

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

王艳华 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



四、实验步骤

1. 测量未校正系统的开环幅频特性

(1) 按附图 3-28 接线。

(2) 加阶跃信号，记录阶跃响应曲线，并测出超调量。

(3) 记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

主 编 王艳华

编 写 邹振春 韩志凌 胡祝兵

主 审 于希宁

1. 按附图 3-28 接线。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。

记录曲线峰值时间。



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

版权专有 翻印必究

前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。本书是为适应高等职业教育电气、自动化及机电类各专业的教学要求而编写的，体现了高等职业教育该专业的应用特色和能力本位。

自动控制作为重要的技术手段，在现代科学技术的许多领域中得到广泛的应用，不仅可以提高劳动生产力和产品质量，改善劳动条件，而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面起着极为重要的作用。

全书力求突出物理概念，避免繁琐的数学推导，深入浅出，强调工程应用。书中大量实例和习题来源于工程实际，增强了本书的实用性，有利于激发读者的学习兴趣，加深读者对控制技术在国民经济建设中的重要地位的认识。

全书精心组织了一个在控制工程中的重要应用实例——磁盘驱动读取系统，并将它贯穿于全书始终，各章都结合本章所介绍的原理、方法对该系统进行循序渐进的分析，有利于帮助学生建立起系统工程的观念，提高应用控制理论分析实际控制系统的能力。

本书体现了“以控制理论为基础，以计算机为核心”的现代控制工程特点，有关各章都结合本章内容介绍了运用 MATLAB 软件分析和设计自动控制系统的基本方法，再配合附录二中 MATLAB 应用简介，可使学生较易理解和掌握 MATLAB 在控制工程中的应用，以利于培养学生应用计算机辅助分析和设计控制系统的能力。

本书由承德石油高等专科学校王艳华教授任主编，并编写第一、二、五章；邹振春教授编写第四、七章；韩志凌副教授编写第三、六章；胡祝兵编写附录、第二章~七章中关于 MATLAB 的应用一节。

本书由华北电力大学于希宁教授担任主审，审阅过程中提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中难免有缺点和不当之处，恳请读者批评、指正。

编者

2007年6月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 自动控制的基本概念	1
第二节 控制系统的基本控制方式	2
第三节 自动控制系统的分类	5
第四节 自动控制系统的性能要求	6
第五节 自动控制理论发展	7
第六节 控制系统的建立过程	9
第七节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	10
小 结	11
术语和概念	11
习 题	12
第二章 控制系统的数学模型	15
第一节 控制系统的微分方程	15
第二节 传递函数	21
第三节 动态结构图	31
第四节 反馈控制系统的传递函数	40
第五节 用 MATLAB 处理系统数学模型	42
第六节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	44
小 结	46
术语和概念	46
习 题	47
第三章 时域分析法	52
第一节 控制系统的动态性能指标	52
第二节 一阶系统的时域分析	55
第三节 典型二阶系统的时域分析	58
第四节 高阶系统的时域分析	65
第五节 控制系统的稳定性分析	67
第六节 稳态误差分析	72
第七节 MATLAB用于时域分析	78
第八节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	82
小 结	87

术语和概念	87
习 题	88
第四章 根轨迹法	91
第一节 根轨迹的基本概念	91
第二节 绘制一般根轨迹的基本规则	93
第三节 参量根轨迹	99
第四节 根轨迹的应用	100
第五节 MATLAB用于根轨迹分析	103
第六节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	105
小 结	107
术语和概念	107
习 题	107
第五章 频率法	110
第一节 频率特性	110
第二节 典型环节的频率特性	113
第三节 系统的开环频率特性	118
第四节 奈奎斯特稳定判据和系统的相对稳定性	124
第五节 开环频率特性与时域指标的关系	130
第六节 MATLAB用于频域分析	137
第七节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	142
小 结	144
术语和概念	144
习 题	145
第六章 控制系统的校正	149
第一节 系统的设计与校正	149
第二节 串联校正	150
第三节 串联校正的设计方法	157
第四节 反馈校正	160
第五节 复合校正	163
第六节 MATLAB用于系统的校正	165
第七节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	169
小 结	171
术语和概念	171
习 题	172
第七章 线性采样系统控制技术	175
第一节 采样控制系统的基本概念	175
第二节 Z变换	179

第三节 采样控制系统的数学模型	184
第四节 采样控制系统分析	189
第五节 MATLAB 用于采样控制系统分析	196
第六节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统	200
小 结	201
术语和概念	202
习 题	202
附 录	204
附录一 常用函数的拉氏变换和 Z 变换表	204
附录二 MATLAB 的应用介绍	206
附录三 典型实验	211
实验一 典型环节的模拟研究	211
实验二 典型系统动态响应和稳定性	215
实验三 控制系统的频率特性	218
实验四 系统校正	219
实验五 采样控制系统分析	221
参考文献	224

第一章 概 述

本章简要介绍了有关自动控制的基本概念，控制系统的基本控制方式和分类，控制系统的性能要求；还介绍了自动控制理论的发展历史和研究方法，最后简单介绍了建立控制系统的具体过程，并结合磁盘驱动读取系统进行分析。

第一节 自动控制的基本概念

自动控制作为重要的技术手段，在现代科学技术的许多领域中得到了广泛的应用，不仅提高了劳动生产力和产品质量，改善了劳动条件，而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人类物质生活等方面起着极为重要的作用。

自动控制技术最显著的特征就是通过对各类机器、各种物理参量和工业生产过程的控制直接造福于社会。

所谓自动控制是指在无人直接参与的情况下，通过控制装置使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。被控制的装置称为受控对象，所用的控制设备称为控制器。受控对象和控制装置的总体称为自动控制系统。

基本自动控制系统的组成如图 1-1 所示。由控制器与检测元件组成控制装置，受控对象为物理装置，而给定值和被控量均为一定形式的物理量。给定值又称为控制系统的输入量，被控量又称为控制系统的输出量。

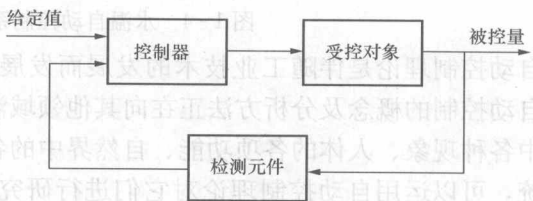


图 1-1 基本自动控制系统

控制理论的中心问题是研究自动控制系统，对自动控制系统的性能进行分析和设计则是自动控制原理的主要任务。下面，进一步举例说明。

【实例一】 如图 1-2 所示的水温人工控制系统。这里受控对象为水箱，具体地说，是水箱中的水，被控制量则是水的温度，它是表征受控对象物理特征的物理量。水箱中注入冷水，蒸汽经手动阀门并流经热传导器件，通过热传导作用将冷水加热，加热后的水流出水箱。同时，蒸汽冷却成水后由排水口排出。由人通过手动调节阀门来调节蒸汽流量，进而调节水的温度，使其满足要求。这种人工控制方式要依赖人的感官和经验，因而难以实现稳定的高质量控制。

【实例二】 如图 1-3 所示的水温自动控制系统。这是通过控制装置来调节蒸汽的流量，达到控制水温的目的。控制装置包括热敏测温元件、控制器、执行机构和阀门。给定值为要求达到的水温值，它可以是与该水温值对应的不同形式的物理量。测温元件将检测到的水温值转换成与给定值相同的物理量，并馈赠给控制器。控制器将给定值和检测值比较之

后，发出控制信号。当水箱中的水温低于给定值的要求时，执行机构将阀门的开度增加，使更多的蒸汽流入，直至实际水温与给定值相符为止。反之，当水温偏高时，同样亦可进行相应的调节。这样，就实现了没有人直接参与的自动水温控制。

要使自动控制系统能满足工程实际的需要，必须研究自动控制系统的结构、参数与系统性能之间的关系。为了分析方便，常用结构图来表示系统各个部件及变量之间的关系。图 1-4 为水温自动控制系统的结构图。图中的叉圈符号称为综合点，它表示几个信号相加减，其输出量即为诸信号的代数和，负信号需在相应信号线的箭头附近标以负号。

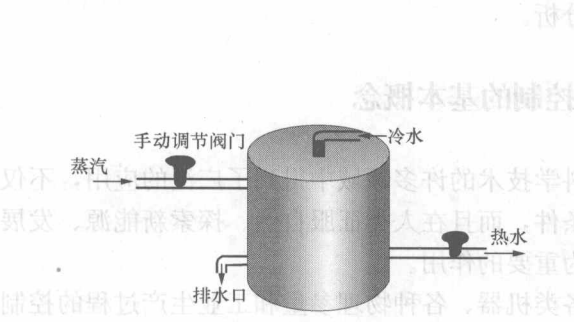


图 1-2 水温人工控制系统

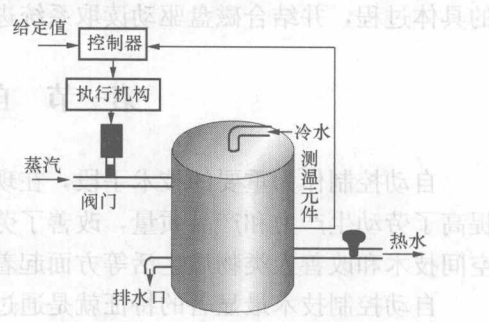


图 1-3 水温自动控制系统

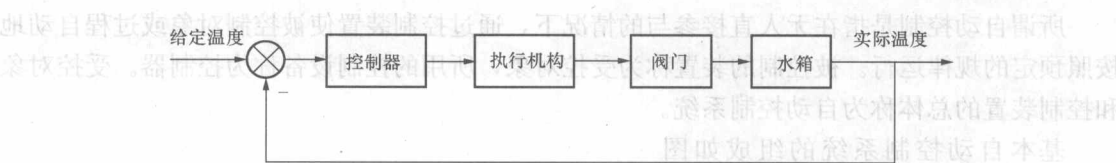


图 1-4 水温自动控制系统的结构示意图

自动控制理论是伴随工业技术的发展而发展的，但是它有着更为广阔的应用范围。目前，自动控制的概念及分析方法正在向其他领域渗透，政治和经济领域中的各种体系、社会生活中各种现象、人体的各项功能、自然界中的各种生物学系统等，都可认为是一种自动控制系统，可以运用自动控制理论对它们进行研究。目前，我们对这些系统的认识还不够深入，随着自动控制理论的发展与实践、计算机技术在控制领域中的广泛应用，人类对自然界以及社会上各种系统的控制能力也将日益提高。

第二节 控制系统的基本控制方式

若通过某种装置将反映输出量的信号引回来去影响控制信号，这种作用称为“反馈”作用。控制系统根据是否具有反馈环节分为闭环控制系统和开环控制系统。闭环控制系统又可称为反馈控制系统，它是构成现代控制系统的主体，也是本书研究的主要对象。

自动控制系统的两种基本结构对应着开环控制、闭环控制、复合控制三种基本控制方式。

一、开环控制

控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系时，称为开环控制。

例如，一般洗衣机就是一个开环控制系统。其浸湿、洗涤、漂清和脱水过程都是依设定的时间程序依次进行的，而无需对输出量（如衣服清洁程度、脱水过程等）进行测量。

【实例三】 转台速度开环控制系统。许多现代装置都利用转台驱动盘片匀速旋转，例如 CD 机、计算机磁盘驱动器、留声机等都需要在电动机和其他部件发生变化的情况下，仍然保持盘片的转速恒定，如图 1-5 所示。该系统利用电池提供与预期速度成比例的电压，直流放大器将给定信号进行功率放大后，用来驱动直流电动机。作为执行机构，直流电动机的转速与加在其电枢上的电压成比例以驱动盘片旋转。

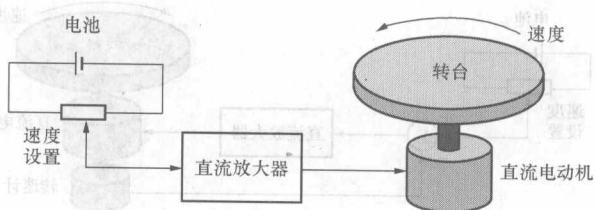


图 1-5 转台速度开环控制系统

系统结构框图如图 1-6 所示。由图可见，系统的被控量没有反馈到系统的输入端与给定量进行比较，即被控量不对系统产生控制作用，故属开环控制系统。这种转台需要在电动机和其他部件的参数发生变化的情况下，仍然保持恒定的转速，但在开环控制下是做不到这一点的。这是因为电动机和直流放大器受到的任何扰动，如电网电压的波动、环境温度变化引起的放大系数变化等都会引起转速的改变，而这种变化未能被反馈至控制装置并影响控制过程。因此，开环控制系统无法克服由此产生的偏差。

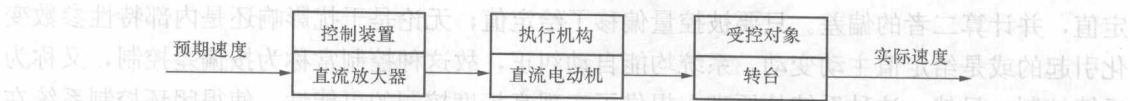


图 1-6 转台速度开环控制系统的结构图

开环控制的特点是，系统结构和控制过程均很简单，但由于这类系统无抗扰能力，因而其控制精度较低，大大限制了它的应用范围。开环控制一般只能用于对控制性能要求不高、干扰因素较少的场合，一些自动化生产线、数控机床、自动切割机等常用这种控制方式。

开环控制系统可以利用前馈作用来改善其控制性能。



图 1-7 按扰动补偿的控制方式结构图

如果扰动能被测出来，则可采用按扰动补偿的控制方式，如图 1-7 所示。其基本原理是，将扰动测量出来，送入控制器，以形成与扰动作用相反的控制量，该控制量与扰动共同作用的结果是使被控量基本不受扰动的影响。在这种控制方式

中，由于被控量对控制过程不产生任何影响，故它也属于开环控制。由于测量的是干扰，故只能对可测干扰进行补偿，而不可测干扰、受控对象和各功能部件内部的参数变化对控制量的影响，系统自身仍无法控制，因此控制精度受到限制。存在强干扰而且变化比较剧烈的场合常用这种控制方式，如龙门铣刀的转速控制、稳压电源控制等。

二、闭环控制

控制装置与受控对象之间，不但有顺向作用，而且还有反向联系，即有被控量对控制过程的影响，这种控制称为闭环控制，相应的控制系统称为闭环控制系统。闭环控制又常称为反馈控制或偏差控制。

【实例四】 转台速度闭环控制系统。该系统中，转速计是一种有效的传感器，它能提供与转轴速度成比例的电压信号。以转速计作为检测元件，便可得到转台速度闭环控制系

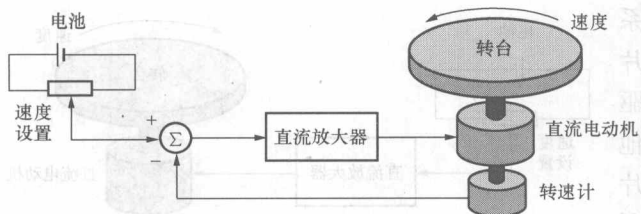


图 1-8 转台速度闭环控制系统

统，如图 1-8 所示，其结构示意图如图 1-9 所示。偏差电压信号是由对应预期速度的给定电压与转速计输出电压比较相减后得到的。当预期速度为定值，而实际速度受扰动的影响发生变化时，偏差电压也会随之变化，通过系统的调节，使实

际速度接近或等于预期速度，从而消除扰动对速度的影响，提高系统的控制精度。

由于闭环控制系统能对偏差做出响应，并在运行中不断减小偏差，故闭环控制系统将优于开环控制系统。若采用精密部件，该闭环控制系统的误差可望达到开环控制系统误差的 1/100。



图 1-9 转台速度闭环控制系统的结构图

闭环控制的特点是，需要控制的是受控对象的被控量，而控制装置测量的是被控量和给定值，并计算二者的偏差。只要被控量偏移了给定值，无论是干扰影响还是内部特性参数变化引起的或是给定值主动变动，系统均能自动纠正，故这种控制常称为按偏差控制，又称为反馈控制。显然，这种系统从原理上提供了实现高精度控制的可能性，使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

这类控制系统具有两种传输信号的通道，由给定值至被控量的通道称为前向通道，由被控量至系统输入端的通道叫反馈通道。

三、复合控制

反馈控制是在外部（给定或扰动）作用下，系统的被控量发生变化后才作出相应调节和控制的，在受控对象具有较大时滞的情况下，其控制作用难以及时影响被控量，无法形成快速有效的反馈控制。

前馈补偿控制，则在测量出外部作用的基础上，形成与外部作用相反的控制量，该控制量与相应的外部作用共同作用的结果是使被控量基本不受影响，即在偏差产生之前就进行了抑制偏差产生的控制。在这种控制方式中，由于被控量对控制过程不产生任何影响，故它也属于开环控制。

前馈补偿控制与反馈控制相结合构成了复合控制。复合控制有两种基本形式，即按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制，如图 1-10 所示。

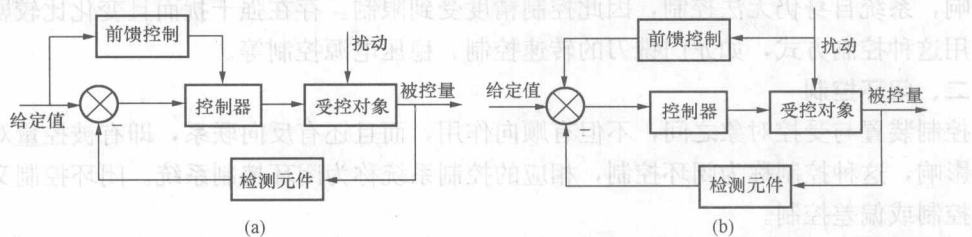


图 1-10 两种复合控制方式结构图

(a) 按输入前馈补偿的复合控制；(b) 按扰动前馈补偿的复合控制

第三节 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法较多,常见的有以下几种。

一、按输入量变化的规律分类

1. 恒值控制系统

若系统的给定值为一定值,而控制任务就是克服扰动,使被控量保持恒值,此类系统称为恒值控制系统。恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统,如自动调速系统、恒温控制系统、恒压控制系统、水位控制系统、稳压控制系统、稳流控制系统等。

2. 随动控制系统

若系统的给定值按照事先不知道的时间函数变化,并要求被控量跟随给定值变化,则此类系统称为随动控制系统。这类控制系统可以用功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械,此外还可以进行远距离控制。随动控制系统在工业和国防上有着极为广泛的应用,如火炮自动跟踪系统、舵舵位置控制系统、雷达导引控制系统、机器人控制系统等。

3. 程序控制系统

若系统的给定值按照一定的时间函数变化,并要求被控量随之变化,则此类系统称为程序控制系统,如数控伺服系统以及一些自动化生产线等。

二、按输出量和输入量间的关系分类

1. 线性系统

若系统中所有元件都由线性元件组成,它的输出量和输入量间的关系可以用线性微分方程或线性差分方程描述,称这种系统为线性系统。线性系统的最重要的特性是可以应用叠加原理。叠加原理说明,两个不同的作用量,同时作用于系统时的响应,等于两个作用量单独作用的响应的叠加。

2. 非线性系统

若系统中存在有非线性元件(如具有死区、饱和、含有库仑摩擦等非线性特性的元件),系统的输出量和输入量间的动态关系不能用线性微分方程描述,而只能用非线性微分方程描述,这种系统称为非线性系统。非线性系统不能采用叠加原理,通常采用描述函数和相平面法。

三、按系统中的参数对时间的变化情况分类

1. 定常系统

若系统微分方程的系数不是时间变量的函数,则称此类系统为定常系统。若线性系统微分方程的系数为常数,则称这类系统为线性定常系统。此类系统为本书的主要讨论对象。

2. 时变系统

若系统微分方程中有的系数是时间的函数,则称此类系统为时变系统。如宇宙飞船控制系统就是时变控制系统,宇宙飞船在飞行过程中,飞船内燃料质量、飞船受的重力等都在发生变化。

四、按系统传输信号对时间的关系分类

1. 连续控制系统

若系统各元件的输入量和输出量都是连续量,则称此类系统为连续控制系统,又称为模

拟控制系统。连续控制系统的控制规律通常可用微分方程来描述。

2. 离散控制系统

若控制系统中有的信号是脉冲序列、采样数据量或数字量,则称此类系统为离散控制系统,又称为采样数据控制系统。离散控制系统的控制规律通常可用差分方程来描述。通常采用计算机控制的系统都是离散控制系统。

此外,根据系统元部件的类型,还可分为机电控制系统、液压控制系统、气动系统以及生物系统等。根据系统被控物理量的不同,可分为位置控制系统、速度控制系统、温度控制系统等。

第四节 自动控制系统的性能要求

理想控制系统在控制过程中,应使其被控量始终等于给定值,运行中完全没有误差,完全不受干扰的影响。但是,实际上由于机械部分中质量和惯量的存在,电路中储能元件的存在以及能源功率的限制,使得运动部件的加速度受到限制,其速度和位置难以瞬时变化。所以,当给定值变化时,被控量不可能立即等于给定值,而需要经过一个过渡过程,即动态过程。所谓动态过程就是指系统受到外加信号(给定值或扰动)作用后,被控量随时间变化的全过程。动态过程可以反映系统内在性能的好坏,而常见的评价系统优劣的性能指标也是从动态过程中定义出来的。

性能指标是衡量自动控制系统技术品质的客观标准,是定货、验收的基本依据,也是技术合同的基本内容。对系统性能的基本要求有稳、快、准三个方面。

一、稳——动态过程的稳定性

若系统受到外作用(给定值变化或扰动)后,输出量将会偏离原来的期望值,由于反馈信号的作用,通过系统内部的自动调节,其被控量可以重新达到某一稳定状态,则称系统是稳定的;但也可能由于内部的相互作用,使系统出现发散,则称为不稳定的。另外,若系统出现等幅振荡,即处于临界稳定的状态,也视为不稳定,如图 1-11 所示。

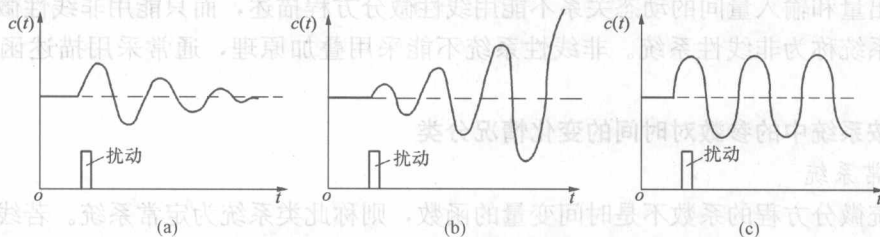


图 1-11 稳定系统和不稳定系统

(a) 稳定系统; (b) 不稳定系统; (c) 临界稳定系统

显然,不稳定系统是无法正常工作的。对任何自动控制系统,首要的条件便是系统能稳定正常运行。对系统的稳定性将在第三章中进行分析。

二、快——动态过程的快速性

快速性是通过动态过程时间长短来表征的。过渡过程时间越短,表明快速性越好,反之亦然。快速性表明了系统输出对输入响应的快慢程度。系统响应越快,说明系统的输出复现输入信号的能力越强。

三、准——动态过程的准确性

准确性是由输入给定值与输出响应的终值之间的差值来表征的。它反映了系统的稳态精度。若系统的最终误差为零,则称为无差系统,否则称为有差系统。

受控对象不同,对稳、快、准的要求也有所侧重,随动系统对快速性要求较高,而温控系统对稳定性限制严格。同一系统,稳定性、快速性和准确性往往是互相制约的。在设计与调试过程中,若过分强调系统的稳定性,则可能会造成系统响应迟缓和精度较低;反之,若过分强调系统响应的快速性,则又会使系统的振荡加剧,甚至导致系统不稳定。

如何根据工作任务的不同,分析和设计自动控制系统,使其对三方面的性能有所侧重,并兼顾其他,以全面满足要求,这正是本课程所要研究的内容。

第五节 自动控制理论发展

公元前两千年,古巴比伦人根据土壤湿度来控制水闸闸门,以调节底格里斯河和幼发拉底河的灌溉用水的流量,这可以说是一种闭环控制系统。早在 2000 年以前,我国就发明了自动定向的指南车,这是一种具有扰动顺馈补偿的开环控制系统。又如公元 1088 年,宋代的苏颂、韩公廉、周日严等人制作了水运仪象台,属于闭环控制系统。它利用水力运转,并能保持一个和天体运动一致的恒定速度,可使天空中运行的恒星保持在视野里。

人们普遍认为最早应用于工业过程的自动反馈控制器,是瓦特 (James Watt) 在 1769 年发明的飞球调节器,如图 1-12 所示。它被用来控制蒸汽机的转速,飞球 (金属球) 的转速与蒸汽机的转速成正比,在蒸汽机恒速运转时,飞球的离心力与弹簧的弹力平衡,控制气阀的阀门,使通过的蒸汽流恒定,保证蒸汽机按照要求的速度恒速运转。当蒸汽机转速降低时,飞球的离心力随之减少,通过杠杆使阀门开大,送入蒸汽机的蒸汽流增加,使蒸汽机转速增加。当蒸汽机转速因负荷变化而改变时,由于同样的工作原理,飞球调节器也将使其转速保持恒定。

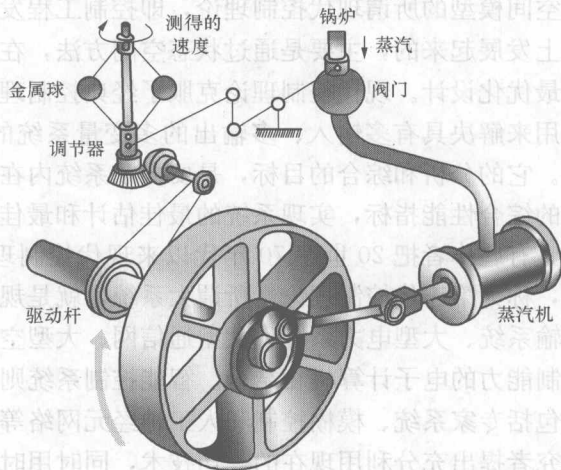


图 1-12 Watt 的飞球调节器

1868 年之前,自动控制系统发展的主要特点是凭借直觉的实证性发明。为了提高控制系统的精度,必须要解决暂态振荡的减振问题,甚至是系统的稳定性问题,因此发展自动控制理论便成了当务之急。1868 年,麦克斯威尔 (James Clerk Maxwell) 发表了著名的《论调节器》一文,这可以说是有关反馈控制理论的第一篇正式发表的论文。他用微分方程建立了一类调节器的数学模型,发展了与控制理论相关的数学理论,其工作重点在于研究不同系统参数对系统性能的影响。紧接着劳斯 (E.J. Routh) 于 1874 年、赫尔维茨 (A. Hurwitz) 于 1895 年,分别独立地提出了对高阶控制系统的稳定性判据。1892 年,李雅普诺夫 (A.M. Lyapunov) 发表了重要著作《论运动稳定性的一般问题》,全面论述了稳定性问题,

并且得出了和劳斯判据一致的结果。1932 年，奈魁斯特（H. Nyquist）提出了根据频率响应法得出的稳定判据。随之，伯德（H. W. Bode）、霍尔（A. C. Hall）及哈里斯（H. Harris）都做了大量研究工作，使频率响应法更趋完善。1948 年，从事飞机导航及控制研究的伊万斯（W. R. Evans）提出了根轨迹法理论，创建了用微分方程模型来分析系统性能的整套方法。由于根轨迹法的提出，控制工程发展的第一个阶段基本完成。

从 20 世纪 20~40 年代形成了以时域法、频率法和根轨迹法为主要内容的经典控制理论。它立足于复数方法，以传递函数为数学模型，以传递函数所对应的系统零、极点分布来确定系统动态性能，用频域分析法来进行系统的分析和综合。它的优点是计算量小、物理概念清楚、并可用实验方法来建立系统的数学模型，所以长期以来，得到了不断的发展、完善和广泛的应用。但是，经典控制理论有着一些固有的局限：①主要适用于线性定常系统，难于应用到非线性系统或时变系统；②研究的主要对象是具有单输入、单输出的单变量系统，难于应用到具有多输入、多输出的多变量系统；③以传递函数为基础，只讨论外部输入量与输出量之间的关系，因此当系统的内部特性中含有的某些因素在外部特性中反应不出来时，这种方法就可能得出错误的结论；④是在频域范围内研究系统的时间变化特性，因此是一种间接的方法，只能判断系统运动的主要特性，得不出系统运动的精确曲线。

20 世纪 60 年代以来，随着计算机技术的发展和航天等高科技的推动，又产生了基于状态空间模型的所谓现代控制理论，即控制工程发展的第二个阶段。它是在经典控制理论的基础上发展起来的，主要是通过状态空间方法，在时域范围内研究系统状态的运动规律，并实现最优化设计。现代控制理论克服了经典控制理论的许多局限性，显示了强大的生命力，主要用来解决具有多输入、多输出的多变量系统的问题，适用于解决大型复杂系统的控制问题。它的分析和综合的目标，是要揭示系统内在规律，并通过结构辨识与参数估计，针对一定的综合性能指标，实现系统的最佳估计和最佳控制。

有些作者把 20 世纪 70 年代以来现代控制理论的新发展——大系统理论和智能控制理论，称为第三代控制理论。所谓大系统，就是规模十分庞大的信息与控制系统，如大型交通运输系统、大型电力系统、大型通信网、大型空间测控系统等，其包含若干子系统，并与有控制能力的电子计算机相结合。智能控制系统则是与人工智能相结合的信息与控制系统，主要包括专家系统、模糊控制和人工神经网络等内容。另外，20 世纪 90 年代末以来，不少研究者提出充分利用现在的一切技术，同时用时间域和频率域两种方法来设计控制系统，即择优控制。表 1-1 为控制系统发展的主要过程。

表 1-1 控制系统发展历史简表

时间	历史事件
1769 年	James Watt 发明了蒸汽机和飞球调节器。蒸汽机的发明常常被认为是英国工业革命开始的标志。工业革命时期，机械化水平有了巨大的提高，这是自动化发展的前奏
1800 年	Eli Whitney 的“可互换生产”概念在滑膛枪生产中得到验证。Whitney 的成就常常被认为是大规模工业化生产开始的标志
1868 年	J. C. Maxwell 为一类蒸汽机的调节器建立数学模型
1913 年	Henry Ford 在汽车生产中引入机械化装配机

续表

1927 年	H. W. Bode 分析反馈放大器
1932 年	H. Nyquist 研究出了系统稳定性分析方法
1952 年	MIT 为机床实施轴向控制，并发出数控（NC）方法
1954 年	George Devol 开发出“程控物体转运器”，这是最早的工业机器人
1960 年	在 Devol 设计的基础上，Unimate 研制了第一台机器人，并于 1961 年用它向压铸机给料
1970 年	发展了多变量模型和最优控制
1980 年	鲁棒控制系统设计得到广泛应用
1990 年	出口外向型产业公司强调自动化
1994 年	汽车上广泛采用反馈控制系统。工业生产中迫切需要可靠性高、鲁棒性强的系统

虽然现代控制理论的内容很丰富，但对于单输入、单输出线性定常系统而言，用经典控制理论来分析和设计，仍是最实用、最方便的。真正优良的设计必须允许模型的结构和参数不精确并可能在一定范围内变化，即具有鲁棒性，这是当前的重要前沿课题之一。总之，自动控制理论正随着技术和生产的发展而不断发展，而它反过来又成为高新技术发展的重要理论根据。

本书所介绍的内容是该理论中最基本的也是最重要的内容，即经典控制理论部分。它在工程实践中用得最多，也是进一步学习现代控制理论的基础。

第六节 控制系统的建立过程

建立一个实用的控制系统目的是逐步确定预期系统的结构配置、设计规范和关键参数，以满足实际的需求。建立控制系统的基本流程是：确定系统目标，建立控制系统（包括传感器和执行机构）模型、设计合适的控制器或断言不存在满足要求的控制系统。图 1-13 说明了控制系统建立的工作流程。

通过建立胰岛素注射控制系统及后续各章的示例，讲解控制系统建立的工作流程。在第一章的例题中只能完成步骤 1 到步骤 4，以获得初步的概要设计。

步骤 1：控制目标——胰岛素注射控制系统。

步骤 2：控制变量为血糖浓度。

步骤 3：控制要求就是使病人的血糖浓度严格逼近（跟踪）健康人的血糖浓度。

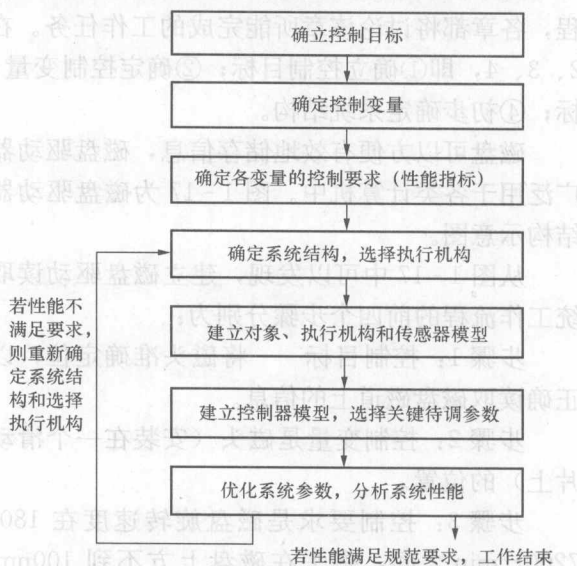


图 1-13 控制系统建立的工作流程

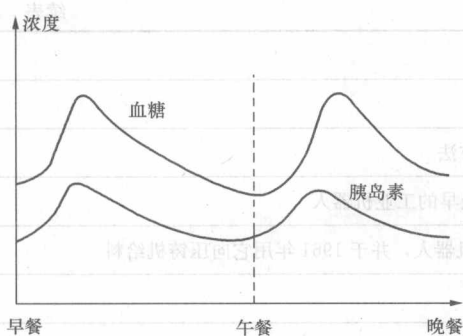


图 1-14 健康人士的血糖和胰岛素的浓度

健康人士的血糖和胰岛素的浓度如图 1-14 所示。胰岛素注射控制系统要向糖尿病人注射剂量适中的胰岛素。

步骤 4：初步确定系统结构。

图 1-15 所示的血糖开环控制系统由一个预编程信号发生器和一个微型电机泵来调节胰岛素注射速率。图 1-16 所示的血糖闭环控制系统则采用了一个血糖测量传感器，将测量值与预期血糖浓度相比较，并在必要时调整电机泵的阀门。

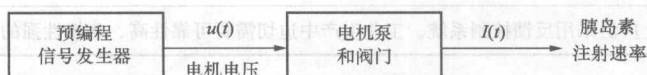


图 1-15 血糖的开环控制系统

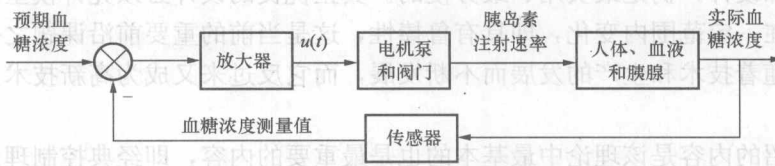


图 1-16 血糖的闭环控制系统

第七节 循序渐进分析示例——磁盘驱动读取系统

这个控制系统实例将在本书的各章中循序渐进地加以讨论。按照图 1-13 给出的工作流程，各章都将讨论该章所能完成的工作任务。在本章中，我们将完成工作流程中的步骤 1、2、3、4，即①确立控制目标；②确定控制变量；③初步确定各变量的控制要求，即性能指标；④初步确定系统结构。

磁盘可以方便有效地储存信息，磁盘驱动器则广泛用于各类计算机中。图 1-17 为磁盘驱动器的结构示意图。

从图 1-17 中可以发现，建立磁盘驱动读取系统工作流程的前四个步骤分别为：

步骤 1：控制目标——将磁头准确定位，以便正确读取磁盘磁道上的信息。

步骤 2：控制变量是磁头（安装在一个滑动簧片上）的位置。

步骤 3：控制要求是磁盘旋转速度在 1800～7200r/min 之间，磁头在磁盘上方不到 100nm 的地方“飞行”，位置精度指标初步定为 1μm。如有可能，要进一步做到使磁头由磁道 a 移动到磁道 b 的时间小于 50ms。

步骤 4：初步确定系统结构。

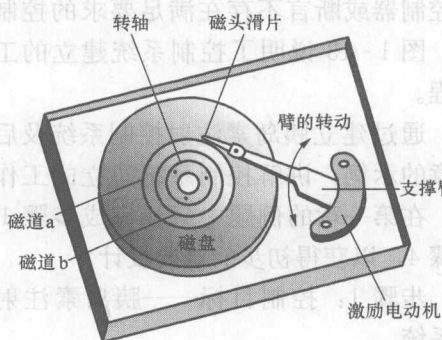


图 1-17 磁盘驱动器的结构示意图