



普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

翟春艳 主编

陈兆娜 王国良 副主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

翟春艳 主编

陈兆娜 王国良 副主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了自动控制理论的基本原理、分析、设计方法,涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基本内容。详细介绍了经典控制理论,包括系统数学模型的建立,系统的时域分析法、根轨迹法和频域分析法;线性系统的分析法;离散系统的分析法;非线性系统分析法,包括相平面法和描述函数法;简要介绍了现代控制理论,包括线性系统状态空间描述建立;状态方程的解;能控性与能观测性;状态反馈和极点配置;状态观测器设计等内容。

本书可作为自动化专业及其他电子信息类专业本科生的必修课教材,亦可作为成人教育和继续教育的教材,还可供从事自动控制类的各专业工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 翟春艳主编. —北京:
中国石化出版社, 2015. 7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-3321-3

I. ①自… II. ①翟… III. ①自动控制理论—高等
学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 102108 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者
以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 474 千字

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

定价:39.00 元

前 言

自动控制原理是研究自动控制共同规律的一门技术科学,是研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是高等学校自动化类专业的一门专业基础理论课程。自动控制技术已广泛应用于工业、农业、交通、航空及航天等众多产业部门,学好自动控制理论对掌握自动化技术有着重要的作用。

本书是为适应自动化学科的发展,根据厚基础、宽专业、优化整体教学体系的教学改革形势,化繁为简、重点内容讲透、去掉工程上不常用的扩展内容,突出基础和重点,适用于自动化专业及其他电子信息类专业本科生,还可作为成人教育和继续教育的教材。

全书共分为9章,内容包括经典控制理论和现代控制理论两部分,主要以经典控制理论为主。第1章主要介绍了自动控制的基本原理,引出了自动控制系统的常用术语,并介绍了自动控制系统的基本要求和自动控制理论的发展史。第2章主要介绍了建立连续控制系统常用的数学模型——微分方程和传递函数的方法以及两种数学图形——系统结构图和信号流图,并详细讨论了如何化简系统结构图和用梅逊公式求系统传递函数。第3~6章主要介绍了经典控制的时域分析方法、根轨迹分析法、频率特性分析法以及校正和设计方法,从时域、复数域和频域角度对线性定常系统进行定量和定性分析。其中第3章主要介绍了线性系统的时域分析方法,并重点讨论了二阶系统的时域响应和相应的性能指标,以及分析系统稳定性的劳斯稳定判据。第4章主要介绍了根轨迹的概念和绘制原则,以及如何用根轨迹分析法分析系统的性能。第5章主要介绍了工程上重点应用的频域分析法,对频率域作图、稳定性分析进行了详细讨论,并给出了频域指标的分析计算方法。第6章主要介绍了工程中常用的线性系统的校正方法——频率法校正,对串联校正、反馈校正、复合校正的内容作了详细介绍,并给出了各种校正装置的设计方法和性能指标的验算方法。第7章主要

介绍了离散系统的理论，对离散系统的数学模型——差分方程和脉冲传递函数、动态性能、稳定性以及数字校正方面作了详细讨论。第8章主要介绍了非线性系统的描述函数分析法和相平面分析法，讨论了工程实际中常见的非线性特性及解决的一般方法。第9章为现代控制理论部分，主要介绍了状态空间描述的建立、状态方程的解、能控性和能观测性、状态空间的设计方法——极点配置和观测器设计，重点讨论了基于单入单出线性定常系统的状态空间分析方法和相关定理的证明。

本书由辽宁石油化工大学翟春艳主编，陈兆娜、王国良副主编，王莉、许秀、李书臣、吴旭翔参编。其中翟春艳编写第9章，陈兆娜编写第7章，王国良编写第8章，王莉编写第4章、第5章，许秀编写第2章、第3章，李书臣编写第1章，吴旭翔编写第6章。

由于时间仓促和作者水平有限，对于本书中存在的错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 自动控制的基本概念	(1)
1.3 自动控制系统的基本形式	(2)
1.4 对自动控制系统的基本要求	(6)
习题	(6)
第 2 章 控制系统的数学模型	(9)
2.1 控制系统微分方程的建立	(9)
2.2 非线性方程线性化	(14)
2.3 拉普拉斯变换	(16)
2.4 传递函数	(22)
2.5 控制系统结构图与信号流图	(29)
2.6 典型反馈系统的几种传递函数	(44)
习题	(46)
第 3 章 控制系统的时域分析法	(52)
3.1 控制系统的时域分析基础	(52)
3.2 一阶系统的时域响应	(55)
3.3 二阶系统的时域响应	(57)
3.4 线性定常系统的重要特性	(65)
3.5 高阶系统的时域分析	(66)
3.6 线性系统的稳定性分析	(67)
3.7 线性系统的稳态误差	(76)
习题	(85)
第 4 章 根轨迹法	(89)
4.1 根轨迹的基本概念与根轨迹方程	(89)
4.2 根轨迹绘制的基本法则	(92)
4.3 控制系统根轨迹的绘制	(97)
4.4 广义根轨迹	(101)
4.5 闭环零、极点分布与阶跃响应的定性关系	(106)
4.6 系统阶跃响应的根轨迹分析方法	(109)
习题	(115)
第 5 章 线性系统的频域分析法	(120)
5.1 频率特性的基本概念	(120)
5.2 频率特性的几何表示法	(123)

5.3	奈奎斯特稳定判据	(144)
5.4	控制系统的相对稳定性	(153)
5.5	开环频率特性与系统阶跃响应的关系	(158)
	习题	(160)
第6章	线性系统的设计方法	(168)
6.1	引言	(168)
6.2	校正装置及特性	(170)
6.3	基于伯德图的系统校正	(173)
6.4	PID 控制器	(180)
	习题	(183)
第7章	离散控制系统的分析	(185)
7.1	概述	(185)
7.2	采样过程的数学描述	(186)
7.3	信号恢复	(189)
7.4	z 变换理论	(193)
7.5	离散系统数学模型	(198)
7.6	离散系统分析	(204)
7.7	数字控制器的设计	(210)
	习题	(213)
第8章	非线性系统分析	(218)
8.1	控制系统中的典型非线性特性	(218)
8.2	相平面法	(221)
8.3	描述函数法	(230)
	习题	(241)
第9章	状态空间分析与综合	(245)
9.1	引言	(245)
9.2	状态空间描述的建立	(250)
9.3	线性定常系统状态方程的解	(261)
9.4	线性系统的能控性和能观测性	(271)
9.5	状态反馈与极点配置	(283)
9.6	状态估计与状态观测器	(289)
	习题	(298)
	参考文献	(301)

第 1 章 绪论

1.1 引言

目前,自动控制系统在人们生活中几乎无处不在、无时不在,从航天空间站、飞行器、高速列车、城市交通这些复杂的大系统,到工业生产、现代农业、机器人等,自动控制系统不知不觉地影响和改变着人们的生活。自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。控制技术的广泛应用,不仅将人们从繁重的体力劳动和大量重复性的操作中解放出来,而且也极大地提高了劳动生产率和产品质量。在科学技术发展的历史上控制技术始终起着重要的作用。因此,对于工程技术人员和科学工作者来说,掌握一定的控制技术是十分必要的。

本章将从自动控制原理的基本概念出发,介绍自动控制系统的基本结构、工作原理、控制系统的基本形式以及基本要求。在对控制系统进行深入分析之前,需要明确自动控制原理研究的内容和对控制系统的基本要求。

1.2 自动控制的基本概念

“控制”是一个很一般的概念或术语,在人们日常生活中随处可见。实际上自然界中的任何事物都受到不同程度的控制。但在自动控制原理中,“控制”是指为了克服各种扰动的影响,达到预期的目标,对生产机械或过程中的某一个或某一些物理量进行的操作。例如,日常生活中,对房屋的室内温度、汽车的方向和速度、洗衣机的控制;工业生产中,对电网电压、电机转速、锅炉的温度和压力、机器人的控制;航空航天工业中,对航天飞机的发射、飞行器的姿态控制;生物工程中的体温和血压以及市场经济中的商品质量和价格的控制等。这些都是在自动控制原理中涉及到的控制问题。在这里,房屋、汽车、电网、电机、锅炉、航天飞机、飞行器等称为被控对象,室内的温度、汽车的方向和速度、电网的电压、电机的转速、航天飞机发射时的角度和速度、飞行器的姿态等称为被控变量(简称被控量)。

通常,在自动控制技术中,把这些工作的机器设备称为被控对象,把表征这些机器设备工作状态的物理量称为被控变量,而对这些物理参量的要求值称为给定值或希望值(或参考输入)。则控制的任务可概括为,使被控对象的被控变量等于给定值。

在对被控变量进行控制时,按照系统中是否有人参与,可分为人工控制和自动控制。若由人来完成对被控变量的控制,称为人工控制;若由自动控制装置代替人来完成这种操作,则称为自动控制。自动控制的任务,是在没有人直接参与下,利用控制装置操纵被控对象,使被控变量等于给定值。

自动控制是在没有人直接参与情况下,利用控制装置来操纵被控对象的某些物理状态,使其按照预定的规律去运行。

如图 1.1 所示是一个简单的反应器温度控制的工程例子。正常运行中,反应器的温度是

控制目标，称为被控变量。控制的任务是希望这个温度保持在一个恒定的温度值 T_0 ，称为给定值。因为化学反应是放热反应，用冷却剂 w 通入夹套进行冷却。混合原料由前道工序送来，因而其流量 q 及温度 T_{in} 都可能波动，是造成被控变量波动的主要原因，一般称为干扰。生成物的流量和进料流量相同，反应器中保持着恒定的物料量。反应器的温度通过温度测量仪表 TT 测量出温度 T ，并将其送到控制器 TC，与给定值 T_0 进行比较，按比较的结果 $\Delta T = T_0 - T$ (称为误差或偏差) 进行计算，然后发出指令控制调节阀移动，使冷却剂流量改变，以达到消除干扰影响的目的。冷却剂流量是为了消除干扰影响的手段，故称为控制变量或操纵变量。

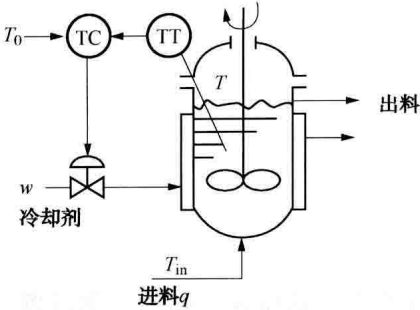


图 1.1 反应器温度控制系统

控制器进行计算的方法称为控制规律。正常情况下，反应器的温度处于平衡状态，偏差为零；若进料量流量 q 增大，实际温度 T 上升，控制器 TC 给出加大冷却剂阀门开度以增加夹套进水量指令；反之，若进料量流量 q 减少，实际温度 T 下降，控制器 TC 就会发出关小冷却剂阀门开度的指令。由上述调节过程看出，无论进料量变大还是变小，只要温度 T 发生变化，系统都会自动而及时地采取控制作用，以使温度自动上升或下降，直至偏差为零，达到新的平衡状态。

上述的自动控制和人工控制的区别在于，在自动控制系统中某些装置被有机地组合在一起，代替了人工控制系统中人的功能。由于这些装置担负着控制的功能，通常称之为控制器。因此，自动控制系统可定义为，由被控对象和控制器按一定方式连接起来，完成某种自动控制任务的有机整体。

1.3 自动控制系统的基本形式

自动控制系统种类繁多，有机械的、电子的、液压的、气动的、抽象的等等。虽然这些控制系统的功能和复杂程度都各不相同，但就其基本结构形式而言，可分为两种类型：开环控制系统和闭环控制系统。

1.3.1 开环控制系统

若系统的输出量(即被控变量)不返回到系统的输入端，则称之为开环控制系统。控制装置与被控制对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程，或输出信号不对系统的控制作用发生影响。如图 1.2 所示的电加热器控制房间温度的控制系统就属于开环控制系统。

对于电加热器温度控制系统而言，不管房门开关次数如何变化，都要尽量将房间温度维持在恒定值。因此，温度控制系统的主要目的，一个是消除或减少由于房门开关次数导致的室温下降；另一个是维持室温在恒定的期望值。

如图 1.3 所示，在室温控制系统中，控制任务就是通过开关 S 的开合，加热电阻丝，使房间温度恒定。其中被控对象为房间；被控变量为房间的温度；开关 S 受时间继电器控制，按照预先规定的时间接通或断开电源，对房间温度进行控制，所以开关 S 和电阻丝为控制装置(或控制器)；房门开关次数及室内热量的散失为扰动。扰动是不希望的系统输入量。在这个系统中它的存在将使房间的温度偏离期望值。

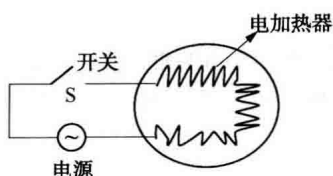


图 1.2 电加热器温度控制



图 1.3 室温开环控制系统

通常，室温处于期望值附近。当房门开关次数及室内热量的散失增加时，室温将下降。对于图 1.3 这样的开环控制系统，室温的下降是无法反映到系统输入端的，因此对开关的接通与断开不产生影响，也就无法消除房门开关次数及室内热量的散失增加对被控变量室温的影响。这就是开环控制系统的缺陷，它无法消除由于系统内部参数变化或外部扰动对系统被控变量的影响。

开环控制系统结构如图 1.4 所示。由于在开环控制系统中，控制器与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系，系统的被控变量对控制作用没有任何影响，系统的控制精度完全取决于所用元器件的精度和特性调整的准确度。因此开环系统只有在输出量难于测量且要求控制精度不高以及扰动的影响较小或扰动的作用可以预先加以补偿的场合，才得以广泛应用。对于开环控制系统，只要被控对象稳定，系统就能稳定地工作。

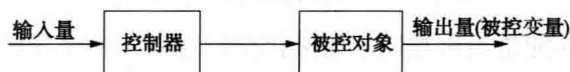
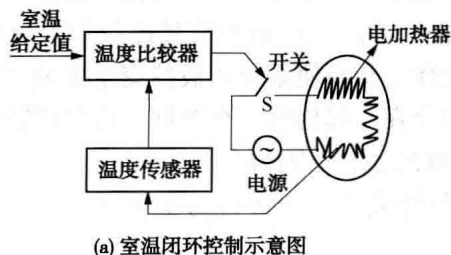


图 1.4 开环控制系统结构图

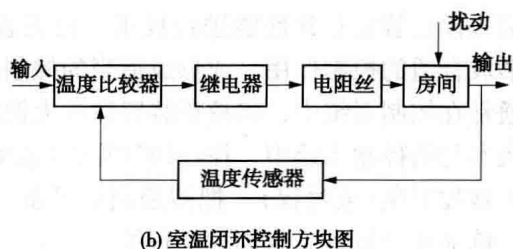
1.3.2 闭环控制系统

通常，在实际控制系统中，扰动是不可避免的。为了克服开环控制系统的缺陷，提高系统的控制精度以及在扰动作用下系统的性能，人们在控制系统中将控制变量反馈到系统输入端，对控制作用产生影响，这就构成了闭环控制系统。

如图 1.5 所示为室温闭环温度控制系统的原理方块图。其中参考输入给出了系统的期望温度。系统的输出量(即被控变量)是室温的实际温度，通过温度传感器反馈到系统输入端。理想情况下，室温维持在恒定的期望值附近。如果除房门开关次数及室内热量的散失引起室温发生变化，则这种温度的变化将通过温度传感器反馈到系统输入端，与参考输入比较，产生误差信号。控制器将根据误差信号对开关进行调节，以消除室温的实际温度与期望值之间的误差，使实际温度维持在期望值附近。



(a) 室温闭环控制示意图



(b) 室温闭环控制方块图

图 1.5 室温闭环控制系统

这种通过负反馈产生偏差，并根据偏差的信息进行控制，以达到最终消除偏差或使偏差减小到允许范围内的控制原理，称为负反馈控制原理，简称反馈控制原理。因此闭环控制系

统又称为反馈控制系统或偏差控制系统。

通常，在闭环控制系统中，从系统输入量到系统被控变量之间的通道称为前向通道，从被控变量到输入端的反馈信号(用以减少或增加输入量的作用)之间的通道称为反馈通道。

1.3.3 闭环控制系统的组成

虽然闭环控制系统根据被控对象和具体用途的不同，可以有各种各样不同的结构形式。但是，就其工作原理来说，闭环控制系统是由给定装置、比较元件、放大元件、执行机构、检测元件、校正装置和被控对象组成的。其原理结构图如图 1.6 所示。图中的每一个方块，代表一个具体特定功能的装置或元件。

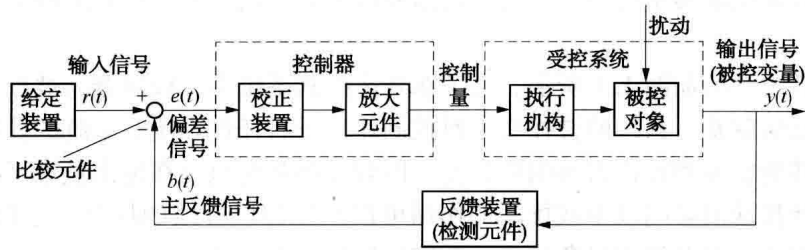


图 1.6 闭环控制系统典型方块图

(1) 给定装置 其功能是给出与期望的被控变量相对应的系统输入量(即参考输入信号或给定值)。

(2) 比较元件 其功能是将检测元件测量到的被控变量的实际值，与给定装置提供的给定值进行比较，求出它们之间的偏差。

(3) 放大元件 比较元件通常位于低功率的输入端，由于提供的偏差信号通常很微弱，因此须用放大元件将其放大，以便推动执行机构去控制被控对象。如果偏差时电信号，则可用集成电路和晶闸管等元器件所构成的电压放大器和功率放大器来进行放大。

(4) 执行机构 其功能是执行控制作用并驱动被控对象，使被控变量按照预定的规律变化。

(5) 检测元件 其功能是测量被控制的物理量，并将其反馈到系统输入端。在闭环控制系统中检测元件及相关的元器件构成系统的反馈装置。如果被测量的物理量为电量，一般用电阻、电位器、电流互感器和电压互感器等来测量；如果被测量的物理量为非电量，通常检测元件应将其转换为电量，以便于处理。

(6) 校正装置 由于被控对象和执行机构的性能难以满足要求，在构成控制系统时，通常需要引入校正装置对其性能进行校正。校正装置的功能是对偏差信号进行加工处理和运算，以形成合适的控制作用，或形成适当的控制规律，从而使系统的被控变量按预定的规律变化。通常在控制系统中，将校正装置和放大器组合在一起构成一个器件，称为控制器。在有计算机参与的控制系统中，往往用计算机(或微处理器)作为控制器。

(7) 被控对象(或过程) 把被控制的设备、物体或者一个运行的变化过程，如化学反应过程、炼油生产过程、生物学过程等。

下面给出图 1.6 所示的闭环控制系统方块图各信号定义。

输入信号：是指参考输入，又称给定量、给定值或输入量。它是控制着输出变化规律的指令信号。

输出信号：是指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，又称被控变量或输出量，它与输入信号之间满足一定的函数关系。

反馈信号：由系统(或元件)输出端取出并反射送入系统(或元件)输入端的信号称为反馈信号。反馈有主反馈和局部反馈、正反馈和负反馈之分。在反馈通道中，当主反馈信号与输出信号相等时，称为单位反馈。

偏差信号：是指输入信号与主反馈信号之差。偏差信号简称偏差。

误差信号：是指系统被控变量实际值与期望值之差，简称误差。在单位反馈情况下，误差值也就是偏差值，二者是相等的。在非单位反馈情况下，两者存在着一定的关系。

扰动信号：简称扰动或干扰，它与控制作用相反，是一种不希望出现、影响系统输出的不利因素。扰动信号既可来自系统内部，又可来自系统外部，前者称为内部扰动，后者称为外部扰动。

系统：作为一个有机的整体，将一些部件组合在一起完成特定的任务。系统不仅限于物理系统，还可用于软件系统，甚至抽象的动态过程，如计算机操作系统、经济系统、工程系统进行某种数学上的变换等。

特性：指系统输入与输出之间的关系，可用数学式表示，也可用曲线或图表方式表示。系统特性分静态特性和动态特性。静态特性是系统稳定以后表现出来的输入输出关系，通常表现为静态的放大倍数；动态特性指的是系统输入输出在从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程中所表现出来的特性，又称为过渡过程特性。

1.3.4 闭环系统的特点

为了进一步说明闭环系统的特点，可将图 1.6 所示的系统方块图简化为图 1.7 所示的方块图。图中， r 和 y 分别是系统的输入和输出信号； e 为系统的偏差信号； b 为系统的主反馈信号；假设参量 G 和 H 分别是前向通道和反馈通道的增益，即放大系数。

由图 1.7 可得出如下关系：

$$e = r - b \quad (1-1)$$

$$b = H \cdot y \quad (1-2)$$

$$y = G \cdot e \quad (1-3)$$

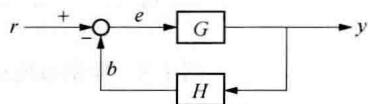


图 1.7 闭环控制系统

将式(1-3)和式(1-2)代入式(1-1)，整理后可得出输入与输出之间的关系为

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (1-4)$$

这一关系式将有助于理解闭环系统的一些特征。概括起来，闭环系统有如下特点：

(1) 闭环控制系统是利用反馈的作用来减小系统误差的。在闭环控制系统中，控制器与控制对象之间不仅有正向作用，而且还有反向联系，因而信号的传递形成一个闭合回路，闭环控制系统也因此而得名。因此，当输出偏离期望值时，这个偏差将被检测出来，对控制作用产生影响，从而使系统具有修正被控变量偏离的能力，减小了系统误差，较好地实现了自动控制的功能。

(2) 闭环控制系统能够有效地抑制被反馈通道包围的前向通道中各种扰动对系统输出量的影响。

1.4 对自动控制系统的基本要求

为了实现自动控制的任务,必须要求控制系统的被控变量(输出量)跟随给定值的变化而变化,希望被控变量在任何时刻都等于给定值,两者之间没有误差存在。然而,由于实际系统中总是包含具有惯性或储能元件,同时由于能源功率的限制,使控制系统在受到外作用时,其被控变量不可能立即变化,而有一个跟踪过程。

控制系统的性能,可以用动态过程的特性来衡量,考虑到动态过程在不同阶段的特点,工程上常常从稳定性(稳)、快速性(快)、准确性(准)三个方面来评价自动控制系统的总体精度。

1. 稳定性

是指系统在外作用后,若控制装置能操纵被控对象,使其被控变量随时间的增长而最终与给定期望值一致,则称系统是稳定的,如图 1.8 曲线①所示。如果被控变量随时间的增长,越来越偏离给定值,则称系统是不稳定的,如图 1.8 曲线②所示。

稳定的系统才能完成自动控制的任务,所以,系统稳定是保证控制系统正常工作的必要条件。一个稳定的控制系统,其被控变量偏离给定值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。

2. 快速性

快速性是指系统的动态过程进行的时间长短。过程时间越短,说明系统快速性越好,过程时间持续越长,说明系统响应迟钝,难以实现快速变化的指令信号,如图 1.9 响应曲线①所示。

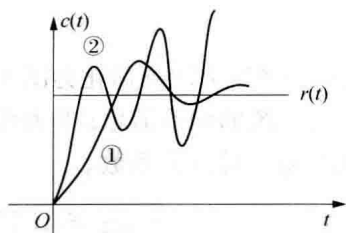


图 1.8 控制系统动态过程曲线

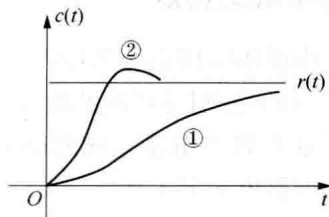


图 1.9 控制系统动态过程

稳定性和快速性反映了系统在控制过程中的性能。系统在跟踪过程中,被控变量偏离给定值越小,偏离的时间越短,说明系统的动态精度偏高,如图 1.9 中的曲线②所示。

3. 准确性

是指系统在动态过程结束后,其被控变量(或反馈量)对给定值的偏差而言,这一偏差即为稳态误差,它是衡量系统稳态精度的指标,反映了动态过程后期的性能。

由于被控对象的具体情况不同,各系统对稳、快、准的要求应有所侧重。而且同一个系统,稳、快、准的要求是相互制约的。提高动态过程的快速性,可能会引起系统的剧烈振荡,改善系统的平稳性,控制过程又可能很迟缓,甚至会使系统的稳态精度很差。分析和解决这些矛盾,将是自动控制理论学科讨论的重要内容。

习题

1-1 在下列过程中,哪些是开环控制?哪些是闭环控制?指出各控制系统的输入量和输出量。

(1)人到书架取书;(2)人的体温控制系统;(3)微波炉做饭;(4)空调制冷。

1-2 试比较开环控制系统与闭环控制系统的优缺点。

1-3 什么叫反馈？为什么闭环控制系统常采用负反馈？试举例说明。

1-4 自动控制系统的特征是什么？

1-5 图 1.10 为水箱液位控制系统的三个不同控制方案，图中 Q_1 、 Q_2 分别为进水流量和出水流量。控制的目的是保持水位为一定的高度。试说明其工作原理有何不同，画出系统方框图。

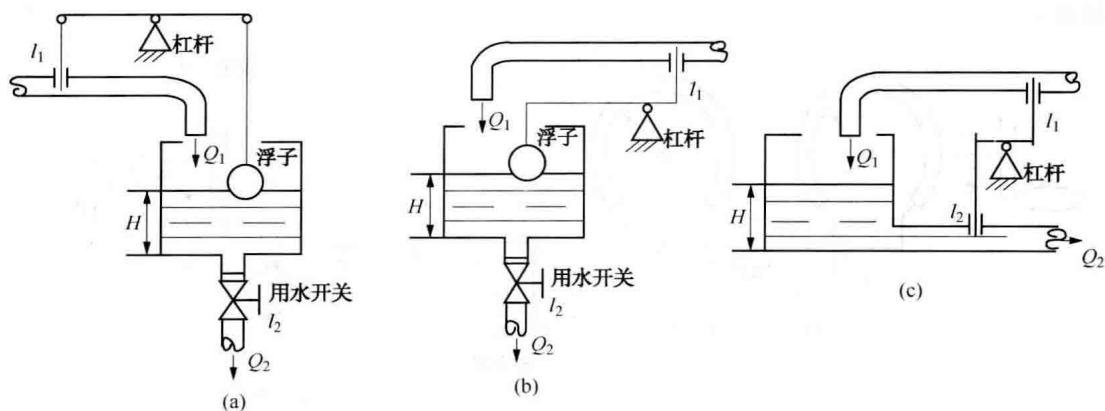


图 1.10 水箱液位控制系统

1-6 工业上常见的炉温控制系统如图 1.11 所示。指出系统的输入量和被控变量，区分被控对象和控制器，画出系统的原理方块图，并简述工作原理。

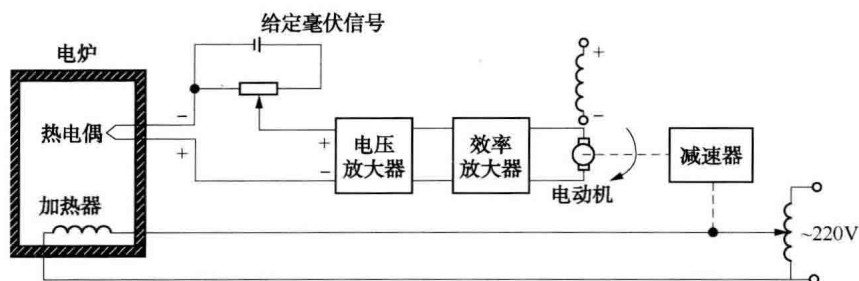


图 1.11 炉温控制系统

1-7 图 1.12 是一加热炉出口温度控制系统，燃料油在炉中燃烧，放出热量以加热原料油。工艺上要求原料油的出口温度控制在 $(350 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，为此设计了 (a)、(b) 两种控制方案。

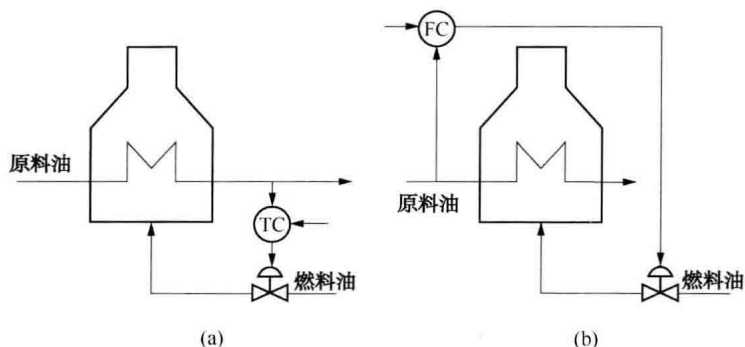


图 1.12 加热炉出口温度控制系统

(1) 分别画出两种控制系统的方框图, 说明它们在控制系统结构上分别属于什么控制系统?

(2) 当原料油的入口温度经常波动时, 控制方案(b)能否使原料油的出口温度保持不变?

(3) 控制方案(a)属于定值还是随动控制系统? 给定值是多少?

1-8 位置随动系统的原理图如图 1.13 所示。试说明系统的工作原理, 并画出系统的方框图。

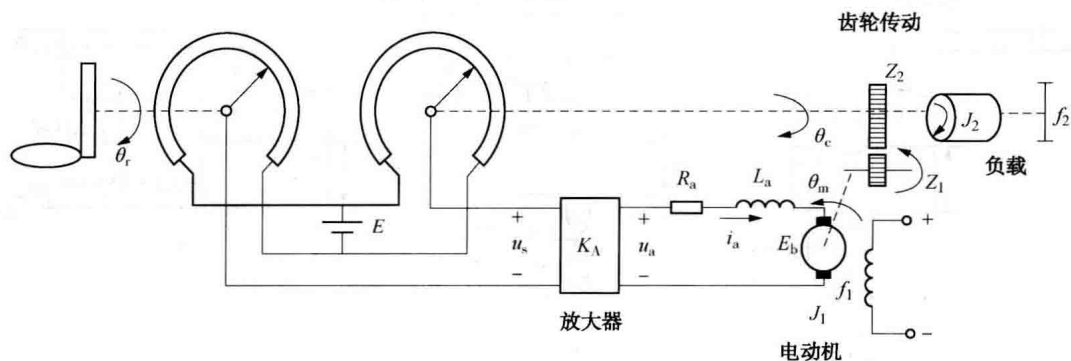


图 1.13 位置随动系统

1-9 有人认为“如果开环控制系统不稳定, 可以利用反馈提高其稳定性”。你认为这种说法正确吗? 为什么?

第2章 控制系统的数学模型

控制理论研究的主要问题包括以下两个方面。一是对于一个给定的控制系统，它的运动具有哪些性质和特征；二是怎样设计一个控制系统使它的运动具有给定的性质和特征。前一个问题称为控制系统的分析，后一个问题称为控制系统的综合和设计，它们都离不开对控制系统运动的研究。要研究各种变量的运动，就必须把它们彼此相互作用的关系和规律以数学形式表示出来。描述系统输入输出变量以及系统内部各个变量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型。

数学模型有动态模型和静态模型之分。描述系统各变量动态关系的表达式称为动态数学模型；在静态条件下（即变量的各阶导数为零），描述系统各变量之间关系的表达式称为静态数学模型。在实际工程中，无论是机械的、电气的、液压的、热力的系统，还是经济的、生物的系统等等，它们虽然具有不同的物理特性，但是却都具有最基本的相似性，即它们的动态行为都可以用微分方程来描述，不同的物理系统可以具有同一形式的数学模型。

建立数学模型的方法可分为解析法和实验法。所谓解析法即根据系统及元件各变量之间所遵循的物理、化学定律列出变量间的数学表达式，并经实验验证。而实验法则是对系统或元件输入一定形式的信号（阶跃信号、脉冲信号、正弦信号等），根据系统或元件的输出响应，经过数据处理而辨识出系统的数学模型。前者适用于简单、典型、通用常见的系统，而后者适用于复杂、非常见的系统。实际应用中常常是把这两种方法结合起来建立数学模型。

实际系统往往是很复杂的，都具有不同程度的非线性、时变等特性，很难准确地用数学表达式描述各变量之间的关系。在工程上为了寻求一种行之有效的方法，必须对问题进行简化，忽略一些次要因素，使其避免数学处理上的困难，又不影响分析系统的准确性。当忽略了非线性因素，并认为参数是集中、定常时，描述系统的动态数学模型为线性、定常微分方程，对应的系统为线性、定常系统，可以应用叠加原理。若考虑了非线性因素，则数学模型为非线性微分方程，对应的系统为非线性系统。若参数是非定常的，则对应的系统是时变系统。本章主要研究线性定常系统。

根据解决的问题不同、分析的方法不同，线性定常系统可以采用不同形式的数学模型，例如，微分方程、传递函数、脉冲传递函数、频率特性、差分方程、状态方程等。还有数学模型的图形表示，如结构图、信号流图等。本章研究系统的微分方程、传递函数和结构图、信号流图等。其他形式的数学模型将在后续的章节中进行研究。

2.1 控制系统微分方程的建立

控制系统的运动状态和动态性能可由微分方程式来描述，微分方程就是系统的一种数学模型。要建立一个控制系统的微分方程，首先必须了解整个系统的组成、工作原理，然后根据有关的物理、化学定律，列出整个系统输出量与输入量之间关系的动态关系式，即微分方程。建立微分方程的一般步骤如下：

① 分析系统和各个元件的工作原理,找出各物理量(变量)之间的关系,确定系统和各元件的输入输出变量。

② 在条件允许的情况下,忽略一些次要因素。

③ 根据物理或化学定律列出元件的原始方程。这里所说的物理或化学定律是指诸如牛顿第二定律、能量守恒定律、物质不灭定律、克希霍夫定律等。

④ 列出原始方程式中中间变量与其他因素的关系式。这种关系式可能是数学方程式,或是曲线图。它们在大多数情况下是非线性的。若条件许可,应进行线性化处理。否则按非线性对待,问题会相当复杂。

⑤ 将上述关系式带入原始方程式,消去中间变量,得元件的输入输出关系方程式。

⑥ 同理,求出其他元件的方程式。

⑦ 从所有元件的方程式中消去中间变量,最后得系统的输入输出微分方程。

下面举例说明建立微分方程的方法和步骤。

[例 2-1] RC 无源网络如图 2.1 所示,图中 R 、 C 分别为电阻和电容,均为常值,输出端开路。试建立输入电压 $u_r(t)$ 和输出电压 $u_c(t)$ 之间关系的动态方程。

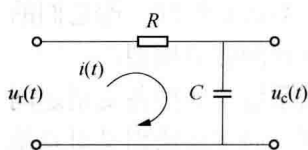


图 2.1 RC 无源网络

解: ① 根据克希霍夫定律可写出原始方程:

$$u_r(t) = Ri(t) + u_c(t) \quad (2-1)$$

② 式中, $i(t)$ 是中间变量,它与输出 $u_c(t)$ 有如下关系:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2-2)$$

③ 消去中间变量 $i(t)$ 后,可得输入输出微分方程为

$$RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-3)$$

一般在列写微分方程时,输出量及其各阶导数项写在方程式左端,按导数的阶数降序排列,输入量及其各阶导数项写在方程式右端。

令 $RC=T$, 则式(2-3)又可写成如下形式:

$$T \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-4)$$

式中 T —— RC 无源网络的时间常数, s。

这是一个一阶线性微分方程,也就是图 2.1 所示的 RC 无源网络的数学模型。能够用一阶微分方程描述的对象称为一阶对象,所以图 2.1 所示的 RC 无源网络是一个一阶对象。

[例 2-2] RLC 无源网络如图 2.2 所示,图中 R 、 L 、 C 分别为电阻、电感和电容,均为常值,输出端开路。试建立输入电压 $u_r(t)$ 和输出电压 $u_c(t)$ 之间关系的动态方程。

解: 根据克希霍夫定律,可得

$$u_r(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + u_c(t) \quad (2-5)$$

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2-6)$$

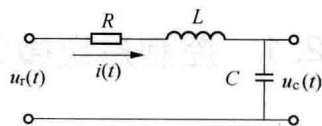


图 2.2 RLC 无源网络

消去中间变量 $i(t)$ 后,可得输入输出微分方程为