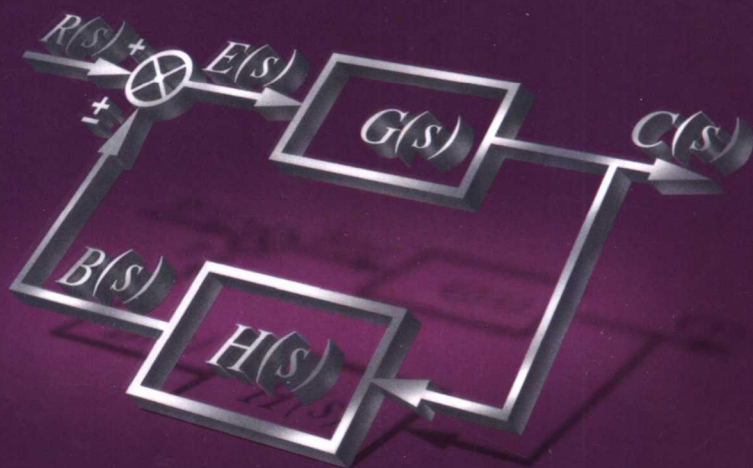




21 世纪高等院校电气信息类系列教材

自动控制理论基础

左为恒 周林 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书深入浅出地阐述了自动控制的基本概念和基本理论。分析了开、闭环自动控制系统的主要特点和基本要求。详细讲解了控制系统在时域、复频域中数学模型的建立及其特性、控制系统的时域分析法、根轨迹法、频率特性法、控制系统校正、非线性系统及采样控制系统。全书共分 10 章,除介绍经典控制理论外,还对现代控制理论的基本概念和基本理论作了讲解。书中最后介绍了计算机辅助分析与设计语言 Matlab 在控制系统中的应用。

本书可作为高等院校电气工程与自动化等专业的教科书,也可作为相关专业工程技术人员的自学和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论基础/左为恒,周林主编. —北京:机械工业出版社, 2007.9

(21 世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 978 - 7 - 111 - 22205 - 7

I. 自… II. ①左…②周… 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 (2007) 第 131062 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: 冉晓华 责任校对: 姚培新

封面设计: 刘吉维 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.25 印张 · 474 千字

0 001—5 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 22205 - 7

定价: 29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的。期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注意理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

自动控制原理课程是高等院校电气工程与自动化及相关专业的一门必修主干课程。我们根据教学大纲要求,针对高等院校电气工程与自动化专业学生的需要编写了本书。本书力求思路清晰,语言流畅,易学易懂,除详细介绍经典控制理论外,还对现代控制理论的基本概念和基本理论及 Matlab 计算机辅助分析与设计作了讲解。通过本教材的学习,能使学生掌握分析和设计控制系统的基本理论和基本方法,为后续课程的进一步学习打下基础。

本书可作为高等院校电气工程与自动化专业的教科书,也可作为相关专业工程技术人员的自学和培训教材。

本书由重庆大学电气工程学院左为恒、周林主编,吕厚余、童明俦两位教授主审。第1、7章由周林编写,第3、8章由侯世英编写,第2、6章由薛大金编写,第4章由李昌春编写,第5章由周林和左为恒编写,第9章由左为恒编写,第10章由孙韬编写,全书由左为恒统稿及修改。在教材审阅过程中,两位主审老师以严谨的治学态度提出了许多改进意见,罗亦军老师在教材的编写中也做了大量有益的工作,在此向他们表示诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 自动控制理论及 MATLAB

简介 1

- 1.1 自动控制的历史 1
- 1.2 自动控制理论的基本概念 3
 - 1.2.1 经典控制理论和现代控制理论 3
 - 1.2.2 开环控制和闭环控制 4
 - 1.2.3 自动控制举例 7
 - 1.2.4 自动控制系统的分类 8
 - 1.2.5 对自动控制系统的基本要求 9
- 1.3 控制系统 MATLAB 计算及仿真 10
 - 1.3.1 控制系统计算机仿真的基本概念 10
 - 1.3.2 MATLAB 简介 10
 - 1.3.3 控制系统 MATLAB 计算仿真的优秀性能 13
 - 1.3.4 MATLAB 开发控制系统流程 13
- 1.4 习题 14

第2章 控制系统的数学模型 15

- 2.1 系统微分方程的建立 15
- 2.2 传递函数 18
 - 2.2.1 传递函数的基本概念和定义 18
 - 2.2.2 传递函数的基本性质 19
 - 2.2.3 传递函数的求取 20
- 2.3 典型环节的传递函数 21
 - 2.3.1 比例环节 21
 - 2.3.2 惯性环节 22
 - 2.3.3 积分环节 23
 - 2.3.4 微分环节 24
 - 2.3.5 振荡环节 25
 - 2.3.6 延迟环节 26
- 2.4 闭环控制系统的动态结构图 27
 - 2.4.1 动态结构图的概念 27
 - 2.4.2 动态结构图的建立 28

- 2.5 动态结构图的等效变换 29
 - 2.5.1 动态结构图的等效变换 29
 - 2.5.2 动态结构图的等效变换举例 32
 - 2.5.3 梅逊公式 32
- 2.6 控制系统的传递函数 34
 - 2.6.1 开环传递函数 34
 - 2.6.2 给定输入作用下的闭环系统 35
 - 2.6.3 扰动 $N(s)$ 作用下的闭环传递函数 36
 - 2.6.4 给定输入和扰动输入同时作用下的闭环系统 36
- 2.7 习题 36

第3章 时域分析法 41

- 3.1 典型输入信号与系统的性能指标 41
 - 3.1.1 典型的初始状态 41
 - 3.1.2 典型的输入信号 41
 - 3.1.3 单位阶跃响应的性能指标 43
- 3.2 典型一阶系统的时域响应 44
 - 3.2.1 典型一阶系统的数学模型 44
 - 3.2.2 典型一阶系统的单位阶跃响应 44
 - 3.2.3 典型一阶系统的单位斜坡响应 45
 - 3.2.4 典型一阶系统的单位脉冲响应 46
 - 3.2.5 三种响应间的关系 46
- 3.3 典型二阶系统的阶跃响应 47
 - 3.3.1 典型二阶系统的数学模型 47
 - 3.3.2 典型二阶系统的单位阶跃响应 48
 - 3.3.3 欠阻尼二阶系统阶跃响应的性能指标 50
 - 3.3.4 改善二阶系统动态特性的方法 53
- 3.4 高阶系统的时域响应 55
 - 3.4.1 三阶系统的阶跃响应 55
 - 3.4.2 高阶系统的动态性能分析 56
 - 3.4.3 高阶系统的分析方法 56

3.5 控制系统的稳定性与代数判据	57
3.5.1 稳定的基本概念	57
3.5.2 系统稳定的条件	57
3.5.3 系统稳定的必要条件	59
3.5.4 劳斯 (Routh) 判据	60
3.5.5 劳斯判据的特殊情况	61
3.5.6 用劳斯判据分析系统参数与稳定性 的关系	62
3.5.7 古尔维茨 (Hurwitz) 判据	63
3.6 稳态误差分析	64
3.6.1 误差与稳态误差的定义	64
3.6.2 给定输入下的稳态误差	65
3.6.3 振动作用下的稳态误差	68
3.6.4 改善系统稳态精度的方法	69
3.7 习题	70

第4章 根轨迹法

4.1 根轨迹的基本概念	74
4.2 根轨迹方程	75
4.2.1 根轨迹方程的定义	75
4.2.2 用试探法绘制根轨迹	76
4.3 根轨迹的绘制法则	77
4.4 广义根轨迹	88
4.4.1 参量根轨迹	88
4.4.2 延迟系统的根轨迹	89
4.4.3 正反馈回路和零度根轨迹	92
4.5 控制系统的根轨迹分析	94
4.5.1 闭环零、极点分布与系统性能 的关系	94
4.5.2 闭环主导极点的分布与系统阶 跃响应的关系	95
4.5.3 增加零、极点对根轨迹和系统动 态性能的影响	98
4.6 习题	99

第5章 频率特性法

5.1 频率特性的基本概念	103
5.2 频率特性的几何表示法	106
5.2.1 极坐标图 (奈奎斯特图)	106
5.2.2 对数坐标图 (伯德图)	106
5.3 典型环节的频率特性	107
5.3.1 比例环节	107
5.3.2 积分环节	108

5.3.3 惯性环节	108
5.3.4 振荡环节	109
5.3.5 微分环节与比例微分环节	111
5.3.6 延迟环节	111
5.4 系统开环频率特性的绘制	112
5.4.1 开环对数频率特性曲线的绘制	112
5.4.2 开环幅相特性曲线的绘制	118
5.5 奈奎斯特稳定判据和对数频率 稳定判据	119
5.5.1 奈奎斯特稳定判据	119
5.5.2 对数频率稳定判据	123
5.5.3 稳定裕量	124
5.6 开环频率特性与系统阶跃响应的 关系	125
5.6.1 伯德定理	126
5.6.2 开环对数幅频特性的低频段与 系统稳态误差的关系	126
5.6.3 开环频率特性的中频段与系统 动态性能的关系	126
5.6.4 高频段的作用	129
5.7 闭环系统的频域特性分析	130
5.7.1 闭环系统的频域性能指标	130
5.7.2 闭环频率特性的求法	134
5.7.3 等 M 圆	135
5.7.4 等 N 圆 (等 α 圆)	136
5.7.5 利用等 M 圆和等 N 圆线图求 闭环频率特性	137
5.8 习题	138

第6章 控制系统的校正

6.1 概述	142
6.1.1 系统的性能指标	142
6.1.2 校正的一般概念	143
6.1.3 控制系统的校正方式	144
6.2 PID 控制规律分析	145
6.2.1 比例 (P) 控制规律	145
6.2.2 比例加微分 (PD) 控制规律	145
6.2.3 积分 (I) 控制规律	147
6.2.4 比例积分 (PI) 控制规律	147
6.2.5 比例加积分加微分 (PID) 控 制规律	149
6.3 串联校正	149
6.3.1 常用校正装置及其特性	149

6.3.2 频率特性法在系统校正中的应用	153	8.1.1 状态空间法的提出	202
6.4 反馈校正	160	8.1.2 状态与状态空间表达式	203
6.4.1 利用反馈改变局部结构、参数	160	8.2 状态空间表达式的建立	205
6.4.2 利用反馈减弱参数变化对系统性能的影响	162	8.2.1 由系统运动规律建立状态空间表达式	205
6.5 复合校正	164	8.2.2 由系统的动态结构图建立状态空间表达式	206
6.5.1 附加前馈校正的复合控制	164	8.2.3 由系统的微分方程或传递函数建立状态空间表达式	209
6.5.2 附加干扰补偿校正的复合控制	166	8.3 状态方程的线性变换	217
6.6 控制系统的“最佳”模型设计方法	167	8.3.1 矩阵的特征方程、特征值和特征向量	218
6.6.1 开环“最佳”控制模型的选择	167	8.3.2 变换矩阵 P 的求取	219
6.6.2 控制系统模型的近似处理	169	8.4 线性定常系统状态方程的解	224
6.6.3 基于二阶“最佳”模型设计方法的应用	171	8.4.1 齐次状态方程的解	224
6.6.4 基于三阶“最佳”模型设计方法的应用	173	8.4.2 线性定常系统的状态转移矩阵	225
6.6.5 说明	175	8.4.3 非齐次状态方程的解	226
6.7 习题	176	8.5 线性系统的可控性和可观性	228
第7章 非线性系统	179	8.5.1 线性定常系统的可控性	229
7.1 常见的非线性特性	179	8.5.2 线性定常系统的可观性	233
7.1.1 死区	179	8.5.3 对偶原理	236
7.1.2 饱和	180	8.5.4 可控性、可观性与传递函数的关系	237
7.1.3 间隙	180	8.6 习题	239
7.1.4 继电特性	181	第9章 采样控制系统	246
7.2 非线性系统的特点	182	9.1 采样控制系统的基本概念	246
7.3 典型非线性特性的描述函数	183	9.2 连续信号的采样与复现	247
7.3.1 描述函数的定义	183	9.2.1 采样过程	247
7.3.2 几种典型的非线性特性的描述函数	185	9.2.2 信号保持	250
7.4 用描述函数法分析非线性系统	189	9.3 Z 变换与 Z 反变换	250
7.4.1 非线性系统的稳定分析	189	9.3.1 Z 变换的定义	251
7.4.2 自激振荡的稳定性	190	9.3.2 Z 变换的基本定理	254
7.4.3 用描述函数法分析非线性系统	190	9.3.3 Z 反变换	257
7.5 相平面法基础	192	9.4 采样控制系统的数学模型	259
7.5.1 相平面图的绘制	192	9.4.1 线性常系数差分方程及其求解	259
7.5.2 相平面图的性质	194	9.4.2 脉冲传递函数的基本概念	260
7.5.3 奇点与极限环	195	9.4.3 采样控制系统脉冲传递函数的求取	263
7.5.4 用相平面法分析非线性系统	196	9.5 采样控制系统的稳定性与稳态误差	268
7.6 习题	199	9.5.1 采样控制系统稳定性分析	268
第8章 现代控制理论基础	202	9.5.2 采样控制系统稳态误差计算	271
8.1 状态变量及状态空间表达式	202	9.6 习题	272

第 10 章 计算机辅助分析与设计	275	10.4.1 根轨迹的绘制	285
10.1 MATLAB 语言简介	275	10.4.2 基于根轨迹的系统设计	286
10.1.1 进入 MATLAB 环境和执行 MATLAB 的命令与程序	275	10.5 控制系统的频域分析	288
10.1.2 Simulink 软件包	275	10.5.1 Bode 图的绘制	288
10.2 建立动态系统的数学模型	276	10.5.2 Nyquist 曲线的绘制	288
10.2.1 由传递函数描述的系统模型	276	10.5.3 求解幅值裕量和相位裕量	289
10.2.2 由状态方程描述的系统模型	277	10.5.4 基于频率特性的系统串联校正 ...	290
10.2.3 不同模型之间的相互转换	278	10.6 非线性环节的仿真	291
10.2.4 建立复杂系统的数学模型	279	10.7 状态空间分析	293
10.3 控制系统的时域分析	280	10.7.1 矩阵指数及状态方程的解	293
10.3.1 稳定性分析	280	10.7.2 系统的可控性与可观测性判别 ...	294
10.3.2 求解时域响应	282	10.8 习题	296
10.3.3 系统的稳态误差	285	参考文献	298
10.4 控制系统的根轨迹分析	285		

第1章 自动控制理论及 MATLAB 简介

在工农业生产、国防和科学技术领域中，自动控制技术都起着十分重要的作用。在电力、冶金、机械、轻工、电子、石油、化工、汽车等工业部门，在人造卫星、无人驾驶、宇宙飞船、机器人、导弹制导等尖端领域，在经济、人口、社会、生态环境等非生产部门，均不同程度地应用控制理论的成果及技术，例如发电厂的电压、频率的自动调节，锅炉中蒸汽压力的自动调节、电动机转速的自动调节、水池液位的控制等都是自动控制的典型例子。

自动控制原理是自动控制技术的基础理论。它的发展初期是以反馈控制理论为基础的經典控制理论。它以传递函数为基础，研究单输入—单输出控制系统的分析和设计问题，主要的研究方法是根轨迹法和频率法。这部分理论经过长期发展，已经相当成熟，并在工程实践中得到了广泛的应用。20 世纪 50 年代末期，由于航天技术以及后来计算机技术的迅速发展和工程实践的需要，使得自动控制理论发展到了一个新的阶段——现代控制理论。它以状态空间法为基础，研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度控制系统的分析和设计问题。

1.1 自动控制的历史

利用反馈来控制系统有着悠久的历史。最早的反馈控制出现在公元前 330 年的古希腊，运用在一种改进的浮球控制器装置上。Ktesibios 的水钟就运用了浮球控制器的原理。大约在公元前 250 年，为了燃油在油泵中能保持恒定的液位，Philon 在一种油泵装置中采用了浮球控制器。在公元 1 世纪，亚历山大港的 Heron 出版了一本名为 *Pneumatica* 的书，概述了很多种应用浮球控制器的例子。

现代欧洲的第一个反馈系统出现在荷兰人 Cornelis Drebbel (1572—1633) 发明的温度控制器中。在 1681 年，Dennis Papin (1647—1712) 发明了第一台用于蒸汽锅炉的压力控制器，这是一种与高压锅炉阀门相似的安全压力控制器。

18 世纪，瓦特 (James Watt) 的蒸汽机离心调速器被公认是第一台应用在工业生产中的自动反馈控制器，这是将自动控制技术应用到工业中的最早代表。它是在 1769 年为了控制蒸汽机速度改良而来的。整个机械装置如图 1.1.1 所示，它从旋转轴的输出端测量速度，利用飞球相应速度的运动来控制阀门，从而控制相应量的蒸汽进入到机器中。随着速度的增加，飞球的高度相应增加，它们离轴线的距离也变远，因此阀门渐渐关闭。由于飞球的转动需要机械提供能量，所以速度测量的精度不高。

俄国声称发明了历史上第一套反馈系统，即 I. Polzunov 在 1765 年就已发明的浮球水位控制器。这种调节系统如图 1.1.2 所示，浮球检测到水面的高度值，并用来控制锅炉内进水阀门的开度。

在 1868 年以前的整个时期，自动控制系统的发展仅仅是靠直觉和发明。为了提高控制系统精度，不得不减慢瞬变振荡的衰减，甚至导致系统的不稳定。因此，有必要发展一套自

动控制的理论。J. C. Maxwell 总结了一套与控制理论相结合的数学理论，而这套控制理论应用了控制器不同的等效模型。他的研究还注意到了和系统性能密切相关的不同参数的影响。与此同时，I. A. Vyshnegradskii 也总结出一套控制器的数学理论来。

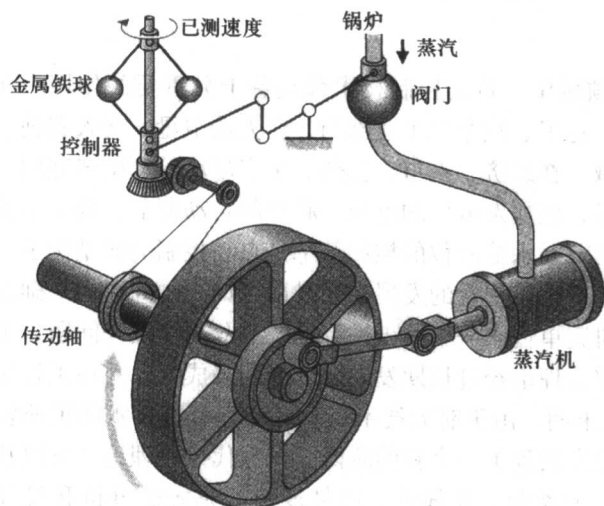


图 1.1.1 瓦特飞球调速器

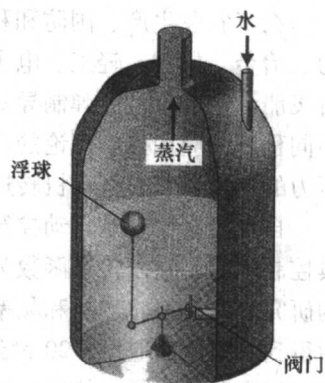


图 1.1.2 浮球水位控制器

1932 年奈奎斯特 (H. Nyquist) 提出了研究控制系统的频率法。1948 年伊文斯提出了根轨迹法，这两项重大贡献，是自动控制理论和控制技术史上的里程碑。建立在频率法和根轨迹法基础上的控制理论被称为经典控制理论。

第二次世界大战前，美国和西欧的自动控制理论，在发展方式上与俄国和东欧有很大差别。在美国，应用反馈的主要促进因素是电话系统的发展，以及 Bell 电话实验室的 Bode、Nyquist 和 Black 对电子反馈放大器的改进，主要是用频域来描述整个控制过程。与此相反，前苏联杰出的数学家和机械学家在控制理论领域占主流。因此，俄国的理论更倾向于运用不同方程的时域公式。

第二次世界大战是自动控制的理论和实践得到巨大发展的时期。因为当时，必须设计和制造自动领航系统、火炮位置系统、雷达天线控制系统和其他建立在反馈控制方法基础上的军事系统。这些军事系统的复杂性和优良的性能都要求必须发展不同的控制技术，提高控制系统的性能，以及发展新的理论和方法等。

在 1940 年前，控制系统的设计是一种伴随着不断试验和失败的过程。而在 20 世纪 40 年代后，越来越多的数学和分析方法得到应用，控制工程才真正成为一门独立的工程学科。

第二次世界大战后，随着拉氏变换和复频面得到越来越多的应用，频域技术渐渐成为控制领域的主流。20 世纪 50 年代，控制工程领域的重点放在 s 平面法（特别是根轨迹法）的发展和运用上。而在 20 世纪 80 年代，数字计算机作为控制元件日渐普遍。这种有着快速精确计算性能的控制元件的技术，在以前的控制工程中是无法实现的。这些计算机特别适用于同时测量和控制多种变量的系统中。

20 世纪 50 年代末到 60 年代初，核能、电子计算机以及空间技术的科学发展，对自动

控制学科提出了更高的要求。随着人造卫星和空间时代的来临,控制工程拥有了新的巨大推动力,因为有必要为运载火箭和空间探测器设计一种复杂、高精度的控制系统。此外,人造卫星的轻型化和控制的精密化也产生了重要的最优化控制领域。为了满足这些要求,由 Liapunov、Minorsky 和其他人发展的时域方法,在过去 20 年中引起了广泛的关注。由前苏联人 L. S. Pontryagin, 美国人 R. Bellman 发展的最优化控制的现代理论,以及近来对鲁棒系统的研究,也对时域方法作出了贡献。大型复杂系统的控制,高速度控制操作及高精度控制品质的要求,使经典控制理论的局限性暴露出来,促使人们寻找更完善的控制理论和更高级的控制技术。在这种背景下,贝尔曼等人提出了状态空间法。1960 年贝尔曼在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法,并提出了能控性和能观测性的新概念,这被认为是现代控制理论发展的开端。20 世纪 60 年代以后迅速发展的新控制理论,如模糊控制、最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络控制、大系统理论等,都属于现代控制理论的范畴。与经典控制理论相比,现代控制理论内涵十分丰富。例如 20 世纪 70 年代后期,提出了大系统理论,它是指针对规模十分庞大的系统的控制理论。又如大型钢铁联合企业、大型电力系统、大型通信网、大型交通运输网等大型系统控制需要涉及运筹学、信息论、系统论等方面的理论,才能解决多级递阶控制、多目标综合优化等问题。

展望未来,控制系统继续发展的目标是实现高度灵活和高度自动化。现在用的工业用机器人实现了高度的自动化,即一旦程序确定,就不需要更多的人工干预了,但是这些机器人对于周围的环境变化无法灵活响应,这也是计算机科学应该着重解决的一个问题。控制系统的确非常有用,但这取决于人类思维的前瞻能力。先进的机器人系统通过革新传感器的反馈功能可以达到灵活的目的。通过提高智能化,增加传感器功能、计算机可视功能和离线式 CAD/CAM 编程功能将使系统更经济且得到更广泛的应用,使控制系统正朝高度自动化方向迈进。控制水平的提高,旨在减少人类操作的负担,对人机对话模式方向的研究和计算机数据库管理等,将使控制更高效、更可靠,大量关于机器人和自动控制方面的研究要求降低运行成本和拓宽其应用领域,这就要求更新人机交流方式和更换编程语言等。

1.2 自动控制理论的基本概念

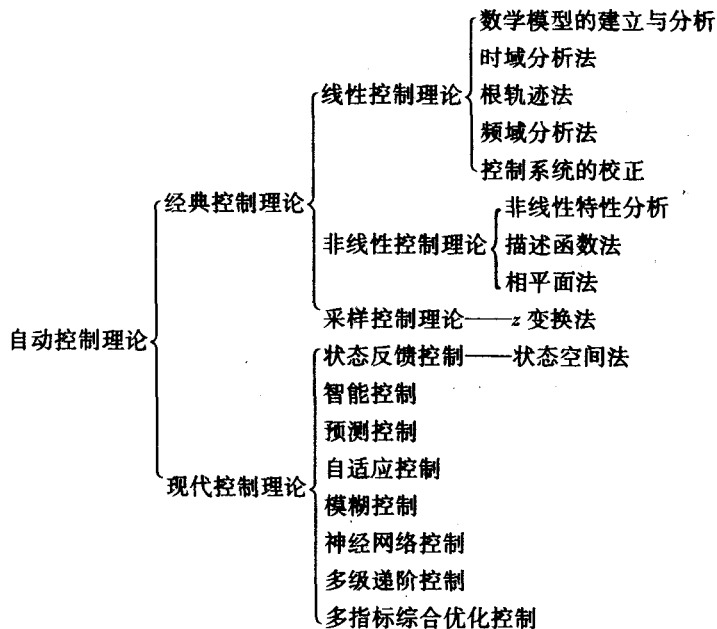
在已知控制系统结构和参数的基础上,求取系统的各项性能指标,并找出这些性能指标与系统参数间的关系就是对自动控制系统的分析,而在给定对象特性的基础上,按照控制系统应具备的性能指标要求,寻求能够全面满足这些性能指标要求的控制方案并合理确定控制器的参数,则是对自动控制系统的分析和设计。

1.2.1 经典控制理论和现代控制理论

自动控制理论可分为经典控制理论和现代控制理论两部分。

经典控制理论是以传递函数为基础,研究单输入、单输出控制系统的分析和设计。

现代控制理论是以状态空间法为基础,进行多输入、多输出、变系数、非线性等控制系统的分析和研究。自动控制理论可粗略地按如下层次划分:



1.2.2 开环控制和闭环控制

根据有无反馈作用，控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

如果控制系统的输出量对系统的控制作用没有影响，则称该系统为开环控制系统。图 1.2.1 所示的他励直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。假设它的励磁电流恒定，其输入量是给定电压 u_r ，输出量（被控制量）是转速 n 。改变给定电位器滑臂的位置，可得到不同的给定电压 u_r 和电枢电压 u_a ，从而得到不同的电动机转速 n 。当负载转矩及其他外部条件（如电网电压）不变时， u_r 和 n 之间有一一对应的关系。因此，可以由给定电压直接控制转速。如果出现扰动（如负载转矩或电网电压变化），电动机转速将随之改变而偏离给定值。如要维持给定转速不变，操作人员必须根据实际转速偏离转速给定值的情况，不断地调整电位器滑臂的位置，使电动机的转速保持在给定值。

图 1.2.2 所示的框图表示了这种系统的输入量和输出量之间的关系，箭头表示信号传递的方向。这类控制系统的结构简单、成本低、工作稳定。但是由于它们不具备自动修正被控量偏差的能力，故系统的精度低，只能用在控制要求不高的场合。

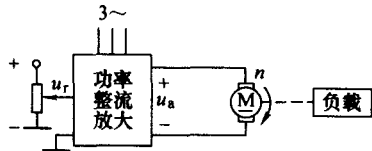


图 1.2.1 转速控制系统

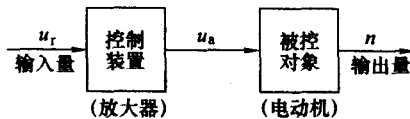


图 1.2.2 转速控制系统的框图

2. 闭环控制系统

开环控制系统控制精度不高的原因，是它没有从系统输出端到输入端的反馈环节。为了提高控制精度，必须把输出量检测出来，经过物理量的信号转换，再反馈到输入端去与给定

量进行比较（二者相减，即负反馈），根据比较所得的偏差信号，经过控制装置对被控对象进行控制，这样可以抑制扰动量对输出量的影响，减少或消除输出量的偏差。这种通过反馈构成系统闭环，按偏差产生控制作用，以减小或消除偏差的控制系统，称为闭环控制系统，或反馈控制系统。

图 1.2.3 所示闭环调速系统是闭环控制系统的例子。测速发电机 CF 将电动机的实际转速 n 检测出来，并转换成与给定电压相同的反馈信号 u_f ，然后反馈到输入端，与给定电压 u_r 相比较，其偏差 u_e 经放大器放大后，用来控制电动机的转速，使电动机保持在与给定电压 u_r 相对应的转速下运转。

如果出现扰动，如负载转矩增大，则电动机转速降低。速度的变化，将由测速发电机检测出来。此时反馈电压 u_f 减小，与给定电压 u_r 比较后的偏差电压 u_e 增大，经放大后电枢电压 u_a 相应增大，从而使电动机的转速降得到补偿，使系统基本上恒速运行。图 1.2.4 是控制系统原理框图。

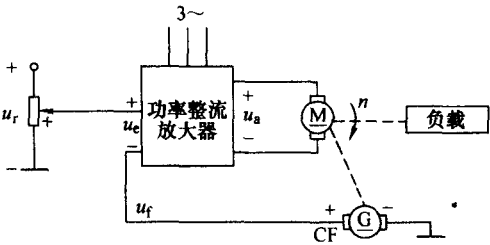


图 1.2.3 闭环转速控制系统

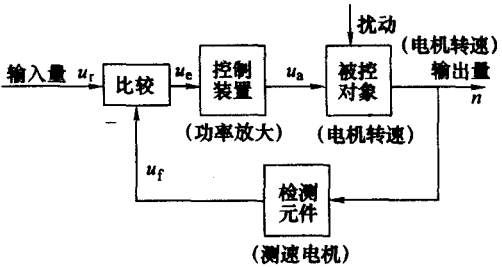


图 1.2.4 闭环转速控制系统原理框图

图 1.2.5 是闭环的发电机自动励磁控制系统的示意图。图中的被控对象是三相交流同步发电机。控制器称为自动电压控制器。发电机由原动机（如汽轮机）带动旋转，并向所接负荷提供电力。系统的被控量即输出变量，是发电机的机端电压 u_G 。通过电压互感器和整流器得到了与输出电压 u_G 成正比的反馈电压 u_R 。给定电压 u_r 和反馈电压相减，得到的差值电压 u_e 作为电压控制器的输入。

假定发电机外接负载发生变化，使输出电压 u_G 减小，反馈电压 u_R 同时减少，误差电压 u_e 增大。由于控制器的控制作用，励磁电压 u_f 随 u_e 的增大而增大，从而使输出电压 u_G 上升。由于反馈的作用，输出电压可以基本上保持恒定。图 1.2.6 是自动励磁控制系统的原理框图。

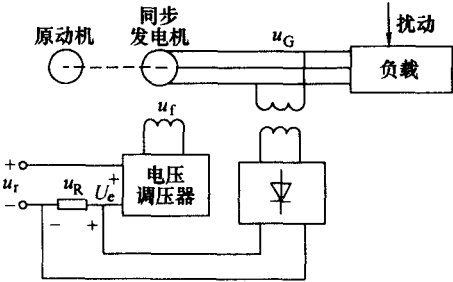


图 1.2.5 发电机励磁自动控制系统

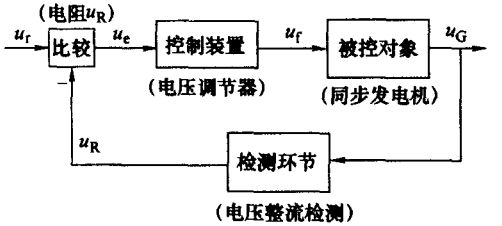


图 1.2.6 发电机励磁自动控制系统原理框图

反馈分为正反馈和负反馈。自动控制系统一般采用负反馈。不论造成偏差的原因是外来的扰动，还是内部参数的变化，负反馈闭环控制系统总是力图减小和消除偏差，即所谓“检测偏差，纠正偏差”。但是闭环控制系统结构复杂，成本较高。因为信号反馈的作用，如果系统参数配合不当，可能出现振荡或发散等不稳定的情况，使系统不能正常工作。

3. 闭环控制系统的组成

不同应用领域的闭环控制系统具有各种不同形式，但是一般的闭环控制系统的组成都可以用图 1.2.7 所示的框图来表示。

1) 控制对象：自动控制系统需要控制的工作机械或生产过程。需要控制的物理量称为被控量或输出量。

2) 执行元件：直接对被控对象进行操作，使被控量和期望值趋于一致的元件。

3) 测量元件：用来测量被控量，将其转换成与给定量相同的物理量，并反馈到输入端的元件。

4) 比较元件：用来比较给定信号和反馈信号，并产生两者差值（偏差信号）的装置。控制框图中，比较环节一般用 $\otimes$ 图形符号来表示。

5) 放大元件：将比较微弱的偏差信号放大，输出具有足够大的幅值和功率的信号去推动执行机构。

6) 校正装置：由以上元件组成的控制系统的性能往往达不到预期的要求。有时仅靠改变系统参数并不能达到目的。在这种情况下需要加入校正装置，以提高系统的性能。校正装置可分为串联校正装置和反馈校正装置两种。

在图 1.2.7 中，信号的传递方向用箭头表示，这样的传递方向是单向不可逆的。信号从输入端沿箭头方向达到输出端的传输通路称为前向通路或前向通道。由系统输出端沿箭头方向经测量元件反馈到输入端的传输通路，称为主反馈通路。前向通路与主反馈通路一起构成主回路。此外，可能还有局部反馈通路以及由它组成的内回路。

在实际系统中，一个元件或部件可能起着图 1.2.7 中几个方框中的元件的作用。例如以集成运算放大器为核心的电子控制器，同时起到了比较元件、放大元件和校正装置的作用。

扰动是一种不希望的外作用。它破坏给定输入信号对系统的控制作用。在实际系统中，扰动是不可避免的，它可能作用在系统中的任一部位上。通常所说的系统输入信号是指有用的给定信号。

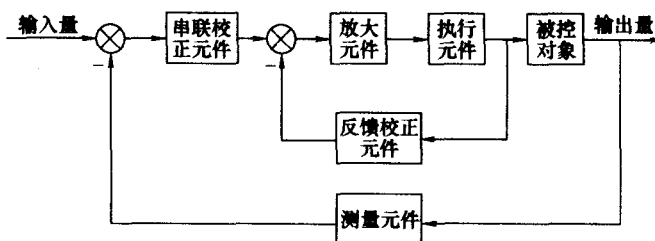


图 1.2.7 自动控制系统的基本组成

4. 复合控制

当生产机构对自动控制提出很高的控制要求时，单独采用开环控制或者闭环控制是有困

难的。这时，可以设计一种开环控制和闭环控制相结合的复合控制系统，如图 1.2.8 所示。在这种系统中，带有负反馈的闭环控制起主要的调节作用，而带有前馈的开环控制则起辅助的补偿作用，这样能使系统达到很高的控制精度。

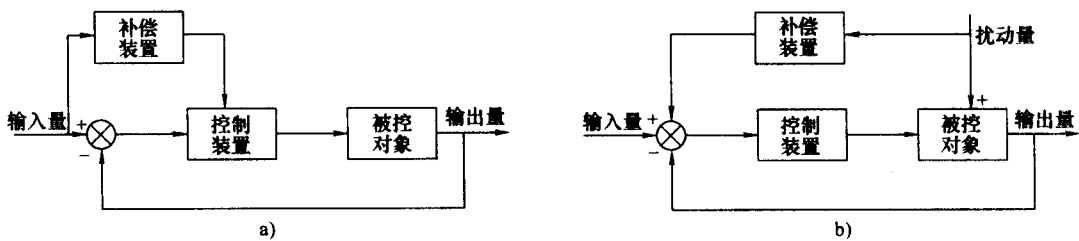


图 1.2.8 复合控制系统
a) 按输入作用补偿 b) 按扰动作用补偿

1.2.3 自动控制举例

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用外加设备或装置（称控制装置）使生产过程或工作机械（称被控对象）自动地按预定的规律运行，或使某个参数（称被控量）按预定要求变化。自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统，它一般由控制装置和被控对象组成。例如在水位控制系统中，水经阀门流进水池，由出水管道流出供用户使用。若要求在用水量任意改变的情况下，保持水位高度不变，则可由人工操作实现。操作人员首先测量水池实际水位，并与要求值比较，得出偏差。然后根据偏差的大小调节进水阀门的开启程度，通过改变水量使水位达到要求值。如用控制装置代替操作人员进行控制，则构成水位自动控制系统。图 1.2.9 是水位自动控制系统的一种形式。这里浮子起测量水位高度的作用，连杆起比较作用，连杆决定电位器滑头的位置，电位器滑头的正或负输出电压反映水位的偏差，放大器、伺服电动机、减速器和阀门等起调节和执行的作用，控制进水量的大小。图 1.2.10 是水位自动控制系统的原理框图。框图是根据实际的物理系统的信号传递关系画出的。

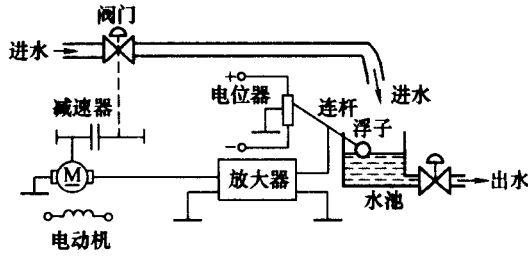


图 1.2.9 水位自动控制系统

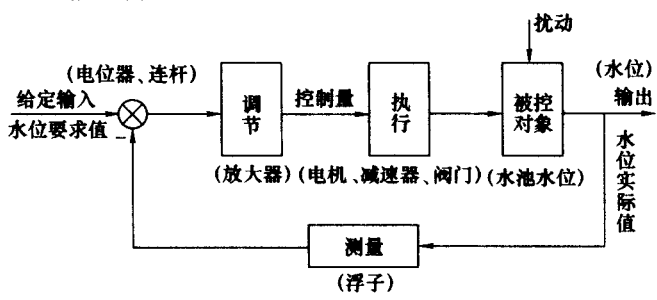


图 1.2.10 水位自动控制系统原理框图

通常把控制系统的被控量称作系统的输出量，而把影响系统输出的外界输入称作系统的输入量。一般系统的输入有两类：给定输入和扰动。给定输入决定系统输出量的变化规律或

要求值；扰动则是系统不希望的外作用，它影响给定输入对系统被控量的控制。例如在水位控制系统中，水位要求值是给定输入，放大器的零点漂移、出水量的变化等则是扰动。

又如，机电工业中常用的原材料硅钢片在热处理过程中，需进行 10 小时 680℃ 的连续保温后才能达到预期性能，这就需要退火炉的温度进行控制。炉温用下述方法控制：

- 1) 用热电偶测量炉温。
- 2) 与要求的温度进行比较，得出偏差。
- 3) 根据偏差的大小和正负调节调压器的输出电压，使炉温保持在要求值。

图 1.2.11 是电炉炉温控制系统的原理框图，电炉是系统的被控对象，热电偶是测量元件，用来测量炉温并将其转换为电压 u_2 。炉温 T 是系统的被控量或输出量。电压 u_2 与被控量成比例，即 $u_2 = K_2 T$ ，它是系统的反馈量。电压 u_1 为系统的给定输入，电源 E 和电位器称为给定元件。将反馈量 u_2 与输入量 u_1 比较后得到偏差 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。只要偏差不为零，则意味着炉温偏离了要求值。偏差 Δu 经放大后具有足够的能量并选择适当的极性去驱动直流电动机的正反转，调节调压器的动触头的位置，从而完成控制过程。图 1.2.12 是电炉炉温控制系统的原理框图。

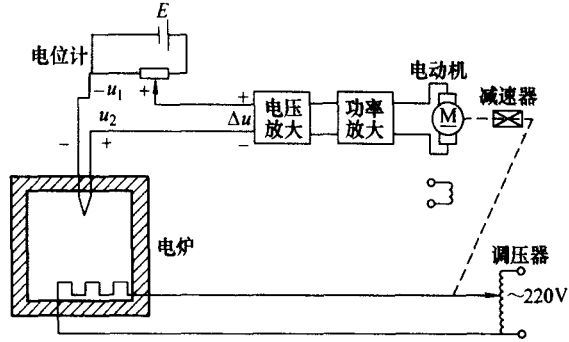


图 1.2.11 电炉炉温控制系统

反馈控制系统在我们周围随处可见。这种控制系统的研究不仅涉及到新型工程零部件或设备的发展，而且还要综合现有的硬件来实现理想的目标。控制系统是一种元件的集合，这些元件通过某种连接方式去影响系统在某一主要方面的控制运行。控制系统几乎运行在人类生活的每个方面，也存在于诸如飞机自动驾驶仪和汽车巡航控制系统这种要求没有人相互作用的系统中。

反馈控制系统在我们周围随处可见。这种控制系统的研究不仅涉及到新型工程零部件或设备的发展，而且还要综合现有的硬件来实现理想的目标。控制系统是一种元件的集合，这些元件通过某种连接方式去影响系统在某一主要方面的控制运行。控制系统几乎运行在人类生活的每个方面，也存在于诸如飞机自动驾驶仪和汽车巡航控制系统这种要求没有人相互作用的系统中。

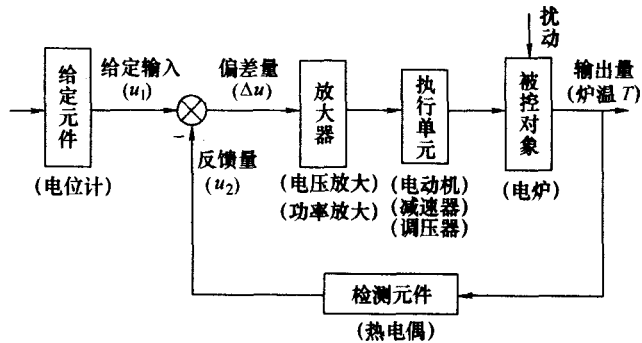


图 1.2.12 炉温控制系统原理框图

在处理控制系统，尤其是工程控制系统的过程中，我们将处理系统中多种组成部分，这表明该学科是跨学科的。控制工程师需要力学、电子学、电机学、水力学、热力学、建筑学和材料学等知识。显而易见，不是每个控制系统都包含上述各种知识，但是，大多数实用的控制系统都包含超过一种的知识。

1.2.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的类型很多，不同类型的系统有不同的特点，它们的分析和设计方法也有很大的区别。

自动控制系统的分类方法很多，现分述如下：

1. 按系统元件的特点分类

如果系统全部由线性元件组成, 则称为线性控制系统。含有非线性元件的系统叫做非线性控制系统。

系统参数不随时间变化, 则称为定常系统, 反之则为时变系统。

2. 按照给定信号分类

1) 恒值控制系统: 这类系统的给定值一般恒定不变或很少变动, 如前述的恒定速度、恒定输出电压的调节系统。

2) 程序控制系统: 这种系统的给定值是按照一定的时间函数变化的, 如热处理炉和程序控制机床等。

3) 随动控制系统: 这种系统的给定量按照事先不知道的时间函数变化, 要求输出量跟随给定量变化, 例如火炮自动控制系统和某些记录仪表中的系统。

3. 按控制计算装置分类

1) 连续信号系统: 又称模拟信号系统。系统各部分的信号都是模拟的连续信号, 其控制器一般都是模拟电路。

2) 离散信号系统: 其控制计算装置是数字计算机或数字控制器。系统中存在着离散信号(数字信号)。

1.2.5 对自动控制系统的基本要求

反馈控制系统的给定量或扰动量变化时, 被控制量偏离给定值。通过反馈的调节作用, 经过一段时间的过渡过程, 被控制量又趋于新的稳定值, 系统由原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。这一变化过程称为动态过程, 而被控制量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。工程上常常从稳定性、快速性和稳态精度三个方面来评价自控系统的性能。

1. 稳定性

图 1.2.13a 和图 1.2.13b 给出了控制系统对输入或扰动的阶跃响应曲线。曲线①和②表明系统的输出量 $c(t)$ 能以单调变化或衰减振荡的方式最终趋向给定值或恢复到原有的状态, 这样的系统是稳定的。曲线③、④所示系统的输出量是单调发散的或是振荡发散的。系统不但不能纠正偏差, 偏差反而越来越大, 这样的系统是不稳定的, 它们根本无法正常工作甚至会造成设备的损坏。另外, 在动态过程中, 输出响应可能出现等幅振荡, 这样的系统也是不稳定的。显然, 系统稳定是系统正常工作的首要条件。

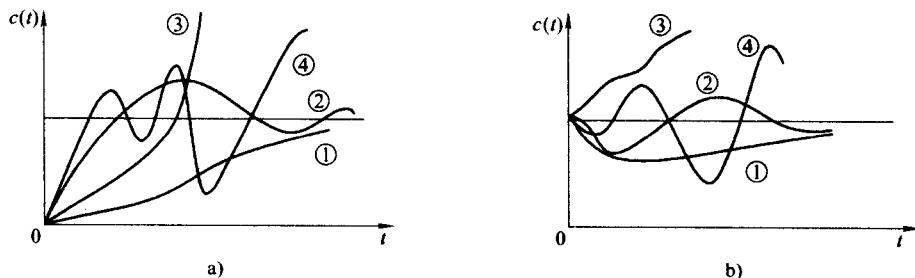


图 1.2.13 控制系统的动态过程曲线

上述的稳定性有时称为绝对稳定性, 而把输出量衰减振荡的强烈程度称为相对稳定性。