

——创新型人才培养“十三五”规划教材

自动控制理论 及MATLAB实现

——◆ 张 涛 王 娟 杜海英 主 编

——◆ 唐建波 马 彪 宋 鹏 副主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

创新型人才培养“十三五”规划教材

自动控制理论及 MATLAB 实现

张 涛 王 娟 杜海英 主 编
唐建波 马 彪 宋 鹏 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了经典控制理论的基本内容,着重于基本概念、基本理论和基本方法的论述。全书共分8章:自动控制系统的概念、控制系统的建模、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频率响应法、控制系统的校正、非线性控制系统、离散控制系统。

本书有两个重要特点。一是体现了科学性与实用性。为了科学地验证理论内容,在每章都加入了MATLAB的具体应用实例。为了便于读者深入理解书中所述的重要概念,每章都列举了一定数量的例题和习题,供练习之用。二是适合语码转换式双语教学。在每节中都为重要的技术术语加注了英文词汇,每节末都加入了重点概念和专业术语的中英文对照表,便于学生为阅读英文专业文献积累词汇量,进而切实地提高双语教学水平。

本书可作为自动化专业本科生的教科书,也可作为相关专业本科生、研究生及工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论及 MATLAB 实现 / 张涛, 王娟, 杜海英主编. —北京: 电子工业出版社, 2016.7

创新型人才培养“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-29337-5

I. ①自… II. ①张… ②王… ③杜… III. ①自动控制理论—高等学校—教材②Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TP13②TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 156225 号

责任编辑: 康 霞

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 524.8 千字

版 次: 2016 年 7 月第 1 版

印 次: 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254468, quxin@phei.com.cn, QQ382222503。

前 言

要实现中华民族伟大复兴的中国梦，离不开工业全面现代化的支撑，而工业现代化的基础就是自动化，从而“自动控制理论”就成为高等院校许多学科共同的专业基础，且越来越占有重要的位置。

“自动控制理论”是专门研究有关自动化系统基本概念、基本原理和基本方法的一门课程。本书系统而全面地介绍了经典控制理论的基本内容，主要包括自动控制系统的基础概念、控制系统的建模、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频率响应法、控制系统的校正、非线性控制系统和离散控制系统。这些内容都是被国内外高校公认的关于自动控制理论的基本内容。

本书的一个重要特点是体现了科学性与实用性。为了科学地验证理论内容，在每章都加入了 MATLAB 的具体应用实例。为了便于读者深入理解书中所述的重要概念，每章都列举了一定数量的例题和习题，供练习之用。

本书的另一个重要特点是适合语码转换式双语教学。在每节中都为重要的技术术语加注了英文词汇，每节末都加入了重点概念和专业术语的中英文对照表，便于教师在课堂上对学生进行专业词汇的渗透，使学生在学本课程的同时逐步增加专业词汇量，方便学生更好地阅读英文专业文献，进而切实提高双语教学水平。

本书由张涛、王娟和杜海英担任主编，唐建波、马彪和宋鹏担任副主编。全书共分为 8 章，其中第 1、5 章由张涛执笔，第 2、6 章由王娟执笔，第 3、4 章由杜海英执笔，第 7 章由唐建波执笔，第 8 章由马彪执笔，每章的 MATLAB 应用部分由宋鹏执笔。本书由徐国凯教授担任主审。研究生徐凯、马雪寒和龙雨飞承担了部分绘图和文字处理工作，在此表示感谢。

书中参考和借鉴了同类教科书的精华，为此对原书作者深表谢意。

本书可作为自动化专业本科生的教科书，也可作为电子信息类或其他与控制有关专业的本科生、研究生及工程技术人员的参考书。

由于编者水平有限，书中一定会有一些不妥之处，恳请广大读者和同行专家批评、指正。

编 者
2016 年 3 月

目 录

第 1 章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 自动控制系统的定义	1
1.2 自动控制系统的分类	4
1.2.1 运动与过程控制系统	4
1.2.2 开环与闭环控制系统	4
1.2.3 定值、随动与程序控制系统	6
1.2.4 线性与非线性控制系统	7
1.2.5 连续与离散控制系统	8
1.3 自动控制系统的性能评价	8
1.4 自动控制理论的发展概况	10
小结	13
习题	13
第 2 章 控制系统的建模	15
2.1 控制系统微分方程的建立	16
2.1.1 简单系统微分方程的建立	16
2.1.2 复杂系统微分方程的建立	18
2.2 非线性数学模型的线性化	21
2.3 传递函数	24
2.3.1 传递函数的定义	24
2.3.2 传递函数的特点	25
2.3.3 传递函数与理想单位脉冲响应的关系	26
2.3.4 系统典型环节的传递函数	28
2.4 系统框图与传递函数	33
2.4.1 系统框图的组成	33
2.4.2 系统框图的建立	33
2.4.3 系统框图的等效变换	35
2.4.4 控制系统的传递函数	40
2.5 信号流图和梅逊公式的应用	42
2.5.1 信号流图的概念	42
2.5.2 信号流图的术语和性质	43
2.5.3 梅逊公式及其应用	45
2.6 利用 MATLAB 建立数学模型	48

小结	51
习题	51
第 3 章 控制系统的时域分析法	54
3.1 控制系统的时域评价	54
3.1.1 典型输入信号	54
3.1.2 控制系统时域性能指标	57
3.2 一阶系统的时域分析	59
3.2.1 一阶系统的数学模型	59
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	59
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	61
3.2.4 一阶系统的单位抛物线响应	61
3.2.5 一阶系统的单位脉冲响应	62
3.3 二阶系统的时域分析	62
3.3.1 二阶系统的数学模型	62
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	64
3.3.3 欠阻尼二阶系统的性能分析	67
3.3.4 二阶系统的单位脉冲响应	71
3.3.5 二阶工程最佳参数	72
3.4 高阶系统的时域分析	73
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	74
3.4.2 闭环主导极点	75
3.5 线性系统的稳定性分析	75
3.5.1 稳定性的基本概念	76
3.5.2 线性系统稳定的充分必要条件	77
3.5.3 线性系统稳定的必要条件	78
3.5.4 劳斯稳定判据	78
3.5.5 赫尔维兹稳定判据	81
3.5.6 劳斯判据的应用	82
3.6 控制系统的稳态误差	84
3.6.1 稳态误差的定义	84
3.6.2 系统类型与输入作用下的稳态误差	85
3.6.3 扰动作用下的稳态误差	88
3.6.4 提高系统稳态精度的方法	90
3.7 MATLAB 在时域分析法中的应用	90
3.7.1 单位脉冲响应和单位阶跃响应	90
3.7.2 单位斜坡响应	92
3.7.3 任意函数作用下系统的响应	93

3.7.4 Simulink 中时域响应举例	95
小结	96
习题	96
第 4 章 控制系统的根轨迹法	99
4.1 根轨迹的介绍	99
4.1.1 根轨迹的基本概念	99
4.1.2 根轨迹与系统性能	100
4.1.3 根轨迹的幅值条件和相角条件	101
4.1.4 根轨迹增益与系统开环增益的关系	102
4.2 绘制根轨迹的基本法则	103
4.3 广义根轨迹的绘制	114
4.3.1 参量根轨迹	114
4.3.2 零度根轨迹	117
4.4 用根轨迹分析闭环控制系统的性能	120
4.4.1 用根轨迹分析系统的稳定性	120
4.4.2 用根轨迹分析系统的动态性能	121
4.4.3 用根轨迹分析系统的稳态性能	122
4.4.4 附加开环零、极点的作用	124
4.5 MATLAB 在根轨迹法中的应用	126
小结	131
习题	131
第 5 章 控制系统的频域响应法	135
5.1 频率特性	135
5.1.1 频率特性的基本概念	135
5.1.2 由传递函数确定系统的频域响应	137
5.2 对数坐标图	139
5.2.1 典型因子的伯德图	140
5.2.2 绘制开环系统伯德图的一般步骤	148
5.2.3 最小相位系统与非最小相位系统	149
5.2.4 系统的类型与对数幅频特性曲线低频渐近线的对应关系	151
5.3 极坐标图	153
5.3.1 典型因子的乃氏图	153
5.3.2 极坐标图的一般形状	157
5.4 频域稳定判据	160
5.4.1 幅角原理	160
5.4.2 乃奎斯特稳定判据	162

5.4.3 乃奎斯特判据应用于滞后系统	168
5.5 相对稳定性分析	170
5.5.1 增益裕量	171
5.5.2 相位裕量	171
5.5.3 相对稳定性与对数幅频特性中频段斜率的关系	173
5.6 频域性能指标与时域性能指标间的关系	175
5.6.1 闭环频域特性及其特征量	175
5.6.2 二阶系统时域响应与频域响应的关系	177
5.7 传递函数的实验确定	181
5.8 MATLAB 在频域响应法中的应用	182
5.8.1 用 MATLAB 绘制伯德图	183
5.8.2 用 MATLAB 绘制乃奎斯特图	186
小结	190
习题	191
第 6 章 控制系统的校正	195
6.1 系统的设计与校正问题	195
6.1.1 被控对象	195
6.1.2 性能指标	195
6.1.3 系统带宽的确定	197
6.1.4 系统校正方式	198
6.2 线性系统的基本控制规律	199
6.2.1 比例控制规律	200
6.2.2 比例-微分控制规律	200
6.2.3 积分控制规律	200
6.2.4 比例-积分控制规律	201
6.2.5 比例-积分-微分控制规律	201
6.3 串联校正	202
6.3.1 超前校正	203
6.3.2 滞后校正	208
6.3.3 滞后-超前校正	214
6.4 反馈校正	220
6.4.1 利用反馈校正改变局部结构和参数	221
6.4.2 利用反馈校正取代局部结构	222
6.5 复合校正	223
6.5.1 前馈校正与反馈控制组成的复合控制	223
6.5.2 扰动补偿校正与反馈控制组成的复合控制	225
6.6 MATLAB 在串联校正中的应用	226

小结	233
习题	234
第 7 章 非线性控制系统	236
7.1 非线性控制系统概述	236
7.1.1 研究非线性控制理论的意义	236
7.1.2 非线性系统的特征	238
7.1.3 非线性系统的分析与设计方法	240
7.2 常见非线性及其对系统运动的影响	241
7.2.1 非线性特性的等效增益	241
7.2.2 常见非线性因素对系统运动的影响	243
7.3 描述函数	245
7.3.1 描述函数的基本概念	246
7.3.2 非线性元件描述函数的举例	247
7.3.3 用描述函数法分析非线性控制系统	252
7.4 相平面法	255
7.4.1 相平面的基本概念	255
7.4.2 线性二阶系统的相轨迹	256
7.4.3 绘制相平面图的等倾斜线法	258
7.4.4 非线性系统的相平面分析	260
7.5 MATLAB 在相平面分析中的应用	265
小结	269
习题	270
第 8 章 离散控制系统	272
8.1 离散控制系统的概念	272
8.2 信号的采样与复现	275
8.2.1 采样过程	275
8.2.2 采样定理	276
8.2.3 零阶保持器	278
8.3 Z 变换与 Z 反变换	280
8.3.1 Z 变换	280
8.3.2 Z 变换的基本性质	283
8.3.3 Z 反变换	286
8.4 脉冲传递函数	288
8.4.1 串联环节的脉冲传递函数	289
8.4.2 闭环系统的脉冲传递函数	291
8.5 差分方程	295

8.5.1	差分的定义	295
8.5.2	差分方程概述	295
8.5.3	用 Z 变换法求解差分方程	296
8.5.4	用迭代法求解差分方程	297
8.6	离散控制系统的性能分析	299
8.6.1	离散控制系统的稳定性分析	299
8.6.2	闭环极点与瞬态响应的关系	302
8.6.3	离散系统的稳态误差	305
8.7	MATLAB 在离散控制系统中的应用	307
8.7.1	利用 Simulink 分析和设计离散控制系统	307
8.7.2	利用 MATLAB 函数分析和设计离散控制系统	312
8.7.3	利用 SISO 分析工具分析和设计离散控制系统	312
小结		314
习题		314
参考文献		317

第1章 自动控制系统的基本概念

在实现“两个一百年”的奋斗目标，成就中华民族伟大复兴伟大梦想的过程中，工业的全面现代化是不可逾越的阶段。工业现代化的基础是工业自动化。工业自动化的显著特征是自动控制技术的广泛应用。自动控制技术不仅可以大幅度地提高投入产出比，而且在减轻劳动强度、提高产品质量和降低能源消耗等方面有着不可替代的巨大作用。此外，自动控制技术还在改善生活质量、探索未知世界、提高国防实力等方面发挥着越来越重要的作用。

举例来讲，从家庭的电冰箱、洗衣机到车间的数控机床、焊接机器人；从农村的蔬菜（花卉）种植大棚到制造业的无人工厂；从远洋巨轮、深水潜艇到客机的自动驾驶、巡航导弹的自主飞行；从“机遇”号的火星登陆到“神舟五号”载人飞船的太空返回，都无一例外地采用了自动控制技术。现代计算机技术、互联网技术和云计算技术的发展和运用，使得自动控制的水平和自动控制系统的效能上升到了新的高度。

除了传统的应用领域，自动控制理论和技术已经渗入到诸如生物工程、经济管理、金融风险防范和人口控制等非传统应用领域。所以，相关的工程技术人员和科学工作者都有必要具备一定的自动控制知识，以便根据任务需求来分析、设计或者应用某种自动控制系统。

1.1 自动控制系统的定义

自动控制的理论基础是自动控制理论（或称自动控制原理）。自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门科学，是关于自动控制系统的构成、分析和设计的理论。自动控制理论的任务是研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径，为建造高性能的自动控制系统提供必要的理论手段。自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用控制器使被控对象（如机器、设备和生产过程）的某些物理量（或工作状态）能自动地按照预定的规律运行（或变化）。自动控制是相对人工控制而言的。

自动控制系统是在无人直接参与下，可使生产过程或其他过程按期望规律或预定程序进行的控制系统。自动控制系统是实现自动化的主要手段，简称自控系统。自动控制技术的载体是自动控制系统。

自动控制系统是由实现自动控制任务所需的、按照一定的规律连接起来的并且能够按照特定要求去控制被控对象的各种部件的组合物。

现实中，自动控制系统的种类较多，被控制的物理量也各种各样，如温度、压力、流量、转速、位移和力等。组成这些控制系统的元（部）件虽然有较大的差异，但是其基本结构却有着共同特点，且一般都是通过机械、电气、液压等手段来控制。为了解自动控制系统的概念，有必要分析一下图 1-1 所示的人工参与的水池液面控制系统。

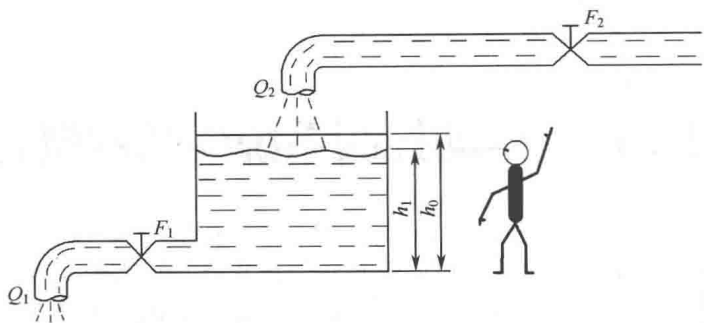


图 1-1 水池液面控制系统

图 1-1 中 F_1 为水池的放水阀， F_2 为水池的进水阀， Q_1 为水池的放水量， Q_2 为水池的进水量。控制任务要求实际的液面高度 h_1 始终保持在希望的液面高度 h_0 。当人参与控制时，就要不断地通过观察将实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 做比较，根据比较的结果，决定进水阀 F_2 的开度是增大还是减小，以达到维持液面高度不变的目的。

图 1-2 所示为人工参与的水池液面控制系统的结构图（也称框图）。该系统由眼睛、大脑、手与阀 F_2 和水池四部分组成。由该图可见，人在参与液面控制中起了以下三方面的作用。

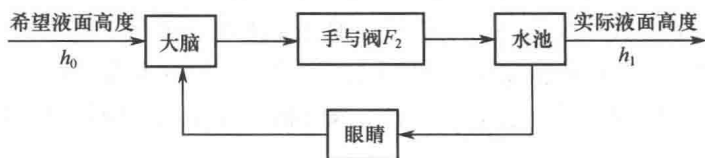


图 1-2 液面人工控制系统框图

- (1) 测量实际液面高度 h_1 ——用眼睛。
- (2) 将测得的实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 做比较——用大脑。
- (3) 根据比较的结果，即按照偏差的正负和大小去决定阀的开度——用手。

显然，如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述三种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。不言而喻，用人工控制不能保证系统要求的控制精度（control accuracy），也不能减轻人的劳动强度。如果将图 1-1 改为图 1-3 所示的自动控制系统，当满足放水量小于进水量这个条件时，不论放水阀 F_1 输出的流量如何变化，系统总能自动维持其液面高度在允许的偏差范围（error range）之内。假设水池液面高度因放水阀 F_1 的开度的增大而稍有降低，系统立即产生一个与降落液面成比例的误差电压 u ，该电压经放大器放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 F_2 的开度相应地增大，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

图 1-3 所示的液面自动控制系统由以下五部分组成。

- (1) 被控对象——水池。
- (2) 测量元件——浮子。
- (3) 比较机构——比较浮子的希望位置与实际位置之差。
- (4) 放大机构——当测量元件测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行元件动作时，一般都需要放大元件。

(5) 执行机构——它的作用是直接驱动被控对象，以改变被控制量。

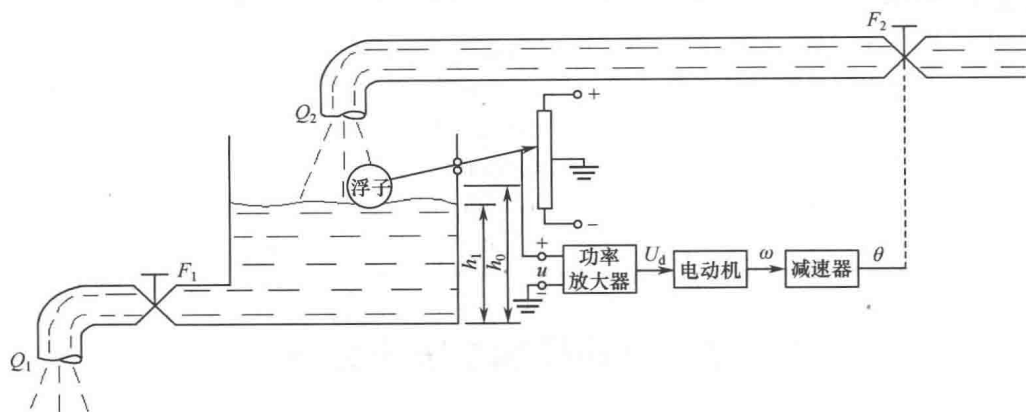


图 1-3 液面自动控制系统

以上五部分也是一般自动控制系统的组成单元。此外，为了改善控制系统的动、静态性能，通常还在系统中加上某种形式的校正装置。

为了使控制系统的表示简单明了，一般采用方框来表示系统中的各个组成部件，在每个方框中填入它所表示的部件的名称或函数表达式，不必画出它们的具体机构。根据信号（亦即信息）在系统中传递的方向，用有向线段依次把它们连接起来，就可得到控制系统框图。控制系统框图由以下三个基本单元组成。

(1) 引出点，如图 1-4 (a) 所示。它表示信号的引出，箭头表示信号的方向。

(2) 比较点，如图 1-4 (b) 所示。它表示两个或两个以上信号在该处进行的“±”运算，“+”表示信号相加，“-”表示信号相减。

(3) 部件的方框，如图 1-4 (c) 所示。输入信号置于方框的左端，方框的右端为其输出量，方框内填入部件名称。

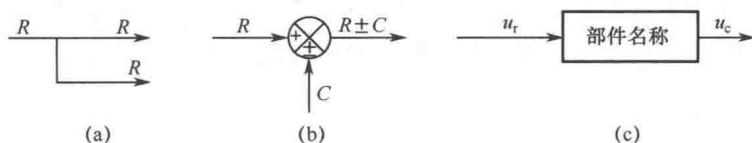


图 1-4 系统框图的基本组成单元

据此，可把图 1-3 所示液面控制系统的原理图改用图 1-5 所示的框图来表示。显然，后者的表示不仅比前者简单，而且信号在系统中的传递过程也更为清晰。因此，在以后的讨论中控制系统一般均以框图的形式表示。

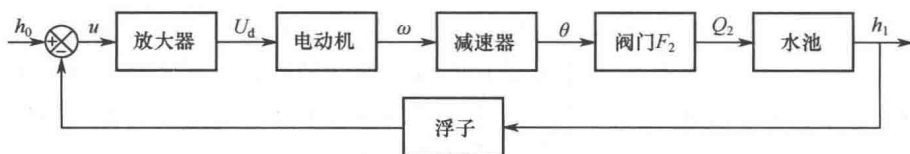


图 1-5 液面自动控制系统框图

专业术语中英文对照

自动控制	automatic control
被控对象	controlled plant
测量元件	measure element
比较机构	comparer
放大机构	amplifier
执行机构	actuator

1.2 自动控制系统的分类

在工程实际中,人们从不同角度对自动控制系统进行了分类。因此,了解控制系统的各种类型,从而分门别类地掌握控制系统的工作原理与相互区别,对于控制系统的分析和设计是很有必要的。

1.2.1 运动与过程控制系统

按照被控制量属性的不同,自动控制系统可以分为运动控制系统和过程控制系统。

1. 运动控制系统

运动控制系统是指被控制量为力、位移、速度、加速度(或力矩、轨迹、角位移、角速度、角加速度)的自动控制系统。

2. 过程控制系统

如果系统的被控制量是温度、流量、压力、液位、成分、浓度等生产过程参量时,这种自动控制系统则称为过程控制系统。这里“过程”是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程。通过对过程参量的控制,可使生产过程中产品的产量增加、质量提高和能耗减少。

1.2.2 开环与闭环控制系统

按照信息传递路径的不同来分类,控制系统可以分为开环系统、闭环系统和复合系统三种类型。这里只介绍开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统(又称无反馈系统)

如果系统的输出量(被控制量)没有与其输入量(参考输入、给定量)相比较,即系统的输出端与输入端之间不存在信息反馈的通道,则这种控制方式叫作开环控制。图 1-6 所示为开环控制系统的框图。由图可见,这种控制系统的特点是结构简单、所用的元器件少、成本低。然而,由于这种控制系统既不对被控制量进行检测,又没有将被控制量反馈到系统的输入端和参考输入相比较,所以当系统受到某种扰动作用后,被控制量就会偏离

原有的平衡状态, 系统没有自行消除或减小误差的功能, 这是开环系统的最大缺点。正是这个缺点, 大大限制了这种系统的应用范围。

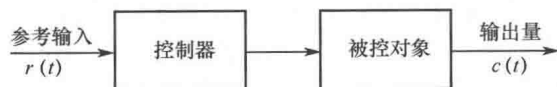
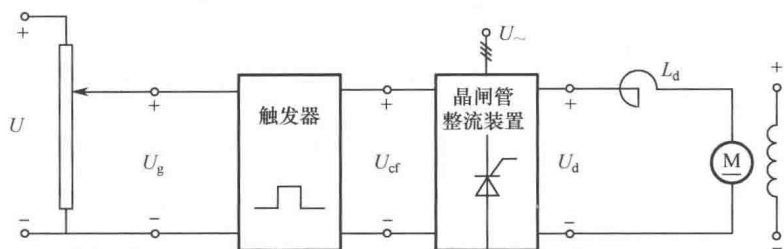
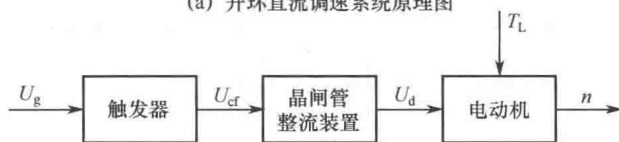


图 1-6 开环控制系统

图 1-7 (a) 所示为一个开环直流调速系统, 图 1-7 (b) 所示为它的框图。图中 U_g 为给定的参考输入。



(a) 开环直流调速系统原理图



(b) 开环直流调速系统框图

图 1-7 开环直流调速系统

参考输入电压 U_g 经过触发器控制晶闸管整流装置, 将交流电压 U 转变为相应的直流电压 U_d , 并供电给直流电动机, 使之产生一个 U_g 所设定的转速 n 。但是当系统遇到扰动时, 如电动机的负载转矩 T_L 、交流电网的电压或者电动机的励磁有变化时, 电动机的转速 n 就会随之变化, 不能再维持 U_g 所期望的转速。该系统自身没有纠正转速变化的能力。

2. 闭环控制系统 (又称反馈控制系统)

若把系统的被控制量反馈到它的输入端, 并与参考输入相比较, 这种控制方式叫作闭环控制。由于这种控制系统中存在着被控制量经反馈环节至比较点的反馈通道, 故闭环控制又称反馈控制。闭环系统的特点是: 连续不断地对被控制量进行检测, 把所测得的值与参考输入作减法运算, 求得的误差信号经控制器的变换运算和放大器的放大后, 驱动执行元件, 以使被控制量能完全按照参考输入的要求去变化。这种系统如果受到来自系统内部或外部的干扰, 通过闭环控制系统的作用, 能自动地消除或削弱干扰对被控制量的影响。由于闭环控制系统具有良好的抗扰动性能, 因而它在控制工程中得到了广泛的应用。

如果把图 1-7 所示的开环调速系统改造为图 1-8 (a) 所示的闭环系统, 则它就具有自动消除扰动影响 (即抗扰动) 的功能。图 1-8 (b) 为它的框图。系统自动消除干扰的调节过程如下: 当电动机的负载转矩 T_L 增大时, 流经电动机电枢中的电流便相应地增大, 电枢

电阻上的压降也变大,从而导致电动机转速的降低;而转速的降低使测速发电机(TG)的输出电压 U_{fn} 减小,误差电压 ΔU 相应地增大,经放大器放大后,使触发脉冲(triggering pulse)前移,晶闸管(thyristor)整流装置的输出电压 U_d 增大,从而补偿了由于负载转矩(load torque) T_L 的增大而造成的电动机转速的下降,使电动机的转速近似地保持不变。当因电网电压 U_- 的减小而导致电动机的转速下降时,系统也会进行类似的自动调节。

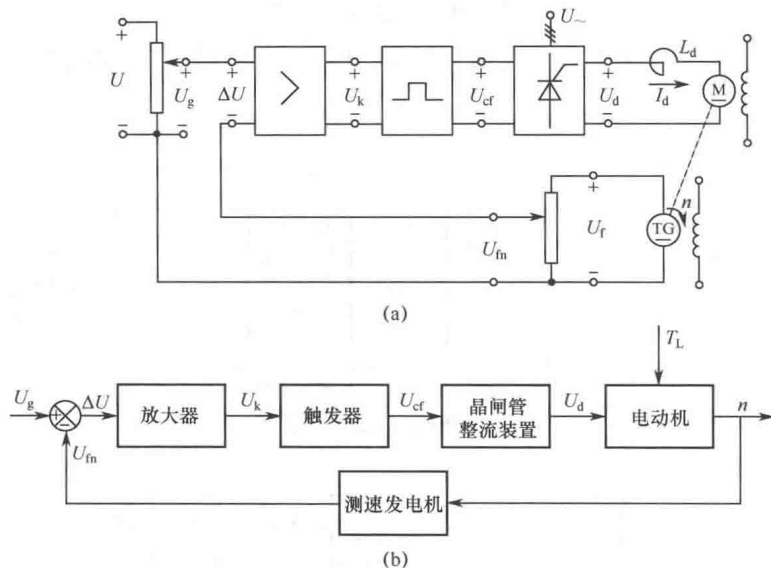


图 1-8 闭环直流调速系统

上述的自动调节过程,也可用图 1-9 所示的因果关系图来表示。

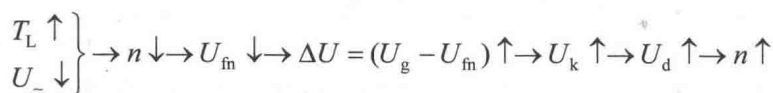


图 1-9 闭环直流调速系统自动调节的因果关系图

1.2.3 定值、随动与程序控制系统

按照输入量随时间变化规律的不同,自动控制系统可以分为定值控制系统、随动系统和程序控制系统三类。

1. 定值控制系统(又称恒值、镇定调节系统)

给定量(参考输入)为常值的控制系统称为定值控制系统。这种系统的任务是保证在任何扰动下,被控参数(输出)均保持恒定的、希望的数值。在过程控制系统中,一般都要求将过程参数(如温度、压力、流量、液位和成分等)维持在工艺给定的数值。

2. 随动系统(又称跟踪系统、伺服系统)

这类控制系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,系统的任务是在各种情况下保证系统的输出以一定精度跟随参考输入的变化而变化,所以这种系统又称为跟踪系

统。导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统及舵位置控制系统等都是典型的随动系统。在随动系统中, 如果被控量是机械位置或其导数时, 这类系统称之为伺服系统。

3. 程序控制系统

这类控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数, 要求被控量迅速、准确地加以复现。机械加工使用的数控机床便是一例。程序控制系统和随动系统的输入量都是时间函数, 不同之处在于前者是已知时间函数, 后者则是未知的任意时间函数, 而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.2.4 线性与非线性控制系统

按照描述系统的数学表达式的特性不同来分类, 控制系统可以分为线性控制系统和非线性控制系统(或线性系统和非线性系统)两类。

1. 线性控制系统

若组成控制系统的元件都具有线性特征, 则称该系统为线性控制系统。这类系统可以用线性微分方程描述, 其一般形式为:

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) \\ & = b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned}$$

式中, $c(t)$ 是系统被控量; $r(t)$ 是系统输入量。

系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 是常数时, 称为定常系统; 系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 随时间变化时, 称为时变系统。线性系统的主要特点是具有齐次性(odd)和适用叠加原理。

2. 非线性控制系统

在控制系统中, 只要有一个元部件的输入—输出特性是非线性的, 则称该系统为非线性控制系统。这时, 要用非线性微分(或差分)方程描述其特性。非线性方程的特点是系数与变量有关, 或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项, 例如:

$$\ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) = r(t)$$

非线性系统一般不具有齐次性, 也不适用叠加原理, 而且它的输出响应与其初始状态有很大的关系。

严格地说, 绝对的线性特征(或元件)是不存在的, 因为所有的物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性。为了简化系统的分析和设计, 在一定条件下, 可以对某些非线性特性作线性化处理。这样, 非线性系统就近似为线性系统, 从而可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

工程上有时为了改善控制系统的性能, 常常人为地引入某种非线性元件。例如, 为了实现最短时间控制, 采用开关型的控制方式; 又如, 在晶闸管组成的整流装置的直流调速系统中, 为了改善系统的动态特性和限制电动机的最大电流, 人们有意识地把电流调节器和速度调节器设计成具有饱和和非线性的特性。