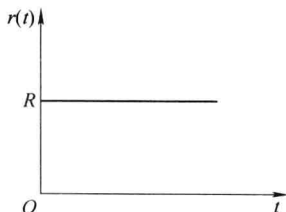


图 1-11 阶跃函数

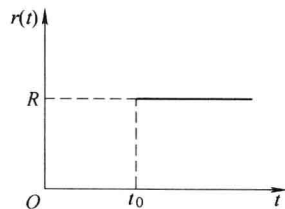


图 1-12 t_0 时刻出现的阶跃函数

2. 斜坡函数 (速度函数)

斜坡函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Rt, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

式(1-2)表示从 $t=0$ 时刻开始,随时间以恒定速率 R 变化的函数,其图像如图1-13所示。当 $R=1$ 时,称为单位斜坡函数。

3. 加速度函数 (抛物线函数)

加速度函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{2}Rt^2, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

其图像如图1-14所示。

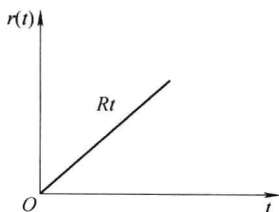


图 1-13 斜坡函数

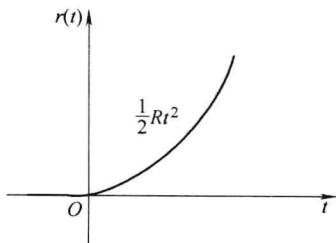


图 1-14 加速度函数

同样, 当 $R=1$ 时, 称为单位加速度函数。

4. 脉冲函数

脉冲函数定义为

$$r(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)] \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知, $(A/t_0)[1(t) - 1(t - t_0)] = r_1(t)$ 是由 $t=0$ 时幅值为 A/t_0 的阶跃函数, 与 $t=t_0$ 时幅值为 A/t_0 的负阶跃函数叠加而成的矩形脉动函数, 如图 1-15a 所示。矩形脉动函数的面积 $S = (A/t_0)t_0 = A$ 。因此, 脉冲函数是当其宽度 t_0 趋于零时矩形脉动函数的极限, 这是一个宽度为零、幅值为无穷大、面积为 A 的极限脉冲, 如图 1-15b 所示。脉冲函数的强度通常用它的面积表示。

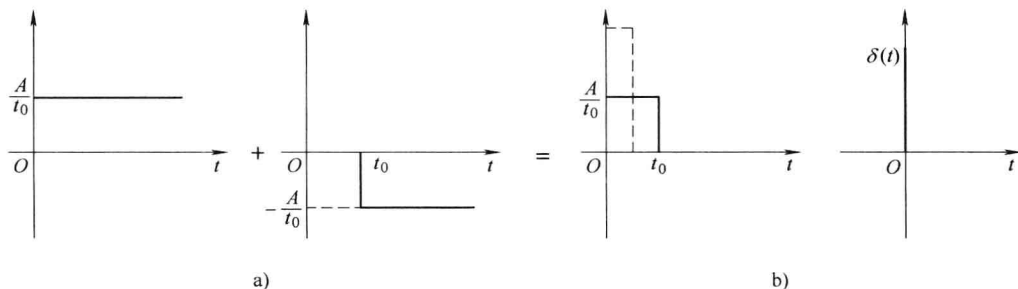


图 1-15 脉动函数和脉冲函数

a) 脉动函数 b) 脉冲函数

面积 $A=1$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数或 δ 函数。于是, 强度为 A 的脉冲函数 $r(t)$ 可表示为 $r(t) = A\delta(t)$ 。

$\delta(t - t_0)$ 表示在 $t=t_0$ 时刻出现的单位脉冲函数, 即

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ \infty, & t = t_0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1$$

单位脉冲函数可看做单位阶跃函数的导数。由图 1-11 可见, 单位阶跃函数 $1(t)$ 只在 $t=0$ 时有突变, 因此, $1(t)$ 在 $t=0$ 时的导数为无穷大, 而在其他各处均为零, 即 $\delta(t) = d1(t)/dt$ 。

5. 正弦函数

正弦函数的表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A \sin(\omega t + \varphi), & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中, A 为正弦函数的振幅; ω 为正弦函数的角频率, $\omega = 2\pi f$; φ 为正弦函数的相角。

当 $A=1$ 时, 称为单位正弦函数。余弦函数也属于这种典型的输入类型。

究竟选择以上哪种函数作为典型输入信号, 应根据系统和工作条件而定。如果控制系统遇到突然变化的外作用, 如突然通电、断电或电源电压突然跳动; 负载突然增大或减小; 飞机飞行中遇到的常值阵风扰动等, 都可视为阶跃输入形式。如果系统的控制量是随时间变化的函数, 如雷达、高射炮、防空系统及温控系统等, 则选择斜坡函数较为合适。如果控制系统为冲击输入量,

如导弹发射、卫星发射等，则选择脉冲函数较为合适。如果控制系统的输入量是随时间变化的往返运动量，如机器振动，则选择正（余）弦函数较好。

值得注意的是：在控制系统的分析设计中，阶跃函数是应用最多的一种评价系统动态性能的典型外作用。正（余）弦函数作为典型输入信号，其响应即频率响应，也是研究控制系统性能的重要依据。

第二节 自动控制系统示例

一、数控机床控制系统

数控机床控制系统是机电控制系统的重要应用领域之一，它从某种程度上也代表了当前机电控制系统的发展方向。

数控系统对机床的控制包含顺序控制和数字控制两个方面。

顺序控制即开关量控制，是指对刀具交换、主轴调速、冷却液开停及工作台限位等的控制，属于低速控制信息，一般由 PLC 完成。

数字控制则是对机床进给传动的伺服控制，以实现对工作台或刀架的进给量、进给速度及各轴间运动协调的控制，属于高速控制信息。数控机床控制系统的结构图如图 1-16 所示。

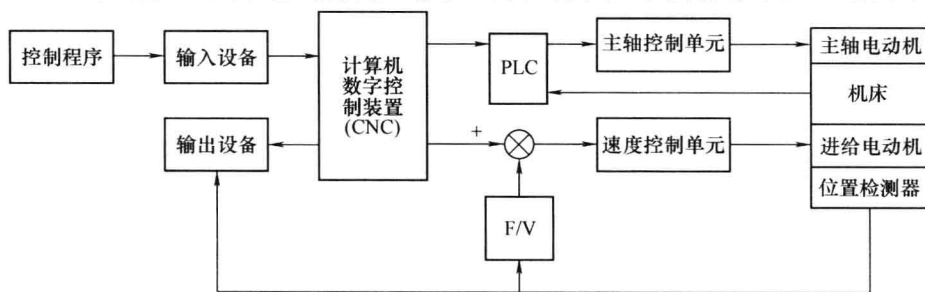


图 1-16 数控机床控制系统结构图

CNC 装置根据输入的零件加工程序，通过插补运算计算出理想的运动轨迹，然后输出到进给伺服控制系统，加工出所需要的零件。另外，CNC 装置还完成进给坐标控制、主轴控制、刀具控制及辅助控制等功能。其中，进给伺服控制系统是 CNC 和机床机械传动部件间的联系环节，是一个典型的闭环反馈控制系统。其控制原理如图 1-17 所示。

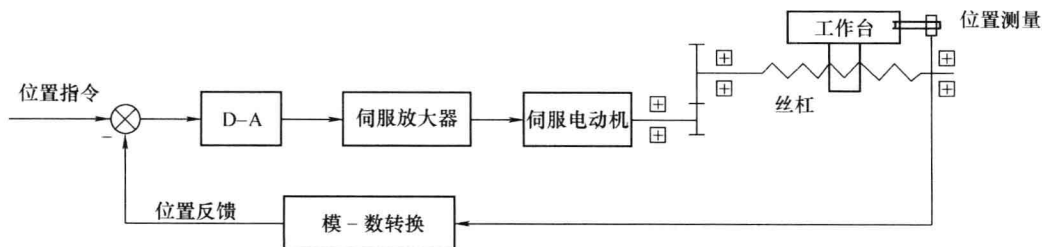


图 1-17 数控机床伺服控制原理图

二、位置随动系统

位置随动系统的根本任务就是实现执行机构对位置指令（给定量）的准确跟踪，当给定量

随机变化时,系统能使被控量准确无误地跟随并复现给定量。因此,输出响应的快速性、灵活性及准确性成了位置随动系统的主要特征。

位置随动系统中的位置指令(给定量)和被控量一样,也是位移(或代表位移的电量),当然可以是角位移,也可以是直线位移,所以位置随动系统必定是一个位置反馈控制系统。下面通过一个简单的例子来说明位置随动系统的基本组成。图 1-18 所示为一个电位器式位置随动系统的原理图,该系统用来实现雷达天线的跟踪控制。

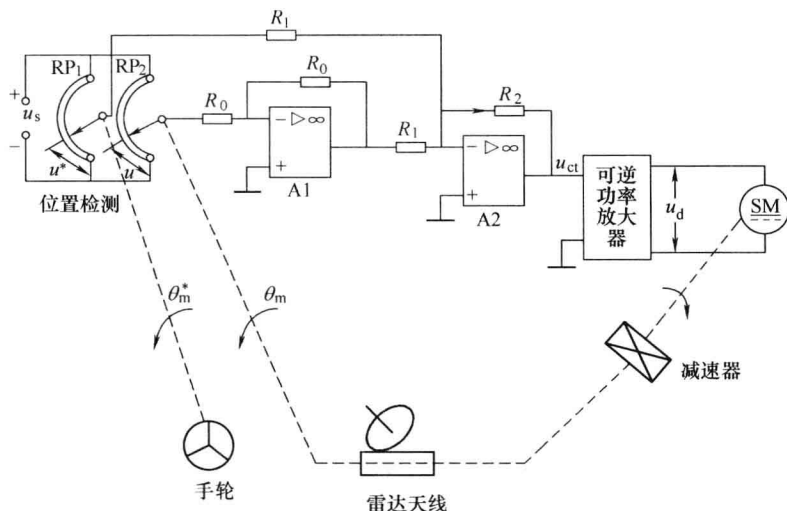


图 1-18 电位器式位置随动系统原理图

1. 位置随动系统的基本组成

(1) 位置检测器 由电位器 RP_1 和 RP_2 组成位置(角度)检测器,其中,电位器 RP_1 的转轴与手轮相连,作为转角给定。电位器 RP_2 的转轴通过机械机构与负载部件相连接,作为转角反馈。两个电位器均由同一个直流电源 U_s 供电,这样可以将位置信号直接转换成电量输出。

(2) 电压比较放大器 电压比较放大器由放大器 A1 和 A2 组成,其中放大器 A1 起倒相作用,A2 则起电压比较和放大作用,其输出信号作为下一级功率放大器的控制信号,并具备鉴别电压极性(正反电位)的能力。

(3) 可逆功率放大器 为了推动随动系统的执行电动机,只有电压放大器是不够的,还必须有功率放大器,功率放大器由晶闸管或大功率晶体管组成整流电路,由它输出一个足以驱动电动机 SM 的电压。

(4) 执行机构 永磁式直流伺服电动机 SM 作为带动负载运动的执行机构,雷达天线即为负载,电动机到负载之间还得通过减速器来匹配。

以上四部分是位置随动系统不可缺少的组成部分,不同的系统仅在所采用的具体元件或装置上有所不同。例如,可采用不同的位置检测器、不同的电压比较放大器、不同的电动机(直流或交流)等。

2. 电位器式位置随动系统的工作原理

当两个电位器 RP_1 和 RP_2 的转轴位置一样时,给定角 θ_m^* 与反馈角 θ_m 相等。角度差 $\Delta\theta_m = \theta_m^* - \theta_m = 0$,电位器输出电压 $u^* = u$,电压放大器 A2 的输入电压为 0,故其输出电压 $u_{ct} = 0$,因而功率放大器输出电压 $u_d = 0$,电动机转速 $n = 0$,系统处于静止状态。当转动手轮,使给定角

θ_m^* 增大, 则 $\Delta\theta_m > 0$, 于是 $u^* > u$, 放大器 A2 的输入电压不为 0, 其输出电压 $u_{a1} > 0$, 功率放大器的输出电压 $u_d > 0$, 驱动电动机旋转, 经减速器带动雷达天线转动, 进而通过机械机构带动电位器 RP_2 转动, 使 θ_m 也增大。只要 $\theta_m < \theta_m^*$, 电动机就一直带动天线朝着缩小偏差的方向运动, 直到 $\theta_m = \theta_m^*$ 才会停止。该系统的结构图如图 1-19 所示。

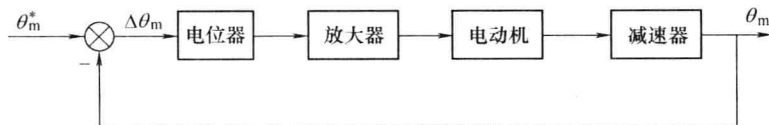


图 1-19 电位器式位置随动系统结构图

三、电液伺服控制系统

液压伺服系统是以液体压力能为动力的机械量（位移、速度和力）自动控制系统。按系统中实现信号传输和控制方式的不同可分为机液伺服系统和电液伺服系统两种。

机液伺服系统的典型实例是飞机、汽车和工程机械主离合器操纵装置上常用的液压助力器、机床上的液压仿形刀架和汽车与工程机械上的液压动力转向机构等。

电液伺服控制系统是以液压为动力, 采用电气方式实现信号传输和控制的机械量自动控制系统。按系统被控机械量的不同, 它又可分为电液位置伺服系统、电液速度伺服系统和电液力控制系统三种。电液位置伺服控制系统适合负载惯性性的高速、大功率对象的控制, 它已在飞行器的姿态控制、飞机发动机的转速控制、雷达天线的方位控制、机器人的关节控制、带材跑偏、张力控制、材料试验机和加载装置中得到应用。电液速度伺服系统适合于对速度控制精度要求较高的场合, 如原动机调速, 机床的进给拖动以及转台, 天线、雷达及炮塔的跟踪姿态控制等, 这些都要求对速度进行反馈控制。电液力控制系统适用于需要对力进行控制的场合。由于电液力控制系统具有精度高、响应速度快、功率大、结构紧凑和使用方便等优点, 因此得到了越来越广泛地应用, 例如, 材料试验机、平整机的液压下压控制、带材张力控制、车轮刹车装置等都采用了电液力控制系统。

按照系统中承担功率转换与放大作用元件的不同, 电液伺服控制系统又可分为阀控（节流）式控制系统和容积式控制系统。阀控式控制系统采用电液伺服阀控制驱动执行元件的流量来实现功率转换及放大, 具有结构简单、成本低且响应速度快等特点, 故一般情况下均采用它。其不足之处是存在节流损失（如果采用定量泵加溢流阀供油还有溢流损失）, 效率低。容积式控制系统采用调节变量泵的排量以控制进入执行元件的流量, 或采用调节变量马达的排量以控制驱动执行元件的转矩实现功率转换及放大, 没有节流损失, 效率高。但在实际的容积式控制中, 常需要一个小规格的阀控式电液位置系统或电气位置系统来推动泵或马达的变量机构来改变排量, 这使得容积系统较阀控系统复杂、成本高且响应慢, 因而只有在功率较大、对系统效率有严格要求的场合才使用。

图 1-20 是一个典型的电液位置伺服系统。该系统用输入电位计控制液压缸活塞杆的运动, 反馈电位计检测活塞杆的位置。采用电液伺服阀作为功率转换与放大元件, 该阀的工作特性是: 无电流时, 阀芯处于中位, 压力油与液压缸两腔都不通, 活塞杆不动; 当伺服阀的线圈通入一定电流时, 阀芯偏离中位, 油液进入液压缸, 活塞杆以一定的速度运动, 在这里, 电流的极性决定了液流的方向, 电流的绝对值大小则决定了阀芯偏离中位的距离和通过阀口的流量。

系统的工作原理如下: 输入电位计和反馈电位计的两个固定端上加有固定电压 u , 根据其活