



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程及其自动化专业精品教材

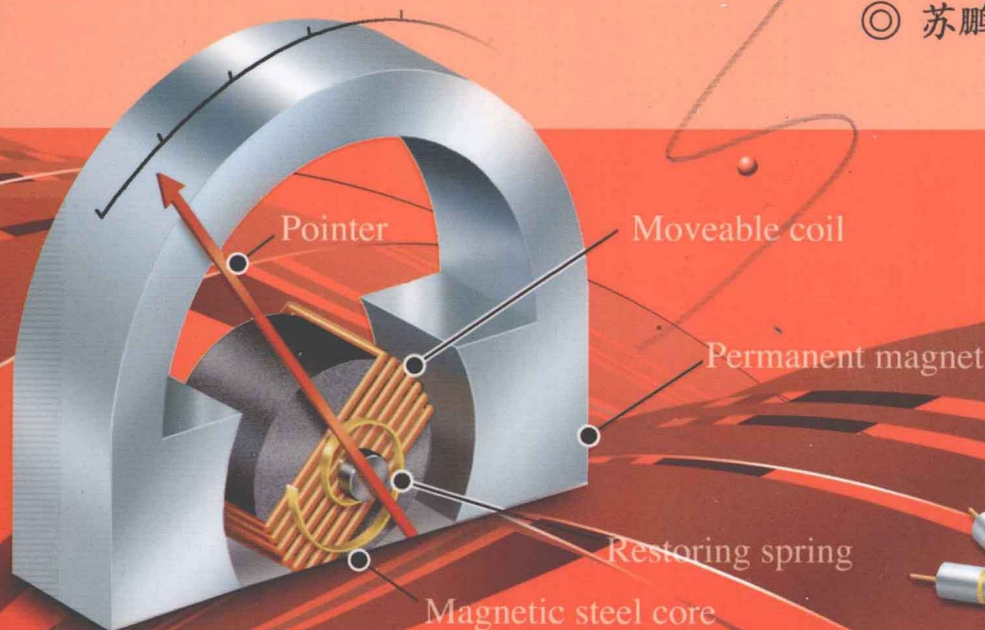
自动控制原理

(第2版)

Automatic Control Systems

Second Edition

© 苏鹏声 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家

电气工程与自动化专业精品教材

自动控制原理

(第2版)

苏鹏声 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

自动控制原理是各工科专业的一门重要的技术基础课,是学习和掌握控制理论与自动化技术的基础课程。

本书介绍经典控制理论和现代控制理论的基础知识,包括控制系统数学模型建立、变换和求解,系统的稳定概念和判据,控制系统的稳态误差和动态性能分析及计算,根轨迹分析方法,对数频率特性分析方法,经典控制论的系统设计方法,系统的能控性和能观性,状态反馈和状态观测器, Z 变换和 Z 反变换,计算机控制系统的分析方法和设计等。本书附录还介绍几个 MATLAB 控制系统仿真软件包的使用方法,可以对本书中例题和习题中的各系统进行计算机仿真分析。

本书可以作为普通高等院校和成人高等学校的自动化、电气工程、机械、冶金、热工、化工、轻工等各专业的教材或参考书,亦可供有关科技人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/苏鹏声编著. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2011. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-13611-5

I. ①自… II. ①苏… 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(2011)第 091909 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷:

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13 字数: 353 千字

版 次: 2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书是为非控制专业本科生编写的专业基础课教材。编写本书的目的是为了提供一本适合当前工科专业教学环境的少学时教材。

近十多年来,随着教学改革的不断深入,各工科专业都增加了信息技术、计算机应用以及人文学科等方面的课程,扩大了学生的知识面,但原有课程的学时都有不同程度的减少,很多工科专业的“自动控制原理”授课学时也相应大大缩减,很需要适合当前教学环境的“自动控制原理”教材。本书适合 48~60 学时的教学需要,是为电气工程、自动化等各专业所开设的“自动控制原理”编写的,也可以作为机械、热工、化工、轻工等工科专业选用的教材。

在编写本书过程参考了国内的教材和近几年出版国外的部分教材,选材上考虑了近十几年国内外教材的变化趋势。经典控制理论部分仍然是“自动控制原理”的主要教学内容,本书的重点以传递函数为分析工具的频域法和根轨迹法为主,同时,也兼顾介绍了在状态空间数学模型基础上的现代控制理论的初步知识。考虑到计算机控制系统的广泛应用,以及学生将来从事工业应用技术开发的需要,对采样离散控制系统的基础知识也做了必要的介绍。

编者认为理工学科的课堂教学应主要启发学生的思维和讲解解决问题的方法,学生所学到的东西是建立在理解和熟练运用基础上的,并不要求学生去死记硬背一些公式和结论,因此,在编写本书时也尽量反映这个思想。

本课程的名称“自动控制原理”是考虑到国内多年来的习惯用法,而相应的国外教材一般称为“自动控制系统”(Automatic Control Systems)、“现代控制系统”(Modern Control Systems)或“线性控制系统工程”(Linear Control Systems Engineering)等。

本书是在 2003 年第一版的基础上的修订本。编者根据教学中的遇到的问题,对原有内容进行了修改和补充,并对习题也做了适当的补充和调整。编者在十多年的“自动控制原理”教学活动中长期采用了戴忠达主编的“自动控制理论基础”(清华大学出版社)的教材,并得到戴忠达老师和窦曰轩老师的指导和帮助,在此表示感谢。在本书的初稿形成过程,焦连伟老师参加了第 6 章和第 7 章部分内容的编写工作。李永东教授对本书提供了修改意见和资料。

编 者

2011 年 4 月于清华大学电机系

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制系统的基本概念	1
1.1.1 开环控制系统	1
1.1.2 闭环控制系统	2
1.2 控制系统的工程应用	3
1.2.1 温度控制系统	4
1.2.2 硬盘中的磁头位置控制系统	4
1.2.3 火电厂电能生产综合控制系统	5
1.3 控制理论发展的简要回顾	5
1.4 控制系统的分析和设计	6
小结	6
习题一	7
第 2 章 控制系统的数学模型	8
2.1 线性动态系统	8
2.1.1 线性系统的叠加性和齐次性	8
2.1.2 物理系统的线性近似	9
2.2 传递函数与系统结构图	9
2.2.1 传递函数	9
2.2.2 传递函数结构图	10
2.2.3 典型环节的传递函数	12
2.2.4 结构图的变换	13
2.2.5 闭环控制系统的基本结构	15
2.3 信号流图及 Mason 公式	16
2.3.1 信号流图	16
2.3.2 Mason 公式	18
2.4 状态空间模型	20
2.4.1 状态变量	20
2.4.2 状态空间方程	21
2.4.3 线性变换	23
2.5 传递函数与状态空间方程的转换	23
2.5.1 由状态空间方程到传递函数	23
2.5.2 传递函数不变性	24
2.5.3 由传递函数到状态空间方程	25
2.6 状态图	27
2.7 利用传递函数求解响应	30
2.8 状态方程求解	32
小结	33
习题二	34

第3章 控制系统的时域分析	38
3.1 系统的稳定性	38
3.1.1 Liapunov 稳定	38
3.1.2 渐近稳定	38
3.1.3 BIBO 稳定	39
3.2 Routh 稳定判据	41
3.2.1 稳定判据	41
3.2.2 两种特例的处理	43
3.2.3 Routh 判据的应用	44
3.3 稳态性能	45
3.3.1 测试输入信号	45
3.3.2 稳态误差的定义	46
3.3.3 稳态误差计算	47
3.3.4 干扰信号	49
3.3.5 灵敏度分析	51
3.4 动态响应	51
3.4.1 动态性能指标	52
3.4.2 一阶系统	52
3.4.3 二阶系统	53
3.4.4 高阶系统	56
3.4.5 高阶系统的简化	58
3.5 根轨迹法	59
3.5.1 根轨迹的概念	59
3.5.2 绘制根轨迹的条件	60
3.5.3 根轨迹绘制的规则	61
3.5.4 根轨迹的参数设计	68
3.5.5 添加零一极点对根轨迹的影响	68
小结	70
习题三	70
第4章 控制系统的频域分析	74
4.1 系统的频率特性	74
4.2 Nyquist 稳定判据	75
4.2.1 Cauchy 辐角原理	75
4.2.2 Nyquist 围线和 Nyquist 图	76
4.2.3 Nyquist 稳定判据	78
4.2.4 绘制 Nyquist 图和应用稳定判据的示例	78
4.2.5 S 右半平面的映射域与稳定性	85
4.3 对数频率特性法	86
4.3.1 典型环节的 Bode 图	87
4.3.2 系统 Bode 图的合成	90
4.3.3 对数幅频特性渐近线分段作图法	92
4.3.4 相频特性草图分段作图法	93
4.3.5 最小相位系统	95

4.4 稳定裕量	95
4.4.1 幅值裕量和相角裕量	96
4.4.2 稳定裕量与稳定性	96
4.4.3 幅值裕量和相角裕量计算示例	97
4.4.4 最小相位系统的幅频特性	100
4.5 闭环频率特性和带宽	102
小结	103
习题四	104
第5章 反馈控制系统设计	107
5.1 系统设计方法	107
5.1.1 性能指标	107
5.1.2 校正装置	107
5.2 串联校正网络	108
5.2.1 PID 校正	108
5.2.2 超前校正	110
5.2.3 滞后校正	111
5.2.4 滞后-超前校正	112
5.3 用根轨迹法设计校正网络	113
5.3.1 时域性能和期望极点	113
5.3.2 串联超前校正	114
5.3.3 串联滞后校正	116
5.4 用对数频率特性法设计校正网络	119
5.4.1 频域指标和期望频率特性	119
5.4.2 串联超前校正	120
5.4.3 串联滞后校正	123
5.4.4 串联滞后超前校正	124
小结	127
习题五	127
第6章 状态变量反馈控制系统	129
6.1 能控性	129
6.1.1 能控性的定义	129
6.1.2 能控性判据	130
6.1.3 线性变换不改变能控性	130
6.1.4 能控标准型(SISO 系统)	132
6.2 能观性	132
6.2.1 能观性的定义	133
6.2.2 能观性判据	133
6.3 能控性能观性与传递函数的零—极点对消	135
6.4 系统的能控性和能观性分解	137
6.5 状态反馈与极点配置	139
6.6 状态观测器	145
6.7 带观测器的状态反馈控制系统	147
小结	149

习题六	149
第7章 数字控制系统	152
7.1 信号采样和保持	152
7.1.1 采样器	152
7.1.2 零阶保持器	153
7.2 Z变换	154
7.2.1 Z变换定义	154
7.2.2 Z变换的性质	156
7.2.3 Z反变换	157
7.3 离散控制系统数学模型	159
7.3.1 差分方程	159
7.3.2 脉冲传递函数	160
7.3.3 离散状态空间方程	160
7.3.4 连续系统传递函数的离散化	162
7.3.5 连续状态空间方程的离散化	165
7.4 离散控制系统性能分析	166
7.4.1 离散控制系统的稳定性	166
7.4.2 离散控制系统的稳态误差	168
7.4.3 离散系统动态响应	169
7.4.4 离散状态空间模型的能控性与能观性	171
7.5 数字控制器的设计	172
7.5.1 模拟化设计方法	172
7.5.2 数字化设计方法	175
7.5.3 状态反馈极点配置设计法	178
小结	178
习题七	179
附录A MATLAB及控制系统工具箱简介	181
A.1 简介	181
A.2 数学模型的输入方法	182
A.2.1 状态方程	183
A.2.2 传递函数	183
A.2.3 由开环传递函数求闭环传递函数	184
A.3 控制系统分析用函数	184
A.3.1 经典控制论的几个基本分析函数	184
A.3.2 系统分析和仿真的例题	185
A.4 SISO系统设计工具	188
附录B 能控性和能观性证明	192
B.1 能控性判据	192
B.2 能控标准型	193
B.3 能观性判据	197
附录C 拉普拉斯变换对	199
参考文献	200

第 1 章 绪 论

1.1 控制系统的基本概念

控制系统是指应用在工业生产、科学研究和人们日常生活中的一种装置,它们按照输入信号或输入指令的要求调节相应的物理量连续变化,使之达到预期的固定数值,或按照预期的规律变化。在设定输入指令后,控制系统可以自动地工作。

随着控制理论的发展和计算机技术的广泛应用,控制系统不但能够代替人们完成一般的工作,而且还能够完成复杂的和高精度的工作。控制系统在促进和发展现代科学技术、工业生产和社会文明中发挥着越来越大的作用。我们处处可能遇到某类控制系统,例如,个人计算机中硬盘和打印机、日常生活中的空调器、电冰箱等,以及工业生产过程的机械加工设备、产品装配线、成套的石油化工装置等,都使用着各种不同的控制系统。

控制系统是自动化领域的一个重要组成部分,人们在现代化工业生产和生活已经离不开控制系统和自动控制技术。

下面首先介绍控制系统的一些基本概念。

1.1.1 开环控制系统

开环控制系统是最简单的一种控制系统,如图 1.1 所示。

被控对象是控制系统的执行机构,例如,工业生产设备中的电动机、发动机、加热装置等。

被控量是压力、速度、转速、位移、温度、电压、电流等物理量,是被控对象运行中的一个参数,是控制系统需要调节的对象。

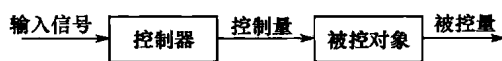


图 1.1 开环控制系统的组成

控制器是将输入信号按一定控制规律转换成控制作用的装置。一般控制器的前级为电子电路或微型计算机,后级为功率变换器等,将弱电信号转换成具有一定能量的能驱动执行机构的电压、电流、力矩等物理量。但控制器并不一定是简单的放大器,它不仅仅将信号放大为控制量,而可以具有复杂的函数关系。

由于控制系统的出现,使人们不需要直接通过手动去操作设备,只需要按预先制定的程序和目标,就可以使设备“自动”地进行工作,这是实现设备自动化的必要条件。

直流电动机速度控制系统就是一个开环控制系统的简单例子,如图 1.2 所示。控制器将输入电压信号 u_g , 例如 $0 \sim 5\text{V}$ 的直流电压信号,去调节输出电压 u_d , 例如 $0 \sim 220\text{V}$ 的直流电压。控制器的输出部分是一个电压可调的功率电源,具有驱动直流电动机的容量。电动机为控制系统的执行机构(被控对象),其转速为被控量。在这个系统中,可以通过调节输入电压信号,调节电机的转速。

在控制系统中,输入信号、控制量和被控量等都是信号,输入量到输出量(被控量)是信号的传递过程,是输入信号对输出信号的控制过程。在控制系统中存在能量转换,图 1.2 中控制器输出的电能来自电源,但是,在控制系统分析和设计过程中不讨论能量转换关系和效率等问题,而是研究控制系统对输入信号的响应,设计一个系统实现以某种特定的方式来处理信号。

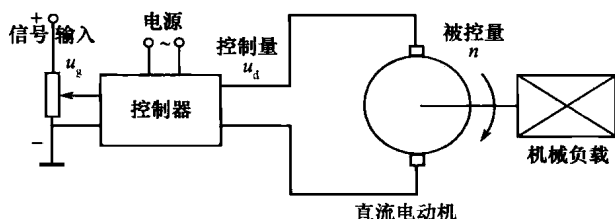


图 1.2 开环直流电动机速度控制系统

开环控制系统的结构简单,但是,其缺点是对系统外部或内部的扰动没有抑制能力。如果系统因内部元件参数的变化,或外部环境变化引起被控量(输出量)发生变化,产生了偏差,则不可能得到纠正或补偿。

例如,如图 1.2 所示的开环直流电动机速度控制系统在某一转速下运行,如果机械负载增加,则电动机转速会下降,而控制系统不可能使电动机转速保持在原有的转速上。这是开环控制系统所固有的缺点。产生这个问题的原因很明显,因为控制系统没有得到电动机的转速变化的信息,如果将电动机转速变化的信息输入到控制器,这个问题将不难解决,这就是下面介绍的闭环控制系统设计思想的出发点。

1.1.2 闭环控制系统

闭环控制系统增加了对输出量的测量,再将测量信号引到系统输入端,与输入信号进行比较,然后用它们的差值进行控制。图 1.3 就是一个闭环控制系统的方框图,其中对输出量的测量信号称其为反馈信号。因为输入信号和反馈信号的比较就是输入信号减去反馈信号,因此,闭环控制又称为负反馈控制。负反馈控制系统是按偏差进行控制的。



图 1.3 闭环控制系统的基本结构

虽然只增加了一个负反馈通道,但从控制思想上看,负反馈控制系统与开环控制系统有很大的区别。由于负反馈信号与输入信号符号相反,实际进入控制器输入端的信号是输入信号减反馈信号的偏差信号。在这个偏差信号中包含了输入信号对输出量(被控量)的控制作用,也反映了输出量对输入信号的制约作用。这样,在一个闭环负反馈控制系统中包括输入量和输出量两者之间的既互相制约又互相协调的对立统一关系。由于有了这种关系,使控制系统具有自我调节的“活力”,不但可以克服开环系统对扰动没有抑制的缺点,而且系统的参数经合理配制后,其性能可能达到一个新的水平,具有更高的精度和更快的速度。

以直流电动机速度控制系统为例,采用负反馈闭环控制系统如图 1.4 所示。输入电压信号 u_g 和反馈信号 u_b 之差为控制器的输入信号,控制器的输出电压 u_d 为直流电动机的电枢电压。因此,偏差信号为 $u_g - u_b$;控制量为 $u_d = k(u_g - u_b)$ 。可以通过调节输入电压信号 u_g 调节电机的转速 n 。

当输入电压信号 u_g 不变时,电动机转速 n 就会“自动”保持恒定。如果电动机转速 n 因某种原因发生了变化,负反馈闭环控制将会“自动”地使转速 n 恢复原有数值。按偏差调节的过程是

按以下方式实现的。

如果转速 n 上升,则反馈信号 u_b 相应上升,由于输入信号 u_g 不变,故偏差信号 $(u_g - u_b)$ 下降,控制器输出电压 u_d 下降,从而导致电动机转速 n 下降,使转速恢复或接近原数值;

如果转速 n 下降,则反馈信号 u_b 相应下降,由于输入信号 u_g 不变,故偏差信号 $(u_g - u_b)$ 上升,控制器输出电压 u_d 上升,从而导致电动机转速 n 上升,使转速恢复或接近原数值。

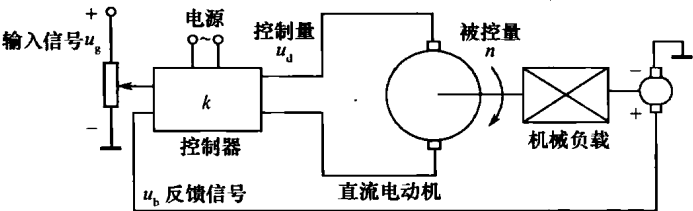


图 1.4 负反馈直流电动机速度控制系统

在直流电动机速度控制系统中,由于负载增加,电机或控制器参数变化,电源波动等各种原因引起的电动机转速的变化,通过速度负反馈的作用都可以得到校正,电动机的转速精度将大大提高。由于负反馈的作用,系统的动态性能也会加快,这在后续的章节中会进一步介绍。因此,闭环控制系统的性能比开环控制系统更优越。本书所分析的控制系统将主要是闭环控制系统。

复杂的控制系统可能具有多个被控变量和包括多个反馈通道,可能有复杂的系统结构,如图 1.5 所示,但是负反馈控制的基本思想与上述的单闭环控制系统是一致的。

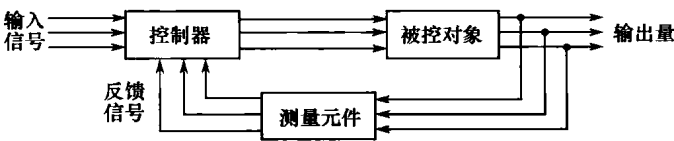


图 1.5 多变量闭环反馈控制系统

1.2 控制系统的工程应用

如果在工业生产过程中采用一系列的自动控制装置实现生产过程的自动控制,而不是采用手工操作,人工控制,则通常称为工业自动化。工业自动化对提高生产效率和提高产品的质量起了决定性的作用,促进了人类社会的进步和发展。

近几年来,计算机技术的迅速发展也为自动控制装置的进步提供了有力技术支持,工业生产过程的自动控制装置没有不采用计算机技术的。计算机和信息技术使自动控制装置数字化,不但操作更加方便,而且大量生产过程的信息可以及时存储和显示,这使生产过程的控制和管理提高到了一个新的水平。

目前在化工、冶金、电力、汽车、造纸等各个工业行业都普遍实现了自动化。例如,在现代汽车工业生产中,普遍实现了生产过程的自动化。由传送带和自动化机床相结合的生产线上,可以在几乎没有人员干预的情况下生产汽缸和水箱等零部件。在汽车的总装配生产线上采用了机器人进行焊接、装配等操作。机器人也是一种由计算机控制的高维智能自动控制装置,机器人的工作原理也离不开自动控制理论。

可以认为,自动控制理论及其实际应用已经成为现代工程学科领域中一个极其重要的热门学科。

下面用几个具体的例子说明工业控制系统的应用。

1.2.1 温度控制系统

温度控制系统是常见的定值控制系统之一,其工作原理与上述的直流电动机速度控制系统相同,如图 1.6 所示。

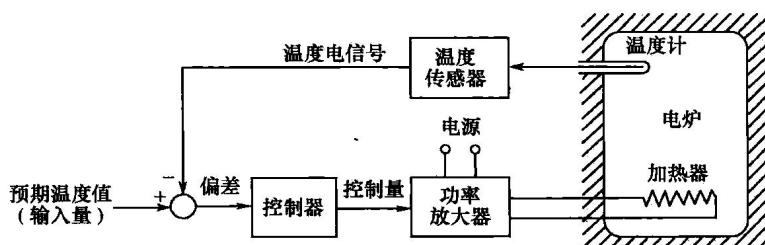


图 1.6 电炉的温度控制系统

被控量为电炉内的温度,其温度值可以通过改变控制系统的输入量来控制。电炉内的实际温度通过温度传感器检测得到,由温度传感器将温度值转换成电信号反馈到输入端。控制器输入的信号是预期温度值(输入量)与实际温度值(反馈信号)的偏差。通过这个偏差信号控制电炉内加热器的输入功率的大小,从而调节电炉的温度值。

当系统设定的预期温度值(输入量)确定以后,由于存在电炉内的实际温度的反馈信号的作用,炉内温度发生任何变化,控制系统都能及时改变对加热器的输入电功率,使炉内温度准确地保持与预期温度值的一致。

1.2.2 硬磁盘中的磁头位置控制系统

硬磁盘广泛应用于各类计算机中,是存储信息的重要工具。硬磁盘的信息按磁道存放,磁道分布在磁盘不同半径的圆上。磁头沿磁盘径向移动就能定位在每一个磁道上,并读取到信息。

硬磁盘的结构如图 1.7 所示,工作时磁盘旋转速度为 $4500 \sim 7200\text{r/min}$,磁头在磁盘上方。当磁头位于某一个磁道的上方时,在磁盘旋转过程中就可以读取该磁道记录的信息(或在该磁道记录信息)。磁头可以沿径向的寻道轨迹上移动,以便定位于不同的磁道上方,磁头驱动电动机控制磁头移动。

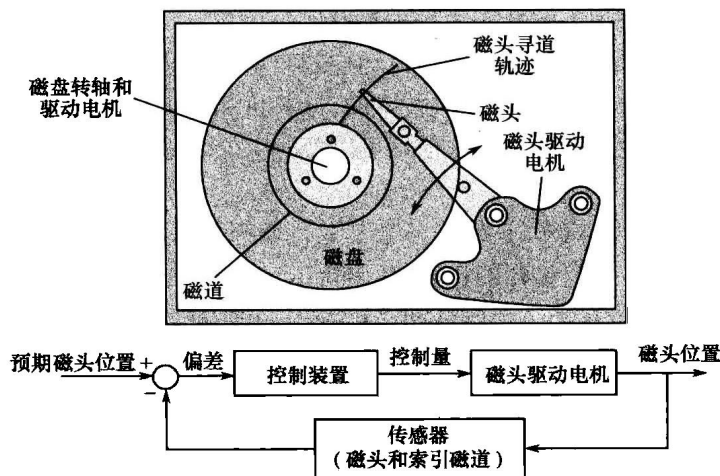


图 1.7 磁头位置控制系统

磁头位置控制系统的目标是将磁头准确定位到预期的某一个磁道上,位置精度指标为 $1\mu\text{m}$,从一个磁道到另一个磁道的寻道时间小于 50ms 。因此,磁头位置控制装置是一个高速高精度的控制系统。

磁头位置控制系统也是一个负反馈闭环控制系统,其磁头的位置信息是通过读取索引磁道上的信息得到的(索引磁道是在磁盘格式化过程中所做的标记)。

1.2.3 火电厂电能生产综合控制系统

火电厂电能生产是一个工业生产过程,主要设备为发电机、汽轮机和锅炉等三个部分,此外,还有大量的辅助设备。为保证发电机输出一定的有功功率,锅炉要供给足够的燃料,保持足够的蒸汽温度和压力,使汽轮机达到一定转速和驱动转矩。

火电厂电能生产过程的控制是一个多变量的复杂控制系统,如图 1.8 所示。从各个设备的反馈信息包括电流、电压、转速、压力、温度、氧气等不同类型的物理量。控制系统的输入信息除预期的输出功率外,还有设备的工作状态指标。这是一个复杂的工业生产过程的控制问题。

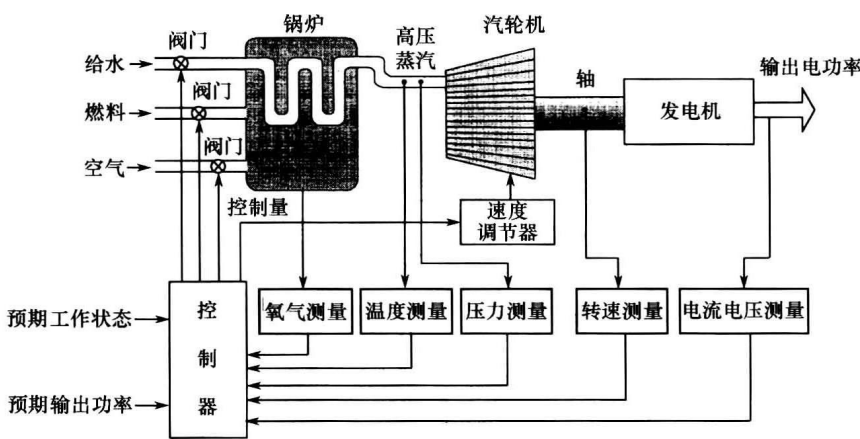


图 1.8 火力发电厂综合控制系统

1.3 控制理论发展的简要回顾

最早应用于工业生产过程的反馈控制器是瓦特在 1769 年发明的用于控制蒸汽机转速的飞球调节器。

在 20 世纪的 40 年代自动控制理论及应用取得了巨大的发展。二战期间由于战争的需要,在飞机驾驶系统、火炮定位系统、雷达天线控制系统等军用武器装备中大量使用了反馈控制系统,并促使自动控制技术和理论的进步和发展,在此期间形成了以频域方法为基础的“经典控制理论”。同时,“经典控制理论”在工业生产的各个领域也得到了广泛应用。

“经典控制理论”是建立在 S 平面上的控制理论,以通过拉普拉斯变换得到的传递函数作为工具,在频域内分析和设计控制系统,不需要直接求解微分方程。频域方法物理概念清楚,通过绘图的分析设计方法形象直观,因此,一直深受广大工程技术人员喜爱。

20 世纪的 60 年代以后随着人造卫星和空间时代的到来,控制理论发展又有了新的推动力。由于导弹、航空、航天的制导等方面对高精度多变量控制系统的需求,以及计算机技术的进步,建立在时域方法上的“现代控制理论”逐步形成并得到不断的发展,在工业领域也得到很

多应用。

“现代控制理论”是建立在状态空间上的控制理论,基于状态方程的数学模型分析和设计控制系统。状态空间模型容易实现对多输入多输出系统的建模和分析,最优控制理论以及近期对鲁棒(Robust)控制系统的研究,都建立在时域的状态空间模型上。

近20年来,在“现代控制理论”的基础上已经开拓和发展了多个技术领域,例如自适应控制、系统辨识、大系统理论、非线性控制和智能控制等,并不断有新的研究成果出现,目前控制理论仍然是一个十分活跃的学科领域。

但是,在工程控制的领域,频域方法的物理概念清楚且形象直观的特点是时域方法所无法替代的。因此,尽管“现代控制理论”取得很大的进步,但“经典控制理论”的频域方法仍然是控制工程师的重要设计工具。一个不争的事实是,在进行控制系统分析和设计过程,必须同时考虑时域和频域两种方法。本书也将以介绍“经典控制理论”的方法为主要内容。

1.4 控制系统的分析和设计

学习分析和设计一个控制系统的方法是本书的主要教学目标。

设计过程的第1步是确定设计目标,这主要是被控变量(输出量)和性能指标。控制系统的性能指标包括动态性能和稳态性能的指标。动态性能是对控制系统输出响应快速性和平稳性的描述。稳态性能是指控制系统输出响应稳态误差的指标,反映控制系统的控制精度。此外,还有抗干扰能力、鲁棒性等指标。性能指标是根据用户和现场实际的需求提出来的,同时也应该考虑实现条件和成本等因素。

第2步是确定控制系统的结构,选择驱动装置和配置适当的传感器,但设计者不能改变被控设备的结构,如图1.9所示。对于复杂的控制系统,要确定多个反馈回路的结构。

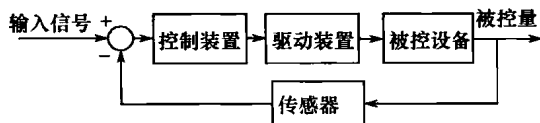


图 1.9 闭环控制系统的结构设计

第3步是建立控制系统的数学模型和设计控制装置。以系统的数学模型为工具,分析和计算系统的性能。设计控制装置,或称校正装置,是改善控制系统性能的主要手段,设计控制系统的关键部件。需要反复调整控制装置的结构和参数来获得

期望的性能指标。最后,对所设计的控制系统进行计算机仿真,校核系统的输出响应。

第4步是实验室或现场的调试工作。理论分析和设计过程都是经过一定简化,忽略了某些因素的影响,因此,一个工程设计方案如果没有实验的验证,在实际应用中可能出现意想不到的问题。经过实验工作后,再进行调整是必要的。本书不在实验方面的问题展开讨论。

在以后的各个章节中将全面介绍建立控制系统数学模型的方法及分析和设计控制系统的基本原理。线性定常(时不变)连续系统在理论上最成熟、应用最普遍,是控制理论的基础,也是分析非线性系统的基础,因此是重点介绍的部分。控制系统的频域分析方法物理概念清楚,可以采用绘图和手工计算,形象直观,是“经典控制论”的基本方法,也是一个重要内容。本书还包括现代控制理论的基本内容,包括可控性、可观性和状态反馈等,以及采样离散控制系统的内容,提供计算机控制系统分析和设计的知识。

小 结

自动控制系统有开环控制系统和闭环控制系统两种基本结构。开环控制系统由输入信号

(控制指令) 直接控制被控量。闭环控制系统, 即负反馈控制系统, 是按输入信号和被控量(输出量) 反馈信号的偏差来进行调节和控制的。

负反馈控制系统不但有输入信号对被控量的控制作用, 也存在被控量对输入信号的制约和抑制的反作用。这种输入和输出之间的控制和制约、协调和对立的关系, 使控制系统具有了合理的结构, 不但提升了控制系统抗干扰能力, 而且可以大大改善系统的稳态和动态性能。本书讨论和分析的控制系统就是负反馈控制系统, 或闭环控制系统。

习 题 一

1. 什么是开环控制系统? 什么是闭环控制系统? 它们各有什么优缺点?
2. 闭环控制系统由哪些基本环节组成? 它们各起什么作用?
3. 图 T1.1 是一个简单的水位控制系统。
 - (1) 试说明它的工作原理。
 - (2) 指出系统的被控对象、被控量、给定量(输入信号)。
 - (3) 画出系统工作原理的方框图。

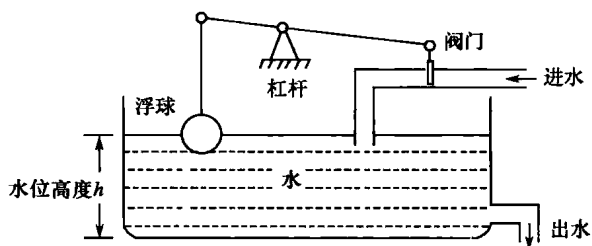


图 T1.1

4. 图 T1.2 是一个直流发电机的励磁调节电压控制系统。
 - (1) 试说明它的工作原理。
 - (2) 画出系统工作原理的方框图。
 - (3) 说明如何调节输出电压。
 - (4) 分析引起输出电压不稳定的主要干扰源。
5. 图 T1.3 是一个晶体管直流稳压电源。
 - (1) 试说明它的工作原理。
 - (2) 画出系统工作原理的方框图。
 - (3) 试说明电路中起测量作用的元件, 起执行作用的元件和起给定信号作用的元件。
 - (4) 说明如何调节输出电压的大小。

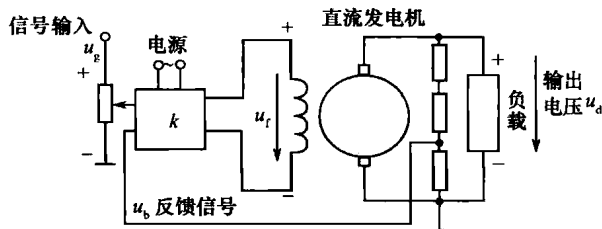


图 T1.2

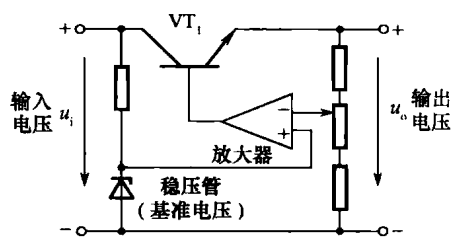


图 T1.3

第2章 控制系统的数学模型

控制系统的分析、仿真和设计完全建立在控制系统的数学模型的基础上,因此,数学模型的正确性和准确性是非常重要的。由于实际系统的复杂性,以及存在一些未知因素,在建立数学模型过程中必须做出某些假设并忽略部分次要因素。工业应用的自动控制系统都是物理系统,描述这种系统动态特性的数学模型就是微分方程(在离散系统为差分方程)。本章将讨论建立线性定常(时不变)连续系统数学模型,以及模型的变换和求解等问题。

2.1 线性动态系统

本书中控制系统的物理模型都将按线性动态系统对待。大多数物理系统可以通过近似处理为线性特性,线性动态系统就是最基本和最重要的物理系统,线性动态系统可用标准的方法求解。

2.1.1 线性系统的叠加性和齐次性

线性系统有两个基本特征,是分析线性系统的基本根据。

1. 线性系统满足叠加原理

线性系统的一个激励的存在不影响另一个激励产生的响应;线性系统的各个激励产生的响应互不影响。激励就是线性系统的输入量,响应就是线性系统的输出量。

如图 2.1 所示一个线性系统,如果激励函数 $u_1(t)$ 在物理系统产生响应函数 $y_1(t)$,而激励函数 $u_2(t)$ 产生响应函数 $y_2(t)$,可以表示为

$$y_1(t) = f[u_1(t)] \quad (2.1)$$

$$y_2(t) = f[u_2(t)] \quad (2.2)$$

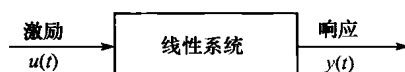


图 2.1 线性系统

对于线性系统,应满足以下关系

$$y_1(t) + y_2(t) = f[u_1(t) + u_2(t)] \quad (2.3)$$

2. 线性系统满足均匀性原理

线性系统在输入和输出域内保持比例因子不变。

如果激励函数 $u(t)$ 产生响应函数 $y(t)$,对于任意实数 c ,线性系统应满足关系:

$$cy(t) = f[cu(t)] \quad (2.4)$$

线性系统的激励和响应必须保持相同的缩放系数,这也称为齐次性。对于代数方程,齐次性就是正比例关系表达式,如: $y = kx$ 。

恒定参数线性动态系统是工程中应用最多的一种线性系统,可以用常系数微分方程来描述,称为线性时不变系统,或线性定常系统,这将是本书主要研究的对象。线性定常系统在输出端不会产生新的频率成分,它只会保持输入激励中的原有的频率分量,但各频率分量的幅值和相位在输出端都会发生改变。这一重要性能是线性定常系统频域分析的依据,将在频域分析一章中详细讨论。

2.1.2 物理系统的线性近似

线性系统是一种理想化的模型,实际物理系统都可能在参数的某些范围内呈现非线性特性,例如,力学实验中的弹簧,电子元件中的运算放大器,在它们的工作范围内呈线性特性,如果超出这个范围,都是非线性的。

有些系统的数学模型就是非线性的,例如:关系式 $y = x^2$, $y = \sin\theta$ 等都是非线性的,它们不满足叠加原理。如果考虑关系式 $y = x^2$ 在工作点 (x_0, y_0) 附近小范围内变化的增量 Δx 和 Δy ,这些小变化的增量是线性关系的。这就是非线性数学模型线性化的原理。为此,要对非线性关系式在工作点附近进行泰勒级数展开,只取一阶导数项,设一阶导数为 m_0 ,这就是工作点处的斜率。最后可以得到线性方程: $(y - y_0) = m_0(x - x_0)$,或 $\Delta y = m_0 \Delta x$ 。

对于关系式 $y = kx + b$ (b 是常数),不是正比例关系式,不满足齐次性。考虑在工作点 (x_0, y_0) 上的激励和响应的增量 Δx 和 Δy 的关系,取 $x_0 = 0, y_0 = b$,同样可以得到: $(y - y_0) = k(x - x_0)$, $(y - b) = k(x - 0)$,即 $\Delta y = kx$,满足叠加性和齐次性。

本书所讨论的线性系统是对实际物理系统的一些非线性特性进行了线性化处理,或忽略了部分非线性特性后的结果。采用线性系统的模型能够解决工程中的大多数课题。

2.2 传递函数与系统结构图

2.2.1 传递函数

首先定义线性系统的传递函数。设有单输入单输出线性定常系统,用 n 阶常微分方程描述为

$$y^{(n)}(t) + a_n y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 y(t) = b_{m+1} u^{(m)}(t) + b_m u^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1 u(t) \quad (2.5)$$

式中 $u(t)$ 输入量, $y(t)$ 输出量, $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_{m+1}$ 为常数,且有 $n \geq m$ 。

在零初始条件下,即

$$y(0) = \dot{y}(0) = \cdots = y^{(n-1)}(0) = 0 \quad (\text{一共有 } n \text{ 个条件})$$

$$u(0) = \dot{u}(0) = \cdots = u^{(m-1)}(0) = 0 \quad (\text{一共有 } m \text{ 个条件})$$

对微分方程(2.5)进行拉普拉斯变换,得

$$[s^n + a_n s^{n-1} + \cdots + a_1 s]Y(s) = [b_{m+1} s^m + b_m s^{m-1} + \cdots + b_1 s]U(s) \quad (2.6)$$

系统的传递函数定义为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_{m+1} s^m + b_m s^{m-1} + \cdots + b_1}{s^n + a_n s^{n-1} + \cdots + a_1} \quad (n \geq m) \quad (2.7)$$

传递函数是零初始条件下拉普拉斯变换后的输出量与输入量之比。传递函数的表达式是算子 s 为自变量的多项式分式。

如果没有零初始的条件,显然得不到输出与输入的拉普拉斯变换的比值关系,也就得不到传递函数的表达式。实际上,每一个非零初始的分量都可以看做对式(2.6)增加的一个输入量,它们对输出的影响满足叠加原理。如果考虑非零初始分量存在的情况,可以按叠加原理的方法考虑它们对输出的影响。

请注意,在式(2.5)~(2.7)中的 $n \geq m$ 必要条件。这是一个实际的物理系统所具有的特征。如果不满足这个条件,在传递函数中将会出现纯微分环节,这在实际系统中是不可能存在的。

传递函数可以表示为方框图(方块图),它和输入变量与输出变量的关系可以表示成