



普通高等教育电气信息类规划教材



教育部财政部职业院校教师素质提高计划职教师资培养资源开发项目
《职教师资本科自动化专业培养标准、培养方案、核心课程和特色教材开发》专业职教师资培养资源开发 (VTNE030)



免费教学资源下载

www.cmpedu.com



自动控制原理 及仿真技术

刘君义 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

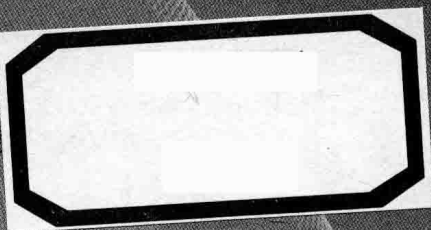




普通高等教育电气信息类规划教材

师

教育部财政部职业院校教师素质
《职教师资本科自动化专业培养
材开发》专业职教师资培养资源



免费教学资源下载

www.cmpedu.com



自动控制原理 及仿真技术

刘君义 主编

田佳 雷霞 方健 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全书分为五个情境,共20个任务。其中前三个情境为并列关系,这三个情境都按照建立系统数学模型—分析系统稳定性—分析控制系统精度—分析控制系统暂态性能指标—改善系统性能这一结构进行。后两个情境也为并列关系,加深了难度,同时也是前三个情境的深化,其按照分析原系统性能—比较给定性能指标要求—重新设计系统—求取新系统参数—验证新系统是否满足期望性能指标要求这一结构进行设置。本书精选了近几十年来经典的控制理论丛书作为理论参考,同时结合现代教育法,采用项目教学方式,将传统经典的课程以项目为载体进行讲解,力求达到理实一体、讲练结合的功效。

本书可作为电气类及信息类相关专业的本科教材,也可作为较深层次的控制理论课程的辅助用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及仿真技术/刘君义主编. —北京:机械工业出版社,2017.8
ISBN 978-7-111-57667-9

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动控制理论—教材 ②自动控制系统—仿真系统—教材 IV. ①TP13 ②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第191511号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:丁伦 责任印制:常天培

责任校对:张艳霞

涿州市京南印刷厂印刷

2017年11月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·293千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57667-9

定价:35.00元(附赠免费教学资源)

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

服务咨询热线:(010) 88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010) 68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

教育部 财政部职业院校教师素质提高计划成果系列丛书

项目牵头单位：吉林工程技术师范学院

项目负责人：刘君义

项目专家指导委员会

主 任：刘来泉

副主任：王宪成 郭春鸣

成 员：（按姓氏笔画排列）

刁哲军	王乐夫	王继平	邓泽民	石伟平	卢双盈
汤生玲	米 靖	刘正安	刘君义	沈 希	李仲阳
李栋学	李梦卿	吴全全	张元利	张建荣	孟庆国
周泽扬	姜大源	郭杰忠	夏金星	徐 流	徐 朔
曹 晔	崔世钢	韩亚兰			

出版说明

《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》颁布实施以来，我国职业教育进入了加快构建现代职业教育体系、全面提高技能型人才培养质量的新阶段。加快发展现代职业教育，实现职业教育改革发展新跨越，对职业学校“双师型”教师队伍建设提出了更高的要求。为此，教育部明确提出，要以推动教师专业化为引领，以加强“双师型”教师队伍建设为重点，以创新制度和机制为动力，以完善培养培训体系为保障，以实施素质提高计划为抓手，统筹规划，突出重点，改革创新，狠抓落实，切实提升职业院校教师队伍的整体素质和建设水平，加快建成一支师德高尚、素质优良、技艺精湛、结构合理、专兼结合的高素质、专业化的“双师型”教师队伍，为建设具有中国特色、世界水平的现代职业教育体系提供强有力的师资保障。

目前，我国共有60余所高校正在开展职教师资培养，但由于教师培养标准的缺失和培养课程资源的匮乏，制约了“双师型”教师培养质量的提高。为完善教师培养标准和课程体系，教育部、财政部在“职业院校教师素质提高计划”框架内专门设置了职教师资培养资源开发项目，中央财政划拨1.5亿元，系统地开发用于本科专业的职教师资培养标准、培养方案、核心课程和特色教材等系列资源。其中，包括88个专业项目、12个资格考试制度开发等公共项目。这些项目由42所开设职业技术师范专业的高校牵头，组织近千家科研院所、职业学校、行业企业共同研发，号召一大批专家学者、优秀校长、一线教师、企业工程技术人员参与其中。

经过三年的努力，培养资源开发项目取得了丰硕成果。一是开发了中等职业学校88个专业（类）职教师资本科培养资源项目，内容包括专业教师标准、专业教师培养标准、评价方案，以及一系列专业课程大纲、主干课程教材及数字化资源；二是取得了6项公共基础研究成果，内容包括职教师资培养模式、国际职教师资培养、教育理论课程、质量保障体系、教学资源中心建设和学习平台开发等；三是完成了18个专业大类职教师资资格标准及认证考试标准的开发。基于上述成果，完成了共计800多本正式出版物。总体来说，培养资源开发项目实现了高效益，形成了一大批资源，填补了相关标准和资源的空白；凝聚了一支研发队伍，强化了教师培养的“校—企—校”协同；引领了一批高校的教学改革，带动了“双师型”教师的专业化培养。职教师资培养资源开发项目是支撑专业化培养的一项系统化、基础性工程，是加强职教教师培养培训一体化建设的关键环节，也是对职教师资培养培训基地教师专业化培养实践、教师教育研究能力的系统检阅。

自2013年项目立项开题以来，各项目承担单位、项目负责人及全体开发人员做了大量深入细致的工作，结合职教教师培养实践，研发出很多填补空白、体现科学性和前瞻性的成果，有力地推进了“双师型”教师专门化培养向更深层次发展。同时，专家指导委员会的各位专家以及项目管理办公室的各位同志克服了许多困难，按照两部对项目开发工作的总体要求，为实施项目管理、研发、检查等投入了大量时间和心血，也为各个项目提供了专业的咨询和指导，有力地保障了项目实施和成果质量。在此，我们一并表示衷心的感谢。

编写委员会

前 言

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础,是专门研究有关自动控制系统中的基本原理、基本方法和基本概念的一门课程,是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程,也适用于机械类、信息类等本科相关专业的学习。本书在研究本科阶段学习特点的同时也研究了高职院校学生的学习特点,深入浅出,注重“做中学”的学习导向,所以本书在适合作为本科院校教学用书的同时也适用于高职高专院校相关专业的学习。

本书的编写遵循以项目任务为载体,实践为导向,按照“理论讲透,重在应用”的原则,对曾经传统的教学模式、教学内容进行了较大的精炼和修改。力求做到深入浅出,通俗易懂,注重实际概念的叙述,同时也引用实例,使理论与实际相结合,培养学生的逻辑思维能力和解决问题的能力。

本书采用理实一体化的教学理念,突破了以往的理论与实践相脱节的现象,使得教学环节相对集中。本书强调教师的主导作用,通过设定一定的教学任务和教学目标,让师生双方边教、边学、边做,全程构建素质培养和技能培养框架,丰富课堂教学和实践教学环节,提高了教学质量。在整个教学环节中,直观和抽象交错出现,理论和实践交替进行,没有固定的先实后理或先理后实,而是理中有实,实中有理。这样的内容安排可以更加突出学生的动手能力和专业技能的培养,充分调动和激发学生的学习兴趣。

本书在教学理论体系上按照控制系统的一般概念→数学模型→系统性能分析方法→控制系统的校正与综合的体系结构进行安排,其中在性能分析方法上强调了时域分析法和频域分析法,而去掉了根轨迹分析法。此种结构主要是研究工程的近似计算和分析的方法,使教学思路更加清晰,同时使学生对该课程内容和教学目标可以更加容易理解和掌握。这是本书的一个基本特点。

MATLAB 是一种面向工程和科学运算的交互式计算机软件,将 MATLAB 用于自动控制系统的计算、分析、设计和仿真,具有良好的教学效果。本书将 MATLAB 作为一种基本工具引入教学的各个环节,用于分析性能指标和解决设计的问题,弱化了系统分析或设计中的理论推导计算,强化分析和设计控制系统的方法研究,并有部分例题是应用 MATLAB 来进行控制系统的辅助分析、设计。这是本书的第二个特点。

为了强调理论知识的应用,注重启发学生拓展和创新的思维,加深学生对课程的理解,本书增加了自动控制系统示例,其内容充分体现了作者丰富的教学经验。这是本书的第三个特点。

为了结合实际以及增强学生的动手能力,本书在整体的课程设计中加入了实验箱的运用,将实例与实验箱相结合,使学生对控制系统有了更加深入的了解。这是本书的第四个特点。

全书分为五个情境,共 20 个任务。其中前三个情境为并列关系,这三个情境都按照建立系统数学模型—分析系统稳定性—分析控制系统精度—分析控制系统暂态性能指标—改善系统性能这一结构进行。后两个情境也为并列关系,加深了难度,同时也是前三个情境的深

化,其按照分析原系统性能—比较给定性能指标要求—重新设计系统—求取新系统参数—验证新系统是否满足期望性能指标要求这一结构进行设置。

情境一以单容水箱液位控制系统为例,对其进行性能分析,主要围绕数学模型的建立,分析系统的动态过程、响应速度快慢及控制系统的精度,以及影响系统性能的原因进行介绍。

情境二针对简单的直流电机调速控制系统进行分析,根据最简单的控制目标,由电枢电流控制电机转速,建立数学模型,分析系统的动态过程。

情境三以直线一级倒立摆为载体,对其进行基于频域方法的系统分析与设计。

以上这三个情境整体分析呈现一种并列关系,但是其程度由浅入深,即:单容水箱系统性能分析(一阶系统)、电机调速系统性能分析(二阶系统)、基于频域法的直线一级倒立摆性能分析(高阶系统)。

情境四以三轴转台系统为例,对其进行了基于频域法的校正与设计,在系统中引入了调节器,以改善系统的稳定性能和动态性能。

情境五以精馏塔系统为载体,综合以上四个情境学过的理论和实践知识,对其提出性能指标要求,按照性能指标要求结合系统本身性能,利用频域的方法设计调节器,让系统性能达到指标要求。

在每个情境后,都有与相应情境匹配的习题,让学生可以在课上和课后,对所学知识进行巩固。

本书的编者都是“自动控制原理”课程教学的一线教师,具有丰富的教学经验,十分了解当前学生的需求以及课程的发展历程。本书是在整体教学讲义的基础上,广泛参考了国内外优秀的教学内容和体系结构,并且结合了编者教学经验而编写的。

本书由吉林工程技术师范学院刘君义担任主编,田佳、雷霞、方健担任副主编,其中参加编写的还有李炜、赵蕊、叶天迟、王彬、于静、孙艳红等。吉林工程技术师范学院电气工程学院自动化专业学生田梦雪、马春雨、孔祥茹、高月、刘泽禹等协助硬件调试以及软件绘图等工作,他们卓有成效的工作,使得本书更加贴合学生自身的情况,也更具有实用性。

鉴于编者能力有限,书中难免存在不足之处,恳请读者原谅,并提出宝贵建议。

编 者

目 录

出版说明

前言

情境一 基于时域法的单容水箱液位控制系统的分析与设计

——一阶系统的分析与设计..... 1

任务一 单容水箱液位控制系统数学模型的建立..... 2

一、任务目标 2

二、任务描述 2

三、相关知识点 3

四、任务分析 10

五、任务实施 10

任务二 对单容水箱系统控制性能的评价 11

一、任务目标 11

二、任务描述 11

三、相关知识点 11

四、任务分析 17

五、任务实施 18

任务三 试验法分析单容水箱的性能 18

一、任务目标 18

二、任务描述 18

三、相关知识点 18

四、任务分析 23

五、任务实施 23

任务四 MATLAB 仿真分析法分析单容水箱系统的性能 26

一、任务目标 26

二、任务描述 26

三、相关知识点 26

四、任务实施 28

任务五 改善单容水箱系统的性能 35

一、任务目标 35

二、任务描述 35

三、相关知识点 35

四、任务分析 36

五、任务实施 36

习题	40
情境二 基于时域法的简单直流电机调速系统的分析与设计	
——二阶系统的分析与设计	43
任务一 简单直流电机数学模型的建立	43
一、任务目标	43
二、任务描述	44
三、相关知识点	44
四、任务分析	45
五、任务实施	46
任务二 简单直流电机数学模型的实验箱模块搭建及参数测定	47
一、任务目标	47
二、任务描述	47
三、相关知识点	47
四、任务分析	56
五、任务实施	56
任务三 小型直流电机系统暂态性能分析	58
一、任务目标	58
二、任务描述	58
三、相关知识点	58
四、任务分析	66
五、任务实施	66
任务四 直流电机控制系统的稳定性分析	68
一、任务目标	68
二、任务描述	68
三、相关知识点	68
四、任务分析	72
五、任务实施	72
任务五 改进性能的电机调速系统控制精度分析	74
一、任务目标	74
二、任务描述	75
三、相关知识点	75
四、任务分析	81
五、任务实施	82
六、结论	84
习题	84
情境三 基于频域法的倒立摆系统分析	87
任务一 倒立摆系统开环幅相频率特性的绘制	101
一、任务目标	101
二、任务描述	101

三、相关知识点	101
四、任务分析	103
五、任务实施	104
任务二 倒立摆系统开环对数频率特性(伯德图)的绘制	105
一、任务目标	105
二、任务描述	105
三、相关知识点	105
四、任务分析	107
五、任务实施	108
任务三 应用频率法分析倒立摆系统的稳定性	110
一、任务目标	110
二、任务描述	110
三、相关知识点	110
四、任务分析	111
五、任务实施	112
任务四 频率法中倒立摆系统稳定裕量的计算	115
一、任务目标	115
二、任务描述	115
三、相关知识点	115
四、任务分析	117
五、任务实施	118
任务五 应用对数幅频特性分析倒立摆系统的性能	124
一、任务目标	124
二、任务描述	124
三、相关知识点	124
四、任务分析	127
五、任务实施	127
习题	132
情境四 基于频域法的三轴转台系统的校正与设计	135
任务一 应用超前校正装置改善三轴转台系统的性能	140
一、任务目标	140
二、任务描述	140
三、相关知识点	140
四、任务分析	143
五、任务实施	143
任务二 应用滞后校正装置改善三轴转台系统的性能	145
一、任务目标	145
二、任务描述	145
三、相关知识点	146

四、任务分析	149
五、任务实施	149
任务三 应用滞后-超前校正装置改善三轴转台系统的性能	151
一、任务目标	151
二、任务描述	151
三、相关知识点	151
四、任务分析	153
五、任务实施	153
习题	155
情境五 精馏塔系统的综合分析与设计	157
任务一 精馏塔温度控制系统设计	158
一、任务目标	158
二、任务描述	159
三、任务分析	159
四、任务实施	159
五、结论	169
任务二 精馏塔塔釜液位系统综合设计	169
一、任务目标	169
二、任务描述	169
三、任务分析	170
四、任务实施	170
五、结论	180
习题	181
附录	182
附录 A 本书使用的部分 MATLAB 指令	182
附录 B 拉普拉斯变换对	185
参考文献	186

情境一 基于时域法的单容水箱液位控制系统的 分析与设计——一阶系统的分析与设计

由于液位控制系统自动控制经验成熟，控制方式灵活，因此广泛应用于石油、化工、电站、冶金、轻工、制药、造纸、食品、自来水厂和污水处理等领域中，结合现代先进的 PLC、单片机、组态及网络控制技术，能对多种敞口和密闭容器及地下水池、水槽内介质进行测量和远程控制，并可在中央控制室或仪表控制台上进行监控、显示、报警。现应用 RTGK-2 型过程控制实验装置来模拟液位控制过程，该实验系统实物图如图 1-1 所示。

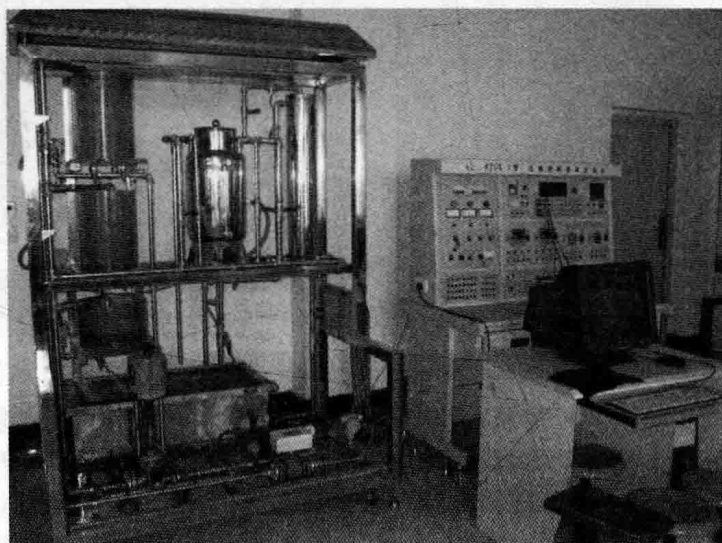


图 1-1 RTGK-2 型过程控制实验装置实物图

该实验装置的控制信号及被控信号均采用 IEC 标准，即电压为 $0 \sim 5\text{ V}$ 或 $1 \sim 5\text{ V}$ ，电流为 $0 \sim 10\text{ mA}$ 或 $4 \sim 20\text{ mA}$ 。该实验系统供电要求为单相交流 $220 (\pm 10\%) \text{ V}$ ， 10 A ；外形尺寸为 $167\text{ mm} \times 164\text{ mm} \times 73\text{ mm}$ ，质量为 580 kg 。该实验系统包括：不锈钢储水箱（长 $\times$ 宽 $\times$ 高： $850\text{ mm} \times 450\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ），强制对流换热器系统，串接圆筒有机玻璃上水箱（ $\phi 250\text{ mm} \times 370\text{ mm}$ ）、中水箱（ $\phi 250\text{ mm} \times 370\text{ mm}$ ）、下水箱（ $\phi 250\text{ mm} \times 270\text{ mm}$ ），三相 4.5 kW 电加热锅炉（由不锈钢锅炉内胆加温筒和封闭式外循环不锈钢冷却锅炉夹套组成），纯滞后盘管实验装置。系统动力支路分为两路：一路由单相丹麦格兰富循环水泵、电动调节阀、涡轮流量计、自锁紧不锈钢水管及手动切换阀组成；另一路由小流量水泵、变频调速器、小流量电磁流量计、自锁紧不锈钢水管及手动切换阀组成。其中的检测变送和执行元件有液位传感器、温度传感器、涡轮流量计、电磁流量计、压力表、电动调节阀、电磁阀等。

RTGK-2 型过程控制实验装置的检测及执行装置包括：

检测装置：扩散硅压力液位传感器。分别用来检测上水箱、下水箱的液位和小流量水泵

的管道压力；电磁流量计、涡轮流量计分别用来检测小流量泵动力支路流量和单相格兰富水泵动力支路流量；Pt100 热电阻温度传感器分别用来检测锅炉内胆、锅炉夹套和对流换热器冷水出口、热水出口、纯滞后盘管出口水温。

执行装置：三相晶闸管移相调压装置用来调节三相电加热管的工作电压；电动调节阀用来调节管道出水量；变频器用来调节小流量泵。

当启动装置对单容水箱的液位进行控制时，在上位机上的组态软件就会模拟显示液位的被控过程。图 1-2 是某次实验过程中组态界面显示结果。

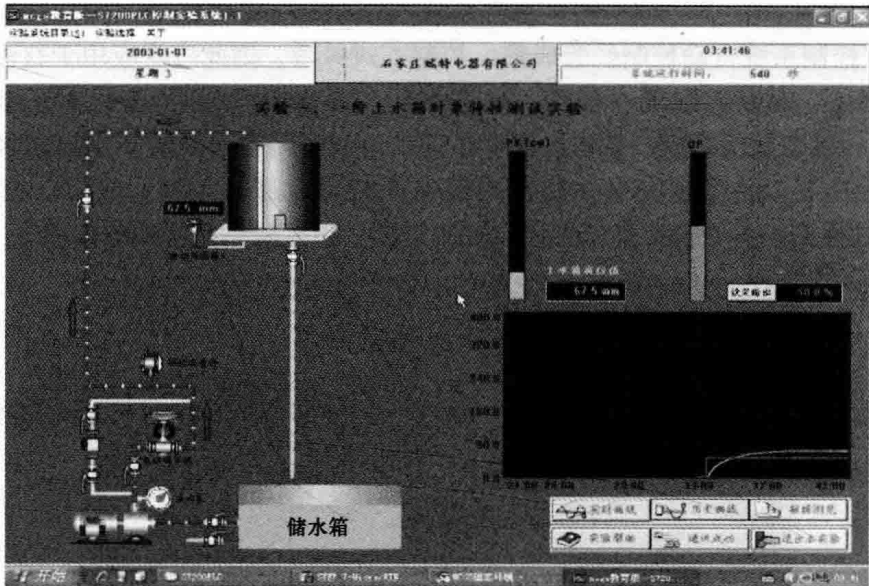


图 1-2 某次实验组态界面显示结果

本情境的学习以实验室液位控制系统——单容水箱为例，对其进行性能分析，主要围绕数学模型的建立、分析系统的动态过程、响应速度的快慢和控制系统的精度，以及影响系统性能的原因来开始学习。

任务一 单容水箱液位控制系统数学模型的建立

一、任务目标

认知目标：

- 1. 了解单容水箱的工作过程；
- 2. 了解单容水箱数学模型的建立方法；
- 3. 了解单容水箱的两种数学模型形式。

能力目标：

- 1. 能够根据单容水箱的工作过程及物理特点建立变量间的微分方程；
- 2. 能够将微分方程数学模型转换为传递函数数学模型。

二、任务描述

某小区二次供水系统为一简单的储水箱，上位由一个阀门控制流入储水箱的水流量，水

箱出口安装阀门对用户供水,水箱液位根据上位阀门开度和用户用水量大小有所变化。总体控制要求为保证水箱液位始终为一恒定值,当液位发生改变时能尽快恢复到设定的液位高度。为了更清楚地研究该控制过程,可以从数学模型的角度来分析如何使小区水箱液位达到平衡所需时间最短,这就需要先建立该系统的数学模型。实际系统简化图如图 1-3 所示。

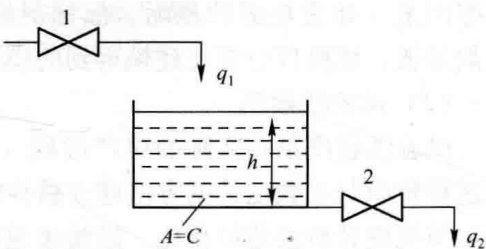


图 1-3 单容水箱液位控制示意图

三、相关知识

（一）基本概念

1. 什么是数学模型，为什么建立数学模型

在自动控制设计中，为了使所设计的闭环自动控制系统的暂态性能满足要求，必须对系统的暂态过程在理论上进行分析，掌握其内在的规律。用来描述系统因果关系的数学表达式，称为系统的数学模型。

在自动控制系统中，用来描述系统内在规律的数学模型的形式有很多，常用的有微分方程、传递函数、状态方程、传递矩阵、结构框图和信号流图等。在以单输入单输出系统为研究对象的经典控制理论中，主要采用微分方程、传递函数、结构框图和信号流图描述系统；而在最优控制或多变量系统中，则主要采用传递矩阵、状态方程作为描述系统的数学模型。

2. 自动控制系统中的基本概念

被控对象和对象：被控的设备和过程称为被控对象或者对象。

被控量和输出量：被控对象中被控制的物理量称为被控量或者输出量。

输入量：输入量包括以下两种：

- 1) 给定量：决定被控量大小的物理量。
- 2) 扰动量：妨碍给定量对被控量进行正常控制的所有因素。

3. 数学模型建立的方法

常用的各环节和系统微分方程式的列写方法有两种：一种是进行理论推导，这种方法是根据各环节所遵循的物理规律（如力学、运动学、电磁学、热学等）来编写的；另一种是统计数据求取，即根据统计数据进行整理编写。实际工作中，这两种方法是相辅相成的。对于简单的环节或装置，多用理论推导；而对于复杂的装置，往往因涉及的因素较多，多用统计方法。

（1）机理分析法建模

机理分析法建模是根据过程的内部机理（运动规律），运用一些学过的或已知的定律、原理（如生物学定律、化学动力学原理、物料平衡方程、能量平衡方程、传热传质原理等）建立被控过程的数学模型。建立数学模型的参数直接与设备结构、性能参数有关，因此对新设备的研究和设计具有重要的意义。另外，对于不允许进行实验的场合，该方法是唯一可取的。机理分析法建模主要是基于分析过程的结构和其内部的物理化学过程，因此要求建模者应有相应学科的知识。通常此法只能用于简单过程的建模。对于较复杂的实际过程来说，机理分析法建模有很大的局限性，这是因为人们对实际过程的机理并非完全了解，同时过程的

某些因素（如受热面的积垢、催化剂的老化等）可能在不断变化，难以精确描述。另外，一般来说，用机理分析法建模得到的模型还需要通过试验验证。

（2）试验法建模

试验法建模是在实际的生产过程（设备）中，根据过程输入、输出的实验数据，即通过过程辨识与参数估计的方法建立被控过程的数学模型。

与机理分析法建模相比，试验法建模的主要特点是不需要深入了解过程的机理。但是必须设计一个合理的实验，以获得过程所含的最大信息量，而这往往是困难的。所以，在实际使用时，这两种方法经常是相互补充的。如先通过机理分析确定模型的结构形式，再通过实验数据来确定模型中各系数的大小。

4. 传递函数的定义及术语

在初始条件为零时，系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比称为系统的传递函数。通常用 $G(s)$ 或 $\Phi(s)$ 表示。

传递函数的性质：

- 1) 传递函数适用于线性定常系统。
- 2) 传递函数只取决于系统的结构和参数，与输入量的大小和形式无关。
- 3) 传递函数只反映系统在零状态下的动态特性。
- 4) 传递函数一般为复变量 s 的有理分式，它的分母多项式 s 的最高阶次 n 总大于或等于其分子多项式 s 的最高阶次 m ，即 $n \geq m$ 。
- 5) 极点：传递函数的分母多项式的根称为系统的极点。
- 6) 零点：传递函数的分子多项式的根称为系统的零点。
- 7) 两个系统传递函数结构参数一样，但若输入、输出的物理量有所不同，则代表的物理意义不同。对于两个完全不同的系统（例如一个是机械系统，另一个是电子系统），只要它们的控制性能是一样的，就可以有完全相同的传递函数。这就是在实验室做模拟实验的理论基础。
- 8) 一个传递函数只能表示一个输入与一个输出之间的关系，而不能反映系统内部的特性。对于多输入、多输出的系统，不能用一个传递函数去描述，而是要用传递函数矩阵去表征系统的输入与输出间的关系。

5. 开环控制系统与闭环控制系统的定义

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

（1）开环控制

只有输入量对输出量产生控制作用，而没有输出量参与对系统的控制；当出现扰动时，如果没有人工干预，给定量与输出量之间的对应将被改变，即系统输出量（实际输出）将偏离给定量所要求的数值（理想输出）。

开环控制的特点：结构简单、成本低、工作易稳定、抗干扰能力差（精度不高）。

开环控制的适用范围：对精度要求不高的场合。

闭环控制则是在开环控制的基础上引入人工干预过程演变而来的。

（2）闭环控制（又称反馈控制或偏差控制）

不仅存在输入到输出的控制，也存在输出经检测装置反馈到输入端形成闭环、参与系统的控制，称此系统为闭环控制系统。

闭环控制的特点：精度高、抗干扰能力强、结构复杂、成本高。

闭环控制的适用范围：高精度控制系统中。

(二) 理论推导

传递函数的推导

设系统微分方程的一般形式为

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

式中 $r(t)$ 、 $c(t)$ ——分别为系统的输入量和输出量。

设 $R(s)$ 、 $C(s)$ 分别为 $r(t)$ 、 $c(t)$ 的拉氏变换，对方程式 (1-1) 的每一项进行拉氏变换，当初始条件均为零时，由拉氏变换的微分性质，可将微分方程式 (1-1) 变为代数方程

$$\begin{aligned} & (s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n) C(s) \\ &= (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m) R(s) \end{aligned} \quad (1-2)$$

即有

$$C(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} R(s)$$

传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1-3)$$

利用传递函数可将系统输出量的拉氏变换写成

$$C(s) = G(s) R(s) \quad (1-4)$$

(三) 方法和经验

1. 数学模型举例

(1) 微分方程求解

编写图 1-4 所示 RC 电路的动态微分方程。

解：1) 确定输入、输出量

输入： $X_i(t) = u_1$

输出： $X_c(t) = u_2$

2) 列写原始微分方程

$$u_1 = iR + u_2 \quad ①$$

$$i = dq/dt \quad ②$$

$$q = Cu_2 \quad ③$$

3) 消去中间变量 i 、 q 得

$$RC du_2/dt + u_2 = u_1$$

$$RC \frac{dx}{dt} + x_c = x_r$$

编写图 1-5 所示 RL 电路的微分方程。

同理，RL 电路的微分方程为

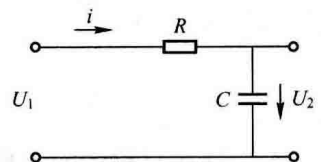


图 1-4 RC 电路

$$L \frac{di}{dt} + iR = u$$

$$L \frac{dx_c}{dt} + R x_c = x_r$$

(2) 传递函数求解

求前述 RC 电路的传递函数。

解： RC 电路的微分方程为

$$RC \frac{dx_c}{dt} + x_c = x_r$$

当初始条件为零时，取拉氏变换：

传递函数为

$$(RCs + 1) X_c(s) = X_r(s)$$

式中 T_c —— RC 电路的时间常数， $T_c = RC$ 。

2. 数学模型建立的方法举例

(1) 机理分析法建模

图 1-6 所示为两只水箱串联工作的双容过程。

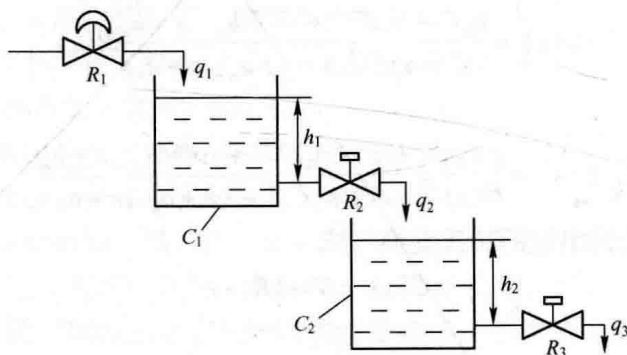


图 1-6 两只水箱串联的示意图

q_2 ：被控过程的输入量；

h_2 ：被控过程的输出量。

设其被控量是第二只水箱的液位 h_2 ，输入量为 q_1 。上述分析方法相同，根据物料平衡关系可以列出如下方程：

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_1 - \Delta q_2 &= C_1 \frac{d\Delta h_1}{dt} \\ \Delta q_2 &= \frac{\Delta h_1}{R_2} \\ \Delta q_2 - \Delta q_3 &= C_2 \frac{d\Delta h_2}{dt} \\ \Delta q_3 &= \frac{\Delta h_2}{R_3} \end{aligned} \right\}$$

根据上述方程的拉氏变换式，画出图 1-7。

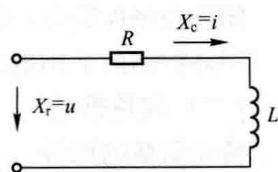


图 1-5 RL 电路