



PUTONG GAODENG JIAOYU GUIHUA JIAOCAI

• 普通高等教育规划教材 •

[四川省高等教育精品课程教材]

自动控制理论

毕效辉 主编

于春梅 安永泉 副主编

黄家英 主审

AUTOMATIC CONTROL THEORY



中国轻工业出版社

普通高等教育规划教材

自动控制理论

毕效辉 主 编
于春梅 安永泉 副主编
黄家英 主 审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制理论 / 毕效辉主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2007.1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-5019-5680-4

I. 自... II. 毕... 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 (2006) 第 126247 号

内容简介

本教材是在总结近年来教学实践和教学改革的经验并借鉴了国内外同类优秀教材的基础上编写而成, 较全面系统地阐述自动控制的基本分析和研究方法。全书共分 8 章和 3 个附录, 主要内容有: 自动控制概述、线性控制系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频率特性分析、控制系统的设计与校正、非线性控制系统分析、离散控制系统等。书中强化了通过国际流行的 MATLAB 软件对控制系统进行辅助分析与设计的内容, 并在附录中介绍了 MATLAB 的基础知识。为便于自学, 各章均附有内容小结和丰富的例题与习题。本书内容有相应的电子课件, 需要者可与出版社联系。

本教材可作为普通高等学校自动化等电气信息类专业和相关专业的本科生教材, 也可作为成人教育和继续教育的教材, 还可作为研究生和从事自动化技术的人员的参考书。

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 刘 鹏

版式设计: 马金路 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 胡 兵 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 河北省高碑店市鑫昊印刷有限责任公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23

字 数: 608 千字

书 号: ISBN 7-5019-5680-4/TP·085 定价: 30.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

50392J4X101ZBW

前 言

自动控制理论是自动化学科的重要理论基础,是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程,并已成为诸多专业普遍开设的重要课程。学好自动控制理论对掌握自动化技术有着重要的作用。实践证明,该课程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,建立理论联系实际的科学观点和提高综合分析问题的能力,都具有重要的作用。

本教材全面阐述了自动控制理论的基本概念和基本原理,系统地介绍了自动控制系统分析和综合的基本方法。教材具有以下主要特点:

1. 以最基本的内容为主线,注重基本理论阐述的同时,突出工程应用方法。
2. 理论严谨,系统性强,兼顾工科学生特点,便于读者自学。
3. 配有适量的习题和较多的精选例题,对学生解题能力训练特别是考研很有帮助。
4. 紧跟现代教育技术发展趋势,引入了利用国际上流行的 MATLAB 软件进行控制系统计算机辅助分析与设计的最新的教学内容。

5. 配套有 ppt 电子课件、Flash 教学光盘、MATLAB 辅助课件等多媒体软件,形成了立体化教材系列(详情请登录《四川省精品课程——自动控制理论》网站)。

本书第 1 章简述自动控制理论的发展历史,介绍自动控制的基本概念,引出了自动控制系统的常用术语,并介绍控制理论研究的对象和目的。

第 2 章是控制系统数学描述方法,系统地介绍分析控制系统的微分方程和传递函数模型;介绍了利用结构图等效化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法。

第 3 章介绍了线性系统的时域分析方法,重点讨论了系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法。

第 4 章介绍了线性系统的根轨迹分析方法,重点讨论了根轨迹的绘制法则以及利用根轨迹对系统性能进行分析的方法。

第 5 章频率法是工程上重点应用的方法,详细讨论了频率域作图、分析的原理,介绍了频域稳定判据,给出了频域指标的计算及分析方法。

第 6 章介绍了线性系统的校正方法,主要有常用校正方案、根轨迹校正法、频率响应校正法以及反馈校正法等。

第 7 章介绍工程实际中常见的非线性特性,讨论了系统分析的相平面法和描述函数法。

第 8 章介绍了线性离散系统的分析与校正,详细讨论了 z 变换理论,以及离散系统的数学模型、时域分析法,并介绍了数字控制器的直接设计方法。

本教材可作为普通高等学校自动化等电气信息类专业和相关专业的本科生教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可作为研究生和从事自动化技术的人员的参考书。

本教材第 1、2 章及附录 II (部分)由毕效辉编写;第 3 章由于春梅编写;第 4 章、附录 I 由杨胜波编写;第 5、8 章由邢慧编写;第 6、7 章由安永泉编写;全书由毕效辉教授统稿。

四川大学的黄家英教授指导了本教材的编写工作，并一丝不苟地仔细审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的修改意见；郭圣权、王德滨、邢慧等为本书的组稿、编辑付出了辛勤的劳动。在此，谨向关心并为本教材出版做出贡献的所有人员表示诚挚的谢意！

对书中存在的错误及不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2006 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 控制理论的发展历程	(1)
1.1.2 自动控制系统的组成及术语	(2)
1.2 自动控制举例	(4)
1.2.1 温度控制	(4)
1.2.2 液位控制	(5)
1.2.3 速度控制	(5)
1.2.4 随动控制	(6)
1.3 自动控制的基本方式	(8)
1.3.1 开环控制	(8)
1.3.2 闭环控制	(8)
1.3.3 复合控制	(9)
1.4 控制系统的分类	(9)
1.4.1 按系统输入信号的变化规律不同来分	(9)
1.4.2 按系统传输信号的性质来分	(10)
1.4.3 按描述系统的数学模型不同来分	(10)
1.4.4 其他分类方法	(11)
1.5 对控制系统的基本要求	(11)
本章小结	(13)
例题精解	(14)
习题	(16)
第 2 章 控制系统的数学模型	(19)
2.1 引言	(19)
2.1.1 数学模型的特点	(19)
2.1.2 数学模型的类型	(20)
2.1.3 建模途径与原则	(21)
2.2 控制系统的微分方程	(21)
2.2.1 建立微分方程模型的一般步骤	(21)
2.2.2 建模举例	(21)
2.2.3 非线性系统(数学模型)的线性化	(25)
2.3 控制系统的传递函数	(27)
2.3.1 传递函数的概念	(28)
2.3.2 典型环节及其传递函数	(30)

2.3.3	控制系统的传递函数	(34)
2.3.4	传递函数的标准形式	(36)
2.3.5	传递函数的零点和极点对输出的影响	(37)
2.4	控制系统的结构图	(37)
2.4.1	结构图的概念	(37)
2.4.2	系统结构图的建立	(38)
2.4.3	结构图的等效变换	(40)
2.5	信号流图与梅逊公式	(44)
2.5.1	信号流图的概念	(45)
2.5.2	信号流图的绘制	(46)
2.5.3	梅逊公式	(46)
2.6	应用 MATLAB 进行模型处理	(48)
2.6.1	拉氏变换与反变换	(49)
2.6.2	传递函数	(50)
2.6.3	控制系统的特征根及零极点图	(53)
2.6.4	控制系统的方框图模型	(54)
2.6.5	符号模型的运算	(56)
本章小结		(57)
例题精解		(58)
习题		(66)

第 3 章	线性系统的时域分析	(70)
3.1	引言	(70)
3.1.1	典型信号	(70)
3.1.2	性能指标	(72)
3.2	一阶系统的分析和计算	(73)
3.2.1	一阶系统的数学模型	(73)
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	(74)
3.2.3	单位斜坡响应	(75)
3.2.4	单位脉冲响应	(75)
3.3	二阶系统的分析和计算	(75)
3.3.1	二阶系统的数学模型	(75)
3.3.2	单位阶跃响应	(76)
3.3.3	二阶系统性能指标分析	(79)
3.3.4	单位脉冲响应	(81)
3.4	改善二阶系统性能的措施	(82)
3.4.1	二阶系统的比例-微分控制	(82)
3.4.2	二阶系统的速度反馈控制	(83)
3.4.3	比例-微分控制与测速反馈控制的比较	(84)
3.5	高阶系统的时间响应	(85)

3.5.1 高阶系统的阶跃响应	(85)
3.5.2 高阶系统性能估计	(86)
3.6 用 MATLAB 进行动态响应分析	(87)
3.6.1 绘制响应曲线	(87)
3.6.2 阶跃响应性能分析	(88)
3.6.3 应用 Simulink 进行仿真	(89)
3.7 稳定性分析	(90)
3.7.1 稳定性的概念和定义	(90)
3.7.2 线性系统稳定的条件	(91)
3.7.3 劳斯-赫尔维茨判据	(92)
3.8 线性系统的稳态误差计算	(95)
3.8.1 稳态误差的定义	(95)
3.8.2 参考输入作用下的稳态误差	(97)
3.8.3 扰动作用下的稳态误差	(99)
3.8.4 动态误差系数	(101)
本章小结	(102)
例题精解	(103)
习题	(114)
 第 4 章 根轨迹法	 (118)
4.1 根轨迹的基本概念	(118)
4.1.1 闭环零、极点与开环零、极点之间的关系	(118)
4.1.2 根轨迹的基本概念	(119)
4.2 根轨迹方程	(120)
4.3 根轨迹绘制的基本规则	(121)
4.3.1 180° 根轨迹绘制的基本规则	(121)
4.3.2 零度根轨迹的绘制规则	(128)
4.4 典型反馈系统的根轨迹分析	(130)
4.4.1 反馈系统的根轨迹分析举例	(130)
4.4.2 典型的根轨迹图	(133)
4.4.3 非最小相位系统的根轨迹	(133)
4.4.4 参量根轨迹	(134)
4.5 用 Matlab 绘制系统的根轨迹	(136)
4.5.1 命令介绍	(136)
4.5.2 绘图示例	(137)
本章小结	(139)
例题精解	(139)
习题	(147)

第 5 章 线性系统的频域分析法	(151)
5.1 频率特性的基本概念	(151)
5.1.1 频率特性的定义	(151)
5.1.2 频率特性的几何表示法	(153)
5.2 典型环节的频率特性	(154)
5.2.1 比例环节	(155)
5.2.2 积分环节	(155)
5.2.3 微分环节	(156)
5.2.4 惯性环节	(157)
5.2.5 一阶微分环节	(158)
5.2.6 振荡环节	(159)
5.2.7 二阶微分环节	(162)
5.2.8 延迟环节	(162)
5.3 控制系统的开环频率特性	(162)
5.3.1 开环 Nyquist 图	(162)
5.3.2 开环 Bode 图	(165)
5.3.3 最小相位系统与非最小相位系统	(167)
5.4 奈奎斯特稳定判据	(169)
5.4.1 辅助函数 $F(s)$	(169)
5.4.2 幅角原理	(170)
5.4.3 奈奎斯特稳定判据	(171)
5.4.4 对数频率特性稳定判据	(174)
5.5 控制系统的稳定裕度	(176)
5.6 闭环频率特性	(178)
5.6.1 用向量法求取闭环频率特性	(178)
5.6.2 尼柯尔斯图线	(179)
5.6.3 闭环频率特性	(180)
5.7 频率特性分析	(180)
5.7.1 用开环频率特性分析系统的性能	(180)
5.7.2 开环频域性能指标与时域指标的关系	(182)
5.7.3 开环频域指标与闭环频域指标的关系	(184)
5.8 Matlab 频率特性分析	(185)
5.8.1 Bode 图	(185)
5.8.2 Nyquist 图	(187)
5.8.3 Nichols 图	(189)
本章小结	(189)
例题精解	(190)
习题	(197)

第 6 章 控制系统综合与设计	(200)
6.1 引言	(200)
6.1.1 性能指标	(200)
6.1.2 控制系统校正的基本方法	(200)
6.2 校正方案	(201)
6.2.1 校正方式	(201)
6.2.2 校正装置	(202)
6.2.3 校正方案	(204)
6.3 根轨迹法校正	(204)
6.3.1 基于根轨迹法的超前校正	(205)
6.3.2 基于根轨迹法的滞后校正	(210)
6.3.3 基于根轨迹法的滞后-超前校正	(215)
6.4 频率响应法校正	(218)
6.4.1 应用伯德图设计的思路	(219)
6.4.2 频率响应超前校正	(219)
6.4.3 频率响应滞后校正	(224)
6.4.4 频率响应滞后-超前校正	(228)
6.5 反馈校正	(232)
本章小结.....	(233)
例题精解.....	(235)
习题.....	(251)
 第 7 章 非线性控制系统	(255)
7.1 引言	(255)
7.1.1 非线性控制系统的特点	(255)
7.1.2 典型非线性特性.....	(255)
7.2 描述函数法	(257)
7.2.1 描述函数的含义.....	(257)
7.2.2 典型非线性环节的描述函数	(259)
7.2.3 典型非线性环节组合时的描述函数	(264)
7.3 非线性控制系统描述函数分析	(265)
7.3.1 非线性系统稳定性分析	(265)
7.3.2 自振荡分析	(267)
7.4 相平面法	(270)
7.4.1 相平面的基本概念.....	(270)
7.4.2 相平面的特点	(270)
7.4.3 线性系统相轨迹.....	(271)
7.4.4 相轨迹绘制	(274)
7.5 非线性系统相平面分析	(276)
7.5.1 奇点与极限环	(276)

7.5.2 相平面法分析非线性系统	(278)
本章小结	(282)
例题精解	(282)
习题	(286)
第8章 离散控制系统	(290)
8.1 离散系统的基本概念	(290)
8.2 采样过程和采样定理	(293)
8.2.1 采样过程的数学描述	(293)
8.2.2 采样定理	(295)
8.3 信号恢复	(296)
8.3.1 零阶保持器	(296)
8.3.2 一阶保持器	(298)
8.4 Z 变换	(300)
8.4.1 Z 变换的定义	(300)
8.4.2 求 Z 变换的方法	(301)
8.4.3 Z 变换的性质	(303)
8.4.4 Z 反变换	(305)
8.5 离散系统的数学模型	(306)
8.5.1 差分方程	(306)
8.5.2 脉冲传递函数 (Z 传递函数)	(308)
8.6 离散系统的运动分析	(313)
8.6.1 离散系统的稳定性	(313)
8.6.2 离散系统的瞬态质量	(317)
8.6.3 离散系统的稳态误差	(319)
8.7 离散系统的数字校正	(319)
8.7.1 数字控制器的脉冲传递函数	(320)
8.7.2 最少拍系统及其设计	(321)
8.8 Matlab 离散控制系统分析	(326)
8.8.1 连续系统的离散化	(326)
8.8.2 采样系统的响应	(327)
本章小结	(328)
例题精解	(329)
习题	(333)
附录	(337)
参考文献	(358)

第 1 章 绪 论

1.1 引言

近一个世纪以来,科学技术取得了突飞猛进的发展,在这一发展过程中,自动控制始终担负着重要的角色。自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学的许多领域。例如,控制车床按照预先编制好的程序加工部件,雷达自动跟踪空中的飞行体,洗衣机、微波炉等家用电器按照预定规律的自动运行等等,所有这些都离不开自动控制技术。

所谓自动控制,就是在人不直接参与的情况下,利用控制装置使某些被控量(如飞机的飞行速度和仰角、工业加热炉的炉温等)按指定的规律变化。

自动控制技术的广泛应用,不仅可以改善工作条件,减少劳动强度和提高生产效率,而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明的新社会等方面有着重要的意义。随着经济以及科技、国防事业的发展和人们生活水平的提高,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动控制技术本身也将会得到进一步发展。作为一个工程技术人员,了解和掌握自动控制方面的知识是十分必要的。

1.1.1 控制理论的发展历程

1.1.1.1 经典控制理论阶段

自动控制领域的第一项重大成果,是 18 世纪詹姆斯·瓦特 (James Watt) 为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器。在控制理论发展初期,做出过重大贡献的众多学者中有迈那斯基 (Minorsky)、黑曾 (Hezen) 和奈奎斯特 (Nyquist)。1922 年,迈那斯基研制出船舶操纵自动控制器,并且证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932 年,奈奎斯特提出了一种相当简便的方法,就是根据对稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统的响应性能。1934 年,黑曾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。

20 世纪 40 年代,频率响应法为工程技术人员设计满足性能要求的线性闭环控制系统提供了一种可行的方法。从 20 世纪 40 年代末到 50 年代初,伊万思 (Evans) 提出了形象、直观、使用方便的根轨迹法。

频率响应法和根轨迹法是经典控制理论的核心。由这两种方法设计出来的系统是稳定的,并且不同程度地满足一组适当的性能要求。一般来说,这些系统是令人满意的,但它不是某种意义上的最佳系统。从 20 世纪 50 年代末期开始,控制系统设计问题的重点从设计许多可行系统中的一种系统,转变到设计在某种意义上的最佳系统。

维纳 (N. Wiener) 于 1948 年出版了专著《控制论》,它是经典控制理论的辉煌总结。而且该书的内容覆盖了更广阔的领域,正如该书的副标题“动物和机器中的控制与通讯”所揭示的,是一部继往开来的、具有深远影响的名作。1954 年,我国学者钱学森出版了专著

《工程控制论》，系统地揭示了控制论对自动化、航空、航天、电子通信等工程技术领域的意义和深远影响。这标志着控制论学科分化而产生的第一个分支学科“工程控制论”的诞生。

1.1.1.2 现代控制理论阶段

大约从 1960 年开始，由于数字计算机的出现以及工业、军事特别是空间技术的需求，以时域方法为主的诸多分析设计方法得以迅猛发展，在原有“经典控制理论”的基础上，又形成了所谓的“现代控制理论”，这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。

为现代控制理论的状态空间法的建立做出开拓性贡献的有：1954 年，贝尔曼 (P. Bellman) 的动态规划理论；1956 年，庞特里雅金 (L. S. Pontryagin) 的极大值原理；1960 年，卡尔曼 (R. E. Kalman) 的多变量最优控制和最优滤波理论。

在 20 世纪 50 年代，控制理论的发展主要集中在复平面上及根轨迹的发展。同时，在这一时期，控制的对象从单输入—单输出发展到多输入—多输出，从确定性系统发展到随机系统，由于数字计算机在控制系统中的使用变得普遍起来，这些新控制部件的使用使得控制变得精确、快速。

状态空间方法属于时域方法，其核心是最优化技术。它以状态空间描述（实质上是一阶微分或差分方程组）作为数学模型，利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段，适应于多变量、非线性、时变系统。它不仅在航天、航空、制导与军事武器控制中有成功的应用，在工业生产过程控制中也得到逐步应用。

1.1.1.3 智能控制理论阶段

近年来，把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合，充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制，逐渐形成了智能控制理论的雏形。这种新发展起来的控制技术，是人工智能在控制上的应用。

智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的，它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧，解决目前那些需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象的复杂性体现为：模型的不确定性；高度非线性；分布式的传感器和执行器；动态突变；多时间标度；复杂的信息模式；庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。

虽然智能控制体系形成的历史不长，理论还未完全成熟，但其已有的应用成果和理论发展说明了智能控制正成为自动控制的前沿学科之一。

1.1.2 自动控制系统的组成及术语

在各种各样的自动控制系统中，反馈控制是最基本的控制方式之一。一个典型的反馈控制系统总是由控制对象和各种结构不同的元器件组成的。除控制对象外，其他各部分可通称为控制装置。每一部分各司其职，共同完成控制任务。

典型反馈控制系统基本组成可用图 1-1 表示。其中用“ $\otimes$ ”或“ $\bigcirc$ ”代表多路信号会合点（也称综合点），“+”表示信息相加（图中往往省略），“-”表示信息相减。从这种方框图中可明显地看出各环节之间的关系和控制作用的传递过程。

(1) 被控对象 (controlled plant) 通常是一个设备、物体或过程（一般称任何被控制的运行状态为过程），其作用是完成一种特定的操作。它是控制系统所控制和操纵的对象，它接受控制量并输出被控量。

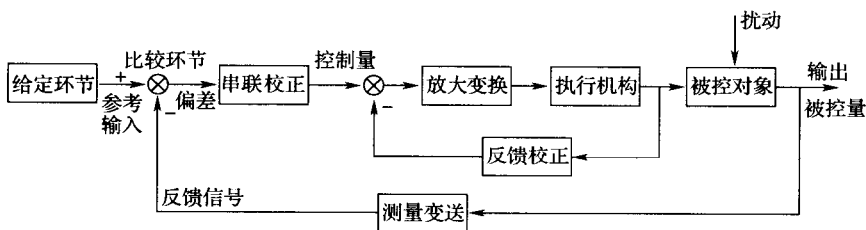


图 1-1 反馈控制系统基本组成

(2) 给定环节 给出与期望的输出相对应的系统输入量，是一类产生系统控制指令的装置（或软件界面）。

(3) 测量变送环节 它用来检测被控量的实际值。如果输出的物理量属于非电量，大多数情况下要把它转换成电量，以便利用电的手段加以处理。测量变送环节一般也称为反馈环节。

(4) 比较环节 其作用是把测量元件检测到的实际输出值与给定环节给出的输入值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的电量比较元件有差动放大器、电桥电路等。在计算机控制系统中通过编程可实现。

(5) 放大变换环节 将比较微弱的偏差信号加以放大，以足够的功率来推动执行机构或被控对象。当然，放大倍数越大，系统的反应越敏感。一般情况下，只要系统稳定，放大倍数应适当大些。

(6) 执行环节 其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。常见的执行元件有阀门、伺服电动机等。

(7) 校正环节 为改善系统的动态和静态性能特性而附加的装置，其参数可灵活调整。工程上称为调节器或控制器。常用串联或反馈的方式连接在系统中。简单的校正元件可以是一个 RC 网络，复杂的校正元件可含有电子计算机。

在具体讨论控制系统之前，还应了解一些常用的名词术语。

(1) 被控量 (controlled variable) 即系统的输出，是一种被测量和被控制的量值或状态。

(2) 控制量 (controlling variable) 控制量也称操纵量，是一种由控制器改变的量值或状态，它将影响被控量的值。通常，被控量是系统的输出量。控制意味着对系统的被控量的值进行测量，并且使控制量作用于系统，以修正或限制测量值对期望值的偏离。

(3) 参考输入 (reference input) 是人为给定的，使系统具有预定性能或预定输出的激发信号，它代表输出的希望值。故又称为给定输入、给定值、期望输出等。

(4) 反馈 (feedback) 将系统（或环节）的输出量经变换、处理送到系统（或环节）的输入端，称为反馈。若此变量是从系统输出端取出送入系统输入端，这种反馈称为主反馈；而其他称为局部反馈。

(5) 偏差 (deviation) 给定输入量与主反馈量之差。

(6) 误差 (error) 是指系统输出量的实际值与希望值之差。系统希望值是理想化系统的输出，实际上很难达到，因而用与控制输入量有一定比例关系的信号来表示。在单位反馈情况下，希望值就是系统的输入量，误差量就等于偏差量。

(7) 扰动 (disturbance) 扰动是一种对系统的输出量产生不利影响的信号。如果扰动

产生在系统的内部，称为内部扰动；反之，当扰动产生在系统的外部时，则称之为外部扰动。外部扰动也是系统的输入量。

(8) 系统 (system) 系统是一些部件的组合，这些部件组合在一起，完成一定的任务。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、生物学和经济学等方面的系统。

1.2 自动控制举例

1.2.1 温度控制

以电炉恒温箱的温度控制为例。恒温控制的任务是，在扰动因素作用（如打开箱门取放物品、电源电压的波动以及环境温度的变化等）下保持箱内温度恒定，以满足生产工艺对温度的要求。

图 1-2 (a) 所示的是电炉恒温箱的手动控制系统。手动控制的方法是：通过眼睛观察温度计所显示温度与希望温度的偏差，人工调节活动触头的位置，改变加在加热电阻丝两端的电压，从而调节电阻丝电流的大小以达到恒温控制的目的。控制系统的方框图可用图 1-2 (b) 来表示。

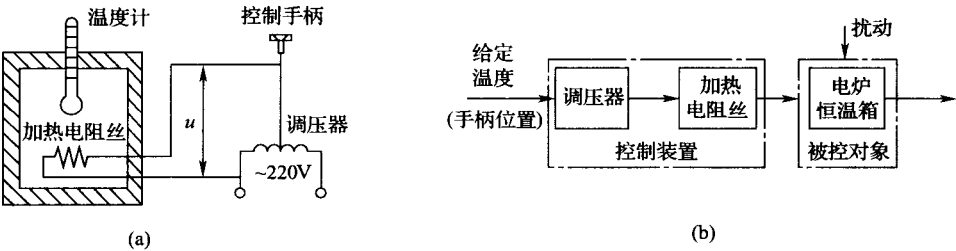
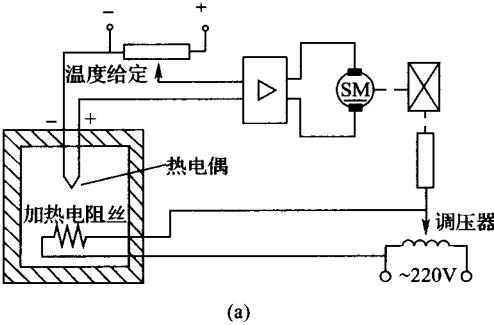


图 1-2 电炉恒温箱手动控制
(a) 原理图 (b) 方框图

图 1-3 (a) 所示的是电炉恒温箱的自动控制系统。自动控制的过程是：用热电偶对炉温（被控量）进行检测并转换成对应的电压，反馈送至输入端与给定温度进行比较（相减）得到偏差电压；经放大器放大后驱动电动机运转，再经减速器调节调压器活动触头的位置，从而改变加在加热电阻丝两端的电压，以达到恒温控制的目的。自动控制系统的方框图可用图 1-3 (b) 来表示。



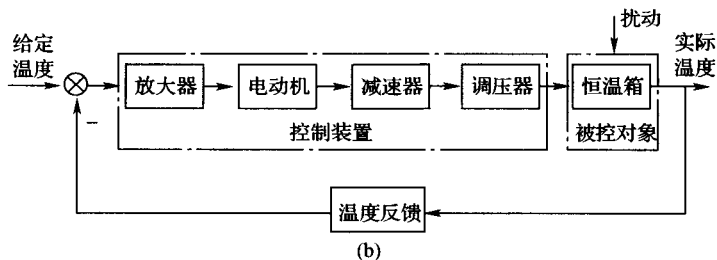


图 1-3 电炉恒温箱自动控制系统

(a) 原理图 (b) 方框图

1.2.2 液位控制

图 1-4 所示的是一个水箱。因生产和生活的需要，希望液面高度 h 维持恒定（或在允许的偏差范围以内）。当水的流入量与流出量平衡时，水箱的液面高度维持在预定（希望）的高度上。

当水的流出量或流入量发生变化，则平衡就会被破坏，液面的高度不能自然地维持恒定。而且这种出水量与进水量的不平衡现象是必然要经常发生的（例如，进水压力的下降或用水量的增加）。这便使得这种“水位恒定的要求”变得难以实现了。

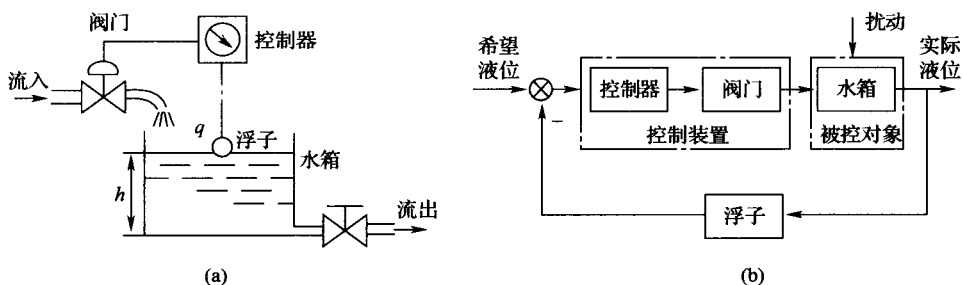


图 1-4 液位自动控制

(a) 原理图 (b) 方框图

对液面进行自动控制时，液面的希望高度由自动控制器刻度盘上的指针标定。当出水与进水的平衡被破坏时，水箱水位下降（或上升），出现偏差。这偏差由浮子标测出来，自动控制器在偏差的作用下，控制阀门使其开大（或关小），对偏差进行修正，从而保持液面高度不变。

1.2.3 速度控制

直流电动机速度自动控制的原理结构如图 1-5 (a) 所示。图中，电位器电压 u_g 为输入信号。电位器动点的位置一定，电动机速度就有一定值，故电位器电压的变化称为参考输入或给定值。测速发电机是电动机转速的测量元件，又称为变送元件（变送器）。图 1-5 (a) 中，代表电动机转速变化的测速发电机电压 u_r 送到输入端与电位器电压 u_g 进行比较，两者的差值 u_e （又称偏差信号）经放大器放大后加到触发器—晶闸管可控整流装置的输入端，整流装置的输出 u_d 控制电动机的转速和方向，进而对被控量进行相应的调节。这就形成了电动机转速自动控制系统。

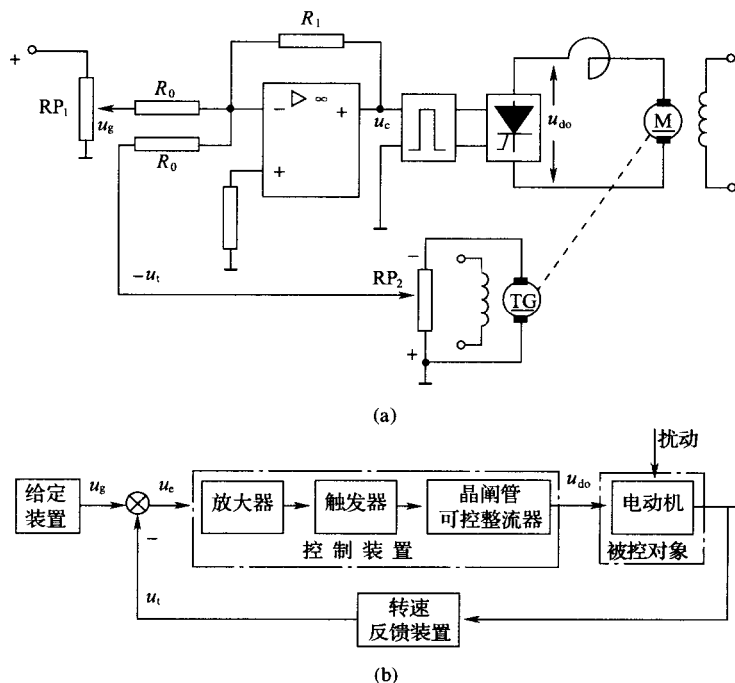


图 1-5 直流电动机速度自动控制系统

(a) 原理图 (b) 方框图

电源变化、负载变化等引起转速变化，即为扰动。当电动机（被控对象）受到扰动后，转速（被控量）发生变化，经测量元件（测速发电机）将转速信号（又称为反馈信号）反馈到控制器（功率放大与整流装置），使控制器的输出（称为控制量）发生相应的变化，从而可以自动地保持转速不变或使偏差保持在允许的范围内，也即使被控量自动地保持为给定值或在给定值附近的一个很小的允许范围内变动。

如果在图 1-5 (a) 中，取消测速发电机及其反馈回路，电动机的转速由人工监测，当转速偏离给定值时，由人工去改变电位器的动点，改变放大器的输出，从而改变电动机的电枢电压，改变电动机的转速，使之恢复到转速的定值。这样，电动机的转速控制就成为人工控制系统。

1.2.4 随动控制

上面所介绍的控制系统其特点是，给定信号一经整定好后就保持恒值，具有这一特点的系统在实际中不乏其例，通常称这类系统为恒值调节系统。而随动系统是工程上应用领域非常广泛的另一类闭环控制系统，如工业自动化仪表中的显示记录仪、雷达高射炮炮身位置随动系统、火炮群跟踪雷达天线控制系统、轮船上的自动操舵装置 [该装置（或系统）可使装在船体尾部的舵叶的偏转角跟踪位于驾驶室的操舵手轮的偏转角]、数控机床的加工轨迹控制和仿型机床的跟踪控制、以及轧钢机压下装置的控制等均属于这类系统。

随动系统与上述恒值系统一样都是根据反馈控制原理工作的，所不同的主要在于：随动系统的输入信号不是恒值而是随机变化的，系统的主要任务是使输出量紧紧跟踪输入量的变