

自动控制原理

袁安富摇主编摇

清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共设8章。第1、2两章讲述自动控制原理的基础知识,第3~5章介绍经典自动控制原理三种主要的分析方法——时域分析法、根轨迹分析法和频域分析法,第6章讲述串联校正,第7章为离散系统的一些基本知识,第8章主要通过一些具体的应用实例来说明自动控制原理的应用。该书结合国内外同类教材,以我国学生的现状为基础,通过大量经过精选的例子来说明自动控制的一些基本原理,使学生能轻松地理解和掌握自动控制的相关知识,并能灵活运用;同时结合著名软件MATLAB,举例说明了该软件在自动控制中的具体应用。

本书侧重于工程应用,内容由浅入深,对于不同层次的学生可灵活挑选其中的内容学习。本书适用对象主要是理工科大学生及企业的相关技术人员。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/袁安富主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2008.8
ISBN 978-7-81123-317-9

Ⅰ. 自… Ⅱ. 袁… 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(2008)第077820号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:宋望溪

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:21.5 字数:537千字

版 次:2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-317-9/TP·420

印 数:1~4 000册 定价:33.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前摇摇言

随着科学技术的发展和社会的进步,自动化学科的发展也很快,在短短的几十年中,已经从经典自动化理论发展到现代控制理论。自动控制的新学科也不断涌现,如智能控制、网络控制、模糊控制等。而且自动化理论已经深入到很多领域,如航空航天、机器人、量子控制、现代物流控制等。在一定程度上,自动化理论的应用情况代表了它们的发展水平。作为现代制造业标志的数控机床是它的典型代表,正是由于自动化理论和制造业的高度结合,才形成了各种高档的、功能强大的数控机床和加工中心。

本书侧重于应用,主要为理工科大学生服务,也可作为相关研究人员、工程技术人员的自学教材。本书的特点是以应用为主,内容深入浅出,通过大量的应用实例解释一些深奥的问题,使学生在具体学习过程中,易于理解,能比较轻松地掌握自动控制原理的相关知识。同时在本书中,还专门设立了一章,介绍了自动化理论怎样在具体的工程实践中得以应用,通过这一章的具体例子来加深前面所学的知识。

教师在具体授课过程中,可根据具体的课时数和要求,调整相应的内容。书中打“*”的内容,教师可根据具体情况来选择学习。

本书共设8章。第1章主要讲述自动控制的一般概念,包含了自动控制的概念、分类方法、组成和发展前景;第2章主要讲述自动控制所涉及的基础知识,如数学模型、传递函数、结构图、信号流图、Mason公式;第3章主要涉及自动控制的时域分析法,其中包含了一、二阶系统的标准式,它们在典型信号作用下的响应、系统的性能指标、系统的稳定性及其判据;第4章讲述自动控制的根轨迹法,主要内容有根轨迹的概念、根轨迹方程、根轨迹的绘制法则、广义根轨迹和零度根轨迹;第5章为频域分析法,主要讲述频域的概念、频域的表达方式、系统在频域的稳定性判据和稳定域度;第6章为串联校正,主要内容为无源网络和有源网络的特性、串联校正、复合校正等;第7章为离散采样系统,包括离散系统基本概念、差分方程、Z变换与Z传递函数,以及离散系统稳定性等;第8章为自动控制在具体工业应用的一些典型实例。

本书第1章、第4~8章由袁安富编写,第2、3章主要由陆振宇编写。

为便于教师教学,本书配有教学课件;为使学生更好地学习和掌握自动控制原理各知识点,本书配有课后习题答案,两者均可从北京交通大学出版社网站(press.bjtu.edu.cn)下载,或发邮件至 cbswce@jg.bjtu.edu.cn 索取。

在本书的编写过程中,研究生陈可做了大量的前期工作,邱晓惠、刘玉娟、傅奇娟做了大量的校对工作,其他很多同仁、朋友对本书的出版提供了很多的帮助和指导,提出了很多宝贵的意见,在此,一并表示最衷心的感谢。没有他们的无私劳动与辛勤汗水,本书不会如此顺利出版。由于作者水平有限,书中难免会出现错误,望批评指正,谢谢。

编摇者

2008年7月

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

目 录

第 1 章 自动控制系统的一般概念	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 自动控制发展历程	(1)
1.3 自动控制的实例	(3)
1.4 自动控制系统的基本组成及要求	(5)
1.4.1 自动控制系统的基本组成	(5)
1.4.2 自动控制系统的基本要求	(6)
1.5 自动控制系统的分类	(6)
1.5.1 按控制方式分类	(6)
1.5.2 按控制系统性能分类	(7)
1.5.3 控制系统其他的分类方法	(8)
1.6 自动控制的发展前景	(8)
1.6.1 自动控制理论的发展	(8)
1.6.2 数控制造业的发展	(9)
1.6.3 电网调度的自动化技术	(11)
1.7 本课程的任务	(12)
附录：自动控制的相关术语	(13)
习题	(14)
第 2 章 控制系统的数学模型	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 运动对象的微分方程	(16)
2.3 线性微分方程的求解	(21)
2.3.1 线性微分方程的特性	(21)
2.3.2 非线性微分方程的线性化	(21)
2.4 控制系统的复域数学模型	(22)
2.5 控制系统的结构图	(27)
2.5.1 结构图的基本组成	(27)
2.5.2 结构图的绘制	(27)
2.5.3 结构图的基本连接方式	(29)
2.5.4 结构图的简化	(31)
2.6 信号流图和梅逊公式	(36)
2.6.1 信号流图的基本术语和性质	(36)
2.6.2 信号流图的绘制	(38)
2.6.3 梅逊增益公式	(40)

摇2.7摇数学模型的实验测定	(45)
摇附录:拉普拉斯变换与反变换	(46)
摇习题	(52)
第3章摇线性系统的时域分析法	(55)
摇3.1摇引言	(55)
摇3.2摇线性控制系统的时域性能指标及典型输入	(55)
摇摇3.2.1摇绝对稳定性、相对稳定性	(55)
摇摇3.2.2摇典型输入信号	(56)
摇摇3.2.3摇系统的时域性能指标	(57)
摇3.3摇一阶系统的时域响应	(58)
摇摇3.3.1摇单位阶跃响应	(59)
摇摇3.3.2摇单位脉冲响应	(60)
摇摇3.3.3摇单位斜坡响应	(60)
摇摇3.3.4摇一阶系统的单位加速度响应	(61)
摇3.4摇二阶系统的时域响应	(62)
摇摇3.4.1摇二阶系统的数学模型	(62)
摇摇3.4.2摇二阶系统的特性	(64)
摇摇3.4.3摇欠阻尼二阶系统的响应	(65)
摇摇3.4.4摇临界阻尼二阶系统的响应	(73)
摇摇3.4.5摇过阻尼二阶系统的响应	(75)
摇摇3.4.6摇二阶系统的性能改善*	(79)
摇摇3.4.7摇非零初始条件的二阶系统响应*	(85)
摇3.5摇高阶系统的时域响应*	(85)
摇3.6摇线性定常系统的稳定性	(89)
摇摇3.6.1摇稳定性的基本概念	(89)
摇摇3.6.2摇劳斯稳定判据	(90)
摇摇3.6.3摇劳斯稳定判据特殊情况	(92)
摇3.7摇线性系统稳态误差的计算	(95)
摇摇3.7.1摇系统类型	(95)
摇摇3.7.2摇不同类型系统的稳态误差	(96)
摇摇3.7.3摇带扰动作用线性系统的性能分析*	(98)
摇习题	(100)
第4章摇自动控制系统的根轨迹法	(104)
摇4.1摇根轨迹概念	(104)
摇4.2摇根轨迹增益及根轨迹方程	(105)
摇摇4.2.1摇根轨迹增益	(105)
摇摇4.2.2摇根轨迹方程	(107)
摇4.3摇根轨迹绘制的基本法则	(110)
摇4.4摇使用 MATLAB 绘制根轨迹	(126)

摇摇4.4.1摇求系统根轨迹的函数 rlocus ()	(126)
摇摇4.4.2摇求系统根轨迹的函数 rlocfind ()	(129)
摇摇4.4.3摇零极点分布图函数 pzmap ()	(130)
摇摇4.4.4摇根轨迹设计工具	(130)
摇摇4.5摇根轨迹与系统性能的关系	(134)
摇摇4.5.1摇根轨迹与系统性能之间的关系	(135)
摇摇4.5.2摇利用根轨迹设计控制系统	(140)
摇摇4.6摇广义根轨迹*	(143)
摇摇4.6.1摇参数根轨迹	(143)
摇摇4.6.2摇零度根轨迹	(147)
摇习题	(151)
第5章摇自动控制系统的频域分析法	(154)
摇摇5.1摇引言	(154)
摇摇5.2摇频率特性的表示方法	(154)
摇摇5.2.1摇幅相频率特性曲线图	(154)
摇摇5.2.2摇对数频率特性图	(156)
摇摇5.2.3摇其他频率表示方法*	(158)
摇摇5.3摇开环典型环节频率特性绘制	(159)
摇摇5.3.1摇典型最小相位环节的幅频曲线	(159)
摇摇5.3.2摇典型非最小相位环节的幅频曲线*	(165)
摇摇5.4摇一般系统频率特性的绘制	(166)
摇摇5.5摇特定系统频率特性的表示方法	(169)
摇摇5.5.1摇 v 型开环传递函数的幅相曲线绘制	(169)
摇摇5.5.2摇 v 型开环传递函数的对数频率特性曲线的绘制	(172)
摇摇5.5.3摇带二阶零阻尼系统开环传递函数幅相曲线的绘制	(173)
摇摇5.5.4摇带二阶零阻尼系统开环传递函数对数频率特性曲线的绘制	(177)
摇摇5.5.5摇带延迟环节系统幅相曲线的绘制	(179)
摇摇5.6摇频率特性的重要性质*	(180)
摇摇5.7摇频域系统的稳定性	(182)
摇摇5.7.1摇基本概念及数学基础	(182)
摇摇5.7.2摇奈奎斯特稳定性判据	(189)
摇摇5.7.3摇奈奎斯特稳定性判据应用举例	(191)
摇摇5.7.4摇对数频率特性的稳定性判据	(201)
摇摇5.8摇控制系统的稳定裕度	(204)
摇摇5.8.1摇幅值裕度	(205)
摇摇5.8.2摇相角裕度	(205)
摇摇5.8.3摇稳定裕度举例	(205)
摇摇5.8.4摇系统稳定性小结	(207)
摇摇5.9摇使用 MATLAB 绘制系统的频率特性	(208)

摇摇5.9.1	摇摇控制系统的幅相特性的绘制	(208)
摇摇5.9.2	摇摇控制系统的对数频率特性的绘制	(210)
摇摇5.9.3	摇摇控制系统的 Nichols 曲线的绘制	(212)
摇摇5.9.4	摇摇控制系统稳定裕度的计算和判断	(213)
摇摇5.9.5	摇摇带延迟环节系统的分析	(215)
摇摇5.10	摇摇闭环系统的频域性能指标	(217)
摇摇5.10.1	摇摇闭环控制系统的带宽	(217)
摇摇5.10.2	摇摇闭环系统的带宽对系统性能的影响	(217)
摇摇5.10.3	摇摇闭环系统与开环系统之间的关系	(219)
摇摇5.10.4	摇摇闭环二阶系统频域指标和时域指标之间的关系	(222)
摇摇5.10.5	摇摇Nichols 图线的应用	(224)
摇摇5.11	摇摇频域系统的设计举例	(227)
摇摇5.11.1	摇摇给定目标性能, 设计系统传递函数	(227)
摇摇5.11.2	摇摇远程遥控侦察车	(231)
摇摇5.11.3	摇摇雕刻机控制系统	(233)
摇摇附录:	傅氏变换	(235)
摇摇习题		(240)
第6章	摇摇自动控制系统的串联校正	(245)
摇摇6.1	摇摇引言	(245)
摇摇6.2	摇摇常用校正装置	(245)
摇摇6.2.1	摇摇无源校正网络	(245)
摇摇6.2.2	摇摇有源校正装置	(250)
摇摇6.2.3	摇摇PID 控制器	(253)
摇摇6.3	摇摇系统的串联校正	(254)
摇摇6.3.1	摇摇频率响应法校正方法	(254)
摇摇6.3.2	摇摇串联超前校正	(255)
摇摇6.3.3	摇摇串联滞后校正	(259)
摇摇6.3.4	摇摇串联滞后-超前校正	(262)
摇摇6.3.5	摇摇串联校正的预期频率特性综合法	(265)
摇摇6.4	摇摇反馈校正	(269)
摇摇6.4.1	摇摇反馈校正的原理	(269)
摇摇6.4.2	摇摇反馈校正的特点	(270)
摇摇6.4.3	摇摇反馈校正的综合	(271)
摇摇6.4.4	摇摇测速-超前网络反馈校正	(272)
摇摇6.5	摇摇复合校正	(274)
摇摇6.5.1	摇摇按扰动补偿的复合校正	(274)
摇摇6.5.2	摇摇按输入补偿的复合校正	(276)
摇摇6.5.3	摇摇串联综合法校正	(279)
摇摇6.5.4	摇摇串联工程综合设计法	(283)

摇习题	(286)
第7章摇离散采样系统	(289)
摇7.1摇概述	(289)
摇7.2摇计算机控制系统的组成及特点	(289)
摇摇7.2.1摇计算机反馈控制系统	(289)
摇摇7.2.2摇计算机控制系统的组成	(290)
摇摇7.2.3摇计算机控制系统的特点	(291)
摇7.3摇信号转换	(292)
摇摇7.3.1摇A/D 转换	(292)
摇摇7.3.2摇采样信号	(293)
摇摇7.3.3摇采样定理	(294)
摇摇7.3.4摇采样周期 T 的选取	(294)
摇摇7.3.5摇信号恢复与保持器	(295)
摇7.4摇Z 变换	(295)
摇摇7.4.1摇采样信号拉氏变换	(296)
摇摇7.4.2摇Z 变换的定义	(296)
摇7.5摇Z 变换的性质和定理	(297)
摇7.6摇Z 变换的求法	(300)
摇摇7.6.1摇级数求和法	(300)
摇摇7.6.2摇基于 Z 变换定理求法	(301)
摇摇7.6.3摇部分分式展开法	(301)
摇摇7.6.4摇留数算法	(302)
摇7.7摇Z 反变换	(303)
摇摇7.7.1摇幂级数展开法	(303)
摇摇7.7.2摇部分分式展开法	(304)
摇摇7.7.3摇反演积分法	(305)
摇7.8摇Z 传递函数	(306)
摇摇7.8.1摇Z 传递函数的定义	(306)
摇摇7.8.2摇Z 传递函数与单位脉冲响应序列的关系	(307)
摇7.9摇离散系统的稳定性分析	(307)
摇摇7.9.1摇离散系统稳定性的概念	(307)
摇摇7.9.2摇离散系统稳定性判据	(308)
摇7.10摇线性离散系统的响应分析	(309)
摇习题	(312)
第8章摇自动控制系统的工业应用 [*]	(314)
摇8.1摇典型控制单元	(314)
摇摇8.1.1摇弹簧	(314)
摇摇8.1.2摇电位差计和变阻器	(315)
摇摇8.1.3摇伺服电机	(316)

摇8.2摇典型控制器	(317)
摇摇8.2.1摇液压控制器	(317)
摇摇8.2.2摇电气控制器	(319)
摇摇8.2.3摇链式控制	(321)
摇摇8.2.4摇比例控制	(323)
摇8.3摇工业应用实例	(326)
摇摇8.3.1摇蒸汽发生器	(326)
摇摇8.3.2摇水处理系统	(327)
摇摇8.3.3摇空气调节系统	(328)
摇摇8.3.4摇无人驾驶飞机	(329)
参考文献	(331)

第 1 章 自动控制系统的一般概念

1.1 引言

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。人体是一个典型的自动控制系统，它可根据环境的变化自行调节各组成部分，使其维持在一个相对稳定的状态，如将体温保持在 37°C 左右，心跳控制在一定的范围内。自然界有很多这样的例子，如水箱中热水的温度和水高度的控制系统，可将水的温度和高度维持在一定的范围内；导航控制系统可使汽车自动保持在设定车速；刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑；等等，这些都涉及自动控制系统。

从上述可看出，所谓自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。具有这种控制功能的系统就称为自动控制系统。

自动控制从其问世至今短短的几十年时间里，借助于科学技术的发展，其学科和相关技术发展得非常快。从而极大地改善了人类的劳动环境、促进了经济增长、提高了人类社会的生活水平。在军事上，从自动控制学科问世开始，它就得到了广泛的应用，借助于自动控制理论，极大地提高了武器的打击精度和杀伤力（如巡航导弹、精确制导导弹、太空武器等）；在工农业、交通运输、航空航天等领域，自动控制在其中所起的作用也越来越重要（如高速铁路系统、卫星导航系统等）。下面从制造业和能源产业这两个方面来简单叙述自动控制在当今世界所占的地位。

众所周知，数控机床是根据零件形状进行编程，机床能根据所输入的程序自动完成对零件的加工。由于它具有独特的优点，因此，在当今制造业中所起的作用越来越重要，很多高精度的产品和形状复杂的零件均由数控设备进行加工。目前，数控制造业已经代表了一个国家技术的先进程度。而对数控机床而言，要完成对不同形状零件的加工，除了相应的软件系统外，还必须配备一个完整的自动控制系统，该系统性能的好坏，直接影响或决定了数控机床的性能。

在当前社会，能源问题已经成了制约一个国家发展的瓶颈，引起了各国的重视。开发和利用各种新能源也成了各国科学家关注的焦点，其中核能是当今世界上最新和最有前途的一种新能源。核电站的建设非常快，全球的装机容量的上升速度也非常快，如在我国，自建成第一座核电站——秦山核电站后，又很快地建设了大亚湾核电站及其他的核电站。核电站因为需要靠核反应堆来进行发电，因此对核反应堆的控制对于整个核电站安全运行而言，占据着举足轻重的地位，其意义也是不言而喻的。

1.2 自动控制系统发展历程

1769 年，世界上第一个应用于工业过程的反馈控制系统诞生了，James Watt 通过飞球调

速机构来控制蒸汽机的转速。如图 1-1 所示。

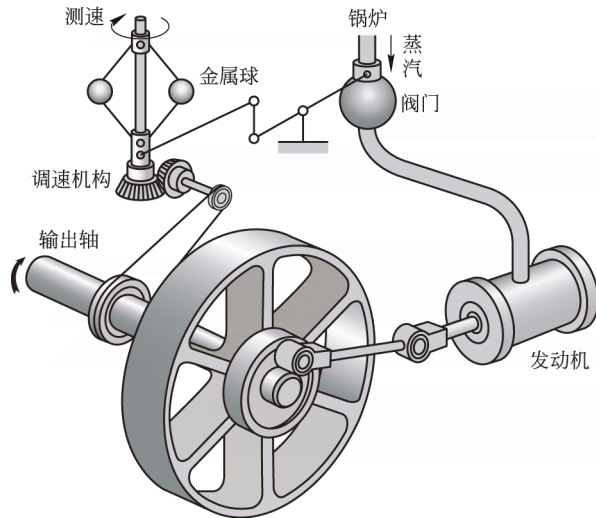


图 1-1 摇Watt 设计的飞球调速机构示意图

从图示机构可以看出，它首先测量输出轴的转速，并通过该转速来控制金属飞球的旋转运动，进而控制阀门的开度，达到控制进入发动机蒸汽量的目的。如当速度增加时，球旋转时就远离其旋转轴，结果使阀门的开度减小，降低发动机的输出功率，从而降低输出轴的转速；反之亦然。其后，自动控制理论得到了很快发展，现列表如下^①：

- 摇1800年，Eli Whitney 在头盔生产中开始了可交换零件的生产，这被认为是批量生产的开端；
- 摇1868年，J. C. Maxwell 对蒸汽发动机调速机的控制形成了一个数学模型；
- 摇1913年，Henry Ford 在汽车生产中引入了机械装配机；
- 摇1922年，Minorsky 研制船舶操纵自动控制器，并证明了从系统的微分方程确定系统的稳定性；
- 摇1927年，H. W. Bode 分析了反馈放大器；
- 摇1932年，Nyquist 提出了一种相当简便的方法，即根据对稳态正弦输入的开环响应，确定闭环的稳定性；
- 摇1934年，Hezen 提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念，讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器式伺服机构；
- 摇19世纪40年代，频率响应法为闭环控制系统提供了一种可行方法，从20世纪40年代末到50年代初，Evans 提出并完善了根轨迹法；
- 摇1952年，数控机床问世；
- 摇1954年，George 研发了 PAT (Programmed Article Transfer)，被认为是第一个工业机器人设计；

^① 多尔夫，毕晓普. 现代控制系统. 北京：科学出版社，2005. www.ertongbook.com

- 20 世纪 60 年代，数字计算机的出现为复杂系统的时域分析提供了可能，因此利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论应运而生，从而适应了现代设备日益增加的复杂性；同时也满足了军事、空间技术和工程应用领域对精确度、重量和成本方面的严格要求；
- 1970 年，状态变量模型及最优控制问世；
- 1980 年，Robust 控制被广泛研究；
- 1990 年，以出口为导向的制造企业开始注重自动化；
- 1994 年，反馈控制被广泛地应用于汽车工业，可靠性、鲁棒控制在制造业中的需求日益上升；
- 1997 年，首台能自治漫游的装置——旅行者号 (Sojourner) 运行在火星表面；
- 1998—2003 年，首次开发并应用了具有人工智能功能的微型机械。

1.3 自动控制的实例

现通过几个实例来说明自动控制理论在当代社会发展中所起的作用。

1. 电阻炉温控制系统

在现代工业的很多场合，需要对工业锅炉的温度进行控制。随着计算机技术的发展，使用微型计算机来控制炉温，具有精度高、功能强、自动化程度高、操作简单等特点。它也是今后进行工业控制的发展方向。图 1-2 为某工业用微型计算机炉温控制系统的原理图。图中的电阻丝通过晶闸管主电路加热，炉温期望值用计算机键盘预先设置，炉温实际值由热电偶进行检测，并将此检测到的值经过放大、滤波后，经 A/D 输入到计算机中。计算机根据所接收到的值与事先设置的期望值进行比较，将所得到的差值根据预定的控制算法，计算出相应的控制量，再经 D/A 转换变成电流，通过触发器控制晶闸管导通角，从而改变电阻丝中的电流值，达到控制炉温的目的。

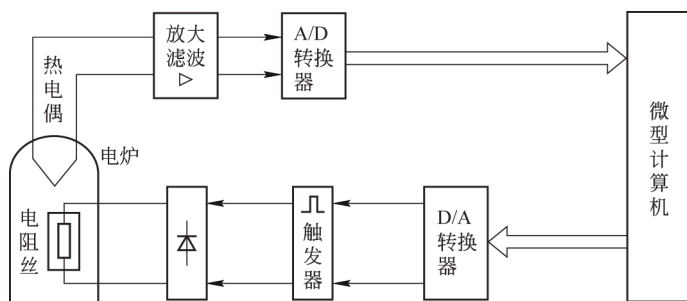


图 1-2 电阻炉温控制系统原理图

2. 飞机自动驾驶仪系统

飞机自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动控制装置。它可以稳定飞行的姿态、高度和航迹，可以操纵飞机爬高、转弯和下降。

飞机自动驾驶仪是通过控制飞机的三个操纵面（升降舵、方向舵和副翼）的偏转，改变舵面的空气动力学特性，以形成围绕飞机质心的旋转转矩，从而改变飞机的飞行

姿态。

图 1-3 为飞机自动驾驶仪控制系统的工作原理图。在该图中，飞机是被控对象，俯仰角 θ 是被控量，其他为控制测量装置，扰动主要指的是大气干扰。图中垂直陀螺仪作为测量元件用来测量飞机的俯仰角，当飞机以某给定的俯仰角 θ_0 水平飞行时，陀螺仪的电位器没有电位输出；如果飞机受到大气的干扰，使得飞机的俯仰角偏离了期望值（如使机头向下），陀螺仪的电位器就会输出与偏离值成正比的信号，此信号经放大后，用来驱动舵机，一方面推动升降舵面向上偏转，产生使飞机抬头的转矩；另一方面带动反馈电位器滑臂，输出与舵偏角成正比的电压并反馈到输入端，以达到减小偏差的目的，随着偏差的减小，陀螺仪电位器的输出信号也越来越小，直到与期望值一致，这时，舵面也恢复到正常的飞行状态。

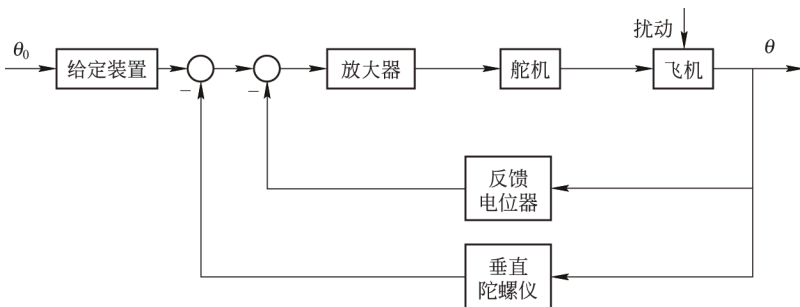


图 1-3 飞机自动驾驶仪控制系统工作原理图

3. 温度控制系统

图 1-4 所示为一个热力系统的人工反馈控制示意图，在这里人起到了控制器的作用，通过人工控制可使热水温度保持在某一温度值。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。操作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，以降低温度；当发现温度低于希望的温度时，操作者就反向操纵蒸汽阀门，使进入系统的蒸汽量增大，以提高温度。

从上述控制过程可以看出，控制系统的输出量（水温）与参考输入量进行比较，通过它们的差值来采取相应的控制动作。只是在本例中，所有这些动作均由人工来实现的，正因如此，这类系统被称作为人工闭环控制系统。

4. 温度自动控制系统

如在上例中，将人的作用采用相应的自动控制装置来代替，则成为一个自动控制系统（如图 1-5 所示）。在该系统中，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），由温度测量装置对其进行测量，将该测量值通过变送器转变成与输入量相同的物理量后，与输入量进行比较，将所得的误差经过放大后，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。

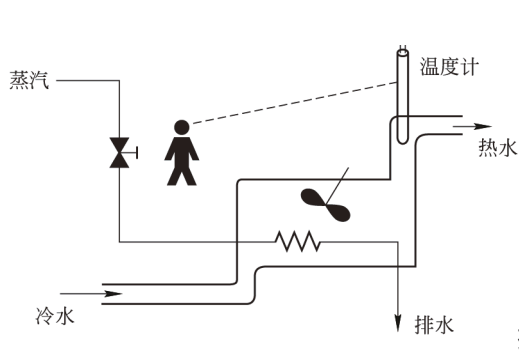


图 1-4 温度控制系统示意图

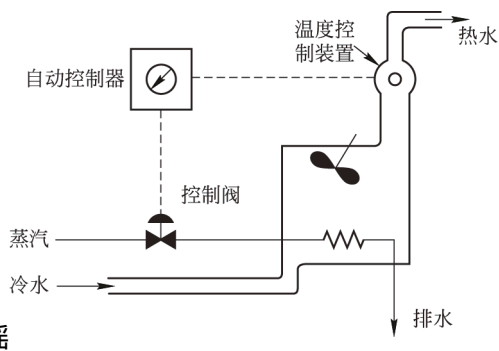


图 1-5 温度自动控制系统示意图

1.4 自动控制系统的基本组成及要求

1.4.1 自动控制系统的基本组成

在自然界中，自动控制系统多种多样，它们分别完成不同的控制任务，从“自动控制”的角度来看，尽管在不同系统中，元部件的结构完全不同，但是都可以具有相同的职能。作为一个完整的控制系统，应该由以下几个部分组成。

(1) 被控对象：就是整个控制系统的控制对象。

(2) 执行部件：根据所接收到的相关信号，使得被控对象产生相应的动作。常用的执行元件有阀、电动机、液压马达等。

(3) 给定元件：给定元件的职能就是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参考量）。

(4) 比较元件：把测量元件检测到的被控量的实际值与给定元件给出的参考值进行比较，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。

(5) 测量反馈元件：该元件的职能就是测量被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般需要将其转换成为电量。常用的测量元部件有测速发电机、热电偶、各种传感器等。

(6) 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。

(7) 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，用以改善系统的性能。常用的校正元件有电阻、电容组成的无源或有源网络，它们与原系统串联或与原系统构成一个内反馈系统。

图 1-6 给出了反馈控制系统的基本组成框图。图中“○”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，“-”代表两者符号相反，即负反馈；“+”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。

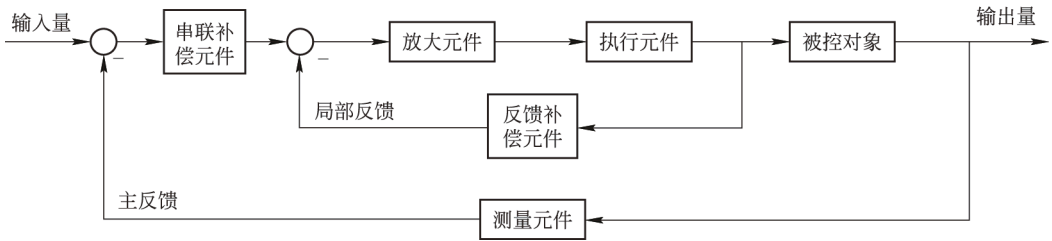


图 1-6 反馈控制系统的基本组成框图

1.4.2 自动控制系统的的基本要求

尽管在现实生活中，自动控制系统有不同的类型，对每一个系统也有其特殊的要求，然而从自动控制理论的角度出发，所有这些系统在性能方面均有共同的要求，即稳定性、准确性和快速性。

(1) 稳定性：对恒值系统而言，要求当系统受到扰动后，经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。而对随动系统而言，被控制量始终跟踪参考量的变化。稳定性通常由系统的结构决定的，与外界因素无关，系统的稳定性是对系统的基本要求，不稳定的系统不能实现预定任务。

(2) 准确性：控制系统的准确性一般用稳态误差来表示。即系统在参考输入信号作用下，系统的输出达到稳态后的输出量与参考输入所要求的期望输出量之差叫作稳态误差。显然，这种误差越小，表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

(3) 快速性：对过渡过程的形式和快慢的要求，一般称为控制系统的动态性能。系统的快速性主要反映系统对输入信号的变化而作出响应的快慢程度，如高射炮射角随动系统，虽然炮身最终能跟踪目标，但如果目标变动迅速，而炮身行动迟缓，仍然抓不住目标。

由于被控对象具体情况的不同，各种系统对上述三方面性能要求的侧重点也有所不同。例如，随动系统对快速性和稳态精度的要求较高，而恒值系统一般侧重于稳定性能和抗扰动的能力。此外，在同一个系统中，上述三方面的性能要求通常也是相互制约的，如为了提高系统动态响应的快速性和稳态精度，就需要增大系统的放大能力，而放大能力的增强，必然会使系统动态性能变差，甚至会使系统变得不稳定。反之，若强调系统动态过程平稳性的要求，系统的放大倍数就应较小，从而导致系统稳态精度的降低和动态过程的缓慢。由此可见，系统动态响应的快速性、高精度与动态稳定性之间是一对矛盾体，在实际使用中，需要根据特定的系统，综合协调各项性能指标。

1.5 自动控制系统的分类

自动控制系统有很多种分类方法，目前常用的分类方法有以下几种。

1.5.1 按控制方式分类

如按控制方式进行分类,可分为开环控制系统和闭环控制系统。在介绍这两种系统之前,首先介绍反馈的概念。所谓反馈就是把取出的输出量送回输入端,并与输入信号相比较产生偏差信号的过程。若反馈的信号与输入信号相减,使产生的偏差越来越小,则称为负反馈;反之,则称为正反馈。

如果系统的输出量与输入量之间不存在反馈通道,则这种控制方式就称为开环控制,具有开环控制的系统称为开环控制系统(如图1-7所示)。



图 1-7 开环控制系统示意图

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。开环控制系统的结构特点就是结构简单,但控制的精度较差。只有在比较稳定(或扰动较小时)的场合或者控制精度要求比较低的场合,才采用开环控制系统。

全自动洗衣机就是典型的开环控制系统的例子。洗衣过程(如浸湿、洗涤和漂洗等)均按照洗衣机预先存储的程序依次进行,在整个洗涤过程中,无需对其输出信号(即衣服的清洁程度)进行检测,一旦程序执行完毕,就意味着衣服被清洗干净,至于衣服是否真正洗干净则不在洗衣程序的考虑范围内。

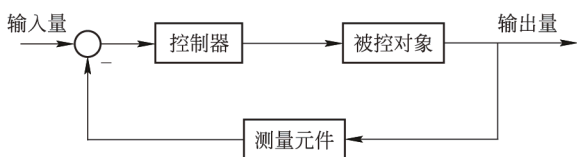


图 1-8 闭环控制系统示意图

如果在一个控制系统中,将系统的输出量通过某测量机构对其进行实时测量,并将该测量值与输入量进行比较,形成一个反馈通道,从而形成一个封闭的控制过程,这样的控制就称为闭环控制。闭环控制也被称为反馈控制,具有闭环控制的系统称为闭环控制系统(如图1-8所示)。

闭环控制与开环控制系统的区别如下。

(1) 控制方式:闭环控制属于反馈控制,它控制的是偏差,这种控制方式可以抑制内、外扰动对被控制量的影响,控制精度高;而开环控制则属于顺向作用,它没有反向的联系,没有修正偏差的能力,抗扰动性也较差,因此控制精度也较低。

(2) 系统结构:开环控制系统结构简单、调整方便、成本低;而闭环控制结构复杂、设计分析麻烦,制造成本高。

(3) 使用场合:开环控制系统适合于精度要求不高或扰动影响较小的场合;而闭环控制系统适合于控制精度较高,或扰动较明显的场合。

1.5.2 按控制系统性能分类

如按系统性能进行分类,可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等。

1. 线性控制系统

所谓线性连续控制系统,指的是整个系统可表示成输入量与输出量的线性微分方程,如

果系数是常系数,则这个系统被称之为线性定常控制系统;如果微分方程的系数随时间变化,则称为线性时变控制系统。

线性定常控制系统按其输入量的变化规律不同可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 恒值控制系统:如恒温箱的温度控制系统就属于恒值控制系统,因为温度一经调整,被控量就应与调整好的参考量保持一致。类似的系统还有压力控制系统、液位控制系统等。

(2) 随动系统:这类系统的输入量是预先未知的,它是随时间任意变化的函数,要求系统的被控制量以尽可能小的误差跟随输入信号变化。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。如在随动系统中,被控制量是机械位置(角位置)或其导数时,则这类系统又被称之为伺服系统。

(3) 程序控制系统:这类控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求系统的被控制量能迅速、准确地复现。机械加工使用的数字程序控制机床便是其中典型的一例。程序控制系统和随动系统的不同之处在于程序控制系统是已知的时间函数,而随动系统则是未知的任意的时间函数。

2. 非线性控制系统

系统中只要有一个元部件的输入输出特性是非线性的,这类系统就称为非线性控制系统。严格地说,实际物理系统中都含有程度不同的非线性元部件(如二极管和三极管的饱和特性、死区特性、齿轮传动系统的传动间隙、各种运动部件之间摩擦等)。

1.5.3 摇控制系统其他的分类方法

除了上述常用的分类方法外,还有以下几种分类法。

(1) 按元件类型分为机械控制系统、电气控制系统、机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统、生物控制系统等。

(2) 按系统功用分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统。

1.6 摇自动控制的发展前景

随着科学技术的不断向前发展和人类社会的不断进步,自动控制理论也在不断地发展。如今在各行各业均可找到自动控制的产物。下面从各方面来阐述这个问题。

1.6.1 摇自动控制理论的发展^①

控制理论发展至今已历经好几代,对于第三代控制理论而言,它有两大的主要的发展分支,即大系统理论和智能控制理论。所谓大系统理论,主要采用状态方程及代数方程的数学模型,利用“分解”和“协调”相结合的设计原则,使求解复杂的控制问题得到简化,并

^① 本节内容主要摘自参考文献[2]~[11]。请访问: www.ertongbook.com