

高等学校电子信息类专业
“十三五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

自动控制原理

主 编 胡 皓
副主编 任鸟飞 张海燕

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

自动控制原理

主 编 胡 皓

副主编 任鸟飞 张海燕

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书比较全面、系统地介绍了自动控制原理的基本内容和控制系统的分析、校正及综合设计方法。全书共分8章,主要内容包括自动控制的一般概念、连续控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率特性法、控制系统的校正、非线性系统、采样控制系统。书中的计算与绘图附有相应的 MATLAB 程序,每章给出了涉及相应知识的引例及小结,并配有适当的习题。

本书可作为高等学校电子信息科学类、仪器仪表类、电气信息类、自动控制类相关专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,亦可作为科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/胡皓主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.1

高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3889-8

I. ① 自… II. ① 胡… III. ① 自动控制理论—高等学校—教材

IV. ① TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283462 号

策划编辑 云立实

责任编辑 阎 彬 牛 帅

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.375

字 数 435千字

印 数 1~3000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-3889-8/TP

XDUP 418100-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

随着科学技术的发展,自动控制技术已经广泛深入地应用于工农业生产、交通运输、国防现代化和航空航天等领域。特别是我国神舟系列载人航天飞船的研制成功,极大地鼓舞了国人,提升了我国在国际社会中的地位。自动控制原理作为工科院校重要的技术基础课,不仅对工程技术有指导作用,而且对培养学生的辩证思维能力、建立理论联系实际科学观点和提高综合分析问题的能力,都具有重要的作用。深入理解、掌握自动控制原理课程的概念、思想和方法,对于学生日后解决实际控制工程问题、掌握控制原理及其他学科领域的知识,都是必备的基础。

自动控制理论按其发展阶段不同,可以分为古典控制理论、现代控制理论以及大系统理论和智能控制理论。其中古典控制理论是学习现代控制理论的基础,是工科院校普遍开设的一门专业基础理论课,也是本书介绍的主要内容。本书共分8章,主要包括自动控制的一般概念与数学基础、连续控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率特性法、控制系统的频率法校正、非线性系统和采样控制系统等内容。通过本书的学习,学生可掌握分析和设计自动控制系统的基本理论和方法,为学习相关专业知识打下良好的理论基础。

编者根据多年教学经验,从读者角度出发,力求每一步推导、每一道习题、每一段讲解都有理有据,通俗易懂,重点突出。鉴于MATLAB计算仿真已经成为工科学生必须掌握的一种应用工具,因此,本书在部分章节中编入了控制系统计算机仿真的内容,使读者在学习理论的同时,能够掌握一种高效便利的仿真工具,减轻烦琐的计算负担。

本书详细地阐述了课程的重点内容,删除了工程中不常用的扩展部分;以基本内容为主线,注重基本概念和原理的讲解,突出工程实用方法,在有些理论性较强的部分和主要的设计方法上作了较详细的分析与讨论。本书具有论述系统、严谨,论证周密,理论性、系统性强,例题、习题丰富,配合基本概念,易于理解,紧密结合工程实际,便于自学掌握和应用等显著特点。

本书由胡皓担任主编,任鸟飞、张海燕担任副主编。其中,第1章、第2章、第7章和第8章由胡皓编写;第3章和第4章由张海燕编写;第5章和第6章由任鸟飞编写。全书由胡皓统稿、定稿。

本书在编写过程中学习和汲取了其他教材的部分内容,参考了许多院校老师们编写的教科书和习题集,得到了西安电子科技大学出版社云立实等有关同志的大力帮助。在此,谨向关心并为本书的出版付出辛勤劳动的所有同志表示深深的谢意!

由于编者水平有限,书中难免出现不妥之处,恳请各位读者、同行批评指正。

胡皓

2015年6月

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念	1	2.6.3 信号流图中的术语	40
1.1 引例	1	2.6.4 信号流图的性质	41
1.2 反馈的基本概念	2	2.6.5 梅逊(Mason)公式	41
1.3 术语	3	2.7 磁悬浮系统的数学模型	43
1.4 自动控制系统示例	5	小结	49
1.5 控制系统的组成	5	习题	49
1.5.1 反馈控制系统的基本组成	5	第 3 章 时域分析法	55
1.5.2 开环控制	7	3.1 引例	55
1.5.3 闭环与开环控制系统的比较	7	3.2 典型输入信号和时域性能指标	56
1.5.4 复合控制系统	8	3.2.1 典型输入信号	56
1.6 自动控制系统的分类	8	3.2.2 动态过程和稳态过程	58
1.7 对自动控制系统的基本要求	11	3.2.3 控制系统的时域性能指标	58
1.8 本课程的任务	11	3.3 典型系统的动态响应及其性能指标	60
1.9 自动控制理论的发展	12	3.3.1 一阶系统的动态响应分析	60
习题	15	3.3.2 二阶系统的动态响应分析	62
第 2 章 连续控制系统的数学模型	17	3.3.3 二阶系统性能的改善	68
2.1 引例	17	3.4 高阶系统的动态分析	70
2.2 控制系统数学模型的概念	18	3.4.1 高阶系统的瞬态响应	70
2.2.1 数学模型的类型	18	3.4.2 高阶系统的降阶	71
2.2.2 数学模型的特点	19	3.5 线性系统的稳定性分析	73
2.2.3 建立数学模型的方法	19	3.5.1 稳定的概念和稳定的充要条件	73
2.3 控制系统的动态微分方程	20	3.5.2 代数稳定判据	74
2.3.1 列写动态微分方程的一般方法	20	3.5.3 代数判据的应用	76
2.3.2 非线性元件微分方程的线性化	23	3.6 稳态误差分析与计算	78
2.4 控制系统的传递函数	26	3.6.1 误差及稳态误差的定义	79
2.4.1 传递函数的定义	26	3.6.2 给定输入下的稳态误差	80
2.4.2 传递函数的性质	26	3.6.3 扰动信号作用下的稳态误差	83
2.4.3 传递函数的求取	27	3.7 应用 MATLAB 进行时域分析	85
2.5 动态结构图及其等效变换	30	3.7.1 应用 MATLAB 分析系统的	85
2.5.1 动态结构图的概念	30	稳定性	85
2.5.2 结构图的等效变换	33	3.7.2 应用 MATLAB 分析系统的	86
2.6 信号流图	37	动态特性	86
2.6.1 信号流图介绍	38	3.8 炉温自动控制系统时域分析	87
2.6.2 系统的信号流图	38	3.8.1 系统各部分的传递函数	87

3.8.2 系统的时域分析	89	5.2.1 基本概念	127
小结	91	5.2.2 频率特性曲线	130
习题	91	5.3 典型环节的频率特性	131
第4章 根轨迹法	94	5.4 系统的开环频率特性	138
4.1 引例	94	5.4.1 开环幅相曲线	139
4.2 根轨迹的基本概念	95	5.4.2 开环对数频率特性曲线	141
4.2.1 根轨迹	95	5.4.3 最小相位系统与非最小相位系统	142
4.2.2 根轨迹方程及相角、幅值条件	95	5.5 奈奎斯特稳定判据	144
4.2.3 闭环零、极点与开环零、极点之间的关系	96	5.5.1 数学基础	144
4.3 根轨迹绘制规则	97	5.5.2 奈奎斯特稳定判据	146
4.3.1 根轨迹的起点与终点	98	5.5.3 对数频率稳定判据	150
4.3.2 根轨迹的分支数与对称性	98	5.6 开环频域分析	152
4.3.3 实轴上的根轨迹	99	5.6.1 稳定裕度	152
4.3.4 根轨迹的渐近线	99	5.6.2 开环频率特性分析	154
4.3.5 分离点及会合点	100	5.7 闭环频率特性	157
4.3.6 根轨迹的起始角与终止角	101	5.7.1 闭环频域指标	157
4.3.7 根轨迹与虚轴的交点	102	5.7.2 闭环频域指标和时域指标的关系	157
4.3.8 根之和规律	102	5.7.3 闭环频域指标和开环频域指标的关系	158
4.4 控制系统根轨迹的绘制	103	5.8 MATLAB 频域特性分析	160
4.5 广义根轨迹	108	小结	161
4.5.1 参数根轨迹	109	习题	161
4.5.2 正反馈系统的根轨迹	110	第6章 控制系统的校正	166
4.5.3 非最小相位系统的根轨迹	111	6.1 校正的基本概念	166
4.6 控制系统的根轨迹分析	114	6.1.1 校正的定义	166
4.6.1 闭环零点、极点和开环根轨迹增益的确定	114	6.1.2 校正方式	167
4.6.2 闭环零点、极点分布对系统性能的影响	114	6.1.3 校正装置的设计方法	168
4.6.3 利用根轨迹估算系统性能	115	6.2 频率法串联校正	169
4.6.4 开环零、极点对根轨迹的影响	116	6.2.1 串联超前校正	169
4.7 利用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	118	6.2.2 串联滞后校正	172
4.8 用根轨迹法设计小车控制系统	120	6.2.3 串联滞后-超前校正	176
4.8.1 系统建模	120	6.2.4 串联综合法校正	179
4.8.2 控制器的设计	121	6.2.5 PID 调节器	182
小结	123	6.3 频率法反馈校正	185
习题	124	6.3.1 反馈校正原理	185
第5章 频率特性法	127	6.3.2 综合法反馈校正	185
5.1 引例	127	6.4 复合校正	188
5.2 频率特性	127	6.4.1 按扰动补偿的复合校正	188
		6.4.2 按输入补偿的复合校正	190
		6.5 MATLAB 在控制系统校正中的应用	191

小结	193	8.4.1 Z变换定义	249
习题	194	8.4.2 Z变换方法	249
第7章 非线性系统	197	8.4.3 Z变换的性质	251
7.1 引例	197	8.4.4 Z反变换	254
7.2 常见非线性系统及其特点	199	8.4.5 差分方程的解法	256
7.2.1 常见非线性特性	199	8.5 离散系统的传递函数	257
7.2.2 非线性系统的特点	201	8.5.1 Z传递函数的定义	257
7.3 相平面法	204	8.5.2 离散系统的结构图与 开环传递函数	258
7.3.1 基本概念	204	8.5.3 闭环系统的传递函数	261
7.3.2 线性系统的相轨迹	204	8.6 离散系统的稳定性分析	264
7.3.3 相轨迹的做法	208	8.6.1 离散系统的稳定条件	264
7.3.4 非线性系统的相平面分析	211	8.6.2 劳斯稳定判据	265
7.4 描述函数法	214	8.7 采样系统的稳态误差	267
7.4.1 描述函数的概念	214	8.7.1 用终值定理计算稳态误差	267
7.4.2 描述函数的求法	215	8.7.2 用静态误差系数计算稳态误差	268
7.4.3 用描述函数研究非线性系统的 稳定性和自振	220	8.8 暂态响应与传递函数零、极点 分布的关系	271
7.5 基于 MATLAB 的非线性系统分析	225	8.9 采样系统的校正	274
7.6 非线性特性的利用	232	8.9.1 PID 数字控制器的设计方法 ...	274
小结	235	8.9.2 数字控制器的数字化直接 设计方法	275
习题	235	8.9.3 最少拍系统的设计	276
第8章 采样控制系统	240	8.10 MATLAB 在离散系统中的应用	279
8.1 引例	240	8.10.1 连续系统的离散化	279
8.2 采样与保持	241	8.10.2 求采样系统的响应	279
8.2.1 采样过程	241	小结	281
8.2.2 采样定理	243	习题	281
8.2.3 零阶保持器	245	参考文献	285
8.3 差分方程	247		
8.3.1 差分的定义	247		
8.3.2 线性常系数差分方程	248		
8.4 Z变换	249		

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 引 例

自动控制是一个非常有吸引力的研究领域，在过去的几十年中发展起来的自动控制理论解决了大量的自动化问题，使这个理论得到了广泛的应用。正因如此，各工程专业都对大学生和研究生开设了相关的课程。

在这个地球上，我们的生活在很大程度上都依赖于自动运行的系统。当我们说一个自动运行的系统时，就是指它的运行不需要人为的干预。自然界有很多这样的例子，如果将人体作为一个例子来考虑，这个系统持续的自动控制是我们生存的基本要求。例如，将我们的体温保持在 37°C 的自动温控系统以及心跳控制系统、眼球聚焦系统等，它们都可以称为自动系统。这些系统和其他许多人体内的系统一样，都是在我们没有任何有意识干预的情况下自动运行的。实际上，在我们周围还有许多自动运行的人造系统，其中的许多系统我们能够在日常生活中接触或使用。在一个现代化的居室内，温度由温度调节装置自动控制；刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑；在大型办公楼或酒店，电梯调度系统自动发送车辆搭载乘客。这些只是众多自动运行系统中的几个例子。在日常生活中，我们每天都可以碰到自动运行的人造系统，如电子的、机械的、化学的、水力的、金融的和经济的系统，只是在大多数情况下，只有发生了故障时，我们才意识到它们是自动运行的。

虽然我们并不理解自动控制复杂的细节，但却已从现代生活中的洗衣机、电冰箱、电饭煲等生活用品感受到自动控制给我们带来的便利。这些系统具有的在不需要人们干预的情况下自动执行某些功能的能力对我们的生活产生了巨大的影响，自动控制的成就令人着迷和兴奋。

打陀螺是中国最早的娱乐项目之一。陀螺的形状略像海螺，多用木头制成，下面有铁尖，玩时用绳子缠绕，用力抽绳，使陀螺直立旋转。陀螺隐含的物理原理是：当一个力学系统(物体)受到数个力的作用时，若其合力(大小、方向)为零，且各力对任一点之力矩和亦为零，就称此力学系统处于平衡状态。换言之，当物体呈现一种“动者恒动、静者恒静”的状态时，即可称之为“平衡”。物体在很多情况下都能呈现平衡状态，不只是在静止的时候，当它在动的时候也会达到平衡状态(包括星体的运行也是)，有些平衡状态能持久，而有些则很短暂。一般而言，静态的平衡大多属于稳定平衡，动态的平衡则多属于不稳定平衡。当陀螺受力旋转时，因各方向离心力总和达到平衡，因此陀螺能暂时用轴端站立，保持平衡状态。因受到空气阻力、地面摩擦或陀螺重心问题等因素的影响，其旋转的力矩逐渐减弱，等到旋转的动力消失时，陀螺也跟着左摇右晃地倒了下来。因此，如何制作、挑选好的陀螺，掌握、拿捏抛掷的力的要诀，控制抽绳用力的大小、角度，让陀螺抛得更准、转得更

久,便成为许多男孩子玩陀螺时挑战的终极目标。陀螺是一个典型的控制的例子。

自动控制在人类的登月计划中起到了关键的作用,而且在许多年里它都是科幻小说的中心话题。事实上,在过去的 100 年里,科学技术的进步使大量系统的自动控制成为可能,从而提高了生产率,促进了经济增长,改善着人们的生活质量。另外,对我们来说,高度复杂的科技社会对自动控制的需求在未来将持续增长,我们必须准备应对这一挑战。

据考证,现代意义上的自动控制开始于瓦特的蒸汽机。在瓦特之前,已有人发明过各种各样的蒸汽机及相关控制装置,但没有真正地解决问题,主要由于蒸汽的进气和排气是手动操纵的,转速不稳定。瓦特的发明解决了这一问题。蒸汽机的转速调节系统原理如图 1.1 所示。瓦特在蒸汽机的转轴上安了一个小棍,棍的一端和放气阀相连,放气阀松开阀就关闭,转速增加,放气阀按下阀就打开,转速降低;棍的另一端是一个小重锤。棍中间通过支点和转轴连接。转轴转起来的时候,小棍会由于离心力的缘故抬起来。转速太高了,小棍会抬得很高,放汽阀就被按下打开,转速下降;转速太低了,小棍抬不起来,放汽阀就被松开关闭,转速回升。这样,蒸汽机可以自动保持稳定的转速,既保证安全,又方便使用。也就是因为这个小小的转速调节器,瓦特的名字便和工业革命连在了一起。

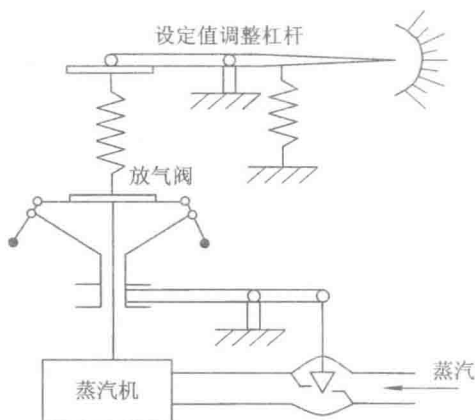


图 1.1 蒸汽机转速调节系统

类似的例子在机械系统里有很多,家居必备的抽水马桶是另一个例子。放水冲刷后,水箱里水位降低,浮子随水面下降,进水阀打开。随着水位的升高,进水阀逐渐关闭,直到水位达到规定高度,进水阀完全关闭,水箱的水正好准备下一次使用。这是一个看似简单但却非常巧妙的水位控制系统,可以说是一个经典的设计。

这些机械系统设计巧妙,工作可靠,可以说是巧夺天工,但是在实用中,人们希望能够有一个系统的方法,可以解决“所有”的自动控制问题,这就是控制“方法”上升到“理论”的由来。

1.2 反馈的基本概念

从小,大人就教我们,走路要看路。为什么呢?要是不看着路,走路走歪了也不知道,结果就是东撞西撞,甚至摔跟头。要是看着路呢?走歪了,马上就看到,赶紧调整脚步,走回到正道上来。这里有自动控制里的第一个重要概念:反馈。

什么是反馈呢?反馈是一个过程,包括:

(1) 设定目标。对小朋友走路的例子来说,就是前进的路线。

(2) 测量状态。小朋友的眼睛看着路,就是在测量自己的前进方向。

(3) 将测量到的状态和设定的目标比较。把眼睛看到的前进方向和心里想的前进方向作比较,判断前进方向是否正确,如果不正确,相差有多少。

(4) 调整行动。在心里根据实际前进方向和设定目标的偏差, 决定调整的量。

(5) 实际执行。也就是实际挪动脚步, 重回正确的前进方向。

在整个走路的过程中, 这个反馈过程周而复始, 不断进行, 这样, 就不会走得七扭八拐了。但是, 这里有一个问题: 如果所有的事情都是在瞬时里同时发生的, 那这个反馈过程就无法工作。要使反馈工作, 一定要有一定的反应时间。还好, 世上之事, 都有一个过程, 这就为反馈赢得了所需要的时间。

小时候, 妈妈在锅里蒸食物, 蒸好了, 从锅里拿出来总是很麻烦, 需要抹布什么的垫着, 免得烫手。但是碗和锅之间的间隙不大, 连手带抹布伸进去颇困难, 如果徒手把热的碗拿出来, 只要动作快, 手起碗落, 则烫不着手。当然, 要是捧着热碗再东晃晃、西荡荡, 那肯定要把手指烫着不可。在从手接触碗到手皮肤温度和碗表面一样, 这里面有一个皮肤逐渐升温的过程, 这就是动态过程。

这个过程中有两个因素要注意: 一个是升温的过程有多快, 另一个是最终的温度可以升到多少。要是知道了这两个参数, 同时知道自己的手可以耐受多高的温度, 理论上可以计算出热碗在手里可以停留多长时间而不至于烫手。

反馈控制过程也叫闭环控制过程。既然有闭环, 那就有开环。开环控制过程就是没有反馈的控制过程, 即设定一个控制作用, 然后就执行, 不根据实际测量值进行校正。开环控制只有对简单的过程有效, 比如洗衣机和烘干机按定时控制, 到底衣服洗得怎么样, 烘得干不干, 完全取决于开始时的设定。对于洗衣机、烘干机, 多设一点时间就是了, 稍微浪费一点, 但可以保证效果。

对于空调机, 就不能不顾房间温度, 仅仅简单地设一个类似开 10 分钟、关 5 分钟的循环, 而应该根据实际温度作闭环控制, 否则房间里的温度难以保证到底会达到多少。

在数学上, 动态过程用微分方程描述, 反馈过程就是在描述动态过程的微分方程的输入项和输出项之间建立一个关联, 这样改变了微分方程本来的性质。自动控制就是通过反馈和动态过程来达到控制目的的。

1.3 术 语

说到控制, 会涉及许多专门的概念, 如对象、过程、系统、扰动、反馈控制、反馈控制系统、随动系统、自动调整系统、过程控制系统等。

对象: 一个设备, 它是由一些零部件有机地组合在一起的, 其作用是完成一个特定的功能。在下面的讨论中, 称任何被控物体(如加热炉、电动机、化学反应器或宇宙飞船)为对象。

过程: 任何被控制的运行状态, 例如化学过程、经济学过程、生物学过程等。

系统: 一个广义的概念, 完成一定任务的一些元部件的组合。系统不限于物理系统, 系统的概念可以应用于抽象的动态现象, 如在经济学中遇到的一些现象。因此, “系统”这个词, 应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等多种现象的系统。

扰动: 一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统内部, 则称为内扰; 扰动产生在系统外部, 则称为外扰。外扰是系统的输入量。

反馈控制: 一种控制过程, 它能够在存在扰动的情况下, 力图减小系统的输出量与参

考输入量(也称给定量,或任意变化时希望的状态)之间的偏差,而且其工作正是在基于这一偏差基础之上进行的。在这里,反馈控制仅仅是对无法预计的扰动(即那些预先无法知道的扰动)而设计的,因为对于可以预计的或是已知的扰动来说,总是可以在系统中加以校正,因而对于它们的测量是完全不必要的。

反馈控制系统:一种能对输出量与参考输入量进行比较,并力图保持两者之间的既定关系的系统,它利用输出量与输入量的偏差来进行控制。

应当指出,反馈控制系统不限于工程范畴,在各种非工程范畴内,诸如经济学和生物学中,也存在着反馈控制系统。

例如,人的机体在某种意义上说,就类似于一个具有许多控制变量的化工设备。在这种传输和化学反应不断进行的过程控制中,包含着许多控制回路。事实上,人的机体是一个极其复杂的反馈控制系统。

随动系统:一种反馈控制系统,在这种系统中,输出量是机械位移、速度或者加速度。因此,随动系统这个术语,与位置(或速度或加速度)控制系统是同义语。在现代工业中,广泛采用了随动系统。例如,采用程序指令的机床的全自动化操作,就可以应用随动系统来完成。

自动调整系统:一种反馈控制系统,在这种系统中,参考输入量或希望的输出量,或者保持常值,或者随时间而缓慢变化,而这种系统的基本任务,正是要在存在扰动的情况下,将实际的输出量保持在希望的数值上。

用恒温器作为控制器的室内加温系统,就是一种自动调整系统。系统中恒温器的温度给定值(即希望的温度值),用来与室内的实际温度进行比较,室外温度变化是该系统的扰动。调整系统的任务,是保持所要求的室内温度不受室外温度变化的影响。自动调整系统的例子很多。例如,压力的自动控制以及电压、电流和频率等电学量的自动控制。

过程控制系统:当自动调整系统的输出量是温度、压力、流量、液位或 pH 值(氢离子浓度)等这样一些变化缓慢的变量时,就称此控制系统为过程控制系统。过程控制在工业中获得广泛应用,如在加热炉的温度控制中,炉温是根据预先制定的程序进行控制的,此类控制又叫程序控制。程序控制是经常采用的一种过程控制系统。例如,预先制定的程序可以是:炉温在一定的时间间隔内,先上升到某一给定温度,然后在另一段时间间隔内再下降到另一给定温度。在这类程序控制中,给定量是按照预先制定的规律变化的,控制器则保持炉温紧紧地跟随给定量变化。

系统方框图:是从控制系统的信息流程图上抽象出来的,它突出了系统中各个环节输入与输出的关系及各环节之间的相互影响。对于定性分析,方框图比原理图清晰方便。我们将系统中各个部分都用一个方框来表示,并标上文字和代号,根据各方框之间的信息传递关系,用有向线段将它们依次连接起来,并标明相应的信息,就得到整个系统的方框图。

在具体探讨一个控制过程时,我们有时并不关心系统中各个部件的详细构造,如体积、重量、材料、强度等,也不特别关心能量流通的路径、功率的大小、效率的高低等,而特别注意的是“信息”的传递、“信息”传递的途径、“信息”的变换等。今后我们会注意到,在方框图中写出各元件的数学模型,可用来进行定量的运算,在进行理论分析时,这将是十分有用的工具。

1.4 自动控制系统示例

1. 热力系统的人工反馈控制

如图 1.2 所示的热力系统,操纵者在这里起了控制器的作用,他希望使热水温度保持在给定温度上。为了测量热水的实际温度,在热水的输出管道内安装了一支温度计,温度计测得的温度就是系统的输出量。操纵者始终监视着温度计,当发现温度高于希望值时,就减少输送到系统中的蒸汽量,以降低其温度;当发现温度低于希望的

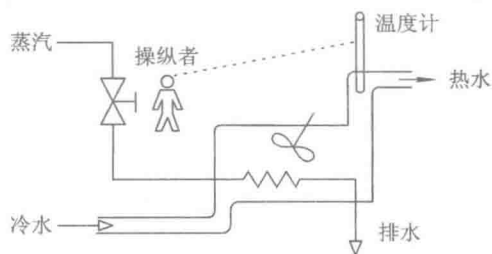


图 1.2 热力系统的人工反馈控制

温度时,操纵者就反向操纵蒸汽阀门,使进入系统的蒸汽量增大,以提高这一温度。这种控制作用,是基于闭环控制原理的。在这个例子中,输出量的反馈(水温)与参考输入量的比较以及控制作用,都是通过人来实现的。这就是一种闭环控制系统,这类系统可以叫做人工反馈系统,或叫人工闭环控制系统。

2. 热力系统的自动反馈控制

如果用自动控制器来取代人工操作,如图 1.3 所示,就变成自动控制系统,或叫自动反馈控制系统、自动闭环控制系统。

将自动控制器刻度盘上指针的位置,标定在(转到)希望的温度,如 80°C 。系统的输出量,即热水的实际温度,由温度测量装置予以测定后,与希望的温度值进行比较,以产生误差信号。为此,在进行比较之前,需通过变送器(将信号从一种物理量变换成另一种物理量的装置)将输出温度变成与输入量(即给定值、参考量)相同的物理量。在自动控制器中,产生的误差信号经过放大后,作为控制器的输出量加到控制阀上,从而改变控制阀的开度,使进入系统的蒸汽量发生相应的变化,最后使实际的水温得到校正。如果没有误差信号,当然也就不必改变阀的开度了。

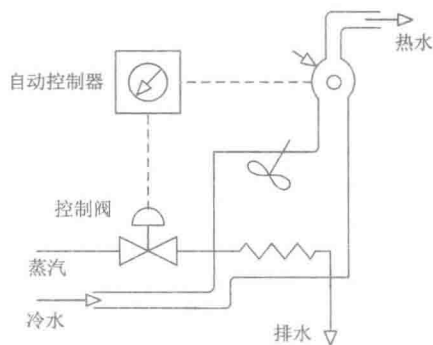


图 1.3 热力系统的自动反馈控制

在上述系统中,环境温度的变化以及输入冷水温度的变化等,都可看做是系统的外扰。

人工反馈和自动反馈控制系统的工作原理是相似的。操纵者的眼睛类似于误差测量装置,操作者的头脑类似于自动控制器,而操纵者的肌体则类似于执行机构。

在复杂的控制系统中,由于系统中各变量之间存在着错综复杂的关系,所以就很难进行人工操纵了。应当指出,即使在简单的系统中,采用自动控制器也有利于消除人工操纵造成的误差。所以,如果要求精确控制,就必须采用自动控制系统。

1.5 控制系统的组成

1.5.1 反馈控制系统的基本组成

反馈控制系统是由各种结构不同的系统部件组成的。从完成“自动控制”这一职能看,

一个控制系统必然包含被控对象和控制装置两个部分,如图 1.4 所示。

控制装置由具有一定职能的各种基本元件组成。在不同系统中,结构完全不同的元部件都可以具有相同的职能。组成系统控制装置的元部件按职能分类主要有以下几种:

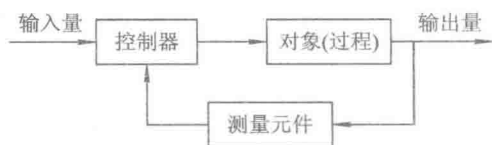


图 1.4 反馈控制系统

测量元件:其职能是测量被控制的物理量,如果这个物理量是非电量,一般要转换为电量。例如,测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压;湿敏传感器利用“湿-电”效应来检测湿度,并将其转换成电信号;电位器、旋转变压器、自整角机等用于检测角度并转换为电压;热电偶用于检测温度并转换为电压等。

给定元件:其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即参考量)。

比较元件:把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参考量进行比较,求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置和电桥等。

放大元件:将比较元件给出的偏差进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。如电压偏差信号,可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器加以放大。

执行元件:直接推动被控对象,使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

校正元件:亦称补偿元件,它是结构或参数便于调整的元件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用电子计算机。

这样,一个负反馈系统就可用图 1.5 所示的框图来表示。

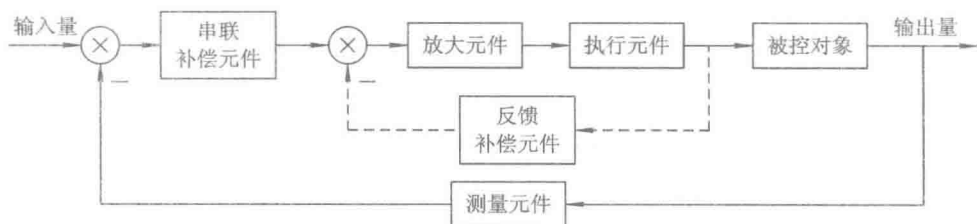


图 1.5 反馈控制系统基本组成

图 1.5 所示的是一个典型的反馈控制系统基本组成,图中用“ $\otimes$ ”号代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与参考量进行比较,“-”号代表两者符号相反,即负反馈;“+”号代表两者符号相同,即正反馈。信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称前向通路;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。包含一个主反馈通路的系统称单回路系统;有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

一般,加到反馈控制系统上的外作用有两种类型,一种是有用输入,一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律,例如,参考量;而扰动是系统不希望有的外作用,它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中,扰动总是不可避免的,它可能作用于系统中的任何元部件上,系统也可能同时受到几种扰动作用。电源电压波动、环境湿度、压力以及负载的变化等都是扰动。

1.5.2 开环控制

如果系统的输出量与输入量间不存在反馈的通道,这种控制系统称为开环控制系统,如图1.6所示。在开环控制系统中,不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。



图 1.6 开环控制系统

大多数洗衣机均是开环控制系统的例子。浸湿、洗涤和漂清过程,在大多洗衣机中是依次进行的,在洗涤过程中,无需对其输出信号,即衣服的清洁程度进行测量。

在任何开环控制中,系统的输出量都不被用来与参考输入进行比较。因此,对应于每一个参考输入量,便有一个相应的固定工作状态与之对应。这样,系统的精度便决定于校准的精度(为了满足实际应用的需要,开环控制系统必须精确地予以校准,并且在工作过程中保持这种校准值不发生变化)。当出现扰动时,开环控制系统就难以实现既定任务了,如果输入量与输出量之间的关系已知,并且不存在内扰与外扰,则可以采用开环控制。沿时间坐标轴单向运行的任何系统,都是开环系统。例如,采用时基信号的交通管制、电炉、闹钟等都是开环控制的例子。

在认识了开环与闭环控制系统的结构与原理后,我们会发现,闭环控制应该是最常用的一种控制方式了。显然,有简单的闭环控制,也有复杂的闭环控制。闭环控制在工程系统和社会经济系统中得到了广泛应用。在生命有机体的生长和进化过程中也普遍存在着这种反馈控制,生命有机体为适应环境的变化而做出有效的动作反应,主要是依靠这种反馈作用。人具有学习能力,能通过学习积累经验,用过去的经验来调节未来行为的策略,并具有通过学习来适应环境和改造世界的能力,本质上也是一种反馈控制。

1.5.3 闭环与开环控制系统的比较

一般地,在开环系统中,从控制结构上来看,只有从输入端到输出端的信号传递通道(称为正向通道或前向通道);从控制原理来看,只有输入量对输出量产生控制作用,是按给定值进行控制的方式;开环控制系统结构比较简单,成本较低;对系统参数变化敏感,抑制扰动能力差,控制精度较低。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合,如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

与开环控制相比,闭环控制具有很大优点。尽管闭环控制系统种类繁多,具体结构不一样,而且它们完成的控制任务也不相同,但从测量偏差、利用偏差信号对受控对象进行控制,以减小或纠正输出量的偏差的过程却是相同的。归纳起来,这种系统的特点如下:

(1) 从控制结构上来看,闭环控制系统中除正向通道外,还必须有从输出端到输入端的信号反馈通道,使输出信号也参与控制作用。闭环控制系统就是由正向通道和反馈通道组成的。

(2) 从控制原理来看,输入量与输出量共同(二者偏差)产生控制作用,是按偏差的控制方式。闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的,只要输出量与给定值之间存在偏差,就有控制作用存在,并力图纠正这一偏差。因而,对于闭环控制系统,不论是给定信号的变化,或者外部扰动的影响,或者系统内部的变化,只要是被控量偏离了给定值,都会产生相应的作用去消除偏差。

(3) 闭环控制系统对系统参数变化不敏感,抑制扰动能力强,控制精度较高。

(4) 闭环控制系统结构比较复杂, 成本较高。为了检测偏差, 必须直接或间接地检测出输出量, 并变换为与输入量相同的物理量, 以便与给定值相比较, 得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节和比较环节, 系统设备投资较大。

虽然闭环控制有很大优点, 但是引入反馈增加了系统的复杂性, 如果闭环控制系统参数的选取不适合, 系统可能会产生振荡, 甚至失稳而无法正常工作, 这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

1.5.4 复合控制系统

除了开环与闭环控制系统外, 在实际应用中还有一种集开环控制结构与闭环控制结构于一体的复合控制系统。

反馈控制是在外部作用(参考输入或扰动)对受控对象产生影响后才能做出相应的控制, 当受控对象具有较大延迟时, 反馈控制不能及时地调节输出的变化。前馈控制能预测输出随外部作用的变化规律, 在受控对象还没有受到影响之前就做出相应的控制, 使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。前馈控制和反馈控制相结合构成了复合控制, 即复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制形式, 也是构成高精度控制的一种有效控制方式, 能使自动控制系统具有更好的控制性能。复合控制基本上具有两种形式: 按参考输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制, 如图 1.7 所示。

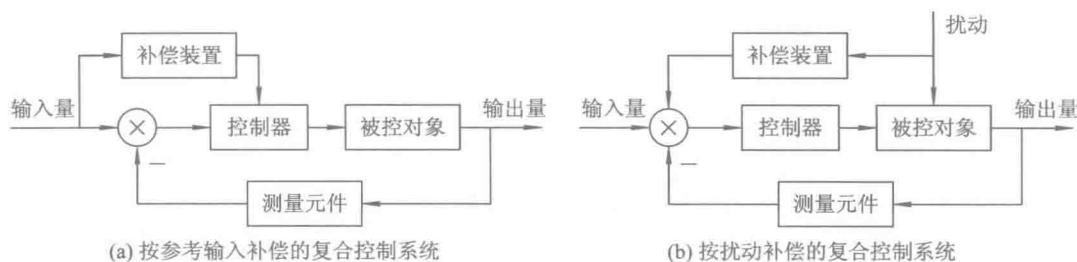


图 1.7 复合控制系统

1. 按参考输入补偿的复合控制系统

如图 1.7(a)所示。通常情况下, 附加的补偿装置可提供一个顺馈控制信号, 与原输入信号一起对被控对象进行控制, 以提高系统的跟踪能力。这是一种对控制能力的加强作用, 往往提供的是输入信号的微分作用, 起到超前控制。

2. 按扰动补偿的复合控制系统

如图 1.7(b)所示。附加的补偿装置所提供的控制作用, 主要起到对扰动影响“防患未然”的效果。应该按不变性原理来设计, 即保证系统输出与作用在系统上的扰动无关, 这一点与补偿作用是截然不同的。

应当注意的是, 附加的顺馈通路相当于开环控制。因此对其本身补偿装置补偿参数要求较高, 否则会由于参数本身的漂移而削弱其补偿效果。此外顺馈通路对闭环回路性能影响不大, 特别是对稳定性无影响, 但能大大提高系统精度, 故获得了广泛应用。

1.6 自动控制系统的分类

随着科学技术的发展, 自动控制技术已渗透到许多领域。对自动控制系统的分类可根

据需要和应用方便,从各个不同的角度加以划分。例如,根据系统元件的属性可分为机电系统、液压系统、气动系统等;根据系统功率的大小可分为大功率系统和小功率系统。分类的目的主要是为了应用上的方便。控制理论研究的重点主要是信息的传递与转换,因此更多的分类方式是以系统信息为出发点来进行的。前面介绍的开环控制与闭环控制,正是从控制信息的传递路径上来划分的。从研究自动控制系统的动态性能、运动规律和设计方法的理论角度,常有以下几种能反映系统基本实质的划分方式。

1. 按给定信号的特征分类

给定信号是系统的指令信息,它代表了系统期望的输出值,反映了系统要完成的基本任务和职能。

1) 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是给定输入一经设定就维持不变,希望输出维持在某一恒定值上。这种系统主要的任务是当被控量受到某种干扰而偏离希望值时,通过自动调节的作用,使它尽可能快地恢复到希望值。例如,温度控制系统(恒温箱)中,温度一经调整,被控量就应与调整好的希望值保持一致。显然,要想使系统输出维持恒定,克服扰动的影响是系统设计中要解决的主要矛盾。

2) 随动控制系统

随动系统的参考量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求被控制量以尽可能小的误差跟随参考量的变化。在随动系统中,扰动的影响是次要的,系统分析、设计的重点是研究被控制量跟随的快速性和准确性。函数记录仪、高炮自动跟踪系统便是典型的随动系统的例子。在随动系统中,如果被控制量是机械位置(角位置)或其导数时,这类系统称之为伺服系统。

3) 程序控制系统

这类控制系统的参考量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控制量迅速、准确地复现参考量,机械加工使用的数字程序控制机床便是一例。程序控制系统和随动系统的参考量都是时间的函数,不同之处在于程序控制系统是已知的时间函数,随动系统是未知的任意时间函数,而恒值控制系统可视为程序控制系统的特例。

2. 按系统的数学描述分类

任何系统都是由各种元部件组成的。从控制理论的角度来看,这些元部件的性能可用其输入输出特性进行分析。按照元件特性方程式的不同,可以将系统分为线性系统与非线性系统。

线性控制系统是由线性元件构成的系统。线性元件是指输入和输出静特性的关系为线性的元件。也可以说,线性系统是可以由线性微分方程描述的系统。当线性微分方程的系数为常数时,称为线性定常系统;当线性微分方程的系数是时间的函数时,称为线性时变系统。

线性系统的主要特点是满足叠加原理和齐次原理。叠加原理是指当系统有多个输入时,系统的输出等于每个输入单独作用下系统的输出之和;齐次原理是指当输入增大或缩小若干倍时,系统的输出也相应增大或缩小若干倍。所以,还可以这样说,凡是既满足叠加原理又满足齐次原理的系统就是线性系统。若控制系统中至少含有一个非线性元件,系统就是非线性系统,或者说用非线性微分方程描述的系统就是非线性系统。非线性微分方

程的特点是系数与方程变量有关。例如,非线性方程

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + y \frac{dy}{dt} + y = r \quad (1-1)$$

可以改写成

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{dy}{dt} + y\right) \frac{dy}{dt} + y = r \quad (1-2)$$

式中, $\frac{dy}{dt}$ 项的系数 $\left(\frac{dy}{dt} + y\right)$ 就与方程的变量 y 有关。实际上,理想的线性系统是不存在的,但在一定条件下,如变量在工作点附近做小范围的变化,或忽略系统中的一些次要的因素时,许多非线性系统可以近似为线性系统。线性系统在数学上处理较为容易,线性系统理论也相当成熟,而非线性系统目前还缺少统一的数学处理方法。

非线性特性明显时,会产生一些比线性系统复杂的现象,有些是我们不希望的,要通过分析加以控制。而有些非线性元件,通过正确地在系统中使用,会收到意想不到的控制效果。近年来在系统中引入非线性特性以改善控制系统质量,已取得了很成功的经验。非线性理论仍在不断发展着。

3. 按系统中信号的形式分类

1) 连续系统

连续系统的特点是系统中各元件的输入信号和输出信号都是时间的连续函数,其运动状态是用微分方程来描述的。

连续系统中各元件传输的信息在工程上称为模拟量,多数物理量都属于这一类。

2) 离散系统

控制系统中只要有一处的信号为脉冲序列或数码时,该系统即为离散系统。这种系统的状态和性能一般用差分方程来描述。实际物理系统中,信息的物理形式为离散信号的并不多见,往往是控制上的需要,人为地将连续信号离散化。

当今时代,计算机作为控制器用于系统控制越来越普遍,计算机进行采样的过程,是把采样信号转换成数字信号来进行运算处理的,A/D转换器承担了这一任务。具有数字信号的系统一般称为计算机控制系统。

离散系统的数学描述形式与连续系统不同,分析研究方法也有不同的特点。随着计算机控制的广泛应用,离散系统的理论方法也愈显重要。

4. 按系统中信号的个数分类

1) 单变量控制系统(SISO)

只有一个输入量和一个输出量的系统,称为单变量控制系统(SISO),又称单输入单输出系统。所谓单变量,是根据系统外部变量的描述来划分的,不计系统内部通路所含的变量。也就是说给定输入是单一的,响应也是单一的,但系统内部的结构可以是多回路的,显然内部变量也可能是多种形式的。内部变量可称为中间变量,输入与输出变量称为外部变量。对系统的性能分析,一般只研究外部变量之间的关系。

在自动控制系统中,许多简单的或基本的控制系统往往都是单变量系统。例如过程控制中的压力或流量调节系统,天线的随动系统,坦克的火炮稳定装置等。单变量控制系统的分析和设计方法已经相当成熟,主要有频率响应法和根轨迹法。基于这些方法的单变量