



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

www.cmpedu.com

自动控制原理

王 军 高秀梅 宋潇潇 侯思颖 舒欣梅 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书系统地介绍了自动控制理论的基本内容,并注重阐述基本理论、基本概念和综合分析方法。本书共分9章,主要内容包括:控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率分析法、控制系统的校正、离散控制系统以及现代控制理论基础的部分内容与非线性系统分析。本书重点突出,层次分明,理论联系实际。各章不仅介绍 MATLAB 相关应用的内容,而且有一定数量的典型例题分析。

本书是一本面向高等院校电气自动化、电子信息、仪表及测试、机电类等专业的本科教材,也可供从事控制工程领域工作的工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的老师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 1157122010, 电话: 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/王军等编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 8

普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-38276-8

I. ①自… II. ①王… 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(2012)第 139867 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:时 静 责任编辑:时 静

版式设计:纪 敬 责任校对:刘志文

责任印制:乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 395 千字

0001—3500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-38276-8

定价: 35.00 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

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是自动控制理论的入门教材。内容编排上以经典控制理论为主，同时扼要地介绍了现代控制理论基础部分内容。本书共分 9 章，首先对控制系统的基本概念作了必要的叙述，讨论了控制系统数学模型的建立；其次阐述了线性控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率分析法，介绍了控制系统的校正、离散控制系统；最后对现代控制理论基础部分内容与非线性系统分析进行了介绍。

本书定位于工程应用型人才培养，内容编排上以对控制系统进行分析与综合的体系为线索，力求重点突出，层次分明，理论联系实际，尽量避免烦琐的数学推导和定理证明。在书中加入一定数量的典型例题分析，使学生在各章的控制系统分析方法时，能够通过针对实际系统分析，更加直接地与工程系统进行连接。同时，由于 MATLAB 软件已成为控制系统分析和设计的主要工具，在各章的最后一节介绍了 MATLAB 的相关应用，以帮助学生掌握用 MATLAB 软件进行分析与设计的方法。为了便于学生加深对概念和理论的消化，每章都有足够的例题和习题。

本书由西华大学王军教授主编，西华大学教师高秀梅，宋潇潇、侯思颖、舒欣梅参编。编写人员分工如下：第 1 章和第 3 章由王军编写；第 2 章和第 4 章由高秀梅编写；第 5 章和第 6 章由侯思颖编写；第 7 章和第 9 章由宋潇潇编写；第 8 章和每章最后一节 MATLAB 部分由舒欣梅编写。

在本书编写过程中，得到了许多朋友的帮助和支持，在此表示由衷感谢，同时向引用文献作者表示深深的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，请读者批评指教，我们将不胜感激。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1	2.4.3 动态结构图的等效变换举例	21
1.1 引言	1	2.5 自动控制系统的传递函数	23
1.1.1 自动控制理论的发展	1	2.5.1 闭环控制系统的开环传递函数	23
1.1.2 人工控制与自动控制	1	2.5.2 闭环传递函数	23
1.1.3 开环控制与闭环控制	2	2.6 信号流图	25
1.1.4 闭环控制系统的基本组成和 术语定义	4	2.6.1 信号流图的术语和性质	25
1.2 自动控制系统的分类	4	2.6.2 信号流图的绘制	26
1.2.1 线性控制系统和非线性控制系统	5	2.7 梅逊公式	27
1.2.2 恒值控制系统、随动控制系统 和程序控制系统	5	2.7.1 梅逊公式的定义	28
1.2.3 连续控制系统和离散控制系统	6	2.7.2 应用梅逊公式求系统闭环传递 函数举例	28
1.3 对自动控制系统的基本性能要求	6	2.8 利用 MATLAB 建立控制系统模型	30
1.3.1 稳定性	7	2.8.1 时间常数形式的传递函数 模型表示	30
1.3.2 快速性	7	2.8.2 零极点形式的传递函数 模型表示	31
1.3.3 准确性	8	2.8.3 模型的转换和连接	31
1.4 MATLAB-Simulink 介绍	8	2.9 案例分析与设计	32
1.5 本章小结	8	2.10 本章小结	36
思考题与习题	9	思考题与习题	36
第 2 章 控制系统的数学模型	10	第 3 章 时域分析法	39
2.1 微分方程	10	3.1 典型输入信号和时域性能指标	39
2.1.1 系统微分方程的建立	10	3.1.1 典型输入信号	39
2.1.2 建立微分方程的步骤	11	3.1.2 阶跃响应的动态性能指标	40
2.2 传递函数	13	3.1.3 稳态性能指标	41
2.2.1 传递函数的定义	13	3.2 一阶系统的时域分析	41
2.2.2 传递函数的性质	14	3.2.1 单位阶跃响应	41
2.3 典型环节的传递函数	15	3.2.2 单位脉冲响应	42
2.3.1 比例环节	15	3.2.3 单位斜坡响应	42
2.3.2 积分环节	15	3.3 二阶系统的时域分析	43
2.3.3 惯性环节	16	3.3.1 典型的二阶系统	43
2.3.4 微分环节	16	3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	44
2.3.5 振荡环节	17	3.3.3 系统的暂态性能指标	45
2.3.6 延迟环节	17	3.4 高阶系统的时域分析	49
2.4 动态结构图的等效变换	17	3.5 系统的稳定性分析	50
2.4.1 动态结构图的建立	17	3.5.1 系统稳定性的充分必要条件	50
2.4.2 动态结构图的等效变换法则	19	3.5.2 劳斯-赫尔维茨稳定判据	51

3.5.3 代数稳定判据的应用	54	5.4.1 幅角原理	114
3.6 稳态误差计算	57	5.4.2 开环传递函数虚轴上无极点时 的奈奎斯特稳定性判据	115
3.6.1 稳态误差的定义和计算	57	5.4.3 开环传递函数虚轴上存在极点时 的奈奎斯特稳定性判据	119
3.6.2 给定输入下的稳态误差	58	5.5 系统的相对稳定性	121
3.6.3 扰动输入作用下的稳态误差	61	5.5.1 增益裕量	122
3.6.4 减小稳态误差的方法	63	5.5.2 相位裕度	122
3.7 应用 MATLAB 求控制系统的 时域响应	64	5.6 系统的闭环频率特性	123
3.8 案例分析与设计	67	5.7 系统的频域性能指标和时域性能指标 的关系	124
3.9 本章小结	68	5.7.1 开环频域指标与时域指标 的关系	124
思考题与习题	69	5.7.2 闭环频域指标与时域指标 的关系	127
第4章 根轨迹分析法	71	5.7.3 开环对数频率特性曲线与系统 时域性能指标之间的关系	128
4.1 根轨迹的基本概念	71	5.8 应用 MATLAB 绘制系统的频率 特性曲线	129
4.1.1 根轨迹的概念	71	5.9 案例分析与设计	131
4.1.2 根轨迹方程及绘制条件	72	5.10 本章小结	134
4.2 绘制根轨迹的基本规则	73	思考题与习题	134
4.2.1 基本规则	73	第6章 控制系统的校正	138
4.2.2 绘制根轨迹举例	79	6.1 系统校正的基本概念	138
4.3 广义根轨迹	81	6.1.1 性能指标	138
4.3.1 参数根轨迹	81	6.1.2 系统的校正	138
4.3.2 零度根轨迹	82	6.2 常用控制规律	139
4.4 应用 MATLAB 绘制控制系统的 根轨迹	83	6.2.1 P 控制规律	139
4.5 案例分析与设计	85	6.2.2 PD 控制规律	140
4.6 本章小结	87	6.2.3 PI 控制规律	141
思考题与习题	88	6.2.4 PID 控制规律	141
第5章 频率分析法	90	6.3 基于频率法的串联校正设计	142
5.1 频率特性的基本概念	90	6.3.1 串联超前校正	142
5.1.1 频率响应	90	6.3.2 串联滞后校正	146
5.1.2 频率特性	91	6.3.3 串联滞后-超前校正	149
5.1.3 频率特性与传递函数的关系	92	6.4 按期望特性进行串联校正	151
5.1.4 频率特性的表示方法	92	6.5 应用 MATLAB 进行校正设计	153
5.2 对数坐标图	92	6.6 案例分析与设计	157
5.2.1 对数坐标图的特点	92	6.7 本章小结	160
5.2.2 典型环节的对数坐标图	94	思考题与习题	161
5.2.3 开环传递函数的对数坐标图	101	第7章 离散控制系统	162
5.2.4 系统类型与对数幅频特性曲线 之间的关系	103	7.1 离散控制系统的基本概念	162
5.3 幅相频率特性图	107	7.2 信号的采样与复现	163
5.3.1 典型环节的奈奎斯特图	107		
5.3.2 开环传递函数概略奈奎斯特图的 绘制	111		
5.4 奈奎斯特稳定性判据	114		

7.2.1 香农采样定理	163	8.5.1 全维状态观测器	209
7.2.2 零阶保持器的原理	164	8.5.2 配置极点求观测器增益矩阵的 待定系数法	211
7.3 离散控制系统的数学模型	166	8.5.3 配置极点求观测器增益矩阵的 能观标准型法	212
7.3.1 差分方程	166	8.5.4 带状态观测器的状态反馈 系统	213
7.3.2 z 变换与 z 反变换	167	8.6 李雅普诺夫稳定性分析	215
7.3.3 脉冲传递函数的定义	170	8.6.1 李雅普诺夫关于稳定性 的定义	215
7.3.4 开环系统的脉冲传递函数	171	8.6.2 李雅普诺夫判断系统稳定性 的方法	217
7.3.5 闭环系统的脉冲传递函数	173	8.6.3 线性定常系统的李雅普诺夫稳定性 分析	218
7.4 离散系统的性能分析	176	8.7 案例分析与设计	219
7.4.1 离散系统的稳定性条件和 代数判据	176	8.8 本章小结	222
7.4.2 离散系统的稳态误差	179	思考题与习题	223
7.4.3 离散系统的动态性能	181	第9章 非线性系统分析	226
7.5 应用 MATLAB 进行离散系统分析	183	9.1 控制系统的非线性特性	226
7.6 案例分析与设计	185	9.1.1 典型的非线性特性	226
7.7 本章小结	186	9.1.2 非线性系统的特性	228
思考题与习题	187	9.1.3 非线性控制系统的分析 研究方法	229
第8章 现代控制理论初步	189	9.2 相平面法	229
8.1 控制系统的状态空间描述	189	9.2.1 相轨迹的基本概念	230
8.1.1 状态变量和状态空间方程	189	9.2.2 相轨迹的基本性质	231
8.1.2 线性定常连续系统状态空间表 达式的建立	190	9.2.3 相轨迹的绘制	231
8.1.3 状态空间表达式的线性变换	192	9.2.4 由相平面图求时间解	234
8.1.4 传递函数与状态方程之间 的转换	192	9.2.5 奇点和极限环	234
8.1.5 状态图	197	9.2.6 非线性控制系统的相平面分析	236
8.2 线性定常系统状态方程的解	198	9.3 描述函数法	238
8.2.1 线性系统状态方程的解	198	9.3.1 描述函数的基本概念	238
8.2.2 状态转移矩阵的计算	199	9.3.2 典型非线性特性的描述函数	239
8.3 线性定常系统的能控性和能观性	200	9.3.3 非线性控制系统的描述 函数分析	240
8.3.1 能控性	201	9.4 案例分析与设计	242
8.3.2 能观性	201	9.5 本章小结	243
8.3.3 能控、能观标准型的线性 变换	202	思考题与习题	243
8.3.4 对偶原理	205	附录	245
8.4 线性定常系统的极点配置	205	附录 A 常见拉普拉斯变换及 z 变换表	245
8.4.1 状态反馈	205	附录 B 控制理论中常用的中英文词组	246
8.4.2 状态反馈极点配置定理	206	参考文献	249
8.4.3 求状态反馈矩阵 K 的待定系 数法	206		
8.4.4 求状态反馈矩阵 K 的能控标准 型法	207		
8.5 状态观测器	209		

第1章 绪 论

1.1 引言

自动控制原理是研究自动控制技术的理论基础，是一门理论性较强的工程科学。目前，自动控制技术已广泛地应用于各个领域，例如导弹能准确地命中目标，人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面，宇宙飞船能准确地在月球着陆并重返地球，都是自动控制技术迅速发展的结果。随着数学理论、计算机技术和电子技术的迅速发展，自动控制技术不仅广泛应用于空间、工业、交通管理、环境卫生等领域，而且它的概念和分析方法也渗透到其他领域（如经济、政治等）。

1.1.1 自动控制理论的发展

自动控制技术的广泛应用开始于欧洲工业革命，其代表是1788年瓦特发明的飞球式调速器（也称离心式调速器），通过自动控制阀门开度，使得当负载或蒸汽的供给量发生变化时，蒸汽机的转速得到控制。1868年，基于飞球式调速器，物理学家麦克维斯第一次系统研究了反馈系统的稳定性问题。1892年，俄国科学家李雅普诺夫在其《论运动稳定性的一般问题》的博士论文中，提出了李雅普诺夫稳定性理论。20世纪20年代，反馈控制器的诞生确立了“反馈”在自动控制技术中的核心地位。20世纪30年代，比例积分微分（PID）控制器出现，此后获得广泛应用。20世纪40年代是控制理论思想空前活跃的年代，1945年贝塔朗菲提出了《系统论》，1948年维纳提出了著名的《控制论》，形成了完整的经典控制（classical control）理论体系——以传递函数为基础，研究单输入单输出、线性定常系统的分析与设计问题。

进入20世纪50~60年代，随着人类进入太空技术的需要，催生了现代控制（modern control）理论的问世——研究多输入多输出、定常数或变参数、线性或非线性一类自动控制系统的分析和设计问题。1957年，苏联成功发射了第一颗人造地球卫星。1968年，美国阿波罗飞船成功登上月球。随着现代科学技术的发展，出现了最优控制、最佳滤波、模糊控制、系统辨识和自适应控制等一些新的控制方式。因此，现代控制也是研究庞大的系统工程和模仿人类的智能控制等方面必不可少的理论基础。

1.1.2 人工控制与自动控制

人工控制（manual control）是指一个系统中由人来操作机器，例如开汽车和图1.1a所示的水箱水位控制系统。当水箱的水位保持在给定值且流入、流出量相等时，系统处于平衡状态。当系统受到扰动作用，如水位给定值发生变化时，工人通过肉眼观测水位的高度，与脑中存储的给定水位进行比较，得到差异值，凭经验作出决策，然后用手操作进水阀门，最终使水位等于给定值。

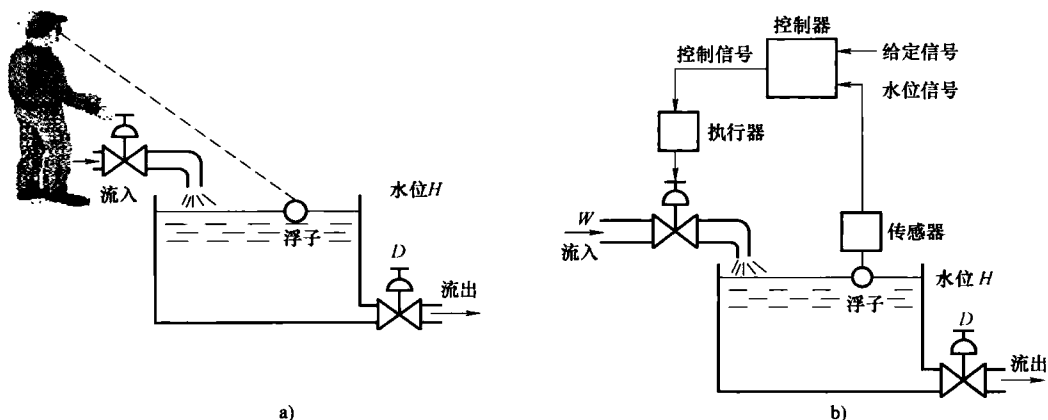


图 1.1 水箱水位控制系统

自动控制 (automatic control) 是指在没有人直接参与的情况下, 利用外加的设备或装置, 使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。在水位的自动控制中, 测量元件 (传感器) 测量水位的变化情况, 并传给控制器, 控制器将给定值与水位实际值进行比较, 并发出控制信号给执行器, 执行器操作进水阀门。

在图 1.1b 所示的水位自动控制系统中, 水箱水位高度预先给定, 称为参考输入或给定输入 (reference input)。当流出阀门开度加大 (或变小) 使水位变化, 称为扰动 (disturbance)。水箱是被控对象 (plant) 或过程 (process)。水位是被控量 (controlled variable)。用于控制所需要的信号的部件称为控制器 (controller)。

1.1.3 开环控制与闭环控制

1. 开环控制系统

开环控制和闭环控制是自动控制系统两种最基本的形式。开环控制 (open-loop control) 是一种最简单的控制方式。其特点是, 在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用, 如图 1.2 所示。这种控制系统结构简单, 系统的精度主要取决于元器件的精度和调整的精度。

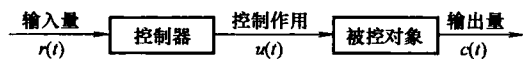


图 1.2 开环控制系统框图

当系统内部干扰和外部干扰影响不大、精度要求不高时, 可采用开环控制方式。但是当系统在干扰作用下, 输出一旦偏离了原来的预定值, 由于系统没有输出反馈, 对控制量没有任何作用, 因此系统没有消除或减少偏差的功能, 这是开环控制最大的缺点, 从而限制了它的应用范围。

图 1.3 所示的直流电动机控制系统是开环控制系统。 u_g 为给定参考输入, 它经触发器和晶闸管整流电路后产生直流电动机的供电电压 u_d , 使电动机产生期望的转速 ω 。但是若电动机负载、电网电压或励磁电流发生变化时, 转速 ω

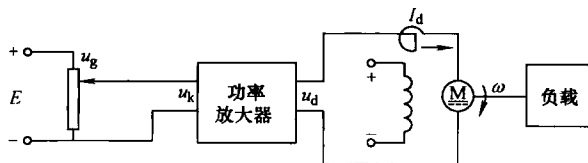


图 1.3 开环直流调速系统

会改变, 显然该系统无抗干扰能力。

2. 闭环控制系统

若将系统的输出量反馈到它的输入端, 并与参考输入进行比较, 则构成闭环控制 (closed-loop control) 系统, 其框图如图 1.4 所示。

闭环控制的特点是, 在控制器与被

控对象之间, 不仅存在着正向作用, 而且存在着反馈 (feedback) 作用, 即系统的输出量对控制量有直接影响。由于偏差信号是输入信号与反馈信号之差, 偏差信号作用于控制器上, 使系统的输出量趋向于给定的数值, 则称为负反馈 (negative feedback)。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, 因此闭环控制又称为反馈控制 (feedback control)。若反馈信号与输入信号相加, 送入控制器输入端, 则称为正反馈 (positive feedback)。若控制系统按正反馈构成闭环, 是不能正常工作的。

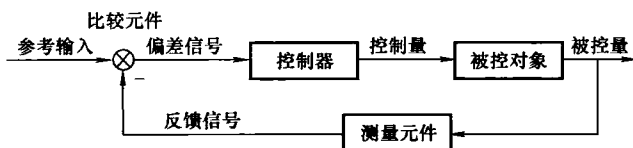


图 1.4 闭环控制系统框图

图 1.5 是闭环直流调速系统。

直流输出转速通过测速发电机 GT 检测出来, 并转换成电压信号 u_{fn} , 反馈到输出端与参考输入电压 u_g 相减, 产生偏差信号 ΔU , 经功率放大和晶闸管整流电路后, 使输出转速完全按照参考输入的要求变化。当电动机受到干扰, 如负载增大时, 使电动机流过的

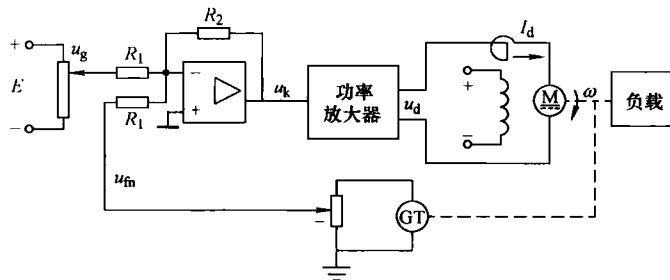


图 1.5 闭环直流调速系统

电流 I_d 上升, 电枢电阻压降增大, 导致电动机转速 ω 下降, 从而测速发电机输出电压 u_{fn} 减小, 偏差电压 ΔU 上升, 经放大后使触发脉冲前移, 晶闸管整流输出电压 u_d 上升, 从而补偿了由于负载增大所造成的电动机转速下降, 使转速 ω 近似保持不变。分析可知, 闭环控制系统可以通过负反馈产生偏差, 取得控制作用去消除输出量的误差, 这种控制原理称为反馈控制原理。

归纳起来, 开环控制系统与闭环控制系统的区别如下:

1) 在开环控制系统中, 从控制信号来看, 只有输入量对输出量产生控制作用; 从控制结构上来看, 只有从输入端到输出端从左向右的信号传递通道 (该通道称为前向通道)。而闭环控制系统中, 除了有从输入到输出的通道 (称为前向通道) 外, 还必须要有从输出端到输入端的信号传递通道, 使输出信号也参与控制作用, 该通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由前向通道和反馈通道组成的。

2) 闭环控制系统为了检测偏差, 必须直接或间接地检测出输出量, 并将其变换为与输入量相同的物理量, 以便与给定量比较, 得出偏差信号。因此, 闭环控制系统必须有测量输出信号的测量元件, 以及比较输入信号与反馈信号的比较元件。

3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的, 因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行结构。闭环控制系统正是靠放大的偏差信号来推动执行结构, 进一步对控制对象进行控制的。只要输出量与给定量之间存在偏差, 就有控制作用存在, 并力

图纠正这一偏差。由于反馈控制系统是利用偏差信号作为控制信号，自动纠正输出量与其期望值之间的误差的，因此可以构成精确的控制系统。

本书将重点研究闭环控制系统。

1.1.4 闭环控制系统的基本组成和术语定义

尽管控制系统由不同的元件组成，系统的功能也不一样，但相同的工作原理决定了它们必然具有类似的结构，都可以用一些基本框图和符号来表示。一般来说，一个闭环控制系统由以下基本元件（或装置）组成。

1) 测量元件：检测被控制的物理量，如果该物理量是非电量，一般要转换成电量。如热电偶用于检测温度并将其转换成电压。

2) 比较元件：对系统输出量与输入量进行比较后得到偏差（误差）信号。

3) 放大元件：将比较元件输出的偏差信号进行放大和变换，用来驱动执行元件，以控制被控对象。

4) 执行机构：直接对被控对象进行控制，使被控对象与希望值趋于一致。执行机构有电动机、阀、液压马达等。

5) 被控对象：指自动控制系统根据需要进行控制的机器、设备或生产过程，而被控对象内要求实现自动控制的物理量称为被控量或系统输出量。

6) 校正元件：也叫补偿元件，通过串联或反馈等方式加在系统中，从而对系统的参数或结构进行调整，用于改善系统性能。

图 1.6 是一个自动控制系统的基本组成框图。图中，系统的基本元件和被控对象用方框表示；信号传输方向用箭头表示；“-”号表示输入信号与反馈信号相减，即负反馈；“+”号表示正反馈。

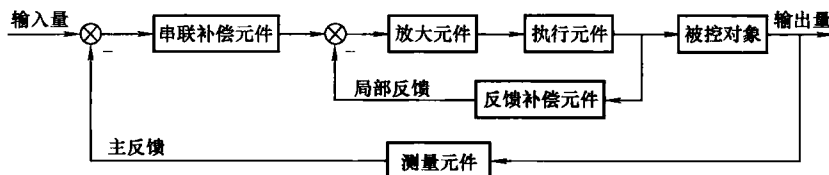


图 1.6 典型的自动控制系统的基本组成框图

一个复杂的控制系统也可能有多个反馈信号（除被控量的反馈信号外，还有其他的反馈信号）组成多个闭合回路。只有一个反馈通道的系统称为单回路系统（single loop system），有两个及以上反馈通道的系统称为多回路系统（multi-loop system）。系统输出经过测量装置反馈到输入端的通道称为主反馈通道。前向通道与主反馈通道一起，构成主回路。

此外，系统的输入变量 r 有时也不止一个，可能有 m 个输入变量。具有多个输入变量的系统，称为多输入系统（multi-input system）；反之，只有一个输入变量的系统，称为单输入系统（single input system）。

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，应用范围很广，性能与结构各异，因此可以从不同角度进行

分类。一般情况下，自动控制系统有下面几种常用的分类方法。

1.2.1 线性控制系统和非线性控制系统

按系统的数学模型是否为线性方程，系统可分为线性控制系统和非线性控制系统。

1. 线性控制系统

当控制系统各组成元件的输入/输出特性是线性特性，控制系统的动态过程可以用线性微分方程（或线性差分方程）来描述，则称这种控制系统为线性控制系统（linear control system）。线性控制系统的特点是可以应用叠加原理，当系统存在几个输入信号时，系统的输出信号等于各个输入信号分别作用于系统时系统输出信号之和。

如果描述系统的线性微分方程的系数是不随时间而变化的常数，则这种线性控制系统称为线性定常系统。这种系统的响应曲线只取决于输入信号的形状和系统的特性，而与输入信号施加的时间无关。若线性微分方程的系数是时间的函数，则这种线性系统称为线性时变系统，这种系统的响应曲线不仅取决于输入信号的形状和系统的特性，而且和输入信号施加的时刻有关。本书主要讨论线性定常系统。

2. 非线性控制系统

当控制系统中有一个或一个以上的非线性元件时，系统的特性就要用非线性方程来描述。由非线性方程描述的系统称为非线性控制系统（nonlinear control system）。在控制系统中常见的非线性元件有饱和非线性元件、死区非线性元件、磁滞非线性元件、继电器特性非线性元件等。

非线性控制系统不适用于叠加原理。严格地说，实际的控制系统都存在着不同程度的非线性特性，所以绝对的线性控制系统（或元件）是不存在的。但在一定条件下，可以对某些非线性特性进行“线性化”处理，这样就可应用线性控制理论进行分析和讨论。但是，如果在系统中能正确地使用非线性元件，有时可以得到意想不到的控制效果。因此，近年来在实际应用系统中引入了非线性特性以改善控制系统的质量，并已取得了很成功的经验。

1.2.2 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统

按给定值信号的特点分类，控制系统可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 恒值控制系统

参考输入为常量的系统称为恒值控制系统（constant control system），为此要求系统保持被控量恒定不变，也就是在控制过程结束时，被控量等于给定值。这是生产过程中用得最多的一种控制系统，例如发电机电压控制、电动机转速控制、电力网的频率（周波）控制和各种恒温、恒压、恒液位等控制都属于恒值控制系统。

2. 随动控制系统

给定信号随时间的变化规律事先不能确定的控制系统，称为随动控制系统（servo control system）。随动控制系统的任务是在各种情况下快速、准确地使被控量跟踪给定值的变化。例如自动跟踪卫星的雷达天线控制系统、工业控制中的位置控制系统、工业自动化仪表中的显示记录等均属于随动控制系统。

3. 程序控制系统

在程序控制系统 (process control system) 中, 给定值按事先预定的规律变化, 是一个已知的函数, 控制的目的是要求被控量按确定的给定值的时间函数来改变, 例如机械加工中数控机床、加热炉的自动温度控制系统等均属于程序控制系统的范畴。

1.2.3 连续控制系统和离散控制系统

按控制系统信号的形式分类, 控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。

1. 连续控制系统

若控制系统中传递的信号都是时间的连续函数, 则这种系统称为连续控制系统 (continuous control system)。连续控制系统又常称为模拟量控制系统 (相对于数字量信号控制系统而言)。目前大部分控制系统都是连续控制系统。本书将主要研究连续控制系统。

2. 离散控制系统

若控制系统在某处或几处传输的信号是脉冲序列或数字形式, 在时间上是离散的, 则称为离散控制系统 (discrete control system)。离散控制系统的主要特点是, 在系统中采用采样开关, 将连续信号转变成离散信号。如果用计算机或数字控制器, 离散信号是以数码形式传输的系统, 称为数字控制系统 (digital control system)。由于被控制量是模拟量, 所以这种系统中有模-数 (A-D) 和数-模 (D-A) 转换器。图 1.7 是典型计算机控制系统的框图。本书将在第 7 章对其作简要阐述。

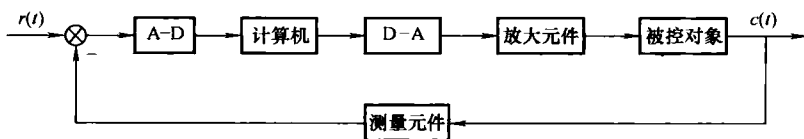


图 1.7 典型计算机控制系统的框图

自动控制系统的分类方法还有很多, 例如按控制系统的输入和输出信号的数量来分, 有单输入单输出 (single input and single output, SISO) 系统和多输入多输出 (multi-input and multi-output, MIMO) 系统; 按控制器采用常规的模拟量控制器还是采用计算机控制, 则可分为常规控制系统和计算机控制系统; 按照不同的控制理论分支设计的新型控制系统, 则可分为最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统和神经网络控制系统等。

1.3 对自动控制系统的基本性能要求

当自动控制系统给定值 (参考输入) 改变或受到各种干扰 (扰动) 时, 被控量就会发生变化, 偏离原来的稳态值。通过系统的反馈控制作用, 经过一定的过渡过程, 被控量又恢复到原来的稳态值或稳定到一个新的稳态值。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态, 被控量在变化中的过渡过程称为动态过程 (dynamic process) 或暂态过程 (transient process), 而把被控量处于平衡状态时称为静态或稳态。

对一个自动控制系统的性能要求可以概括为三个方面: 稳定性 (stability)、快速性

(transient performance) 和准确性 (steady-state performance)。

1.3.1 稳定性

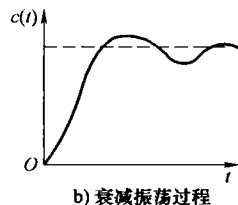
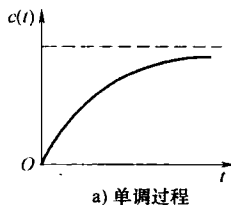
稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个自动控制系统最基本的要求是系统必须是稳定的, 不稳定的控制系统是不能工作的。所谓稳定性, 是指系统受到扰动作用后偏离原来的平衡状态, 在扰动作用消失后, 经过一段过渡时间能否回复到原来的平衡状态或足够准确地回到原来的平衡状态的性能。若系统能回复到原来的平衡状态, 则称系统是稳定的; 否则称系统是不稳定的。一个稳定的系统, 当内部参数稍有变化或初始条件改变时, 仍能正常工作。因此要求系统具有一定的稳定裕量。

如何判断系统稳定性, 有很多科学家提出了判断系统是否稳定的判据 (如劳斯稳定判据、赫尔维茨稳定判据、奈奎斯特稳定判据、李雅普诺夫稳定判据和伯德定理等), 这些判据将在本书后续章节中详细介绍。

1.3.2 快速性

在具体介绍自动控制系统的动态过程要求之前, 先看看控制系统动态过程 (动态特性) 的类型。自动控制系统被控量变化的动态过程一般有以下几种:

1) 单调过程。被控量 $c(t)$ 单调变化 (即没有“正”、“负”的变化), 缓慢地到达新的平衡状态 (新的稳态值), 如图 1.8a 所示, 一般这种动态过程具有较长的动态过程时间 (即到达新的平衡状态所需的时间)。



2) 衰减振荡过程。被控量 $c(t)$ 的动态过程是一个振荡过程, 但是振荡的幅度不断衰减, 到过渡过程结束时, 被控量会达到新的稳态值。这种过程的最大幅度称为超调量, 如图 1.8b 所示。

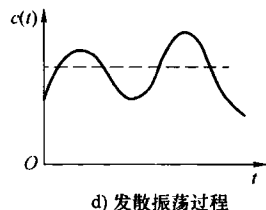
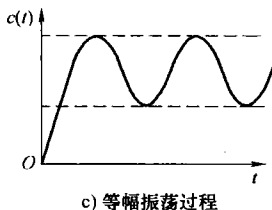


图 1.8 自动控制系统被控量的动态过程

3) 等幅振荡过程。被控量 $c(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程, 始终不能达到新的稳态值, 如图 1.8c 所示。这种过程如果振荡的幅度较大, 生产过程不允许, 则认为是一种不稳定的系统; 如果振荡的幅度较小, 生产过程可以接受, 则认为是稳定的系统。

4) 发散振荡过程。被控量 $c(t)$ 的动态过程不但是一个振荡的过程, 而且振荡的幅度越来越大, 以致会大大超过被控量允许的误差范围, 如图 1.8d 所示。这是一种典型的不稳定过程, 设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

一般说来, 自动控制系统如果设计合理, 其动态过程多属于图 1.8b 所示的情况。为了满足生产过程的要求, 希望控制系统的动态过程不仅是稳定的, 并且希望过渡过程时间 (又称调整时间) 越短越好, 振荡幅度越小越好, 衰减得越快越好。但是二者存在矛盾, 如果要求过渡过程时间很短, 可能使动态误差 (偏差) 过大。合理的设计应该兼顾这两方面的要求。

1.3.3 准确性

准确性又称稳态精度。系统在过渡过程结束后实际输出与给定期望值之间的偏差，称为稳态误差。稳态误差越小，系统的控制精度越高。稳态误差是衡量控制系统性能的另一项重要指标。设计者的任务之一就是要求控制系统被控量的稳态误差（偏差）为零或在允许的范围之内。对于一个好的自动控制系统来说，一般要求稳态误差越小越好，最好稳态误差为零。但在实际生产过程中往往做不到完全使稳态误差为零，只能要求稳态误差越小越好。一般要求稳态误差在被控量额定值的 2% ~ 5% 之内。

由于被控对象具体情况的不同，不同的控制系统对上面提出的三方面基本要求的侧重点也各有不同。例如，恒值控制系统对稳定性的要求严格，随动控制系统对快速性的要求较高。而且，对同一个系统，以上三方面的性能要求往往是相互制约的。例如，提高系统的快速性，会使系统强烈振荡；若改善平稳性，控制过程又可能延缓，甚至会影响准确性。分析和解决这些问题，正是控制理论研究的主要内容。

1.4 MATLAB-Simulink 介绍

MATLAB 仿真软件，全称 Matrix Laboratory（矩阵实验室），是自动控制理论常用的基本数学工具。它的 TOOLBOX 工具箱和 Simulink 仿真工具，为控制系统的计算与仿真提供了一个高性能、强有力的仿真工具。

1.5 本章小结

自动控制原理按控制理论和设计方法不同可以分为两类：经典控制（classical control）理论和现代控制（modern control）理论。经典控制以传递函数为基础，研究单输入单输出、线性定常系统的分析与设计问题。现代控制理论是基于状态空间法，研究多输入多输出、定常数或变参数、线性或非线性一类自动控制系统的分析和设计问题。

根据系统结构不同，控制系统可分为开环控制系统（open loop control system）和闭环控制系统（closed-loop control system）。闭环控制也称反馈控制（feedback control），通过传感器检测输出信号，利用偏差信号作用于控制器上，使系统的输出量趋向于给定的数值。高精度控制系统必须采用闭环控制系统。

一般来说，一个闭环系统由基本元件（或装置）组成。利用框图（block diagram）这种图形化形式来简单方便、直接描述控制系统的结构和组成。

自动控制系统按不同方式，可以分为不同类型。一般可以分为：线性控制系统与非线性控制系统，恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统，连续控制系统和离散控制系统。按控制系统的输入和输出信号的数量来分，有单输入单输出（single input and single output, SISO）系统和多输入多输出（multi-input and multi-output, MIMO）系统。

自动控制系统的基本性能可以概括为三个方面：稳定性（stability）、快速性（transient performance）和准确性（steady-state performance）。控制理论研究的主要内容就是分析和解决控制系统的性能。

思考题与习题

- 1-1 试举出几个日常生活中的开环控制系统和闭环控制系统的实例，并说明它们的工作原理。
- 1-2 闭环控制系统的组成部件有哪些？传感器、执行机构的作用是什么？
- 1-3 对自动控制系统基本的性能要求是什么？最主要的要求是什么？
- 1-4 反馈控制系统的动态过程有哪几种类型？生产过程希望的动态过程是什么？
- 1-5 图 1.9 为仓库大门自动控制系统原理示意图，试说明系统自动控制大门开启和关闭的工作原理，如果大门不能全开或全关，则应如何调整。

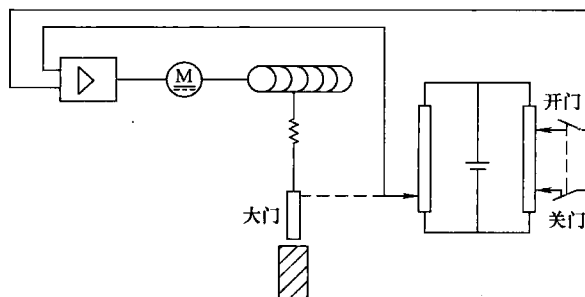


图 1.9 仓库大门自动控制系统

- 1-6 图 1.10 为一电位器位置随动系统，输入量为给定转角 θ_r ，输出量为随动系统的随动转角 θ_c 。试说明：

- (1) 系统是如何工作的？
- (2) 该系统由哪些环节组成？各起什么作用？试用框图表示出该系统的组成和结构。
- (3) 说明当输入转角 θ_r 变化时输出转角 θ_c 的跟随过程。

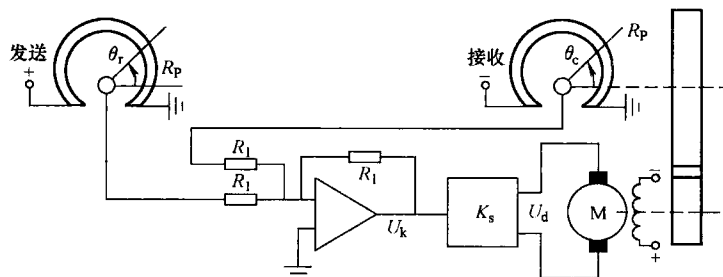


图 1.10 电位器位置随动系统

第2章 控制系统的数学模型

为了从理论上对控制系统进行定性的分析和定量的计算，首要的问题就是建立系统的数学模型。控制系统的数学模型就是将描述系统工作状态的各物理量随时间变化的规律，用数学表达式或图形表示出来，而这种描述各物理量之间关系的数学表达式或图形就称为系统的数学模型。自动控制系统的组成可以是电气的、机械的、液压的、气动的等，然而描述这些系统的数学模型却可以是相同的。因此，通过数学模型来研究自动控制系统，就摆脱了各种类型系统的外部关系而抓住这些系统的共同的、内在的运动规律。

根据系统中各变量的关系，将数学模型分为静态模型和动态模型。如果系统中各变量随时间变化缓慢，其对时间的导数可以忽略不计，这样的数学模型就称为静态模型；而当系统中的变量对时间的导数不可忽略，并将其在动态过程中的关系用微分方程描述，这样的数学模型就称为动态模型。控制理论研究的是系统的动态模型。

根据不同的描述方法，数学模型可以分为两类：一类是输入-输出描述，又称为端部描述，微分方程是这种描述的最基本形式，传递函数、动态结构图、信号流图等其他形式的数学模型均由它导出；另一类是状态变量描述，又称为内部描述，它不仅描述了输入和输出的关系，还描述了系统的内部特性，特别适用于多变量控制系统。

建立系统数学模型的方法有解析法和实验法两种。解析法是根据系统及各元件各变量之间所遵循的客观规律而列出的微分方程式。实验法是对实际系统人为地加入某种形式的输入信号，然后对其输出响应进行分析，并用适当的数学模型去逼近。本章只介绍解析法。

2.1 微分方程

2.1.1 系统微分方程的建立

系统中的输入量和输出量通常都是时间 t 的函数。常见的元器件或系统的输入量和输出量之间的关系都可以用一个微分方程表示，方程中含有输入量、输出量以及它们对时间的导数或积分，这种微分方程又称为动态方程。微分方程的阶数一般是指方程中最高导数项的阶数，又称为系统的阶数。

列写微分方程的关键是了解元器件或系统所属学科领域的相关规律，下面通过一个简单的例子来说明如何列写系统或环节的微分方程。

例 2.1 图 2.1 为一 RLC 电路，输入电压为 $u_i(t)$ ，输出电压为 $u_o(t)$ ，试求 $u_i(t)$ 与 $u_o(t)$ 之间的微分方程。

解：设回路电流 $i(t)$ 如图 2.1 所示。由基尔霍夫电压定律可得下列方程：

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_o(t) = u_i(t)$$

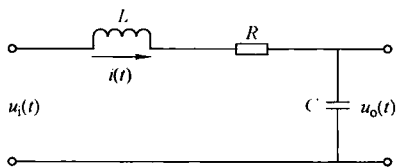


图 2.1 RLC 电路

$$i(t) = C \frac{du_o(t)}{dt}$$

将以上两式联立，消去中间变量 $i(t)$ ，得

$$LC \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t)$$

得到的是一个二阶常系数线性微分方程，对应的系统为二阶线性定常系统。

2.1.2 建立微分方程的步骤

通过例 2.1 对微分方程的建立有了一个初步的了解，即先根据各变量所遵循的规律列写微分方程组，然后消去中间变量，求出整个系统的微分方程。

列写系统微分方程的具体步骤如下：

- 1) 根据实际系统的情况，确定系统和各元器件的输入量和输出量。
- 2) 根据各变量所遵循的科学规律，围绕输入量、输出量以及有关中间变量，列写各环节或元器件的微分方程，构成微分方程组。
- 3) 消去中间变量，得到只有输入量和输出量的微分方程。将与输出量相关的各项放到方程式的左边，与输入量相关的各项放到方程式的右边，并将其各阶导数项按降幂排列。

例 2.2 由理想运算放大器组成的电路如图 2.2 所示，输入电压为 $u_i(t)$ ，输出电压为 $u_o(t)$ ，试求 $u_i(t)$ 与 $u_o(t)$ 之间的微分方程。

解：理想运算放大器正、反相输入端的电位相同，且输入电流为零。根据基尔霍夫电流定律得

$$\frac{u_i(t)}{R} + C \frac{du_o(t)}{dt} = 0$$

整理后得

$$RC \frac{du_o(t)}{dt} = -u_i(t)$$

或

$$T \frac{du_o(t)}{dt} = -u_i(t)$$

式中， $T = RC$ ，称为时间常数。得到的是一阶微分方程。

例 2.3 如图 2.3 所示，由质量块、弹簧和阻尼器组成的机械系统，其中 k 为弹性模量， m 为质量块的质量， f 为阻尼系数，外力 $F(t)$ 为输入量，位移 $y(t)$ 为输出量。试求其微分方程。

解：在外力 $F(t)$ 作用下，如果弹簧恢复力和阻尼器阻力与 $F(t)$ 不能平衡，则质量块 m 将有加速度。根据牛顿第二定律可得

$$F(t) - F_B(t) - F_K(t) = ma$$

式中， $F_B(t)$ 为阻尼器阻力，它与质量块的运动速度成正比，即

$$F_B(t) = f \frac{dy(t)}{dt}$$

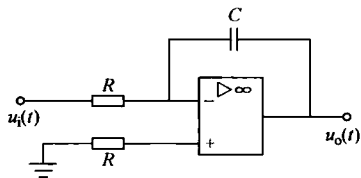


图 2.2 电容负反馈电路

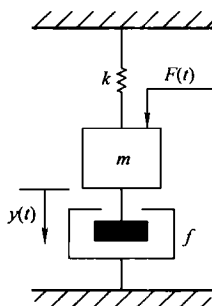


图 2.3 弹簧-质量-阻尼器机械位移系统