普通高等院校计算机仿真系列教材

控制系统 MATLAB 仿真

主　编　沈清波　宋云东　杨　静
副主编　赵春芳　刘姝廷

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书以 MATLAB 9.5（MATLAB R2018b）为仿真平台，较全面地介绍了自动控制系统的建模、分析、仿真、校正与设计的基本原理和方法。全书共分 7 章，内容包括绪论、MATLAB 计算基础、Simulink 仿真、控制系统数学模型、控制系统时域分析法、频域分析法和控制系统校正与参数整定。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业“控制系统仿真”课程的教材，也可作为“系统建模与仿真”课程的参考教材，还可作为“自动控制原理”“过程控制工程”等相关课程的辅助教材，或者作为工程技术人员的参考用书。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

控制系统 MATLAB 仿真 / 沈清波，宋云东，杨静主编 . —北京：北京理工大学出版社，2021. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9454 - 6

Ⅰ. ①控…　Ⅱ. ①沈… ②宋… ③杨…　Ⅲ. ①Matlab 软件 - 应用 - 自动控制系统 - 系统仿真 - 高等学校 - 教材　Ⅳ. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 005103 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 / （010）68914775（总编室）
（010）82562903（教材售后服务热线）
（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http：//www. bitpress. com. cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 唐山富达印务有限公司
开　　本 / 787 毫米 × 1092 毫米　1/16
印　　张 / 15
字　　数 / 347 千字
版　　次 / 2021 年 1 月第 1 版　2021 年 1 月第 1 次印刷
定　　价 / 42. 00 元

责任编辑 / 陈世立
文案编辑 / 赵　轩
责任校对 / 刘亚男
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前　言

《控制系统 MATLAB 仿真》是一本涉及控制理论、计算机数学与计算机仿真技术的综合性学科教材。本教材以 MATLAB/Simulink 仿真软件为平台，用数学模型和仿真模块替代实际的控制系统，对与控制系统相关的数学函数、PID 算法、闭环系统进行仿真实验和研究。

MATLAB/Simulink 仿真软件具有功能强大、适用范围广、编程效率高和图形界面友好等优点，在控制理论和控制工程仿真设计中得到了广泛应用。MATLAB 的 Toolbox（工具箱）与 Simulink（仿真）是控制系统设计与系统校正计算与仿真的两个强有力的工具，它们使控制系统的设计与校正发生了革命性的变化。

本教材以 MATLAB 9.5（MATLAB R2018b）仿真软件为平台，在借鉴众多相关优秀书籍和教材的基础上，以培养应用型人才为宗旨，结合工科自动化、电气、测控和信息类专业的特点和教学任务要求，介绍了控制理论、系统的发展和概念，并运用 MATLAB 软件进行系统程序设计和应用仿真实验；介绍了控制系统的建模、分析、仿真与校正设计的基本原理和方法。全书共分 7 章，内容包括第 1 章 绪论（介绍控制理论发展、控制系统概念、计算机仿真和 MATLAB 下的控制系统仿真等）；第 2 章 MATLAB 计算基础（介绍 MATLAB 命令行操作、常用指令、数值类型、矩阵运算、符号运算、逻辑运算、复变函数运算、常用绘图命令和程序设计等）；第 3 章 Simulink 仿真（介绍仿真模块和创建仿真模型）；第 4 章 控制系统数学模型（介绍模型的建立和转换）；第 5 章 控制系统时域分析法；第 6 章 频域分析法；第 7 章 控制系统校正与参数整定。本教材在阐述控制系统仿真原理的同时，力争通过大量有代表性的例题来介绍相应的内容，使控制系统仿真内容更生动，其包含的模拟系统工程设计实际应用技术的仿真操作，能够便于读者掌握和巩固本专业所学的内容，为将来工程仿真设计和创新打下应用的基础。

“控制系统仿真”课程是在学习“电路原理”“控制原理”和“C 语言程序设计”等专业基础课后开设的，后续的相关专业课有“过程控制工程”等。学生在具有前期“电路原理”“控制原理”和“C 语言程序设计”等相关的概念和编程基础后，能够更好地理解本教材内容。另外，本教材借助 MATLAB 仿真软件，对专业学习和巩固专业知识和技能应用可起到事半功倍的作用。

本教材分工如下。沈阳工学院信息与控制学院副教授沈清波编写第 1、3、6、7 章，并统稿全书，宋云东（国家电网辽宁省电力有限公司电力科学研究院高级工程师）和副教授

赵春芳编写第4、5章，副教授刘姝廷编写第2章，沈阳科技学院的杨静教师收集并提供了相关素材和资料。

本教材在编写过程中参考了部分网络资料和文献，限于篇幅，没有全部列入参考文献，在此对这些资料的作者深表谢意。

由于时间仓促以及编者的水平所限，书中难免存在一些不足和错漏，恳请读者批评指正。

编　者

2020年10月

CONTENTS 目录

第1章 绪论 …… (1)

1.1 自动控制理论的发展与应用 …… (1)

1.1.1 自动控制理论的发展 …… (1)

1.1.2 自动控制理论的应用 …… (2)

1.2 自动控制系统的基本概念 …… (2)

1.2.1 自动控制系统的基本分类 …… (2)

1.2.2 自动控制系统的基本组成和应用示例 …… (3)

1.2.3 反馈控制系统的品质要求 …… (5)

1.2.4 自动控制系统的其他分类 …… (5)

1.3 控制系统计算机仿真 …… (6)

1.3.1 计算机仿真技术概述 …… (6)

1.3.2 控制系统计算机仿真的实质 …… (6)

1.4 MATLAB/Simulink 下的控制系统仿真 …… (7)

1.4.1 MATLAB 仿真软件 …… (7)

1.4.2 MATLAB/Simulink 的仿真特点 …… (7)

1.4.3 与控制系统设计与分析、测试相关的基础工具箱 …… (8)

练习题 …… (8)

第2章 MATLAB 计算基础 …… (9)

2.1 MATLAB 桌面操作环境 …… (9)

2.1.1 MATLAB 启动和退出 …… (9)

2.1.2 MATLAB 操作窗口 …… (9)

2.1.3 命令行窗口中的常用命令 …… (11)

2.1.4 MATLAB 文件管理 …… (13)

2.1.5 MATLAB 帮助功能 …… (13)

2.2 MATLAB 数值计算 …… (14)

2.2.1 数值类型 …… (14)

2.2.2 矩阵运算 …… (19)

2.3 关系运算和逻辑运算 …… (24)

2.4 符号运算 …… (24)

2.4.1 MATLAB 符号运算基础 …… (25)

2.4.2 控制系统中常用的符号运算 …… (26)

2.5 复数与复变函数运算 …… (28)
2.5.1 复数运算基础 …… (28)
2.5.2 留数及其基本运算 …… (31)
2.5.3 拉普拉斯变换及拉普拉斯反变换 …… (32)
2.5.4 Z 变换及其反变换 …… (33)
2.6 MATLAB 常用绘图指令 …… (35)
2.6.1 基本的绘图指令 …… (35)
2.6.2 图形窗口处理指令和添加/删除栅格指令 …… (35)
2.6.3 应用型绘图指令 …… (37)
2.6.4 坐标轴相关的指令 …… (38)
2.6.5 文字标示指令 …… (39)
2.6.6 图形保持/覆盖指令 …… (39)
2.7 MATLAB 的 M 文件和程序设计 …… (41)
2.7.1 M 文件的概述 …… (41)
2.7.2 MATLAB 程序流程控制结构 …… (45)
2.7.3 MATLAB 程序设计原则和程序调试 …… (51)
练习题 …… (54)
第 3 章 Simulink 仿真 …… (56)
3.1 Simulink 仿真概述 …… (56)
3.1.1 Simulink 简介 …… (56)
3.1.2 Simulink 的仿真特征和启动方式 …… (57)
3.1.3 Simulink 建模仿真 …… (58)
3.2 Simulink 的模块库简介 …… (59)
3.2.1 Simulink 模块库浏览窗口 …… (59)
3.2.2 Simulink 模块库分类 …… (60)
3.2.3 控制系统仿真中最常用的模块和模块集 …… (61)
3.3 Simulink 功能模块的处理 …… (65)
3.3.1 Simulink 功能模块参数设置 …… (65)
3.3.2 Simulink 模块的基本操作 …… (68)
3.3.3 Simulink 模块间的连线处理 …… (69)
3.4 Simulink 仿真设置 …… (70)
3.4.1 Solver 参数设置 …… (70)
3.4.2 Data Inport/Export 设置 …… (75)
3.4.3 启动仿真与实例 …… (77)
3.5 Simulink 仿真示例 …… (79)
3.6 Simulink 自定义功能模块 …… (84)
3.6.1 自定义功能模块的创建 …… (84)
3.6.2 自定义功能模块的封装 …… (85)
3.7 S – Function 的设计与应用 …… (89)
3.7.1 S – Function 的概念 …… (89)
3.7.2 Simulink 的仿真运行原理 …… (90)

3.7.3 S-Function 的基本结构 …… (91)
3.7.4 S-Function 设计示例 …… (95)
练习题 …… (97)
第 4 章 控制系统数学模型 …… (98)
4.1 动态过程微分方程描述和建立 …… (98)
4.2 拉普拉斯变换与控制系统模型 …… (99)
4.2.1 拉普拉斯变换求解微分方程 …… (99)
4.2.2 拉普拉斯变换示例 …… (100)
4.3 数学模型描述 …… (100)
4.3.1 传递函数模型 …… (100)
4.3.2 零、极点增益模型 …… (101)
4.3.3 状态空间模型 …… (101)
4.4 MATLAB/Simulink 在模型中的应用 …… (101)
4.4.1 多项式处理相关的函数 …… (102)
4.4.2 建立传递函数相关的函数 …… (104)
4.4.3 建立零、极点增益模型相关函数 …… (106)
4.4.4 建立状态空间模型相关的函数 …… (108)
4.4.5 Simulink 中的控制系统模型表示 …… (109)
4.4.6 Simulink 模型与状态空间模型的转化 …… (110)
4.5 系统模型转换及连接 …… (112)
4.5.1 模型转换 …… (112)
4.5.2 系统的组合连接和 MATLAB 示例 …… (113)
4.6 MATLAB/Simulink 应用实例 …… (117)
练习题 …… (120)
第 5 章 控制系统时域分析法 …… (121)
5.1 时域响应分析 …… (121)
5.1.1 典型输入信号及其拉普拉斯变换 …… (121)
5.1.2 瞬态响应与稳态响应 …… (123)
5.1.3 控制系统时域响应的性能指标 …… (124)
5.1.4 一阶系统的时域分析 …… (126)
5.1.5 典型二阶系统的瞬态性能 …… (127)
5.1.6 高阶系统的时域分析 …… (132)
5.2 MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用 …… (133)
5.2.1 时域分析中 MATLAB 函数的应用 …… (133)
5.2.2 时域响应性能指标求取 …… (138)
5.3 系统稳定性分析 …… (142)
5.3.1 稳定性的定义与分析 …… (142)
5.3.2 稳定性判据 …… (143)
5.3.3 稳态误差分析 …… (145)
5.4 综合实例及 MATLAB/Simulink 应用 …… (147)
练习题 …… (153)

第6章 频域分析法 …… (154)
6.1 频率特性 …… (154)
6.1.1 频率特性的基本概念 …… (154)
6.1.2 频率特性的表示方法 …… (155)
6.2 基于频域法的控制系统稳定性能分析 …… (157)
6.2.1 频域法的 Nyquist 稳定判据 …… (157)
6.2.2 频域法的 Bode 稳定判据 …… (167)
6.3 控制系统的相对稳定性 …… (169)
6.3.1 相对稳定性 …… (170)
6.3.2 系统稳定性能指标的求取 …… (171)
6.4 MATLAB 在频域法中分析与绘制曲线的应用 …… (172)
6.4.1 MATLAB 频域分析和绘制响应曲线的相关函数 …… (172)
6.4.2 MATLAB 频域分析示例 …… (174)
练习题 …… (176)
第7章 控制系统校正与参数整定 …… (178)
7.1 控制系统校正简介 …… (178)
7.1.1 控制系统性能指标 …… (178)
7.1.2 控制系统校正的方法 …… (179)
7.2 基于频域法的控制系统校正 …… (181)
7.2.1 频域法的串联超前校正 …… (181)
7.2.2 频域法的串联滞后校正 …… (184)
7.2.3 频域法的串联滞后 - 超前校正 …… (187)
7.3 基于根轨迹法的控制系统校正 …… (192)
7.3.1 根轨迹法的串联超前校正 …… (192)
7.3.2 根轨迹法的串联滞后校正 …… (196)
7.3.3 根轨迹法的串联超前 - 滞后校正 …… (199)
7.4 PID 控制器设计及 MATLAB/Simulink 应用 …… (202)
7.4.1 PID 控制器简述 …… (202)
7.4.2 比例控制 …… (202)
7.4.3 微分控制 …… (204)
7.4.4 比例微分控制 …… (204)
7.4.5 积分控制 …… (205)
7.4.6 比例积分控制 …… (206)
7.4.7 比例积分微分控制 …… (206)
7.5 PID 控制器参数整定 …… (212)
7.5.1 响应曲线法 …… (212)
7.5.2 临界比例度法 …… (217)
7.5.3 衰减曲线法 …… (221)
练习题 …… (226)
参考文献 …… (228)

第1章 绪 论

本章介绍了自动控制理论的发展、自动控制系统的构成和分类、自动控制系统的相关术语、控制系统仿真和计算机仿真的基础知识、仿真技术的分类和发展趋势及 MATLAB 仿真软件特点等。通过本章内容的学习，读者能够对自动控制系统与仿真有一个整体的认识。

1.1 自动控制理论的发展与应用

自动控制理论的发展经过经典控制理论（频域法或复频域法）、现代控制理论（状态空间法）、大系统控制理论和智能控制等阶段。

1.1.1 自动控制理论的发展

按发展阶段的不同，自动控制理论可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。20 世纪 40 年代至 20 世纪 50 年代，经典控制理论（频域法或复频域法）诞生，其核心为传递函数，以及稳定性、稳定裕度等。该理论采用图形方法，直观简便，设置参数少（以简单控制结构获取相对满意的性能），适用于单输入单输出（Single Input and Single Output，SISO）系统，其数学基础是复变函数和积分变换。

20 世纪 60 年代至 20 世纪 70 年代，现代控制理论（状态空间法）诞生，其核心为状态变量的能控、能观性和系统性能的最优化。该理论采用时域法，统一处理 SISO 系统和多输入多输出（Multi - Input and Multi - Output，MIMO）系统，有完整的理论体系，其数学基础是线性代数和矩阵理论。该理论的缺点为对系统的数学模型精度要求高，实际性能达不到设计的最优，所需状态反馈难以直接实现。

从 20 世纪 70 年代到现在，多种新型控制理论、多变量频域控制理论诞生。例如，基于互质分解的全新的频域优化理论，当具有当系统存在模型误差或受到扰动时仍能保持良好性能的能力，即良好的鲁棒性控制（Robust Control）、拟人（学习、记忆、判断、推理等）智能控制（Intelligent Control）、大系统控制和复杂系统控制等；其控制系统具有高维数、强关联、多约束、多目标、不确定性、分散性、非线性、大时滞和难建模等特征，适用于电力系统、城市交通系统、网络系统、制造系统和经济系统等。

1.1.2 自动控制理论的应用

自动控制理论的早期应用可以追溯到两千年前古埃及的水钟控制和中国古代的指南车控制，但当时还未建立自动控制的理论体系。1769 年，瓦特（Watt）设计的内燃机引发了现代工业革命，而他于 1788 年为内燃机设计的飞锤调速器可以被认为是最早的反馈控制系统的工业应用。随后，线性系统的稳定性、PID 控制器参数的经验公式等控制理论先后被提出。

系统的传递函数、时域和频域分析技术，以及线性反馈系统的根轨迹分析技术等构成了经典控制理论。由庞特里亚金（Pontryagin）提出的极大值原理，以及美国学者提出的动态规划和状态空间分析技术开创了控制理论研究的新时代，构成了第二代控制理论——现代控制理论的基础。之后，在此基础上又出现了线性二次型最优调节器、极点配置状态反馈、最优状态观测器等新型控制理论。

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置，使机器、设备或生产过程中的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。自动控制理论的研究有利于将人类从复杂、危险、烦琐的劳动环境中解放出来，并且能够大大提高生产效率。

1.2 自动控制系统的基本概念

自动控制系统是指采用自动控制装置，对生产中的设备或对象的某些关键参数进行自动控制，使它们在受到外界干扰（扰动）的影响而偏离正常状态时，能够被自动地调回到工艺所要求的数值范围内。自动控制系统分为开环、闭环控制系统，而闭环控制系统还有控制品质的要求。此外，还可根据数学模型所描述系统的运动性质和使用的数学工具将控制系统分为多种类型。

1.2.1 自动控制系统的基本分类

根据有无反馈，可将自动控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。这是自动控制系统最基本的分类方式，可以根据现场不同的工艺要求选择不同的控制系统。

1. 开环控制系统

如果控制系统的输出量对系统没有反馈作用，则称为开环控制系统。开环控制系统抗扰动能力差，控制精度难以保证，应用少，其框图如图 1－1 所示。

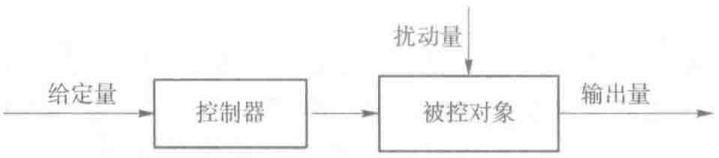


图 1－1 开环控制系统框图

可见，给定量直接经过控制器作用于被控对象，不需要将输出量反馈到输入端与给定量进行比较，所以只有给定量影响输出量。开环控制系统主要应用于机械、化工、物料装卸和运输等过程的控制，机械手和自动生产线也会应用。

2. 闭环控制系统

闭环控制系统是把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端与给定量进行比较（相减），并利用比较后的偏差信号，经过控制器或调节器对控制对象进行控制，抑制外部或

内部扰动对输出量的影响，从而减小输出量的误差。也就是说，只要闭环控制系统的输出量出现偏差，系统就自行纠正，其框图如图 1 - 2 所示。

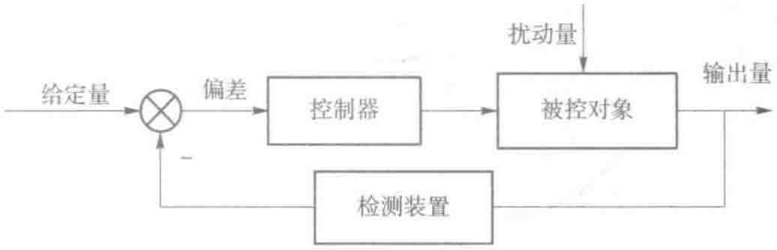


图 1 - 2　闭环控制系统框图

闭环控制系统通过被控量与给定值比较的偏差对系统进行控制，也称为反馈控制系统，其特点是当不论什么原因导致被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。

1.2.2　自动控制系统的基本组成和应用示例

自动控制系统的作用就是保证生产对象（装置）的某输出量始终满足生产工艺的要求，其基本组成和应用示例如下。

1. 自动控制系统的基本组成

自动控制系统就是利用控制器操纵被控对象，使被控量按技术要求变化，其基本组成框图如图 1 - 3 所示。

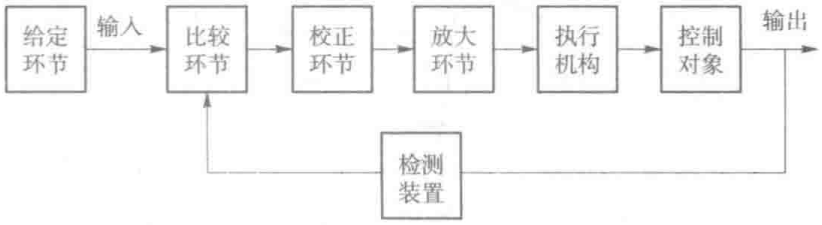


图 1 - 3　自动控制系统的基本组成框图

自动控制系统基本组成框图的说明如下。

（1）给定环节：给出与期望的被控量相对应的系统输入量的给定值。

（2）比较环节：把测量到的输出被控量（实际值）与给定环节给出的输入量（给定值）进行比较，求出它们之间的偏差。

（3）校正环节：即补偿环节，它是调整结构或参数的环节（控制器）。

（4）放大环节：将比较环节给出的偏差信号进行放大，推动执行机构去控制被控对象。

（5）执行机构：由传动装置和调节机构组成，执行机构直接作用于控制对象，使被控制量发生变化达到所要求的数值。

（6）控制对象（调节对象）：是指需要对其进行控制的设备或过程，也称被控对象。

（7）检测装置（传感器）：检测被控制量，并将其转换为与给定量统一的物理量。

自动控制系统中通常把比较环节、校正环节和放大环节合在一起称为控制装置，其说明如下。

（1）根据其特性，有超前、滞后和滞后 - 超前校正等。

（2）根据其与被控对象的不同连接方式，有串联、并联（反馈）、前馈和干扰补偿校正等。

常用的校正方法是串联、并联（反馈）校正和前馈－反馈（复合）校正等。

2. 自动控制系统的应用示例

【例1－1】 水池水位人工控制系统原理如图1－4所示。在出水量随意的情况下，能够保持水位高度不变。请说明该水池水位人工控制系统的操作过程，并画出框图。

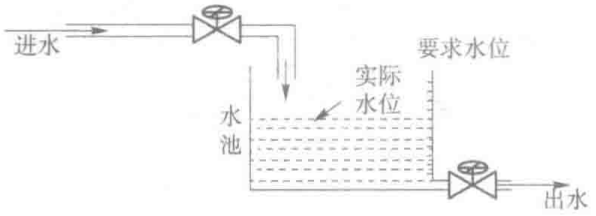


图1－4　水池水位人工控制系统原理

解： 该系统操作过程说明如下。

操作人员需先测出实际水位，并与要求的水位进行比较。若实际水位低于要求的水位，则需开大进水阀门，否则应关小进水阀门；若两者正好相等，则进水阀门不动。

根据水池水位人工控制系统的原理图，可画出其框图如图1－5所示。

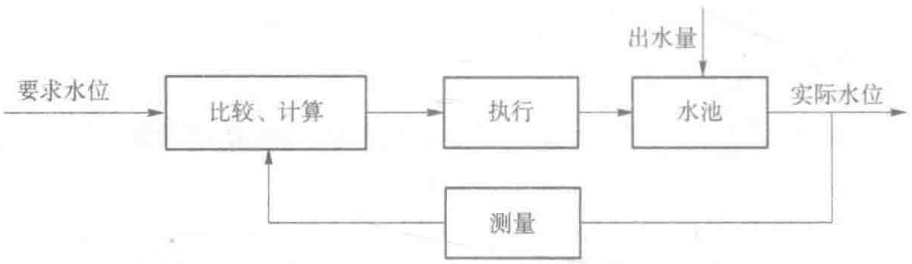


图1－5　水池水位人工控制系统框图

【例1－2】 自动控制装置代替操作人员控制水池水位。水池水位自动控制系统原理如图1－6所示。请说明该水池水位控制系统的操作过程，并画出框图。

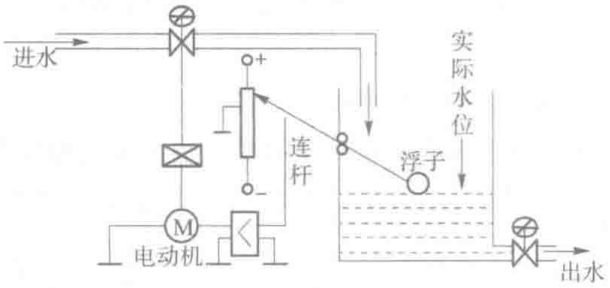


图1－6　水池水位控制系统原理

解： 该系统操作过程说明如下。

浮子测出实际水位，与要求的水位比较，得出偏差然后再由调节元件根据偏差的大小和正负产生控制信号，最后由执行元件根据控制信号执行控制动作。其具体操作过程为：将浮子测出的水位与连杆和电位器进行比较，当浮子低时，电位器上得到正电压，经放大器使电动机向进水阀门开大的方向旋转；反之，当浮子高时，电位器上得到负电压，使电动机向进水阀门关小的方向旋转；若水位正好，则电位器上电压为0，电动机不转，阀门不动。

由此，水池水位自动控制系统框图如图1－7所示。

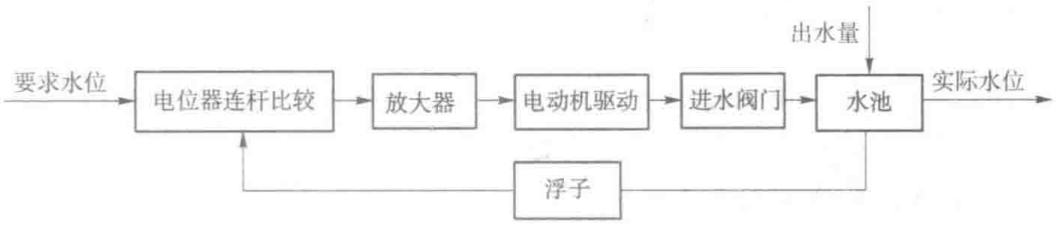


图 1-7 水池水位自动控制系统框图

1.2.3 反馈控制系统的品质要求

在反馈控制系统中，当扰动量或给定量发生变化时，希望系统的输出量（被控量）必须迅速、准确地按输入量的变化而变化，以克服扰动影响。但在实际中，系统输出量不会按理想状态变化，而是偏离给定量而产生偏差，经过反馈作用和过渡过程，输出量最后趋于新的稳态值。因此，反馈控制系统的品质要求可以归纳为稳定性、快速性和准确性。

1. 稳定性

稳定性是指动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡状态的能力，是对系统的基本要求，不稳定的系统不能实现预定任务。不同的系统对于稳定性有不同的要求，且稳定性通常由系统的结构决定，与外界因素无关。

2. 快速性

快速性是对过渡过程的形式和快慢提出的要求，一般称为动态特性或暂态特性，其实质是指动态过程的时间长短。

一般来说，在合理的结构和适当的系统参数下，一个系统的动态过程多属于衰减振荡过程，即被控量变化很快并产生超调量，经过几个振荡后，达到新的稳定工作状态。为了满足生产工艺的要求，往往要求系统的动态过程达到稳定状态越快越好，振荡程度越小越好。

3. 准确性

准确性通常用稳态误差来表示，而稳态误差是指系统达到稳态时，输出量的实际值和期望值之间的误差。准确性是指系统过渡过程结束达到新的平衡工作状态后或系统受干扰重新恢复平衡后，最终保持的精度，是反映后期的性能。

因被控对象不同，各种控制系统对稳、快、准的要求有不同侧重。恒值系统对稳要求严格；随动系统对快、准要求高。同一控制系统稳、快、准是相互制约的，提高过渡过程的快速性，可能会引起振荡；改善了稳定性，过渡过程又很迟缓。因此，必须兼顾这两方面的要求，根据具体情况合理解决问题。

1.2.4 自动控制系统的其他分类

自动控制系统是工程科学的一个分支，从使用方法的角度看，它以数学的系统理论为基础，按数学描述分类可分为线性控制系统和非线性控制系统；从数学角度，按时间信号的性质可分为连续控制系统和离散控制系统；按系统参数是否随时间变化可分为定常系统和时变系统；按给定量的不同可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。不同系统模型需要不同的数学分支和求解工具来研究。

1. 线性控制系统和非线性控制系统

（1）线性控制系统：由线性元件组成，其特征方程用线性方程描述，如线性微分方程、线

性差分方程和线性代数方程等，其特点具有齐次性和叠加性，优点是数学处理简便，理论体系完整。

（2）非线性控制系统：由非线性微分方程描述，其微分方程系数与自变量相关。非线性控制系统一般只能满足近似的定性描述和数值计算，不满足叠加原理。

2. 连续控制系统和离散控制系统

（1）连续控制系统：系统中各部分信号均以模拟的连续函数形式表示（各变量均对时间连续）。

（2）离散控制系统：系统中一处或几处的变量是以脉冲序列或数字形式表示的，如计算机控制系统和采样控制系统。

3. 定常系统和时变系统

（1）定常系统：参数不随时间变化，其描述动态特性的微分方程或差分方程的系数为常数。

（2）时变系统：系统的参数随时间变化，其描述动态特性的微分方程或差分方程的系数不为常数。

4. 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统

（1）恒值控制系统：要求被控制量保持在恒定值，其给定量是不变的，即给定值不变，要求系统输出量以一定的精度接近给定期望值的系统，如石化炼油厂的炼油装置设定的生产标号油品的温度、水池水位控制系统，空调、冰箱、恒温箱、炉温和电动机转速控制系统等。

（2）随动控制系统：其给定量按照事先不知道的时间函数随意变化，并要求输出量能按一定精度随给定量的变化而变化，如跟踪目标的雷达系统、火炮群控制系统、导弹制导系统、参数的自动检验系统、$X-Y$记录仪、船舶驾驶舵位跟踪系统及飞机自动驾驶仪系统等。

（3）程序控制系统：其给定量按照一定时间函数变化，如程控机床的控制系统输出量应与给定量的变化规律相同等。另外，在间歇生产过程中，该类系统应用也比较普遍，如多种液体自动混合加热控制系统。

1.3 控制系统计算机仿真

控制系统计算机仿真从诞生至今经过半个多世纪的飞速发展，已成为一种系统的实验科学，其基本思想是利用物理或数学模型，并借用计算机技术来模仿现实过程，所遵循的基本原则是相似性原理。

1.3.1 计算机仿真技术概述

计算机仿真技术的基本内容包括系统建模、仿真算法、计算机程序设计与仿真结果显示、分析与验证等环节。其三要素为系统、模型与计算机。联系三要素的3个基本活动为模型建立、仿真模型建立及仿真试验（运行）。计算机仿真技术的三要素及3个基本活动框图如图1-8所示。

1.3.2 控制系统计算机仿真的实质

控制系统计算机仿真是系统仿真的一个重要分支，它是一门涉及自动控制理论、计算数学、计算机技术、系统辨识、控制工程，以及系统科学的新型综合性学科，为控制系统的分析、计算、研究、综合设计及计算机辅助教学等提供了快速、经济、科学、有效的手段。



图 1-8 计算机仿真技术的三要素及 3 个基本活动框图

控制系统计算机仿真通过控制系统的数学模型和计算方法，编写程序，使之能自动求解各环节变量的动态变化情况，从而得到关于系统输出和所需要的中间各变量的有关数据和曲线等，以实现对控制系统性能指标的分析与设计。

总之，控制系统计算机仿真就是利用计算机研究控制系统性能的一门学问，它依赖于现行“自动控制原理”和“现代控制理论”课程的基础知识，但侧重点又与这两门课程不同，控制系统计算机仿真更倾向于控制理论问题的计算机分析和求解。

1.4 MATLAB/Simulink 下的控制系统仿真

控制系统的仿真设计普遍使用 MATLAB 软件，该软件的仿真途径有如下两种。

（1）在 MATLAB 的命令行窗口下，运行 M 文件，调用指令和各种用于系统仿真的函数，进行系统仿真。

（2）直接在 Simulink 窗口上进行面向系统结构方框图的系统仿真。

1.4.1 MATLAB 仿真软件

MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件，用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境，主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。MATLAB 是矩阵（matrix）和实验室（laboratory）两个词的组合，意为矩阵工厂（矩阵实验室）。

MATLAB 具有强大的数值计算能力，包含各种工具箱，但其程序不能脱离 MATLAB 环境而运行，所以严格地讲，MATLAB 不是一种计算机语言，而是一种高级的科学分析与计算软件。Simulink 是 MATLAB 附带的基于模型化图形组态的动态仿真环境。首创者克里夫·莫勒尔（Cleve Moler）和约翰·里多（John Little）等人成立了 The MathWorks 公司。该公司自从于 1984 年首次推出 MATLAB 后，不断更新陆续推出了多个版本，几乎每年 MathWorks 公司都会有新版本的 MATLAB 更新出品，本教材选用 MATLAB R2018 进行案例仿真。

1.4.2 MATLAB/Simulink 的仿真特点

MATLAB/Simulink 在控制系统的仿真中得到了广泛应用，其具有如下特点。

1. MATLAB 的仿真特点

MATLAB 的仿真特点如下：

（1）强大的运算功能；

（2）特殊功能的工具箱（Toolbox）；

（3）高效的编程效率；

（4）简单易学的编程语言；

（5）友好的编程环境。

2. Simulink 的仿真特点及仿真步骤

Simulink 的仿真特点如下：

（1）Simulink 采用系统模块直观地描述系统典型环节；

（2）建立仿真模型不用花费较多时间编程。

Simulink 的仿真步骤如下：

（1）启动 Simulink，进入 Simulink 窗口；

（2）在 Simulink 窗口中，借助 Simulink 模块库，创建系统框图模型并设置模块参数；

（3）设置仿真参数后进行仿真；

（4）输出仿真结果。

1.4.3 与控制系统设计与分析、测试相关的基础工具箱

在 MATLAB 中，与控制系统设计与分析、测试相关的基础工具箱包括控制系统工具箱（Control System Toolbox）、系统辨识工具箱（System Identification Toolbox）、模型预测控制工具箱（Model Predictive Control Toolbox）、鲁棒控制工具箱（Robust Control Toolbox）、神经网络工具箱（Neural Network Toolbox）、模糊逻辑工具箱（Fuzzy Logic Toolbox）、优化工具箱（Optimization Toolbox）、航空航天工具箱（Aerospace Toolbox）、数据采集工具箱（Data Acquisition Toolbox）、仪器控制工具箱（Instrument Control Toolbox）、图像采集工具箱（Image Acquisition Toolbox）和车辆网络工具箱（Vehicle Network Toolbox）等。

练习题

1.1 绘制水池水位闭环控制系统框图，并写出各环节在系统中的作用。

1.2 计算机仿真的三要素和 3 个基本活动分别是什么？

1.3 运用 MATLAB 进行控制系统仿真的特点是什么？

1.4 运用 Simulink 进行系统仿真的步骤有哪些？

第2章 MATLAB 计算基础

本章首先介绍了 MATLAB 的桌面操作环境，MATLAB 数值、关系、逻辑、符号和复数运算和仿真的基础知识，并对 MATLAB 控制系统中常用的符号运算和积分变换运算如傅里叶变换、拉普拉斯变换和 Z 变换的基本命令进行了比较详细的描述；其次介绍了 MATLAB 常用的绘制图形命令和图形窗口处理命令，并对 MATLAB 命令的执行方法、M 文件分类概念、程序文件类型及应用、MATLAB 程序流程控制和 MATLAB 程序设计原则等进行了实例分析；最后对程序的调试进行了简单介绍。

通过本章内容的讲解，读者能够对 MATLAB 有一个比较全面的了解，并熟练掌握各种科学计算及绘图指令的运用，学会程序设计方法，为使用 MATLAB 进行控制系统建模、分析、程序设计与仿真打下基础。本书以 MATLB R2018b 版本为例，介绍 MATLAB 的基本操作及示例仿真。

2.1 MATLAB 桌面操作环境

MATLAB 系统由 MATLAB 开发环境、MATLAB 数学函数库、MATLAB 语言、MATLAB 图形处理系统和 MATLAB 应用程序接口（API）五大部分构成。本节介绍 MATLAB R2018b 的启动和退出、操作窗口、命令行窗口的常用指令、文件管理和帮助功能。

2.1.1 MATLAB 启动和退出

启动和退出 MATLAB 是仿真过程中进入和结束仿真平台窗口的基本操作。

1. 启动 MATLAB

双击电脑桌面上 MATLAB 的快捷图标，即可启动 MATLAB。

2. 退出 MATLAB

退出 MATLAB 有如下方式：

（1）单击 MATLAB 主页界面窗口右上角的“关闭”图标；

（2）在命令行窗口输入指令 Exit 或 Quit，按〈Enter〉键。

2.1.2 MATLAB 操作窗口

MATLAB 操作窗口上部由主页、绘图、APP 选项卡和搜索文档等工具条栏目组成，其下部