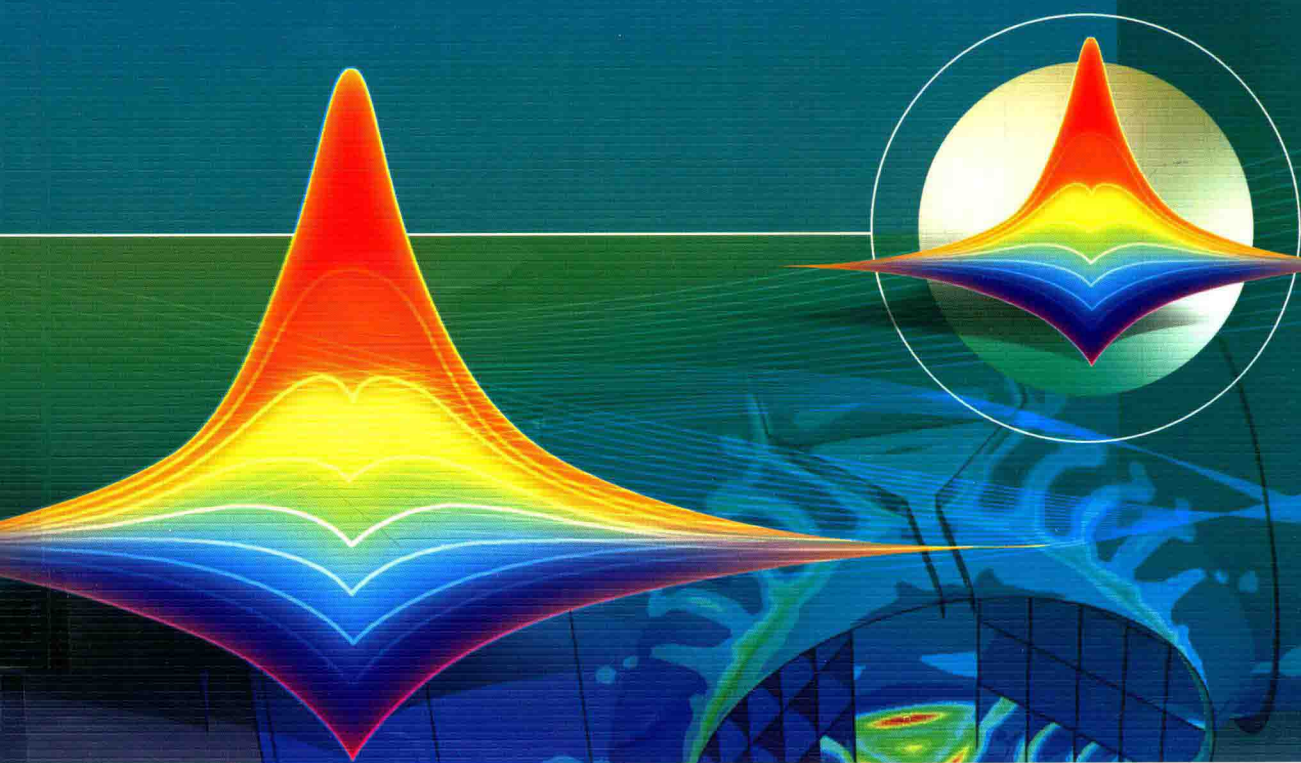


——创新型人才培养“十三五”规划教材

# 自动控制原理

## (第3版)

——◆ 李国勇 李虹 主编 ◆ 乔学工 韩念琛 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

# 自动控制原理

## (第3版)

李国勇 李 虹 主 编  
乔学工 韩念琛 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书全面阐述了经典控制理论的基本概念、原理和自动控制系统的各种分析方法。主要内容包括：控制系统的数学模型，线性控制系统的时域分析法、根轨迹分析法（复域分析法）和频域分析法，线性控制系统的校正方法，非线性控制系统的分析，以及线性离散控制系统的分析与设计等。本书取材先进实用，讲解深入浅出，各章选例和习题丰富，且均有用 MATLAB/Simulink 编写的仿真及解题实例，便于读者自学。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、电子科学与技术、测控技术与仪器、过程装备与控制工程、轨道交通信号与控制、交通设备与控制工程、机械设计制造及其自动化、机械电子工程、建筑电气与智能化、农业机械化及其自动化等专业的本科生教材，或作为其他相关专业的研究生和高年级本科生教材，也可作为从事自动控制研究、设计和应用的科技人员的参考用书。

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

自动控制原理/李国勇，李虹主编. —3 版. —北京：电子工业出版社，2017.11

创新型人才培养“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-31155-0

I. ①自… II. ①李… ②李… 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 060473 号

策划编辑：牛平月

责任编辑：王敬栋 文字编辑：牛平月

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

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：787×1 092 1/16 印张：20.5 字数：524 千字

版 次：2010 年 8 月第 1 版

2017 年 11 月第 3 版

印 次：2017 年 11 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 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：（010）88254454，[niupy@phei.com.cn](mailto:niupy@phei.com.cn)。

# 前言

## 《《《《 PREFACE

自动控制理论不仅是高等学校自动化及其他电类专业的一门核心基础理论课,而且在机械、化工等非电类工程专业的课程设置中也占有重要地位。特别是近年来,由于自动控制技术在各行各业的广泛渗透,控制理论已逐渐成为高等学校许多学科共同的专业基础,且越来越占有重要的位置。

本书自 2010 年 8 月初版和 2014 年 8 月第 2 版出版发行以来,得到了广大读者的关心和支持,被国内多所大学选作教材。这次修订在保持前两版系统、实用、易读的特点和基本框架的基础上,除修改和调整了个别章节的内容外,还增加了利用 MATLAB 实现根轨迹法的串联校正,力求使本书内容更为准确、合理和完整。同时,本次修订版也更加符合自动化及相关学科的发展,能够拓宽专业面,优化整体教学体系的教学改革形势,满足自动化及相关专业的教学需要和多学科交叉背景学生的学习需求。

本书按照“理论讲透,重在应用”的原则,系统地论述了以下几方面的内容:

- (1) 自动控制的基本概念及自动控制系统的组成、基本控制方式、分类和基本要求。
- (2) 控制系统的数学模型,包括线性系统的微分方程、非线性系统微分方程的线性化、传递函数、方框图、信号流图和 MATLAB 中数学模型的表示。
- (3) 线性控制系统的时域分析法,包括典型输入信号、系统的稳定性、一阶系统的时域响应、二阶系统的时域响应、高阶系统的时域响应、系统的稳态误差和基于 MATLAB 的控制系统时域分析。
- (4) 线性控制系统的根轨迹分析法(复域分析法),包括常规根轨迹的绘制、广义根轨迹的绘制、纯迟延系统根轨迹的绘制、利用根轨迹分析控制系统和基于 MATLAB 的根轨迹分析。
- (5) 线性控制系统的频域分析法,包括典型环节的频率特性、系统的开环频率特性、奈奎斯特稳定判据、控制系统的稳定裕量、系统的闭环频率特性、利用频率特性对闭环系统进行分析 and 基于 MATLAB 的控制系统频域分析。
- (6) 线性控制系统的校正方法,包括校正装置及其特性、频率法串联校正、根轨迹法串联校正、反馈校正、复合校正和基于 MATLAB 的控制系统校正。
- (7) 非线性系统分析,包括常见非线性特性、相平面法、描述函数法和基于 MATLAB 的非线性系统分析。
- (8) 离散控制系统,包括采样过程与采样定理、采样信号保持器、 $z$  变换、离散系统的数学模型、离散系统的稳定性分析、离散系统的动态性能、离散系统的稳态误差、离散系统的校正和基于 MATLAB 的离散系统分析。

本书由浅入深、循序渐进,各章选例和习题丰富,且均有用 MATLAB/Simulink 编写的仿真及解题实例,强调了现代化的解题方法。

全书包括 8 章和 2 个附录。其中，第 1 章由杨麦仓编写，第 2 章由李虹编写，第 3 章由韩念琛编写，第 4 章由梁金蕊编写，第 5 章由李国勇编写，第 6 章由马志芳编写，第 7 章由吝伶俐编写，第 8 章由乔学工编写；全书由李国勇统稿。李岚教授和杜欣慧教授主审了全书，在此表示衷心的感谢。此外，还要感谢策划编辑牛平月女士和研究生杨欣东为本书的出版所付出的辛勤工作。

本教材适用于总学时数为 48~96 (3~6 学分)，其中课堂教学 42~82 学时、实验 6~14 学时的课程。各章编排具有相对的独立性，便于不同层次院校的不同专业选用，以适应不同教学学时的需要。

本书配套的教学课件，可登录电子工业出版社旗下华信教育资源网 ([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)) 免费下载。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者指正。

编 者

# 目录

## CONTENTS

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 第 1 章 绪论                   | (1)  |
| 1.1 自动控制的基本概念              | (1)  |
| 1.2 自动控制系统的组成              | (3)  |
| 1.3 自动控制系统的基本控制方式          | (4)  |
| 1.4 自动控制系统的分类              | (5)  |
| 1.5 自动控制系统的基本要求            | (8)  |
| 1.6 自动控制理论的产生和发展           | (9)  |
| 小结                         | (13) |
| 习题                         | (14) |
| 第 2 章 控制系统的数学模型            | (15) |
| 2.1 微分方程                   | (15) |
| 2.1.1 微分方程的建立              | (16) |
| 2.1.2 微分方程的增量表示            | (21) |
| 2.1.3 非线性微分方程的线性化          | (22) |
| 2.2 传递函数                   | (24) |
| 2.2.1 传递函数的定义              | (24) |
| 2.2.2 传递函数的常用形式            | (27) |
| 2.2.3 传递函数的特点              | (28) |
| 2.2.4 典型环节的传递函数            | (29) |
| 2.3 结构图                    | (33) |
| 2.3.1 结构图的概念               | (33) |
| 2.3.2 结构图的简化               | (34) |
| 2.4 信号流图                   | (41) |
| 2.4.1 信号流图的概念              | (42) |
| 2.4.2 信号流图的绘制              | (43) |
| 2.4.3 梅逊增益公式               | (44) |
| 2.5 利用 MATLAB 描述和求解系统数学模型  | (46) |
| 2.5.1 利用 MATLAB 描述系统数学模型   | (46) |
| 2.5.2 利用 MATLAB 实现数学模型间的转换 | (47) |
| 2.5.3 利用 MATLAB 化简系统数学模型   | (47) |
| 小结                         | (49) |

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| 习题                                         | (49)  |
| 第3章 线性控制系统的时域分析法                           | (52)  |
| 3.1 时域分析的基础知识                              | (52)  |
| 3.1.1 典型输入信号                               | (52)  |
| 3.1.2 系统时域响应的形式                            | (54)  |
| 3.1.3 系统时域响应的性能指标                          | (55)  |
| 3.2 系统的稳定性                                 | (57)  |
| 3.2.1 稳定性的基本概念                             | (57)  |
| 3.2.2 线性控制系统稳定的条件                          | (58)  |
| 3.2.3 代数稳定判据                               | (60)  |
| 3.2.4 系统参数对稳定性的影响                          | (63)  |
| 3.2.5 相对稳定性和稳定裕量                           | (64)  |
| 3.3 系统的时域响应                                | (64)  |
| 3.3.1 一阶系统的时域响应                            | (64)  |
| 3.3.2 二阶系统的时域响应                            | (66)  |
| 3.3.3 高阶系统的时域响应                            | (74)  |
| 3.4 系统的稳态误差                                | (77)  |
| 3.4.1 稳态误差的定义                              | (77)  |
| 3.4.2 静态误差系数法                              | (78)  |
| 3.4.3 动态误差系数法                              | (80)  |
| 3.4.4 给定信号和扰动信号同时作用下的稳态误差                  | (82)  |
| 3.5 基于 MATLAB 的控制系统时域分析                    | (84)  |
| 3.5.1 利用 MATLAB 分析系统的稳定性                   | (84)  |
| 3.5.2 利用 MATLAB 分析系统的动态特性                  | (84)  |
| 3.5.3 利用 MATLAB 计算系统的稳态误差                  | (87)  |
| 小结                                         | (88)  |
| 习题                                         | (88)  |
| 第4章 线性控制系统的根轨迹分析法                          | (92)  |
| 4.1 根轨迹分析的基础知识                             | (92)  |
| 4.1.1 根轨迹的基本概念                             | (92)  |
| 4.1.2 根轨迹的基本条件                             | (94)  |
| 4.2 常规根轨迹的绘制                               | (95)  |
| 4.2.1 负反馈系统的根轨迹                            | (95)  |
| 4.2.2 正反馈系统的根轨迹                            | (105) |
| 4.2.3 $180^\circ$ 等相角根轨迹和 $0^\circ$ 等相角根轨迹 | (107) |
| 4.3 参数根轨迹的绘制                               | (107) |
| 4.3.1 单参数根轨迹                               | (108) |
| 4.3.2 多参数根轨迹                               | (109) |
| 4.4 纯迟延根轨迹的绘制                              | (111) |

|       |                              |       |
|-------|------------------------------|-------|
| 4.5   | 利用根轨迹分析控制系统                  | (114) |
| 4.5.1 | 利用根轨迹定性分析                    | (115) |
| 4.5.2 | 利用根轨迹定量分析                    | (116) |
| 4.6   | 利用 MATLAB 进行根轨迹分析            | (119) |
| 4.6.1 | 绘制系统根轨迹和获得根轨迹增益              | (119) |
| 4.6.2 | 绘制阻尼系数和自然频率的栅格线              | (121) |
|       | 小结                           | (122) |
|       | 习题                           | (122) |
| 第 5 章 | 线性控制系统的频域分析法                 | (126) |
| 5.1   | 频域分析的基础知识                    | (126) |
| 5.1.1 | 频率特性的基本概念                    | (126) |
| 5.1.2 | 频率特性的表示方法                    | (128) |
| 5.2   | 典型环节的频率特性                    | (130) |
| 5.2.1 | 比例环节                         | (130) |
| 5.2.2 | 积分环节                         | (131) |
| 5.2.3 | 微分环节                         | (131) |
| 5.2.4 | 一阶惯性环节                       | (132) |
| 5.2.5 | 一阶比例微分环节                     | (134) |
| 5.2.6 | 二阶振荡环节                       | (134) |
| 5.2.7 | 纯滞后环节                        | (136) |
| 5.3   | 系统的开环频率特性                    | (137) |
| 5.3.1 | 开环频率特性的三种图示法                 | (137) |
| 5.3.2 | 最小相位系统的开环频率特性                | (144) |
| 5.3.3 | 奈奎斯特稳定判据                     | (147) |
| 5.3.4 | 控制系统的稳定裕量                    | (156) |
| 5.4   | 系统的闭环频率特性                    | (159) |
| 5.4.1 | 等 M 圆 (等幅值轨迹) 和等 N 圆 (等相角轨迹) | (159) |
| 5.4.2 | 利用等 M 圆和等 N 圆求系统的闭环频率特性      | (161) |
| 5.4.3 | 利用 Nichols 图求系统的闭环频率特性       | (163) |
| 5.5   | 利用频率特性对系统进行分析                | (164) |
| 5.5.1 | 系统频域特性与稳态性能的关系               | (164) |
| 5.5.2 | 系统频域特性与时域性能的关系               | (165) |
| 5.6   | 基于 MATLAB 的控制系统频域分析          | (168) |
| 5.6.1 | 利用 MATLAB 绘制 Bode 图          | (168) |
| 5.6.2 | 利用 MATLAB 绘制奈奎斯特图            | (169) |
| 5.6.3 | 利用 MATLAB 绘制 Nichols 图       | (170) |
| 5.6.4 | 利用 MATLAB 计算系统的相角裕量和幅值裕量     | (170) |
| 5.6.5 | 利用 MATLAB 绘制系统的闭环频率特性曲线      | (171) |
|       | 小结                           | (172) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 习题                            | (173) |
| 第 6 章 线性控制系统的校正方法             | (177) |
| 6.1 线性控制系统的基础知识               | (177) |
| 6.1.1 性能指标                    | (177) |
| 6.1.2 校正方式                    | (178) |
| 6.2 串联校正                      | (179) |
| 6.2.1 串联校正装置及其特性              | (179) |
| 6.2.2 频率法串联校正                 | (185) |
| 6.2.3 根轨迹法串联校正                | (194) |
| 6.3 反馈校正                      | (204) |
| 6.3.1 反馈校正的原理                 | (204) |
| 6.3.2 反馈校正的设计                 | (205) |
| 6.4 复合校正                      | (206) |
| 6.4.1 按输入补偿的复合校正              | (206) |
| 6.4.2 按扰动补偿的复合校正              | (208) |
| 6.5 基于 MATLAB 的控制系统校正         | (209) |
| 6.5.1 利用 MATLAB 实现频率法的串联校正    | (209) |
| 6.5.2 利用 MATLAB 实现根轨迹法的串联校正   | (213) |
| 小结                            | (217) |
| 习题                            | (218) |
| 第 7 章 非线性控制系统的分析              | (221) |
| 7.1 非线性控制系统的基础知识              | (221) |
| 7.1.1 非线性系统的特点                | (221) |
| 7.1.2 常见的非线性特性                | (223) |
| 7.1.3 非线性系统的分析方法              | (225) |
| 7.2 相平面分析法                    | (225) |
| 7.2.1 相平面概述                   | (225) |
| 7.2.2 相轨迹图的绘制                 | (231) |
| 7.2.3 由相轨迹图求系统的暂态响应           | (235) |
| 7.2.4 控制系统的相平面分析              | (236) |
| 7.3 描述函数分析法                   | (242) |
| 7.3.1 描述函数概述                  | (243) |
| 7.3.2 典型非线性环节的描述函数            | (244) |
| 7.3.3 非线性系统的描述函数法分析           | (247) |
| 7.3.4 非线性系统的简化                | (253) |
| 7.4 基于 MATLAB 的非线性系统分析        | (254) |
| 7.4.1 利用 MATLAB 求解非线性系统的线性化模型 | (254) |
| 7.4.2 基于 MATLAB 的相平面法分析非线性系统  | (256) |
| 7.4.3 基于 MATLAB 的描述函数法分析非线性系统 | (259) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 小结                           | (260) |
| 习题                           | (261) |
| 第 8 章 线性离散控制系统的分析与设计         | (264) |
| 8.1 线性离散控制系统的基础知识            | (264) |
| 8.1.1 信号的采样                  | (265) |
| 8.1.2 信号的保持                  | (268) |
| 8.2 $z$ 变换及其反变换              | (270) |
| 8.2.1 $z$ 变换定义               | (270) |
| 8.2.2 $z$ 变换方法               | (271) |
| 8.2.3 $z$ 变换的基本定理            | (272) |
| 8.2.4 $z$ 反变换                | (275) |
| 8.3 离散系统的数学模型                | (276) |
| 8.3.1 差分方程                   | (276) |
| 8.3.2 脉冲传递函数                 | (278) |
| 8.4 离散控制系统的稳定性分析             | (283) |
| 8.4.1 离散控制系统稳定的条件            | (283) |
| 8.4.2 代数稳定判据                 | (284) |
| 8.5 离散控制系统的动态性能              | (286) |
| 8.5.1 离散系统的输出响应              | (286) |
| 8.5.2 闭环零点、极点分布对瞬态响应的影响      | (287) |
| 8.5.3 离散系统的根轨迹分析             | (290) |
| 8.6 离散控制系统的稳态误差              | (291) |
| 8.6.1 典型输入信号下的稳态误差           | (291) |
| 8.6.2 扰动信号作用下的稳态误差           | (293) |
| 8.7 离散控制系统的校正                | (293) |
| 8.7.1 采用 Bode 图的方法           | (294) |
| 8.7.2 最少拍控制系统的校正             | (295) |
| 8.8 基于 MATLAB 的离散控制系统的分析与设计  | (297) |
| 8.8.1 利用 MATLAB 实现 $z$ 变换    | (297) |
| 8.8.2 利用 MATLAB 实现连续系统的离散化   | (298) |
| 8.8.3 利用 MATLAB 分析离散控制系统的稳定性 | (298) |
| 8.8.4 利用 MATLAB 计算离散系统的稳态误差  | (299) |
| 8.8.5 利用 MATLAB 分析离散系统的动态特性  | (299) |
| 小结                           | (301) |
| 习题                           | (301) |
| 附录 A 拉普拉斯变换                  | (303) |
| 附录 B 习题参考答案                  | (308) |
| 参考文献                         | (315) |

## 绪 论

随着科学技术的飞速发展,自动控制系统在工业和国防的科研、生产中起着越来越重要的作用,计算机的广泛应用给自动控制系统的发展提供了更广阔的前景。自动控制理论是研究自动控制系统共同规律的技术科学。自动控制技术的广泛应用,不仅将人们从繁重的体力劳动和大量重复性的操作中解放出来,而且也将极大地提高了劳动生产率和产品质量。本章将从自动控制理论的基本概念出发,介绍自动控制系统的基本结构、工作原理、控制方式及分类。在对自动控制系统进行深入分析之前,首先要明确自动控制理论研究的内容和对控制系统的基本要求。

## 1.1 自动控制的基本概念

下面通过一个实际生产过程的自动控制系统来给出控制和自动控制的定义。

图 1-1 所示的是恒温水箱液位控制系统。在生产过程中,常常需要维持被加热箱体的水位高度,以满足工业生产的需要。

## 1. 工艺过程

用户通过用户阀门  $R_2$  不定时、不定量地从加热的水箱中取走热水  $Q_2$  以满足工业生产的需要,即  $R_2 \rightarrow Q_2 \rightarrow H_{\text{实}}$ 。

## 2. 控制要求

图 1-1 中被加热箱体的水位:水位过高 $\rightarrow$ 溢出 $\rightarrow$ 不经济;水位过低 $\rightarrow$ 干箱 $\rightarrow$ 不安全。

因此,人需要控制进水阀门  $R_1$  来改变流入量  $Q_1$ ,即通过不断调节进入箱体内的流量,使得水箱中的实际水位  $H_{\text{实}}$  等于规定的水位  $H_0$ 。

在人工控制过程中,人要连续不断地观测箱体内的水位,并与要求水位比较,反映到大脑中,然后大脑根据水位差的大小和方向,产生控制指令,加大或减小进水阀门的开度,以减少差异,人通过连续不断的操作,使箱体水位维持在要求值附近。

通过研究上述人工控制恒温水箱水位的过程可以看到,所谓控制就是使某个对象中物理量按照一定的目标来动作。本例中,对象指箱体,其中的物理量指箱体水位,一定的目标就是事

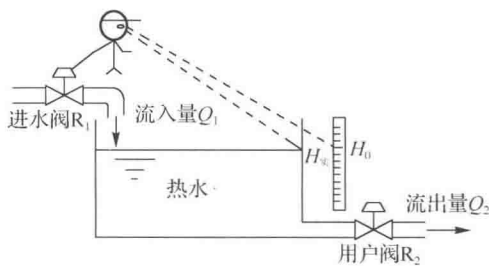


图 1-1 水箱液位人工控制系统

先要求水位的高度期望值  $H_0$ 。

若液位控制要求精度较高,那么由人来控制就很难满足要求,这时就需要用控制设备代替人,形成液位自动控制系统。

采用杠杆机构作为控制设备来代替人进行操作的杠杆水箱液位自动控制系统,如图 1-2 所示。图 1-2 中用杠杆机构一端连接的浮子代替人的眼睛来测量液位的高低。用杠杆机构代替人的大脑来计算水箱中实际液位  $H_{实}$  与规定液位  $H_0$  的偏差(调节杠杆中间支撑点的位置,可改变水箱液位期望值  $H_0$  的大小)。用杠杆机构另一端连接的阀门挡板代替人的手来调节阀门开度。当用户用水量增大时,水箱液位开始下降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用,使阀门挡板上提,进水阀门开度增大,进水流量增大,使液位回升至期望值附近。反之,若用水量减小,水箱液位及浮子上升,则进水阀门开度减小,进水流量减小,使液位下降至期望值附近。其结果是无论用户用水量多还是少,实际液位的高度总是在期望值附近变化。

显然,图 1-2 是一种简单的自动控制系统,如果对液位控制精度要求很高,这时就必须采用其他高精度的控制设备,图 1-3 所示的就是采用电控仪表作为控制设备的水箱液位自动控制系统。图 1-3 中用压力变送器代替人的眼睛来测量液位的高低。用控制器代替人的大脑来计算水箱中实际液位  $H_{实}$  与规定液位  $H_0$  的偏差(控制器内部可设置水箱液位期望值  $H_0$  的大小)。用电动调节阀代替人的手来调节进水阀门开度大小。

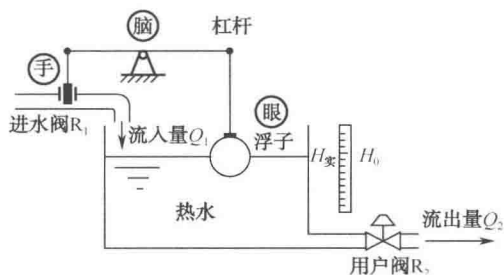


图 1-2 杠杆水箱液位自动控制系统

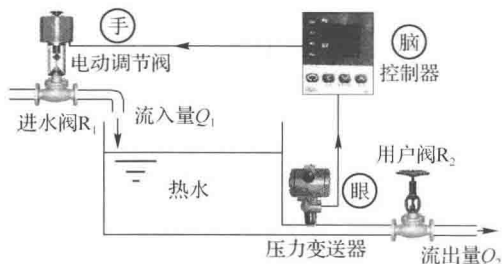


图 1-3 水箱液位自动控制系统

### 3. 控制设备

图 1-3 所示的水箱液位自动控制系统由压力变送器、控制器、电动调节阀和水箱等构成。压力变送器将水箱的实际液位测量出来,并将其信号变换及放大后传送给控制器。控制器将根据液位的给定信号与实际测量信号的偏差,产生相应的信号控制电动调节阀。电动调节阀根据控制器的要求调节进水阀门的开度  $\mu_1$ ,以减少实际液位  $H_{实}$  与要求的液位  $H_0$  差异,直到偏差为零。

#### 1) 测量变送仪表

测量变送仪表又称为测量变送装置。常用测量液位的仪表为压力变送器,它将水箱液位位置的变化,转换及放大为仪表系统中的(电)信号。它的作用类似于人工控制中人的眼,将液位的变化输送到大脑或控制器中。

#### 2) 控制器

控制器将液位变化的(电)信号(相应于实际液位的测量值  $H_{测}$ )与控制器内部设定的(电)信号(相应于要求的液位  $H_0$ )进行比较。它的作用类似于人工控制中人的脑。若  $\mu_1$  为进水调节阀门的开度,则

当  $H_{\text{测}} > H_0$  时, 要求  $\mu_1 \downarrow \rightarrow Q_1 \downarrow \rightarrow H_{\text{实}} \downarrow \rightarrow H_{\text{测}} \downarrow$ ;

当  $H_{\text{测}} < H_0$  时, 要求  $\mu_1 \uparrow \rightarrow Q_1 \uparrow \rightarrow H_{\text{实}} \uparrow \rightarrow H_{\text{测}} \uparrow$ ;

当  $H_{\text{测}} = H_0$  时, 要求  $\mu_1$  不变。

### 3) 执行器

常用的执行器为电动调节阀或气动调节阀, 它包括执行机构和阀体两部分, 它根据控制器的命令, 改变进水调节阀门的开度  $\mu_1$ 。执行器的作用类似于人工控制中人的手, 去执行大脑或控制器的命令。

由此可见, 自动控制和人工控制的基本原理是相同的, 它们都是建立在“测量偏差, 修正偏差”的基础上, 并且为了测量偏差, 必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制设备代替人完成控制。

总之, 自动控制就是在没有人直接参与的情况下, 利用控制设备使被控对象中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。所谓自动控制系统就是由被控对象和控制设备按一定方式连接起来, 完成某种自动控制任务的有机整体。

为了方便技术人员讨论问题, 一般将控制系统表示成方框图的形式。方框图是由若干方框、有向信号线、信号的相加点与分支点所组成的框图。它是实际工艺设备图中控制系统信号传递的一种抽象简明的表示, 它可用在自动控制系统的分析中, 去表明每个重要设备在系统中的功能和各个重要设备之间的相互关系。例如, 可把图 1-3 所示的水箱液位自动控制系统表示成如图 1-4 所示的方框图。

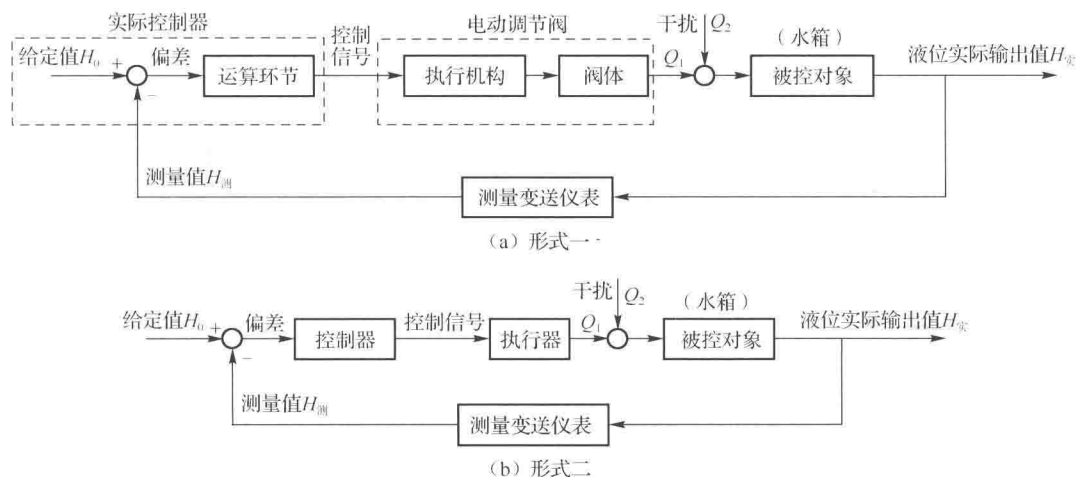


图 1-4 水箱液位自动控制系统的方框图

控制系统中的实际控制器是由信号比较机构和运算环节两部分组成的, 如图 1-4(a) 所示。但在控制系统的方框图表示中, 为了突出其比较机构, 通常将其简单表示成图 1-4(b) 所示的形式。

## 1.2 自动控制系统的组成

为了实现各种复杂的控制任务, 首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,

组成一个有机总体,即自动控制系统。虽然自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同,可以有各种各样的结构形式。但是,就其工作原理来说,一个典型自动控制系统的基本组成可用如图 1-5 所示的方框图来表示。

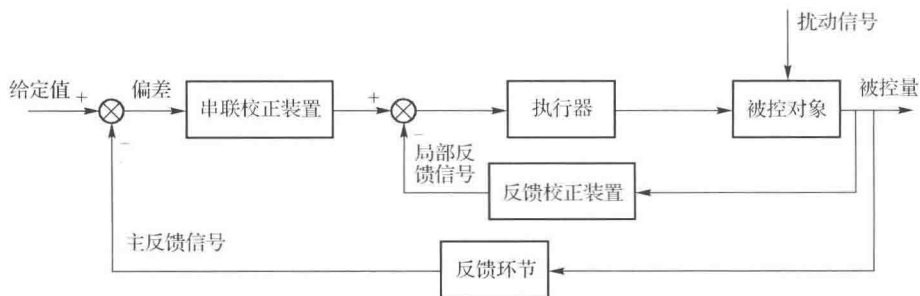


图 1-5 典型自动控制系统方框图

(1) 被控量: 是指控制系统中被控制的物理量,也称为输出量,一般用  $y(t)$  或  $c(t)$  表示,如以上水位的实际值  $H_{\text{实}}$ 。

(2) 给定值: 在控制系统中被控量  $y(t)$  所希望的值,也称为参考输入,一般用  $r(t)$  表示,如以上水位的设定值  $H_0$ 。

(3) 扰动信号: 使被控量偏移给定值的所有因素,它是系统要排除影响的量,一般用  $n(t)$  或  $d(t)$  表示。它包括内扰和外扰。内扰为调节阀不动作时,调节阀所在通道中物料的各种因素变化引起的干扰,如以上进水管道的压力波动引起进水量  $Q_1$  的变化;外扰为除内扰以外的一切干扰,如以上用户用水量  $Q_2$  的变化。

(4) 反馈信号: 将系统(或环节)的输出信号经变换、处理送到系统(或环节)的输入端的信号,称为反馈信号。若此信号是从系统输出端取出送入系统输入端,这种反馈信号称主反馈信号,一般用  $y_m(t)$  表示。而其他反馈信号称为局部反馈信号。

(5) 偏差: 给定值  $r(t)$  与主反馈信号  $y_m(t)$  之差,一般用  $e(t)$  表示,即  $e(t) = r(t) - y_m(t)$ 。

(6) 输入信号: 泛指对系统的输出量有直接影响的外界输入信号,既包括参考输入  $r(t)$ ,又包括扰动信号  $n(t)$ 。

(7) 被控对象: 它是控制系统所控制和操作的对象,如以上的恒温水箱。

(8) 校正装置: 对系统的参数和结构进行调整,用于改善系统控制性能的仪表或装置,也称为控制器或调节器,如以上的水位控制器。

(9) 执行器: 接收校正装置的输出信号,并将其转换为对被控对象进行操作的装置或设备,如以上的电动调节阀。

(10) 反馈环节: 它用来测量被控量  $y(t)$  的实际值,并经过信号处理,转换为与被控制量有一定函数关系,且与输入信号同一物理量的信号。反馈环节一般也称为测量变送环节。

### 1.3 自动控制系统的基本控制方式

闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式,也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外,还有开环控制方式和复合控制方式,它们都有其各自的特点和不同的适用场合。



## 1. 开环控制系统

开环控制系统是指无被控量反馈的控制系统,即需要控制的是被控对象的某一量(被控量),而被控量对于控制作用没有任何影响的系统。信号由给定值至被控量单向传递。这种控制较简单,但有较大的缺陷,即对象或控制装置受到干扰或工作中特性参数发生变化时,会直接影响被控量,而无法自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证。从另一种意义上理解,也意味着对被控对象和其他控制元件的技术要求较高,如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。开环控制系统原理方框图如图 1-6 所示。信号流动由输入端到输出端单向流动。

## 2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外,还有输出端到输入端的反馈信号,则构成闭环控制系统,也称反馈控制系统,方框图如图 1-7 所示。闭环控制的定义是有被控制量反馈的控制。从系统中信号流向看,系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端,构成闭合通道,故称闭环控制系统或反馈控制系统。这种控制方式,无论是由于干扰造成,还是由于结构参数的变化引起被控量出现偏差,系统就利用偏差去纠正偏差,故这种控制方式为按偏差调节。

闭环控制系统的突出优点是,利用偏差来纠正偏差,使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较,闭环系统的结构比较复杂,构造比较困难。需要指出的是,由于闭环控制存在反馈信号,利用偏差进行控制,如果设计得不好,将会使系统无法正常和稳定地工作。另外,控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

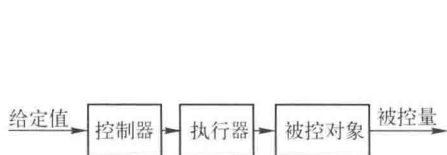


图 1-6 开环控制系统原理方框图

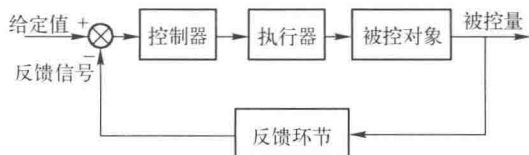


图 1-7 闭环控制系统方框图

## 3. 复合控制系统

开环控制和闭环控制方式各有优缺点,在实际工程中应根据工程要求及具体情况来决定采用何种控制方式。如果事先预知给定值的变化规律,又不存在外部和内部参数的变化,则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测,系统内部参数又经常变化,为保证控制精度,采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高,为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾,可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统或其他复杂控制系统。

# 1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统根据控制方式及其结构性能和完成的任务,有多种分类方法。除以上按控制方式分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统外,还可以根据系统输入信号分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统;按系统性能又可以分为线性控制系统和非线性控制系统、连续控制系统和离散控制系统、定常控制系统和时变控制系统、确定性控制系统和不确定性控制系统等。下面简单介绍几种常见的分类方法。

## 1. 按系统输入信号形式划分

### 1) 恒值控制系统 (自动调节系统)

这种系统的特征是输入量为一恒值, 通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响, 使输出量维持在给定值 (期望值)。如工业过程中恒温、恒压和恒速等控制系统。

### 2) 随动控制系统 (跟踪控制系统)

该系统的输入量是一个事先无法确定的任意变化的量, 要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动控制系统。

### 3) 程序控制系统

系统的输入量不是常值, 而是事先确定的运动规律, 编成程序装在输入装置中, 即输入量是事先确定的程序信号, 控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控机床就属此类系统。

## 2. 按系统微分方程形式划分

### 1) 线性控制系统

组成系统元器件的特性均为线性的, 可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性控制系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

### 2) 非线性控制系统

在系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系, 则称为非线性控制系统。非线性控制系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重, 或做近似分析时, 均可用线性系统理论和方法来处理。非线性控制系统分析将在第7章专门讨论。

## 3. 按系统参数与时间有无关系划分

### 1) 定常控制系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数, 则称为定常控制系统。该类系统只要输入信号的形式不变, 在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

### 2) 时变控制系统

如果描述系统特性的微分方程中至少有一项系数是时间的函数, 此系统称为时变控制系统。

## 4. 按系统传输信号形式划分

### 1) 连续控制系统

系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的, 信号的大小均是可任意取值的模拟量, 称为连续控制系统。

### 2) 离散控制系统

离散控制系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中使用了采样开关, 将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号, 此类系统也称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器, 其离散信号是以数码形式传递的, 此类系统也称为数字控制系统。在这种控制系统中, 一般被控对象的输入/输出是连续变化的信号, 控制装置中的执行部



件也常常是模拟式的,但控制器是用数字计算机实现的,所以,系统中必须有信号变换装置,如模/数转换器(A/D转换器)和数/模转换器(D/A转换器)。离散控制系统将是今后控制系统的主要发展方向,它的分析和设计将在第8章专门讨论。

## 5. 按系统控制作用点个数划分

### 1) 单输入单输出控制系统

若系统的输入量和输出量各为一个,则称其为单输入单输出控制系统,简称为单变量控制系统。

### 2) 多输入多输出控制系统

若系统的输入量和输出量多于一个,称为多输入多输出控制系统,简称为多变量控制系统。对于线性多输入多输出控制系统,系统的任何一个输出等于每个输入单独作用下输出的叠加。

## 6. 按系统的稳态误差划分

自动控制系统按系统在给定值或扰动信号的作用下是否存在稳态误差,分为有差控制系统和无差控制系统。恒值控制系统的主要任务是,当存在扰动信号时,保证被控量维持在希望值上,也就是说,要在有扰动信号的情况下保持被控量不变。随动控制系统主要是确定系统对给定值有差还是无差。

### 1) 有差控制系统

在恒值控制系统中,如果某个系统经扰动信号作用经过一段时间后趋于某一恒定的稳态值,而被控量的实际值与期望值之差也逐渐趋于某一恒值,且这个值取决于扰动信号作用的大小,那么这个系统就称为对扰动有差的系统。在随动控制系统中,如果给定值经过一段时间之后趋于某一稳态值,系统的误差也趋于某一稳态值,则称此系统称为对给定值有差的系统。

### 2) 无差控制系统

在恒值控制系统中,如果一个系统的扰动信号作用经过一段时间而趋于某一恒定的稳态值,而被控量的实际值与期望值之差逐渐趋于零,且与扰动信号作用的大小无关,那么这个系统就称为对扰动无差的系统。在随动控制系统中,如果不论给定值的大小如何变化,系统的误差趋于零,则称这一系统称为对给定值无差的系统。

应该强调指出,同一系统可能对扰动输入信号是有差的,而对给定输入信号是无差的,或者相反。因此在研究一个控制系统是有差还是无差时,必须指出是对扰动信号而言,还是对给定值而言。

## 7. 按系统参数的空间分布特性划分

### 1) 集中参数控制系统

严格来讲,任何元器件的参数都具有分布性。例如,用电阻丝绕成的电阻器,它的电阻并不是集中于某一点,而是沿着电阻丝的全长分布的,无论多么小的一段,都含有电阻,这是绕线电阻器的电阻参数的分布性。应当指出,在一定条件下,这种分布性可以不予考虑,根据串联合并的概念,可将电阻器的电阻由一个集中的电阻表示。

如果组成系统的实际元器件允许用如电阻、电感和电容等参数中的一个或数个来集中表征时,则称为集中参数元器件或理想电路元器件。由集中参数元器件构成的控制系统称为集中参数控制系统。