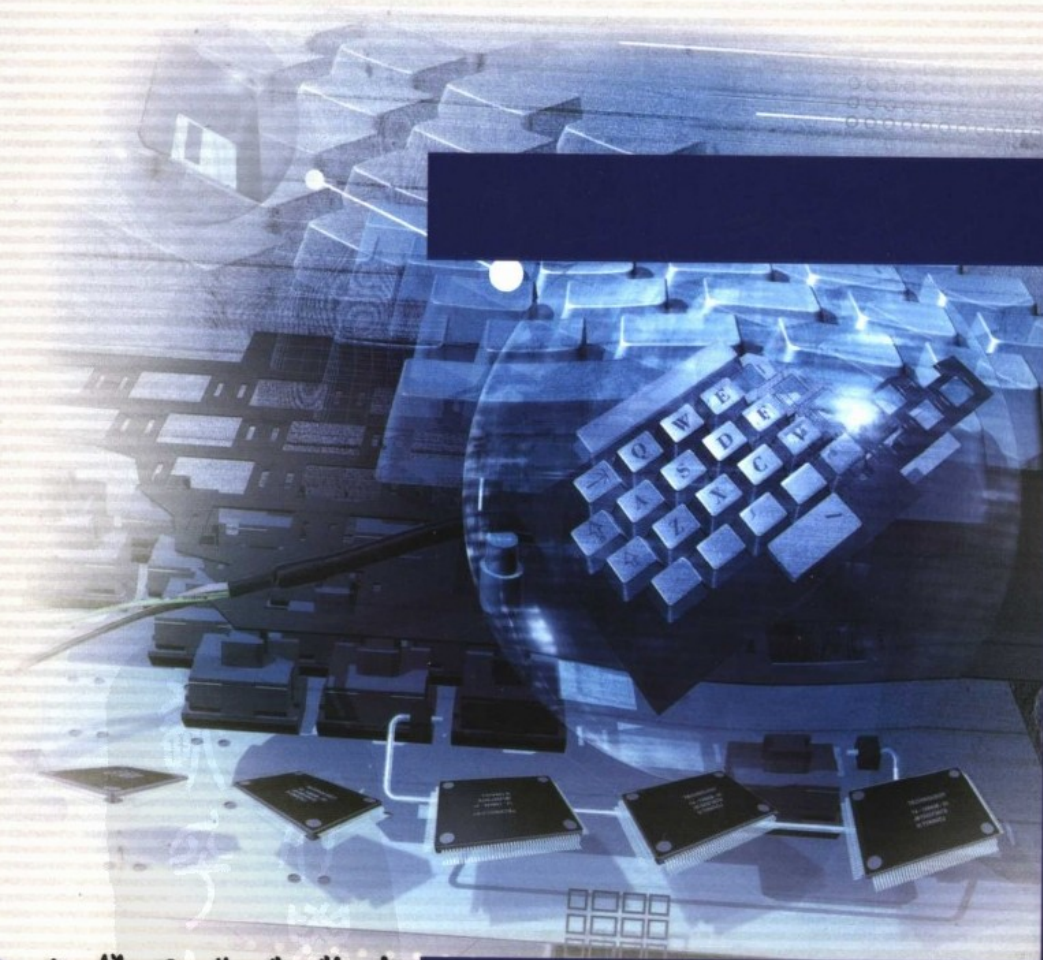


高等学校规划教材

自动控制原理

厉玉鸣 马召坤 王晶 主编



化学工业出版社
教材出版中心

PDG

自动化·信息工程类系列规划教材部分书目

教育部面向21世纪课程教材

自动检测技术及仪表控制系统(第二版) 张毅

普通高等教育“九五”国家级重点教材

控制仪表与计算机控制装置 周泽魁

普通高等教育“十五”国家级规划教材

自动检测技术与装置 张宏建

计算机软件技术基础 周峰

信号与系统 于慧敏

微处理机原理与接口技术 王汀

微型计算机原理及应用 王建宇

微型计算机(80486)原理及接口技术 朱德森

自动控制原理 孙德宝

自动控制原理 厉玉鸣

自动检测技术 王化祥

工业过程控制工程 王树青

计算机控制系统(第二版) 王慧

运动控制系统 罗飞

计算机网络及应用 瞿坦

系统工程导论 梁军

建筑智能化系统及工程应用 杨志

控制系统的数字仿真及计算机辅助设计 钱积新

MATLAB与控制系统的数字仿真及CAD 黄道平

计算机仿真技术 吴旭光

智能仪器技术及其应用 方彦军

人工智能控制 蔡自兴

控制工程与信号处理 罗持翼

智能仪表原理与设计 李昌禧

人工神经网络理论、设计及应用 韩力群

信号检测与估计 景占荣

自动控制原理(非自动化专业适用) 王敏

过程自动化及仪表(非自动化专业适用) 俞金寿

化工自动化及仪表(工艺类专业适用) 杨丽明

ISBN 7-5025-7092-6



9 787502 570927 >

ISBN 7-5025-7092-6

定价: 34.00元

PDG

高等学校规划教材

自动控制原理

厉玉鸣 马召坤 王 晶 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/厉玉鸣, 马召坤, 王晶主编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 6

高等学校规划教材

ISBN 7-5025-7092-6

I. 自… II. ①厉…②马…③王… 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 (2005) 第 074656 号

高等学校规划教材

自动控制原理

厉玉鸣 马召坤 王晶 主编

责任编辑: 唐旭华

文字编辑: 廉静

责任校对: 于志岩

封面设计: 关飞

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23 字数 616 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7092-6

定 价: 34.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

PDG

前 言

自动控制原理是一门重要的技术基础理论课程，在许多工科课程中占据了核心地位，涉及石油、化工、机械、冶金、信息、电力、医药、轻工等诸多工程领域，其应用范围还扩展到工程领域之外的诸多领域，诸如社会、经济、军事、航天、金融等。因此，掌握自动控制的基本理论是十分重要的。

学习自动控制原理课程，要求学生除了掌握必要的数学、电学等基础知识外，还应该对自己所研究的工程领域有一定的了解。为了帮助学生能够学好本门课程，我们组织在本课程的教学中有多年经验的老师共同编写了本教材。编写时既照顾到控制理论的完整性和系统性，又力求理论与实践相结合，希望对各院校教师在本门课程的教学有所帮助。

本教材的内容包括经典控制理论与现代控制理论的基本概念和若干应用。在经典控制理论中，除介绍控制系统的时域分析法、根轨迹分析法和频率特性分析法外，还特别提出了校正网络设计的代数方法，该方法可同时适用于超前、滞后、滞后-超前三大类校正网络的设计。在现代控制理论中，主要介绍了状态空间模型的建立、能控性和能观测性，并介绍了状态反馈控制系统和状态观测器的设计方法。

在各章内容安排中，都有一节学生自读的内容。其中有该章的学习目标，以利于学生更好地掌握各章的重点内容。此外，除在正文里列举一些工程实例来说明理论的应用外，还在学生自读一节中专门安排了例题分析与工程实例，通过结合生产过程的实际分析，使学生更好地掌握控制理论在生产中的应用，力图使读者能学以致用。

为了使大家对 Matlab 及控制系统工具箱的应用有所了解，本书除在各章中结合自动控制理论进行讲解外，还在附录中给出了 Matlab 的一些基本知识及使用说明。

为了便于读者学习本门课程，在附录中给出了数学基础，介绍了复变函数、拉式变换、Z 变换、向量与矩阵等基本数学知识。

本书的主要内容已经制作成用于多媒体教学的课件，需要者可联系：txh@cip.com.cn。

本书由北京化工大学、北京理工大学、山东兖州电大联合编写。参加编写的有王晶（第 7、9 章）、曹柳林（第 3 章）、王晓华（第 2 章）、刘振娟（第 5 章）、陈娟（第 8 章）、马召坤（第 4、6 章）、厉玉鸣（第 1 章）。王晶副教授在本书的整理方面做了大量的工作。

本书难免出现不妥之处，敬请各位老师和读者批评指正。

本书的编写得到了“北京化工大学化新教材基金”和山东兖州电大的资助。

编者

2005 年 3 月



内 容 提 要

本书为高等学校《自动控制原理》课程教材，适用于自动化、电气工程及其自动化等其他相关专业，诸如石油、化工、机械、冶金、信息、电力、医药、轻工等相关专业都是本书涉及的主要范围。

本书的内容包括经典控制理论与现代控制理论的基本概念和若干应用。编写时既照顾到控制理论的完整性和系统性，又力求理论与实践相结合。

本书本着循序渐进、启发思维的原则，力求在内容安排上遵循教学的内在规律，既有利于教学，又有利于培养学生的创新精神。在各章末专门安排了学生自读的内容，使学生能掌握各章的重点内容，并通过大量实例分析和习题，使学生了解并逐步掌握控制理论在生产中的应用，力图使读者能学以致用。本书还介绍了 Matlab 在控制系统分析及设计中的应用，以帮助读者更快更好地掌握本书的主要内容。

本书对控制工程领域从事科学研究及相关工程技术人员，具有参考价值。



目 录

第 1 章 概述	1	第 3 章 控制系统的时域分析法 ...	42
1.1 自动控制理论的发展及趋势	1	3.1 控制系统的过渡过程形式及性能 指标	42
1.2 开环控制与闭环控制	2	3.1.1 控制系统的输入信号	42
1.3 对自动控制系统的基本要求	4	3.1.2 控制系统过渡过程的性能 指标	43
1.3.1 稳定性	4	3.2 一阶系统的动态响应	44
1.3.2 精确性	5	3.2.1 单位阶跃响应	45
1.3.3 快速性	5	3.2.2 单位斜坡响应	46
1.4 本书梗概	6	3.2.3 单位脉冲响应	47
1.4.1 建模	6	3.3 二阶系统的动态响应	48
1.4.2 系统分析	6	3.3.1 二阶系统数学模型的标准 形式	48
1.4.3 系统综合	6	3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应 ...	49
1.5 学生自读	6	3.3.3 二阶欠阻尼系统过渡过程的 性能指标	52
1.5.1 学习目标	6	3.4 高阶系统的动态响应	56
1.5.2 例题分析与工程实例	6	3.4.1 高阶系统的解析分析	56
1.5.3 本章小结	9	3.4.2 高阶系统的降阶近似分析 ...	58
习题 1	9	3.5 控制系统的稳态误差分析	59
第 2 章 控制系统及其组成环节的 数学模型	11	3.5.1 稳态误差与系统类型	60
2.1 数学模型的类型及建模方法	11	3.5.2 给定稳态偏差分析	61
2.1.1 数学模型的几种类型	11	3.5.3 扰动稳态偏差分析	64
2.1.2 数学模型建立的一般方法 ...	11	3.6 控制系统的稳定性分析	65
2.2 系统的微分方程数学模型的 建立	11	3.6.1 系统稳定性的概念及条件 ...	65
2.3 控制系统的传递函数模型	15	3.6.2 劳斯稳定判据	66
2.3.1 传递函数	15	3.6.3 劳斯稳定判据的应用	70
2.3.2 控制系统中的典型环节	17	3.7 应用 Matlab 分析控制系统的 性能	71
2.3.3 系统方块图	21	3.8 学生自读	75
2.3.4 信号流图	27	3.8.1 学习目标	75
2.3.5 梅逊公式	31	3.8.2 例题分析与工程实例	75
2.4 利用 Matlab 建立控制系统 模型	32	3.8.3 本章小结	79
2.5 学生自读	36	习题 3	80
2.5.1 学习目标	36	第 4 章 根轨迹分析	82
2.5.2 例题分析与工程实例	36	4.1 根轨迹的概念	82
2.5.3 本章小结	38	4.1.1 根轨迹引入的背景	82
习题 2	39		

4.1.2 根轨迹的概念	82	特性	137
4.1.3 闭环零、极点与开环零、 极点的关系	83	5.4.2 闭环频率特性分析方法	138
4.1.4 根轨迹方程	84	5.5 应用 Matlab 进行频率特性 分析	140
4.2 根轨迹绘制的基本法则	84	5.6 学习自读	142
4.3 广义根轨迹	89	5.6.1 学习目标	142
4.3.1 参数根轨迹	89	5.6.2 例题分析与工程实例	142
4.3.2 零度根轨迹的绘制法则	90	5.6.3 本章小结	147
4.4 利用根轨迹图分析系统性能	91	习题 5	148
4.4.1 根轨迹图上的闭环零、极 点与时间响应的关系	91	第 6 章 线性系统的校正方法	150
4.4.2 系统性能定性分析的原则	93	6.1 系统校正的问题和校正装置	150
4.4.3 举例	94	6.1.1 性能指标及互换	150
4.5 利用 Matlab 绘制系统的根 轨迹	95	6.1.2 校正方式	152
4.6 学生自读	98	6.1.3 常用校正装置及其特性	153
4.6.1 学习目标	98	6.1.4 PID 控制器	155
4.6.2 例题分析与工程实例	98	6.2 频率域上的校正方法	156
4.6.3 本章小结	101	6.2.1 串联超前校正	156
习题 4	101	6.2.2 串联滞后校正	157
第 5 章 频率特性分析法	103	6.2.3 串联滞后-超前校正	158
5.1 频率特性及其图示法	103	6.2.4 并联校正	159
5.1.1 频率特性	103	6.3 时域上的校正方法	159
5.1.2 频率特性的极坐标图	107	6.3.1 串联校正	160
5.1.3 典型环节的伯德 (Bode) 图示法	113	6.3.2 并联校正	166
5.2 奈奎斯特 (Nyquist) 稳定 判据	125	6.3.3 一般二次型校正装置的 设计	167
5.2.1 柯西定理	125	6.3.4 PID 控制器的理论设计	170
5.2.2 奈奎斯特稳定判据	126	6.4 前馈校正和复合校正	171
5.2.3 奈奎斯特轨迹穿过 $F(s)$ 奇点情况	130	6.4.1 前馈校正的第一种形式	171
5.2.4 奈奎斯特稳定判据的物理 意义	131	6.4.2 前馈校正的第二种形式	172
5.3 稳定裕度及其分析方法	132	6.4.3 前馈滤波器问题	172
5.3.1 稳定裕度的基本概念	132	6.4.4 复合校正	173
5.3.2 系统稳定裕度与系统性能 指标的关系	134	6.5 Matlab 在系统校正中的应用	173
5.3.3 系统的带宽	134	6.6 学生自读	175
5.3.4 稳定裕度的分析方法	135	6.6.1 学习目标	175
5.4 闭环频率特性及其分析方法	137	6.6.2 例题分析与工程实例	175
5.4.1 开环频率特性与闭环频率 特性	137	6.6.3 本章小结	179
		习题 6	179
		第 7 章 状态空间分析设计 方法	181
		7.1 线性系统的状态空间数学 模型	181

7.1.1	系统状态空间表达的基本概念	181	8.1	采样控制系统概述	243
7.1.2	线性系统的状态空间描述	182	8.2	信号的采样与保持	244
7.1.3	由机理分析建立状态空间表达式	182	8.2.1	采样器与采样过程	244
7.1.4	由微分方程建立状态空间表达式	184	8.2.2	采样过程的数学描述	245
7.1.5	由传递函数建立状态空间表达式	187	8.2.3	采样定理及采样保持	247
7.1.6	状态空间表达式与传递函数矩阵	187	8.3	采样信号的Z变换	251
7.2	系统的状态空间运动分析	189	8.3.1	采样信号的Z变换	251
7.2.1	线性定常系统状态运动分析	189	8.3.2	Z变换的基本性质	254
7.2.2	矩阵指数函数 e^{At}	191	8.3.3	Z反变换	257
7.3	线性定常系统的能控性与能观测性	193	8.4	离散系统的数学模型	260
7.3.1	基本概念	194	8.4.1	微分方程的离散化	260
7.3.2	能控性与能观测性判据	196	8.4.2	连续状态方程的离散化	261
7.3.3	单输入单输出系统的能控/能观测标准形	202	8.4.3	脉冲传递函数	263
7.3.4	结构分解	204	8.5	采样系统的数学模型之间的相互转换	271
7.4	线性系统的状态反馈与极点配置	210	8.5.1	差分方程和脉冲传递函数之间的转换	271
7.4.1	状态反馈与输出反馈	210	8.5.2	差分方程和离散状态方程之间的转换	271
7.4.2	状态反馈极点配置	212	8.5.3	离散状态方程和脉冲传递函数之间的转换	273
7.4.3	输出反馈极点配置	215	8.6	采样系统的性能分析	277
7.5	状态观测器的设计	216	8.6.1	稳定性分析	277
7.5.1	全维观测器的设计	216	8.6.2	稳态特性分析	281
7.5.2	最小阶观测器	220	8.6.3	动态特性分析	283
7.5.3	具有观测器的状态反馈控制系统	223	8.7	Matlab 在离散系统中的应用	286
7.6	Matlab 在状态空间分析中的应用	226	8.8	学生自读	289
7.7	学生自读	234	8.8.1	学习目标	289
7.7.1	学习目标	234	8.8.2	例题分析与工程实例	289
7.7.2	例题分析与工程实例	234	8.8.3	本章小结	292
7.7.3	本章小结	240	习题 8		293
习题 7		240	第 9 章 非线性控制系统		295
第 8 章 采样控制系统分析方法		243	9.1	概述	295
			9.1.1	研究非线性系统的意义	295
			9.1.2	非线性系统的一般特征	296
			9.1.3	模型线性化	296
			9.1.4	典型非线性环节及其影响	298
			9.1.5	非线性系统的研究方法及其特点	299
			9.2	描述函数方法	301
			9.2.1	描述函数的概念	302

9.2.2 典型非线性环节描述函数的计算.....	302	9.5 应用 Matlab 分析非线性系统.....	323
9.2.3 描述函数分析方法.....	306	9.6 学生自读.....	327
9.3 相平面方法.....	311	9.6.1 学习目标.....	327
9.3.1 相平面及相轨迹的特点.....	311	9.6.2 例题分析与工程实例.....	327
9.3.2 相轨迹的绘制方法.....	312	9.6.3 本章小结.....	330
9.3.3 线性二阶系统的相轨迹.....	313	习题 9	331
9.3.4 非线性系统相平面分析.....	316	附录 1 数学基础	333
9.4 李亚普诺夫稳定性理论.....	317	附录 2 根轨迹绘制法则的证明 ...	336
9.4.1 李亚普诺夫意义下的稳定性.....	317	附录 3 Matlab 基础知识	340
9.4.2 李亚普诺夫稳定性理论.....	319	部分习题答案	350
9.4.3 线性系统的李亚普诺夫稳定性分析.....	322	参考文献	359

第 1 章 概 述

1.1 自动控制理论的发展及趋势

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，通过自动控制装置使被控制的对象和过程自动地按照预定的规律运行。例如使导弹能够命中目标；宇宙飞船准确地登上月球，并按预定的时间与地点返回地球；机床能够自动加工出符合一定形状与精度的零件；机器人能按一定的规律进行某种操作；化学反应器在一定的压力、温度下反应并生产出合格的产品等，都离不开自动控制理论与自动控制技术的发展。自 20 世纪 40 年代以来自动控制应用的领域越来越广泛，除了在航空航天技术、军事装备及部门、工业生产的过程中，自动控制技术起着特别重要的作用外，目前大至世界及国家政治经济管理、能源控制、医疗卫生、地区规划、交通运输，小至人的日常生活，都离不开自动控制理论及自动控制技术的应用。

自动控制技术的广泛应用，不仅可以提高生产效率，减轻劳动强度，改善工作条件，节省能源等，而且对国家的经济发展、社会进步乃至人们生活水平的提高都会起着越来越重要的作用。

自动控制理论是自动控制技术的理论基础，是一门理论性较强的科学。按照自动控制理论发展的不同阶段，自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

20 世纪中叶，由于自动控制技术的发展，逐渐形成并日臻成熟了“经典控制理论”。这些理论主要是以传递函数为基础，研究单输入单输出（SISO）自动控制系统的分析和设计问题。采用的方法主要是微分方程分析法、根轨迹分析法和频率特性分析法。这些方法对控制系统的分析设计和运行发挥了重要的作用，并积累了丰富的经验，成功地解决了一系列以输出反馈为主要控制手段的自动控制问题。

20 世纪 60 年代开始，由于生产的发展，自动控制系统日趋复杂、规模日趋庞大，特别是空间技术的发展，使自动控制理论有了一次新的飞跃，逐渐形成了“现代控制理论”。这些理论主要是以状态空间法为基础，研究多输入多输出（MIMO）及变参数、非线性控制系统的分析设计问题。

近年来，由于计算机技术的迅猛发展和应用数学研究的进展，特别是一些新型控制技术，诸如最优控制、自适应控制、预测控制、模糊控制、人工神经网络控制、鲁棒控制等的出现，使自动控制理论又有了日新月异的发展。目前，主要是在研究庞大的系统工程的基础上发展起来的大系统理论和在模仿人类智能活动的基础上发展起来的智能控制方面，都取得了许多重大进展。

“经典控制理论”和“现代控制理论”是自动控制理论发展的两个阶段，但它们又是相互联系，相互促进的。“现代控制理论”不能看成是“经典控制理论”简单的延伸和推广，在所采用的数学工具、理论基础、研究方法、研究对象等方面都有着明显的不同，可以说是一次质的飞跃。但是，这并不意味着这两种方法原理截然分离。特别是在解决实际工程问题中，许多用经典控制理论解决的问题，同样可以用现代控制理论的方法来实现，反之亦然。当然，它们又是不完全相同的，尽管现代控制理论从方法上看更加完备或结果更强，但是，经典控制理论简洁有效的分析方法和控制方式，往往是现代控制理论难以实现的。也就是说，它们又有很强的互补性。现代科学技术的发展和生产技术的提高，为经典和现代控制理

论的发展及应用都提供了广阔的前景。

1.2 开环控制与闭环控制

所谓控制，一般是指采取某种手段使被控制的对象或过程的某一物理量按照一定的规律运行。这里被控制的对象或过程简称被控对象，而被控制的物理量称为被控变量，能够实施某种控制手段的装置称为控制器，其最简单的方块图如图 1-1 所示。

例如，如果要控制直流电动机的转速，可采用能改变直流电压的装置，一旦直流电压被改变，就可以起到电机的调速作用了，那么这时被控对象就是直流电动机，控制器实质上就是一个调压器，控制量就是施加到直流电机上的电压。图 1-2 是该系统的示意方块图。

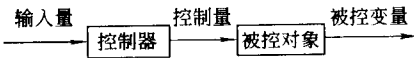


图 1-1 开环控制系统方块图

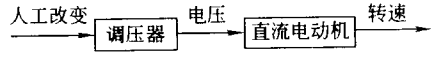


图 1-2 直流电动机转速控制系统示意方块图

图 1-3 所示为热交换器的示意。被加热物料进入热交换器，与进来的加热蒸汽进行热交换，物料出口温度得以升高。通过调压器来改变蒸汽调节阀上的气体压力，从而可以改变进入热交换器的蒸汽量。蒸汽量的改变就使被加热物料的出口温度得以控制。该系统也可以用方块图 1-1 来表示。在这个系统中，调压器就起到控制器的作用，被控对象是热交换器，被控变量是物料的出口温度，控制量是进入热交换器的蒸汽量。

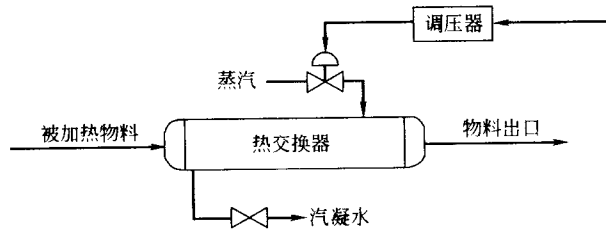


图 1-3 热交换器的示意

从上述两个例子可以看出，这种系统只是改变控制量对被控变量进行控制，在整个控制过程中，被控变量的变化情况对控制量不产生任何影响。这种被控变量只是受控于控制量，而对控制量不能反过来施加影响的系统称为开环控制系统。在第一个例子中，电动机的转速变化并不能自动地对施加于电动机的电压产生任何影响；在第二个例子中，被加热物料出口温度的变化并不能自动地对进入热交换器的蒸汽量产生任何影响。

在开环控制系统中，由于被控变量的变化并不能自动地对控制量产生任何影响，因此，当系统中受到各种扰动（干扰）的影响，例如电动机负载的变化或热交换器进料温度变化时，被控变量必然会出现偏差，这种系统不具备自动修正偏差的能力。为了克服这个缺点，必须引入反馈量，形成闭环控制系统。反馈控制是闭环控制系统的—个特点。

图 1-4 所示为直流电动机的转速闭环控制系统的方块图。当电动机的转速受到负载（或其他因素）的影响而改变时，通过测速发电机测得实际转速并转换为电压信号 u_0 后，反过来送到系统的输入端，与代表转速期望值的电压信号值 u_r 进行比较。如果有偏差，则通过电子放大器放大后，来改变控制量——施加到直流电动机上的直流电压，于是，转速就得到了控制。显然可见，这里被控变量——转速的变化反过来会影响控制量，所以属于闭环控制系统。图 1-5 所示为该系统的原理示意。这个系统的控制目的是为了使电机的实际转速尽

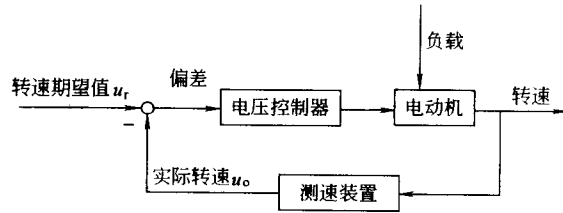


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统的方块图

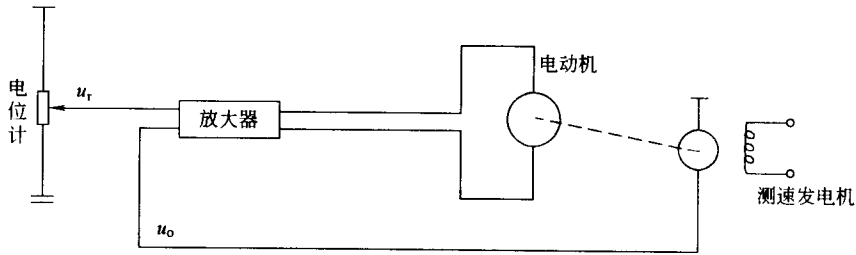


图 1-5 电机转速闭环控制原理示意

量接近或等于转速的期望值，即偏差越小越好。在图 1-4 中，计算偏差时，用转速的期望值减去转速的实际值。因此，实际转速送入控制器之前有一个负号“—”，这种反馈称之为负反馈，负反馈是闭环控制系统的又一特点。

图 1-6 所示为热交换器出口物料温度控制的方块图。当热交换器的物料出口温度受到一些扰动量（例如，进料温度的变化）影响而发生变化时，通过温度测量装置测得温度实际值，然后反过来（反馈）送到系统的输入端与温度期望值进行比较，如有偏差，则控制器送出信号改变调节阀上的气压信号，使阀门的开度发生变化，从而改变进入热交换器的加热蒸汽量，进而使物料的出口温度得以控制。

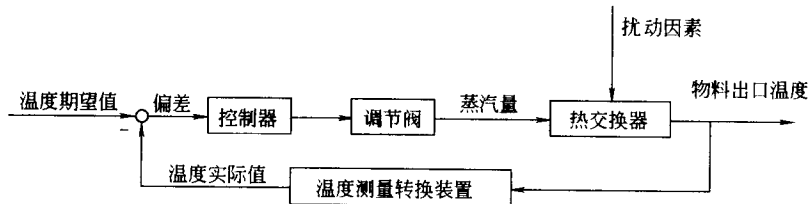


图 1-6 热交换器出口物料温度控制系统的方块图

图 1-7 所示为一般闭环自动控制系统的方块图。在图 1-7 中被控对象的被控变量经过测量装置得到它的实际值，然后，与被控变量的期望值（设定值）进行比较，得出它们的偏差。控制器根据偏差的大小及变化情况，按照一定的规律运算后得到控制量。控制量送入执行器，从而改变了能直接影响被控变量变化的操纵变量，最终达到被控变量尽量接近或等于设定值的目标。这个系统，操纵变量和扰动量都会影响被控变量的数值，但它们造成的后果却是不一样的，扰动量的作用是使被控变量偏离设定值，操纵变量的作用是使被控变量回到设定值。一旦根据实际情况，选定了操纵变量之后，其他能够影响被控变量的所有因素都可以看作是扰动量。

由于闭环控制系统采用负反馈的原理，能够自动地修正或消除被控变量和设定值之间的

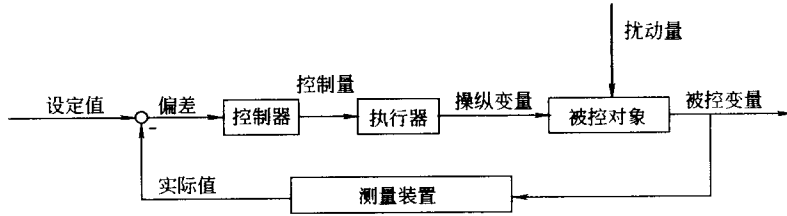


图 1-7 一般闭环自动控制系统的方块图

差值，所以在国防生产及其他许多生产部门中得到了广泛的应用。在闭环控制系统中，根据设定值的不同情况，又可以分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

当系统的设定值是一个不变的数值时，称为定值控制系统。这种系统的控制目的是为了克服扰动量对被控变量的影响，从而维持被控变量恒定不变。例如工业生产过程中，要保持热交换器的物料出口温度不变；保持某反应器的反应温度不变；保持某管道的物料流量不变；保持电动机转速不变等都属于定值控制系统的实例。

当系统的设定值是一个随机变化而事先未知的函数时，其构成的控制系统称为随动控制系统。这种系统的控制目的是为了使被控变量随着设定值的变化而变化，因此又称为自动跟踪系统。例如高射炮的自动跟踪系统就是为了跟踪敌人的目标（例如飞机），而这个目标的位置是随机变化的。另外，某些自动平衡式的测量仪表，其指示值应该随被测量的变化而随之改变，因此也可以当作是一种随动控制系统。

当系统的设定值是一个人们预先确定的时间函数时，其构成的控制系统称为程序控制系统。例如在金属热处理过程中，被处理的金属温度应该按照事先定好的规律（程序）变化，这种系统称为程序控制系统。

1.3 对自动控制系统的基本要求

具有反馈的自动控制系统，其基本职能是保证在系统受到各种扰动作用的情况下，仍能使被控变量保持或接近设定值。在理想情况下，系统的被控变量 $y(t)$ 应恒等于设定值 $r(t)$ 。但在实际运行中，当系统受到扰动作用或设定值发生变化时，其被控变量经过了一段时间，才逐渐接近或等于设定值，这个过程一般称为系统的过渡过程。如何全面地衡量控制系统在过渡过程中的性能优劣呢？一般应从稳定性、精确性和快速性等三个方面来评价系统的总体性能。

1.3.1 稳定性

稳定性是控制系统能够正常工作的首要条件，它反映系统受到扰动作用或设定值的变化后恢复平衡状态的能力。系统的稳定性取决于系统的固有特性。对于任何一个控制系统，当受到外界作用后，其系统过渡过程的具体形式与输入作用的形式有关。在一般情况下，可以假定输入作用是一个阶跃作用。以定值控制系统为例，如果在某一个时刻（假定 $t=0$ ）突然加一个扰动作用 $f(t)$ ，其大小保持不变，如图 1-8 (a) 所示。系统在这种扰动作用下其被控变量就会发生变化，其变化过程（即过渡过程）的形式如图 1-8 所示。

图 1-8 (b) 是一种单调变化过程，被控变量 $y(t)$ 回到或接近设定值。图 1-8 (c) 是一种衰减振荡过程，被控变量 $y(t)$ 是振荡的，其幅值逐渐减小，直至接近设定值。图 1-8 (d) 是一个等幅振荡过程，其振幅一定，被控变量 $y(t)$ 始终围绕设定值两侧反复变化。图 1-8 (e) 是发散振荡过程，其被控变量 $y(t)$ 的振幅值越来越大。图 1-8 (f) 是一单调发散过程，被控量 $y(t)$ 越来越偏离设定值。

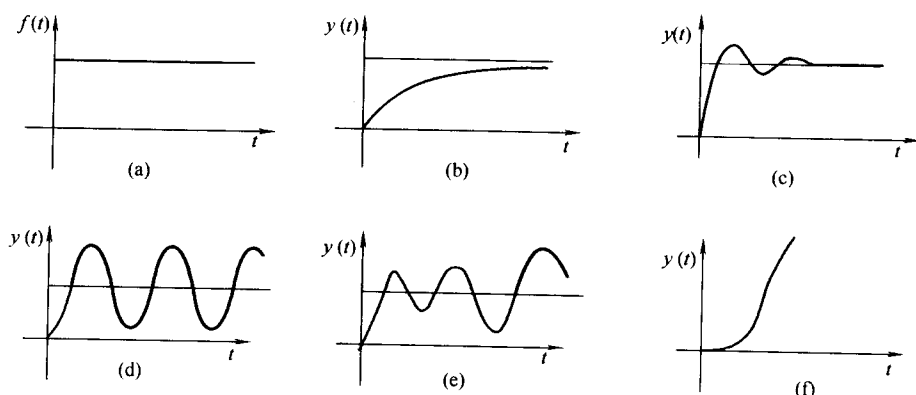


图 1-8 过渡过程的形式

由图 1-8 中可以看出,控制系统的过渡过程如果如图 (e) 和图 (f) 所示,在系统受到扰动作用后,被控变量 $y(t)$ 最终将远离设定值 $r(t)$,即系统没有恢复平衡状态的能力。因此这种系统是不稳定的。在实际工作中,当然是不允许的。

图 1-8 (d) 所示的等幅振荡过程,被控变量 $y(t)$ 也不能稳定在某个数值上,因此也认为是不稳定的。

图 1-8 (b)、图 1-8 (c) 所示的过渡过程形式,其被控变量 $y(t)$ 最终能回到或接近设定值,经过相当长时间后, $y(t)$ 能恢复到一种平衡状态,因此,这两种形式是稳定的,其对应的控制系统是稳定的控制系统。

控制系统能够正常发挥其控制作用,保证系统的稳定性是首要条件。因此,如何判断系统是否稳定是控制理论中极其重要的课题。在控制理论中,将要介绍时域中的求取特征方程式特征根的基本方法,以判断系统的稳定性;通过特征方程系数以判断其稳定性的劳斯 (Routh) 稳定判据;通过绘制根轨迹以获得当系统中某个参数变化时对系统稳定性的影响。在频域中将介绍基于频率曲线的奈魁斯特 (Nyquist) 稳定判据。在现代控制理论中将介绍李亚普诺夫稳定性判据方法。

1.3.2 精确性

精确性是反映系统受到外界作用(设定值变化或扰动作用)后,系统的被控变量 $y(t)$ 偏离设定值 $r(t)$ 的程度。它是系统控制准确度的一个指标。

当系统受到输入信号作用后,被控变量经过一段时间后才能由一个平衡状态达到另一个平衡状态。这个过程称为系统的动态过程(即过渡过程)。系统在动态过程中,被控变量 $y(t)$ 是变化的,因此它与设定值 $r(t)$ 之间的偏差 $e(t)$ 也是变化的,这个变化的 $e(t)$ 反映系统的动态精确度,称为动态偏差。在实际的控制系统中,动态偏差的数值不能太大,否则被控变量偏离设定值太远,尽管这只是短时间偏差,但也可能使工业生产过程出现异常,严重时会导致事故发生。

当过渡过程结束后,系统达到了新的平衡状态,系统处于静态。系统中的各个变量不再变化,这时被控变量与设定值之间的差值称为残余偏差,简称余差。余差的大小反映了系统的静态精确度。在自动跟踪系统中,余差反映了系统的跟踪精确度。在定值控制系统中,余差不能太大,否则会给生产过程带来不利影响。

1.3.3 快速性

控制系统受到外界的作用后,系统能否从一个平衡状态迅速地达到另一个平衡状态,这

就是系统快速性。当然，只有当系统稳定时，才有快速性可言，对于不稳定的系统，是永远达不到新的平衡状态的。

系统的稳定性、精确性和快速性之间是互相联系，有时又是互相矛盾的。例如图 1-8 (b) 所示的单调衰减过程，尽管稳定性很好，被控变量的变化非常缓和，但其控制的快速性较差，系统的过渡过程时间很长，有时还会使静态偏差较大，所以这种过渡过程的形式在实际控制系统中也是较少采用的。对于图 1-8 (c) 所示的衰减过程，由于其稳定性、精确性、快速性都能顾及，所以在生产过程的控制系统中是经常采用的。当然，同样是衰减振荡过程，过分地强调其快速性，往往会使振荡加剧；过分地强调其稳定性，往往会影响其控制过程的精确性和快速性，所以适当地选择其衰减的程度是非常重要的，如何使控制系统达到比较理想的性能指标，将是本课程的一个重要内容。

1.4 本书梗概

本书主要介绍自动控制系统的建模、分析与综合。

1.4.1 建模

要研究控制系统，首先要了解系统（或环节）的输入量与输出量的关系。能够定量地表达系统（或环节）的各变量之间关系的表达式，称为系统（或环节）的数学模型。

本书介绍了建立数学模型的方法，并通过若干实例介绍了如何通过机理分析法得到系统的机理模型。

本书介绍的数学模型主要有以下几种形式：微分方程（差分方程）式、传递函数、频率特性及状态空间表达式等。这几种形式的数学模型在一定条件下可以互相转换。

1.4.2 系统分析

系统分析是指在已知系统数学模型的情况下，如何对控制系统的稳定性、快速性和精确性进行分析。本书主要介绍了微分方程（差分方程）分析法、根轨迹分析法、频率特性分析法及状态空间分析法。

当系统中的各变量都是时间的连续函数时，称为连续控制系统；当系统中的某些变量是时间的离散函数时，称为离散控制系统。本书着重介绍连续系统的分析方法，对离散控制系统的分析方法只作简要的介绍。

1.4.3 系统综合

为了达到某些控制目的和要求，如何选择合适的控制系统结构和参数，这就是系统综合所要解决的问题。

经典控制理论和现代控制理论都对系统综合提供了一些有效的方法，这些方法从不同的角度来看各有特点和适用的场合，它们之间还有着密切的内在联系。本书介绍了经典控制理论中常用的 RC 网络、PID 调节等校正器的设计，介绍了现代控制理论中极点配置、状态观测器的设计等。

1.5 学生自读

1.5.1 学习目标

- ① 掌握开环控制系统与闭环控制系统的基本概念，并学会分析系统的基本类型。
- ② 理解反馈和负反馈的基本概念及反馈在控制系统中的作用。
- ③ 了解控制理论的发展过程及发展趋势。

1.5.2 例题分析与工程实例

【例 1-1】图 1-9 所示为一反应器温度控制系统。A、B 两种物料进入反应器进行放热反应。为了保证反应正常进行，需要通过改变进入夹套的冷却水的流量来保持反应器的温度不

变。图中 TT 表示温度测量装置，测量反应器内的温度值后并转换为一定信号（亦称温度传感器）送到温度控制器 TC，与温度设定值 sp 比较后经某种规律运算得出信号送到调节阀，改变其开度，从而使进入反应器夹套的冷却水流量改变，进而可以通过热交换改变反应器内的温度。试指出该系统的被控对象、被控变量、操纵变量各是什么？扰动量可能有哪些？说明该系统属于开环控制还是闭环控制？并画出该温度控制系统的方块图。

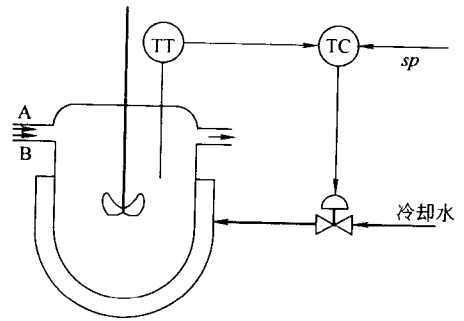


图 1-9 反应器温度控制系统

解 在这个系统中，被控对象是反应器，它是需要控制的设备；被控变量是反应温度，它是需要控制的变量；操纵变量是冷却水的流量，它是用以维持反应器内的温度不变的控制手段；扰动量有物料 A、B 的进料量和进料温度、反应器的传热情况、冷却水的供水压力等，它们的变化都会引起被控变量偏离设定值。

该系统的方块图如图 1-10 所示。由方块图可以看出，该系统的被控变量温度经过测量后返回到系统的输入端，从而改变控制信号，由此属于具有负反馈的闭环控制系统。

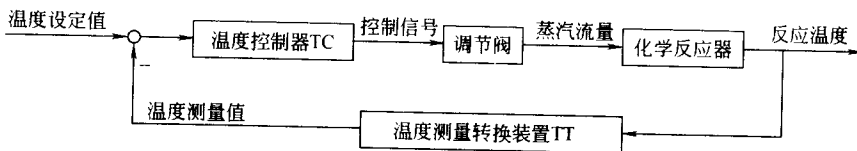


图 1-10 温度控制系统方块图

【例 1-2】 在炼油化工生产中，经常需要将原料油加热至一定温度以进入下一工序。加热炉是让燃料油在炉中燃烧，放出热量以加热原料油，工艺上要求原料油的出口温度保持在规定的数值上，为此设计如图 1-11 所示的温度控制系统的三种方案。图中 FT 表示原料油流量的测量转换装置，FC 表示燃料油的流量控制器，TT 表示原料油的温度测量转换装置，TC 表示原料油的温度控制器。试分别画出以上三种控制方案的方块图，并分别说明它们属于开环控制还是闭环控制。

解 图 1-12 (a)、(b)、(c) 分别是图 1-11 (a)、(b)、(c) 对应的方块图。由图 1-12 (a) 可以看出，改变流量控制器 FC 的设定值（或操作指令），就会使调节阀的开度发生变化，进而改变燃料油的流量。由于燃料油流量的增减会改变加热炉内的燃烧情况，因而使通过加热炉的原料油出口温度升高或降低。但是，这时原料油的出口温度变化并没有反馈给控制器，从系统结构来看，并没有形成闭合回路，因此属于开环系统。在这种系统中，如果由于其他扰动量（例如原料油进口流量或温度、燃烧状况等）使原料油的出口温度偏离期望的数值，系统不能自动地来修正这种偏差。

由图 1-12 (b) 可以看出，当由于某些扰动使被控变量（原料油出口温度）发生变化时，经过检测变换装置 TT 后，就会使信号返回来引入温度控制器，其输出信号送到调节阀，调节阀的开度发生变化后就会改变操纵变量（燃料油流量）的数值，从而使被控变量回到所期望的数值。从结构上来看，系统构成闭合回路，因此属于闭环控制系统。闭环控制系统能够自动地修正由于扰动量所引起的被控变量与设定值的偏差，因而是一种使用极为广泛的自动控制系统。