



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 控制系统的数字仿真 及计算机辅助设计

## 第二版

钱积新 王 慧 周立芳 赵豫红 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 控制系统的数字仿真及 计算机辅助设计

第二版

钱积新 王 慧 周立芳 赵豫红 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书的前5章是控制系统数字仿真部分,包括连续系统数学模型表示方法及实现、连续系统的离散化、连续控制系统的仿真、采样控制系统的数字仿真等内容,在取材及编排上根据多年的教学与实践经验做了一定的处理,以期突出基本原理及概念。第6~9章着重介绍作者在应用实践中已经证明是行之有效的方法,内容涵盖计算机辅助建立系统动态模型、基于频域的控制系统的计算机辅助分析与设计、基于时域的线性控制系统计算机辅助设计,其中不但涉及PID控制器、先进控制器的辅助设计与仿真,而且结合了编者在应用中的实例,具有鲜明的理论联系实际特色。第10章从应用角度,进一步介绍了目前国际上较通用的一些CACSD软件及其功能,着重介绍目前应用的主流产品MATLAB。

本书立足于控制系统数字仿真及计算机辅助设计的基础理论与概念,注重理论与实际应用相结合,在注意到知识的完整性与系统性的同时,没有面面俱到地去罗列一些已经广泛见诸于类似著作中的方法。

本书既可作为普通高等院校自动化及相关专业相应课程的教材,还可供广大从事自动控制的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

控制系统的数字仿真及计算机辅助设计/钱积新等  
编著. —2版. —北京:化学工业出版社,2009.9  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-06541-4

I. 控… II. 钱… III. ①控制系统-数字仿真-高等学校-教材②控制系统-计算机辅助设计-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第147973号

---

责任编辑:唐旭华 郝英华

文字编辑:孙 科

责任校对:蒋 宇

装帧设计:张 辉

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数393千字 2010年1月北京第2版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:28.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

控制系统的数字仿真是分析、研究、设计自动控制系统的一种快速和经济的辅助手段,同时它还是控制系统教育和训练的一种有效方法,是从事自动控制研究与工程设计技术人员必须掌握的一门技术。因而在自动控制领域中已得到广泛的重视与应用。

控制系统仿真,首先是研究如何将由系统建模得到的数学模型离散化,使之成为既适合于计算机计算又有良好计算精度与数值稳定性的仿真模型,简单地说就是模型离散化。其次是解决如何将欲仿真控制系统的拓扑结构、各种参数及初值等输入计算机,最后进行仿真计算,输出所需形式的仿真结果。

计算机辅助设计技术是一种包含计算机硬件、软件与设计者的人机共存系统,在系统中设计者与计算机相互作用并共同有效地工作,以完成预想的工作。由于这部分的内容十分丰富,类似的出版物也很多,因此本书取材时尽量避免与类似的出版物内容重复且侧重于作者多年来在教学、科研及生产现场使用过的一些方法。例如,第6章计算机辅助建立系统动态模型,为避免与系统辨识等著作重复,这部分内容就没有列入,而着重介绍目前国内外在工业应用中常用的测试方法。第7~9章的一些方法也均被作者使用过,这几章的例子均出自实际应用。为了给出计算机辅助控制系统设计一个较完整的概念,本书第10章介绍了目前国际上较通用的一些CADCS软件,如MATLAB等的功能及特点。

本书立足于控制系统数字仿真及计算机辅助设计的基础理论与概念,根据应用经验,理论与实际相结合,并注意到知识的完整性与系统性,没有面面俱到地去罗列一些已经广泛见诸于类似著作中的方法。

为方便教学,本书配套的电子教案可免费提供给采用本书作为教材的相关院校使用。如有需要,请发电子邮件至 txh@cip.com.cn 索取。

本书第一版中的1~5章、8.3节由钱积新教授执笔,6~7章、8.1节、8.2节、9.1~9.3节、9.5节由王慧教授执笔,9.4节、9.6节和第10章由周立芳副教授执笔。第二版则由王慧、周立芳与赵豫红执笔全面修订,加入了许多授课过程中的心得体会。全书由钱积新审定。在本书的编写过程中,我们得到了化学工业出版社及所在单位浙江大学控制科学与工程学系的大力支持,并采用了一些学生的研究成果及作业作为素材,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年7月于杭州求是园

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>1 概论</b>              | 1  |
| 1.1 仿真技术概述               | 1  |
| 1.1.1 仿真技术简介             | 1  |
| 1.1.2 仿真技术的应用与发展         | 2  |
| 1.2 计算机辅助设计控制系统的形成与发展    | 4  |
| 习题                       | 5  |
| <b>2 连续系统数学模型表示方法及实现</b> | 6  |
| 2.1 连续系统的数学模型表示方法        | 6  |
| 2.1.1 连续时间模型             | 6  |
| 2.1.2 离散时间模型             | 7  |
| 2.1.3 连续-离散混合模型          | 8  |
| 2.1.4 数学模型之间的转换          | 9  |
| 2.2 实现问题                 | 12 |
| 2.2.1 可控标准型              | 12 |
| 2.2.2 可观标准型              | 16 |
| 2.2.3 对角标准型              | 18 |
| 2.2.4 若当标准型              | 19 |
| 2.2.5 传递函数中分子分母同阶次时的处理   | 21 |
| 2.2.6 状态初值的通用求解方法        | 25 |
| 习题                       | 26 |
| <b>3 连续系统的离散化</b>        | 27 |
| 3.1 引言                   | 27 |
| 3.1.1 解析解与数值解            | 27 |
| 3.1.2 常微分方程初值问题和边值问题     | 27 |
| 3.1.3 线性常微分方程组的稳定性       | 28 |
| 3.1.4 病态微分方程组            | 29 |
| 3.1.5 数值解的稳定性            | 30 |
| 3.1.6 数值计算中误差的来源         | 35 |
| 3.2 数值分析方法               | 36 |
| 3.2.1 化导数为差商的方法          | 36 |
| 3.2.2 泰勒展式法              | 37 |
| 3.2.3 数值积分法              | 37 |
| 3.3 常用的数值积分方法            | 38 |
| 3.3.1 单步法                | 38 |
| 3.3.2 多步法                | 45 |
| 3.3.3 预估-校正法             | 46 |
| 3.3.4 数值积分方法的选择          | 48 |
| 3.4 离散相似法离散连续系统          | 49 |

|          |                             |     |
|----------|-----------------------------|-----|
| 3.4.1    | 连续系统状态方程的离散化                | 50  |
| 3.4.2    | 连续系统传递函数的离散化                | 53  |
| 3.4.3    | 快速数字仿真算法                    | 55  |
| 3.4.4    | 信号重构                        | 56  |
| 3.4.5    | 保持器的传递函数及其频率特性              | 59  |
| 3.4.6    | 离散相似模型的校正                   | 62  |
| 习题       |                             | 64  |
| <b>4</b> | <b>连续控制系统的仿真</b>            | 65  |
| 4.1      | 仿真模型的结构                     | 65  |
| 4.1.1    | 面向闭环系统微分方程(或传递函数)的数字仿真      | 65  |
| 4.1.2    | 面向系统结构图的数字仿真                | 65  |
| 4.2      | 典型环节的离散化系统及其差分方程            | 68  |
| 4.2.1    | 三阶环节                        | 68  |
| 4.2.2    | 滞后环节                        | 69  |
| 4.3      | 控制系统结构图的数值表示方法              | 71  |
| 4.4      | 非线性系统的仿真                    | 75  |
| 4.4.1    | 饱和、分段线性及失灵区非线性特性            | 75  |
| 4.4.2    | 间隙非线性特性                     | 76  |
| 4.4.3    | 继电及具有死区的继电非线性特性             | 77  |
| 4.4.4    | 具有滞环的继电非线性特性                | 77  |
| 4.4.5    | 具有死区和滞环的继电非线性特性             | 79  |
| 4.5      | 关于仿真误差及数值稳定性问题              | 80  |
| 4.5.1    | 截断误差                        | 80  |
| 4.5.2    | 舍入误差                        | 80  |
| 习题       |                             | 81  |
| <b>5</b> | <b>采样控制系统的数字仿真</b>          | 83  |
| 5.1      | 计算机控制系统的仿真                  | 83  |
| 5.2      | 数字控制器的仿真                    | 84  |
| 习题       |                             | 85  |
| <b>6</b> | <b>计算机辅助建立系统动态模型</b>        | 86  |
| 6.1      | 用经典时域辨识法建立对象动态数学模型          | 86  |
| 6.1.1    | 阶跃响应与方波响应                   | 86  |
| 6.1.2    | 低阶传递函数模型的建立                 | 89  |
| 6.1.3    | 从响应曲线求对象的微分方程模型             | 95  |
| 6.2      | 用频域法辨识系统模型                  | 102 |
| 6.2.1    | 由系统脉冲过渡函数 $g(t)$ 计算频率特性     | 102 |
| 6.2.2    | 由系统的频率特性拟合传递函数              | 104 |
| 6.3      | 用相关分析法辨识系统脉冲响应函数            | 111 |
| 6.3.1    | 相关分析法的理论基础                  | 112 |
| 6.3.2    | 相关函数的实验求取方法                 | 113 |
| 6.3.3    | 用白噪声测定系统的脉冲响应               | 113 |
| 6.3.4    | 用伪随机信号辨识脉冲响应函数              | 114 |
| 习题       |                             | 119 |
| <b>7</b> | <b>基于频域的控制系统的计算机辅助分析与设计</b> | 120 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 7.1 单变量系统的稳定性分析 .....               | 120        |
| 7.1.1 劳斯判据 .....                    | 120        |
| 7.1.2 霍尔维茨稳定判据 .....                | 122        |
| 7.2 传递函数的频率特性计算 .....               | 123        |
| 7.2.1 因式分解形式的传递函数频率特性计算 .....       | 123        |
| 7.2.2 直接计算多项式表示的传递函数频率特性 .....      | 125        |
| 7.2.3 系统的稳定裕度 .....                 | 126        |
| 7.3 基于频域法的单变量控制系统计算机辅助设计 .....      | 127        |
| 7.3.1 基于频域法的串联校正原理 .....            | 128        |
| 7.3.2 校正装置传递函数的计算 .....             | 129        |
| 7.4 多变量系统设计的现代频域方法简介 .....          | 137        |
| 7.4.1 概述 .....                      | 137        |
| 7.4.2 基本概念 .....                    | 137        |
| 7.4.3 现代频域方法简介 .....                | 140        |
| 习题 .....                            | 143        |
| <b>8 PID 控制器的计算机仿真与辅助设计 .....</b>   | <b>144</b> |
| 8.1 PID 控制器 .....                   | 144        |
| 8.1.1 标准 PID 控制算法 .....             | 144        |
| 8.1.2 标准 PID 控制算法的改进 .....          | 145        |
| 8.1.3 连续系统 PID 控制器仿真及设计 .....       | 147        |
| 8.1.4 数字 PID 控制器仿真及设计 .....         | 150        |
| 8.2 PID 控制器的参数自动整定 .....            | 151        |
| 8.2.1 PID 控制器的参数整定与自动整定 .....       | 151        |
| 8.2.2 基于继电反馈控制的 PID 控制器参数自动整定 ..... | 152        |
| 8.2.3 示例 .....                      | 153        |
| 8.3 鲁棒 PID 控制器参数整定 .....            | 155        |
| 8.3.1 鲁棒 PID 控制器参数整定思想 .....        | 155        |
| 8.3.2 鲁棒 PID 控制器参数整定算法 .....        | 156        |
| 8.3.3 鲁棒 PID 控制器示例 .....            | 157        |
| 习题 .....                            | 159        |
| <b>9 基于时域的线性控制系统计算机辅助设计 .....</b>   | <b>160</b> |
| 9.1 状态反馈和极点配置 .....                 | 160        |
| 9.1.1 系统的状态能控性和状态能观性 .....          | 160        |
| 9.1.2 状态反馈和输出反馈 .....               | 161        |
| 9.1.3 单输入系统的极点配置 .....              | 161        |
| 9.1.4 多输入系统的极点配置 .....              | 166        |
| 9.2 具有线性二次型性能指标的最优控制系统 .....        | 166        |
| 9.2.1 概述 .....                      | 166        |
| 9.2.2 状态调节器 .....                   | 168        |
| 9.2.3 最优线性输出调节器问题 .....             | 170        |
| 9.2.4 具有期望衰减度的线性二次型调节器 .....        | 172        |
| 9.3 鲁棒控制器 .....                     | 175        |
| 9.3.1 概述 .....                      | 175        |
| 9.3.2 鲁棒控制器的定义 .....                | 176        |

|           |                             |            |
|-----------|-----------------------------|------------|
| 9.3.3     | 鲁棒控制器的存在条件 .....            | 176        |
| 9.3.4     | 鲁棒控制器的结构 .....              | 177        |
| 9.3.5     | 鲁棒控制器的性质 .....              | 178        |
| 9.4       | 模型预测控制器 .....               | 179        |
| 9.4.1     | 预测控制基本原理 .....              | 179        |
| 9.4.2     | 预测控制算法介绍 .....              | 180        |
| 9.4.3     | 参数选择 .....                  | 183        |
| 9.4.4     | 多变量 DMC 算法 .....            | 186        |
| 9.5       | 计算机辅助设计控制系统的工程应用实例之一 .....  | 187        |
| 9.5.1     | 造纸生产过程简介 .....              | 187        |
| 9.5.2     | 计算机辅助建立纸机模型 .....           | 188        |
| 9.5.3     | 控制系统计算机辅助设计 .....           | 189        |
| 9.5.4     | 控制系统实施 .....                | 193        |
| 9.6       | 计算机辅助设计控制系统的工程应用实例之二 .....  | 194        |
| 9.6.1     | 常压塔控制回路工艺 .....             | 194        |
| 9.6.2     | 常压塔先进控制系统总体结构 .....         | 195        |
| 9.6.3     | 常压塔多变量预测控制器设计 .....         | 195        |
| 9.6.4     | 控制系统计算机辅助设计 .....           | 197        |
| 9.6.5     | 控制系统实施 .....                | 197        |
|           | 习题 .....                    | 199        |
| <b>10</b> | <b>计算机控制系统设计与仿真软件 .....</b> | <b>200</b> |
| 10.1      | CACSD 简介 .....              | 200        |
| 10.1.1    | CACSD 软件形成的历史背景 .....       | 200        |
| 10.1.2    | CACSD 的主要内容及特点 .....        | 201        |
| 10.1.3    | CACSD 软件国内外发展概况 .....       | 202        |
| 10.2      | MATLAB 控制系统设计 .....         | 204        |
| 10.2.1    | MATLAB 控制功能介绍 .....         | 205        |
| 10.2.2    | 基于 SIMULINK 的控制系统设计 .....   | 208        |
| 10.2.3    | MATLAB 在倒摆系统设计中的应用 .....    | 212        |
| 10.2.4    | MATLAB 类软件介绍 .....          | 216        |
| 10.3      | SLICOT 软件 .....             | 223        |
| 10.3.1    | SLICOT 功能介绍 .....           | 223        |
| 10.3.2    | 算法改进 .....                  | 224        |
| 10.3.3    | 性能比较 .....                  | 224        |
| 10.4      | 采样控制系统软件 DirectSD .....     | 226        |
| 10.4.1    | 理论基础 .....                  | 226        |
| 10.4.2    | 系统描述 .....                  | 227        |
| 10.4.3    | 最优随机控制 .....                | 227        |
| 10.4.4    | 最优跟踪系统的设计 .....             | 229        |
| 10.4.5    | 最优稳定系统设计举例 .....            | 229        |
| 10.5      | CACSD 的技术现状和展望 .....        | 231        |
|           | 习题 .....                    | 232        |
|           | <b>参考文献 .....</b>           | <b>233</b> |

# 1 概 论

## 1.1 仿真技术概述

### 1.1.1 仿真技术简介

仿真(Simulation),就是用模型(物理模型或数学模型)代替实际系统进行实验和研究。

仿真所遵循的基本原则是相似原理,即几何相似及数学相似。依据这个原理,仿真可分为物理仿真和数学仿真(数学仿真又可分为模拟计算机仿真和数字计算机仿真)。

所谓物理仿真,就是应用几何相似原理,制作一个与实际系统相似但几何尺寸较小的物理模型(例如飞机模型放在与气流场相似的风洞中)进行实验研究。

所谓数学仿真,就是应用数学相似原理,构成数学模型在计算机上进行实验研究。

根据仿真使用的计算机种类,又可把仿真分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真和模拟/数字混合仿真。有时必须有部分实物介入,则称为半物理仿真。

我们要介绍的是自动控制系统的计算机仿真及控制系统的计算机辅助设计。因为,在进行自动控制系统分析、综合与设计过程中,除了进行理论分析与设计外,还要对系统的特性进行实验研究。比如我们用控制理论(包括经典控制理论与现代控制理论)设计好一个系统,但这样设计出来的一个系统是否确实可行呢?设计的控制器参数符合实际情况吗?系统性能对参数变化敏感吗?实际存在的非线性因素影响严重吗?我们在现场实施以前往往要进行一些实验,进行系统性能的考核,没有进行过实验研究是不能直接将设计好的系统放到生产实际中去的,特别是对于一些有危险的场合,或价格昂贵的试验(如导弹发射试验)。当然,我们可以在实验室里建立一套物理模拟装置来进行试验。但是,这种方法十分费时又费钱,而且在有的情况下,物理模拟几乎是不可能的。近年来,由于计算机的迅速发展,采用计算机进行数学仿真的方法已日益被人们所采纳。这种形式的仿真特点是:将实际系统的运动规律用数学形式表达出来,它们通常是一组常微分方程或一组差分方程,然后用模拟计算机或数字计算机来求解这些方程。

采用计算机仿真的好处是:用一套仿真设备可以对物理性质截然不同的许多控制系统进行仿真研究,而且进行一次仿真研究的准备工作主要是准备模拟计算机的排版板或数字计算机的程序。这比在实际物理模型上的安装、接线、调整等准备工作的工作量要小得多,周期也要短得多,所以耗资也就少得多。随着计算机技术的迅速发展,计算机仿真(主要是指数字计算机仿真)已越来越多地取代了物理的仿真。

仿真技术,顾名思义就是要求抓住事物的本质,在计算机上再现事物的基本特征。当然,由于忽略了某种次要因素或数学模型中没有引入某种重要的因素(可能是未知的因素,也可能是难以考虑的某种因素)会造成仿真的失真,这种情况有时可能在所难免。但是有一种情况是应该引起重视的。有的人在仿真研究时遇到程序发散或算不出“理想”结果时不是去认真分析原因,而是任意给定或修改条件或某些系数来获得一条“漂亮”的曲线,这种情况与做实验时制造假数据是同一性质的问题。这不是在仿真,而是在“造假”,这种现象对人对己均无好处,应该力戒。

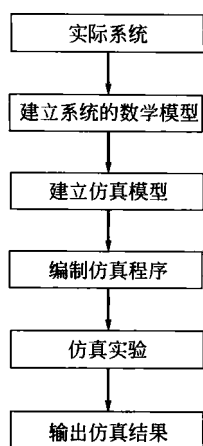


图 1-1 仿真过程示意图

仿真过程(见图 1-1)简述如下。

第一步：建立系统的数学模型。可以是机理建模，也可以是采用系统参数辨识的方法，或两者结合的方法来建模。数学模型是系统仿真的依据，所以数学模型是十分重要的(对于控制系统仿真而言，这里所讲的数学模型不仅包括对象，而且还包括了控制器及各种构成系统所必需的部分)。

第二步：建立仿真模型。即通过一定的算法对原系统的数学模型进行离散化处理，就连续系统而言，是建立相应的差分方程。

第三步：编制仿真程序。对于非实时仿真，可用一般的高级语言或仿真语言。对于快速的实时仿真，往往需要用汇编语言。

第四步：进行仿真实验并输出仿真结果。通过实验对仿真系统模型及程序进行校验和修改，然后按系统仿真的要求输出仿真结果。

这里涉及三个具体的部分：一是实际系统，二是数学模型，三是计算机。并且共有两次模型化，第一次是将实际系统变成数学模型，第二次是将数学模型变成仿真模型，可用图 1-2 表示。

通常我们将一次模型化的技术称为系统建模或系统辨识(包括阶次及参数辨识)，而将二次模型化、仿真编程、运行、修改参数等技术称为系统仿真技术。虽然两者有十分密切的联系，但仍有区别。如图 1-2 所示，系统建模或系统辨识是研究实际系统与数学模型之间的关系；而系统仿真技术则是研究系统数学模型与计算机之间的关系。

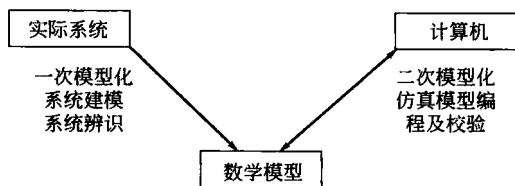


图 1-2 模型化示意图

所以，具体地讲，将一个能近似描述实际系统的数学模型进行二次模型化，变成一个仿真模型，然后将它们放到计算机上进行运算并分析计算结果，调整相关参数，直至使计算结果满足实际要求的过程就称为仿真。

本书中广泛使用“系统”这个名词。我们把系统认为是相互联系又相互作用着的对象的有机组合。因而一个工厂，一套控制计算机，一个控制系统以及系统中的一个动态环节等都可认为是一个系统。

仿真系统的分类方法很多，但其中最基本的是按其状态变量的变化是连续的还是离散的分为两大类。若系统的状态是随时间连续变化的，就称为连续系统。这类系统的动态行为可用一组微分方程来描述，也可以用一组差分方程来描述。不论它们是用微分方程还是差分方程来描述，只要实际状态变化是连续的系统都归入这一类系统。为了区分用差分方程描述的这种系统，人们又称之为采样系统。另一类系统，其状态变化只是在离散时刻发生，而且往往又是随机的，通常用“事件”来表征这些变化，所以又称离散事件系统。在工程和管理系统中有许多这类系统，如通信系统、交通管理系统、大型计算机网络等。这些系统一般规模宏大，结构复杂，一般很难用解析方法求解。因此有必要用计算机仿真技术进行分析、设计。笼统讲，系统仿真应该包括这两类系统的仿真。但本书介绍的控制系统仿真的内容属于第一大类。

### 1.1.2 仿真技术的应用与发展

就控制系统的仿真而言，它是一门涉及到控制理论、计算数学和计算机技术的综合性的学科。然而仿真技术本身不仅被应用于控制系统仿真，还被应用于其他工程系统，如化工流程模拟、造船、飞机、导弹等研制过程。而且它还被应用于非工程系统，如用于研究社会经

济、人口、污染、生物系统等。由于其应用广泛及卓有成效，在国际上成立了国际仿真联合会(International Association for Mathematic and Computer in Simulation——IAMCS)组织经常性的国际学术交流活动，以促进系统仿真技术的发展。

### (1) 计算机仿真技术的发展

就硬件而言，大致经历了如下几个历史阶段。

20 世纪 40 年代出现了模拟计算机，这时的模拟计算机大都是用来设计飞机的专用计算机。20 世纪 50 年代初，出现了通用的模拟计算机。

到 20 世纪 50 年代，数字计算机有了很大的发展，加上这一时期在微分方程数值解的理论方面又有很大进展，所以在几种高级语言(如 ALGOL, FORTRAN)出现以后，在 20 世纪 50 年代末期，数字计算机便在非实时仿真方面开始得到广泛应用。由于这时数字计算机在速度方面还不能满足高速动态系统仿真的要求，所以 1958 年出现了第一台专用的模拟/数字混合计算机，它是用来解决导弹轨道的计算问题。20 世纪 60 年代初期，出现了混合计算机的商品。

下面我们来比较一下模拟计算机与数字计算机用于系统仿真时的特点。

模拟计算机仿真的主要优点在于所有运算(包括加、减、乘、除等)都是同时进行的(“并行的”)，所以运算速度快；其整个运算为连续量，易于与实物连接。这两点使得模拟计算机在快速、实时仿真方面至今仍保持有一定长处。其主要缺点是解题精度低，一般仅为百分之几；对一些特殊环节，如纯滞后或较为复杂的非线性环节，用电子线路来进行仿真不仅线路上比较复杂，而且精度也不易保证；存储和逻辑功能差。

数字计算机仿真却能很好地解决上述困难，即使小型的数字计算机的运算精度通常也可达到 6~7 位有效数字，所以精度远高于模拟计算机。对于一些特殊环节，用数字计算机来仿真是很容易的。另外，用数字计算机来仿真控制系统，整个“被仿真的系统”都包含在一组程序中，所以使用起来十分方便，修改参数也很容易。

但是，用数字计算机仿真也有它的缺点：数字计算机的运算是“串行”的，所以计算速度相对比较低。这对于一些反应快的系统要进行“实时仿真”则带来一些困难。

### (2) 计算机仿真软件的发展

就控制系统仿真而言，前面已讲到，每次仿真都要进行二次建模、编程、调试程序等工作，这也是一项十分繁琐的工作。于是，人们开始编制一些适用于某些类型问题的通用程序——专用或通用的系统仿真软件包。这些通用的软件包是用通用语言编写的，根据仿真过程的要求，可把程序划分为几段，或用一些子程序来完成。一般这种通用软件包应具有如下三个基本功能。

① 置初始值。这是仿真的准备阶段，在这一阶段中应完成下列工作：各变量及参数值设置；所仿真的系统中各状态变量初始值的设置；仿真总时间的设定；设定计算步长及打印间隔等。

② 模型运行。这是仿真的主要阶段，它主要按规定调用某种仿真算法，计算各状态变量和系统输出量。当到达打印间隔时，输出一次计算结果，以数字或曲线形式表示出来。

③ 仿真结果处理和输出。以数据文件的形式输出，或直接画出曲线或打印表格。通用数字仿真程序可以减少工程技术人员编写程序的时间，但是一般说来“通用”性还是不够广泛。虽然这些通用软件包都留有软件接口可以允许用户插入特殊要求的某些子程序，然而这就要求使用者对这个通用程序有一定了解，需要花费一定的精力去熟悉仿真软件本身，这显然不大方便。为进一步方便使用者，20 世纪 60 年代初发展了仿真语言。其实，数字仿真通用程序与仿真语言在仿真功能上并无多大差别，只是它们规定了某种语句类型和语法，使用

时只要按照这些语句和语法直接把数学模型写成程序就可以了。

仿真语言类型很多,用于动力学系统的有如下三种。

- ① 以常微分方程表示数学模型的,如 DSL/90, MIMIC, CSMP, CSSL 等。
- ② 以偏微分方程表示数学模型的,如 FORSIM, PDEL 等。
- ③ 以差分方程表示数学模型的,如 DYNAMO 等,国内已引进了一些仿真语言。

在仿真语言的基础上,仿真技术的进一步发展是开发了采用图形组态方式构造仿真命题的软件,使得利用这种类型的软件进行控制系统的仿真极为方便,例如已经在学术界得到公认的 MATLAB,它也是目前最为成功的商品化科学计算与仿真软件。

仿真技术是一门综合性较强的技术,具有可靠、无破坏性、可重复、安全、经济、不受气象条件和场地限制等特点,已广泛应用于国民经济和社会的各个领域。由于分布式系统具有经济代价小、综合速度较快、较高的可靠性和灵活性等显著优点,现在对于大型系统的仿真都普遍采用了分布式系统。进入 20 世纪 90 年代后,随着仿真技术在国防军事领域的深入应用和不断发展,先进分布式仿真(Advance Distributive Simulation——ADS)成为当前仿真领域的流行趋势。先进分布仿真技术实现的仿真环境,是数以千计甚至万计的人工操纵或计算机控制的坦克、飞机、舰艇等仿真实体和复杂的自然环境如地形、大气、海洋等组成。整个虚拟环境在物理层上由异地分布的仿真站点构成,每个仿真站点是一个局域网,仿真站点之间通过广域网连接。各个实体在计算机形成的三维虚拟空间中不断运动着,且它们之间存在着必要的交互行为。分布式仿真在军事领域具有非常深入的应用,主要用于作战模拟、军事训练、新武器研制和武器对抗等方面。目前,分布仿真技术发展和应用水平被认为是体现一个国家军事实力的重要标志之一。当然,这已超出了控制系统仿真这个应用领域了。

## 1.2 计算机辅助设计控制系统的形成与发展

自动控制作为一门独立的学科出现在 20 世纪 40 年代,开始采用的数学工具主要是传递函数和频率特性,而且主要是针对单输入单输出的线性系统。在 20 世纪 60 年代以前,控制系统的分析和设计主要依靠手工计算和一些图表的帮助。因而在经典控制理论中,人们引入各种各样的图表和曲线,如 Bode(伯德)图、Nyquist(奈奎斯特)图、M 圆图等。

到 20 世纪 60 年代,计算机逐渐引入工程设计领域,其中也包括自动控制系统的设计。开始,计算机主要用于控制系统的单个题目的数值计算,采用的是批处理作业方式,即将所要解决的问题和原始数据编成程序一起送入计算机,由计算机对它进行运算,最后输出计算结果。而在整个计算过程中无人机对话的功能,这种方法就是控制系统的数字仿真。数字仿真的缺点是不能将计算机和工程技术人员两者的特长结合起来。因为任何控制系统的设计,比如控制系统结构的选择、算法的选择、最优化目标的选择、加权矩阵  $R$ 、 $Q$  的选择等,都离不开人的先验知识。而优化计算则可以充分利用计算机极强的计算及数据处理能力。两者的结合将能对控制系统的设计发挥更大的作用,也就是说,控制系统仿真发展到 CACSD (Computer Aided Control System Design),主要是在人机交互、图形显示、系统品质的定量表示、修改系统结构、参数等方面的进一步强化。

计算机辅助控制系统设计反过来又促进了控制理论及控制系统设计方法的发展。在经典的设计方法中,之所以主要采用传递函数和频率特性的方法,是由于它比较直观,适合于手工计算和图表分析。现在,由于计算机可以用来辅助控制系统的设计,这样才有可能使基于状态空间表示的时域分析方法应用于像线性二次型最优控制、最优估计、系统辨识的参数

估计方法等，也使多变量系统的现代频域设计方法获得了广泛的发展，并真正在实际中得到应用。

### 习题

1. 为什么要对控制系统进行计算机仿真？
2. 简述仿真过程。

## 2 连续系统数学模型表示方法及实现

### 2.1 连续系统的数学模型表示方法

连续系统的数学模型表示方法有很多种，但基本上可分为三大类：连续时间模型、离散时间模型及连续-离散混合模型。本节将对它们的线性定常形式作一介绍。

#### 2.1.1 连续时间模型

假定一个系统的输入量  $u(t)$ ，输出量  $y(t)$  以及内部状态变量  $x(t)$  都是时间的连续函数，那么我们可以用连续时间模型来描述它。具体地讲，有四种形式。

(1) 微分方程

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = c_1 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + c_2 \frac{d^{n-2} u}{dt^{n-2}} + \cdots + c_n u \quad (2-1)$$

(2) 传递函数

若系统的初始条件为零，即系统在  $t=0$  时已处于一个稳定状态，那么对式(2-1)两边取拉氏变换后得

$$s^n Y(s) + a_1 s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_{n-1} s Y(s) + a_n Y(s) = c_1 s^{n-1} U(s) + c_2 s^{n-2} U(s) + \cdots + c_n U(s) \quad (2-2)$$

经整理后得

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{n-j+1} s^{j-1}}{\sum_{j=0}^n a_{n-j} s^j}$$

其中  $a_0=1$ 。式(2-2)称为系统的传递函数。

若对式(2-1)引进算子  $p = \frac{d}{dt}$ ，则有

$$\frac{y}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n c_{n-j+1} p^{j-1}}{\sum_{j=0}^n a_{n-j} p^j}$$

可见，在初始条件为零的情况下， $p$  与  $s$  等价。

(3) 权函数

若系统(初始条件为零)在理想脉冲函数  $\delta(t)$  的作用下，其输出响应为  $g(t)$ 。则  $g(t)$  就称为该系统的权函数，或称脉冲过渡函数。

理想脉冲函数  $\delta(t)$  的定义

$$\begin{cases} \delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \\ \int_0^\infty \delta(t) dt = 1 \end{cases} \quad (2-3)$$

若系统在任意函数  $u(t)$  作用下, 则其输出响应  $y(t)$  可通过以下卷积积分公式求出

$$y(t) = \int_0^t u(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (2-4)$$

可以证明,  $g(t)$  与  $G(s)$  构成一对拉氏变换对, 即

$$L[g(t)] = G(s) \quad (2-5)$$

#### (4) 状态空间描述

线性定常系统的状态空间表达式包括下列两个矩阵方程

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (2-6)$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t) \quad (2-7)$$

式(2-6)由  $n$  个一阶微分方程组成, 称为状态方程; 式(2-7)由  $p$  个线性代数方程组成, 称为输出方程。式中,  $\mathbf{X}(t)$  为  $n \times 1$  的状态向量;  $\mathbf{U}(t)$  为  $m \times 1$  的控制向量;  $\mathbf{Y}(t)$  为  $p \times 1$  的输出向量;  $\mathbf{A}$  为  $n \times n$  的状态矩阵, 它由被控对象的参数决定;  $\mathbf{B}$  为  $n \times m$  的控制矩阵;  $\mathbf{C}$  为  $p \times n$  的输出矩阵;  $\mathbf{D}$  为  $p \times m$  的直接传输矩阵。

如果传递函数或传递函数阵各元素为严格真有理分式, 则  $\mathbf{D}$  为零。此时, 式(2-7)为

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \quad (2-8)$$

### 2.1.2 离散时间模型

假定一个系统的输入量、输出量及其内部状态变量均是时间的离散函数, 即为一时间序列  $\{u(kT)\}$ ,  $\{y(kT)\}$ ,  $\{x(kT)\}$ , 其中  $T$  为离散时间间隔(有时为简单起见, 在序列中不写  $T$ , 而直接用  $\{u(k)\}$ ,  $\{y(k)\}$ ,  $\{x(k)\}$  来表示), 那么我们可以用离散时间模型来描述它。具体地说, 也有四种形式。

#### (1) 差分方程

$$a_0 y(n+k) + a_1 y(n+k-1) + \cdots + a_n y(k) = b_1 u(n+k-1) + \cdots + b_n u(k) \quad (2-9)$$

不失一般性, 可设  $a_0 = 1$ 。

若引进移后算子  $q^{-1}$ ,  $q^{-1}y(k) = y(k-1)$ , 则式(2-9)可改写为

$$\sum_{j=0}^n a_j q^{-j} y(k+n) = \sum_{j=1}^n b_j q^{-j} u(k+n)$$

即

$$\frac{y(k+n)}{u(k+n)} = \frac{\sum_{j=1}^n b_j q^{-j}}{\sum_{j=0}^n a_j q^{-j}}$$

或

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{\sum_{j=1}^n b_j q^{-j}}{\sum_{j=0}^n a_j q^{-j}} \quad (2-10)$$

#### (2) Z 传递函数

对式(2-9)两边取 Z 变换, 若系统的初始条件为零, 即  $y(k) = u(k) = 0 (k \leq 0)$ , 则得

$$(a_0 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n})Y(z) = (b_1 z^{-1} + \cdots + b_n z^{-n})U(z)$$

定义

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)}$$

则  $H(z)$  称为系统的 Z 传递函数, 即

$$H(z) = \frac{\sum_{j=1}^n b_j z^{-j}}{\sum_{j=0}^n a_j z^{-j}} \quad (2-11)$$

可见, 在初始条件为零时,  $z^{-1}$  与  $q^{-1}$  等价。

### (3) 权序列

若对初始条件为零的系统施加一单位脉冲序列  $\{\delta(k)\}$ , 则其输出响应被称为该系统的权序列  $\{h(k)\}$ 。单位脉冲序列  $\{\delta(k)\}$  定义为

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

若输入序列为任意一个  $\{u(k)\}$ , 则根据卷积公式可得此时的系统输出响应  $y(k)$  为

$$y(k) = \sum_{i=0}^k u(i)h(k-i) \quad (2-12)$$

$$\text{可以证明} \quad Z[h(k)] = H(z) \quad (2-13)$$

### (4) 离散状态空间模型

线性定常系统的离散状态空间模型为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{B}\mathbf{U}_k \quad (2-14)$$

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{G}\mathbf{U}_k \quad (2-15)$$

其中各状态变量、输出变量、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{G}$  阵与式(2-6)、式(2-7)类同, 这里不再赘述。

## 2.1.3 连续-离散混合模型

这种混合模型仅在系统仿真时用到, 在其他场合是不常用的。

如果有一系统, 它的诸环节中有的环节的状态变量是连续变量, 而有的环节的状态变量是离散变量, 比如数字计算机控制一个连续对象而组成的计算机控制系统就是属于这一类系统, 如图 2-1 所示。

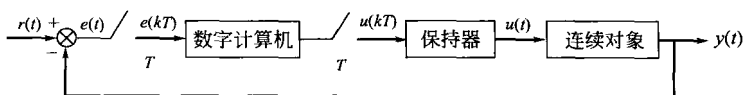


图 2-1 计算机控制系统

对于这类系统, 它的离散部分(图 2-1 中的数字计算机)可用离散时间模型来描述, 而它的连续部分(图 2-1 中的连续对象)则可用连续时间模型来描述。图中的保持器是一个将离散信号  $\{u(kT)\}$  恢复成连续信号的装置, 它的传递函数(零阶保持器)可以证明为  $\frac{1-e^{-sT}}{s}$ , 于是图 2-1 的系统的数学模型可以用图 2-2 来描述。

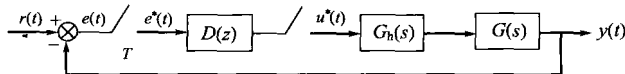


图 2-2 计算机控制系统的数学模型

图 2-2 中  $D(z)$  是  $e^*(t)$  与  $u^*(t)$  拉氏变换之比, 并取  $z=e^{sT}$  后所得的  $Z$  传递函数, 可以证明与图 2-1 中的  $e(kT)$  与  $u(kT)$  直接取  $Z$  变换之比是完全相同的。 $G_h(s)$  为零阶保持器传递函数,  $G(s)$  为连续对象的传递函数。可见, 在这个控制系统中并存两种数学模型——离散的  $D(z)$ , 连续的  $G_h(s)G(s)$ 。

#### 2.1.4 数学模型之间的转换

数学模型按时间集合来分实际上主要是两类, 一类是连续时间模型, 另一类是离散时间模型。如果按模型的表达形式是以输入、输出变量表示还是以状态变量表示划分, 又可将模型分为输入-输出模型与状态空间模型。前者称为外部模型, 后者称为内部模型。从系统辨识得到的往往是输入-输出模型。前面介绍过的除状态方程表示的模型外都是输入-输出模型。系统仿真时(尤其是对于一些非线性系统或不可控不可观系统)往往习惯地用状态空间模型。所以它们之间的转换是人们感兴趣的。另一方面控制系统的数字仿真, 顾名思义是要求在数字计算机上进行系统仿真。因而, 对连续系统的数学模型必须首先进行离散化使之成为仿真模型(离散时间模型)。这是系统仿真最重要的一步。这部分内容将在第 3 章中专门介绍。

##### (1) 状态空间模型与传递函数描述的模型之间的转换

状态空间模型式(2-6)、式(2-7), 即

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}U(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}U(t)\end{aligned}$$

为将它转换成传递函数描述的形式, 对式(2-6)、式(2-7)两边取拉氏变换(设初始条件为零), 得

$$\begin{aligned}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{X}(s) &= \mathbf{B}U(s) \\ \mathbf{Y}(s) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}U(s)\end{aligned}$$

以上两式中消去  $\mathbf{X}(s)$  后, 可得系统的传递函数矩阵为

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$$

相反, 关于由系统的传递函数描述的模型转换为状态空间表示的模型称为实现问题。这个问题将在 2.2 节专门介绍。

将状态空间模型转换为传递函数模型可以采用如下 MATLAB 函数。

$[\text{NUM}, \text{DEN}] = \text{ss2tf}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \text{iu})$ ——其中  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$  为状态空间模型的状态矩阵、控制矩阵、输出矩阵和直接传输矩阵,  $\text{iu}$  表示求取第  $\text{iu}$  个输入对应传递函数(阵)。

$\text{SYS} = \text{tf}(\text{NUM}, \text{DEN})$ ——生成连续时间传递函数, 分子系数和分母系数按照  $s$  的降幂次序排列, 分别表示为  $\text{NUM}$  和  $\text{DEN}$ 。

$\text{SYS} = \text{ss}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D})$ ——生成连续状态方程,  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$  表示状态方程的相应矩阵。

$\text{SYS} = \text{tf}(\text{SYS})$ ——将任意形式的模型转换为传递函数。

**【例 2-1】** 已知

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} 0.6 & 0.233 \\ -0.466 & -0.097 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.233 \end{bmatrix} u \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}\end{aligned}$$

求其脉冲传递函数。