

普通高等院校“十二五”规划教材
普通高等院校机电工程类规划教材

机械工程控制基础

主 编 谭心

副主编 尹明 钟金豹 张文兴 邢静宜

主 审 王建国

普通高等院校机电工程类规划教材

机械工程控制基础

主 编 谭心

副主编 尹明 钟金豹 张文兴 邢静宜

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书根据应用型本科办学的定位,为适应机械类专业的教学需要而编写。本书讲述了机械控制的基本原理、分析和综合方法及其在机械工程中的实际应用,主要包括以下内容:机械控制的基本概念、研究对象和任务;机电系统数学模型的基本概念及建立方法,拉氏变换的应用,传递函数与方框图的求取、简化与演算等;典型机电系统的时域分析方法、性能指标以及系统误差分析方法;机电系统的频域分析方法;判别线性系统稳定性的基本概念和常用判据;系统的综合与校正的常用方法;根轨迹分析法等。

本书适用于普通高等院校机械类相关专业,既可作为教材使用,也可供相关技术人员作为参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械控制基础/谭心主编. —北京:清华大学出版社,2013

普通高等院校机电工程类规划教材

ISBN 978-7-302-33038-7

I. ①机… II. ①谭… III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 145956 号

责任编辑:庄红权

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:15.25

字 数:369 千字

版 次:2013 年 9 月第 1 版

印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00 元

产品编号:039998-01

前 言

随着新技术的发展,学生学习的课程种类和数量不断增加,而各门课程的学时却不断缩减,造成学生理论学习不深不透,工程应用能力不被重视的现状。本书根据应用型本科办学的定位,为适应机械类专业的教学需要而编写。

本书的特色和价值:

(1) 在教材内容的组织上循序渐进、逐步深化、通俗易懂、概念明晰,强调基本概念的理解及其相互联系,尽量避免高深的数学推导;

(2) 侧重应用,紧密结合机械工程实际,通过实际机电系统中应用的实例讲述机械 engineering 控制的基本概念和分析方法,易教易学;

(3) 采用 Matlab 语言作为辅助工具,以便于读者学习用计算机进行控制系统的仿真与辅助设计,有助于增强学习效果;

(4) 定位准确,突出实用性,以满足普通高等院校机械专业本科生的教学要求。

本书由内蒙古科技大学的谭心、尹明、钟金豹、张文兴和邢静宜编写,其中谭心编写第 1、5 章,尹明编写第 4 章,钟金豹编写第 6、7 章,张文兴编写第 2 章,邢静宜编写第 3 章。全书由谭心统稿,内蒙古科技大学王建国教授主审。

本书在编写过程中,受到内蒙古科技大学教材立项建设基金的资助,并得到了许多老师的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制系统的分类及基本要求	3
1.2.1 自动控制系统的分类	3
1.2.2 自动控制系统的的基本要求	5
1.3 反馈控制系统的基本组成	6
1.4 机械控制工程的研究对象	8
1.5 控制理论的发展	9
1.6 课程的主要内容	13
1.7 生活中的几个实例	13
小结	16
习题	16
第 2 章 系统的数学模型	17
2.1 系统的微分方程	17
2.1.1 线性微分方程	17
2.1.2 建立微分方程的步骤和方法	18
2.1.3 非线性微分方程的线性化处理	20
2.2 拉普拉斯变换与反变换	21
2.2.1 拉氏变换的定义	21
2.2.2 典型函数的拉氏变换	21
2.2.3 拉氏变换的基本定理	23
2.2.4 拉氏反变换	26
2.2.5 用拉氏变换与反变换求解常系数线性微分方程	29
2.3 传递函数	31
2.3.1 传递函数的定义	31
2.3.2 传递函数的零点与极点	32
2.3.3 典型环节的传递函数	33
2.4 系统的传递函数方框图及其简化	41
2.5 反馈控制系统的传递函数	46
2.6 相似原理	49
2.7 工程中典型机电液系统传递函数的建立	51
2.8 数学模型的 Matlab 描述	52
习题	61

第3章 系统的时域分析	65
3.1 时域响应及典型输入信号	65
3.1.1 时域响应	65
3.1.2 典型输入信号	66
3.2 一阶系统的时域响应	68
3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应	68
3.2.2 一阶系统的单位脉冲响应	69
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	70
3.3 二阶系统的时域响应	71
3.3.1 典型二阶系统的数学模型	71
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	73
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	75
3.4 瞬态响应的性能指标	77
3.5 高阶系统的时域响应	83
3.5.1 高阶系统的时间响应分析	83
3.5.2 高阶系统的简化	84
3.6 控制系统的误差分析与计算	85
3.6.1 稳态误差的基本概念	85
3.6.2 输入引起的稳态误差	86
3.6.3 干扰引起的稳态误差	89
3.6.4 减少系统误差的途径	92
3.7 用 Matlab 分析时域响应	93
3.8 实例分析	98
习题	99
第4章 控制系统的频率特性分析	103
4.1 频率特性的基本概念	103
4.1.1 频率响应与频率特性	103
4.1.2 频率特性的求取方法	106
4.2 频率特性的极坐标图	109
4.2.1 极坐标图的基本概念	109
4.2.2 典型环节的极坐标图	110
4.2.3 极坐标图的一般画法	114
4.3 频率特性的对数坐标图	119
4.3.1 对数坐标图的基本概念	119
4.3.2 典型环节的对数坐标图	120
4.3.3 对数坐标图的一般画法	126
4.3.4 用幅频特性曲线求系统传递函数	130
4.4 频率特性的特征量	135

4.5 最小相位系统与非最小相位系统	136
4.5.1 最小相位系统与非最小相位系统	136
4.5.2 产生非最小相位的典型环节	138
4.6 用 Matlab 进行频域分析	138
4.7 实例: 电液位置伺服控制系统	141
习题	143
第 5 章 系统的稳定性分析	145
5.1 系统稳定性的基本概念及稳定的条件	145
5.1.1 系统稳定性的基本概念	145
5.1.2 系统稳定的充分必要条件	147
5.2 代数稳定性判据	148
5.2.1 劳斯稳定性判据	148
5.2.2 赫尔维茨稳定性判据	153
5.3 Nyquist(奈奎斯特)稳定性判据	154
5.3.1 Nyquist 稳定性判据的数学基础	154
5.3.2 Nyquist 稳定性判据	156
5.4 Bode(伯德)稳定性判据	163
5.4.1 Nyquist 图和 Bode 图的对应关系	163
5.4.2 穿越的概念	164
5.4.3 Bode 判据	165
5.5 系统的相对稳定性	167
5.5.1 相位裕度	167
5.5.2 幅值裕度	168
5.6 用 Matlab 分析系统的稳定性	170
5.7 实例: 电液位置伺服控制系统稳定性分析	175
习题	176
第 6 章 系统的性能分析与校正	178
6.1 系统的性能指标	178
6.1.1 时域性能指标	178
6.1.2 频域性能指标	179
6.1.3 综合性能指标(误差准则)	180
6.2 系统的校正	182
6.3 串联校正	183
6.3.1 相位超前校正	183
6.3.2 相位滞后校正	187
6.3.3 滞后-超前校正	191
6.4 PID 校正	193

6.4.1	P 调节器	194
6.4.2	PD 调节器	194
6.4.3	PI 调节器	196
6.4.4	PID 调节器	197
6.5	反馈校正与顺馈校正	198
6.5.1	反馈校正	198
6.5.2	顺馈校正	201
6.6	用 Matlab 对系统进行校正	202
	习题	208
第 7 章	根轨迹法	210
7.1	根轨迹概述	210
7.1.1	根轨迹概念	210
7.1.2	根轨迹方程、相角条件及幅值条件	212
7.2	绘制根轨迹的基本规则	215
7.3	广义根轨迹	224
7.3.1	参数根轨迹	224
7.3.2	零度根轨迹	226
7.3.3	滞后系统的根轨迹	228
7.4	根轨迹分析法	230
7.4.1	主导极点与偶极子	230
7.4.2	系统性能的定性分析	232
	习题	233
	参考文献	236

第 1 章 绪 论

当前,机械制造一个新的发展方向就是综合运用控制理论、微电子学、计算机技术及机械工程等学科方面的理论与技术,来提高生产效能及质量,并推出新的产品。

“机械控制工程”是一门技术科学,也是一门边缘科学。它用控制理论的基本原理研究解决机械工程中的实际技术问题。随着工业生产及科学技术的不断发展,机械控制工程越来越显示出它的重要性,为人们所瞩目。现代机械工程要求机械工程师们不但要具有机械结构现代设计方法和制造方法的知识,同时也要具有机械工程自动控制的知识。通过对本书的学习,可以掌握自动控制理论的基本原理及其在现代机械工程中的应用。

本章着重介绍机械工程控制基础的基本概念及其研究对象和任务;学习本课程的目的和意义;关于控制系统、反馈及反馈控制的基本概念;系统及其模型;控制系统的分类;反馈控制系统的基本组成;对控制系统的基本要求;控制理论的发展和生活中的常见实例。

1.1 概 述

在现代科学技术的众多领域中,自动控制技术起着越来越重要的作用。控制工程基础,也称控制理论基础,主要阐述的是自动控制技术的基础理论。在现代的工业、农业、国防和科学技术等领域中,自动控制技术得到了广泛的应用。控制系统分为人工控制和自动控制。所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,采用控制装置使被控对象(如机器的运行或生产过程的进行)的某些物理量(如速度、位移、电压、电流、压力、流量、温度等)在一定精度范围内按照预期的规律变化。例如,电炉炉温自动控制系统能保持恒温;数控车床按照预定程序自动地切削工件能加工出预期的几何形状;化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定;雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统,自动地将导弹引导到锁定的目标;无人驾驶飞机按照预定轨迹自动升降和飞行;人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等,这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。总之,控制系统要解决的最基本问题就是如何使受控对象的物理量按照预定的变化规律变化。

图 1.1 所示为温度人工控制系统。当箱中的温度受环境温度或电源电压波动等外来的干扰而变化时,为满足箱中温度的恒定要求,可由人工来移动调节器的活动触头,改变加热电阻丝的电流,以控制箱内的温度。箱内的温度是由温度计测量的。这里,被控对象是恒温

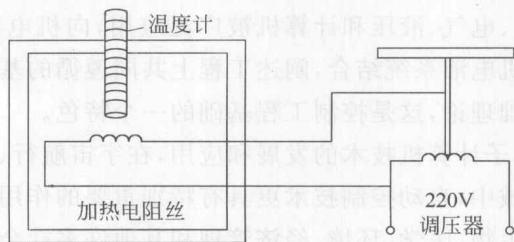


图 1.1 温度人工控制系统

箱,被控量(参数)是温度,控制器是调压器。

恒温箱人工调节过程可归纳如下:

- (1) 观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量)。
- (2) 将被测温度与要求的温度值(给定值)进行比较,两者之差称为偏差,因此得到了温度偏差的大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱内的温度高于所要求的温度值时,可人工移动调压器的触头向左,以减少加热电阻丝的电流,使恒温箱内的温度下降到给定值;反之,当恒温箱内的温度低于所要求的给定温度时,可人工移动调压器的触头向右,以增加加热电阻丝的电流,使恒温箱内的温度上升到给定值。

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程。简单地讲就是监测偏差并用以纠正偏差的过程。

对于这种简单的控制形式,如果能找到一个控制器代替人的职能,那么这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统。如图 1.2 所示,将图 1.1 中的温度计由热电偶代替,并增加了电气、电机及减速器等装置。

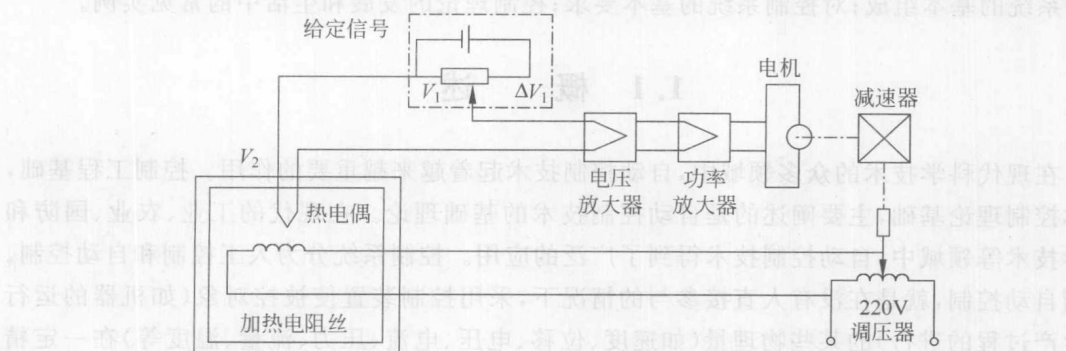


图 1.2 温度自动控制结构图

其中,恒温箱的温度是由给定信号电压 V_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号 V_2 ,并反馈回去与给定信号比较,所得结果即为温度偏差对应的电压信号。经电压及功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,又经传动机构及减速器使调压器的触头移动,使加热电阻丝的电流增加或减少,直至箱内温度达到给定值为止。这时偏差信号为零,电机停止转动,完成控制任务。所以这些装置便组成了一个闭环控制系统。就是这样,箱内温度经自动调节,经常保持在给定值上,这个给定温度由设定 V_1 来得到。

在实际工程中,机械、电气、液压和计算机被广泛应用,向机电液一体化方向发展,这就需要将自动控制技术与机电液系统结合,阐述工程上共同遵循的基本控制规律,即研究工程系统自动控制问题的基础理论,这是控制工程基础的一个特色。

近几十年来,随着电子计算机技术的发展和运用,在宇宙航行、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域中,自动控制技术更具有特别重要的作用。不仅如此,自动控制技术的应用范围已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,自动控制已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

1.2 自动控制系统的分类及基本要求

自动控制系统广泛应用于国民经济的各个部门。随着生产规模的扩大和生产能力的不断提高,以及自动化技术和控制理论的发展,自动控制系统也日益复杂和完善。例如,由单输入单输出的控制系统,发展为多输入多输出的系统;由具有常规仪表和控制器的连续控制系统,发展到由计算机作为控制器的直接数字控制系统,从而实现各种复杂的控制。从不同的角度出发,自动控制系统的类型可以有很多:如按反馈情况,可分为开环控制系统、闭环控制系统;按系统功能(输出变化规律),可分为自动调节系统(恒值控制系统)、随动系统(伺服跟踪系统)、程序控制系统;按系统性能,可分为线性与非线性系统、连续与离散系统等。

1.2.1 自动控制系统的分类

1. 开环控制系统和闭环控制系统

系统按反馈情况可分为开环控制系统(简称开环系统)和闭环控制系统(简称闭环系统)。

1) 开环系统

当一个系统以所需的方框图表示没有反馈回路时,称为开环系统。对自动控制系统而言,开环系统在方框图中就是没有任何一个环节的输入受到系统输出的反馈作用。图 1.1 所示的人工控制的恒温箱即为开环系统。

开环控制系统输入与输出间不存在反馈,输出量对系统的控制无影响,精度取决于系统各部分的标准精度以及工作中元件和参数的稳定程度。其特点是成本较低,结构简单,易维修,稳定性较好;但精度低,易受环境变化的干扰影响。

2) 闭环系统

控制系统的输出与输入间存在着反馈通道,即系统的输出对控制作用有直接影响的系统,称为闭环系统。

闭环控制系统是在开环控制基础上引入人工干预过程演变而来的。图 1.2 所示就是一个闭环控制系统。在这个自动控制系统中,图 1.2 中的温度计由热电偶代替,并增加了电气、电机及减速器等控制装置。

闭环控制系统的特点是由于有反馈环节的存在,因此其精度较高,可及时减小干扰引起的偏差;但其成本较开环控制系统有所增加,结构也较复杂,其稳定性也比开环系统差。在工业与国防等要求较高的应用领域,绝大多数控制系统采用闭环控制。实际中,若要求简单且精度较高的控制任务,可将开、闭环控制结合起来一起应用,从而得到经济效益好、性能也好的控制系统。

上述开环控制系统和闭环控制系统是极其相似的。执行机构类似于人手,测量装置相当于人眼,控制器类似于人脑。另外,它们还有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差。可见,没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或一部分返回输入端,使之与输入量进行比较,比较的结果为偏差。如前所述,基于反馈基础上的“检测偏差用以消除偏差”的原理又称为反馈原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

2. 自动调节系统、随动系统和程序控制系统

在生产中应用最多的闭环系统,往往要求被控制量保持在恒定的数值上。但也有的系统要求输出量按一定规律变化。因此,按照输出变化规律,可将系统分为如下3种类型。

1) 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量是一个恒定值,一经给定,在运行过程中就不再改变(但可定期校准或更改输入量)。这种控制系统的任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒定值。如前述的恒温控制箱、稳压电源。

2) 随动系统

随动系统又称为伺服系统,这种控制系统输入量的变化规律预先不确定。当系统的输入量发生变化时,要求输出量迅速、平稳地随着输入量变化,并且能排除各种干扰因素的影响,准确快速地复现控制信号的变化规律。控制指令可以由操作者根据需要随时发出,也可以由目标物或相应的测量装置发出。例如机械加工中的仿形机床、武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹自动跟踪系统均属于随动系统。

3) 程序控制系统

这种控制系统的输入量不为恒定值,但其变化规律是预先给定的。可将输入量的变化规律预先编制程序,由程序发出控制命令,在输入装置中再将控制指令转换为控制信号,经过全系统的作用,使控制对象按照指令要求运动。例如数控机床的进给系统。

3. 线性系统和非线性系统

自动控制系统按其主要元件的特性方程式的输入输出特征,可以分为线性系统和非线性系统。

1) 线性系统

组成系统的元器件的特性均为线性(或基本为线性),能用线性微分方程描述其输入与输出关系的系统,称为线性系统。线性系统满足叠加原理,其时间响应的特征与初始状态无关。

2) 非线性系统

只要有一个元器件特性不能用线性方程描述,即为非线性系统。描述非线性系统的常微分方程中,输出量及其各阶导数不完全是一次的,或者有的输出量导数项的系数是输入量的函数。非线性系统不能用叠加原理,其时间响应的特征与初始状态有很大关系。对于非线性系统的理论研究远不如线性系统那样完整,一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。

应当指出的是,任何物理系统的特性,精确地说都是非线性的,但是在误差允许范围内,可以将非线性特性线性化,近似地用线性微分方程来描述,这样就可以按照线性系统来处理。非线性系统的暂态特性与其初始条件有关。从这一点来看,它与线性系统有很大的区别。例如当偏差的初始值很小时,系统的暂态过程是稳定的,而当偏差量的初始值较大时,则可能变为不稳定。线性系统的暂态过程则与初始条件无关。

4. 连续系统和离散系统

按照自动控制系统中的信号传递方式,也可将自动控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

1) 连续控制系统

系统中各个参数的变化都是连续进行的,是时间的连续函数(也称模拟量)。图 1.2 所示的恒温箱自动控制系统就属于连续系统。

2) 离散控制系统

系统中某一处或数处的参量是脉冲序列或数码的形式,这种信号是离散的,即数值上和时间上不连续。计算机控制系统就属于离散控制系统,也称作数字控制系统,如图 1.3 所示。



图 1.3 数字控制系统

计算机数字控制系统的给定量、反馈量和偏差量都是数字量。

一般来说,同样是闭环控制系统,数字控制的精度高于连续控制,因为数码形式的控制信号远比模拟控制信号的抗干扰能力强。所以目前在要求控制精度高的场合,大量使用数字控制系统。

1.2.2 自动控制系统的基本要求

在自动控制系统中,当扰动量或输入量发生变化时,输出量偏离了输入量而产生偏差,通过反馈控制作用,经过短暂的过渡过程,输出量又趋于或恢复到原来的稳态值,或按照新的输入量稳定下来,这时系统从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。将输出量处于变化状态的过程称为动态或瞬态,而把输出量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。

对控制系统的基本要求一般可归纳为稳定性、快速性、准确性。

1. 稳定性

由于系统存在着惯性,当系统的各个参数匹配不当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的能力。稳定性是系统工作的首要条件,通常由系统的结构决定,与外界因素无关。

2. 快速性

快速性是指系统输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快慢程度,一般称为动态性能或瞬态性能。一个自动控制系统应能满足瞬态性能的要求。如果控制对象的惯性很大,系统的反馈又不及及时,则输出量在瞬态过程中将产生过大的偏差,达到稳态的时间加长,并呈现各种不同的瞬态过程。

一般来说,在合理的结构和适当的系统参数下,一个系统的瞬态过程多属于衰减振荡过程,即输出量变化很快并产生超调,经过几个振荡后,达到新的稳定工作状态。为了满足生产工艺要求,往往要求系统的瞬态过程不仅是稳定的,并且进行得越快越好,振荡的程度越小越好。亦即要求上升时间和峰值时间等参数要小。前者是瞬态过程的稳定性问题,后者是瞬态过程的性能问题,这些都是设计自动控制系统时必须研究的问题。

3. 准确性

准确性通常用稳态误差来表示,是指在调整过程结束后输出量与输入量之间的偏差,或称为静态精度,这是衡量系统工作性能的重要指标,一个设计合理的自动控制系统其稳态特性应满足工艺的要求。例如,数控机床精度越高,则对系统的准确性要求就越高,这样才能保证更高的加工精度。

综上所述,对控制系统的基本要求是稳、快、准。由于被控对象的具体情况不同,各种系统对稳、快、准的要求也各有侧重。例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定提出较严格的要求。

同一系统稳、快、准是相互制约的。快速性越好,就越可能出现强烈振动;改善稳定性,控制过程又可能过于迟缓,精度也可能变坏。因此,必须兼顾几个方面的要求,根据具体情况合理地解决。分析和解决这些矛盾,是本学科讨论的重要内容。

对于自动控制系统而言,在保证稳定性的前提下,对其快速性和准确性方面的性能指标可按如下类型给出:

(1) 以时域形式给出,即时域性能指标,它包括瞬态性能(快速性与平稳性)指标和稳态性能(准确性)指标。

(2) 以频域形式给出,即频域性能指标,它不仅反映系统在频域方面的特性,而且当时域性能无法求得时,一般可先用频率特性试验来求出该系统在频域中的动态性能,再由此推出时域中的动态性能。

前两种形式的指标之间有确定的关系,因此是等价的,它们都是常规性能指标。

(3) 综合性能指标,它是衡量设置系统的某些重要参数后如何才能保证系统获得一些最优综合性能的测度,即若对这个性能指标取极值,则可获得有关的重要参数值,这些参数值可保证这一综合性能为最优,即最优性能指标。

1.3 反馈控制系统的基本组成

在自动控制系统中,被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量,它可以要求保持为某一恒定值,例如温度、压力、液位等;也可以要求按照某个规定规律运行,例如飞行轨迹、记录曲线等。而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制,但是最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。

在反馈控制系统中,控制装置对被控对象施加的控制作用,取自被控量的反馈信息,用来不断修正被控量与输入量之间的偏差,从而实现对被控对象进行控制的任务,这就是反馈控制的原理。

其实,人就是一个极其复杂而又极其完备的自动控制系统。以体温作为输出,人就是一个自动调节系统;以人追捕某一对象的行动为输出,人就是一个随动系统;以人按计划办事的行动为输出,人就是一个程序控制系统。人的触觉、听觉、嗅觉和味觉等感觉器官都是检测器,人的大脑是中枢控制装置,人的某些器官是执行装置,人的神经系统传递信息,起着联系装置的回路作用。以人作为一个自动控制系统,执行装置中的器官一般也是被控对象。人类最简单的活动,人走路或取物都利用了反馈的原理以保持正常的动作,人抬起腿每走一

步路,腿的位置和速度的信息不断通过人眼及腿部皮肤以及神经感觉反馈到大脑,从而保持正常的步法。下面,通过解剖手从桌上取书的动作过程,透析一下它所包含的反馈控制机理。在这里,书的位置是手运动的指令信息,一般称为输入信号。取书时,首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置,并将这个信息送入大脑(称为位置反馈信息);然后由大脑判断手与书之间的距离,产生偏差信号,并根据其大小发出控制手臂移动的命令(称为控制作用或操纵量),逐渐使偏差减小为零,手便取到书。可以看出,大脑控制手取书的过程,是一个利用偏差(手与书之间距离)产生控制的作用,并不断使偏差减小至消除的运动过程。同时,为了取得偏差信号,必须要有手位置的反馈信息,两者结合起来,就构成了反馈控制。显然,反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程,因此,它也称为按偏差的控制,反馈控制原理就是按偏差控制原理。

通常,我们把取出输出量送回到输入端,并与输入信号相比较产生出偏差的过程,称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,使产生的偏差越来越小,称为负反馈;反之,则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,而且,由于引入了被控量的反馈信息,整个控制过程称为闭合过程,因此反馈控制也称闭环控制。

在工程实践中,为了实现对被控对象的反馈控制,系统中必须配置具有人的眼睛、大脑和手臂功能的设备,以便用来对被控量进行连续的测量、反馈和比较,并按偏差进行控制。这些设备依其功能分别称为测量元件、比较元件和执行元件,并称为控制装置。

反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看,一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分,而控制装置是由具有一定职能的基本工作元件组成的。在不同系统中,结构完全不同的元部件却可以具有相同的职能。因此,根据控制对象和使用元件的不同,自动控制系统有各种不同的形式,但是概括起来,一般均由以下环节组成。

为了便于对一个自动控制系统进行分析以及了解其各个组成部分的作用,经常把一个自动控制系统画成方框图的形式(见图 1.4)。图中方框表示系统的各个组成部分;直线箭头代表作用的方向;在其上的标注表示对方框的输入及输出物理量,⊗代表比较元件。

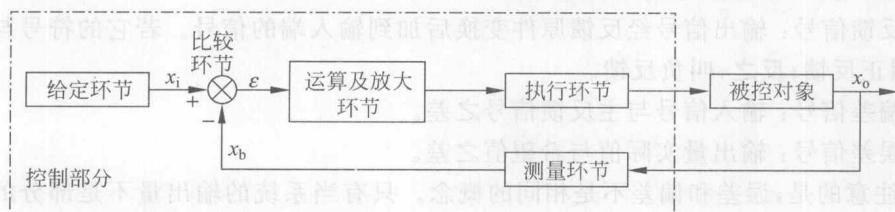


图 1.4 反馈系统的组成

1) 给定环节

它是给出输入信号的环节,用于确定被控对象的“目标值”(或称给定值),给定环节可以用各种形式(电量、非电量、数字量、模拟量等)发出信号。例如,数控机床进给系统的输入装置就是给定环节。

2) 测量环节

它用于测量被控变量,并将被控变量转换为便于传送的另一物理量(一般为电量)。例如,用电位计将机械转角转换为电压信号,用测速电机将转速转换成电压信号,用光栅测量

装置将直线位移转换成数字信号等。前述的热敏元件就为这类环节。一般来说,测量环节是非电量的电测量环节。

3) 比较环节

在这个环节中,输入信号 x_i 与测量环节发出来的有关被控变量 x_o 的反馈量 x_b 相比较,并得到一个小功率的偏差信号 $\epsilon(\epsilon = x_i - x_b)$,如幅值比较、相位比较、位移比较等。偏差信号是比较环节的输出。

4) 运算及放大环节

为了实现控制,要对偏差信号作必要的校正,然后进行功率放大,以便推动执行环节。常用的放大器有电流放大、电气放大、液压放大等。

5) 执行环节

它接收放大环节送来的控制信号,驱动被控对象按照预期的规律运行。执行环节一般是一个有源的功率放大装置,工作中要进行能量转换。例如,把电能通过直流电机转换成机械能,驱动被控对象做机械运动。前述例中的调温装置就属于这类环节。

给定环节、测量环节、比较环节、校正放大环节和执行环节一起,组成了控制系统的控制部分,目的是对被控对象(即被控部分)实现控制。然而,有的装置可兼有两个环节的作用。

反馈控制系统的特点是,利用输入信息与反馈至输入的信息两者之间的偏差对系统的输出进行控制,使被控对象按一定的规律运动。显然,这里的反馈作用就是力图减小反馈信息与输入信息之间的偏差,以期尽可能地获得所希望的输出。因为只要偏差存在,系统的输出就要受到偏差的校正。偏差越大,校正作用越强;偏差越小,校正作用越弱,直至偏差趋向最小。这就是闭环控制系统中的反馈作用。

以上介绍了系统的基本组成,下面介绍几个名词术语。

(1) 输入信号(输出量、控制量、给定量):从广义上指输入到系统中的各种信号,包括扰动信号——这种对输出控制有害的信号在内。一般来说,输入信号是指控制输出量变化规律的信号。

(2) 输出信号(输出量、被控制量、被调节量):输出是输入的结果。它的变化规律通过控制应与输入信号之间保持有确定的关系。

(3) 反馈信号:输出信号经反馈原件变换后加到输入端的信号。若它的符号与输入信号相同,叫正反馈;反之,叫负反馈。

(4) 偏差信号:输入信号与主反馈信号之差。

(5) 误差信号:输出量实际值与希望值之差。

需要注意的是,误差和偏差不是相同的概念。只有当系统的输出量不是部分的而是全部的反馈时,误差才等于偏差。

(6) 扰动信号:人为的激励或输入信号,称为控制信号;偶尔的无法加以人为控制的信号,称为扰动信号或干扰信号。根据产生的部位,扰动信号分为内扰和外扰。扰动也是一种输入量,一般对系统的输出量将产生不利的影响。

1.4 机械控制工程的研究对象

工程控制论研究的是工程技术中的广义系统在一定的外界条件(输入或激励:外加控制干扰)作用下,从系统的一定的初始出发,所经历的由内部的固有特性(由系统的结构与参

数决定的特性)所决定的整个动态历程。

控制基础在研究工程系统、输入和输出之间的动态关系时,可将其大致归纳为以下5个方面:

(1) 当系统已定、输入已知时,求出系统的输出(响应),并通过输出来研究系统本身的有关问题,即系统分析问题。

(2) 当系统已定时,确定输入,且所有确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,即最优控制问题。

(3) 当输入已知时,确定系统,且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,即最优设计问题。

(4) 当输出已知时,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,即滤波与预测问题。

(5) 当输入与输出均已知时,求出系统的结构与参数,建立系统的数学模型,即系统辨识问题。

1.5 控制理论的发展

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展及完善起来的。

早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。例如,我国北宋时代(公元1086—1089年)苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪像台,就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统;1681年Dennis Papin发明了用作安全调节装置的锅炉压力调节器;1765年俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等。

控制理论发展至今大致可分为这么几个阶段:20世纪50年代前的经典控制理论;50年代末的现代控制理论;70年代的大系统理论以及近代出现的智能控制发展阶段。

1. 经典控制理论

控制理论的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统等基于反馈原理的军用装备,进一步促进和完善了自动控制理论的发展。

1788年,英国人瓦特(James Watt)在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。以后人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统中出现的不稳定问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家胡尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性的判据,奠定了频率响应法的