

控制工程 基础及应用

南京机械高等专科学校 左健民 主编

高等专科学学校机电一体化专业系列教材

版社

高等专科学校机电一体化专业系列教材

控制工程基础及应用

主 编	左健民
副主编	董海森
参 编	盖玉先
	杨 丽
主 审	徐伯清



机械工业出版社

本书以经典控制理论为基本内容,重点讲述了控制理论中的数学模型、时域和频域分析、控制系统的稳定性和性能分析、控制系统的校正设计、工程设计方法和线性离散控制系统的分析和设计。全书以少而精的原则安排章节,基础理论体现“必需、够用”,讲清基本概念,避免复杂的数学推导,以工程应用能力培养为主线,从控制工程的角度,培养学生掌握思维和分析问题的方法。

本书是高等工程专科机械电子工程(机电一体化)、机械制造等机械工程类专业的系列教材之一,也可作为函大、电大和职大等层次学生的教材和教学参考书,也可供一般工程技术人员学习控制工程基本知识时参考。

控制工程基础及应用

南京机械高等专科学校 左健民 主编

*

责任编辑:张一萍 版式设计:霍永明

封面设计:姚毅 责任校对:孙志筠

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 13.25·字数 321 千字

1996 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0 001—7 000 定价:14.00 元

*

ISBN 7-111-05117-3/TH·68) (C)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

序

随着微处理器和微型计算机的问世,电子计算机已深深介入机械制造的各个领域,一系列机、电、计算机一体化的新产品诞生。为适应这个变化,迫切需要高等专科学校培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的技术人才。有鉴于此,不少高等专科学校在多年探索机制专业改造并取得经验的基础上正在创办机电工程(机电一体化)专业。以满足社会的需要。但各校对新开专业缺乏经验,缺少教材和师资,在此形势下,1995年3月机械工业部教材编辑室在全国机械制造专业教材编审委员会和全国高等专科学校机械制造专业协会的协助下于南京召开了高等专科学校机电一体化教学与教材研讨会,研讨了机械行业技术发展的大趋势,认为办好机、电、计算机紧密结合的新机电工程专业、培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的机电一体化人材是非常必要的。为给机电一体化专业奠定物质基础,会议决定立即组织第一批急需的机电一体化专业系列教材,初步确定了各教材的主编、协编和主审人员。1995年4月机械工业部教材编辑室又在长沙召开了各课程编写大纲协调会,并进一步调整、落实了编审班子。会后各参编教师立即行动、认真撰写,在1995年9月威海召开的审稿会的基础上,历经了一年左右时间,这一套统编教材终于陆续交稿出版。

这批教材的出版是对机电工程(机电一体化)专业教学的一种尝试,希望它能满足各校的教学所需,这套教材在组织编写过程中得到了众多学校和老师的热心帮助,在这里特向吴善元、盛善权、黄鹤汀、易泓可等诸位老师表示衷心的感谢。

前 言

微电子技术的飞速发展,带动了机械加工技术的飞速发展。自本世纪 50 年代以来,机械加工技术朝着加工自动化的发展方向,走过了刚性自动线或自动化单机、数控(CNC)机床、加工中心和柔性制造系统(FMS)三个阶段,目前正向第四个发展阶段即计算机集成制造系统(CIMS)方向发展。而在其发展过程中,最显著的特点是机械制造将越来越密切地依赖于电子技术、检测技术、自动控制技术、计算机技术、系统论、信息论等现代科学技术。打破了发展初期那种机械部分与电气部分相拼合的设计和生产品模式,强调以产品(或系统)整体最优为目标,以自动控制为核心,高性能,多功能。这是机械制造业的一场深刻的技术革命。这种飞速的发展对工程技术人员的素质提出了越来越高的要求,同时也对培养人材的高等工程教育提出了更高的要求。为适应这种发展,机械工业出版社教材编辑室和高等工程专科机械制造专业教材编审委员会在 1994 年 12 月至 1995 年 5 月半年的时间里,先后三次召开会议,研讨和协调机械电子工程专业人才培养方案、业务规格和基本要求,并组织 and 协调了教材编写大纲和编写人员,确定了“以机为主、机电结合、电为机用”的指导方针,本书正是根据以上会议讨论和确定的教学大纲,为高等工程专科机械电子工程等机械类专业而编写的系列教材之一。

“控制工程基础及应用”课程是一门技术基础课。本教材以机电控制的应用为对象,主要阐述经典控制理论的有关基本概念、基本原理、基本分析方法、设计校正和工程设计方法,以期使学生通过本课程的学习,在传统静态设计的基础上建立起动态设计的概念,为后续课程运用控制理论和进一步深造打下基础。

本书共分九章,第一章和第二章是基础知识;第三章和第四章主要介绍了控制系统的时域和频域分析方法;第五章和第六章讲述了控制系统的稳定性和性能分析;第七章讲述了控制系统的设计和校正方法,第八章从工程设计的角度讲述了控制系统的工程设计方法;第九章主要介绍了线性离散系统的分析和设计。在内容叙述上,基础理论以“必需、够用”、讲清概念为原则,以工程应用能力培养为主线。全书教学时数约 60 学时。

本书由左健民任主编,董海森任副主编。参加编写的有盖玉先和杨丽。其中第一、六、八章由南京机械高等专科学校左健民编写,第二章由左健民和常州工业技术学院杨丽编写,第三、四、九章由哈尔滨工业大学威海分校盖玉先编写,第五、七章由上海机械高等专科学校董海森编写。全书由左健民负责统稿和定稿。由江南大学徐伯清副教授主审,他对本书提出了很多宝贵意见,编者在此特表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了东南大学王积伟教授,燕山大学韩屋谷教授、哈尔滨工业大学威海分校梁景凯副校长等的大力支持和指导,在此表示感谢。

本书是高等专科学校机电一体化专业系列教材,也可供职业大学、业余大学使用。

本书在编写体系和内容取舍方面作了一些新的尝试,加之时间仓促,书中定有许多不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1995 年 11 月

目 录

序	
前言	
第一章 绪 论	1
第一节 控制系统的工作原理及其组成	1
第二节 对控制系统的基本要求	5
第三节 控制系统的基本类型	5
第四节 控制工程理论发展历史的简 单回顾	6
习 题	8
第二章 物理系统的数学模型	9
第一节 物理系统的微分方程	9
第二节 非线性数学模型的线性化	13
第三节 拉氏变换与反变换	15
第四节 传递函数	26
第五节 传递函数的方块图及其运算	34
习 题	45
第三章 控制系统的时域分析	50
第一节 时间响应与典型输入信号	50
第二节 一阶系统的时间响应	51
第三节 二阶系统的时间响应	54
习 题	62
第四章 控制系统的频率特性分析	64
第一节 频率特性的基本概念	64
第二节 幅相频率特性——奈氏图	67
第三节 对数频率特性——波德图	74
习 题	85
第五章 控制系统的稳定性分析	87
第一节 系统稳定的基本概念	87
第二节 劳斯稳定判据	88
第三节 奈氏稳定判据	93
第四节 波德稳定判据	99
习 题	103
第六章 控制系统的性能分析	104
第一节 灵敏度	104
第二节 控制系统的时域和频域性能 指标	106
第三节 控制系统的误差分析和计算	111
习 题	120
第七章 控制系统的校正设计	121
第一节 校正装置及其特性	122
第二节 控制系统的串联校正	130
第三节 控制系统的并联校正	134
第四节 最佳参数法设计	138
习 题	145
第八章 控制系统的工程设计	147
第一节 控制系统的工程设计方法	147
第二节 控制系统工程设计举例	163
习 题	177
第九章 线性离散控制系统	179
第一节 采样过程与采样定理	180
第二节 Z 变换与 Z 反变换	182
第三节 脉冲传递函数	188
第四节 离散系统的品质分析	193
第五节 离散系统的设计与校正	199
习 题	204
参考文献	206

第一章 绪 论

“控制工程基础及应用”课程主要阐述有关自动控制技术的基本理论及其在机械行业的应用。当前,随着计算机技术的发展,机械制造业发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛而深入地引入控制理论。例如,数控机床、工业机器人、电气液压伺服系统、机床动态分析、动态测试、锻压焊接自动化设备、精密仪器设备等都要用到控制工程的基础知识。可以预计,21 世纪的机械产品(或系统)将是以整体最佳为目标、以自动控制为核心的高性能的、多功能的机电一体化产品。因此,控制理论不仅是一门极为重要的学科,而且也是科学方法论之一。控制工程理论强调用系统的、反馈的、控制的方法来分析研究工程实际问题。

第一节 控制系统的工作原理及其组成

一、控制系统概述

要了解什么是控制系统,首先要知道什么是控制,按照控制论创始人维纳的经典定义,控制论是“关于动物和机器中的控制和通信的科学”。这句话的含义是对机械设备采取一定的措施,使其生产过程或被控对象的某些物理量准确地按预期规律变化。例如,要想使发电机正常供电,就必须设法保持其输出电压恒定,尽量使其不受负荷变化和原动机转速波动的影响;要想使数控机床加工出高精度的零件,就必须采取措施保证其工作台或刀架准确地跟随指令进给;要想使烘炉提供合格产品,就必须保证炉温符合生产工艺的要求。这里所说的采取措施就是实行某种控制,这种具有控制作用的系统才可以称为控制系统。显然,上述的发电机、数控机床、烘炉都可以称之为控制系统。也可以把它们看成是受控对象。而电压、工作台或刀架的位置、炉温是表征这些机器装备工作状态的物理参量,它们是被控制量。额定电压(要求的电压)、进给的指令(加工要求)、规定的炉温等都是这些物理参量所应保护的数字,称之为控制量。

由此可知,控制系统是具有控制量、控制对象和被控制量这三层含义的系统。然而,对于那些不要求存在严格的物理参量作为输出量的设备,就不能看成是具有完整意义的控制系统。如抽水机、搅拌机、普通卷扬机等一般的机械,都不具有明显的控制意义。它们或者是开、或者是关,除了这两种工作状态之外,再没有第三种工作状态。而一架飞机,一条轧钢生产线或者一台机械加工中心,它们都具有随时变化着的工作状态,始终存在着控制量和被控制量的矛盾,没有控制,它们就不能正常工作。

控制量输入后,作用于受控对象,使受控对象产生一定的被控制量,成为系统的输出。因此,可以说控制系统是由输入到输出的一系列信号的传递过程,它要求人们把传统的观察问题的方式方法加上控制和通信的观点,不仅把以物理参量形式出现的控制量与被控制量看成是传递的信号,而且也可以把以物质结构形式出现的受控对象看成是具有某种意义的信号。这样,一个物理系统就成为具有控制及其信号传递过程的系统。

这里要注意的是,一个系统往往除了存在信号传递路线以外,同时也存在能量传递路线,

有的还存在物质输送路线，因此要分清它们的区别。例如，在一条轧钢生产线中，既有控制系统，又有能量传递系统，还有钢坯在线上来回运送的系统，三者混为一体，彼此有着紧密的联系。它们之间的关系是：控制系统起着支配能量的传输和物质的运送作用。不要把能量的输入和物质的进出也看成是控制量的输入和被控制量的输出。不能把它们混淆起来，尽管它们交叉存在于同一系统之中。控制理论研究的内容是控制作用如何使设备的工作满足预定的要求，初学者对此往往不易明确，须引起重视。

二、控制系统工作原理

在各种生产过程以及生产设备中，常常需要使某些物理量，如温度、压力、位置、转速等保持恒定，或者让它按照一定的规律变化。要满足这些条件，就应对生产机械或设备进行及时的控制、调整，以抵消外界的扰动和影响。下面将从实现恒温控制的例子中，总结出一般控制系统的工作原理。

实现恒温控制有两种方法：人工控制和自动控制，然而，自动控制是受人工控制的启发而实现的。图 1-1 所示为人工控制的恒温控制箱，人们可以通过调节调压器来改变电阻丝的电流，以达到控制温度的目的，箱内的温度是由温度计测量并显示的，人工调节的过程可以归结为：

- 1) 观察由测量元件（温度计）测出的恒温箱的温度（被控制量）。
- 2) 与要求的温度值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。
- 3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度值时，就移动调压器使电流减小，温度降低；若温度低于给定的值，则移动调压器，使电流增加，温度升到正常范围。

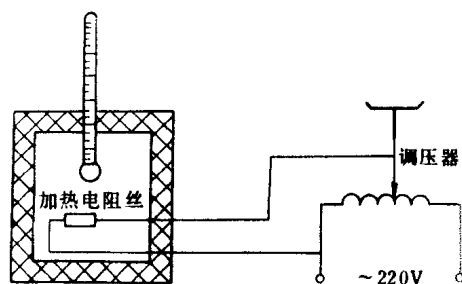


图 1-1 人工控制的恒温箱

由此可见，人工控制的过程就是测量（温度计）、求偏差（人脑）、再控制（调压器）以纠正偏差的过程。简单地讲就是“检测偏差并用于纠正偏差”的过程。

对于这样简单的控制形式，如果能找到一个控制器代替人的职能，那么这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统了，图 1-2 即为一个自动控制系统。其中恒温箱的温度是由给

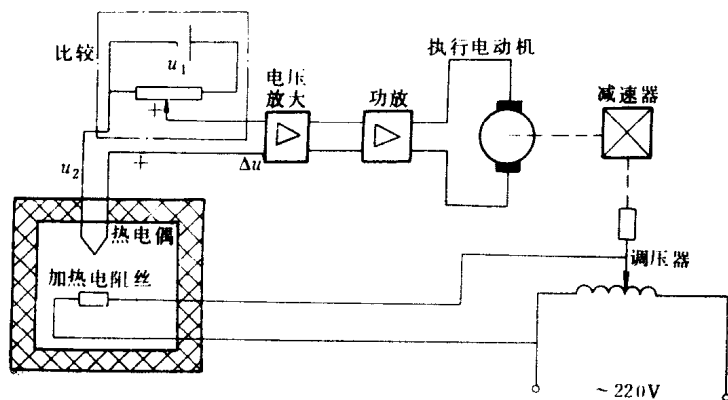


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

定信号电压 u_1 控制的, 当外界因素引起箱内温度变化时, 作为测量元件的热电偶, 把温度转换成对应的电压信号 u_2 , 并反馈回去与给定信号 u_1 相比较, 所得结果即为温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后, 用以改变电动机的转速和方向, 并通过传动装置拖动调压器调节触头。当温度偏高时, 动触头向着减小电流的方向运动; 反之加大电流, 直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时, 电动机才停转, 这样就完成了所要求的控制任务, 而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

上述人工控制系统和自动控制系统是极相似的, 执行机构类似于人手; 测量装置相当于人的眼睛; 控制器类似于人脑。另外, 它们还有一个共同的特点, 就是要检测误差, 并用检测到的偏差去纠正偏差, 可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中, 这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量也叫控制系统的输入量, 被控制量称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或一部分返回输入端, 使之与输入量进行比较。比较的结果叫偏差。因此基于反馈基础上的“检测偏差并用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈原理组成的系统称为反馈控制系统。

图 1-3 所示为恒温箱温度自动控制系统职能方块图, 图中 $\otimes$ 代表比较元件, 箭头代表作用的方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理。也可以看到, 各职能环节的作用是单向的, 每个环节的输出是受输入控制的。总之, 实现自动控制的装置可各不相同, 但反馈控制的原理却是相同的, 可以说, 反馈控制是实现自动控制的最基本的方法。

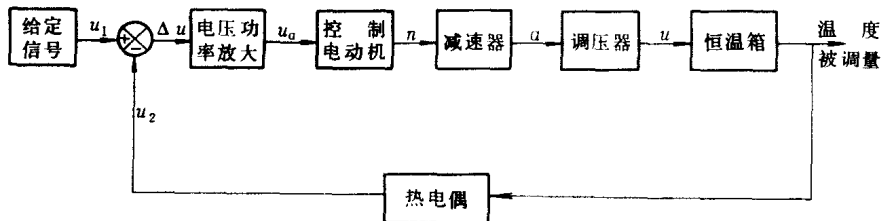


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统职能方块图

三、开环控制与闭环控制

从上述恒温箱自动控制系统的工作原理中可以看出一个重要的现象, 即输出量要反回来参与控制, 产生对系统起控制作用的控制信号。这种输出量 (或被控制量) 能给控制过程以直接影响的控制系统, 称为闭环控制系统。“闭环”的含义就是应用反馈作用来减少系统的误差。这种系统突出的优点是精度高。当系统由于干扰、元件的质量、传动链间的间隙等因素的影响而使输出量偏高给定值时, 可以通过反馈测量元件将其检测出来, 并力图减少这一偏差, 这是闭环系统最重要的功能。

闭环系统也有缺点, 这类系统是检测误差并用以纠正偏差, 或者说是靠偏差进行控制, 在工作过程中系统总会存在偏差。由于组成系统的元件的惯性、死区等因素的存在, 很容易引起振荡, 使系统不稳定。因此精度和稳定性之间的矛盾是闭环系统存在的主要矛盾。

如果控制系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用没有影响, 这样的系统称之为开环控制。如图 1-1 的人工控制的恒温箱系统, 如果没有操作者的经常调节, 任凭干扰因素影响, 置实际温度于不顾, 这样的系统就是开环控制系统。开环控制系

统是使一定的输入量产生一定的输出量。如果由于某种干扰使输出量偏高期望值时，它没有纠正偏差的能力，要进行补偿，必须借助人工改变输入量。所以开环控制系统的精度较差。但是如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定，而且外部的干扰也比较小时，这种系统也可以保证一定的精度。

从稳定性的角度看，开环系统比较容易建造，结构也比较简单，因为开环系统不存在稳定性的问题。

当对整个系统的性能要求比较高时，为了解决闭环控制精度和稳定性之间存在的矛盾，往往将闭环和开环结合在一起应用，即采用复合控制，这是比较合理的。

四、控制系统的组成

上述的闭环系统，只是控制系统的基本组成形式，要想获得理想的控制效果，还必须增加其它有关元件。一个典型的反馈控制系统如图 1-4 所示，该系统包括反馈元件、给定元件、比较元件（或比较环节）、放大元件、执行元件及校正元件等。

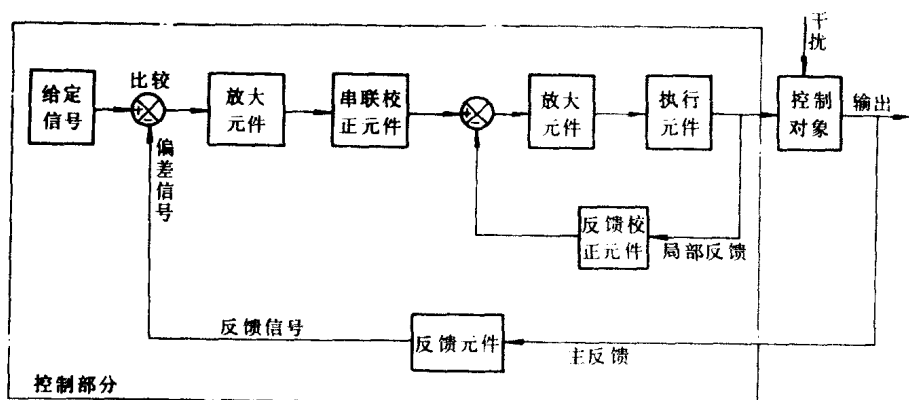


图 1-4 典型的反馈控制系统方块图

给定元件 主要用于产生给定信号或输入信号。

反馈元件 它产生与输出量有一定函数关系的反馈信号，这种反馈信号可以是输出量本身，也可以是它的函数或导数。例如图 1-2 中的热电偶。

比较元件 它用来比较输入信号与反馈信号之间的偏差，它可以是自整角机、旋转变压器、机械式差动装置等物理比较元件，也可以是如图 1-2 中所示的差接的比较电路，所以有时我们也称之为比较环节。

放大元件 对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。

执行元件 直接对控制对象进行操作的元件，如图 1-2 中的执行电动机。

控制对象 控制系统所要操纵的对象，即负载，它的输出量即为系统的输出（被控制量）。

校正元件 或称校正装置，用以稳定控制系统，提高性能，常用的有反馈校正和串联校正两种校正形式。

尽管一个控制系统由许多起着不同作用的元件所组成,但从总体上来看,比较元件、给定元件、放大元件、执行元件和反馈元件等共同起着控制作用。而剩余部分就是被控对象。因此,任何控制系统可以说仅由控制部分和受控对象两部分组成,图 1-4 中双点划线所包含的内容就是控制部分。

第二节 对控制系统的基本要求

自动控制系统用于不同的目的,要求也往往不一样。但自动控制技术是研究各类控制系统共同规律的一门技术,对控制系统有一个共同的要求,一般可归结为稳定、准确、快速。

1. 稳定性 由于系统存在着惯性,当系统的各个参数分配不当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。输出量偏离平衡状态后应该随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。稳定性的要求是系统工作的首要条件。

2. 快速性 这是在系统稳定的前提下提出的。快速性是指系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快速程度。

3. 准确性 是指在调整过程结束后输出量与给定的输入量之间的偏差,或称为稳态误差,这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如数控机床稳态误差愈小,则加工精度就愈高,而一般恒温和恒速系统的稳态误差都可在给定值的 1% 以内。

由于受控制对象的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重。例如,伺服系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性有较严格的要求。

在同一系统中,稳、准、快是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡;改善稳定性,控制过程又可能过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。对于机械传动系统来说,首要的是稳定性,因为过大的振荡将会使部件过载而损坏。此外要防止自振,降低噪声,增加刚度等等,这些都是控制工程理论研究的中心问题。

第三节 控制系统的基本类型

目前自动控制技术在各行各业中正在发挥着越来越大的作用。从普通的家用电器到动力生产和宇宙空间探索的复杂控制系统都离不开自动控制。

在第一节中,我们已对控制系统从概念上作了较详细的叙述,并以恒温控制系统为例,介绍了控制系统的工作原理和系统的组成。这些介绍对于其它类型的系统也是适用的,实际工程中,可以从不同的角度对控制系统进行分类。例如,根据信号传递路径可以分为开环控制和闭环控制系统;根据输入量的特征可以分为恒值控制系统、程序控制系统和伺服系统;根据对系统描述方法的不同可以分为线性控制系统和非线性控制系统;根据系统中传递信号的性质可分为连续控制系统和离散控制系统;根据系统部件的类型又可以分为机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统等等。为了进一步了解控制系统的实质,下面将按不同的研究方法,简要地说明几种不同类型的控制系统的重要特点。

一、恒值控制系统、程序控制系统和伺服系统

1. 恒值控制系统 这种控制系统的输入量是一个恒定值,一经给定,在运行过程中就不

再改变(但可定期校准或更改输入量)。恒值控制系统的任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒值。工业生产中的温度、压力、流量、液面等参数的控制;有些原动机的速度控制;工作母机的位置控制,电力系统的电网电压、频率控制等,均属此类。

2. 程序控制系统 这种系统的输入量不为常值,但其变化规律是预先知道和确定的。可以预先将输入量的变化规律编成程序,由该程序发出控制指令,在输入装置中再将控制指令转换为控制信号,经过全系统的作用,使被控对象按指令的要求运动。计算机绘图就是典型的程序控制系统。工业生产中的过程控制系统按生产工艺的要求编制成特定的程序,由计算机来实现其控制,这就是近年来迅速发展起来的数字程序控制系统和计算机控制系统。微处理器控制将程序控制系统推向了更普遍的发展阶段。

3. 伺服系统 伺服系统又称随动系统,主要是一些控制机械位移和速度的系统。这种系统的输入量的变化规律是不能预先确定的。当输入量发生变化时,则要求输出量也迅速、平稳地跟随着变化,且能排除各种干扰因素的影响,准确地复现控制信号的变化规律。控制指令可以由操作者根据需要随时发出,也可以由目标或相应的测量装置发出。如机械加工中的仿形机床、武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹目标自动跟踪系统等均属于伺服系统。

二、连续控制系统和离散控制系统

控制系统中各部分传递信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统。前面介绍的各种系统除了计算机控制系统外,都是连续控制系统。

近年来,计算机用于控制系统已日益增多。由于计算机只能接受和处理数字信号,如果给定的信号和反馈的信号都是连续信号,就需要采取脉冲采样来实现对系统的控制。这种控制系统中某一处或数处的信号是以脉冲序列或数码的形式传递的系统称为离散控制系统。

由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式有较大差别,因此在分析方法上也有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态,并用拉氏变换法求解微分方程;而离散控制系统则用差分方程来描述系统的运动状态,用 z 变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。由于研究方法不同,必须把连续控制系统和离散控制系统区分开来,本书将在第九章中专门介绍离散控制系统。

第四节 控制工程理论发展历史的简单回顾

最早期的,在工业中起重要作用的第一个自动调节装置是18世纪末由瓦特(J·Watt)发明的蒸汽机中的飞锤调节器,当蒸汽机速度增加时,杠杆上的飞锤升高,使和它联结在一起的汽阀开口减少,从而使蒸汽机速度下降;反之,杠杆上的飞锤降低,使和它联结在一起的汽阀开口增大,从而使蒸汽机速度上升。但是后来发现,汽阀的速度调节并不完善,一些参数处理不好会使蒸汽机产生剧烈的振荡。这就迫使一些数学家思考并解决这些问题。1868年麦克斯韦(Maxwell)从描述系统的微分方程的解中有无增长指数函数项来判断稳定性;1895年,劳斯(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz)导出了著名的稳定性判据。第一次和第二次世界大战中武器的进展促使很多装备的自动调节装置有了飞跃的发展,在这期间,由于通信的需要发明了负反馈放大器,这时劳斯-赫尔维茨的理论的实际意义又不大了,因为描述放大器的微分方程阶次太高,而用“频率响应”及图解形式处理更实际。奈魁斯特(H·Nyquist)于1932年创立了稳定判据及“稳定裕量”的概念。在此基础上,玻德(H·W·Bode)于1945

年提出用图解法来分析和综合线性反馈控制系统的方法，这就是频率法。与此同时，依万斯 (W · R · Evans) 于 1948 年创立了“根轨迹法”，对用微分方程模型来研究问题提供了一个简单而有效的方法，在某些情况下，它比频率法更简单，更直接。到此，“古典控制理论”已比较完善，并在各行业中广泛地应用这些理论，促进了控制工程的进展。1948 年，美国数学家维纳 (N · Wiener) 首创了控制论 (Cybernetics) 这个名词，他认为，到那时为止，反馈理论已可以解决许多生物控制机理、经济发展过程等问题。事实证明，从那以后控制理论才有了新的发展，跨入了“现代控制理论”的阶段。

“现代控制理论”是在“古典控制理论”的基础上，于本世纪 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、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域主要的研究课题，特别是近年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展，又使现代控制理论在大系统理论和模仿人类智能活动的人工智能控制等方面有了重大的发展。

以上简要介绍了控制理论的诞生和发展过程，需要特别提出的是，尽管古典控制理论有一定的局限性，然而它简洁明了，概念清晰，工程技术中的大量问题仍然用它来解决。同时，古典控制理论也是学习和掌握现代控制理论的必要的基础。

从控制理论的发展可以看出，这门学科是起源于机械设备的，而在后期的发展中反而远离了机械工程这一领域，究其原因，可能与以往的生产水平与历史条件有关，设计者凭老经验办事。然而，现在这一切都在发生重大的变革。控制理论在工业制造与设计领域中获得日益广泛的应用。目前，仅仅以静态的角度研究与设计工业设备，只要求它们能够工作，而不讲究其工作品质的情况，已远远不能满足现代工业的要求。只有从动、静态两方面进行研究、分析和设计，即既能保证有足够的强度和刚度，也具有工作平稳、准确、快捷的动态品质，才是合乎理想的工业设备。当前，控制工程理论在机械制造领域中应用最为活跃的主要有以下几个方面。

1) 机械制造过程正在向“自动化”与“最优化”结合的方向，以及机电一体化方向发展。如机床的数字控制；自适应控制和柔性自动生产线；工业机器人的研究和应用；部件及产品的自动装配；产品的自动和半自动测量和检验；具有视觉功能及其它人工智能的智能控制机器人的应用；计算机集成制造系统 CIMS 等。

2) 制造和加工过程的动态研究。因为高速切削、强力切削、高速空程等正在日益广泛地应用，同时，加工精度越来越高， $0.01\mu\text{m}$ 乃至 $0.001\mu\text{m}$ 精度相继出现，这就要求把加工过程如实地作为动态系统加以研究，包括计算机仿真及优化。

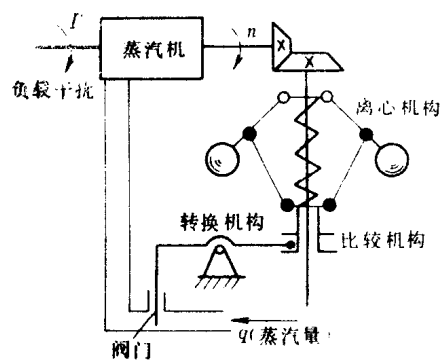
3) 在产品的设计方面，充分考虑产品与设备的动态特性，然后建立它们的数学模型，进行优化设计，包括计算机辅助设计和试验的研究。

4) 在动态过程或参数测试方面，正以控制理论为基础，向着动态测试方向发展。动态精度、动态位移、振动、噪声、动态力与动态温度等的测量，从基本概念，测试手段到测试数据的处理方法无不同控制理论息息相关。

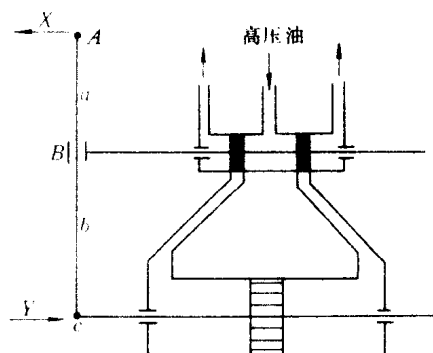
总之，控制理论、微处理机技术同机械制造技术的结合、机电的结合和一体化，将促使这一领域中的试验、研究、设计、制造、管理等各个方面发生巨大的变化。

习 题

- 1-1 试列举几个日常生活中的开环控制和闭环控制系统，并说明它们的工作原理。
- 1-2 说明蒸汽机飞锤调节器的工作原理并画出职能方块图。
- 1-3 如图所示为一液压助力器工作原理图，其中， X 为输入位移， Y 为输出位移，试画出该系统的职能方块图。



题 1-2 图 飞锤调节器



题 1-3 图 液压助力器

第二章 物理系统的数学模型

为了从理论上对控制系统进行性能分析，必须建立系统的数学模型。

所谓数学模型，是指系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式，它揭示了系统结构及其参数与其性能之间的内在关系。系统的数学模型有多种形式，这取决于变量与坐标的选择。在时间域，通常采用微分方程或一阶微分方程组的形式；在复数域则采用传递函数形式；而在频率域则采用频率特性形式。

应当指出，建立“合理”的数学模型，对于系统的分析和研究极为重要，这里的“合理”是指所建立的模型既能反映系统的内在本质，而又能进行简化分析的模型，无论是机械系统、电气系统、液压系统、热力系统还是经济系统、生物系统。只要是确定的系统都可以用数学模型描述其运动特性。但是，要建立一个系统的合理的数学模型并非是件容易的事，这需要对其元件和系统的构造原理、工作情况有足够的了解。在工程上，常常是做一些必要的假设和简化，忽略对系统特性影响小的因素，并对一些非线性关系进行线性化，建立一个比较准确的“合理”的数学模型。

第一节 物理系统的微分方程

微分方程是在时域中描述系统（或元件）动态特性的数学模型，或称为运动方程。利用它可得到描述系统（或元件）动态特性的其它形式的数学模型。

一、建立数学模型的一般步骤

建立物理系统（或元件）微分方程的一般步骤是：

- 1) 分析系统的工作原理和信号传递变换的过程，确定系统和各元件的输入、输出变量。
- 2) 从系统的输入端开始，按照信号传递变换过程，依据各变量所遵循的物理学定律，依次列写出各元件、部件的动态微分方程。
- 3) 消去中间变量，得到一个描述元件或系统输入、输出变量之间关系的微分方程。
- 4) 写成标准化形式。将与输入有关的项放在等式右侧，与输出有关的项放在等式的左侧，且各阶导数项按降幂排列。

二、物理系统微分方程的列写

例 2-1 对图 2-1a 所示动力滑台系统进行质量、粘性阻尼及刚度折算后，可简化成图 2-1b 所示的质量-阻尼-弹簧系统。试建立系统在外力 $f(t)$ 作用下的运动微分方程。

解 该系统输入量为外力 $f(t)$ ，输出量为滑台位移 $y(t)$ ，若取等效质量 m 的自然平衡位置为 $y(t)$ 的零点，应用牛顿第二定律，可列出系统原始运动方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = f - B \frac{dy}{dt} - ky \quad (2-1)$$

式中， B 为等效粘性阻尼系数； k 为等效弹簧刚度。

式 (2-1) 经整理可得

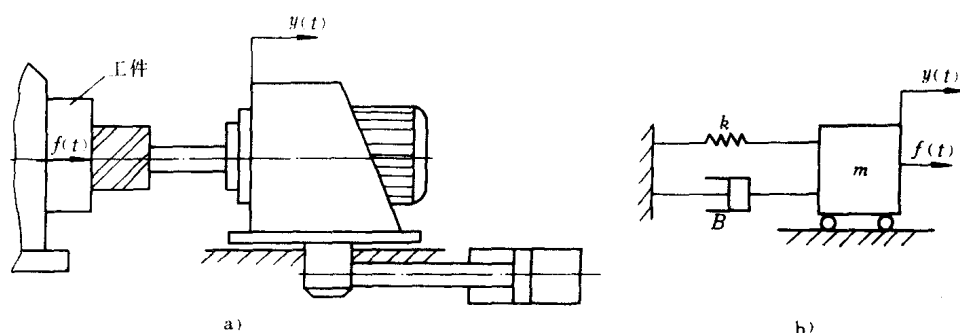


图 2-1 动力滑台及其力学模型

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + B \frac{dy}{dt} + ky = f \quad (2-2)$$

即为该系统在外力 $f(t)$ 作用下的运动微分方程。

例 2-2 图 2-2 所示为一 RC 无源网络, 其中 R_1 、 R_2 、 C 均为常数, 其输入电压为 $u_i(t)$, 输出电压为 $u_o(t)$, 试列写其运动微分方程。

解 根据基尔霍夫定律, 并设流过电容 C 的电流为 $i_1(t)$, 流过电阻 R_1 的电流为 $i_2(t)$, 流过电阻 R_2 的电流为 $i(t)$, 则 $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$, 因此有

$$\begin{cases} u_i(t) = u_o(t) + R_1 i_2(t) & (2-3) \\ \frac{1}{C} \int i_1(t) dt = R_1 i_2(t) & (2-4) \\ u_o(t) = R_2 i(t) & (2-5) \end{cases}$$

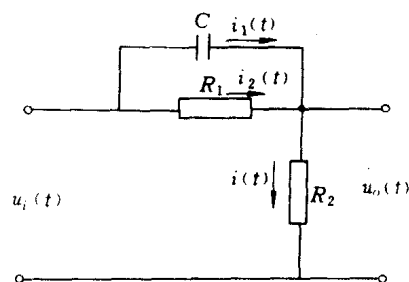


图 2-2 无源电路网络

由式 (2-3) 可得 $i_2(t) = \frac{u_i(t) - u_o(t)}{R_1} \quad (2-6)$

由式 (2-4) 可得 $i_1(t) = R_1 C \frac{di_2(t)}{dt}$

将式 (2-6) 代入, 可得 $i_1(t) = C \left[\frac{du_i(t)}{dt} - \frac{du_o(t)}{dt} \right] \quad (2-7)$

由式 (2-5) 可得 $i(t) = \frac{u_o(t)}{R_2} \quad (2-8)$

将式 (2-6)、式 (2-7)、式 (2-8) 联立, 可得

$$C \left[\frac{du_i(t)}{dt} - \frac{du_o(t)}{dt} \right] + \frac{u_i(t) - u_o(t)}{R_1} = \frac{u_o(t)}{R_2}$$

即 $R_1 C \frac{du_o(t)}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_o(t) = R_1 C \frac{du_i(t)}{dt} + u_i(t) \quad (2-9)$

例 2-3 图 2-3 所示为一齿轮传动链, 输入量为轴 I 的输入转矩 T , 输出量为轴 I 的角位移 θ_1 , 试列写其运动微分方程。

解 齿轮 2 对齿轮 1 的阻力转矩 T_1 与齿轮 2 的驱动转矩 T_2 之间存在着如下关系, 即

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{i} \quad (2-10)$$

式中, Z_1 、 Z_2 分别为齿轮 1 和 2 的齿数; i 为传动比。

轴 I 的角位移 θ_1 和轴 II 的角位移 θ_2 之间有如下关系

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = i \quad (2-11)$$

根据定轴转动动静法, 各轴转矩平衡方程分别为

$$J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + B_1 \frac{d\theta_1}{dt} + T_1 = T \quad (2-12)$$

$$J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + B_2 \frac{d\theta_2}{dt} = T_2 \quad (2-13)$$

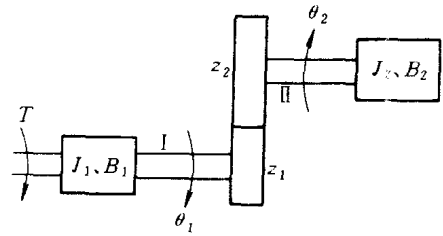


图 2-3 齿轮传动链

式中, J_1 、 J_2 分别为轴 I、轴 II 上的总转动惯量; B_1 、 B_2 分别为轴 I、轴 II 上的粘性阻尼系数。

将式 (2-10)、式 (2-11) 和式 (2-13) 代入式 (2-12), 消去中间变量 T_1 、 T_2 和 θ_2 , 并整理得到该齿轮传动链的运动微分方程为

$$\left(J_1 + J_2 \frac{1}{i^2} \right) \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1}{i^2} \right) \frac{d\theta_1}{dt} = T$$

或写成

$$J \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + B \frac{d\theta_1}{dt} = T \quad (2-14)$$

式中, J 、 B 分别称为折算到轴 I 上的总的转动惯量和粘性阻尼系数。 $J = J_1 + J_2 \frac{1}{i^2}$; $B = B_1 + B_2 \frac{1}{i^2}$ 。

对于齿轮传动链, 折算到第一轴上的总的等效转动惯量和总的等效粘性阻尼系数分别为

$$J = J_1 + J_2 \frac{1}{i_1^2} + J_3 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots \quad (2-15)$$

$$B = B_1 + B_2 \frac{1}{i_1^2} + B_3 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots \quad (2-16)$$

式中, $i_1 = Z_2/Z_1$; $i_2 = Z_4/Z_3$; ... 为各级齿轮传动比。

由式 (2-15) 和式 (2-16) 可知, 减速器的速比越大, 转动惯量、粘性阻尼系数等折算到电动机轴上的等效值越小, 因此在一般分析中常可忽略不计, 但第一级齿轮的转动惯量和粘性阻尼系数影响较大, 应该考虑。

例 2-4 图 2-4 所示为一电枢控制式直流电动机原理图, 励磁绕组电流 i_f 为恒值, 输入量为电枢电压 $u_a(t)$, 输出量为电动机转动角速度 $\omega_m(t)$, 试列写其运动微分方程。

解 电动机产生的转矩 T_m 在直流电动机中, 当励磁电流 i_f 为恒值时, 直流电动机的转矩 T_m 与电枢电流 i_a 成正比, 即

$$T_m = C_m i_a \quad (2-17)$$

式中, C_m 为电动机的转矩系数。

电枢转动时, 在电枢绕组中会产生反电动势, 该反电动势与电动机转动角速度 ω_m 成正比, 即

$$e = C_e \omega_m \quad (2-18)$$