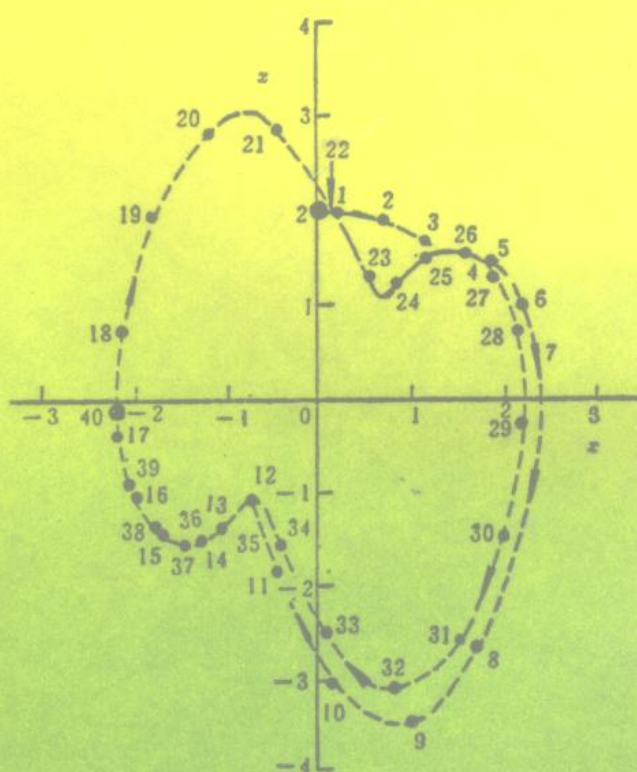




高等学校 规划教材  
工科电子类

# 系统辨识与仿真

曾广达



电子科技大学出版社

N94

Z040

441093

# 系统辨识与仿真

曾广达

电子科技大学出版社

• 1995 •

[川] 新登字 016 号

## 内 容 简 介

系统辨识与数字仿真是系统理论中两个内容丰富、发展迅速的重要分支。由于两者在理论、方法与主要手段上有着许多共通与兼容的部分,本书对这两大分支进行了综合性的讨论。前三章介绍了这两大领域的数学模型、模型转换、一般概念和实际考虑。第四章至第六章主要介绍了最小二乘法及其对开环与闭环系统的参数模型辨识。第七章至第九章主要介绍了连续时间系统与离散事件系统的数字仿真。第十章至第十一章介绍了方波脉冲变换法及其用于系统辨识与数字仿真。第十二章介绍模型的适效性和模型检验。

本书可作为工科院校与系统理论有关的许多专业高年级及研究生的选修课教材。对于从事系统分析、系统仿真、系统辨识与系统工程的科学研究与工程技术人员,亦不失为一本简明的参考书。

DL29/22

## 系统辨识与仿真

曾广达

\*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段四号) 邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

新华书店经销

\*

开本 787×1092 1/16 印张 14.625 字数 352 千字

版次 1995 年 6 月第一版 印次 1995 年 6 月第一次印刷

印数 1—1200 册

ISBN 7-81043-106-4/TN·10

定价: 8.65 元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部  
电子类专业教材办公室

# 前言

系统辨识与系统仿真是当代系统理论和控制理论中发展十分迅速而活跃且成果卓著的两大重要分支。它们都是伴随着数值计算方法与电子计算机的长足进步和广泛应用所发展起来的,而且在工程技术中均得到了广泛的应用。

当前,这两大分支独自发展、各成体系,它们彼此所涉及的理论基础和技术领域极为广泛,它们彼此的内容又相当丰富。就系统而言,其本身就是一个极大的内涵。连续时间系统的理论和方法颇为成熟;但离散事件系统的研究热潮,国内外还是近十来年的事,发展势头看涨,但很不成熟。就辨识而言,以数值计算为基础的经典辨识理论和技术颇为成熟,但带有智能性的新一代辨识,又正在萌芽生长。就仿真而言,有数学仿真、物理仿真和混合仿真等等;而数学仿真中又有数字仿真、模拟仿真和混合仿真等;但数字仿真,在当前受到了世人的普遍关注,故本书仅介绍数字仿真。

尽管这两大分支独自发展、各成体系,但彼此之间在理论、方法和手段上有着许多共同性、共通性和相互兼容之处。如它们彼此都是基于系统的数学模型和对模型的适效检验;都要借助计算机,特别是数字计算机为主要研究手段;它们都存在着一个建模与模型的离散数值化;它们均需要使用计算语言、编制或调用现成的计算程序,在计算机上运行操作,并对结果分析研究;它们均存在一个对输入信号的要求,对数值计算方法的选用及方法本身性能的要求等等。同时,它们彼此间还存在着一个相互利用、互相补偿的问题。正是基于上述种种的共通性与兼容性,因此,本书对该两大学科进行了有机的综合,阐明它们之间的共性、个性及内在联系与互相关系,能使读者收到事半功倍、触类旁通的效果,这也正是本书的主要特色与价值之所在。

诚然,正如上述,试图在规定的字数内全面而系统地介绍这两大领域是一件不可能的事情,这也给本书的内容编排与选择带来了极大的难度。基于此,编者不得不忍痛割爱而择其主要的、常用的、易于理解掌握的基本理论、基本方法及应用中的实际考虑,作一种概要的和引导性的阐述;只能对较为成熟的理论和方法作主要的介绍,同时也兼顾到该两大分支当前发展的动向,以帮助读者具备一个基础去进入这两大“宏伟殿堂”。至于程序、语言,由于所用计算机型号不同,辨识与数字仿真所用的方法不同,以及计算语言的不断发展和更新,加之对本书篇幅的限制,书中基本上未多涉及。编者认为,在充分理解该两大学科的基本原理和基本方法后,对于具有计算机编程能力的读者来说,独立地编写或调用现有的某些算法的程序,并不是一件困难的事情。

考虑到本书是一种教材,故在叙述上注意到了语言的通顺与流畅、内容的精炼、编排上的循序渐进。作为教材而言,考虑到当代对人才素质的多方面要求,在内容的选取上,除了更多的面向工程技术领域外,还顾及了一些非工程技术领域,如经济、管理等方面所需的基本内容。如离散事件动态系统及系统动力学方面内容的引入,正是基于这种考虑。

本书前三章主要是介绍系统辨识与数字仿真的有关基本概念,实际使用中的一些考虑,以及常用的一些数学模型和模型转换方法。由于篇幅的限制和基于最小二乘辨识法的基本

性、重要性及其实用性,本书主要介绍了基本最小二乘法及由其繁衍出来的一系列最小二乘法。第四章至第六章介绍了利用最小二乘法来辨识开环与闭环系统。第七章至第九章主要介绍了连续时间系统、离散事件动态系统、以及系统动力学模型的仿真。离散事件动态系统中,主要介绍了较为成熟的逻辑层次建模与仿真,特别是有限自动化模型。第十至第十一章系统介绍了一种新近发展起来的、并由编者首次提出的新型的数值变换方法——方波脉冲变换法,并介绍采用该变换技术辨识与仿真线性与非线性系统、时变与定常系统、延时与非延时系统。由于该法结构简单、编程容易、运算快捷、易于调整、精度较高、适用范围宽广等一系列无可比拟的优点,越来越受到国内外的普遍重视与广泛应用。最后一章讨论了模型的适效性和模型检验。书后所附参考书目,既是编写本书的主要依据,也为引导读者进入系统辨识与数字仿真这两大领域提供一个索引。

由于本书是综合系统辨识与数字仿真这两大领域的第一次尝试,国内外无可借鉴,加之编者水平所限,错误与不妥之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。特别是这两大领域结构庞大、内容丰富、发展迅速,书中挂一漏万是所必然,敬希广大读者谅解。

本书承武汉工业大学韩光文教授主审,武汉大学张肃文教授给予作者和本书极大的鼓励、支持和指导。他们对本书初稿提出了许多宝贵的建议与修改意见。武汉大学空间物理与电子信息系党政领导给予了作者及本书的支持。在此,编者谨向他们致以衷心的感谢。

编 者

1994年春于武汉、珞珈山

# 目 录

## 第一章 概论

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| § 1-1 系统、实体和模型 .....        | 1  |
| § 1-2 数学模型 .....            | 2  |
| § 1-3 关于系统辨识 .....          | 2  |
| § 1-4 关于系统仿真 .....          | 3  |
| § 1-5 辨识与仿真、数字仿真与数值计算 ..... | 5  |
| § 1-6 关于误差、噪声 .....         | 5  |
| § 1-7 误差准则和辨识方法的分类 .....    | 8  |
| § 1-8 关于精度 .....            | 10 |
| § 1-9 可辨识性 .....            | 11 |
| § 1-10 关于输入信号 .....         | 12 |
| § 1-11 关于采样步长 .....         | 13 |

## 第二章 系统的数学模型

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| § 2-1 模型要素及模型分类 .....         | 15 |
| § 2-2 确定型线性连续时间模型 .....       | 16 |
| § 2-3 随机系统或随机过程 .....         | 19 |
| § 2-4 实现问题和模型的等效变换 .....      | 24 |
| § 2-5 弱非线性系统的一种数学模型及其解法 ..... | 27 |
| § 2-6 某些强非线性系统的数学模型 .....     | 30 |

## 第三章 模型转换和离散时间模型

|                            |    |
|----------------------------|----|
| § 3-1 置换法 .....            | 35 |
| § 3-2 离散相似法 .....          | 37 |
| § 3-3 连续时间状态方程的离散化近似 ..... | 41 |
| § 3-4 数值积分法 .....          | 42 |
| § 3-5 确定型线性系统的离散时间模型 ..... | 44 |
| § 3-6 随机型线性离散时间系统 .....    | 44 |

## 第四章 最小二乘辨识法

|                       |    |
|-----------------------|----|
| § 4-1 概述 .....        | 49 |
| § 4-2 最小二乘法 .....     | 50 |
| § 4-3 广义逆矩阵理论简介 ..... | 52 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| § 4-4 增加采样数据的递推最小二乘法 ..... | 57 |
| § 4-5 增加参数个数的递推最小二乘法 ..... | 59 |
| § 4-6 增广最小二乘法 .....        | 60 |
| § 4-7 最小二乘法的统计特性 .....     | 61 |
| § 4-8 辅助变量法 .....          | 62 |

## 第五章 离散时间系统的参数模型辨识

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| § 5-1 线性非移变系统 .....            | 64 |
| § 5-2 随机系统的参数模型辨识 .....        | 68 |
| § 5-3 多级最小二乘辨识法 .....          | 70 |
| § 5-4 时变系统的参数辨识 .....          | 72 |
| § 5-5 非线性离散时间系统的辨识 .....       | 73 |
| § 5-6 相关最小二乘辨识法 .....          | 75 |
| § 5-7 状态方程描述下系统的可控性与可观测性 ..... | 80 |
| § 5-8 开环系统的可辨识性 .....          | 81 |
| § 5-9 系统辨识中的一些实际考虑 .....       | 84 |
| § 5-10 辨识中常用的激励信号 .....        | 88 |
| § 5-11 最小二乘法与其他辨识方法间的关系 .....  | 93 |
| § 5-12 新一代的辨识与控制 .....         | 95 |

## 第六章 闭环系统辨识

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| § 6-1 引言 .....                     | 98  |
| § 6-2 判明系统是否存在反馈的方法 .....          | 98  |
| § 6-3 闭环系统的可辨识性概念 .....            | 102 |
| § 6-4 辨识方法与可辨识性条件 .....            | 104 |
| § 6-5 最小二乘法和辅助变量法在闭环系统辨识中的应用 ..... | 108 |

## 第七章 确定性连续时间系统的数字仿真

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 7-1 应用数值积分法的系统仿真 .....      | 111 |
| § 7-2 双线性置换法的系统仿真 .....       | 116 |
| § 7-3 离散相似法的系统仿真 .....        | 118 |
| § 7-4 增广矩阵法的系统仿真 .....        | 120 |
| § 7-5 面向系统结构图的数字仿真 .....      | 122 |
| § 7-6 非线性系统仿真 .....           | 123 |
| § 7-7 关于非线性系统仿真中的几个理论问题 ..... | 127 |

## 第八章 工程和非工程系统动力学模型及数字仿真

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 8-1 系统动力学及其基本模型 ..... | 131 |
| § 8-2 系统动力学框图 .....     | 134 |



|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| § 8-3 社会经济系统举例 .....                      | 137 |
| § 8-4 生物系统举例 .....                        | 139 |
| § 8-5 世界动力学系统举例 .....                     | 140 |
| <b>第九章 离散事件动态系统及其仿真法</b>                  |     |
| § 9-1 离散事件系统仿真中概率的概念 .....                | 143 |
| § 9-2 离散事件动态系统仿真模型的建立方法 .....             | 144 |
| § 9-3 离散事件系统仿真模型举例 .....                  | 146 |
| § 9-4 流程管理 .....                          | 152 |
| § 9-5 输出函数的确定 .....                       | 155 |
| § 9-6 模型的有限自动机化 .....                     | 156 |
| § 9-7 机修车间仿真实例 .....                      | 159 |
| § 9-8 离散事件动态系统理论的现况与展望 .....              | 163 |
| <b>第十章 方波脉冲函数和方波脉冲变换</b>                  |     |
| § 10-1 方波脉冲函数的定义及主要性质 .....               | 165 |
| § 10-2 方波脉冲函数的几个重要运算性质 .....              | 166 |
| § 10-3 函数的方波脉冲展开和方波脉冲变换 .....             | 166 |
| § 10-4 基本运算环节的方波脉冲变换 .....                | 167 |
| § 10-5 方波脉冲变换与 Laplace 变换、Z 变换间的关系 .....  | 172 |
| § 10-6 关于标度换算 .....                       | 173 |
| § 10-7 由矩阵函数理论求 $S$ 的整幂、分幂和超越函数 .....     | 174 |
| § 10-8 方波脉冲技术的误差分析 .....                  | 177 |
| <b>第十一章 系统辨识与数字仿真中的方波脉冲变换法</b>            |     |
| § 11-1 线性连续时间模型的方波脉冲变换及其仿真 .....          | 179 |
| § 11-2 非线性动态系统的方波脉冲变换及其仿真 .....           | 184 |
| § 11-3 含延时的动态系统的方波脉冲仿真 .....              | 187 |
| § 11-4 由算子 $S$ 的分数幂及超越函数所描述的系统分析与仿真 ..... | 190 |
| § 11-5 分段恒定信号的低通滤波 .....                  | 193 |
| § 11-6 线性定常系统的参数模型辨识 .....                | 194 |
| § 11-7 一类非线性连续时间系统数学模型的辨识法 .....          | 196 |
| § 11-8 双线性系统的辨识 .....                     | 199 |
| § 11-9 高阶线性定常模型的低阶简化 .....                | 203 |
| § 11-10 相关函数的方波脉冲变换和相关辨识 .....            | 206 |
| § 11-11 线性系统的方框图仿真 .....                  | 210 |
| <b>第十二章 模型的适效性与模型检验</b>                   |     |
| § 12-1 概述 .....                           | 212 |

|              |                   |     |
|--------------|-------------------|-----|
| § 12-2       | 计算程序的核实 .....     | 212 |
| § 12-3       | 关于适效的一般观点 .....   | 213 |
| § 12-4       | 适效的三步法 .....      | 213 |
| § 12-5       | 模型的自相关函数检验法 ..... | 214 |
| § 12-6       | 周期图检验法 .....      | 216 |
| § 12-7       | 置信区间法 .....       | 219 |
| § 12-8       | 分批均值法 .....       | 222 |
| 主要参考文献 ..... |                   | 223 |

# 第一章 概 论

## § 1-1 系统、实体和模型

### 一、系统

当代,可以说,系统是一个泛名词。一切事物、事件、过程和所研究的对象,均可说成是系统。

所谓“系统”,是指由互相作用和互相依赖的部分所组成、且具有特定功能的有机整体。因此,系统具有如下的基本特征:组合性、关联性、目的性和环境适应性。

系统可分为社会系统和自然系统,自然系统中又可分为工程系统和非工程系统。我们主要是研究工程系统。

### 二、实体

一切客观存在的事物、事件、过程、对象及其运动形态等等,均可称为实体或系统的实体。

实体具有数不清的层次和特征,能反映实体的一切特征和运动规律的东西,只能是实体本身。因此,当我们用许多方法来研究系统时,最终均应该用系统的实体来加以检验。

### 三、模型

在科学研究中,为了更好、更方便地研究复杂实体的特征,普遍采用的一种富有成效的方法就是模型法。

所谓“模型”,是指对实体特征及其运动规律的一种表示或抽象。它是适当简化了的实体的代表。

模型不同于实体。模型是系统实体本质方面的表达形式,且是取适于人们需要的一种形式,以便于人们分析和处理。

正确建立起来的模型能更深刻、更集中地反映实体的主要特征和运动规律,从而达到对实体的抽象。从这一点上说,模型更优于实体。

模型是认识系统、研究系统的一种手段或工具。因此,模型的形式应适合应用的目的。相对于被模型化了的实体而言,模型的结构应当比较简单,这是建模的一个重要特点。

模型有物理模型和数学模型之分。物理模型是指由物理器件组构起来的一种具有与实体相似的物理性质的模型。如按比例缩小了的实体外形或实体样机。采用数学描述形式表示实体内部变量的关系和规律的模型,称之为数学模型。由于计算机的迅速发展和广泛应用,数学模型越来越受到重视和广泛应用。

系统分析也好,亦或系统辨识、仿真、决策、预报等等,主要是建立在对数学模型的

研究上。

## § 1-2 数 学 模 型

数学模型的建立主要有两大途径：一是演绎法或分析法，二是归纳法。前者又称为机理模型，后者又称为经验模型。两者又可结合使用。

所谓分析法，是指通过对系统本身机理的分析，从理论上导出系统的数学模型。

所谓归纳法，是指对一个已存在系统的观察、测量，根据验前信息和大量的输入/输出数据，推断出所研究实体的数学模型的方法。后一种方法也就是所谓系统辨识法。

一般而言，数学模型有三大要素，即类型、结构和参数。是随机性的还是确定性的，是集中参数型的还是分布参数型的，是线性的还是非线性的，是时变的还是时不变的，是动态的还是静态的，是 $t$ -域的还是 $\omega$ -域的，是连续时间的还是离散时间的等等，属于模型类型问题。所谓模型结构是指：当数学模型采用参数模型时，如代数方程、微分方程、差分方程、网络函数、状态模型等表征时，是指方程的阶次；当用非参数模型表征时，则指其脉冲响应、阶跃响应、状态转移矩阵等等。而模型参数是易于理解的，如方程中的系数、状态模型中系数矩阵的元素等等。

无论是分析法还是辨识法建立系统的数学模型，应该尽可能多地作到对系统实体的了解。例如：(1) 系统成分和各成分间的连结方式和有关定理或规律。(2) 试验中，系统是否存在非线性效应及其类型，以及系统是否为时变的。(3) 系统响应是否有延时现象。(4) 系统过渡过程时间的长短，或主要时间常数的大小。(5) 系统参数的范围。(6) 系统所允许的输入信号的幅值。(7) 系统干扰或噪声的特性，以及噪声与输入或输出间是否相关等等。这些知识认识得越多，建模就越简易、越有效。这些知识统称为验前信息。

通常，人们不可能一下子对实体认识得很全面、很深刻，因此，建模是一个不断建立、不断修改、不断完善的过程。

此外，建立数学模型时，一般需遵循如下基本原则：目的性——明确建模目的。实在性——模型的物理概念要明确。可辨识性、最简性——描述动态系统基本特性的模型应具有尽可能少的待识参数。

## § 1-3 关于系统辨识

系统辨识 (System identification) 可定义为：根据系统的输入-输出数据 (I/O 特性)，从给定的模型类中寻找与所研究的系统等价的模型。或简言之，系统辨识就是利用系统的 I/O 数据建立系统最优数学模型的理论和方法。

根据这个定义，在系统辨识中必须确定三方面的问题：第一，必须指定一类系统。即根据验前信息确定系统模型的类型。第二，必须规定一类输入信号。例如正弦信号、阶跃信号、脉冲信号、白噪声、伪随机信号等。而且这些信号从时域考虑，必须能持续地激励系统的所有模态；从频域考察，输入信号的频带能复盖系统的频带宽度。第三，必须规定“系统等价”的含义及其度量准则。

由以上定义可以看出，系统辨识问题的提法有相当大的自由度。这种自由度表现在模

型类型的选择、输入信号的选择和评价准则的选择上。而这些选择很大程度上取决于辨识的目的、模型的最终用途，也与验前所得知识有关。

由于系统的数学模型是一个表示输入和输出关系的数学表达式。为此，可以利用各种输入信号去激励系统，并测量出其输出，通常这些输入、输出数据都为噪声所污染，辨识技术就是通过处理这样的数据而获得模型的。图 1-1 概略地展示了数据的采集、转换和辨识，直至获得描述系统的数学模型。图中，方框 M 为测量仪器。

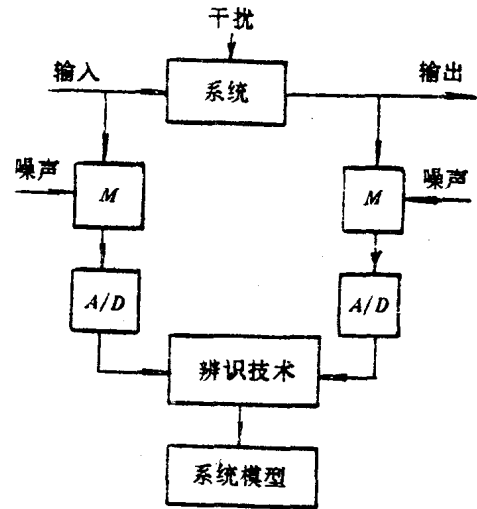


图 1-1

系统辨识的内容包括试验设计、模型结构的确定、参数估计和模型验证等基本环节。

试验设计：在这一步中，除选择感兴趣的输入和输出变量外，还需选择合适的试验信号和确定此信号的参数。

模型结构选择：基本上取决于模型的使用目的和有关的验前信息。从而使模型对系统产生之数据有最好的拟合精度。

参数估计：采用离线辨识时，计算是一次性地成批处理收集到的全部数据；而采用在线辨识时，数据的处理则采用实时的方式，即采用递推算法。

输入-输出数据：可以是外施激励信号作用下的测量值；也可以是系统正常工作时的运行数据。

模型验证：对象和模型的等价性是通过引入评价函数定义的。对某种相同的输入  $u(t)$ ，若实际系统的输出为  $y(t)$ ，模型  $M$  的输出为  $y_m(t)$  时，普遍采用的评价函数是

$$V = V(y, y_m) = \int_0^T l(y(t), y_m(t)) dt \quad T > 0 \quad (1-3-1)$$

式中， $l$  为损失函数，是  $y(t)$  与  $y_m(t)$  偏差的非负标量函数。在给定的模型类中，当模型  $M_0$  使评价函数最小时，定义  $M_0$  与对象等价。因此，辨识就是求评价函数最小的模型  $M_0$  的最优化问题。若模型类采用参数模型描述时，辨识就归结为参数最优化问题。

系统辨识是当前发展很活跃很迅速的学科之一。它和最优控制、自适应控制一样，成为现代控制理论的主要支柱之一，同样也是信号处理技术的重要基础。它在各种需要对系统/信号建立定量数学模型的领域中得到广泛的应用。特别是，系统辨识的进展与微处理机出色成果相结合，为实时辨识提供了廉价而有效的手段。

## § 1-4 关于系统仿真

系统仿真 (System Simulation) 可定义为：利用模型代替实际系统进行实验和研究。由于模型可分为物理的、数学的两大类，故仿真可分为物理仿真 (模拟)、数学仿真，以及介于两者的半物理仿真。在数学仿真中，主要是采用计算机为主要手段。由于计算机分模拟的、数字的、混合的三类，故数学仿真也分为相应的三大类。

仿真所遵循的基本原理是相似性原理,即几何相似、环境相似、性能相似或数学相似,特别是数学的相似性。它可以根据这种相似性,采用最易于组构、最熟悉的方法来仿真被研究的实际系统,从而可用一种手段来研究各种各样的实际系统。

由于仿真所涉及的范围如此宽广,且各有其各自的理论、技术和方法,在这本篇幅极其有限的教材中来系统、全面地介绍仿真,是不可能的。因此本书主要介绍数字仿真,且仅介绍数字仿真的基本理论和方法。余下的问题只能让读者去参考有关专著。

另一个理由在于,数学仿真,即计算机仿真能为许多实验提供方便的、灵活的“活的数学模型”,因此凡是可用模型进行实验的,几乎都可以用计算机仿真来研究各种被仿真系统。所以,随着计算技术的发展,数学仿真越来越多地取代纯物理仿真,它在各方面得到了极广泛的应用。在数学仿真中,模拟仿真和数字仿真相比较,从仿真速度、仿真精度、仿真功能、仿真的逼真程度以及仿真的方便性来看,虽各有其优缺点,但总体而言,当前,数字计算机要优于模拟计算机。现在,数字计算机越来越普及,数字仿真也将普及到每个工程技术人员。基于这个理由,本书只介绍数字计算机仿真,即数字仿真。

数字仿真技术的内容主要包括以下三个方面:

1. 数字仿真方法的研究 在建立了系统数学模型之后,问题是采用什么算法来进行系统仿真。由于大量实际系统在本质上总是连续的,而数字计算机通常不能接受连续的数学模型,因此需将连续模型离散——数值化。当前可有数值积分法和离散相似法两大类。其中牵涉到方法的稳定性、收敛性、精度和计算量等等。

2. 数字仿真程序和仿真语言的开发 数字仿真和数值计算不同,前者要求体现出“在模型上进行试验”这个含义。它要求仿真时试验者如同在真实系统上试验那样,能方便观察系统的性能、品质、过程,并能方便地改变或调整参数。这与一般的数值计算的要求与程序不同,故需研究编制适应多种要求的程序与语言。好在软件工作人员已为仿真试验者提供许多适用而方便的软件包。

3. 研究专用的数字仿真的数字计算机系统特别是全数字式的并行运算的数字计算机,以便用于大系统的仿真。

从仿真技术看,仿真可分为三个主要阶段,即模型建立、模型变换和模型试验。具体而言,仿真需经过如下七步:

1. 系统定义 根据仿真目的确定所研究系统的边界、初始和约束条件。

2. 模型建立 将实际系统抽象成数学公式或流程图。

3. 模型变换 即将数学模型转换成计算机能接受的仿真模型。

4. 设计仿真试验 即输入什么信号、改变那些参数,记录什么结果等。

5. 模型装载 即将模型编制一套仿真程序输入给计算机。

6. 仿真实验 即对模型进行各种规定的试验。

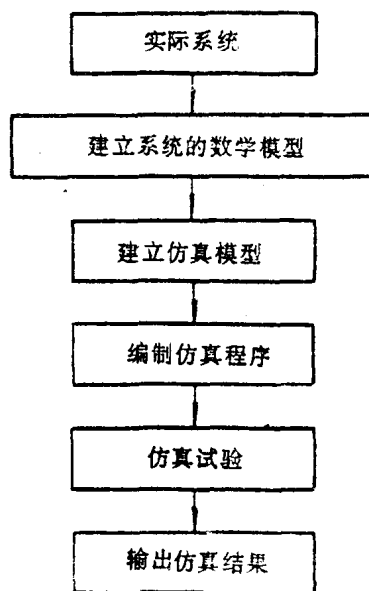


图 1-2 仿真过程

7. 仿真报告 即对仿真结果进行分析、研究、整理等等。

仿真过程如图 1-2 所示。

## § 1-5 辨识与仿真、数字仿真与数值计算

### 一、辨识与数字仿真

辨识与数字仿真是当代系统科学中发展迅速、应用广泛且富有成果的两个分支学科,而且均是源于计算机技术的长足进步而发展起来的。从定义看,它们各有其界定的范围和内容;虽有其区别,但它们之间有许多共通和互为复盖的内容、方法与手段。

1. 它们都是对实际系统的研究,进一步说,它们都是基于对系统模型的研究。

2. 它们都是采用计算机,特别是数字计算机为主要手段。

3. 为能使用数字计算机,它们都存在模型的离散——数值化、计算机程序和语言、上机操作等方面的共同知识、方法和技能。

4. 系统辨识是建模,即根据实际系统的输入-输出数据来建立一个系统的最佳模型。系统仿真即是根据实际系统的数学模型,由输入信号计算、研究系统的输出及各种性能。系统的数学模型是仿真的依据和基础,虽然辨识只是建模方法中的一种,却又是工程系统建模中比较重要的手段之一。所以说,系统辨识是系统仿真中的一种重要的依据和手段。而系统的辨识建模又是借助计算机仿真,例如对模型结构选择,参数最佳拟合与模型校验等的大量计算工作都是通过仿真程序反复计算,最后达到满意的结果。因此,系统仿真又是系统辨识建模的工具和手段。

本书将辨识与仿真集于一体,正是基于上述考虑。

### 二、数字仿真与数值计算

通常,对数值计算与数字仿真并未加以严格的区分,实质上也难以截然分开。它们的区别仅在大概概念与小概念之分,即系统数字仿真是个大概概念、大集合,是“一揽子工程”;而数值计算是其中的一个局部、是大集合中的一个小集合。如果定义数字仿真是用数字计算机对数学模型的实验研究,那么,数值计算则是利用数字计算机对数学模型进行数值计算与分析。前者必然内包含了数值计算,后者必然内含分析研究。诚然,仿真技术还包括仿真语言、仿真程序和仿真计算机的研究,但它与数值计算之间存在着许多共通之处。它们在理论基础、处理方法、所用手段上有着许多共同的东西。因此,在许多著作与论文中,对两者并未加以严格而明确的区分,这是可以理解的。而且通过对熟悉的数值计算去理解与掌握数字仿真,这对读者将是大有裨益的。这就是此处讨论数字仿真与数值计算的原因与目的之所在。

## § 1-6 关于误差、噪声

在数字仿真与系统辨识中,主要存在如下几类误差:其一是舍入误差。由于计算机的字长有限,数字不能表示得完全精确,在计算过程中不可避免地会产生舍入误差。舍入误

差与计算步长  $h$  成反比。若计算步长小, 计算字数多, 则舍入误差大。此外, 舍入误差还与计算机所使用的数字系统, 数的运算次序以及计算函数的子程序的精确度等有关。但若适当选择计算机字长、进行浮点和双精度运算, 仿真计算的精度可达千万分之一到百万分之一。其二是截断误差。这是与模型离散化及所采用的计算方法有关。例如在后面的连续系统的离散化时, 以台劳级数展开式进行近似离散时, 若  $y(t_0)$  是准确的, 则在  $t_{0+1}$  处的精确解为

$$y(t_0 + h) = y(t_0) + h\dot{y}(t_0) + \frac{1}{2!}h^2\ddot{y}(t_0) + \cdots + \frac{1}{r!}h^r y^{(r)}(t_0) + O(h^{r+1}) \quad (1-6-1)$$

如果仅截取右边前两项予以近似 (即欧拉法), 则截断误差的阶为  $O(h^{r+1})$ 。故欧拉法是一阶精度的数值解法。如果截取右边前三项, 即保留  $h^2$  项而全部截去  $h^3$  及其以上各项予以近似, 可得二阶龙格-库塔法。其截断误差的阶为  $O(h^{r+1})$ , 故此法是二阶精度的数值解法。又如截去  $h^3$  及其以上各项, 则得四阶龙格-库塔法, 则其截断误差阶为  $O(h^{r+1})$ 。此法是四阶精度的数值解法。

在后面介绍的离散相似法的替换法中, 将  $S$  域变换到  $Z$  域。若取  $S = \frac{1}{T}(Z - 1) = h(Z - 1)$  而将连续域系统离散化, 得到一种简单置换。若由

$$S = \frac{1}{T} \ln Z = h \ln Z = h \left( 2 \frac{Z-1}{Z+1} + \frac{1}{3} \frac{(Z-1)^3}{(Z+1)^3} + \cdots \right) \quad (1-6-2)$$

取 
$$S \doteq \frac{2}{T} \frac{Z-1}{Z+1} = 2h \frac{Z-1}{Z+1}$$

而将连续系统离散化, 或取

$$S \doteq h \left( 2 \frac{Z-1}{Z+1} + \frac{1}{3} \left( \frac{Z-1}{Z+1} \right)^3 \right)$$

而将连续系统离散化, 取不同的截断, 则得到不同的离散模型, 这些模型的精度就不相同。

还有一种截断误差。例如, 在线性定常系统的零状态响应中, 由卷积积分关系:

$$y(t) = \int_0^\infty h(\tau)u(t-\tau)d\tau = \int_0^t h(\tau)u(t-\tau)d\tau \quad (1-6-3)$$

在数值计算中, 显然不能将时域延拓到  $\infty$ , 而必须取一个有限时间段  $t_0 = T$ 。当  $T$  取值不同, 其计算将带来不同的截断误差。又如在相关辨识中, 其著名的维纳-何甫 (Wiener-Hopf) 方程

$$\varphi_{xy}(\tau) = \int_0^\infty g(\sigma)\varphi_{xx}(\tau-\sigma)d\sigma \quad (1-6-4)$$

其中的相关函数, 如自相关函数定义为

$$\varphi_{xx}(\tau) = E[u(t)u(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)u(t+\tau)dt \quad (1-6-5)$$

上述两个公式的积分均需扩展到  $\infty$ , 但数值计算中必须予以适当的截断。这也必将引起误差。

此外, 在后述的方波脉冲变换法中, 用方波脉冲级数表示函数  $f(\cdot)$ , 会引起表示误差。用方波脉冲级数表示  $\int_0^t f(\tau)d\tau$  也会引起表示误差等。这些误差均与步长  $h$  有关。 $h$  取小, 误差显著减小。

在系统辨识中, 误差的情况就更为复杂。由于系统的输入、输出数据都是由仪器测量



采集出来的,且通常是在动态情况下采集到的。因此,仪表的准确度、频率响应、线性范围、人为的测量误差、测量系统的设计合理性以及由输入信号幅值不当所引起的非线性效应等等,此外,图 1-1 中的 A/D 变换器,以及辨识技术的精度,所选模型的合理性以及外采其他干扰,均可构成辨识过程的误差。但是,在系统辨识中,我们首先着眼于来自被辨识系统测量值的误差。这种误差被统称为噪声干扰。这种噪声干扰可分为对系统本身的干扰以及对系统观测过程中的干扰。对系统本身的干扰又可分为确定型干扰和随机型干扰,前者可测不可控、后者不可测也不可控。随机型干扰如温度、湿度、风速等对系统所引起的干扰,在实测中必然引起误差。而确定型干扰是指这种干扰可以实测、也可重复,且所得误差是确定数据。在系统辨识中,特别关心的是随机型干扰噪声。

一般来说,就每个随机干扰因素而言,它对系统的影响是比较小的。在建立系统模型时,对于这些多种随机干扰因素对系统特性的影响,我们往往用少量的随机干扰源来替代它们。

噪声对信号的作用方式可分为可加性干扰和非可加性干扰两大类。可加性干扰可表示为

$$z(t) = y(t) + v(t) \quad (1-6-6)$$

式中,  $z$ 、 $y$ 、 $v$  分别为系统的测量值、真实值和干扰噪声。非可加性干扰则被表示为

$$z(t) = f[y(t), v(t)] \quad (1-6-7)$$

即混合信号  $z(t)$  是  $y(t)$ 、 $v(t)$  的非可加性函数。

可加性干扰中的典型因素是系统内部噪声、测量噪声、来自其他信号的脉冲干扰、人为干扰、自然干扰等。此外的统称为非可加性干扰,如无线电接收系统中,电波传播和反射过程中的干扰。这些干扰会引起有用信号的一个或几个参量(如振幅、频率、相位等)产生寄生调制,使这些量成为随机变量。因此,只有用随机过程作为描述干扰的模型,才能较为合适地反映出实际存在的随机噪声的作用。描述噪声随机过程的特性,可用诸如均值、方差、协方差函数、或功率谱密度等数字特征来表示。

白噪声是描述实际随机噪声的一种最简单,也是最重要的随机过程,但也是一种理想的、特殊的随机过程。白噪声可用数学描述如下。若随机过程  $e(t)$  的自相关函数为

$$\varphi_e(\tau) = \sigma^2 \delta(\tau) \quad (1-6-8)$$

且其谱密度为

$$S_e(\omega) = \sigma^2 \quad -\infty < \omega < \infty \quad (1-6-9)$$

式中,  $\delta(t)$  为 Dirac 函数。所以说,白噪声是一种均值为零、谱密度为非零常数的平稳随机过程。白噪声过程的取值彼此是不相关的,且白噪声不具有“记忆性”,即  $t$  时刻取值既不取决于过去的值,也不影响将来的值。

不满足上述数学描述特别是谱密度为非常数的随机过程,工程上称为有色噪声。它既不具有取值的非相关性,又具有“记忆性”。故这种噪声又称为相关噪声。

严格定义上的白噪声是不存在的。如果随机过程  $e(t)$  的自相关函数具有近似的  $\delta(t)$  函数,以及有限带宽内功率谱接近均匀分布或具有自相关函数为采样函数型,如图 1-3 所示。则这种随机过程可近似认为是白噪声。

图中,  $\tau_0$  要远小于有关过程的时间常数;  $\omega_0$  要远大于系统的截止频率。

对于线性系统而言,由于它满足可叠加性,因此,噪声对测量数据的影响可以归并到