

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本系列教材

自动控制理论

李天云 张宇辉 编

为继续教育（函授）

量身定做



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

清华大学出版社 中国工信出版集团 人民邮电出版社

自动控制理论

第2版

机械工业出版社

机械工业出版社
北京

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本系列教材

自动控制理论

李天云 张宇辉 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为高等学校“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本系列教材之一，是《自动控制理论》课程，其内容包括经典控制理论的线性定常系统分析法（控制系统的时域分析法、频域分析法和根轨迹法等）、综合法（控制系统的设计与校正）以及现代控制理论初步（状态空间法）。各章均配有较多的例题和习题，书中还附有习题答案，便于自学。

本书系高等学校“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专升本课程教材，也可作为电类学校和职业培训的参考教材，并可供从事自动化方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制理论/李天云，张宇辉编．—北京：中国电力出版社，2007

（电气工程及其自动化专业继续教育（函授）专升本系列教材）

ISBN 978-7-5083-4982-4

I．自… II．①李…②张… III．自动控制理论—高等学校—教材 IV．TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 142802 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.625 印张 399 千字
印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材

参 编 学 校

华中科技大学

武汉大学

华北电力大学

东北电力大学

三峡大学

上海电力学院

长沙理工大学

武汉电力职业技术学院

电气与电子工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电气工程学院

电力与自动化工程学院

电气与信息工程学院

“电气工程及其自动化”专业继续教育(函授)系列教材

编 委 会

主 任：尹项根

副主任：陈柏超 熊 蕊 刘克兴

委 员：(按姓氏笔画排序)

丁坚勇	王义军	尹项根	关根志	刘克兴	齐 俊
朱 凌	陈 坚	何发斌	李天云	李裕能	严国志
应敏华	张元芳	张步涵	张丽静	张 哲	张新国
林碧英	赵 玲	聂宏展	殷小贡	袁兆强	梁文朝
程乃蕾	韩学军	鲁方武	鲁铁成	舒乃秋	谢自美
喻剑辉	曾克娥	曾祥君	辜承林	谭 琼	熊信银
熊 蕊	魏涤非				

编者按语

根据《中国教育改革与发展纲要》中“要大力发展成人高等教育”的精神，由华中科技大学电气与电子工程学院和武汉大学电气工程学院牵头，组织华北电力大学电气工程学院、东北电力大学电气工程学院、三峡大学电气工程学院、上海电力学院电力与自动化工程学院、长沙理工大学电气与信息工程学院、武汉电力职业技术学院等单位，成立了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组，于2003年11月在武汉，就国家在新形势下对人才的需求及“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的现状、特点和人才供需状况，对“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教学计划、课程体系和使用教材现状进行了充分地研讨，制定了“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次的指导性教学计划。在此基础上研究了本专业的教材建设问题，大家一致认为函授教材要遵循自学和面授相结合、理论和实践相结合的原则，体现市场经济和科技发展对继续教育知识更新和理念更新的要求。针对目前“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）专科和专升本两个层次尚缺乏系统性教材的现状，决定组织各学院有经验的教授和专家编写这两个层次的教材。我们希望这两套系列教材能为规范本专业的教学内容和提高本专业的教学质量起到积极的推动作用。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）的教材建设，现在只是开头，需不断改进和完善。因此，在使用过程中敬请读者随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。

“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）教学工作协作组
“电气工程及其自动化”专业继续教育（函授）系列教材编委会

2006年8月

前言

自动控制理论是控制系统分析与设计的理论基础。在科学技术高度发达的今天，自动控制技术不仅在工业生产过程、国防、航空航天、核能技术等工程领域中得到广泛地应用，而且已渗透到非工程领域，诸如生命科学、社会经济学等领域中，起着越来越重要的作用。因此，作为研究自动控制规律的一门技术科学——自动控制理论，成为各类工程技术人员必须掌握的一门技术基础知识。

本书是根据高等学校电气工程及其自动化专业函授本科 80 学时的教学大纲编写的。在内容编排上按经典控制理论和状态空间分析两部分编写，在内容安排上，注重精炼内容，突出重点。突出基本理论和基本概念，在不影响基本理论阐述的前提下，避免过多的数学推导，力求在少而精的原则基础上做到内容的充实。注意深入浅出、循序渐近地引入有关知识点。例如，系统分析的三种经典分析方法，时域分析法具有直观、便于理解的特点，在建立了时域分析的基本概念之后，引入频域分析法和根轨迹分析法即以频率响应曲线和根轨迹图为数学模型分析系统控制性能的基本方法，使读者通过经典控制理论的学习，能够系统地掌握系统分析与综合的基本理论和方法。状态空间分析法是现代控制理论的基础，在阐述基本理论和分析方法的基础上，引入状态反馈的闭环控制概念，给出用状态反馈实现极点任意配置的基本条件和方法，通过状态空间法的学习，使读者能够系统地掌握系统分析与综合的基本理论和方法，为进一步学习现代控制理论打下坚实的基础。

本书具有内容较全面、难度适中、例题丰富等特点，每一章都附有一定数量的习题和答案，便于自学。本书可供电气工程及其自动化专业、机械类等非自动控制专业的学生使用。

本书由李天云主编，并编写了第一章、第三章、第四章、第七章，张宇辉编写第二章、第五章、第六章，最后由李天云教授统稿。由于编者水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 8 月

目 录

编者按语

前言

第一章 自动控制概述	1
第一节 引言	1
第二节 自动控制及其基本方式	1
第三节 自动控制的基本要求	5
小结	6
习题	6
第二章 控制系统的数学模型	7
第一节 列写微分方程的一般方法	7
第二节 利用拉普拉斯变换求解线性微分方程	11
第三节 传递函数	20
第四节 控制系统的动态结构图	25
第五节 反馈控制系统的传递函数	37
第六节 信号流图与梅森 (Mason) 公式	42
第七节 PID 基本控制规律	47
小结	51
习题	51
第三章 控制系统的时域分析	55
第一节 控制系统时域性能概述	55
第二节 一阶系统时域分析	59
第三节 二阶系统时域分析	62
第四节 系统闭环零、极点分布与阶跃响应之间的关系	73
第五节 稳定性与劳斯 (Routh) 判据	77
第六节 稳态误差分析与误差系数	82
小结	90
习题	91
第四章 控制系统的频域分析	96
第一节 频率特性	96
第二节 频率特性的极坐标图	100
第三节 频率特性的对数坐标图	107
第四节 频域分析中的 Nyquist 稳定判据	117
第五节 频域性能指标和时域性能指标之间的关系	129

小结	133
习题	134
第五章 控制系统的根轨迹分析	138
第一节 根轨迹的基本概念	138
第二节 根轨迹方程	141
第三节 绘制根轨迹的基本规则和方法	142
第四节 系统阶跃响应的根轨迹分析	152
小结	163
习题	164
第六章 控制系统的设计与校正	167
第一节 设计概述	167
第二节 串联校正	170
第三节 反馈校正	193
第四节 复合校正	196
小结	201
习题	202
第七章 线性系统状态空间分析法	205
第一节 概述	205
第二节 线性定常系统状态空间表达式的建立	208
第三节 线性定常系统状态方程的求解	228
第四节 线性定常系统的能控性与能观测性	237
第五节 线性控制系统状态空间的综合	251
小结	258
习题	258
习题答案	262
参考文献	274

第一章

自动控制概述

第一节 引言

自动控制理论是研究自动控制过程所遵循的共同规律的一门学科。借助于自动控制理论，可以把工业生产过程和军事、航空航天技术、核能技术、生物工程、经济科学、社会科学等领域的控制问题抽象为数学模型，然后利用自动控制理论中提供的“系统分析”的方法对待研究系统的性能作出正确评价。如果待研究系统的性能不满足规定的性能指标要求，则可利用“系统综合”的方法予以改进。

自动控制理论自产生、发展至今，已取得了举世瞩目的成就。例如，在工业上，生产过程的自动控制，锅炉的温度和压力的自动控制；在军事上，雷达目标的自动跟踪、火炮的自动瞄准、导弹的制导控制；在电力系统方面，同步发电机励磁的自动控制、电力系统频率的自动控制、电力系统故障设备的自动切除或隔离；在航空航天方面，人造地球卫星和宇宙飞船的准确发射并进入预定的轨道、返回地面的回收控制问题等方面。采用自动控制技术后，极大地改善了人们的工作条件，提高了生产率，并使以前人工无法实现的事情变为可能。

根据自动控制理论的内容和不同的发展阶段，自动控制理论的内容可以分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两类。

“经典控制理论”是以传递函数为基础，采用时域法、频率法和根轨迹法给出对控制系统进行分析与综合的基本方法。研究对象是单输入/单输出、线性、时不变控制系统。

“现代控制理论”是在“经典控制理论”基础之上发展起来的，是以状态空间法为基础，研究多输入/多输出、时变参数、分布参数、线性、非线性等控制系统的分析与设计方法。

本课程主要介绍“经典控制理论”中关于自动控制系统的分析与综合方法，而对于现代控制理论则只介绍状态空间法。

第二节 自动控制及其基本方式

一、自动控制

所谓自动控制，是指在无人直接参与下，利用自动装置对受控对象施加作用，使受控对象的某些物理量准确地按照预期的规律变化。

自动控制在一种重要的技术手段，要解决哪类性质的工程问题？承担什么样的技术任务？

任何技术设备、生产过程都必须按照预定的要求运行。例如数控机床要加工出高精度零件，必须保证工作台和刀具的位置，准确地根据指令对部件进行加工。这里“要求”的实质是什么？

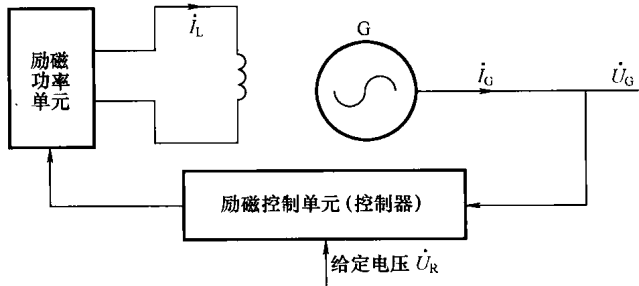


图 1-1 发电机励磁控制系统图

图 1-1 所示为发电机励磁控制系统。发电机在运行时，若励磁电流 i_L 不变，则机端电压 U_G 将随发电机定子电流 i_G 的变化而变化。为了确保发电机端电压 U_G 的幅值在给定运行水平上，必须根据实际端电压 U_G 通过励磁控制单元调节发电机转子励磁电流 i_L 的大小，达到控制发电机端电压在给定运行水平上的

目的。这里的发电机就是受控对象，控制的目标（或物理量）是保持发电机端电压在给定值运行。励磁控制单元就是自动装置，亦称为控制器。

如果将工作设备称作受控对象，将表征其工作状态的物理量称为被控量，而把要求这些物理量所应该保持的数值称为给定值（或称参考输入），那么，控制的目的是使受控对象的被控量等于给定值。

二、自动控制的基本方式

为了完成特定的工作，在工程上，虽然各种控制器的具体任务不同，但其实质是相同的，也就是对受控对象的某些物理量进行控制，以自动保持其应有的规律性。所以说，自动控制系统是由控制器和受控对象构成的总体。那么，控制器是如何操纵受控对象来完成自动控制的任务呢？其中是否存在一些普遍的特点呢？

由于控制器是取代人的一部分工作，因此剖析一下控制过程可以看出其共同的特点：为了使受控对象按照预定的目标有效地去工作，人们首先要了解（或测量）受控对象的实际工作状态，掌握可能出现扰动量的大小，这一过程称为系统运行信息的收集；然后将获取的各方面信息进行分析、处理，对比实际的结果距预期的目标相差多少，并作出控制决策；最后根据作出的控制决策确定如何由执行元件去完成。但是执行的效果如何？需要再观察、再分析、再决策，循环往复直达到达预定的目标。上述的控制过程可以用图1-2来描述。

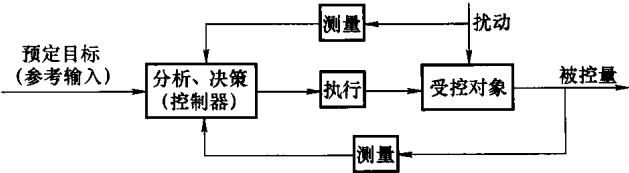


图 1-2 控制系统示意图

从图 1-2 可以看出, 控制器应具备测量、计算 (或分析) 和执行三种基本功能。这些工作需要相应的物理元件来承担, 制订控制决策的信号来自三条途径, 即给定值 (预定目标)、干扰和被控量。

根据不同的标准, 自动控制系统有不同的分类方法, 下面简要介绍几种分类方法。

1. 按照控制器的输入信号分类

根据控制器的输入信号分类, 可分为开环控制系统与闭环控制系统两种。

(1) 开环控制系统。如果控制器的输入信号中不包含系统输出量 (或被控量) 的信息, 那么这种控制方式称为开环控制, 如图 1-3 所示。

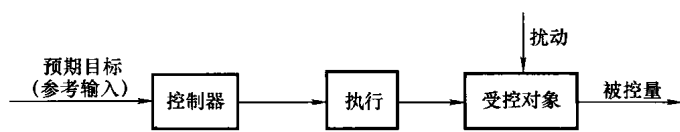


图 1-3 开环控制系统图

可以看出, 在开环控制系统中, 由于控制器的输入信号中没有系统输出量 (或被控量) 的信息, 当不确定因素出现 (如扰动出现或系统参数的变化) 时, 系统的输出量 (或被控量) 将出现误差。所以, 开环控制的控制精度不高。但它具有结构简单、调试方便、容易维修、成本低等优点。

(2) 闭环控制系统。如果控制器的输入信号中包含系统输出量 (或被控量) 的信息, 那么这种控制方式称为闭环控制, 如图 1-4 所示。

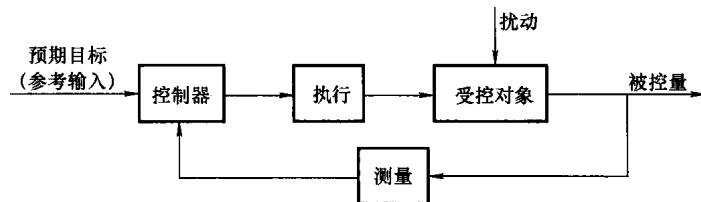


图 1-4 闭环控制系统图

闭环控制能够根据实际输出值与预期输出值之间的误差信号来产生一个合适的控制量, 最后使系统消除误差, 达到被控量等于给定值的目的。所以, 闭环控制具有控制精度高、调节速度快的特点。闭环控制的实质, 就是利用负反馈的作用来减小系统的误差。因此, 闭环控制也称为反馈控制。

2. 按照输入信号特征分类

根据输入信号特征分类, 可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统三种。

(1) 恒值控制系统。如果控制系统的任务是当输入量为给定值时, 能够克服扰动量对系统的影响, 使输出量为对应于输入量的恒定值, 则这种控制系统称为恒值控制系统。

但是在实际工程中, 由于扰动的影响, 被控量会偏离参考输入而产生误差。控制系统就是根据误差产生控制作用, 以克服扰动的影响, 使被控量最终恢复到给定的常值。因此, 恒值控制系统分析与设计的重点是研究各种扰动对受控对象的影响以及抗扰动措施。

在恒值控制系统中，参考输入可以随生产条件的变化而改变。但是，一旦调整后，被控量与调整好的参考输入量（即给定值）应保持一致。恒值控制系统的原理结构图如图 1-5 所示。在工业控制中，如果被控量是温度、压力、流量、水位等生产过程变量时，则称这种控制系统为过程控制。

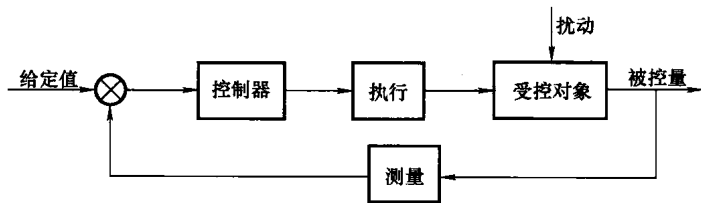


图 1-5 恒值控制系统图

(2) 随动控制系统。如果控制系统的输入信号是预先未知的随时间任意变化的函数，要求系统的输出量精确、快速地跟踪输入信号的变化，则这种控制系统称为随动系统。随动系统在军事领域中有着极为广泛的应用，例如火炮的自动瞄准、雷达的自动跟踪、舰船操舵系统、导弹的拦截等都是典型的随动系统。

在随动控制系统中，如果被控量是机械的位置或导数时，例如电机的转动角或转速，则称这类控制系统为伺服系统。

(3) 程序控制系统。如果系统的输入量按照事先制订好的规律变化，系统的控制过程按照预定的程序进行，则这类控制系统称为程序控制系统。例如机械加工使用的数控机床就是典型的程序控制系统。在这类控制系统中，输入的命令都是根据加工工艺事先编制确定的。

3. 按照控制系统信号的形式分类

根据控制系统信号的形式分类，可分为连续时间系统和离散时间系统两种。

(1) 连续时间系统。如果控制系统中各元件的输入量和输出量都是时间的连续函数，这类系统称为连续时间系统。连续时间系统的运动规律可以用微分方程来描述。

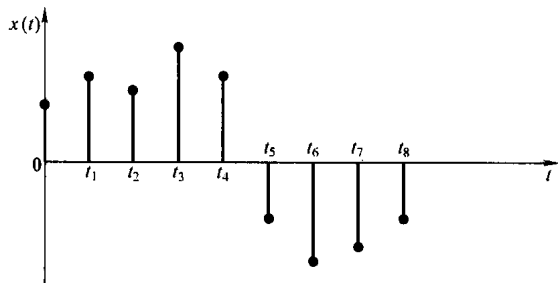


图 1-6 离散信号波形

(2) 离散时间系统。在控制系统中，只要有一处信号是时间的离散函数（或脉冲序列）时，这类系统称为离散时间系统。

离散系统的特点是：信号在特定的时刻上才是时间的函数，在离散时刻之间，信号无意义。离散信号如图 1-6 所示。

离散系统的运动可以用差分方程进行数学描述，即描述在采样时刻上系统输入

量与输出量之间的内在关系。

4. 按照输入量与输出量关系满足的数学模型分类

根据输入量与输出量关系满足的数学模型分类，可分为线性系统和非线性系统两种。

(1) 线性系统。如果描述系统输入量与输出量关系的动态方程是线性微分方程或差分方程，则这类系统称为线性系统。线性系统满足叠加原理。例如，连续时间线性系统的动态方程为

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_m r(t) \quad (1-1)$$

离散时间线性系统的动态方程为

$$y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \cdots + a_n y(k) = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_m r(k) \quad (1-2)$$

式中： $r(t)$ ， $y(t)$ 分别为系统的输入、输出量； n 称为系统的阶数，且满足 $n \geq m$ ； a_1 ， a_2 ， $\cdots$ ， a_n 和 b_1 ， b_2 ， $\cdots$ ， b_n 称为系统的参数。

(2) 非线性系统。如果系统中的某一个元件输入量与输出量之间数学关系式为非线性函数，则这类系统称为非线性系统。非线性系统的动态方程用非线性微分方程来描述。例如，如果系统的动态方程为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 3 \left(1 - 4 \frac{dy(t)}{dt} \right) y^2(t) + y(t) = r(t) \quad (1-3)$$

则该系统为非线性系统。

5. 按照系统的动态方程系数分类

根据系统的动态方程系数分类，可分为定常系统和时变系统两种。

(1) 定常系统。如果系统的动态方程为常系数微分方程，则称为定常系统。在定常系统中，系统的结构和参数是不随时间的变化而变化。

(2) 时变系统。如果系统动态方程的系数是随时间的变化而变化，则称为时变系统。

第三节 自动控制的基本要求

实际工程上的控制系统是千差万别的，对每一个控制系统都有着不同的特殊要求。但是，对于所有的控制系统都有一个最基本的要求，那就是稳定性、准确性、快速性，简称稳、准、快。分析和设计满足性能指标要求的控制系统是本课程的主要任务。

1. 稳定性

稳定是系统存在的基础，那么，什么是稳定性呢？运行于平衡状态下的控制系统，在扰动出现后，系统的工作状态一定会偏离了原来的平衡状态。当扰动消失后，系统能否回到原来的平衡状态呢？凡是能随时间收敛并且回到原来工作状态的系统是稳定的系统；反之，如果扰动消失后，系统的输出趋于无穷或进入发散状态，则称系统是不稳定的。由于系统在实际工作时，不可避免地要受到扰动的作用，所以说，稳定性是保证系统能够正常工作的前提。

2. 暂态性能

暂态性能是指控制系统在暂态过程期间的行为，主要表现为起始响应和总体响应的快

速性、暂态过程的平稳性，即过调量不宜过大和振荡的收敛性。由于控制系统惯性的存在，在输入信号发生变化时，系统响应的变化总是具有一定的延迟，这个延迟越小，快速性越好。过调量是指系统在暂态过程中响应的最大值超过稳态值的程度，过调量偏大对系统中物理元件是一个危害。例如，航海船只在航行过程中，如果偏离预定的航线过大时，随时都有触礁并沉没的危险。因此，必须对过调量加以限制。振荡收敛性是指系统经过多次振荡后，实际响应值与稳态值之间的误差能满足给定的要求，控制系统的这一性能指标在一定程度上反映了系统暂态过程时间的长短。

3. 稳态性能

稳态性能是指系统的控制精度，表明系统的稳态输出值与希望输出值之间的差值大小，反映出系统对输入信号的跟踪能力。稳态性能采用稳态误差来衡量。

对同一个控制系统提出稳、准、快的性能要求，彼此之间是相互制约的。快速性好，可能会有强烈的振荡；改善稳定性，可能使得控制过程过于迟缓，控制精度也可能变坏。而且对于不同类型的输入信号，系统的跟踪能力是不同的。分析和解决这些矛盾，是本课程讨论的重要内容。

小 结

1. 自动控制理论研究的对象是自动控制系统，本课程重点研究依据控制误差产生控制量实现控制目的的反馈控制系统，即根据控制误差来研究如何消除控制误差的反馈控制系统。

2. 对自动控制系统的基本要求是自动控制系统在完成控制任务时，控制过程应该是稳定、快速和准确。

3. 控制系统分析是指对于给定系统，如何在理论上对系统控制过程中的暂态和稳态行为进行定性分析和定量估算。

4. 控制系统综合是指对于给定系统，根据给定的性能指标要求和已知的受控对象，如何设计满足性能指标要求的控制器结构与参数的问题。

习 题

1-1 解释下列术语：①自动控制；②自动控制系统；③受控对象；④参考输入；⑤反馈控制。

1-2 举例说明在日常生活中使用的自动控制系统。

1-3 简要说明开环控制和闭环控制的特点。

1-4 说明恒值控制系统、随动控制系统、程序控制系统的特点。

1-5 如何理解对控制系统的基本要求？

第二章

控制系统的数学模型

为了能够在理论上对自动控制系统的性能进行定性分析和定量计算，给出客观、正确的评价，首先需要建立描述控制系统运动特征的数学模型。描述系统输入量、输出量和内部变量之间转换和传递关系的数学表达式，称为系统的数学模型。

控制系统数学模型的建立具有极其重要的意义。借助于数学模型，人们可以回避实际控制系统中各环节不同的物理、化学特性，如机械的、化工的、热力学的、空气动力学的等学科的专业知识，将不同领域的控制问题抽象为数学模型，研究自动控制系统在控制过程中所具有的本质性的、共同的普遍规律。

控制系统的数学模型又分为静态模型和暂态模型。在静态或稳态条件（系统中变量的各阶导数都为零）下，描述系统中各变量之间关系的数学方程称为静态模型；在暂态过程中，各变量之间关系可以用微分方程或差分方程来描述，称为暂态模型。这里主要研究控制系统暂态模型即微分方程的建立方法。

从结构上划分，控制系统数学模型分为内部描述型和外部描述型。如果控制系统数学模型描述的是系统输入量与输出量之间的动态关系，即双端信息与系统结构之间的关系，则称为控制系统的输入/输出描述，即外部描述型数学模型；如果控制系统的数学模型描述的是系统输入量与内部状态的一阶微分方程组和内部状态与输出量之间的数学关系，则称为状态空间模型即内部描述型。同一个系统的两种数学描述方法在一定意义下可以相互转化。

系统数学模型的建立方法主要有两种，即解析法和实验法。所谓解析法是指，依据系统构成的各元件及其之间的联系，运用物理等专业知识列写出各变量之间的数学关系式，从而建立起控制系统数学模型的方法，也称为机理建模；运用典型实验和估计手段建立控制系统数学模型的方法称为实验法。

本章研究采用解析法针对线性定常系统建立微分方程，进而给出线性定常系统传递函数的概念和传递函数求法。

第一节 列写微分方程的一般方法

一、建立系统微分方程的基本步骤

采用解析法建立系统微分方程的基本步骤是：

- (1) 根据系统的实际工作情况，确定各元件的输入/输出变量。