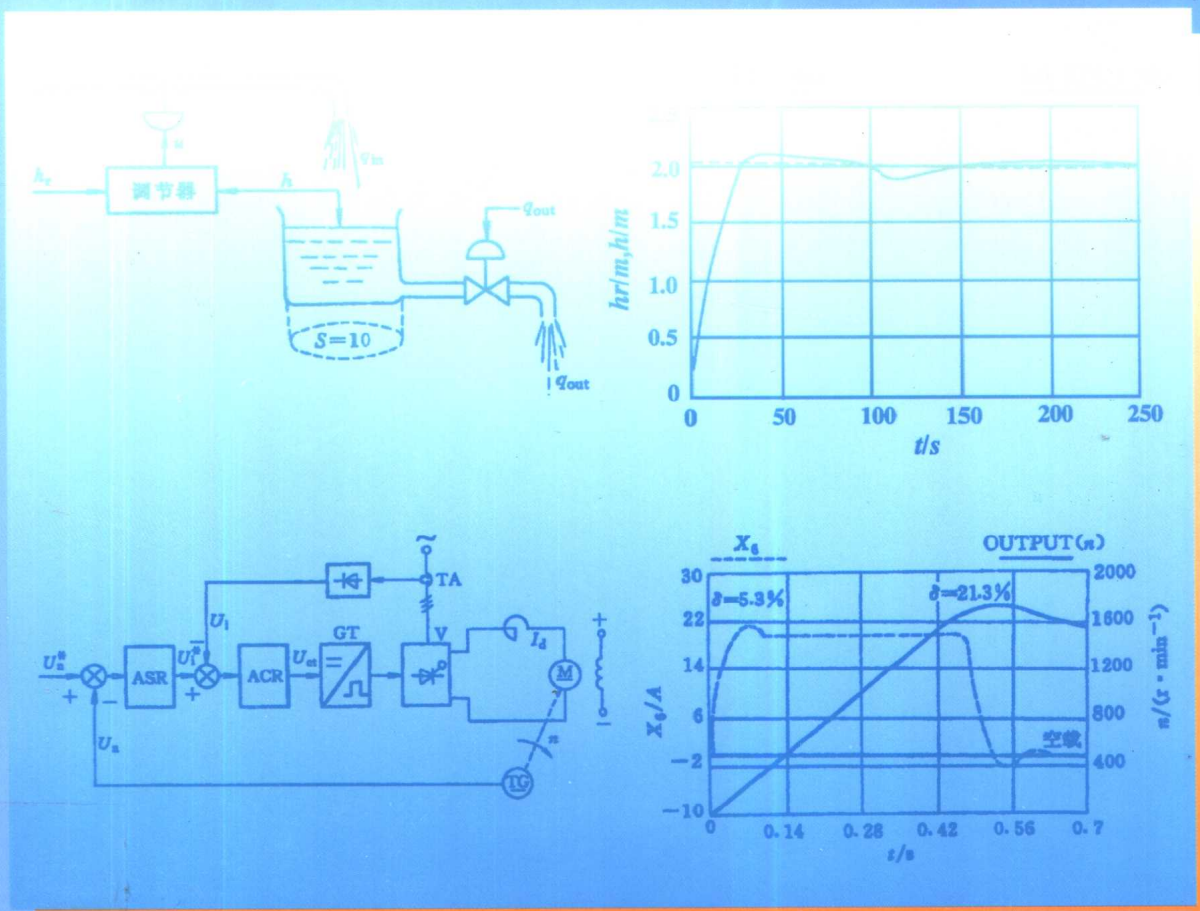


B

普通高等教育机电类规划教材

控制系统 数字仿真与CAD

哈尔滨工业大学 张晓华 主编



(北京)
43



机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

控制系统数字仿真与 CAD

主编 张晓华

参编 王华民

主审 任兴权

机械工业出版社

本书在总结仿真技术发展状况的基础上,以 MATLAB 为平台,系统地阐述了数字仿真的基本概念、原理及方法,概括了控制系统分析与设计中的基本内容。全书共六章,主要包括:控制系统的实验方法、数学描述与模型的建立、MATLAB 与 SIMULINK 基础、数字仿真的实现方法、控制系统 CAD 及综合应用等内容。各章均配适当习题,有助于读者进一步领会与掌握已学过的有关内容。本书系工业自动化专业本科生教材,也可作为自动控制、机电控制、自动化类学科的参考用书。本书为“九五”普通高等教育机电类规划教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统数字仿真与 CAD/张晓华主编. —北京:机械工业出版社, 1999.10

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07093-3

I. 控… II. 张… III. ①控制系统-数字仿真-高等教育-教材 ②控制系统-计算机辅助设计-高等教育-教材 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45918 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:韩雪清 版式设计:霍永明 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·11.5 印张·278 千字

0 001—6 000 册

定价:15.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

近十年来, 仿真技术得到广泛的应用与发展, 在人员培训、目标与环境模拟、系统设计等方面取得丰硕成果, 在以数字计算机及应用软件为基础的数字仿真领域, 以 MATLAB 为代表的优秀系统软件使数字仿真技术进入到一个崭新的阶段。数字仿真与 CAD 技术已成为当今工业自动化专业人员应熟练掌握的基本技能。

为满足教学需要, 全国高等工业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, 经投标与评选, 确定由哈尔滨工业大学张晓华副教授主编该教材, 并请东北大学任兴权教授担任主审。

“控制系统数字仿真与 CAD”涉及到计算机原理、数值分析、自动控制理论以及控制系统设计等诸方面的内容, 是一门综合性与实践性较强的专业课, 灵活地掌握与运用它有助于我们深刻领会已学过的有关课程内容, 为今后的控制系统研究工作提供一个有力的工具。全书在编写过程中注意到以下几点:

1. 内容上适当精简。虽然本课程涉及内容较多, 但其大多数作为高年级的本科生已有所了解(或掌握), 因此本书在力求内容完整、相互联系顺畅的同时, 尽可能减少有关课程中已有明确论述的内容, 突出本课程的特点与问题, 以适应有限学时数的要求。

2. 注重基本概念的理解与基本方法的运用。尽管现今已有多种可直接应用的仿真软件, 但是如何应用得好除了技巧与熟练程度外, 往往还取决于人们对基本概念的理解是否扎实(比如: 步长、数值积分方法、精度等问题); 再者, 已有软件往往不能完全满足我们的需求, 实际工作中还需做必要的程序设计与软件编制工作, 这也需要我们对数字仿真所涉及到的基本概念与方法有深刻的理解和娴熟的运用。

3. 系统建模(即一次模型化)直接影响数字仿真结果的真实性, 应予以充分重视。长期以来, 本门课程过多地强调了数字仿真技术中的“实现问题”与“数值问题”(即二次模型化), 而或多或少地轻视了“建模问题”, 没有形成对从系统建模到结果分析全过程进行综合评判的完整体系, 在相当一部分人中产生了“仿真结果不可信”、“仿真作用不大”等错误认识。尽管本书受到篇幅限制而不能对“建模问题”进行深入讨论, 但始终还是努力通过内容的讲解与实例的分析介绍来说明: 在控制系统分析、设计与实现过程中, 数字仿真技术的切实应用可以起到事半功倍的作用。

4. MATLAB 作为近年来应用广泛、性能卓越的科学计算工具软件已有多种论著予以介绍, 本书受到篇幅限制仅以 MATLAB 及 SIMULINK 为基础工具做初步介绍, 所编入的内容有助于读者对其基本概况、基本性能及一些技巧问题有所认识, 如需作深入了解或进一步提高应用水平, 还需在以后的实际学习与应用中体会、提高。

5. 教、学、用是一个有机的整体。作为数字仿真技术的一个主要应用, 控制系统 CAD 一章系统地阐述了控制系统分析与设计中的有关概念、原理与方法。数字仿真从设计、实现到结果分析的反复应用有助于读者对以往所学内容和新接触问题的理解, 同时也有利于提高他们 MATLAB 的应用水平。

6. 希望本书能够在自动控制原理、计算机控制、自动控制系统及其课程设计等教学环节中起到积极作用。

本书按授课 30 学时编写,其中第五章与第六章中的部分内容可视使用中的具体情况灵活掌握。本书共分六章,其中第一、三、五、六章由哈尔滨工业大学张晓华副教授编写,第二、四章由西安理工大学王华民副教授编写。全书由张晓华主编,任兴权教授主审。

鲍文博士、宋申民博士及陈宏钧博士为本书提供了有关素材及原始资料;在本书的编写与成文过程中始终得到哈尔滨工业大学工业自动化教研室及实验室各位同仁的支持与帮助,在此对他们谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误或不当之处在所难免,殷切期望广大读者批评指正。

编者

1999 年 4 月

目 录

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 2

二、按计算机类型分类 3

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 8

一、CAD技术的一般概念 8

二、控制系统CAD的主要内容 9

三、数字仿真软件 10

第五节 仿真技术的应用与发展 12

一、仿真技术在工程中的应用 12

二、应用仿真技术的重要意义 14

三、仿真技术的发展趋势 14

小结 15

习题 15

第二章 控制系统的数学描述 17

第一节 控制系统的数学模型 17

一、控制系统数学模型的表示形式 17

二、数学模型的转换 19

三、控制系统建模的基本方法 21

第二节 实现问题 25

一、单变量系统的可控标准型实现 25

二、控制系统的数字仿真实现 27

第三节 常微分方程数值解法 28

一、数值求解的基本概念 28

二、数值积分法 29

三、关于数值积分方法的几点讨

论 34

第四节 数值算法中的“病态”问题 37

一、“病态”常微分方程 37

二、控制系统仿真中的“病态”

问题 38

三、“病态”系统的仿真方法 39

小结 40

习题 41

第三章 MATLAB与SIMULINK

基础 43

第一节 引言 43

第二节 MATLAB的操作与使用 44

一、简单数学运算 44

二、变量与数值显示格式 45

三、文件管理 47

四、帮助功能 47

第三节 MATLAB的矩阵运算 49

一、简单矩阵输入 49

二、矩阵运算 50

三、矩阵操作 52

第四节 绘图 54

一、二维图形 54

二、三维图形 55

第五节 数据处理 56

一、矩阵分解 56

二、多项式处理 56

三、曲线拟合与插值 57

四、数据分析 59

五、常微分方程数值解 61

第六节 流程控制 62

一、for循环 62

二、while循环 63

三、if-else-end结构 63

四、函数 63

第七节 控制工具箱 64

一、系统建模 64

二、模型转换和降阶	65	三、控制系统的优化设计	136
三、分析函数	66	第三节 现代控制理论 CAD	141
四、设计函数	67	一、线性二次型最优控制器设计	142
第八节 SIMULINK 基础	67	二、模型参考自适应控制系统设计	146
一、SIMULINK 的操作	67	小结	153
二、模型的构造	69	习题	154
三、数值仿真	72	第六章 数字仿真技术的综合应用	156
四、系统分析	72	第一节 直流电动机双闭环调速系统设计中的若干问题	156
第九节 MATLAB 的其它资源	74	一、双闭环 KZ-D 系统的目的	156
一、工具箱	74	二、关于积分调节器的饱和非线性问题	156
二、网络资源	74	三、关于 ASR 与 ACR 的工程设计问题	157
小结	75	四、双闭环 KZ-D 调速系统的动态分析	159
习题	76	第二节 数字 PID 调节器的鲁棒性设计方法	161
第四章 控制系统数字仿真的实现	78	一、数字 PID 调节器的鲁棒性设计	161
第一节 控制系统的结构及其拓扑描述	78	二、“高精度齿轮量仪”位置伺服系统控制器设计	163
一、控制系统常见的典型结构形式	78	第三节 “水箱系统”液位控制的仿真研究	164
二、控制系统的典型环节描述	79	一、系统建模	165
三、控制系统的联接矩阵	80	二、数字仿真	166
第二节 面向系统结构图的数字仿真	82	三、结果分析	166
一、典型闭环系统的数字仿真	82	第四节 管内移动机器人位置预测模糊控制研究	166
二、复杂联接的闭环系统数字仿真	87	一、管内作业位置的预测模糊控制	167
第三节 环节的离散化与非线性系统的数字仿真	93	二、作业位置预测模糊控制的实现	169
一、连续系统的离散化模型法	93	三、仿真实验	170
二、非线性系统的数字仿真	101	小结	174
第四节 计算机控制系统的数字仿真	109	习题	175
一、采样控制系统的数学描述	110	参考文献	177
二、采样控制系统的仿真方法	113		
三、采样控制系统仿真程序实现	115		
小结	121		
习题	122		
第五章 控制系统 CAD	124		
第一节 概述	124		
第二节 经典控制理论 CAD	125		
一、控制系统固有特性分析	125		
二、控制系统的设计方法	128		

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震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

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

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。

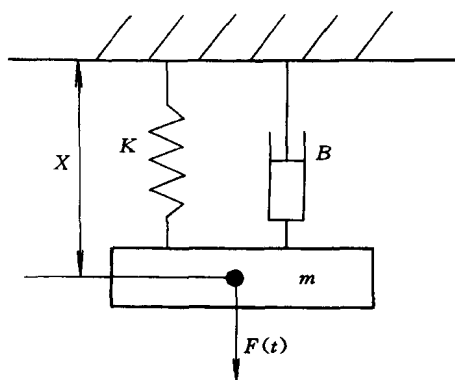


图 1-1 悬挂系统动力学模型

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 给出的是一带传动性能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。

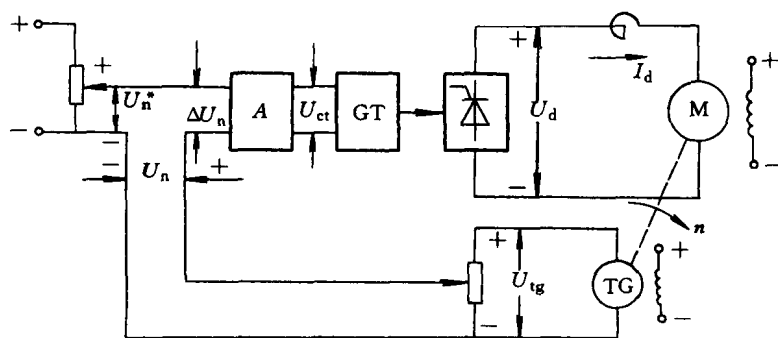


图 1-2 带传动试验机转速控制系统

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。

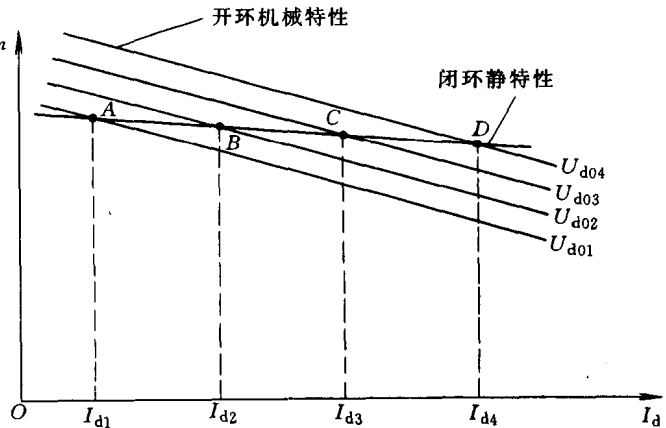


图 1-3 转速控制系统静特性

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，将其置放在“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，然后将其置放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说明之。

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，人们经常把仿真实验中是否有实物介入以及与时间的对应关系作为按模型分类进一步的细化，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。

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

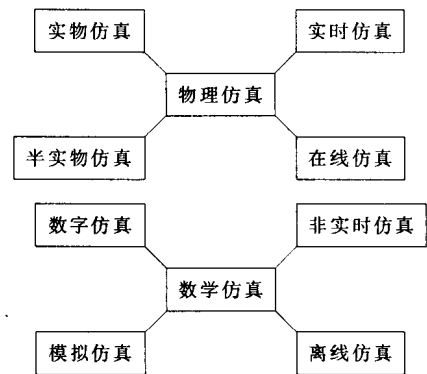


图 1-4 按模型分类的几种情况

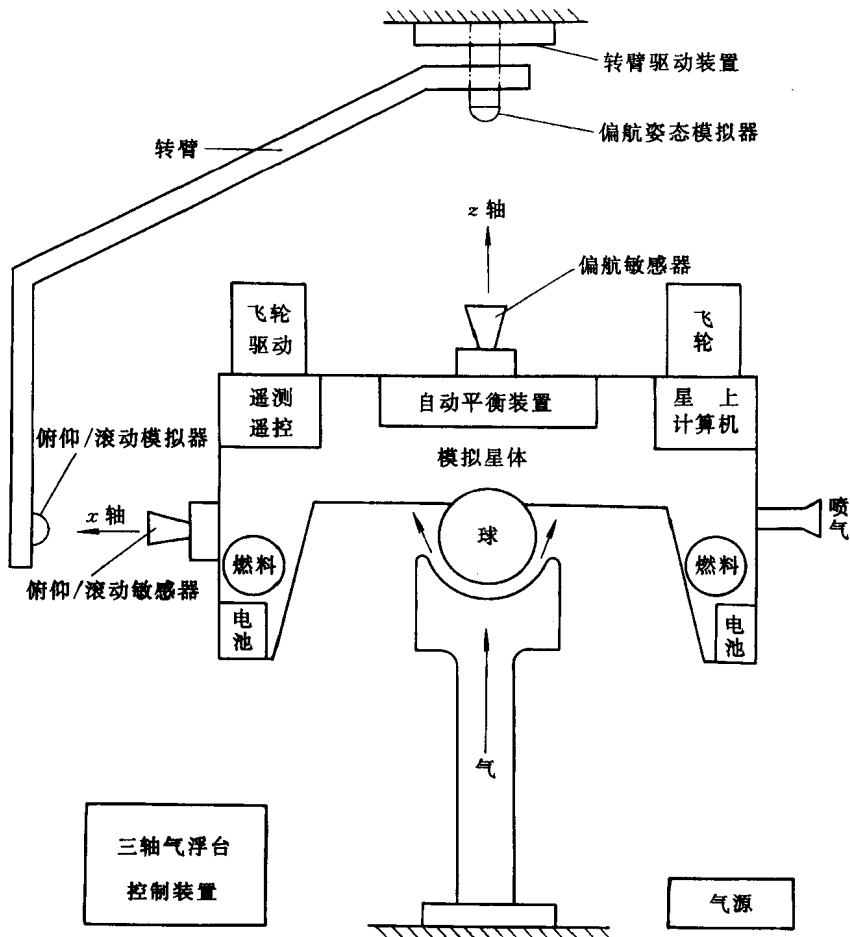


图 1-5 卫星姿态控制的实物仿真系统原理图

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。

例 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作仿真实验。

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, 提高汽车乘座的舒适性。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。
- 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, 其精度不易定得过高。

2) 对计算机控制系统的仿真比较方便。

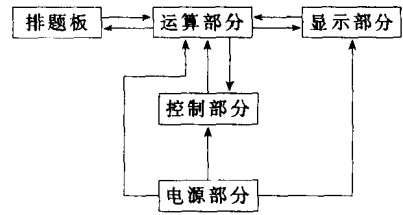


图 1-6 模拟计算机的组成

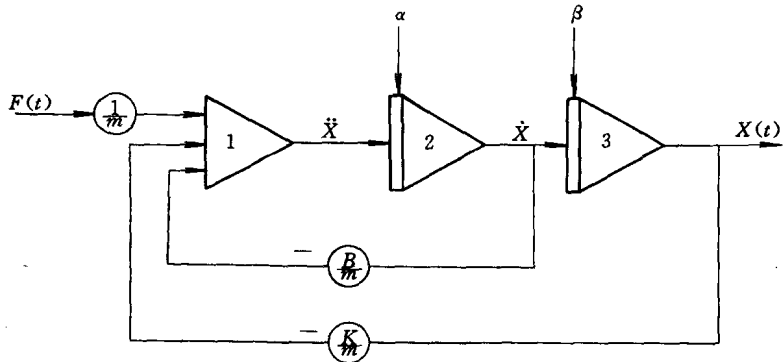


图 1-7 模拟仿真结构图

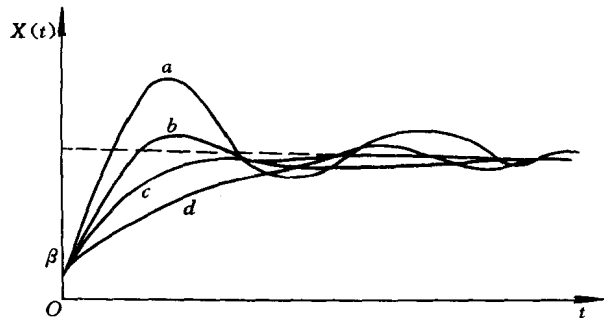


图 1-8 动态仿真结果

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。

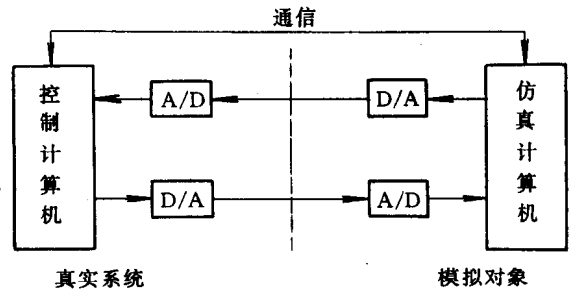


图 1-9 全数字仿真系统原理图

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 机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,这一矛盾问题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 机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径。图 1-10 给出了基于网络技术实现的分布式数字仿真系

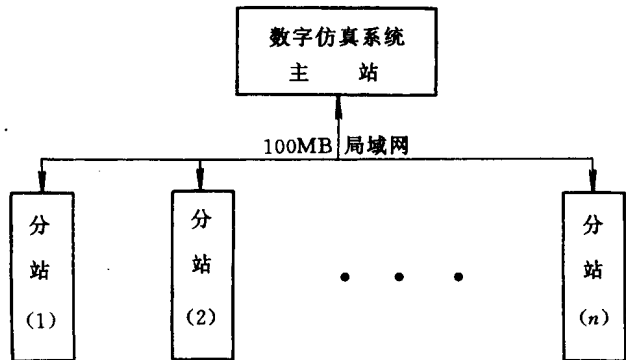


图 1-10 分布式数字仿真系统

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，而成本却相对低得很多，这是一种简便有效的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

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。

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。

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

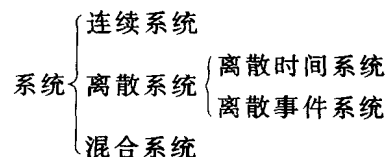
整体性 即系统中的各部分（子系统）不能随意分割。比如任何一个闭环控制系统的组成中，对象、传感器及控制器缺一不可。因此，系统的整体性是一个重要特性，直接影响系统功能与作用。

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。

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。



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：电机速度控制系统、锅炉温度调节系统等。

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。

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。

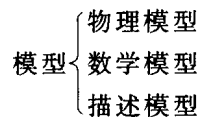
连续离散混合系统 若系统中一部分是连续系统，而另一部分是离散系统，其间有连接环节将两者联系起来，则称之为连续离散混合系统。如计算机控制系统，通常情况下其对象为连续系统，而控制器为离散时间系统。

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）。



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，而只能用语言（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，即若过份追求模型的精确（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如下三个基本活动，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，它还涉及到系统辨识技术问题，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。

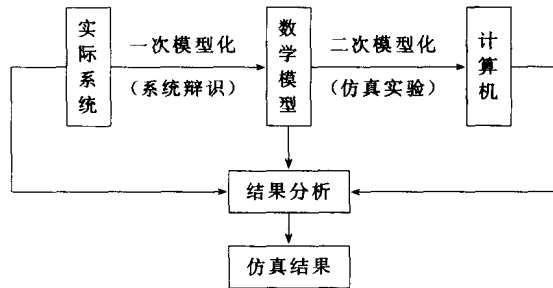


图1-11 数字仿真的基本内容

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。

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的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……，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的水平、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：它是 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：它是 CAD 技术的“基础”，随着单机性能的不断f提高，CAD 技术将更广泛地为各行业所采用。

外围设备：它是人一机信息交换的手段。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 技术涉及到数字仿真、计算方法、显示与绘图以及计算机等诸多内容，作为 CAD 技术的使用者，我们应注意以下几方面的问题：

1) 注重对所涉及内容基本概念的理解与掌握，它是我们今后能够进行创造性思维与逻辑推理的理论基础。

2) 选择数值可靠、性能优越的应用软件作为 CAD 系统的“核心”，以使设计结果具有实际意义。

3) 将理论清晰、概念明确但分析计算复杂的工作交给计算机来做，作为设计者应主要从事具有创造性的设计工作。

控制系统 CAD 作为 CAD 技术在自动控制理论及自动控制系统分析与设计方面的应用分支，是本门课程的另一重要内容。

二、控制系统 CAD 的主要内容

CAD 技术为控制系统的分析与设计开辟了广阔天地，它使得原来被人们认为难以应用的设计方法成为可能。一般认为，控制系统分析与设计方法有两类，即频域法（又称变换法）和时域法（又称状态空间法）。

(一) 频域法

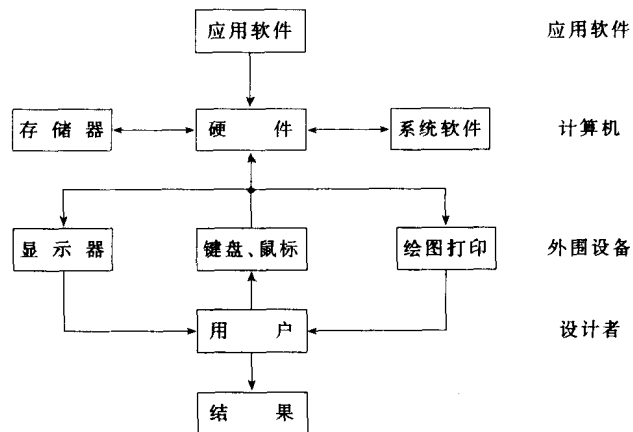


图 1-12 CAD 系统的组成

频域法属经典控制理论范畴,主要适用于单输入单输出系统。频域法借助于传递函数、劳斯判据、波德图、乃氏图及根轨迹等概念与方法来分析系统动态特性和稳态性能,设计系统校正装置的结构,确定最优的装置参数。

(二) 时域法

时域法为现代控制理论内容,适用于多变量系统的分析与设计。其主要内容有:①线性二次型最优控制规律与卡尔曼滤波器的设计;②闭环系统的极点配置;③状态反馈与状态观测器的设计;④系统稳定性、能控性、能观性及灵敏度分析等。

此外,自适应控制、自校正控制以及最优控制等现代控制策略都可利用CAD技术实现有效的分析与设计。

三、数字仿真软件

作为控制系统CAD技术中的“核心”内容——应用软件,数字仿真软件始终为该领域研究开发的热点,人们总是以最大限度地满足使用者(特别是工程技术人员)方便、快捷、精确的需求为目的,不断地使数字仿真软件推陈出新。

(一) 数字仿真软件的发展

随着计算机与数字仿真技术的发展,数字仿真软件经历了以下四个阶段:

(1) 程序编制阶段 即在人们利用数字计算机进行仿真实验的初级阶段时,所有问题(如微分方程求解、矩阵运算、绘图等)都是仿真实验者用高级算法语言(如BASIC、FORTRAN、C等)来编写。往往是几百条语句的编制仅仅解决了一个“矩阵求逆”一类的基础问题,人们大量的精力不是放在研究“系统问题”如何,而是过多地研究软件如何编制、其数值稳定性如何等旁支问题,其结果使得仿真工作的效率较低,数字仿真技术难以为众人所广泛应用。

(2) 程序软件包阶段 针对“程序编制阶段”所存在的问题,许多系统仿真技术的研究人员将他们编制的数值计算与分析程序以“子程序”的形式集中起来形成了“应用子程序库”,又称为“应用软件包”(以便仿真实验者在程序编制时调用)。这一阶段中的许多成果为数字仿真技术的应用奠定了基础,但还是存在着使用不便、调用繁琐、专业性要求过强、可信度低等问题,人们已开始认识到,建立具有专业化与规格化的高效率的“仿真语言”是十分必要的,以使数字仿真技术真正成为一种实用化的工具。

(3) 交互式语言阶段 从人-机之间信息交换便利的角度出发,将数字仿真所涉及到的问题上升到“语言”的高度所进行的软件集成,其结果就产生了交互式的“仿真语言”。仿真语言与普通高级算法语言(如C、FORTRAN等)的关系就如同C语言与汇编语言的关系一样,人们在用C语言在进行乘(或除)法运算时不必去深入考虑乘法是如何实现的(已有专业人员周密处理之);同样,仿真语言可用一条指令实现“系统特征值的求取”,而不必考虑是用什么算法以及如何实现等低级问题。

当今具有代表性的仿真语言有:瑞典Lund工学院的SIMNON仿真语言、IBM公司的CSMP仿真语言以及ACSL、TSIM、ESL等。80年代初,由美国学者Cleve Moler等人推出的交互式MATLAB语言以它独特的构思与卓越的性能为控制理论界所重视,现已成为控制系统CAD领域最为普及与流行的应用软件。

(4) 模型化图形组态阶段 尽管仿真语言将人-机界面提高到“语言”的高度,但是对于从事控制系统设计的专业技术人员来讲还是有许多不便,他们似乎对基于模型的图形化