



21世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

自动控制原理

刘国海 杨年法 主编



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014057306

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

自动控制原理

刘国海 杨年法 主编



TP13-43
138



机械工业出版社



北航

C1742887

014027300

本书是根据高等学校自动化类专业对“自动控制原理”课程的要求编写的。全书共分8章,内容有自动控制的基本概念,自动控制系统的数学模型,自动控制系统的时域分析法,根轨迹分析法,频率特性分析法,自动控制系统的校正,线性离散控制系统的分析,非线性控制系统的分析,每章都有适当的例题和习题。本书力求结合专业特点,并兼顾相近专业的要求。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、检测技术与自动化装置等专业的教材,也可作为电子信息工程和机电类各专业的教学用书,还可供自动控制等专业领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/刘国海,杨年法主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 8

21 世纪高等院校电气信息类系列教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 47304 - 6

I. ①自… II. ①刘…②杨… 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(2014)第 150431 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:时 静 责任编辑:时 静 张利萍

版式设计:赵颖喆 责任校对:胡艳萍

责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.5 印张 · 446 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 47304 - 6

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前言

随着生产和科学技术的发展,自动化技术已逐步深入各行各业以及人们的生活。自动控制理论是各类工程技术人员所必须掌握的技术基础知识,高等院校中越来越多的专业将“自动控制原理”作为必修课程。通过该课程的学习,可以从宏观上了解自动控制系统的结构、性质和任务。

本书介绍的自动控制原理属经典控制理论的范畴。虽然控制理论已从第一代经典控制理论发展到第二代现代控制理论,并已进入第三代控制理论,即大系统理论和智能控制理论,但经典控制理论仍是学习现代控制理论和其他高等控制理论的基础。

随着科学技术的发展,适时地改进自动控制理论教材也是当前课程改革的要求,本教材在分析研究国内外相关教材的基础上,依据高等院校本科自动化控制理论课程的教学要求,从注重理论基础与基本概念,拓宽专业面出发,结合自动化及其他相近专业的教学特点。比较全面地阐述了自动控制原理的基本内容。

本书具有以下几个特点:

1. 从基本理论和概念出发,精炼内容,突出重点,淡化繁冗的理论推导,注重理论与实际的结合。

2. 为了让读者更好地掌握应用所学的知识,适应计算机仿真在控制系统中应用越来越广的要求,各章均安排了采用 MATLAB 仿真的控制系统分析与应用实例。

3. 为了便于读者自学和更好地掌握本课程的基本理论,锻炼和培养分析、综合及解决实际问题的能力,各章均备有适当的例题和习题,并给出小结,供读者学习和归纳使用。

4. 全书共 8 章,参考学时为 60~90 学时。

刘国海、杨年法担任主编,负责全书的统稿。参加本书编写的还有陈兆岭、薛力红、丁煜函、李可、马莉、张军、丁世宏、侯霞。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

版式设计: 赵晓燕 责任校对: 胡海峰

责任印制: 刘 真

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·446 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47304-6

定价: 39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心: (010) 88361066

销售一部: (010) 58326294

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379649

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

理工官网: <http://www.cmpbook.com>

理工微博: <http://weibo.com/cmp1952>

邮购地址: 北京市西城区百万庄大街 24 号

目 录

出版说明

前言

第1章 绪论 1

1.1 自动控制的基本概念 1

1.1.1 人工控制与自动控制 1

1.1.2 控制系统框图 2

1.1.3 开环控制与闭环控制 3

1.1.4 自动控制系统的应用实例 3

1.2 自动控制系统的组成 6

1.2.1 基本组成部分 6

1.2.2 常用的名词术语 7

1.3 自动控制系统的分类 7

1.4 自动控制理论概要 8

1.4.1 自动控制理论的发展 8

1.4.2 对自动控制系统的基本要求 9

1.4.3 本书内容 10

1.5 小结 11

1.6 习题 11

第2章 自动控制系统的数学模型 14

2.1 控制系统数学模型的概念 14

2.1.1 建立数学模型的方法 14

2.1.2 数学模型的类型 14

2.2 控制系统的微分方程 15

2.2.1 线性系统微分方程的建立 15

2.2.2 微分方程的增量化表示 18

2.2.3 线性系统的重要特征 19

2.2.4 非线性微分方程的线性化 20

2.3 控制系统的传递函数 21

2.3.1 传递函数的概念 21

2.3.2 关于传递函数的几点说明 23

2.3.3 典型环节及其传递函数 25

2.4 控制系统的结构图 28

2.4.1 结构图的概念 29

2.4.2 结构图的组成和建立 29

2.4.3 结构图的等效变换和简化 30

2.4.4 典型闭环控制系统的结构图及其

传递函数 36

2.5 信号流程图 38

2.5.1 信号流程图的概念 38

2.5.2 梅逊公式 40

2.6 小结 41

2.7 习题 42

第3章 自动控制系统的时域

分析法 45

3.1 时域分析法基础 45

3.1.1 典型输入信号 45

3.1.2 瞬态响应和稳态响应 46

3.1.3 阶跃响应性能指标 46

3.2 一阶系统的动态性能 47

3.3 二阶系统的动态性能 49

3.3.1 典型二阶系统的动态性能 49

3.3.2 具有零点的二阶系统分析 57

3.4 高阶系统的时域分析 60

3.5 系统稳定性分析 60

3.5.1 线性系统稳定的概念和稳定的

充要条件 61

3.5.2 劳斯 (Routh) 稳定判据 63

3.6 稳态误差分析 68

3.6.1 稳态误差的定义 69

3.6.2 控制系统的型别 70

3.6.3 给定输入作用下系统的稳态

误差 70

3.6.4 扰动输入作用下系统的稳态

误差 74

3.6.5 降低稳态误差的方法 75

3.7 PID 基本控制规律的分析 78

3.8 利用 MATLAB 进行时域分析 80

3.8.1 传递函数模型的 MATLAB

表示 80

3.8.2 用 MATLAB 求控制系统的单位

阶跃响应 82

3.8.3 利用 MATLAB 辅助分析控制系

统的稳定性 83

3.9 小结 83

3.10 习题	84	5.5.1 幅角定理	147
第4章 根轨迹分析法	89	5.5.2 奈奎斯特判据	149
4.1 根轨迹的基本概念	89	5.5.3 奈奎斯特判据在 I 型和 II 型 系统中的应用	150
4.1.1 根轨迹的概念	89	5.5.4 在伯德图上判别闭环系统的 稳定性	155
4.1.2 幅值条件和相角条件	91	5.5.5 多回路系统的稳定性分析	156
4.2 绘制根轨迹的基本法则	93	5.6 相对稳定性	157
4.3 参量根轨迹和根轨迹簇	106	5.7 系统闭环频率特性曲线的绘制	161
4.3.1 参量根轨迹	106	5.7.1 用向量法求闭环频率特性	161
4.3.2 根轨迹簇	108	5.7.2 等 M 圆图和等 N 圆图	162
4.4 零度根轨迹	110	5.7.3 利用闭环幅频特性分析和 估算系统的性能	164
4.5 延迟系统的根轨迹	112	5.8 利用开环频率特性分析系统的 性能	167
4.5.1 延迟系统根轨迹方程的幅值条件 和相角条件	112	5.9 利用 MATLAB 绘制频率特性曲 线图	169
4.5.2 绘制延迟系统的根轨迹	113	5.9.1 利用 MATLAB 绘制奈奎斯 特图	169
4.5.3 根轨迹上 K_g 值的确定	114	5.9.2 利用 MATLAB 绘制伯德图	170
4.6 根轨迹法分析系统的性能	116	5.9.3 利用 MATLAB 分析相对稳 定性	171
4.7 增加开环零极点对根轨迹的影响	121	5.10 小结	171
4.7.1 增加开环零点对根轨迹的 影响	121	5.11 习题	172
4.7.2 增加开环极点对根轨迹的 影响	121	第6章 自动控制系统的校正	176
4.7.3 增加开环偶极子对根轨迹 的影响	121	6.1 控制系统校正的基本概念	176
4.8 利用 MATLAB 绘制根轨迹图	124	6.1.1 校正方式	176
4.9 小结	125	6.1.2 性能指标	177
4.10 习题	125	6.1.3 设计方法	178
第5章 频率特性分析法	129	6.2 校正装置及其特性	178
5.1 频率特性的基本概念	129	6.3 串联校正的设计	186
5.1.1 频率特性的定义	129	6.3.1 串联校正的频率法设计	186
5.1.2 频率特性和传递函数的关系	131	6.3.2 串联校正的根轨迹法设计	193
5.2 频率特性的图示方法	131	6.3.3 串联校正的期望对数频率特性 设计法	200
5.2.1 幅相频率特性曲线	132	6.4 反馈校正的设计	203
5.2.2 对数频率特性曲线	132	6.5 复合控制校正	206
5.2.3 对数幅相特性曲线	133	6.6 小结	207
5.3 典型环节的频率特性	133	6.7 习题	208
5.4 系统的开环频率特性	141	第7章 线性离散控制系统的分析	211
5.4.1 系统开环幅相频率特性的 绘制	141	7.1 线性离散控制系统的概念	211
5.4.2 系统开环对数频率特性的 绘制	144	7.2 采样过程和采样定理	212
5.4.3 最小相位系统与非最小相位 系统	146	7.2.1 采样过程	212
5.5 奈奎斯特稳定判据	147		

7.2.2 采样定理	213	7.9 小结	253
7.2.3 信号复现与零阶保持器	215	7.10 习题	253
7.3 z 变换	216	第8章 非线性控制系统的分析	256
7.3.1 z 变换的定义	217	8.1 非线性控制系统概述	256
7.3.2 z 变换的求法	217	8.1.1 非线性现象的普遍性	256
7.3.3 z 变换的基本定理	220	8.1.2 控制系统中的典型非线性特性	256
7.3.4 z 反变换	223	8.1.3 非线性控制系统的特殊性	258
7.4 离散控制系统的数学模型	225	8.1.4 非线性控制系统的分析方法	259
7.4.1 差分方程	225	8.2 相平面法	259
7.4.2 脉冲传递函数	227	8.2.1 相平面的基本概念	260
7.5 离散控制系统的稳定性分析	232	8.2.2 构造相平面图	262
7.5.1 s 平面与 z 平面的映射关系	232	8.2.3 由相平面图确定时间	265
7.5.2 离散控制系统稳定的充要条件	233	8.2.4 线性系统的相平面分析	266
7.5.3 离散控制系统的劳斯稳定判据	234	8.2.5 非线性系统的相平面分析	267
7.6 离散控制系统的稳态误差分析	236	8.3 描述函数法	269
7.7 离散控制系统的动态性能分析	239	8.3.1 描述函数的基本概念	269
7.7.1 离散控制系统闭环极点分布和暂态响应的关系	240	8.3.2 典型非线性特性的描述函数	274
7.7.2 离散控制系统动态性能的估算	243	8.3.3 用描述函数法分析非线性系统的稳定性	277
7.8 离散控制系统的校正	245	8.4 小结	281
7.8.1 离散控制系统校正的特点	245	8.5 习题	282
7.8.2 校正装置的具体设计方法	245	附录 常用函数z变换表	284
7.8.3 最少拍系统设计	247	参考文献	286

第 1 章 绪 论

1.1 自动控制的基本概念

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置（简称控制器）使整个生产过程或工作机械（称为被控对象）自动地按预先规定的规律运行，或使它的某些物理量（称为被控量）按预定的要求产生变化。

事实上，任何技术设备、工作机械或生产过程都必须按要求运行。例如，要想发电机正常供电，其输出的电压和频率必须保持恒定，尽量不受负荷变化的干扰；要想数控机床能加工出高精度的工件，就必须保证其工作台或刀架的进给量准确地按照程序指令的设定值变化；要使烘烤炉提供优质的产品，就必须严格地控制炉温；要使火炮能自动跟踪并命中飞行目标，炮身就必须按照指挥仪的命令而作方位角和俯仰角的变动……所有这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

1.1.1 人工控制与自动控制

自动控制系统的种类很多，被控制的物理量各种各样，如温度、压力、流量、电压、转速和位移等，所以组成各种控制系统的元、部件有很大的差异，但从控制的角度看，系统的基本结构都是类同的，一般都是通过机械、电气、液压等方法来代替人工控制。

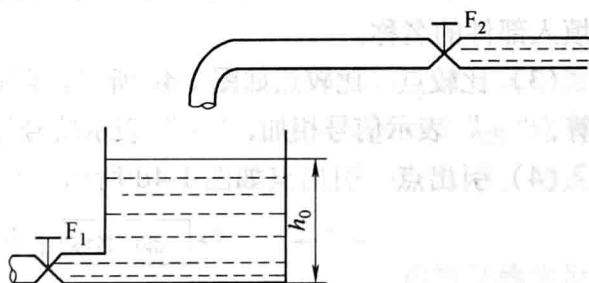


图 1-1 水池液面人工控制系统

为了了解自动控制系统的结构，首先分析一下图 1-1 所示的水池液面控制系统。图中 F_1 为放水阀、 F_2 为进水阀，控制要求液面的希望高度等于 h_0 。当人参与控制时，就要不断地将实际液面的高度与希望液面的高度作比较，根据比较的结果，决定进水阀 F_2 开度的增大还是减小，以达到维持液面高度不变的目的。图 1-2 为该系统控制的框图。由图可见，人在参与控制中起了以下三方面的作用：

- 1) 测量实际液面的高度 h_1 ——用眼睛。
- 2) 将测得实际液面的高度 h_1 与希望液面的高度 h_0 相比较——用大脑。
- 3) 根据比较的结果，即按照偏差的正负去决定控制的动作——用手。



图 1-2 液面人工控制系统的框图

如果用自动控制去代替人工控制，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。显然，用人工控制既不能保证系统所需的控制精度，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，就可以实现不论放水阀 F_1 输出的流量如何变化，系统总能自动地维持其液面高度在允许的偏（误）差范围之内。假设水池液面的高度因 F_1 阀开度的增大而稍有降低，则系统立即产生一个与降落液面高度成比例的误差电压 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 的开度也相应地增大，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

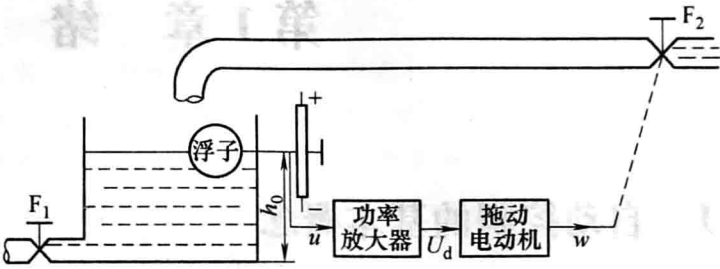


图 1-3 液面自动控制系统

1.1.2 控制系统框图

为了使控制系统的表示既简单又明了，控制工程中常常采用方框表示系统中的各个组成部件，每个方框中填入它所表示部件的名称或其功能函数的表达式，不必画出系统的具体结构。根据信号在系统中的传递方向，用有向线段依次把它们连接起来，就可以得到整个系统的框图。

- 系统的框图由四个基本单元组成：
- (1) 信号线 信号线如图 1-4a 所示。它用带箭头的有向线段表示，箭头表示信号的传递方向，线旁标明相应的信号。
 - (2) 方框 方框如图 1-4b 所示。输入信号置于方框的左侧，右侧为其输出信号，方框中填入部件的名称。
 - (3) 比较点 比较点如图 1-4c 所示。它表示两个或两个以上的信号在该处进行加或减的运算，“+”表示信号相加，“-”表示信号相减。“+”可以省略不标，“-”必须标明。
 - (4) 引出点 引出点如图 1-4d 所示。它表示信号的引出。

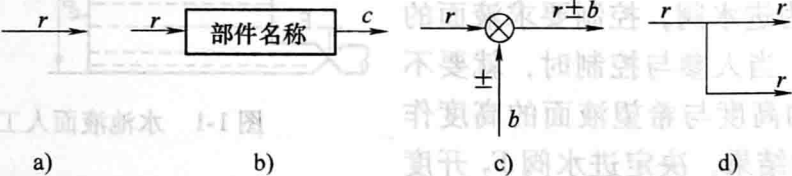


图 1-4 系统框图的基本组成单元

a) 信号线 b) 方框 c) 比较点 d) 引出点

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。

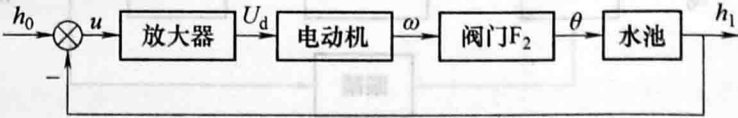


图 1-5 图 1-3 所示系统的框图

1.1.3 开环控制与闭环控制

为达到某一目的，由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体，称为系统。它一般由控制装置（控制器）和被控对象所组成。

自动控制系统有两种最基本的形式，即开环控制和闭环控制。

1. 开环控制系统

开环控制的特点是，在控制器与被控对象之间，只有正向的作用而没有反向的联系，即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意框图如图 1-6 所示。

在开环控制系统中，对于每一个参考输入量，就有一个与之相对应的工作状态和输出量。其控制精度取决于元件的精度和特性调整的精度。当系统存在扰动时，开环控制系统很难完成既定的控制任务，它只适用于系统扰动不大，并且控制精度要求不高的情况。

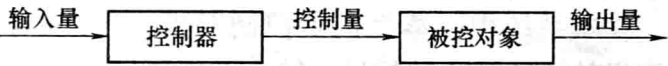


图 1-6 开环控制系统

2. 闭环控制系统

闭环控制的特点是，在控制器与被控对象之间，不仅存在着正向作用，而且存在反馈作用，即系统的输出量对控制量有直接影响。闭环控制系统的示意框图如图 1-7 所示。

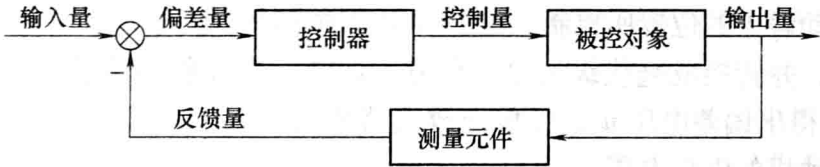


图 1-7 闭环控制系统

将检测出来的输出量送回到系统的输入端，并与输入量比较的过程称为反馈。若反馈量与输入量相减，称为负反馈；反之，若相加，则称为正反馈。输入量与反馈量之差，称为偏差量。偏差量作用于控制器上，控制器对偏差量进行某种运算，产生一个控制作用，使系统的输出量趋向于给定的数值。

闭环控制的实质，就是利用负反馈的作用来减小系统的误差，因此闭环控制又称为反馈控制。反馈控制是一种基本的控制规律，它具有自动修正被控量偏离给定值的作用，因而可以抑制各种干扰的影响，达到自动控制的目的。自动控制的基本原理实质上就是反馈控制原理。

1.1.4 自动控制系统的实际应用

在本节中，将介绍几个闭环控制系统的具体应用实例。

1. 蒸汽机转速自动控制系统

采用由瓦特发明的离心调速器的蒸汽机转速控制系统如图 1-8 所示。其工作原理为：当蒸汽机带动负载转动的同时，通过圆锥齿轮带动一对飞锤作水平旋转。飞锤通过铰链可带动套筒上下滑动，套筒内装有平衡弹簧，套筒上下滑动时可拨动杠杆，杠杆另一端通过连杆调节供汽阀门的开度。在蒸汽机正常运行时，飞锤旋转所产生的离心力与弹簧的反弹力相平衡，套筒保持某个高度，使阀门处于一个平衡位置。如果由于负载增大使蒸汽机转速 n 下

降，则飞锤因离心力减小而使套筒向下滑动，并通过杠杆增大供汽阀门的开度，从而使得蒸汽机的转速 n 上升。同理，若由于负载的减小使得蒸汽机的转速 n 增加，则飞锤因离心力增加而使套筒上滑，并通过杠杆减小供汽阀门的开度，迫使蒸汽机转速回落。这样，离心调速器就能自动地抵制负载变化对转速的影响，使蒸汽机的转速 n 保持在某个期望值附近。

在本系统中，蒸汽机是控制对象，蒸汽机的转速 n 是被控量。转速 n 经离心调速器测出并转换成套筒的位移量后，再经过杠杆传送至供汽阀门，来控制蒸汽机的转速，从而构成一个闭环控制系统。

离心调速器也常见于水力发电站中，作为控制水力透平机的转速之用。

2. 炉温自动控制系统

图 1-9 所示是工业炉温自动控制系统的原理图。在该系统中，加热炉采用电加热的方式运行，加热器所产生的热量和施加的电压 u_c 的二次方成正比， u_c 增高，炉温就上升。 u_c 的高低由调压器滑动触点的位置所控制，该触点由可逆转的直流电动机驱动。炉子的实际温度采用热电偶测出，并转换成毫伏级的电压信号，记为 u_f 。 u_f 作为系统的反馈电压与给定电压 u_r 进行比较，得出偏差电压 u_e ，经电压放大器放大成 u_1 ，再经过功率放大器放大为 u_a ，将其作为控制电动机的电枢电压。

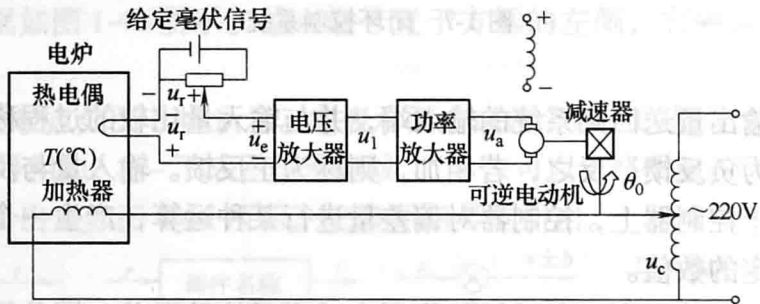


图 1-9 炉温自动控制系统

在正常情况下，炉温等于某个期望值 $T(^{\circ}\text{C})$ ，热电偶的输出电压 u_f 正好等于给定电压 u_r 。此时， $u_e = u_r - u_f = 0$ ，故 $u_1 = u_a = 0$ ，可逆电动机不转动，调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上，使 u_c 保持一定的数值。这时，炉子散失的热量正好等于从加热器吸取的热量，形成了稳定的热平衡状态。

若炉膛温度由于某种原因突然下降，如炉门打开造成的热量流失，则出现如下的控制过程：

$$T(^{\circ}\text{C}) \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow u_e \uparrow \rightarrow u_1 \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow u_c \uparrow \rightarrow T(^{\circ}\text{C}) \uparrow$$

控制的结果是使得炉膛温度回升，直至炉膛温度的实际值等于期望值为止。

3. 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、下滑和转弯。飞机与自动驾驶仪组成的自动控制系统称为飞机——自动驾驶仪系统。

如同飞行员操纵飞机一样，自动驾驶仪控制飞机飞行是通过控制飞机的三个操纵面（升降舵、方向舵、副翼）的偏转，改变舵面的空气动力特性，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和轨迹。现以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例，说明其工作原理。图 1-10 为飞机——自动驾驶仪系统稳定俯仰角的原理示意图。

图中，垂直陀螺仪作为测量元件用以测量飞机的俯仰角，当飞机以给定俯仰角水平飞行时，陀螺仪电位器没有电压输出；若飞机受到扰动，使俯仰角向下偏离期望值，陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号，经放大器放大后驱动舵机，一方面推动升降舵面向上偏转，产生使飞机抬头的转矩 M ，以减小俯仰角偏差；同时还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。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器输出信号越来越小，舵偏角也随之减小，直到俯仰角回到期望值，这时，舵面也恢复到原来状态。

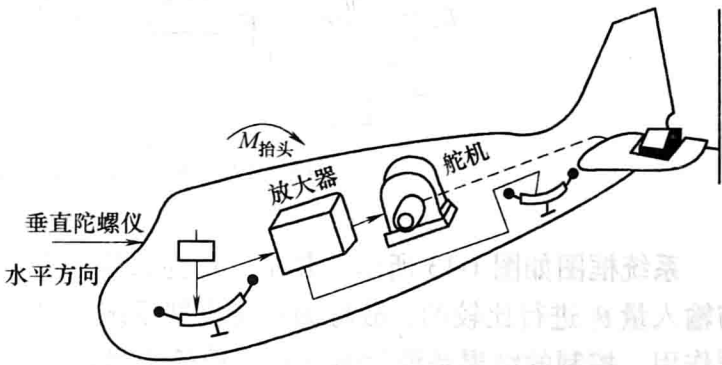


图 1-10 飞机——自动驾驶仪系统原理图

飞机——自动驾驶仪系统稳定俯仰角的系统框图如图 1-11 所示，图中，飞机是被控对象，俯仰角是被控量，放大器、舵机、垂直陀螺仪、反馈电位器等是控制装置，即自动驾驶仪。参考量是给定的常值俯仰角，控制系统的任务就是在任何扰动（如阵风或气流冲击）作用下，始终保持飞机以给定的俯仰角飞行。

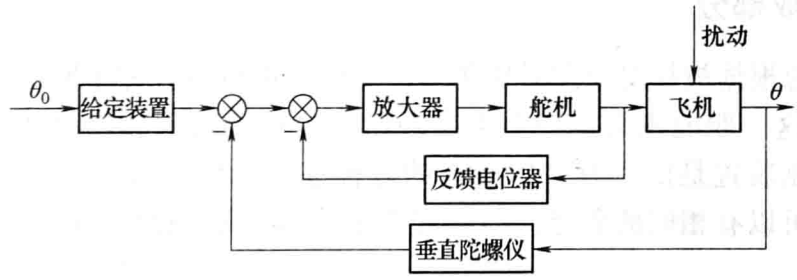


图 1-11 俯仰角控制系统框图

4. 导弹发射架的方位控制

图 1-12 所示是一个用以控制导弹发射架方位的电位器式随动系统原理图。图中，电位器 RP_1 、 RP_2 并联后跨接到同一电源 E_0 的两端，其滑臂分别与输入轴和输出轴相连接，以组成方位角的给定装置和反馈装置。输入轴由手轮操纵；输出轴则由直流电动机经减速后带动，电动机采用电枢控制的方式工作。

当摇动手轮使电位器 RP_1 的滑臂转过一个输入角 θ_i 的瞬间，由于输出轴的转角 $\theta_o \neq \theta_i$ ，于是出现一个偏差 θ_e ： $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ ，该角差通过电位器 RP_1 、 RP_2 转换成电压，并以偏差电压的方式表示出来，即 $u_e = u_i - u_o$ 。

若 $\theta_i > \theta_o$ ，则 $u_i > u_o$ ，即 $u_e > 0$ 。该电压经放大后驱动电动机作正向转动，带动导弹发

射架转动的同时，并通过输出轴带动电位器 RP_2 的滑臂转过一定的角度 θ_o ，直至 $\theta_o = \theta_i$ ，此时 $u_o = u_i$ ，故偏差电压 $u_e = 0$ ，电动机才停止转动。这时，导弹发射架就停留在相应的方位角上，也就是说，随动系统输出轴的运动已经完全复现了输入轴的运动。

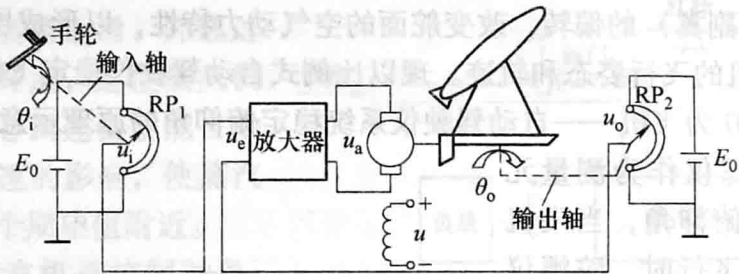


图 1-12 导弹发射架方位控制系统

系统框图如图 1-13 所示。其中，作为系统输出量的方位角 θ_o 是全部直接反馈到输入端与输入量 θ_i 进行比较的，故称为单位反馈系统。只要 $\theta_i \neq \theta_o$ ，系统就出现偏差，从而产生控制作用，控制的结果是消除偏差 θ_e ，使输出量 θ_o 严格地跟随输入量 θ_i 的变化而变化。

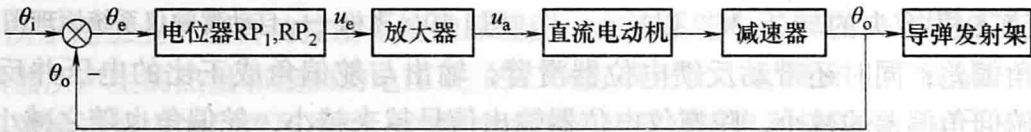


图 1-13 导弹发射架方位控制系统框图

1.2 自动控制系统的组成

1.2.1 基本组成部分

自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同，可以有各种不同的结构形式，但从完成“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（称为控制器）两大部分，而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的元件可以有相同的职能，一个完善的自动控制系统，按职能分类通常由以下几部分组成。

- 1) 测量反馈元件：用以测量被控量并将其转换成与输入量同一物理量后，再反馈到输入端以作比较。
- 2) 给定元件：给出与期望的被控量相对应的系统输入量。
- 3) 比较元件：把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的输入量进行比较，得出它们之间的偏差。
- 4) 放大元件：将微弱的信号进行放大。
- 5) 执行元件：根据偏差信号的性质执行相应的控制作用，以使被控量按期望值变化。
- 6) 校正元件：按某种函数规律变换控制信号，以利于改善系统的动态品质或静态性能。
- 7) 被控对象：需要控制的工作机械或生产过程。出现于被控对象中需要控制的物理量称为被控量。

一个典型的自动控制系统基本组成可用图 1-14 所示的框图表示。

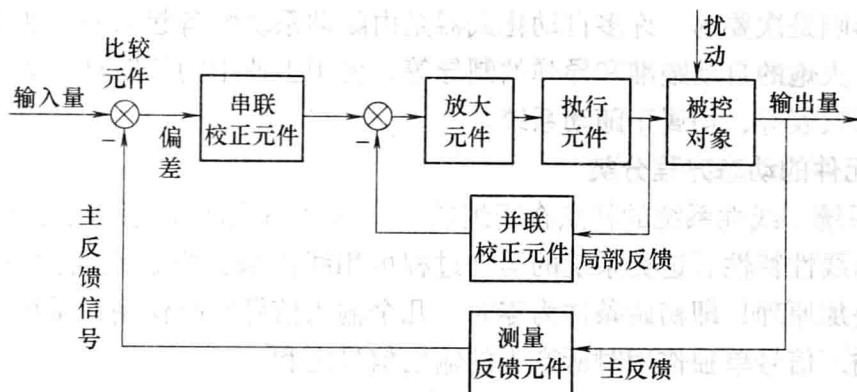


图 1-14 典型自动控制系统框图

1.2.2 常用的名词术语

- 1) 输入信号：输入到控制系统的指令信号，又称参考输入、输入量、给定量。
- 2) 输出信号：被控对象中要求按一定规律变化的物理量，即系统的被控制量，又称被控量、输出量。
- 3) 反馈信号：由系统（或元件）输出端取出并反向送回系统（或元件）输入端的信号。反馈有主反馈和局部反馈之分。
- 4) 偏差信号：输入信号与主反馈信号之差，简称偏差。
- 5) 误差信号：系统输出量的实际值与期望值之差，简称误差。
- 6) 扰动信号：简称扰动或干扰，它与控制作用相反，是一种不希望的、影响系统输出的不利因素。扰动信号既可来自系统内部，又可来自系统外部，前者称内部扰动，后者称外部扰动。

1.3 自动控制系统的分类

控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、闭环控制、复合控制等；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统和生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；这些就不一一列举了，这里根据后面的分析需要，介绍几种常见的分类方法。

1. 按输入信号的特征分类

(1) 恒值控制系统 这类系统的特点是输入信号为某个恒定的常量，系统的基本任务是在存在扰动的情况下，使被控量保持在一个给定的期望值上。由于扰动的出现，将使被控量偏离期望值而出现偏差，恒值系统能根据偏差的性质产生控制作用，使被控量以一定的精度恢复到期望值附近。例如前面介绍的水位控制系统及炉温控制系统均为恒值控制系统。

(2) 程序控制系统 这类系统的输入信号不是常数，而是按照预先知道的时间函数变化。如热处理炉温控制系统中的升温、保温、降温等过程，都是按照预先设定的规律进行控制的。又如机械加工中的程序控制机床、加工中心均是典型的例子。

(3) 随动系统 这类系统的输入信号是预先不知道的随时间任意变化的函数。控制系

统能使被控量以尽可能高的精度跟随给定值的变化。随动系统也能克服扰动的影响,但一般说来,扰动的影响是次要的。许多自动化武器是由随动系统装备起来的,如鱼雷的飞行、炮瞄雷达的跟踪、火炮的自动瞄准和导弹的制导等。民用工业中的船舶自动舵、数控切割机以及多种自动记录仪表等,均属于随动系统。

2. 按描述元件的动态方程分类

(1) 线性系统 线性系统的特点在于组成系统的全部元件都是线性元件,它们的输入、输出静特性均为线性特性。这类系统的运动过程可用线性微分方程或线性差分方程来描述。线性系统满足叠加原理,即初始条件为零时,几个输入信号同时作用在系统上所产生的输出信号,等于各输入信号单独作用时所产生的输出信号之和。

(2) 非线性系统 非线性系统的特点在于系统中含有一个或多个非线性元件。非线性元件的输入、输出静特性是非线性特性。例如饱和限幅特性、死区特性、继电特性以及传动间隙等。凡含有非线性元件的系统均属于非线性系统,这种系统不满足叠加原理,其运动过程需用非线性微分方程或非线性差分方程来描述。

3. 按信号的传递是否连续分类

(1) 连续系统 若系统各环节间的信号均为时间 t 的连续函数,则这类系统称为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述。上述提到的水位控制系统和电动机转速控制系统均属于连续系统。

(2) 离散系统 在信号传递过程中,只要有一处的信号是脉冲序列或数字编码,这种系统就称为离散系统。离散系统的特点是信号在特定离散时刻 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 是时间的函数,而在上述离散时刻之间,信号无意义。离散系统的运动规律需用差分方程来描述。

随着计算机应用技术的迅猛发展,为数众多的自动控制系统都采用数字计算机作为控制手段。在计算机引入控制系统之后,控制系统就由连续系统变成离散系统了。因此,随着数字计算机在自动控制中的广泛应用,离散系统理论得到了迅速发展。

4. 按系统的参数是否随时间变化分类

(1) 定常系统 如果系统中的参数不随时间变化,则这类系统称为定常系统。实际中遇到的大部分系统,都是属于这类系统,或者可以合理地近似地看成这类系统。

(2) 时变系统 如果系统中的参数是时间 t 的函数,则这类系统称为时变系统。

1.4 自动控制理论概要

1.4.1 自动控制理论的发展

随着自动控制技术的广泛应用和迅猛发展,出现了许多新问题,这些问题要求从理论上加以解决。自动控制理论正是在解决这些实际技术问题的过程中逐步形成和发展起来的。它是研究自动控制技术的基础理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。按其发展的不同阶段,可把自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论就是自动控制原理,是 20 世纪 40 年代到 50 年代形成的一门独立学科。早期的控制系统较为简单,只要列出微分方程并求解,就可以用时域法分析它们的性能。第二次世界大战前后,由于生产和军事的需要,出现了较复杂的控制系统,这些系统通常是用

高阶微分方程来描述的。由于高阶微分方程求解的困难,各种控制系统的理论研究和分析方法便应运而生。1932年奈奎斯特在研究负反馈放大器时创立了有名的稳定性判据,在此基础上,1945年伯德提出了分析控制系统的一种图解方法即频率法。随后,1948年伊万斯又创立了另一种图解法——根轨迹法。追溯到1877年,劳斯和1895年赫尔维茨分别独立地提出了判断系统稳定性的代数判据。这些都是经典控制理论的重要组成部分。50年代中期,经典控制理论又添加了非线性系统理论和离散控制理论,从而形成了完整的理论体系。

20世纪50、60年代,人类开始征服太空,1957年,苏联成功发射了第一颗人造地球卫星,1968年美国阿波罗飞船成功登上月球。在这些举世瞩目的成功中,自动控制技术起着不可磨灭的作用,也因此催生了20世纪60年代现代控制理论的问世,其中包括以状态为基础的状态空间法,贝尔曼的动态规划法和庞特里亚金的极大值原理,以及卡尔曼滤波器。

20世纪70年代开始,一方面现代控制理论继续向深度和广度发展,形成了许多分支,如自适应控制、模糊控制、神经网络控制等。另一方面随着控制理论应用范围的扩大,从个别小系统的控制,发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输和环境等大型系统以及社会科学领域,人们开始了对大系统理论的研究。

目前,控制理论还在继续发展,正朝向以控制论、信息论和仿生学为基础的智能控制理论深入发展。

1.4.2 对自动控制系统的基本要求

虽然自动控制系统有不同的类型,对每个系统也有各自不同的特殊要求,但对于各类系统来说,在已知系统结构和参数的情况下,我们感兴趣的是系统在某种典型输入信号作用下,其被控量变化的全过程。而要提高控制质量,就必须对自动控制系统性能提出一定的具体要求。各种不同的系统,对被控量变化全过程提出的基本要求都是一样的,可以归纳为稳定性、快速性和准确性,即稳、快、准的要求。

1. 稳定性

稳定性是指系统重新恢复平衡状态的能力,它是保证控制系统正常工作的先决条件。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推移而逐渐减小并趋于零。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着时间的推移而发散。

由于闭环控制系统有反馈作用,故控制过程有可能出现振荡或不稳定。现以图1-12所示的发射架方位控制为例说明这个问题。设系统原处于静止状态,即 $\theta_0 = \theta_i$,若手轮突然转动某个角度(相当于系统输入阶跃信号),输入轴与输出轴之间便产生偏差角 θ_e 。在偏差信号的作用下,电动机驱动发射架朝着角差减小的方向运动。当偏差 $\theta_e = 0$ 时,由于电动机枢、导弹发射架等元件存在惯性,输出轴不能立即停止转动,因而产生过冲,即 $\theta_e > \theta_i$ 。过冲导致偏差信号极性相反,从而使得电动机驱动发射架朝着角差增大的方向运动。如此反复,发射架将在 θ_i 确定的方位上来回摆动。如果系统具有足够的阻尼,则摆动振幅将随时间迅速衰减,使发射架最终停留在 $\theta_0 = \theta_i$ 的方位上,跟踪过程如图1-15a所示。这样的系统是稳定的。

反之,若系统设计不当或参数调整不合理,其响应过程可能出现等幅振荡甚至呈现发散的振荡现象,如图1-15b、c所示。这样的系统就是不稳定的。