

自动控制原理

(第3版)

徐国凯 张 涛 王 娟 主 编
谢春利 杜海英 宋 鹏 唐建波 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍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。全书共有 8 部分内容:绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频域分析法、控制系统的校正、非线性控制系统分析、计算机控制系统的分析与设计。

作者遵循去粗取精、优化提高、助力专业转型发展的原则,对本书第 2 版进行了调整和修改,形成了第 3 版。本版书有三个鲜明特点。一是体现科学性。既全面系统地论述经典控制理论的基本内容,又介绍该理论的部分高端成果。二是体现实用性。为便于读者深入理解和掌握书中所述的重要概念,除了每章都列举一定数量的例题和习题供练习之用外,还在重点章的末尾提供了典型例题及其 MATLAB 仿真验证。三是适合语码转换式双语教学。为便于读者为阅读外文专业文献而积累词汇量,进而切实提高双语教学水平,除在正文中为重要的技术术语加注英文词汇外,还在每节的末尾以“重要概念和术语(中英对照)”的形式加入了概念和术语的双语对照。

本书可作为高等学校自动化专业本科生的教科书,可作为电子信息类或其他相关专业本科生、研究生的参考书,也可供广大工程技术人员参阅。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理(第 3 版)/徐国凯,张涛,王娟 主编. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-47443-2

I. ①自… II. ①徐… ②张… ③王… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 134771 号

责任编辑:刘金喜 韩宏志

装帧设计:妙思品位

责任校对:曹 阳

责任印制:

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 刷 者:

装 订 者:

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:24 字 数:554 千字

版 次:2017 年 7 月第 1 版 印 次:2017 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:46.00 元

产品编号:

前 言

当前,我国许多高等院校都面临着专业转型发展的重大变革。基于新理念的培养方案不断涌现,与之相适应的课程体系与教学内容的改革也在加快进行。“自动控制理论”或“自动控制原理”作为自动化专业的主干课程之一,理应加入到这种改革中来,为培养应用型人才做出应有贡献。本书就是在这种形势下进行修订的。

遵循去粗取精、优化提高、助力专业转型发展的原则,作者对本书的第2版进行了调整和修改,形成了第3版。本版书有三个鲜明特点。一是体现科学性。既全面系统地论述经典控制理论的基本内容,又介绍该理论的部分高端成果。二是体现实用性。为便于读者深入理解和掌握书中所述的重要概念,除每章都列举一定数量的例题和习题供练习和深化理解之用外,还在重点章的末尾提供了典型例题及其 MATLAB 仿真验证。这将有助于培养读者理论联系实际意识和利用理论知识解决工程实际问题的能力,进而帮助实现专业转型。三是适合语码转换式双语教学;为便于读者为阅读外文专业文献而积累词汇量,进而切实提高双语教学水平,除在正文中为重要的技术术语加注英文词汇外,还在每节的末尾以“重要概念和术语(中英对照)”的形式加入了概念和术语的双语对照表。

本书全面系统地介绍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。全书共有8部分内容:绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频域分析法、控制系统的校正、非线性控制系统分析、计算机控制系统的分析与设计。

本书由徐国凯、张涛和王娟担任主编,谢春利、杜海英、宋鹏和唐建波担任副主编。全书共分为8章,其中第1章由徐国凯执笔,第2章由马彪执笔,第3章由唐建波执笔,第4、7章由张涛执笔,第5、6章由王娟执笔,第8章由谢春利执笔,每章的 MATLAB 应用部分由宋鹏执笔,每章的习题部分由杜海英执笔。全书由徐国凯统稿。

本版次是在第1版和第2版的基础上修订的;编写团队也有所调整。在此谨向第1版和第2版的编者表示衷心感谢。

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。书中吸收和借鉴了同类教科书和参考文献中的精华,为此对其作者深表谢意。此次再版得到了大连民族大学机电工程教学研究中心的资助,在此特别致谢。

本书可作为自动化专业本科生的教科书，可作为电子信息类或其他相关专业本科生、研究生的参考书，也可供广大工程技术人员参阅。

由于编者水平有限，书中一定会有一些纰漏与不妥之处，恳请广大读者和同行专家给予批评指正。

编 者
2017年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统的一般概念	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 定值、随动与程序控制系统	5
1.2.3 开环与闭环控制系统	5
1.2.4 连续与离散控制系统	7
1.2.5 线性与非线性控制系统	8
1.3 自动控制理论的发展概况	9
1.4 自动控制系统的性能要求	12
本章小结	14
习题	14
第 2 章 控制系统的数学模型	16
2.1 列写系统微分方程的一般方法	17
2.1.1 简单系统微分方程的建立	17
2.1.2 复杂系统微分方程的建立	21
2.2 非线性数学模型的线性化	24
2.3 传递函数	28
2.3.1 传递函数的定义	28
2.3.2 传递函数的基本性质	30
2.3.3 控制系统的典型环节及其传递函数	32
2.4 框图和系统的传递函数	36
2.4.1 框图的组成	37
2.4.2 系统框图的建立	37
2.4.3 框图的等效变换	39
2.4.4 利用框图求取系统的传递函数	43

2.5 信号流图和梅逊公式的应用	47
2.5.1 信号流图的概念	47
2.5.2 信号流图的术语和性质	48
2.5.3 信号流图的简化法则	49
2.5.4 梅逊增益公式及其应用	50
2.6 MATLAB 在本章中的应用	54
本章小结	56
习题	57
第 3 章 控制系统的时域分析法	60
3.1 控制系统的时域性能指标	60
3.1.1 典型输入信号	60
3.1.2 控制系统的时域性能指标	64
3.2 一阶系统的时域分析	66
3.2.1 一阶系统的数学模型	66
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	67
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	68
3.2.4 一阶系统的单位抛物线响应	69
3.2.5 一阶系统的单位脉冲响应	69
3.3 二阶系统的时域分析	70
3.3.1 二阶系统的数学模型	70
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	72
3.3.3 欠阻尼二阶系统的性能分析	76
3.3.4 二阶系统的单位脉冲响应	81
3.3.5 二阶工程最佳参数	82
3.4 高阶系统的时域分析	83
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	84
3.4.2 闭环主导极点	85
3.5 线性系统的稳定性分析	86

3.5.1	稳定性的基本概念	86	4.4.1	用根轨迹分析系统的 稳定性	138
3.5.2	线性系统稳定的充分 必要条件	87	4.4.2	用根轨迹分析系统的 动态性能	139
3.5.3	线性系统稳定的必要条件	89	4.4.3	用根轨迹分析系统的 稳态性能	141
3.5.4	劳斯稳定判据	89	4.4.4	附加开环零、极点的作用	144
3.5.5	赫尔维兹稳定判据	92	4.5	MATLAB 在本章中的应用	146
3.5.6	劳斯判据的应用	94	本章小结		150
3.6	控制系统的稳态误差计算	95	习题		150
3.6.1	稳态误差的定义	96	第5章 控制系统的频域分析法		155
3.6.2	系统类型数	97	5.1	频率特性	155
3.6.3	参考输入作用下的稳态误差	97	5.1.1	频率特性的基本概念	155
3.6.4	扰动作用下的稳态误差	101	5.1.2	由传递函数确定系统的 频域响应	158
3.6.5	提高系统稳态精度的方法	102	5.2	对数坐标图	160
3.7	MATLAB 在本章中的应用	103	5.2.1	典型因子的伯德图	161
3.7.1	单位脉冲响应和单位 阶跃响应	103	5.2.2	绘制开环系统伯德图的 一般步骤	170
3.7.2	单位斜坡响应	104	5.2.3	最小相位系统与非最小 相位系统	172
3.7.3	任意函数作用下系统的响应	106	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	174
3.7.4	Simulink 中时域分析举例	107	5.3	极坐标图	176
本章小结		108	5.3.1	典型因子的乃奎斯特图	177
习题		108	5.3.2	极坐标图的一般形状	182
第4章 控制系统的根轨迹法		111	5.4	频域稳定判据	186
4.1	根轨迹的基本概念	111	5.4.1	幅角原理	186
4.1.1	根轨迹的概念	111	5.4.2	乃奎斯特稳定判据	187
4.1.2	根轨迹与系统性能	112	5.4.3	乃氏判据应用于滞后系统	197
4.1.3	根轨迹的幅值条件和 相角条件	113	5.5	相对稳定性分析	199
4.1.4	系统根轨迹增益与开环增益 的关系	115	5.5.1	增益裕量	200
4.2	绘制根轨迹的基本规则	116	5.5.2	相位裕量	200
4.3	广义根轨迹的绘制	131	5.5.3	相对稳定性与对数幅频特性 中频段斜率的关系	203
4.3.1	参量根轨迹	131			
4.3.2	零度根轨迹	134			
4.4	用根轨迹法分析闭环控制系统的 性能	138			

5.6 频域性能指标与时域性能 指标间的关系	205	6.5.2 扰动补偿校正与反馈 控制组成的复合控制	260
5.6.1 闭环频率特性及其特征量	205	6.6 MATLAB 在本章中的应用	261
5.6.2 二阶系统时域响应与 频域响应的关系	208	本章小结	269
5.7 传递函数的实验确定	211	习题	270
5.8 MATLAB 在本章中的应用	213	第 7 章 非线性控制系统分析	272
5.8.1 利用 MATLAB 绘制伯德图	213	7.1 非线性控制系统概述	272
5.8.2 利用 MATLAB 绘制 乃奎斯特图	218	7.1.1 研究非线性控制理论 的意义	272
本章小结	220	7.1.2 非线性系统的特征	274
习题	221	7.1.3 非线性系统的分析与 设计方法	277
第 6 章 控制系统的校正	225	7.2 常见非线性及其对系统 运动的影响	278
6.1 控制系统的校正问题	225	7.2.1 非线性特性的等效增益	279
6.1.1 被控对象	226	7.2.2 常见非线性因素对系统 运动的影响	280
6.1.2 性能指标	226	7.3 非线性系统的描述函数分析	283
6.1.3 系统带宽的确定	228	7.3.1 描述函数的基本概念	284
6.1.4 系统校正方式	229	7.3.2 非线性元件描述函数的举例	285
6.2 线性系统的基本控制规律	230	7.3.3 用描述函数法分析非线性 控制系统	290
6.2.1 比例控制规律	230	7.4 相平面法	294
6.2.2 比例-微分控制规律	231	7.4.1 相平面的基本概念	295
6.2.3 积分控制规律	231	7.4.2 线性二阶系统的相轨迹	296
6.2.4 比例-积分控制规律	232	7.4.3 绘制相平面图的 等倾斜线法	298
6.2.5 比例-积分-微分控制规律	232	7.4.4 非线性系统的相平面分析	301
6.3 串联校正	234	7.5 MATLAB 在本章中的应用	306
6.3.1 超前校正	234	本章小结	309
6.3.2 滞后校正	240	习题	309
6.3.3 滞后-超前校正	247	第 8 章 计算机控制系统的 分析与设计	312
6.4 反馈校正	254	8.1 离散控制系统的概念	312
6.4.1 利用反馈校正改变 局部结构和参数	255	8.2 信号的采样与复现	315
6.4.2 利用反馈校正取代 局部结构	257		
6.5 复合校正	258		
6.5.1 前馈校正与反馈控制 组成的复合控制	258		

8.2.1 采样过程.....	315	8.6.2 闭环极点与瞬态响应 的关系.....	346
8.2.2 采样定理.....	317	8.6.3 离散系统的稳态误差.....	348
8.2.3 零阶保持器.....	319	8.7 数字控制器的设计.....	351
8.3 z 变换与 z 反变换.....	321	8.7.1 数字控制器的模拟化设计.....	351
8.3.1 z 变换.....	321	8.7.2 数字 PID 控制器.....	358
8.3.2 z 变换的基本性质.....	325	8.7.3 数字控制器的直接设计.....	360
8.3.3 z 反变换.....	328	8.8 MATLAB 在本章中的应用.....	365
8.4 脉冲传递函数.....	330	8.8.1 利用 Simulink 分析和设计 离散控制系统.....	365
8.4.1 串联环节的脉冲传递函数.....	332	8.8.2 利用 MATLAB 函数分析和 设计离散控制系统.....	368
8.4.2 闭环系统的脉冲传递函数.....	334	8.8.3 利用 SISO 分析工具分析和 设计离散控制系统.....	369
8.5 差分方程.....	338	本章小结.....	370
8.5.1 差分的定义.....	338	习题.....	370
8.5.2 差分方程概述.....	338	参考文献.....	374
8.5.3 用 z 变换法求解差分方程.....	339		
8.5.4 用迭代法求解差分方程.....	341		
8.6 离散控制系统的性能分析.....	343		
8.6.1 离散控制系统的 稳定性分析.....	343		

第1章 绪 论

自 20 世纪中叶以来，自动控制科学和技术迅猛发展，对国民经济、国防装备乃至日常生活所产生的促进作用越来越显著。当前，我们要实现“两个一百年”的奋斗目标，成就中华民族复兴的伟大梦想，面临着必须首先实现工业全面现代化的艰巨任务。众所周知，工业现代化的前提是工业自动化，工业自动化的鲜明特征是自动控制的广泛应用。所以，继续强化自动控制科学和技术的研究与应用具有十分重要的现实意义。

自动控制不仅可以大幅提高劳动生产率，而且在提高产品质量和降低能源消耗等方面具有突出的优势。此外，自动控制还在改善生活质量、探索未知世界和提高国防实力等方面发挥着越来越大的作用。观察可以发现，从家庭的电冰箱、洗衣机到车间的数控机床、焊接机器人；从乡村的蔬菜(花卉)种植大棚到制造业的无人工厂；从远洋巨轮、民航客机的自动驾驶到深水潜器、巡航导弹的自主航行；从“机遇”号登陆火星到“神舟十一号”载人飞船的太空旅行，都无一例外地采用了自动控制技术。现代计算机技术、物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提升到全新的高度。

超越传统的应用领域，自动控制理论和技术已经渗透到生物工程、经济管理、金融风险防范和人口控制等非传统应用领域。毫不夸张地说，没有自动控制，就没有现代化的社会活动。所以，相关工程技术人员和科学工作者都有必要掌握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。

本章重点内容：

- 自动控制系统的组成
- 自动控制系统的分类
- 自动控制理论的发展历史
- 自动控制系统的性能要求

1.1 自动控制系统的一般概念

自动控制(automatic control)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依据。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(或期望的目标)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(automatic control system)是自动控制技术得以应用的载体和平台,是一种不需要人直接参与就可使生产过程或其他过程按期望规律或预定程序运行的控制系统。

从结构上看,自动控制系统是各种部件的组合物。这些部件是实现自动控制任务所需的,按照一定的规律连接起来,并能按特定要求去控制被控对象。

现实中,自动控制系统的种类较多,被控制的物理量也多种多样。组成这些控制系统的元(部)件虽然有较大差异,但是其基本结构却有着共同特点,且一般都通过机械、电气、液压和网络等手段来实现控制任务。为说明自动控制系统的概念,有必要分析一下图 1-1 所示的人工操纵的水池液面高度(亦称液位)控制系统。

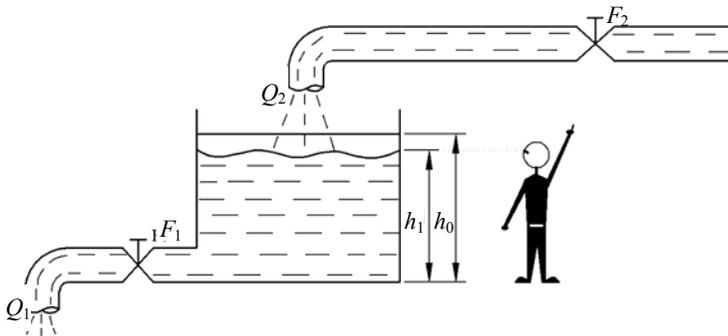


图 1-1 水池液面高度人工控制系统

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 。当工人实施控制时,需要不断用眼睛进行观察,并在大脑里将实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 做比较,根据比较的结果,决定将进水阀 F_2 的开度增大还是减小,以达到维持液面高度符合期望值的目的。

图 1-2 所示为人工参与的水池液面高度控制系统的结构图(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。

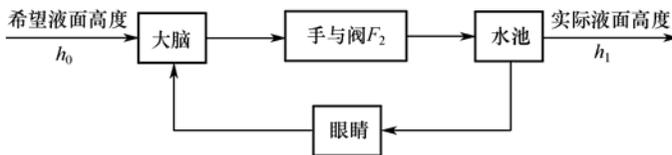


图 1-2 液面高度人工控制系统框图

- (1) 测量实际液面高度 h_1 ——用眼睛,充当测量机构。
- (2) 将测得的实际液面高度 h_1 与希望液面高度 h_0 进行比较——用大脑,充当比较机构。
- (3) 根据比较的结果,即按照偏差的正负和大小去决定阀 F_2 的开度——用手,充当执行机构。

显然，用人工控制既不能保证系统要求的控制精度，也不能减轻工人的劳动强度。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。

图 1-3 所示为由图 1-1 改造而成的液面高度自动控制系统。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 Q_1 如何变化，该系统总能自动维持其液面高度在允许的偏差范围之内。这个液面自动控制系统的工作原理是：假设水池液面高度 h_1 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 θ 相应增大，流量 Q_2 增加，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

图 1-3 所示的液面高度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——比较浮子的期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。

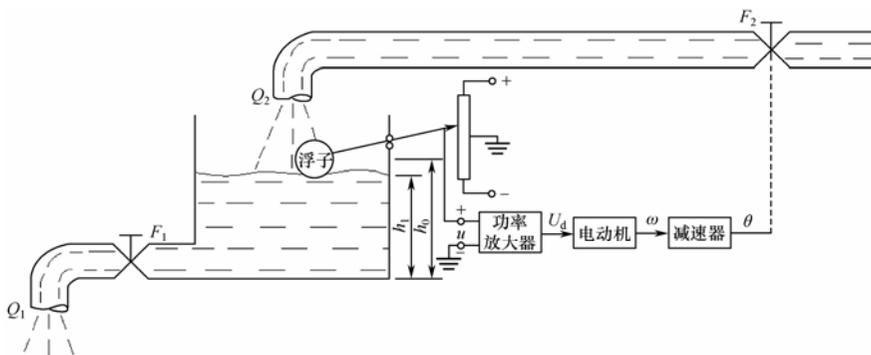


图 1-3 液面高度自动控制系统

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

为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(综合点)，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。

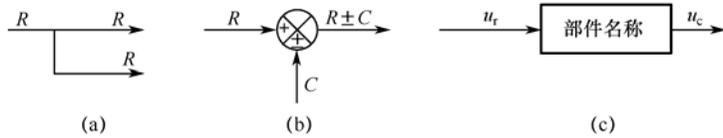


图 1-4 系统框图的基本组成单元

据此,可把图 1-3 所示液面高度自动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清晰。因此,在以后的讨论中,控制系统一般以框图的形式表示。

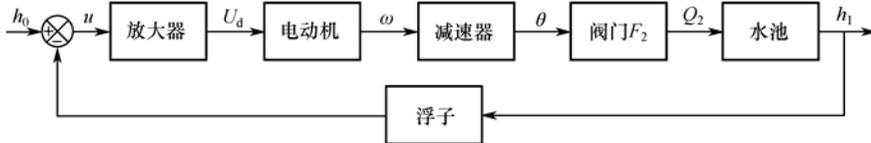


图 1-5 液面高度自动控制系统框图

重要概念和术语(中英对照)

自动控制	automatic control
自动控制系统	automatic control system
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,人们根据需要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,从而掌握不同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,自动控制系统可分为运动控制系统(motion control system)和过程控制系统(process control system)。

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,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 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轮舵位置控制系统等都是典型的随动系统。在随动系统中,当被控量是机械位置或其导数时,这类系统则称为伺服系统。

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。

1.2.3 开环与闭环控制系统

按照系统内部信息传递路径的特点来分类,控制系统可分为开环系统、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通道,则这种控制方式称为开环控制(open-loop control)。

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,系统不具备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。

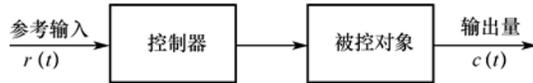


图 1-7(a)所示为一个开环直流调速系统,图 1-7(b)所示为它的框图。图中 U_g 为给定的参考输入。

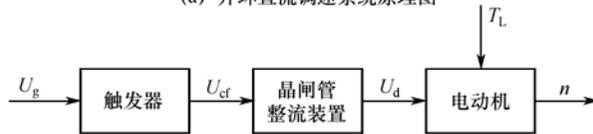
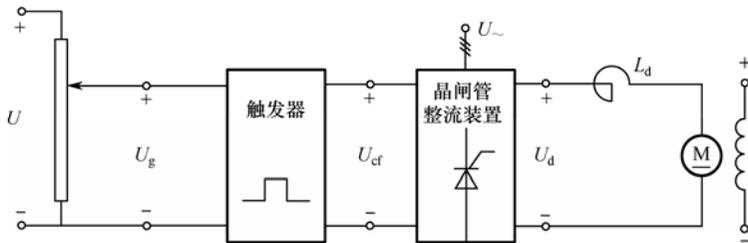


图 1-7 开环直流调速系统

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)

当系统扰动量产生的偏差可以预先进行补偿或影响不大时,采用开环控制是有利的。当扰动量无法预计或控制系统的精度达不到预期要求时,则应采用闭环控制。

若把系统的输出量(即被控制量)反馈到它的输入端,并与参考输入进行综合,这种控制方式称为闭环控制(closed-loop control)。由于这种控制系统中存在着被控制量经反馈环节至输入端的反馈通道,故闭环控制又称反馈控制(feedback control)。反馈控制具有正反馈和负反馈两种方式。多数自动控制系统中采用了负反馈。这里的“负”指控制作用的方向与偏差的方向相反这一性质,并非指某一物理量的极性为负。

负反馈闭环控制系统的优点是:利用测量元件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，所求得误差信号经控制器的处理运算和放大器的功率放大后形成控制作用，去驱动执行元件，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，通过负反馈控制的作用，能自动消除或削弱干扰对被控制量的影响。由于负反馈闭环控制系统具有良好的抗扰动性能，因而在控制工程中得到了广泛应用。

如果把图 1-7 所示的开环调速系统改造为图 1-8(a)所示的负反馈闭环系统，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增大，电枢电阻上的压降也变大，从而导致电动机转速降低；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 相应增大，经放大器放大后，使触发脉冲前移，晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大，电动机转速上升，从而补偿了由于负载转矩 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保持为原来的数值，进而实现了维持电动机转速恒定的目的。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。

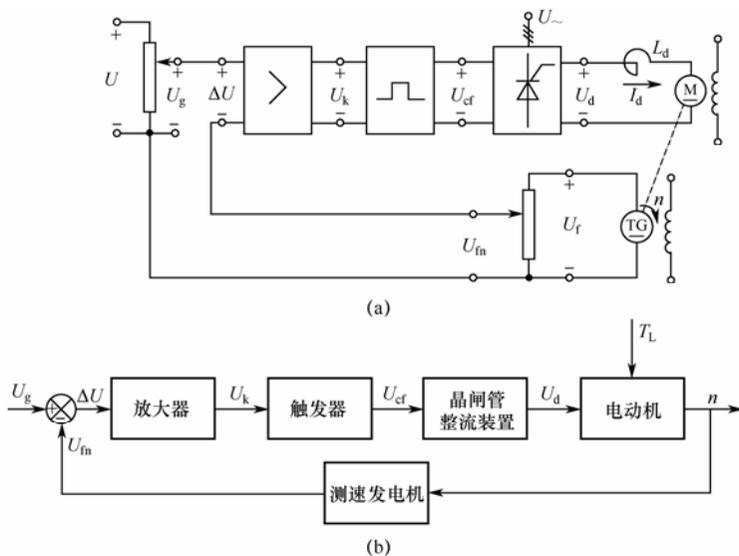


图 1-8 闭环直流调速系统

也可用图 1-9 所示的因果关系图来表示上述的自动调节过程。

$$\left. \begin{array}{l} T_L \uparrow \\ U \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_{fn} \downarrow \rightarrow \Delta U = (U_g - U_{fn}) \uparrow \rightarrow U_k \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

图 1-9 闭环直流调速系统自动调节的因果关系图

1.2.4 连续与离散控制系统

按照系统中所传输的信号与时间的函数关系来分类，控制系统可分为连续控制系统

(continuous control system)和离散控制系统(discrete control system)。

1. 连续控制系统

当系统中各组成环节的输入、输出信号都是时间的连续函数时,称此类系统为连续控制系统。连续控制系统的运动状态或特性一般用微分方程来描述。模拟式工业自动化仪表以及用模拟式仪表实现的过程控制系统都属于连续控制系统。

2. 离散控制系统

在控制系统各部分的信号中,只要有一个是时间 t 的离散信号,即信号以脉冲序列或数码形式传递,则称该系统为离散控制系统。连续信号经过采样开关的采样就可以转化成离散信号。离散系统中一般既有连续的模拟信号,也有离散的数字信号。图 1-10 所示的计算机控制系统就是一种常见的离散控制系统。离散控制系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述,其分析研究方法也不同于连续系统。



图 1-10 计算机控制系统的框图

1.2.5 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,控制系统可分为线性控制系统(linear control system)和非线性控制系统(nonlinear control system)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,其一般形式如式(1-1)所示:

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

式中, $c(t)$ 是系统被控量; $r(t)$ 是系统输入量。

系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 是常数时,称为定常系统;系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 随时间变化时,称为时变系统。

线性系统的重要性质是可以应用叠加原理。叠加原理有两重含义,即具有可叠加性和均匀性(或齐次性)。对线性系统进行分析或设计时,如果有几个外作用(输入量)同时加于系统,则可以分别处理它们,依次求出各个外作用单独加入时系统的输出,然后将它们叠加。此外,每个外作用在数值上可只取单位值,从而大大简化了系统的研究工作。

2. 非线性控制系统

在控制系统中，只要有一个元件的输入-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，举例如式(1-2)所示：

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

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关。

严格地说，绝对的线性特征(或元件)是不存在的，因为所有物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性。为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进行线性化处理。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，常人为引入某种非线性元件。例如，为实现最短时间控制，采用开关型控制方式；又如，在晶闸管组成的整流装置的直流调速系统中，为改善系统的动态特性和限制电动机的最大电流，人们有意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。

重要概念和术语(中英对照)

运动控制系统	motion control system
过程控制系统	process control system
开环控制	open-loop control
闭环控制	closed-loop control
反馈控制	feedback control
连续控制系统	continuous control system
离散控制系统	discrete control system
线性控制系统	linear control system
非线性控制系统	nonlinear control system

1.3 自动控制理论的发展概况

自动控制理论的形成远晚于人类对自动控制装置的应用，它产生于人们对自动控制技术的长期探索和大量实践，它的发展得到了其他学科(如数学、力学和物理学)的推动。二战后，包括工业现代化在内的诸多领域对自动控制的程度、速度、范围及其适应能力的要求不断提高，从而推动了自动控制理论和技术的迅速发展。20世纪60年代以来，电子计算机技术的迅速发展奠定了自动控制理论和技术的物质基础，于是逐步形成了一门现代科学分支，即现代控制理论。而近些年互联网技术和云计算技术的相继出现，则为自动控制

理论的应用提供了非常有力的支持。

纵观历史,控制理论的发展大致经历了3个阶段。

1. 经典控制理论(18世纪60年代起)

自动控制技术是人类长期以来社会活动的产物,特别是工业生产和军事活动的产物。俄国人波尔祖诺夫(И. И. Ползунов)于1765年发明了控制锅炉水位的自动装置,用浮筒与杠杆操纵蒸汽锅炉的进水阀门以调节锅炉水位。英国人瓦特(J. Watt)于1768年发明了飞球调速器,利用蒸汽机飞轮带动的金属飞球的离心力操纵蒸汽机的进气阀门以控制蒸汽机的转速。1868年,马克斯威尔(J. C. Maxwell)首先在 *Proceeding of the Society of London* 第16卷上发表了“论调速器”一文。他指出,在控制系统的平衡点的邻域内,运动可用线性方程描述,因此可以根据特征方程的根的位置判断系统的稳定性。这是目前公认的第一篇以反馈控制为其主要研究内容的经典控制理论论文。劳斯(E. J. Routh)于1877年提出了有关线性系统稳定性的一种代数判据,使自动控制技术前进了一大步。

1892年,俄国伟大的数学力学家李亚普诺夫(А. М. Ляпунов)发表了其具有深远历史意义的博士论文“运动稳定性的一般问题”(The General Problem of the Stability of Motion, 1892)。在该论文中,他提出了为当今学术界广泛应用且影响巨大的李亚普诺夫方法,也即李亚普诺夫第二方法或李亚普诺夫直接方法。该方法不仅可用于线性系统而且可用于非线性时变系统的分析与设计,已成为当今自动控制理论课程讲授的主要内容之一。

1932年,乃奎斯特(H. Nyquist)研制了电子管振荡器,提出以传递函数为依据的划时代的稳定性判别准则。乃奎斯特对控制理论的重大贡献极大地推动了各种工业控制工程。乃奎斯特稳定判据的巨大价值在于:它并不要求知道系统的微分方程或特征多项式,只需要用仪器测出开环系统的增益对频率的关系,就可以使用这种判据,它是与实验直接挂钩的。不仅如此,奈氏曲线还可以直接提示如何通过调节开环增益与频率的关系来改进系统的稳定性。

20世纪30年代末,美国、日本和苏联的科学家们先后创立了用仅有两种工作状态的继电器组成的逻辑自动机理论,并被迅速用于生产实践。在这一时期又先后出现了关于信息的计量方法和传输理论。1945年,波特(H. W. Bode)总结了负反馈放大器原理,出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书,奠定了经典控制理论(classic control theory)基础,在西方国家开始形成自动控制学科。

在这些科学成就的推动下,曾亲自参加过自动化防空系统研制工作的美国数学家维纳(N. Wiener)于1948年把反馈控制的概念和理论应用于动物体内自动调节和控制过程的研究,并把动物和机器中的信息传递和控制过程视为具有相同机制的现象加以研究,发表了著名的《Cybernetics(控制论)》,形成了完整的经典控制理论。1950年,伊文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法,能简便地寻找特征方程的根,进一步充实了经典控制理论。到20世纪50年代,频率响应法已经成为控制领域占主导地位的方法,框图、传递函数、乃奎斯特图、伯德图、描述函数、根轨迹图等概念和方法,都已是为人熟知的有

效且方便的工具，就连随机扰动的作用也已能用频率响应方法表示。频率响应方法的成就达到了高峰。

1954年，中国学者钱学森所著英文版《Engineering Cybernetics(工程控制论)》一书问世，第一次用“工程控制论”这一名词称呼在工程设计和实验中能够直接应用的关于受控工程系统的理论、概念及方法。这是一部首次把控制论推广到工程技术领域的经典著作。工程控制论的目的是把工程实践中常用的设计原则和试验方法加以整理和总结，取其共性，凝练提升为科学理论，使科学技术人员获得更开阔的眼界，用更系统的方法去观察技术问题，以指导千差万别的工程实践。该书给这一学科所赋予的含义和研究范围很快为世界科学技术界所接受。此后，经典控制理论得到了更加深入和广泛的研究与应用。

经典控制理论多半用来解决单输入/单输出的问题，所涉及的系统一般来说是线性定常系统，非线性系统中的相平面法也仅含两个变量。如机床和轧钢机中常用的调速系统，发电机的电压自动调节系统以及冶炼炉的温度自动控制系统等，均被当成单输入/单输出的线性定常系统来处理。如果把某个干扰考虑在内，也只是对它们进行线性叠加而已。解决上述问题时，采用频率法、根轨迹法、奈氏稳定判据、期望对数频率特性综合等比较方便，这些方法均属于通常所说的经典控制理论范畴，所得结果在对精确度、准确度要求不高的情况下完全可用。经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的，它具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点，这个特点是和20世纪40年代和50年代生产发展的状况以及电子计算机技术尚处于发展初级阶段密切相关的。

2. 现代控制理论(20世纪60年代起)

生产的发展与社会的需求不断推动科学的进步。空间技术的需要和电子计算机的应用，推动了现代控制理论和技术的产生与发展。20世纪50年代末至60年代初，空间技术的发展迫切要求对多输入/多输出、高精度、参数时变的系统进行分析和设计。这是经典控制理论无法有效解决的问题，于是出现了新的自动控制理论，称为“现代控制理论(modern control theory)”。

数学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)于1963年提出的极大值原理奠定了最优控制理论的基础。贝尔曼(R. Bellman)于1957年进行的动态规划研究属于约束下的动态优化问题，他揭示了状态概念对于许多决策问题与控制问题的重要意义。卡尔曼(R. E. Kalman)于1960年发表了“控制系统的一般理论”，基于状态概念深入解决了二次型性能指标下的线性最优控制问题，他的方法是综合性的，避免了此前研究工作的试凑式做法。由于研究状态空间模型与传递函数描述之间的关系，因此建立了可控制与可观测性这两个基本的系统结构的概念。人们公认卡尔曼奠定了现代控制理论的基础。状态空间方法的重要价值在于：它比频率域的理论更通用、更严格，也更为深刻地反映了系统的内在结构。状态空间方法对控制理论发展的影响更为深远。

现代控制(modern control)理论的主要内容为：状态空间法、系统辨识、最佳估计、最优控制和自适应控制。

3. 大系统理论和智能控制理论(20世纪70年代起)

这些理论是20世纪70年代后期,控制理论向广度和深度发展的结果。

大系统(large-scale system)理论是关于大系统分析和设计的理论,包括大系统的建模、模型降阶、递阶控制、分散控制和稳定性等内容。大系统的特征是:规模庞大、结构复杂、变量众多且常带有随机性信息与控制系统,它涉及生产过程、交通运输、计划管理、环境保护、空间技术等多方面的控制和信息处理问题。随着生产的发展和科学技术的进步,出现了许多大系统,如电力系统、城市交通网、数字通信网、柔性制造系统、生态系统、水源系统和社会经济系统等。这类系统都具有上述特点,因此造成系统内部各部分之间通信的困难,提高了通信成本,降低了系统的可靠性。原有的控制理论,不论是经典控制理论,还是现代控制理论,都建立在集中控制的基础上,即认为整个系统的信息能集中到某一点,经过处理,再向系统各部分发出控制信号。这种理论应用到大系统时遇到了困难。这不仅由于系统庞大,信息难以集中,也由于系统过于复杂,集中处理的信息量太大,难以实现。因此人们开始研究大系统理论,用于弥补原有控制理论的不足。

智能控制(intelligent control)是人工智能、运筹学、控制论和信息论等学科交叉的产物,是传统控制理论发展的高级阶段。智能控制是针对系统的复杂性、非线性和不确定性而提出的,是指驱动智能机器自主地实现其目标的过程。“智能控制”这一概念是傅京孙(K. S. Fu)教授于20世纪70年代初最先提出的。早在1965年,他提出把人工智能领域的启发式规则应用于学习系统,这一时期可以看成“智能控制”思想的萌芽阶段。美国的萨利迪斯(G. N. Saridis)于1977年把傅京孙教授的二元结构扩展为三元结构,即人工智能、自动控制和运筹学的交叉;后来中南大学的蔡自兴教授又将三元结构扩展为四元结构,即人工智能、自动控制、信息论和运筹学的交叉,形成和完善了智能控制的理论体系。

重要概念和术语(中英对照)

经典控制理论	classic control theory
现代控制理论	modern control theory
大系统	large-scale system
智能控制	intelligent control
工程控制论	engineering cybernetics

1.4 自动控制系统的性能要求

在设计自动控制系统之前,必须对其提出一定的性能(performance)要求。反之,对于一个现成的自动控制系统,也有必要对其实际工作性能进行客观评价。性能要求与性能评价是一个事物的两个方面。

对于一个闭环控制系统而言,当输入量和扰动量均不变时,系统输出量也恒定不变,这种状态称为平衡状态或静态、稳态。当输入量或扰动量发生变化时,反馈量与输入量之

间的偏差由于控制器的调节作用而逐渐趋于零,使输出量最终趋于稳定,即达到一个新的平衡状态。但是由于系统中总存在惯性,故系统从一个平衡点转换到另一个平衡点无法瞬间完成,即存在一个过渡过程,该过程称为动态过程或暂态过程。

尽管自动控制系统有不同的类型,对每个系统都有不同的特殊要求,但对于各类系统来说,在已知系统的结构和参数时,我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下,其被控量变化的全过程。例如,对于恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程;对于随动系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随输入量变化的全过程。但是,对每一类系统被控量变化全过程提出的共同的和本质的要求都是一样的,即输出量跟随输入量,这可以大致归结为对于稳定性、快速性和准确性的要求。

1. 稳定性

稳定性(stability)是保证控制系统正常工作的先决条件,是控制系统的重要特性。所谓稳定性,是指控制系统偏离平衡状态后,自动恢复到平衡状态的能力。在扰动信号的干扰、系统内部参数变化和环境条件改变的情况下,系统状态会偏离平衡状态。如果在随后时间内,系统的输出能够最终回到原先的平衡状态,则系统是稳定的;反之,如果系统的输出逐渐增加趋于无穷,或者进入振荡状态,则系统是不稳定的。

一个稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。具体来说,对于稳定的恒值系统,被控量因扰动而偏离期望值后,经过一个过渡过程,被控量应恢复到原来的期望值状态;对于稳定的随动系统,被控量应始终跟踪输入量的变化。反之,不稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差将随时间的增长而发散,因此,不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

2. 快速性

为很好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对过渡过程的形式和快慢提出要求,这个要求一般称为系统的动态性能(dynamic performance)。一般情况下,当系统由一个平衡态过渡到另一个平衡态时,通常希望过渡过程既快速又平稳。例如,对于稳定的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,而炮身跟踪目标所用过渡过程时间太长,就不可能击中目标。因此,在设计控制系统时,对控制系统的过渡过程时间(即快速性)和最大振荡幅度(即超调量)都有一定的要求。

3. 准确性

准确性就是要求被控量和设定值之间的误差不超出所要求的精度范围。准确性反映了系统的稳态精度,通常控制系统的稳态精度可以用稳态误差(steady state error)来表示。

理想情况下,当过渡过程结束后,被控量达到的稳态值(即平衡状态)应与期望值一致。但实际上,由于系统结构、外作用形式以及摩擦和间隙等非线性因素的影响,被控量的稳态值与期望值之间会存在误差,称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统精度的重要标志,在技术指标中一般都有具体要求。

根据输入点的不同,一般可以分为参考输入稳态误差和扰动输入稳态误差。对于随动

系统或其他对控制轨迹有要求的系统,还应当考虑动态误差。误差越小,控制精度或准确性就越高。

稳定性是系统正常工作的前提,快速性是对稳定系统暂态性能的要求,准确性是对稳定系统稳态性能的要求。只有在系统稳定的前提下,谈论其快速性及准确性才有意义。

重要概念和术语(中英对照)

性能	Performance, characteristics
稳定性	stability
稳态误差	steady state error
过渡过程	transient process
动态性能	dynamic performance

本章小结

(1) 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,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论手段。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。

(2) 开环控制系统结构简单,但当受到干扰作用后,没有自行消除或减小误差的功能。当系统扰动量产生的偏差可以预先进行补偿或影响不大时,采用开环控制是有利的。当扰动量无法预计或控制系统的精度达不到预期要求时,则应采用闭环控制。

(3) 闭环控制系统具有反馈环节,它能依靠反馈环节进行自动调节,以补偿扰动对系统产生的影响,因此可以极大地提高系统的精度。闭环控制在工程上得到了广泛应用。

(4) 自动控制系统通常由给定元件、检测元件、比较机构、放大机构、执行机构、控制对象和反馈环节等部件组成。方框图(动态结构图)可以直观地表达各环节的因果关系,可以表达各种作用量和中间量的作用点与传递情况以及它们对输出量的影响。

(5) 对自动控制系统的性能提出的共同的(和本质的)要求是输出量跟随输入量,这可以大致归结为对于稳定性、快速性和准确性的要求。必要时需要用相应的量化指标来描述控制系统的性能,以便进行比较。

习 题

- 1-1 分析比较开环控制与闭环控制的特征、优缺点和应用场合的不同。
- 1-2 组成自动控制系统的主要环节有哪些?它们各有什么特点?起什么作用?

1-3 某锅炉液位控制系统的工作原理如图 1-11 所示, 气动薄膜调节阀设置在给水进水管上, 液位检测变送器、调节器、定值器(即给定器)全部采用气动单元组合(QDZ)仪表。

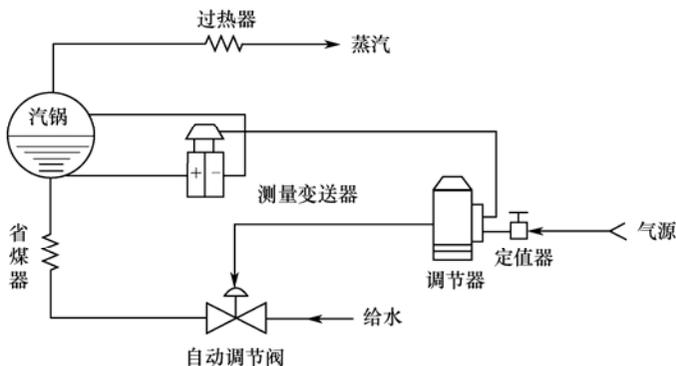


图 1-11 习题 1-3 图

- (1) 试画出该液位控制系统的原理方框图, 要求标出各环节对应的信号。
- (2) 说明被控量、给定值及可能的干扰量各是什么?
- (3) 从系统的结构、给定值变化的规律及对对象特点来分类, 该自动控制系统分别属于哪类控制系统?

1-4 分析图 1-12 所示的液位控制系统, 画出组成系统的方框图。并指出:

- (1) 哪个是被控对象? 被控量是什么? 影响被控量的主扰动量是什么?
- (2) 哪个是执行元件?

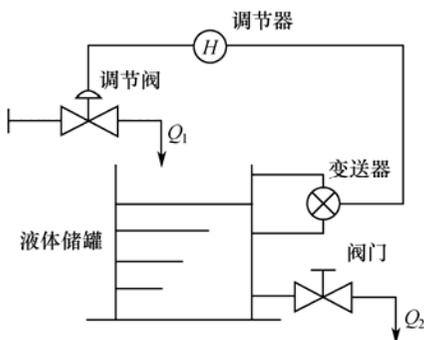


图 1-12 习题 1-4 图

1-5 一炉温控制系统的工作原理如图 1-13 所示, 指出系统的输入量、输出量、偏差信号和被控对象, 画出系统的方框图, 并简单说明炉温的调节过程。

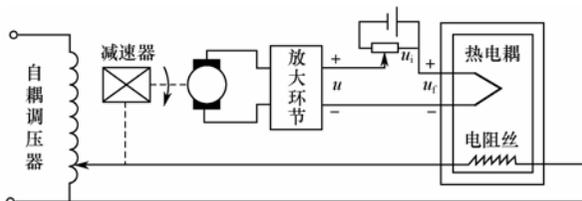


图 1-13 习题 1-5 图