




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

第二版

王万良 编著



 高等教育出版社

014039136

TP13
215-2



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

Zidong Kongzhi Yuanli

第二版

王万良 编著

吴启迪 主审
邹伯敏



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING



北航

C1726564

TP13
215-2

内容简介

本书第一版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是教育部评选的2009年度普通高等教育精品教材,也是国家精品课程“自动控制原理”建设成果。本书系统地阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共9章,第1章自动控制的基本概念;第2章连续系统的数学模型;第3章时域分析法;第4章根轨迹法;第5章频率法;第6章线性系统的校正方法;第7章离散系统控制理论;第8章非线性控制系统分析;第9章控制系统的状态空间分析。本书将MATLAB辅助分析与设计控制系统方法贯穿在相关章节中。每章增加了工程应用题。

本书可作为自动化、电气、电子信息、计算机、机械、仪器等类专业的教材。选用该教材教学的任课教师可向编者以及高等教育出版社免费获取电子教案、习题详细解答等教学资源。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 王万良编著. -- 2版. -- 北京 :
高等教育出版社, 2014.3
ISBN 978-7-04-039102-2

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(2013)第300550号

策划编辑 韩颖
插图绘制 于博

责任编辑 韩颖
责任校对 刘娟娟

封面设计 李卫青
责任印制 张福涛

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京七色印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 27.75
字 数 510千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2008年6月第1版
2014年3月第2版
印 次 2014年3月第1次印刷
定 价 46.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39102-00

自动控制是生产过程中的关键技术,也是许多高新技术产品中的核心技术。自动控制理论撇开控制系统的物理结构,从信息的传输与变换角度,用数学的方法研究控制系统的本质。因此,自动控制理论是许多专业的重要课程。本书是在编者三十多年自动控制原理课程教学经验基础上编写的,是国家精品课程“自动控制原理”的建设成果,经过十多年的精心修改以及在几十所高校的应用,本书第一版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,被教育部评为2009年度普通高等教育精品教材。

1. 主要内容

本书深入浅出地介绍自动控制理论的基本内容。全书共9章,第1章介绍自动控制的基本概念;第2章介绍连续系统的微分方程、传递函数、结构图、信号流图等数学模型及相互关系;第3章介绍线性连续系统的时域分析方法,包括稳定性、暂态性能和稳态误差等系统性能的分析;第4章简要介绍系统的根轨迹分析法;第5章介绍控制系统的频率法;第6章介绍控制系统的校正设计方法;第7章介绍离散系统的控制理论,包括采样与保持的概念、差分方程与 z 变换数学基础知识、离散系统的数学模型、稳定性、暂态性能和稳态误差等性能分析方法;第8章介绍非线性系统的描述函数法、相平面图;第9章简要介绍控制系统的状态空间分析与设计方法的基本内容。

2. 编写特色

(1) 内容基本实用,语言简明易懂。本书着重讲清自动控制理论的基本与实用方法,特别是有助于系统设计的内容,删除了一些可以根据基本方法得到或者不是很实用的内容。书中精选了例题和习题,有助于对理论的理解。每章最后单独设置了工程应用题,以培养学生理论联系实际的能力。

(2) 编排醒目,方便学习。每章设置导读,使读者在学习该章前就知道为什么要学习该章内容及该章主要介绍哪些内容。每章最后扼要总结该章的重要概念、定理与方法。本书采用双色印刷,将重要的公式和概念、定理、方法用明显的颜色标注,有利于学生掌握,避免学生感觉自动控制理论要记忆的公式太多。

(3) 引导学生使用控制系统CAD软件。在每章最后一节简要实用地介绍MATLAB辅助分析与设计控制系统的方法,学生阅读后自己就会使用,教师也可以简单地加以介绍。过多地介绍MATLAB会偏离控制理论的教学主题。实际上,

MATLAB 与一般软件一样,学生很容易掌握。

3. 教师如何使用本教材

(1) 教学内容与时间安排。本书前 8 章主要介绍经典控制理论,用于“自动控制原理”课程的教学,课堂教学时数为 64 学时左右。第 9 章简单介绍现代控制理论的基本内容。对于不单独开设“现代控制理论”课程的专业,可以安排 72 学时左右,讲授本书全部内容。对于非自动化类专业学生,许多学校讲课学时为 32~56,可以根据专业需要选讲本书的主要内容。本书第 7~9 章内容之间没有依赖关系,可以根据专业需要和学时选择学习,仍可保持体系结构的完整性。

(2) 如何讲授本书? 本书语言精练,教师在教学过程中可通过剖析书中的概念、方法进行发挥,特别是结合工程实例介绍书中的概念和方法。对于非自动化类专业,可以减少理论推导,着重讲授具体方法。书中例题是精选的,题型基本不重复。教师也可根据学生的接受能力,适当增加一些例题。

(3) 教学中如何将理论与工程相结合?“自动控制原理”教学一方面强调其方法论特征,不仅适合解决工程问题,而且适合解决经济、管理、社会等非工程问题;另一方面要与工程实际相结合。因此,教师可以在本书的应用题中,选择自己比较熟悉、符合所教专业的一些工程实例,作为补充内容进行介绍,着重介绍工程应用的概貌和思路,提高教学效果。

(4) 如何获取该课程教学资源? 作者负责建设的“自动控制原理”课程被评为国家级精品资源共享课,具有丰富的教学资源,使用本书作为教材的教师可向编者以及高等教育出版社免费获取电子教案、习题详细解答、教学录像等教学资源。

4. 致谢

本书承蒙尊敬的教育部原副部长、同济大学吴启迪教授和浙江大学邹伯敏教授主审,他们对本书结构和具体写作提供了许多宝贵意见,在此深表谢意!

感谢编者负责的国家精品课程“自动控制原理”教学团队多年来开展的教学研究与实践工作,为本书的编写奠定了基础。特别要感谢姚明海、计时鸣、俞浙青、杨旭华、张聚、管秋、何通能、范兴刚、沈国江、李章维、顾勤龙、徐新黎、朱发明、裴翔、郑建炜等教师的合作与帮助!感谢浙江工业大学重点建设教材项目(JC 1307)资助!

本书内容虽然经过多年使用和修改,仍会存在许多缺点和错误,欢迎使用本书的教师和读者提出宝贵意见,邮件请寄 wvl@zjut.edu.cn。

王万良

2014 年 2 月于杭州

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 自动控制系统	2
1.2 自动控制系统的类型	5
1.2.1 开环、闭环与复合控制系统	6
1.2.2 线性系统与非线性系统	7
1.2.3 连续系统与离散系统	8
1.2.4 定常系统与时变系统	9
1.2.5 SISO 系统和 MIMO 系统	10
1.2.6 集中参数系统与分布参数系统	10
1.3 控制系统性能的基本要求	10
1.3.1 稳定性	10
1.3.2 暂态性能	11
1.3.3 稳态性能	11
1.4 本书内容的安排	11
本章小结	12
习题与应用题	13
第 2 章 连续系统的数学模型	17
2.1 系统数学模型的概念	18
2.1.1 数学模型的定义与主要类型	18
2.1.2 建立数学模型的方法	19
2.2 微分方程描述	19
2.3 传递函数	25
2.3.1 传递函数与脉冲响应函数的定义	25
2.3.2 传递函数的表达式	26
2.3.3 线性系统的基本环节	27
2.4 结构图	30
2.4.1 结构图的基本组成	30
2.4.2 结构图的变换法则	33
2.4.3 结构图的简化	33

2.4.4	反馈控制系统的传递函数	38
2.5	信号流图	41
2.5.1	信号流图的定义及基本性质	41
2.5.2	信号流图的构造	42
2.5.3	信号流图的变换法则与简化	45
2.5.4	梅森增益公式	48
2.6	系统数学模型的 MATLAB 表示	50
2.6.1	传递函数的 MATLAB 表示	51
2.6.2	结构图的 MATLAB 表示	53
	本章小结	53
	习题与应用题	54
第3章	时域分析法	63
3.1	稳定性分析	64
3.1.1	稳定性的概念	64
3.1.2	系统稳定的条件	65
3.1.3	劳斯稳定判据	66
3.1.4	赫尔维茨稳定判据	71
3.2	暂态性能分析	73
3.2.1	典型输入信号	73
3.2.2	暂态性能指标	75
3.2.3	一阶系统的暂态性能分析	77
3.2.4	典型二阶系统的暂态性能分析	79
3.2.5	高阶系统暂态性能近似分析	87
3.3	稳态性能分析	93
3.3.1	控制系统误差与稳态误差的定义	93
3.3.2	控制系统型号或无差度的定义	95
3.3.3	终值定理法	96
3.3.4	误差系数法	99
3.3.5	扰动作用下的稳态误差分析	102
3.3.6	复合控制系统及误差分析	105
3.4	MATLAB 辅助分析控制系统时域性能	108
3.4.1	MATLAB 辅助控制系统稳定性分析	108
3.4.2	MATLAB 求控制系统的单位阶跃响应	108
	本章小结	110
	习题与应用题	111

第 4 章 根轨迹法	121
4.1 根轨迹的基本概念	122
4.2 根轨迹的绘制	123
4.3 零度根轨迹的绘制	126
4.4 广义根轨迹的绘制	129
4.5 控制系统的根轨迹分析法	130
4.6 用 MATLAB 绘制根轨迹	131
本章小结	132
习题与应用题	133
第 5 章 频率法	135
5.1 频率特性	136
5.1.1 频率特性的定义	136
5.1.2 频率响应	137
5.1.3 频率特性的几何表示	139
5.2 典型环节频率特性的伯德图	141
5.3 控制系统开环频率特性的伯德图	147
5.4 由伯德图确定传递函数	154
5.4.1 最小与非最小相位系统的概念	154
5.4.2 由伯德图确定传递函数	154
5.4.3 频率特性的实验确定法	156
5.5 奈奎斯特稳定判据	158
5.5.1 辐角原理	159
5.5.2 奈奎斯特稳定判据	159
5.5.3 举例	163
5.6 控制系统相对稳定性分析	169
5.7 MATLAB 在频率法中的应用	173
5.7.1 用 MATLAB 绘制奈氏图	173
5.7.2 用 MATLAB 绘制伯德图	174
5.7.3 用 MATLAB 分析相对稳定性	174
本章小结	175
习题与应用题	176
第 6 章 线性系统的校正方法	183
6.1 控制系统校正的概念	184
6.1.1 控制系统的设计步骤	184
6.1.2 校正的概念与校正方案	185

6.1.3 校正方法	189
6.2 超前校正	190
6.2.1 超前校正及其特性	190
6.2.2 用频域法确定超前校正参数	193
6.2.3 超前校正装置	196
6.3 滞后校正	199
6.3.1 滞后校正及其特性	199
6.3.2 用频域法确定滞后校正参数	201
6.3.3 滞后校正装置	204
6.4 滞后-超前校正	206
6.4.1 滞后-超前校正网络	206
6.4.2 用频域法确定滞后-超前校正参数	208
6.5 串联校正的综合法	210
6.5.1 综合法的基本方法	210
6.5.2 按最佳二阶系统校正	211
6.5.3 按典型三阶系统校正	214
6.6 Simulink 在控制系统仿真中的应用	216
本章小结	217
习题与应用题	218
第7章 离散系统控制理论	221
7.1 信号的采样与保持	222
7.1.1 信号的采样	222
7.1.2 采样信号的保持	227
7.2 差分方程	232
7.2.1 差分方程的概念	232
7.2.2 微分方程描述的差分方程	233
7.2.3 差分方程的递推解法	239
7.2.4 差分方程的经典解法	240
7.3 z 变换	243
7.3.1 z 变换的定义	243
7.3.2 z 变换的基本定理	245
7.3.3 z 变换的基本方法	251
7.3.4 z 逆变换	255
7.3.5 差分方程的 z 变换解法	261
7.4 z 传递函数	263

7.4.1	z 传递函数的概念	263
7.4.2	开环 z 传递函数	266
7.4.3	闭环 z 传递函数	268
7.4.4	带有扰动的系统输出 z 变换式	270
7.5	线性离散系统的稳定性分析	271
7.5.1	朱利稳定判据	272
7.5.2	舒尔-科恩稳定判据	273
7.5.3	修正劳斯稳定判据	274
7.6	线性离散系统的暂态性能分析	276
7.6.1	离散系统的暂态性能指标	276
7.6.2	离散系统极点分布与动态响应的关系	278
7.6.3	离散系统暂态性能指标的计算公式	280
7.7	线性离散系统的稳态误差分析	285
7.8	线性离散系统设计方法	287
7.8.1	数字 PID 控制	288
7.8.2	数字控制器的 z 传递函数	289
7.8.3	最少拍离散控制系统设计方法	290
7.9	MATLAB 在离散系统分析中的应用	294
	本章小结	296
	习题与应用题	298
第 8 章	非线性控制系统分析	303
8.1	典型非线性特性	304
8.1.1	饱和特性	304
8.1.2	死区特性	305
8.1.3	间隙特性	306
8.1.4	继电器特性	307
8.2	描述函数法	308
8.2.1	描述函数法的基本思想与条件	308
8.2.2	描述函数	309
8.2.3	典型非线性特性的描述函数	313
8.2.4	用描述函数法分析非线性系统的自激振荡	320
8.3	相平面法	326
8.3.1	相平面	327
8.3.2	相轨迹的绘制方法	330
8.3.3	奇点	334

8.3.4 极限环	339
8.3.5 非线性系统相平面分区线性化方法	342
8.4 MATLAB 在非线性系统分析中的应用	345
本章小结	346
习题与应用题	347
第9章 控制系统的状态空间分析	351
9.1 状态空间模型	352
9.1.1 状态与状态空间的概念	352
9.1.2 系统的状态空间描述	353
9.1.3 状态方程的线性变换	356
9.2 线性系统的能控性和能观性分析	358
9.2.1 系统能控性和能观性问题	358
9.2.2 线性定常系统的能控性	359
9.2.3 线性定常系统的能观性	364
9.2.4 状态空间表达式的能控标准型与能观标准型	368
9.2.5 对偶原理	373
9.3 李雅普诺夫稳定判据	374
9.3.1 李雅普诺夫稳定性定义	375
9.3.2 李雅普诺夫稳定判据	377
9.3.3 线性连续系统的李雅普诺夫稳定判据	380
9.3.4 线性离散系统的李雅普诺夫稳定判据	381
9.4 状态方程的求解	384
9.4.1 线性连续系统状态方程的求解	384
9.4.2 线性离散系统状态方程的求解	386
9.5 状态反馈控制与状态观测器的设计	389
9.5.1 状态反馈	390
9.5.2 状态反馈的设计	391
9.5.3 状态观测器的设计	396
9.6 线性二次型最优控制	399
9.6.1 线性二次型最优控制问题	399
9.6.2 线性连续系统有限时间状态调节器	400
9.6.3 线性连续系统无限时间定常状态调节器	402
9.6.4 线性离散系统状态调节器	405
9.7 MATLAB 在状态空间分析中的应用	407
本章小结	408

习题与应用题	409
附录 常用拉普拉斯变换和 z 变换表	415
习题与应用题部分参考答案	419
参考文献	431

第 1 章 自动控制的基本概念

1

自动化技术几乎渗透到国民经济的各个领域及社会生活的各个方面,是当代发展最迅速、应用最广泛、最引人注目的高科技,是推动新的技术革命和新的产业革命的关键技术。从某种程度上来说,自动化是现代的同义词。自动控制原理课程主要介绍分析、设计自动控制系统的基本方法。

本章从介绍自动控制的发展历史入手,引出用自动控制理论分析、设计自动控制系统的基本思想,然后介绍自动控制的基本概念以及对自动控制系统的基本要求,使读者大致了解自动控制理论的总目标。

1.1 自动控制系统

1769年瓦特(J. Watt)发明的蒸汽机,推动了工业革命的进一步发展。但是,当时的蒸汽机需要人不断地调节蒸汽阀门才能保持蒸汽机的速度稳定,蒸汽机的应用受到调速精度的限制。为了解决蒸汽机的速度控制问题,瓦特于1788年又将欧洲风力磨坊里的飞球调节器原理,应用于蒸汽机速度控制,构成了世界上公认的第一个自动控制系统,其工作原理如图1.1所示。它是一个与蒸汽机轴相连的机械装置,当蒸汽机的负载减轻或者蒸汽温度升高等原因导致蒸汽机转速升高时,飞球调节器的转速也升高,离心力增加,飞球升高,带着套环上升,汽阀联结器关小蒸汽阀门,从而降低蒸汽机速度。反之,当蒸汽机的负载增加或者蒸汽温度下降等原因导致蒸汽机转速降低时,飞球调节器的转速也下降,离心力减小,飞球降低,带着套环下降,汽阀联结器开大蒸汽阀门,从而提高蒸汽机速度。由此可见,尽管受到负载、蒸汽温度变化等扰动的影响,但由于飞球调节器的作用,使蒸汽机的速度仍然稳定在设定值附近。

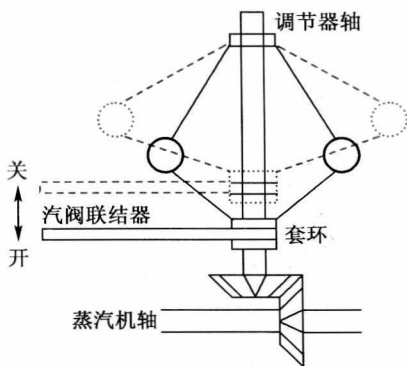


图 1.1 飞球调节器原理图

飞球调节器的发明进一步推动了蒸汽机的应用,也使飞球调节器控制原理闻名于世,并称为瓦特的飞球调节器。但是,有时为了提高调速精度,反而使蒸汽机速度出现大幅度振荡,其后出现的其他自动控制系统也有类似现象发生。由于当时还没有自动控制理论,所以不能从理论上解释这一现象。有人认为系统振荡是因为调节器的制造精度不够,从而努力改进调节器的制造工艺,但始终不能完全解决系统振荡的问题。这种盲目的探索持续了大约一个世纪之久。

1868年,英国的麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了“论调速器”论文,第一次指出不应该单独讨论一个离心锤,必须从整个控制系统出发推导出微分方程,然后讨论微分方程解的稳定性,从而从理论上分析实际控制系统是否会出现不稳定现象。麦克斯韦的这篇著名论文被公认为是自动控制理论的开端。

自动控制理论分析、设计自动控制系统的基本思想是将各种实际问题用微分方程等数学模型描述,然后用数学工具分析这些数学模型的特性,从而分析系

统的性能,设计控制器的数学模型。

自动控制理论研究的对象是系统。人们在日常生活中就接触到很多系统,如经常提到的电力系统、机器系统、文教系统、卫生系统等。事实上,系统是一个很广泛的概念,一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网都是一个系统,一个企业、一个社会组织也是一个系统。有小系统、大系统,也有把一个国家甚至整个世界作为对象的巨系统。

系统的种类如此繁多,又如此千差万别,但它们有一个共同的特点,就是都具有一定的功能,自身的各部分是互相依赖、互相制约的。例如,一条生产线是为了加工某个产品而设立的,生产线的各个部分存在一定的结构关系和运动关系。把系统的这一特征作为“系统”的定义。

由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体称为系统。或者说,为实现规定功能以达到某一给定目标而构成的相互关联的一组元件称为系统。

由人工控制的系统称为手动控制系统。下面通过两个具体例子,分析手动控制的过程,从而可以看出自动控制系统需要解决的问题。

例 1.1 热力系统。

图 1.2 所示为一个热力系统。通过调节蒸汽阀门,使流出的热水保持一定的温度。如果由人工控制,控制者观测温度计的指示值,调节蒸汽阀门的开度。调节方法为:如果温度计的指示值高于期望值,则关小阀门,降低热水温度;否则,开大阀门,升高热水温度,从而使流出的热水基本保持设定的温度。

例 1.2 直流电动机速度控制系统。

图 1.3 所示为直流电动机速度控制系统。控制目标是使电动机按要求的转速稳定运行。从图中可见,对应滑动变阻器触点的某一位置,有一给定电压 U_G ,它经过放大器放大为 U_D ,即为电动机电枢电压。在没有任何扰动的情况下,对应滑动变阻器触点的某一位置,有一电动机转速与之相对应。

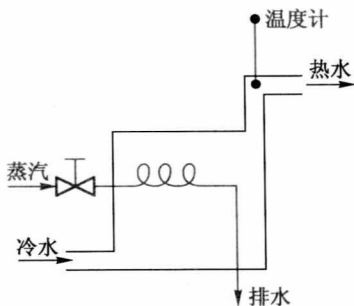


图 1.2 热力系统

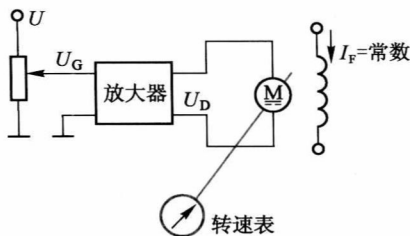


图 1.3 直流电动机速度控制系统

如果负载恒定,电动机及放大器参数也不变化,那么,给定电压 U_c 不变,电动机转速也不会变。但这只是一种理想情况,实际上,电动机负载是经常变化的,电动机、放大器的参数也会发生漂移,因此,即使保持给定电压 U_c 不变,电动机转速也会变化,不能达到控制的目的。如果用人工控制,则通过观测转速表的指示值,调整滑动变阻器的触点位置以改变 U_c ,从而使电动机的转速保持在期望值运行。例如,当负载增大使速度下降时,控制人员则调节触点位置,增大 U_c ,使 U_b 增大,从而使电动机转速回升。

上述两个系统都是由人工控制的,可以看出,人在控制过程中起了3个作用。

① 观测:用眼睛去观测温度计和转速表的指示值。

② 比较与决策:人脑把观测得到的数据与要求的数据相比较,进行判断,根据给定的控制规律给出控制量。

③ 执行:根据控制量用手具体调节,如调节阀门开度、改变触点位置。

在自动控制中,则用控制装置代替人来完成上述功能。例如,自动控制热力系统如图 1.4 所示。

温度测量元件测出实际水温,并转换成电压信号,与给定水温的电压信号同时加在放大器输入端,即可比较大小,其差值信号经放大器放大后,驱动执行电动机,从而调节阀门的开度。例如,当实际水温偏低时,给定水温与实际水温的偏差是一正值,驱动执行电动机朝开启阀门方向运转,增大蒸汽流量,从而使水温上升;反之,当实际水温偏高时,给定水温与实际水温的偏差是一负值,驱动执行电动机朝关闭阀门方向运转,减小蒸汽流量,从而使水温下降。可见,控制装置能够代替人进行控制。

直流电动机速度自动控制系统如图 1.5 所示。

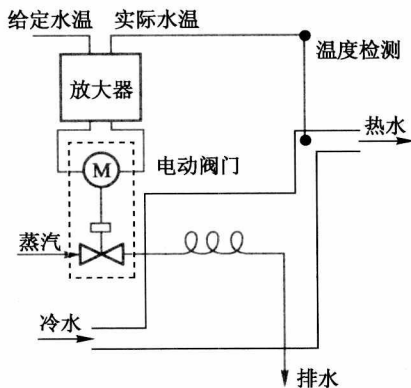


图 1.4 自动控制热力系统

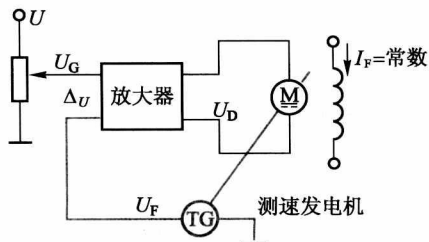


图 1.5 直流电动机速度自动控制系统

测速发电机的输出电压 U_F 与电动机转速成正比,当电动机转速比期望值大时, U_F 大, $\Delta U = U_c - U_F$ 变小, U_D 变小,从而使电动机转速降低;反之,当电动机转速比期望值小时, U_F 小, $\Delta U = U_c - U_F$ 变大, U_D 变大,从而使电动机转速增加。因此,无论负载变化使电动机转速增大还是减小,控制器都能使电动机保持在期望转速运行。

在上述两个自动控制系统中,没有人参与控制,是系统本身进行自动控制来满足要求的。因此,所谓自动控制就是在没有人参与的情况下,系统的控制器自动地按照人预定的要求控制设备或过程,使之具有一定的状态和性能。具有自动控制功能的系统称为自动控制系统。

在自动控制系统中,有许多变量或者信号。

① 输入量。从系统外部施加到系统上而与该系统的其他信号无关的信号称为输入信号。输入信号包括参考输入和扰动输入。在控制系统中希望被控信号再现的恒定的或随时间变化的输入信号称为参考输入,简称为输入。而干扰系统被控量达到期望值的输入称为扰动输入,简称为扰动。例如,温度控制系统中的温度设定是参考输入,而蒸汽温度的变化、热水流量的变化等都是干扰热水温度恒定的,所以都是扰动输入。在电动机速度控制系统中,电位器给出的电压是参考输入,而电动机负载的变化、电网电压的波动等都是干扰电动机速度保持恒定的变量,是扰动输入。

在有些系统中,参考输入是随时间变化的,例如啤酒发酵、家禽孵化过程中,温度设定是时间的函数。而在自动火炮系统中,飞机的飞行轨迹是自动火炮系统的参考输入,是一个事先无法预料的信号。

② 被控量。系统中被控制的量称为被控量。例如,温度控制系统中的温度、电动机速度控制系统中的电动机转速都是被控量。自动控制系统的的作用就是使被控量按照期望的规律变化。

③ 控制量。控制器的输出称为控制量。例如,温度控制系统中的蒸汽阀门开度,电动机速度控制系统中的电枢电压都是控制量。

④ 输出量。控制系统输出的量称为输出量。在控制系统分析与设计中,系统的被控量常作为输出量。实际上,控制系统中需要监控的量都可以作为输出量。例如,系统的误差信号等。

1.2 自动控制系统的类型

自动控制系统根据分类的目的,可以用多种方法进行分类。了解控制系统的分类方法,就能在分析和设计系统之前,对系统有一个正确的认识。

下面介绍控制系统常见的几种类型及其性质。