



普通高等教育
“十一五”国家级
规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

COMPUTER SIMULATION AND CAD
OF CONTROL SYSTEM

控制系统 数字仿真与 CAD

第3版

哈尔滨工业大学 张晓华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

控制系统数字 仿真与 CAD

第 3 版

主 编 张晓华
参 编 王华民
主 审 薛定宇



机械工业出版社

本书在概述了仿真技术发展进程的基础上,以 MATLAB 语言为平台,系统地阐述了数字仿真技术的基本概念、原理与方法,概括了控制系统分析与设计中的基本内容。全书共五章,主要包括:控制系统的实验方法、系统的数学描述与模型的建立、数字仿真的实现方法、控制系统 CAD 及其综合应用等内容。

书中涉及运动控制、过程控制、电磁与电力电子控制等系统的建模、分析与设计问题,其内容深入浅出,可读性较强;各章设有“问题与探究”一节,配有练习型、分析/设计型和探究型的习题,有助于激发学生的兴趣,拓展技术领域,以使读者进一步领会与掌握相关领域的内容。

本书系高等院校自动化专业本科生用教材,也可作为电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化等专业“仿真技术”类课程的教学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统数字仿真与 CAD/张晓华主编. —3 版. —北京:机械工业出版社, 2009. 12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-28802-2

I. 控… II. 张… 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 239037 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:于苏华 责任编辑:于苏华 版式设计:霍永明

封面设计:王洪流 责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷

2010 年 2 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.75 印张·388 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28802-2

定价:28.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

一、关于本书

1997年5月,针对“数字仿真与CAD技术”的广泛应用与发展趋势,为满足本科生教学工作的需要,全国高等学校工业自动化专业教学指导委员会决定组织编写“控制系统数字仿真与CAD”课程的本科生教材,并将其列为“九五”规划教材。1999年,《控制系统数字仿真与CAD》(第1版)由机械工业出版社出版,并于2005年修订。

《控制系统数字仿真与CAD》出版10年以来,作为国内较早地将MATLAB语言融入仿真课程中的本科生教材,广泛地被读者评价为注重基础、内容精炼、可读性强、工程案例内容丰富、多媒体课件资料齐全,先后被国内100余所院校选作为仿真类课程的教材。

随着我国高等教育事业的发展,目前已由原来的多个本科专业合并而成自动化、电气工程与自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化等本科专业。同时,高等院校本科生的培养目标已向着厚基础、宽口径、重能力的方向发展,仿真技术类课程的内容也逐步从原理与软件学习拓展到工程案例教学方向上来。

因此,作为涉及自动控制原理、数值分析、控制系统设计等内容的仿真技术类课程,需要不断地与时俱进。

二、仿真技术类课程教学所面临的问题

1. 课程设置的必要性

仿真技术在其近50年的发展历史中,推动了几乎所有设计领域的革命,被喻为20世纪下半叶十大工程技术成就之一;如今,仿真技术已成为现代工程师应该掌握的基本技能之一。

作为联系自动控制理论、自动控制系统/设计、课程设计、毕业设计等教学环节的仿真技术类课程,其不仅可以使学生加强课程的学习效果,而且还可为学生在毕业设计中提供一个强有力的工具,有效加强教学中的实践性教学环节,提高学生的独立工作能力和创造性思维能力。

2. 新技术的不断涌现

作为以计算机系统、数值技术以及应用软件为基本手段的仿真技术,其内涵与其应用将会随着IT业的发展、各行业的需求和新技术的涌现而不断地向前发展。如何引领前沿技术进入仿真技术类课程的教学中来,以提高学生的学习兴趣,激发学生的创造意识,开阔他们的思维视野,是本课程面临的重要问题之一。

3. 能力的培养与训练

作为一类建立在若干先修课程与知识基础之上的应用型专业课,仿真技术类课程应该传授给学生些什么?笔者认为:把仿真技术这一“利器”传授给学生,使学生掌握其中的基本概念、基本原理和基本方法是本门课程最低层次的要求。同时,如何充分利用仿真工具,使学生加深理解所学的课程与知识内容,培养学生独立地分析问题与解决问题的能力,激发学生的创造意识,训练学生的思维方法,是仿真技术类课程教学所面临的深层次问题。

三、关于本书的修订

本书在第2版的基础上,主要有如下内容变动:

1) 增加了“系统建模”内容:通过增加“三相电压型 PWM 整流器系统控制”与“磁悬浮轴承运动控制”两个电磁与电力电子系统的控制问题,进一步丰富了系统建模部分的案例内容。

2) 增加“问题与探究”一节:本着“不学不成、不问不知”(汉王充)的教育理念,各章均设有“问题与探究”一节,以拓展我们的视野,为读者提供一个自主学习空间。

3) 删除“MATLAB 与 Simulink 基础”一章:鉴于目前 MATLAB 语言已在高等院校师生中广泛普及,本书为控制篇幅、突出重点而不再赘述;如在教学上有需求,建议参考相关教材。

4) 配有多媒体课件(容量达 700M):为便于选用本书的院校与教师有效地组织教学工作,凡选用本书作为仿真技术类课程教材的院校,均可获赠逐年更新的多媒体课件与电子教案。课件内容包括:各章多媒体课件/电子教案 PPT、各章习题解答、教学参考 PPT/图片/影像、参考文献、教学文件(教学大纲、实验指导书、课程报告)等。

作为一门时代特色鲜明、向学生传授系统分析与设计的“利器”、培养学生综合运用所学知识、勤于思考、勇于探索的作风的课程,笔者认为:能力比知识更重要,新技术的不断涌现会使得知识变得陈旧,而能力永恒;过程比结果更重要,随着问题与条件的改变,结果将会不同,而通过提出问题、分析问题、解决问题、归纳总结这样一个过程的训练,将会有效地塑造学生们科学的思维方式与工作习惯,而这将会使他们终生受益。因此,本书的主要目的在于:

1) 通过向读者传授仿真技术,使读者清楚:随着新技术的不断发展,将会不断地产生更有效、更实用的“仿真工具”,因此我们应该不断地学习,以使自己能够与时俱进;

2) 为读者讲明“仿真技术”中所涉及的基本原理、基本概念与基本方法,因为这是我们能够有效运用“仿真工具”的理论基础。

3) 给读者提出一些生动有趣、启迪思想的工程实际问题,创造一个自由畅想、激发创造的空间,以使大家从中体会到:“仿真技术”是我们学习、科研以及生活中不可缺少的工具。

如果本书能够在仿真技术类课程的教学工作中,使得教师“开阔思路、得心应手、提高效果”,使得学生“加深理解、掌握精髓、塑造思维”的话,那将是我们莫大的欣慰。

本书共分五章,其中第一、二、四、五章由哈尔滨工业大学张晓华教授编写,第三章由西安理工大学王华民教授编写;全书由张晓华教授统稿,东北大学薛定宇教授主审。

四、关于本书的使用

本书按授课 30 学时编写。对于计算机仿真技术基础课程,可选用本书的前四章(其中“问题与探究”一节的内容,可视具体情况灵活掌握);一般学时数为 20 学时+4 学时实验。对于“控制系统数字仿真与 CAD”课程,可选用全书内容(其中“问题与探究”一节内容、第五章的内容,可视具体情况灵活掌握);一般学时数为 30 学时+8 学时实验。

“仿真技术”是一门实践性较强的专业课,一般均要求安排一定量的上机实验。对于 4 学时的实验,可安排“水箱液位控制”或“双闭环直流调速系统设计”的仿真实验,以培养学生应用 MATLAB 语言解决实际问题的能力;对于 8 学时的实验,可在“双闭环直流调

速系统设计”仿真实验基础上,安排“基于双闭环PID控制的一阶倒立摆控制系统设计”的仿真实验,重点在于培养学生的综合应用能力。

作为以提高学生能力为主要目的仿真技术类课程,其一般为考查课。因此,笔者建议:本门课程的考核以写报告的形式为主,如“实验报告”或“课程报告”,重点考核学生解决实际问题的能力、归纳总结能力以及科技论文的撰写能力。

五、致谢

在本书的成稿与面世过程中,得到了以下同仁的热诚支持与帮助:

哈尔滨工业大学教学发展基金的资助;

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院;

西安理工大学自动化与信息工程学院;

东北大学薛定宇教授;

哈尔滨工业大学赵旂旒、齐海明、郭源博、姚文昊、林乐天研究生;

机械工业出版社。

在此,一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误与不当之处在所难免,殷切期望广大读者批评指正。

信函请至:哈尔滨工业大学电气学院354信箱 张晓华 收,邮编150001;

E-mail: xh_zhang@hit.edu.cn。

编者

2009年9月

目 录

第 3 版前言

第一章 概述	1
第一节 控制系统的实验方法	1
一、解析法	1
二、实验法	1
三、仿真实验法	2
第二节 仿真实验的分类与性能比较	2
一、按模型分类	3
二、按计算机类型分类	4
第三节 系统、模型与数字仿真	6
一、系统的组成与分类	6
二、模型的建立及其重要性	7
三、数字仿真的基本内容	8
第四节 控制系统 CAD 与数字仿真软件	9
一、CAD 技术的一般概念	9
二、控制系统 CAD 的主要内容	10
三、数字仿真软件	10
第五节 仿真技术的应用与发展	16
一、仿真技术在工程中的应用	16
二、应用仿真技术的重要意义	17
三、仿真技术的发展趋势	18
第六节 问题与探究——虚拟现实与仿真技术	18
一、虚拟现实技术	18
二、虚拟现实仿真技术	22
三、基于虚拟样机的球棒控制系统仿真	25
小结	27
习题	27
第二章 控制系统的数学描述	30
第一节 控制系统的数学模型	30
一、控制系统数学模型的表示形式	30
二、数学模型的转换	32
三、线性时不变系统的对象数据类型描述	34
四、控制系统建模的基本方法	35
第二节 控制系统建模实例	39
一、独轮自行车实物仿真问题	39
二、龙门起重机运动控制问题	42
三、水箱液位控制问题	46
四、燃煤热水锅炉控制问题	49
五、三相电压型 PWM 整流器系统控制问题	51
六、磁悬浮轴承运动控制问题	56
第三节 实现问题	61
一、单变量系统的可控标准型实现	61
二、控制系统的数字仿真实现	63
第四节 常微分方程数值解法	63
一、数值求解的基本概念	64
二、数值积分法	65
三、关于数值积分法的几点讨论	69
第五节 数值算法中的“病态”问题	72
一、“病态”常微分方程	72
二、控制系统仿真中的“病态”问题	74
三、“病态”系统的仿真方法	75
第六节 数字仿真中的“代数环”问题	76
一、问题的提出	76
二、“代数环”产生的条件	77
三、消除“代数环”的方法	78
第七节 问题与探究——电力电子器件建模问题	81
一、问题提出	81
二、建模机理	81
三、问题探究	84
小结	85
习题	86
第三章 控制系统数字仿真的实现	88
第一节 控制系统的结构及其拓扑描述	88
一、控制系统常见的典型结构形式	88
二、控制系统的典型环节描述	89
三、控制系统的连接矩阵	90
第二节 面向系统结构图的数字仿真	92
一、典型闭环系统的数字仿真	92
二、复杂连接的闭环系统数字仿真	97
第三节 环节的离散化与非线性系统的数字仿真	103

一、连续系统的离散化模型法	103	小结	198
二、非线性系统的数字仿真	112	习题	199
第四节 计算机控制系统的数字仿真	119	第五章 数字仿真技术的综合应用	202
一、采样控制系统的数学描述	120	第一节 直流电动机双闭环调速系统设计	
二、采样控制系统的仿真方法	123	中的若干问题	202
三、采样控制系统仿真程序实现	126	一、双闭环 V-M 调速系统的目的	202
第五节 问题与探究——一类非线性控制		二、关于积分调节器的饱和和非线性问题	203
系统数字仿真的效率问题	132	三、关于 ASR 与 ACR 的工程设计问题	203
一、问题提出	132	四、双闭环 V-M 调速系统的动态分析	205
二、问题分析	133	第二节 数字 PID 调节器的鲁棒性设计	
三、几点讨论	139	方法	207
小结	139	一、数字 PID 调节器的鲁棒性设计	207
习题	140	二、“高精度齿轮量仪”位置伺服系统	
第四章 控制系统 CAD	142	控制器设计	209
第一节 概述	142	第三节 “水箱系统”液位控制的仿真	
第二节 经典控制理论 CAD	143	研究	211
一、控制系统固有特性分析	143	一、系统建模	211
二、控制系统的设计方法	146	二、数字仿真	211
三、控制系统的优化设计	154	三、结果分析	211
第三节 基于双闭环 PID 控制的一阶倒立		第四节 一阶倒立摆系统的双闭环模糊	
摆控制系统设计	159	控制方案	212
一、系统模型	159	一、引言	212
二、模型验证	161	二、模糊理论中的几个基本概念	213
三、双闭环 PID 控制器设计	165	三、一阶倒立摆系统的双闭环模糊控制	214
四、仿真实验	170	四、仿真实验	216
五、结论	173	五、结论	223
第四节 现代控制理论 CAD	173	第五节 基于单位功率因数的 PWM 整流	
一、线性二次型最优控制器设计	174	器控制系统设计	223
二、模型参考自适应控制系统设计	182	一、引言	223
第五节 基于时间最优控制的起重机防		二、滑模变结构控制	224
摆控制技术的研究	188	三、系统建模与模型验证	225
一、问题的提出	188	四、基于滑模变结构控制的 PWM 整流	
二、时间最优控制	189	器控制系统设计	226
三、系统建模	190	五、仿真实验	230
四、模型验证	190	六、结论	234
五、时间最优控制策略	192	第六节 问题与探究——两轮电动车自平	
六、仿真实验	194	衡控制问题	234
七、结论	196	一、问题提出	234
第六节 问题与探究——“球车系统”的		二、系统建模	236
建模与控制问题	197	三、问题探究	237
一、问题提出	197	小结	238
二、系统建模	197	习题	238
三、问题探究	198	参考文献	241

第一章 概 述

第一节 控制系统的实验方法

在工程设计与理论学习过程中，我们会接触到许多控制系统的分析、综合与设计问题，需要对相应的系统进行实验研究，概括起来有解析法、实验法与仿真实验法三种实验方法。

一、解析法

所谓解析法，就是运用已掌握的理论知识对控制系统进行理论上的分析、计算。它是一种纯理论意义上的实验分析方法，在对系统的认识过程中具有普遍意义。

例如，在研究汽车轮子悬挂系统的减振器性能及其弹簧参数变化对汽车运动性能的影响时，可从动力学角度分析，将系统等效为图 1-1 所示模型形式，进而得出描述该系统动态过程的二阶常微分方程

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(t) \quad (1-1)$$

对于式 (1-1) 的分析求解显然就是一个纯数学解析问题。但是，在许多工程实际问题中，由于受到理论的不完善性以及事物认识的不全面性等因素的影响（例如“黑箱”问题、“灰箱”问题等），所以解析法往往有很大的局限性。

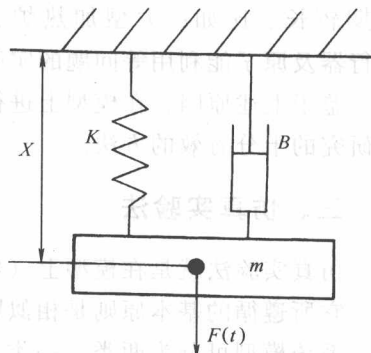


图 1-1 悬挂系统动力学模型

二、实验法

对于已经建立的（或已存在的）实际系统，利用各种仪器仪表与装置，对系统施加一定类型的信号（或利用系统中正常的工作信号），通过测取系统响应来确定系统性能的方法称之为实验法。它具有简明、直观与真实的特点，在一般的系统分析与测试中经常采用。

图 1-2 给出的是一带传动试验机转速控制系统，其动态性能 $n(t)$ 及静态性能 $n(I_d)$ 均可通过实验的方法测得，图 1-3 是其静特性的测量结果。

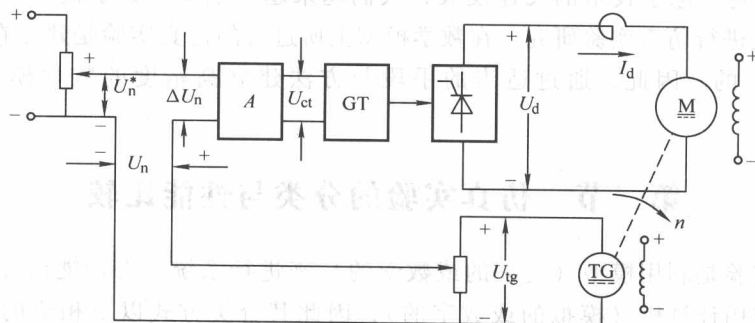


图 1-2 带传动试验机转速控制系统

但是, 由于种种原因, 这种实验方法在实际中常常难以实现。归纳起来有如下几方面的原因:

1) 对于控制系统的设计问题, 由于实际系统还没有真正的建立起来, 所以不可能在实际的系统上进行实验研究。

2) 实际系统上不允许进行实验研究。比如在化工控制系统中, 随意改变系统运行的参数, 往往会导致最终成品的报废, 造成巨额损失, 类似的问题还有许多。

3) 费用过高、具有危险性、周期较长。比如: 大型加热炉、飞行器及原子能利用等问题的实验研究。

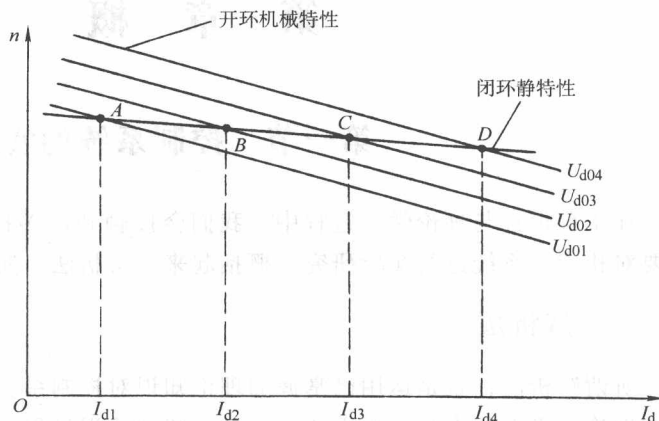


图 1-3 转速控制系统静特性

鉴于上述原因, 在模型上进行的仿真实验研究方法逐渐成为对控制系统进行分析、设计与研究的十分有效的方法。

三、仿真实验法

仿真实验法就是在模型上(物理的或数学的)所进行的系统性能分析与研究的实验方法, 它所遵循的基本原则是相似原理。

系统模型可分为两类, 一类为物理模型, 另一类是数学模型。例如, 在飞行器的研制中, 将其放置在“风洞”之中进行的实验研究, 就是模拟空中情况的物理模型的仿真实验研究, 其满足“环境相似”的基本原则。又如, 在船舶设计制造中, 常常按一定的比例尺缩小建造一个船舶模型, 然后将其放置在水池中进行各种动态性能的实验研究, 其满足“几何相似”的基本原则, 是模拟水中情况的物理模型的仿真实验研究。

在物理模型上所作的仿真实验研究具有效果逼真、精度高等优点; 但是, 其或者造价高昂, 或者耗时过长, 不宜为广大的研究人员所接受, 大多是在一些特殊场合下(比如, 导弹或卫星一类飞行器的动态仿真, 发电站综合调度仿真与培训系统等)采用。

随着计算机与微电子技术的飞速发展, 人们越来越多地采用数学模型在计算机(数字的或模拟的)上进行仿真实验研究。在数学模型上所进行的仿真实验是建立在“性能相似”的基本原则之上的。因此, 通过适当的手段与方法建立高精度的数学模型是其前提条件。

第二节 仿真实验的分类与性能比较

由于仿真实验是利用模型(物理的或数学的)来进行系统动态性能研究的实验, 其中绝大多数都要应用计算机(模拟的或数字的), 因此其分类方式以及相应的称呼均有所不同。下面仅就常用的几种情况进行说明。

一、按模型分类

当仿真实验所采用的模型是物理模型时，称之为物理仿真；是数学模型时，称之为数学仿真。

事实上，人们经常根据仿真实验中有无实物介入以及与时间的对应关系将模型分类进一步地细化，其可归纳成图 1-4 所示的情况。由图可见，物理仿真总是有实物介入的，具有实时性与在线的特点。因此，仿真系统具有构成复杂、造价较高等特点，图 1-5 给出了某卫星姿态控制的实物仿真系统原理，从中可略见一斑。数学仿真是在计算机上进行的，具有非实时性与离线的特点，是一种经济、快捷与实用的实验方法。

本书重点讨论基于数学模型的数字仿真问题。

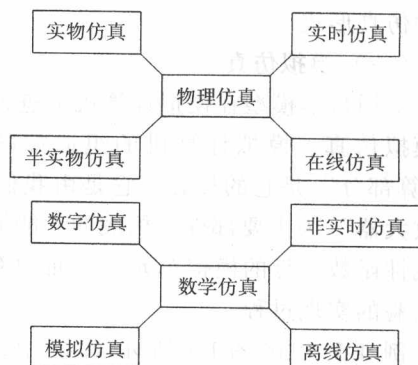


图 1-4 按模型分类的几种情况

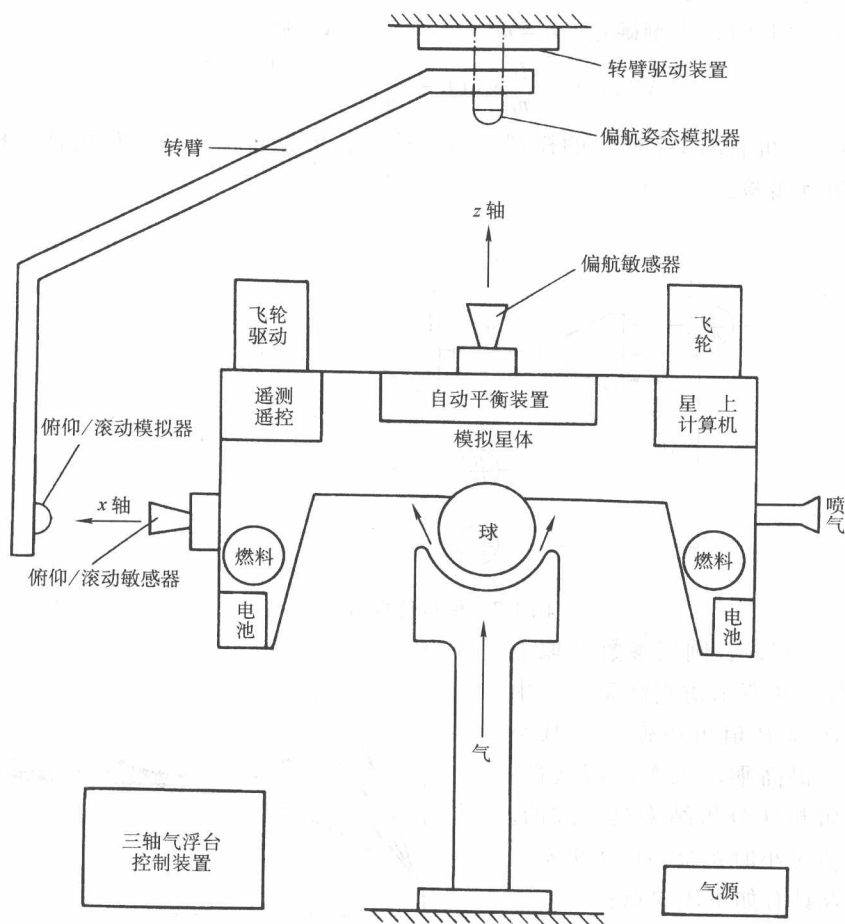


图 1-5 卫星姿态控制的实物仿真系统原理图

二、按计算机类型分类

由于数学仿真是在计算机上进行的，所以视计算机的类型以及仿真系统的组成不同可有多种仿真形式。

(一) 模拟仿真

采用数学模型在模拟计算机上进行的实验研究称之为模拟仿真。模拟计算机的组成如图 1-6 所示，其中“运算部分”是它的核心，它是由我们熟知的“模拟运算放大器”为主要部件所构成的，能够进行各种线性与非线性函数运算的模拟单元。下面的例子说明了模拟仿真实验的实现过程。

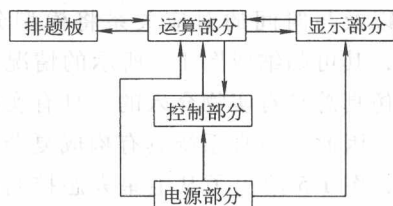


图 1-6 模拟计算机的组成

例 1-1 在图 1-1 所示系统中，若初始条件为

$\dot{X}(t)|_{t=0} = \dot{X}(0) = \alpha$, $X(t)|_{t=0} = X(0) = \beta$, 试分析参数 B 对系统振动特性的影响。

解 对于式(1-1)，不难确定： $a = m$, $b = B$, $c = K$ ，则有

$$\ddot{X}(t) = -\frac{B}{m}\dot{X}(t) - \frac{K}{m}X(t) + \frac{1}{m}F(t) \quad (1-2)$$

据式(1-2)可有图 1-7 所示的模拟仿真结构图，依据它在模拟计算机排题板上即可进行排版及做仿真实验。

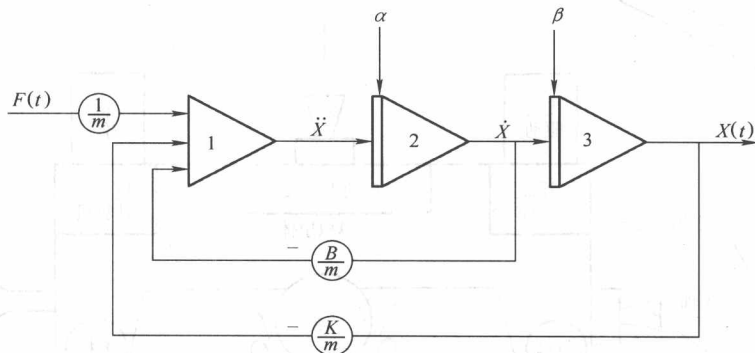


图 1-7 模拟仿真结构图

若 $F(t) = 1(t)$ ，则当参数 B 取不同值时，有图 1-8 所示仿真结果。从中可见，适当选择 B 值可以使系统减小或消除振动，提高乘坐汽车的舒适性。这一结果与解析法分析结果是一致的。阻尼系数 B 值过小时系统易产生振动。

模拟仿真具有如下优缺点：

1) 描述连续的物理系统的动态过程比较自然而逼真。

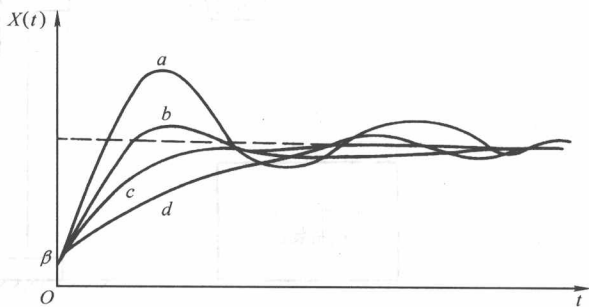


图 1-8 动态仿真结果

- 2) 仿真速度极快,失真小,结果可信度高。
- 3) 受元器件性能的影响,仿真精度较低。
- 4) 对计算机控制系统(采样控制系统)的仿真较困难。
- 5) 仿真实验过程的自动化程度较低。

(二) 数字仿真

采用数学模型,在数字计算机上借助于数值计算的方法所进行的仿真实验称之为数字仿真。数字仿真具有简便、快捷、成本低的特点,同时还具有如下优缺点:

1) 计算与仿真的精度较高。由于计算机的字长可以根据精度要求来“随意”设计,因此从理论上讲系统数字仿真的精度可以是无限的。但是,由于受到误差积累、仿真时间等因素的影响,其精度不宜定得过高。

2) 对计算机控制系统的仿真比较方便。

3) 仿真实验的自动化程度较高,可方便地实现显示、打印等功能。

4) 计算速度比较低,在一定程度上影响到仿真结果的可信度。因此,其对一些“频响”较高的控制系统进行仿真时具有一定的困难。

随着计算机技术的发展,“速度问题”会在不同程度上予以改进与提高,因此可以说数字仿真技术有着极强的生命力。

(三) 混合仿真

通过上面的介绍可以看到,模拟仿真与数字仿真各有优缺点,同时其优缺点可以互补,由此就产生了将这两种方法结合起来的混合仿真实验系统,简称混合仿真,其主要应用于下述情况:

- 1) 要求对控制系统进行反复迭代计算时。例如:参数寻优、统计分析等。
- 2) 要求与实物连接进行实时仿真,同时又有一些复杂函数的计算问题。
- 3) 对于一些计算机控制系统的仿真问题。此时,数字计算机用于模拟系统中的控制器,而模拟计算机用于模拟被控对象。

混合仿真集中了模拟仿真与数字仿真的优点,其缺点是系统构成复杂、造价偏高。

(四) 全数字仿真

对于计算机控制系统的仿真问题,在实际应用中为简化系统构成,对象的模拟也可用一台数字计算机来实现,用软件来实现对象各种机理的模拟,如图 1-9 所示。从中可见,控制计算机系统是真实系统,即今后要实际应用之;而仿真计算机是用来模拟被控对象的,可用软件灵活构成各种线性及非线性特性,因此全数字仿真系统具有灵活、多变、构成简便的特点。

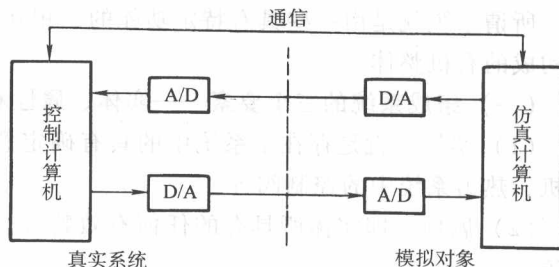


图 1-9 全数字仿真系统原理图

在全数字仿真中,若想进一步降低仿真系统成本,或仅用其作理论研究,则图 1-9 中的 A/D 与 D/A 接口电路部分可以去掉,用网络通信的方法实现控制器与模拟对象之间的信息交换,其在复杂系统数字仿真加速方法上具有独到之处。

(五) 分布式数字仿真

对于算法复杂的大型数字仿真问题,单一的或仅用两台 PC 进行数字仿真往往受到速度与精度这一对矛盾因素的影响,尽管数字计算机单机的运行速度在不断提升,这一矛盾始终困扰数字仿真技术的推广及深入的应用。大型(或巨型)计算机虽然具有卓越的性能,但其价格限制了其市场范围。

那么如何用普通 PC 来解决数字仿真中的加速与精度的提高问题呢?现代计算机网络技术为其开辟了新途径。图 1-10 给出了基于网络技术实现的分布式数字仿真系统。从中可见,数字仿真系统将所研究的问题分布成若干个子系统,分别在主站与各分站的计算机上同时运行,其有用数据通过网络与主站进行信息交换,在网络通信速度足够高的条件下,分布式数字仿真系统具有近似的多 CPU

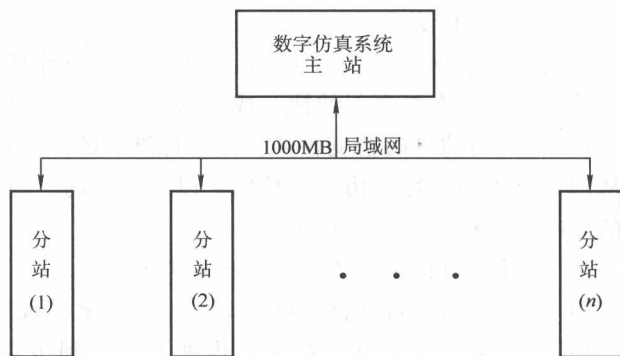


图 1-10 分布式数字仿真系统

并行计算机的性能,使仿真速度与精度均可有所保证,而成本却相对低很多,这是一种简便有效地解决复杂系统数字仿真问题的方法。

第三节 系统、模型与数字仿真

在进行数字仿真实验时,对实际系统的认识,对系统模型的理解以及在计算机上的实现是一个有机的整体,每个环节都不同程度地对最终结果有所影响。因此,我们有必要对它们深入了解与掌握。

一、系统的组成与分类

所谓系统就是由一些具有特定功能的、相互间以一定规律联系着的物体(又称子系统)所构成的有机整体。

(一) 组成系统的三个要素——实体、属性和活动

(1) 实体 就是存在于系统中的具有确定意义的物体。比如电力拖动系统中的执行电动机、热力系统中的控制阀等。

(2) 属性 即实体所具有的任何有效特征。比如温度、控制阀的开度及传动系统的速度等。

(3) 活动 系统内部发生的任何变化过程称之为内部活动;而系统外部发生的对系统产生影响的任何变化过程称之为外部活动。比如:控制阀的开启为热力系统的内部活动,电网电压的波动为电力拖动系统的外部活动(即外部扰动)。

(二) 系统具有的三种特性——整体性、相关性和隶属性

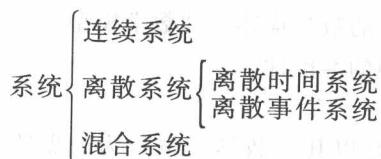
(1) 整体性 即系统中的各部分(子系统)不能随意分割。比如任何一个闭环控制系统的组成中,对象、传感器及控制器缺一不可。因此,系统的整体性是一个重要特性,直接影响系统功能与作用。

(2) 相关性 即系统中的各部分(子系统)以一定的规律和方式相联系,由此决定了其特有的性能。比如电动机调速系统是由电动机、测速机、PI调节器及功率放大器等组成,并形成了电动机能够调速的特定性能。

(3) 隶属性 一般情况下,有些系统并不像控制系统(由人工制成的)那样可清楚地分出系统的“内部”与“外部”,它们常常需要根据所研究的问题来确定哪些属于系统的内部因素,哪些属于系统的外界环境,其界限也常常随不同的研究目的而变化,将这一特性称之为隶属性。分清系统的隶属界限是十分重要的,它往往可使系统仿真问题得以简化,有效地提高仿真工作的效率。

(三) 系统的分类

系统的分类可有多种形式,下面是以“时间”作为依据的分类情况:



(1) 连续系统 系统中的状态变量随时间连续变化的系统为连续系统。如电动机速度控制系统、锅炉温度调节系统等。

(2) 离散时间系统 系统中状态变量的变化仅发生在一组离散时刻上的系统为离散时间系统。如计算机系统。

(3) 离散事件系统 系统中状态变量的改变是由离散时刻上所发生的事件所驱动的系统为离散事件系统。如大型仓储系统中的“库存”问题,其“库存量”是受“入库”、“出库”事件的随机变化的影响的。

离散事件系统的仿真问题本书未涉及,有兴趣的读者可参阅有关文献。

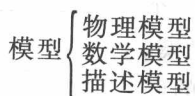
(4) 连续离散混合系统 若系统中一部分是连续系统,而另一部分是离散系统,其间有连接环节将两者联系起来,则称之为连续离散混合系统。如计算机控制系统,通常情况下其对象为连续系统,而控制器为离散时间系统。

本书中所述的“离散系统”均指离散时间系统。

二、模型的建立及其重要性

(一) 模型

系统模型是对系统的特征与变化规律的一种定量抽象,是人们用以认识事物的一种手段(或工具),一般有以下几种:



对于物理模型与数学模型,我们已有所了解,下面着重谈一下“描述模型”。

所谓描述模型是一种抽象的(无实体的),不能或很难用数学方法描述的,而只能用语(自然语言或程序语言)描述的系统模型。

随着科学技术的发展,在许多系统中都存在着“精确”与“实现”之间的矛盾问题,即若过分追求模型的精确(即严格的数学模型),则实际中往往很难实现。因此,为了有效

地对一类复杂系统实现控制，人们已不再单纯地追求“数学模型”，而是建立起基于“经验”或“知识”的描述模型。例如，在模糊（Fuzzy）控制系统中，人们对控制对象的描述就是一组基于“经验”的 If-then-else 语句的描述。

描述模型是系统模型由“粗”向“精”转换过程中的一个中间模型，随着人们对系统行为的不断深入认识，其最终将被精确的数学模型所取代。

（二）模型的建立

建立系统模型就是（以一定的理论为依据）把系统的行为概括为数学的函数关系。其包括以下内容：

- 1) 确定模型的结构，建立系统的约束条件，确定系统的实体、属性与活动。
- 2) 测取有关的模型数据。
- 3) 运用适当理论建立系统的数学描述，即数学模型。
- 4) 检验所建立的数学模型的准确性。

（三）系统建模的重要性

由于控制系统的数字仿真是以其“数学模型”为前提的，所以对于仿真结果的“可靠性”来讲，系统建模至关重要，它在很大程度上决定了数字仿真实验的“成败”。

长期以来，由于人们对系统建模重视不够，使得数字仿真技术的应用仅仅限于“理论上的探讨”，缺乏对实际工作的指导与帮助，因而在一部分人的思想概念中产生了“仿真结果不可信”或“仿真用处不大”的错误认识。

现代的数字仿真技术已日趋完善地向人们提供强有力的仿真软件工具，从而对“系统建模”的要求越来越高，因此应予以充分的重视与熟练的掌握。

三、数字仿真的基本内容

通常情况下，数字仿真实验包括三个基本要素，即实际系统、数学模型与计算机。联系这三个要素则有三个基本活动，即模型建立、仿真实验与结果分析。以上所述三要素及三个基本活动的关系可用图 1-11 来表示。由图可见，将实际系统抽象为数学模型，称之为一次模型化，它还涉及系统辨识技术问题，统称为建模问题；将数学模型转换为可在计算机上运行的仿真模型，称之为二次模型化，这涉及到仿真技术问题，统称为仿真实验。

长期以来，仿真领域的研究重点一直放在仿真模型的建立这一活动上（即二次模型化问题），并因此产生了各种仿真算法及工具软件，而对于模型建立与仿真结果的分析问题重视不够，因此使得当一个问题提出后，需要较长的时间用于建模。同时，仿真结果的分析常常需要一定的经验，这对于进行仿真实验的工程技术人员来讲是有困难的，其结果造成仿真结果不真实、可信度低等问题，这些问题有碍于数字仿真技术的推广应用。

综上所述，仿真实验是建立在模型这一基础之上的，对于数字仿真要完善建模、仿真实验及结果分析体系，以使仿真技术成为控制系统分析、设计与研究的有效工具。

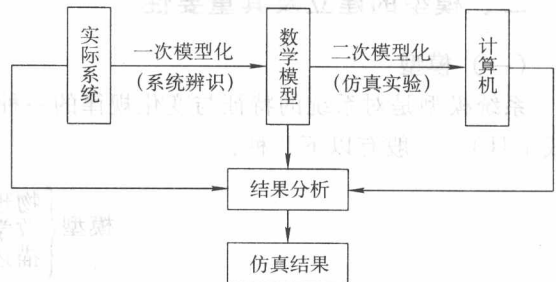


图 1-11 数字仿真的基本内容

第四节 控制系统 CAD 与数字仿真软件

计算机辅助设计 (Computer Aided Design) 技术, 即 CAD 技术是随着计算机技术的发展应运而生的一门应用型技术, 至今已有近 40 年的历史。1989 年, 美国评出了科技领域近 25 年间最杰出的十项工程技术成就, 将 CAD/CAM 技术列为第四项, 称之为“推动了几乎所有设计领域的革命”。

孟子曰: “工欲善其事, 必先利其器”, CAD 技术已成为当今推动技术进步与产品更新换代不可缺少的有力工具。

一、CAD 技术的一般概念

(一) 什么是 CAD 技术

CAD 技术就是将计算机高速而精确的计算能力、大容量存储和处理数据的能力与设计者的综合分析、逻辑判断以及创造性思维结合起来, 用以加快设计进程、缩短设计周期、提高设计质量的技术。

CAD 不是简单地使用计算机代替人工计算、制图等“传统的设计方法”, 而是通过 CAD 系统与设计者之间强有力的“信息交互”作用, 从本质上增强设计人员的想象力与创造力, 从而有效地提高设计者的能力与设计结果的水平。在近 20 年的发展历史中, 汽车制造业的推陈出新、服装加工业的层出不穷以及航空航天领域的卓越成就等, 无不与 CAD 技术的发展有着密切的联系。

因此, CAD 技术中所涉及的“设计”应该是以提高社会生产力水平、加快社会进步为目的的创造性的劳动。

(二) CAD 系统的组成

CAD 系统通常是由应用软件、计算机、外围设备以及设计者本身 (即用户) 组成的, 它们之间的关系如图 1-12 所示。其中, 应用软件是 CAD 系统的“核心”内容, 在不同的设计领域有相应的 CAD 应用软件, 例如, 机械设计中有 Auto CAD 软件, 控制系统设计中有 MATLAB 软件 (及相应工具箱); 计算机是 CAD 技术的“基础”, 随着单机性能的不断提高, CAD 技术将更广泛地为各行业所采用; 外围设备是人-

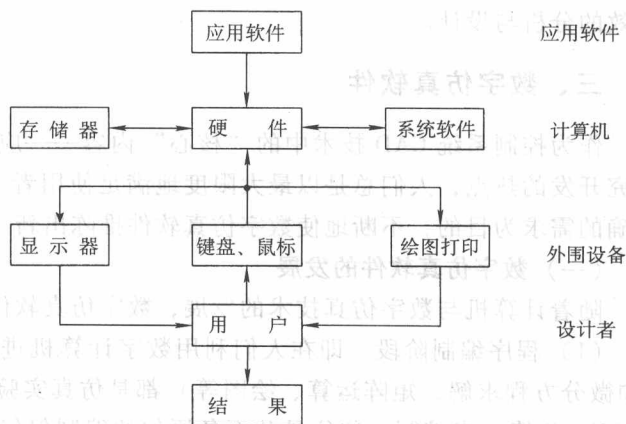


图 1-12 CAD 系统的组成

机信息交换的手段。显示技术与绘图打印技术的不断发展为 CAD 技术提供了丰富多彩的表现形式, 在提高设计者的想象力、创造力以及最终结果的展现等方面具有重要意义。

(三) 怎样面对 CAD 技术

由于 CAD 技术涉及数字仿真、计算方法、显示与绘图以及计算机等诸多内容, 作为