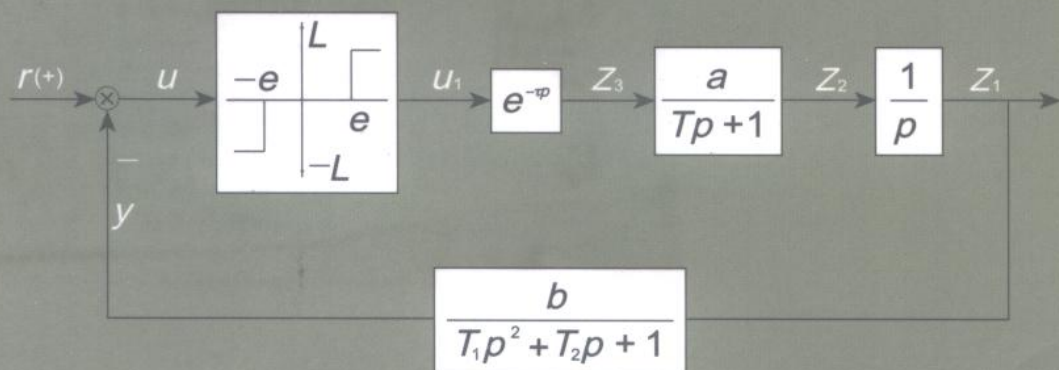


SSAS 系统仿真与应用丛书

# 动力学系统数字仿真算法

Digital Simulation Algorithms for Dynamic Systems

刘德贵 费景高 编 著



0313

465183

164

系统仿真与应用丛书

# 动力学系统数字仿真算法

刘德贵 费景高 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

DY69 13601

本书系统地论述了动力学系统数字仿真的概念、原理、方法以及构造仿真算法的基本思想和技巧；重点介绍了在计算机上进行动力学系统数字仿真的各种不同类型的实用的、高效的仿真算法，并提供了部分实用的 FORTRAN 程序。对所讨论的算法也进行了简明的理论分析。

本书可供从事系统研究、设计、试验以及仿真的工作者、科学计算工作者、工程技术人员学习参考，也可作为高等院校计算数学、计算机科学、自动控制等有关专业师生的参考书。

**图书在版编目 (CIP) 数据**

动力学系统数字仿真算法/刘德贵等编著. -北京: 科学出版社, 2000  
(系统仿真与应用丛书)  
ISBN 7-03-008431-4

I. 动… II. 刘… III. 动力学-数字仿真-仿真算法  
IV. O313

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 06008 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000 年 7 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16  
2000 年 7 月第一次印刷 印张: 27 1/2  
印数: 1—3 000 字数: 630 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

## 《系统仿真与应用丛书》编委会

高级顾问 文传源  
陈怀瑾

主任委员 李伯虎

副主任委员 王行仁

委员(按姓氏笔划排序)

王子才	王正中	王恒霖
刘建中	刘德贵	安亮
陈宗基	张明廉	张鸣戈
陶化成	黄柯棣	梁炳成
熊光楞	蒋教平	鞠丽娜

## 序 言

仿真技术是以相似原理、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的有关专业技术为基础，以计算机系统、与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具，利用模型对系统（已有的或设想的）进行研究的一门多学科的综合性的技术。

仿真本质上是一种知识处理的过程，典型的系统仿真过程包括：系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、模型确认、仿真试验和数据分析处理等，它涉及多学科多领域的知识与经验。系统仿真可以有多种分类方法。按模型的类型，可分为连续系统仿真、离散系统仿真、连续/离散（事件）混合系统仿真和定性系统仿真；按仿真的实现方法和手段，可分为物理仿真、计算机仿真、硬件在回路中的仿真（半实物仿真）和人在回路中的仿真；根据人和设备的真实程度，可分为实况仿真、虚拟仿真和构造仿真。

仿真技术是模型（物理的、数学的或非数学的）的建立、验证和试验运行技术。现代仿真技术的特点可归纳为以下几点：首先，它是一门通用的支撑性技术，它能以其它方法无法替代的特殊功能，为决策者们在面对一些重大的、棘手的问题时，提供关键性的见解和创新的观点。第二，仿真技术学科的发展具有相对的独立性，同时又与光、机、电、声，特别是信息等众多专业技术领域的发展互为促进。因此，仿真技术具有学科面广、综合性强、应用领域宽、无破坏性、可多次重复、安全、经济、可控、不受气候条件和场地空间的限制等独特优点，这是其它技术所无法比拟的。第三，仿真技术的发展与应用紧密相关。应用需求是推动仿真技术发展的源动力，仿真技术应用效益的体现，既与其技术水平的高低有关，还与应用领域的发展密切相关。大量实例表明，仿真技术的有效应用，必须依托于先进的仿真系统，只有服务于应用的仿真系统的发展，才能带动仿真技术的发展。因此，必须处理好应用需求牵引、系统带技术、技术促系统、系统服务于应用的辩证关系。第四，基于仿真技术的发展，仿真技术应用正向被仿真系统的“全系统”、“系统全生命周期”、“系统全方位管理”发展。

近年来，随着现代信息技术的高速发展以及军用和民用领域对仿真技术的迫切需求，系统仿真及其应用得到了飞速的发展。其发展趋势是：（1）系统建模理论与方法的研究范围从定量系统向定性系统拓宽，系统模型的校核、仿真模型的验证以及仿真结果的认可技术已成为复杂系统建模与仿真技术中的重要课题，它正从局部、分散的研究向实用化、自动化、规范化与集成化的系统发展。（2）仿真算法经历了从串行算法到并行算法的发展过程。目前研究的重点是实时连续系统算法、各类系统的并行算法及定性系统算法。（3）仿真软件的研究包括采用新的建模仿真方法学、人工智能等新技术改善建模仿真功能；增强对建模仿真全生命周期活动的支持功能；基于标准、基于软总线的开放的体系结构；注重面向专业领域、面向用户，扩大应用领域；支持复杂系统虚拟样机开发；开发完善支持分布仿真工程的支撑框架。（4）基于 RISC 技术及并行计算机技术的飞速发展，配有面向问题仿真软件的通用高性能微机、工作站及并行机已成为仿真机的主流。基

于高速、宽带、异步、多媒体网络通讯及分布计算技术的发展,使分布计算环境成为仿真计算机平台的重要发展方向。高性能仿真计算机的主要课题包括处理机技术与节点结构;并程序设计与并行化编译器;支持自动并行化的新的框架与概念等。(5)虚拟现实技术是现代仿真技术的一个重要研究领域。它通过建立模型对人、物、环境及其相互关系进行本质的描述,并在计算机上实现。它以仿真的方式使人置身于一个沉浸、交互、构思的虚拟的世界中。其研究包括分布式虚拟环境、虚拟环境建模、分布式可交互环境数据库、虚拟环境显示、虚拟测试、分布式多维人机交互及标准化等。(6)分布仿真技术是仿真技术的最新发展成果,分布仿真技术经历了网络仿真、分布交互仿真和聚合仿真等阶段后,最近又提出了高级体系结构。其研究包括仿真部件和仿真系统高层次上的互操作性和可重用性;系统总体和体系结构;标准、规范、协议;虚拟环境;支撑平台与工具;人的行为描述;实时决策、演练管理;仿真管理(白方);安全管理;网络管理。(7)基于仿真的采办是将建模与仿真技术应用于系统采办全过程的一项创新性建议。能使武器系统的研制缩短周期、节省经费、提高质量。其研究包括体系结构、协同环境、建模/仿真、采办过程及组织等。(8)系统仿真在工程和非工程、生物和非生物、微观和宏观、思维和实践、主观和客观、个体和群体、本体和环境等领域继续获得广泛和深入的应用。

在本丛书的编写中,我们既重视学术水平,也强调实际应用价值。因此,这套丛书有较大的适用范围。我们将努力把系统仿真与应用的最新研究成果与国内外发展动态写得既有深度,又通俗易懂,以使一些读者阅读本丛书后在理论、方法、技巧上有新的启发和收获,而另一些读者除了上述收获外还能应用其中的理论、方法、技术、技巧解决工作中的问题。这是我们这套丛书的宗旨,也是我们的希望。丛书的第一批书包括:《动力学系统数字仿真算法》、《分布交互仿真技术》、《仿真系统的设计与应用》、《仿真器及其应用》、《综合系统建模与仿真》、《现代仿真技术》等六部。本丛书也是开放式的,今后还将陆续出版反映我国仿真系统与应用方面的图书。

本丛书可供从事系统研究、设计、试验以及仿真的工作者、科学工作者、工程技术人员、管理人员使用,也可作为高等院校自动控制、物理、数学、计算机科学等有关专业的本科生、研究生、教师的教学参考书。

在本丛书的编写过程中,得到中国人民解放军总装备部、中国系统仿真学会、科学出版社和丛书作者所在单位的大力支持和帮助。本丛书是丛书作者及其同事们集体智慧的结晶。在此一并表示衷心的感谢。限于作者的水平,本丛书定会有不足之处,敬请读者批评指正。

《系统仿真与应用丛书》编委会

2000年春

# 前 言

当今时代，数字仿真、科学计算已是独立于理论研究、实验研究的一种基本的科学活动，一般不再仅仅把它看作理论研究、实验研究的辅助手段。现在人们可以采用理论研究，实验研究与数字仿真、科学计算三类基本科学活动来进行科学技术研究。因此，数字仿真、科学计算是近代科学技术发展迅速的重要因素。

一个大系统或一个大的工程项目的研究和设计的成功在很大程度上依赖于数字仿真（或数值仿真或数学仿真）。科学家和工程师的理论研究、解决实际问题能力的提高常常受益于仿真（或模拟）。一旦没有仿真或者仿真工作做得不充分，那么他们现今所做的工作对于要解决的那类问题可能是不合适的，严重时可能出现大的事故。这几乎已成为人们在系统研究和设计中的共识了。因此，与仿真有关的研究工作正在受到各个科学和工程领域专家的重视。

动力学系统是数字仿真最重要的应用领域之一，它包含大量的物理系统、化学系统、生物系统，以及各种工程系统等。这些系统的表现形式虽然是千差万别的，但其运动规律却具有相似的数学模型。一般，动力学系统可以用常微分方程和偏微分方程的数学模型来描述。这种模型也常常称为本性数学模型。动力学系统数字仿真是指用某种仿真算法（数值方法）将本性数学模型离散化，在数字计算机上建立该系统的数学模型，即数字仿真模型，并利用该模型进行实验，研究系统的运动状态、性能来确定研究、设计参数，评估系统品质等。因此，仿真算法是数字仿真模型中的核心和关键。本书主要是针对常微分方程组初值问题和微分代数方程描述的动力学系统来讨论数字仿真算法。例如，自动控制系统的运行、电力系统的运行、飞行器的轨道控制、化学反应过程、生态平衡问题等，其数学模型是常微分方程组初值问题和微分代数方程，许多偏微分方程用线方法通过空间离散化也可得到常微分方程组的初值问题。也就是说，我们主要研究这种类型的动力学系统的数字仿真算法。

我们以实际问题为背景，将仿真数值方法的研究与工程问题的特点结合起来，特别是与大系统数字仿真、实时数字仿真结合起来，研究实用的、有效的仿真算法和各种相关问题。介绍动力学系统数字仿真的一些基本的研究成果和实际构造算法的思路，给出一些研究和构造算法的应用背景材料和部分算法软件，以便供读者研究和应用参考。

本书共计八章。第一章是对动力学系统数字仿真的概念、原理的总述；第二章介绍数字仿真的通用算法和微分代数系统的仿真算法；第三章针对线性系统给出一些快速的数字仿真方法；第四章讨论数字仿真模型的频域误差估计和补偿方法；第五章概述刚性的概念、处理刚性系统的思想和方法，重点讨论组方法；第六章介绍实时仿真的概念和实时仿真算法的特点，给出几类实时仿真算法；第七章陈述右函数间断的概念并介绍间断处理的思想和方法；第八章针对常微分方程初值问题介绍并行化处理的思想和各种类型的方法。

考虑到本书的系统性，同时使涉及的内容能反映当前国内外的研究水平，我们也引

用了国内外学者在这个领域中的许多研究成果。

本书作者及其课题组多年从事国防科技预研项目、国防科技预研基金项目(J4.7.2)、国家自然科学基金项目(19871080)等研究。本书内容系统总结了这些科研项目的理论研究与应用研究成果,参加这些研究工作的,除我们之外,还有宋晓秋研究员、陈丽容高级工程师、谢亚军博士、薛晓青工程师和朱珍民副教授等。

李伯虎研究员和梁炳成研究员在百忙中审阅了本书,并提出了许多有益的意见,总装备部刘建中局长、张振民参谋、安亮参谋对本书的出版给予了热情支持和帮助,在此一并致谢!科学出版社鞠丽娜副编审为本书的出版做了认真、细致的审校、联系工作,付出了辛勤的劳动,在此谨向她表示衷心的感谢。由于作者水平所限,书中难免存在缺点甚至错误,欢迎读者批评指正。

刘德贵 费景高

1999年秋于北京



# 目 录

<b>第一章 动力学系统数字仿真原理</b> .....	1
1.1 动力学系统 .....	1
1.2 动力学系统的数字仿真 .....	4
1.3 动力学系统的数学模型 .....	6
1.3.1 常微分方程描述的连续时间动力学系统 .....	8
1.3.2 差分方程描述的离散时间动力学系统 .....	10
1.3.3 采样数据系统数学模型 .....	14
1.3.4 微分代数方程描述的动力学系统 .....	14
1.3.5 建立动力学系统数学模型的实际例子 .....	16
1.4 数字仿真算法和软件.....	21
1.5 仿真模型的校核和验证.....	23
1.5.1 数字仿真模型的校核 .....	24
1.5.2 数字仿真模型的验证 .....	28
<b>第二章 数字仿真的一些通用算法</b> .....	31
2.1 离散相似原理.....	31
2.1.1 Adams 方法 .....	33
2.1.2 局部解析方法 .....	37
2.2 Taylor 级数匹配原理.....	39
2.2.1 Runge-Kutta 方法 .....	40
2.2.2 线性多步方法 .....	44
2.3 数字仿真方法的实现.....	48
2.3.1 单步法的误差估计和步长选取 .....	48
2.3.2 线性多步法的起始值计算.....	57
2.3.3 定步长显式多步方法的计算 .....	60
2.3.4 隐式方程组的求解方法 .....	61
2.3.5 多步方法的预估校正计算.....	66
2.3.6 线性多步方法的变阶变步长的实现 .....	70
2.4 数字仿真算法的稳定性分析.....	75
2.4.1 显式 Runge-Kutta 方法的稳定性分析 .....	77
2.4.2 隐式 Runge-Kutta 方法的稳定区域 .....	78
2.4.3 线性多步方法的稳定性分析 .....	79
2.5 数字仿真算法的时域误差分析.....	81
2.5.1 单步法的时域误差分析 .....	82
2.5.2 线性多步方法的时域误差分析 .....	85

2.6	微分代数系统的仿真算法	87
2.6.1	秩 1 微分代数系统的仿真算法	87
2.6.2	秩 2 微分代数系统的仿真算法	91
<b>第三章</b>	<b>线性系统的数字仿真方法</b>	<b>96</b>
3.1	频域分析基本知识	96
3.1.1	连续函数的频域表示	97
3.1.2	离散时间函数和线性离散时间不变系统的频域表示	104
3.1.3	连续信号频谱与采样离散信号频谱的关系	107
3.1.4	$z$ 变换	109
3.2	线性系统仿真模型建模的预处理方法	113
3.2.1	一般通用数字仿真方法的预处理	113
3.2.2	运载火箭姿态运动的数字仿真	116
3.2.3	小步合成方法	123
3.2.4	局部解析法	130
3.3	线性系统数字仿真模型的转换	135
3.4	传递函数的数字仿真方法	139
3.4.1	变换方法	139
3.4.2	零极点匹配映射法	149
3.4.3	权序列方法 (时域矩阵方法)	151
3.4.4	小步合成方法	157
<b>第四章</b>	<b>数字仿真模型的频域误差估计和补偿方法</b>	<b>162</b>
4.1	数字仿真模型的等效连续模型	162
4.2	数字仿真模型的特征根误差	164
4.2.1	单步法的特征根误差	165
4.2.2	多步预估校正方法的特征根误差	170
4.3	数字仿真模型的正弦离散传递函数误差	176
4.3.1	单遍算法的正弦离散传递函数的误差	178
4.3.2	单步法的正弦离散传递函数误差	181
4.3.3	多步预估校正方法的正弦离散传递函数误差	184
4.4	信号保持器的频域误差分析	187
4.4.1	一阶保持器的频域误差	187
4.4.2	二阶保持器的频域误差	191
4.4.3	三阶保持器的频域误差	192
4.4.4	多帧速计算中保持器的频域误差分析	195
4.5	数字仿真模型频率特性的测试方法	197
4.5.1	周期序列的离散 Fourier 级数表示	200
4.5.2	频率特性测试的相关分析方法	202
4.5.3	频率特性测试的快速 Fourier 变换 (FFT) 方法	204

4.5.4	频率特性测试的例子	206
4.6	数字仿真模型频域误差的补偿	208
4.6.1	相位增益可调的数值积分方法	209
4.6.2	零阶保持器的补偿	219
4.6.3	误差补偿的精确求解法	221
4.6.4	误差补偿的近似求解法	227
<b>第五章</b>	<b>刚性问题与多速率组合方法</b>	<b>232</b>
5.1	刚性问题的例子	232
5.2	刚性系统的概念	238
5.2.1	线性问题的刚性概念	238
5.2.2	非线性问题的刚性性质	240
5.2.3	几个常用的数值稳定性概念	240
5.2.4	刚性系统求解的实质	244
5.3	基本的刚性算法	246
5.3.1	向后微分公式 BDF	246
5.3.2	二阶导数线性多步方法	253
5.3.3	对角隐式 Runge-Kutta 方法 SDIRK	255
5.3.4	Rosenbrock 方法	257
5.4	刚性算法的主要特点	258
5.5	组合方法	259
5.5.1	算法提出的背景	259
5.5.2	算法构造	261
5.5.3	几类通常的组合算法	264
5.6	RK-Rosenbrock 组合算法	268
5.6.1	算法步骤	268
5.6.2	算法的相容阶和收敛性	269
5.6.3	几组具体计算公式	270
5.6.4	数值稳定性分析	272
5.6.5	数值试验结果	274
<b>第六章</b>	<b>实时数字仿真算法</b>	<b>279</b>
6.1	实时数字仿真	279
6.2	实时仿真算法的特点	281
6.3	一些基本的实时仿真算法	283
6.3.1	Adams-Bashforth (AB) 型算法	283
6.3.2	Adams-Moulton (AM) 型算法	284
6.3.3	实时 Runge-Kutta 方法	286
6.4	实时混合 (Hybrid) 方法	291

6.4.1	单步实时混合方法	291
6.4.2	二步实时混合方法	293
6.4.3	数值试验例子	295
6.4.4	带有线性插值的中点公式	295
6.4.5	在非步点上右函数求值的实时仿真算法	297
6.5	实时仿真多速率组合算法	299
6.6	步长选取	303
6.7	几个常用的实时数字仿真的 FORTRAN 程序	306
6.7.1	一阶实时 RK 方法 RTRK1	307
6.7.2	二阶实时 RK 方法 RTRK2	309
6.7.3	三阶实时 RK 方法 RTRK3	311
6.7.4	二阶实时 AB 方法 RTAB2	314
6.7.5	三阶实时 AB 方法 RTAB3	317
6.7.6	二阶实时混合方法 RTH2	321
6.7.7	三阶实时混合方法 RTH3A	323
6.7.8	二阶实时 AM 方法 RTAM2	327
6.7.9	三阶实时 AM 方法 RTAM3	330
<b>第七章</b>	<b>仿真模型中的间断处理</b>	<b>335</b>
7.1	仿真模型中断的例子	335
7.2	右函数间断的分析	337
7.2.1	右函数间断与条件函数间断	337
7.2.2	间断对数值方法阶的影响	340
7.2.3	连续延拓处理	343
7.3	非实时间断处理算法	344
7.3.1	间断处理算法的构造思想	344
7.3.2	几类实用的间断处理算法	346
7.4	实时间断处理算法	361
7.5	间断处理算法的一个 FORTRAN 程序	368
7.5.1	功能	368
7.5.2	使用说明	368
7.5.3	方法简介	369
7.5.4	程序	370
7.5.5	例题	379
7.5.6	程序附注	383
<b>第八章</b>	<b>并行数值仿真方法</b>	<b>385</b>
8.1	构造常微分方程初值问题并行算法的基本途径	385
8.1.1	系统分割的并行化方法	386

8.1.2	方法分割的并行化方法 .....	389
8.1.3	时间分割的并行化方法 .....	391
8.2	并行 Rosenbrock 方法 .....	393
8.2.1	并行 Rosenbrock 公式 .....	394
8.2.2	并行 Rosenbrock 方法的收敛性 .....	395
8.2.3	并行 Rosenbrock 方法的稳定性 .....	397
8.2.4	数值试验 .....	398
8.3	并行 Runge-Kutta (RK) 方法 .....	399
8.3.1	并行显式 RK 方法 .....	400
8.3.2	并行多步多级显式 RK 方法 .....	402
8.3.3	并行多步多级隐式 RK 方法 .....	406
8.3.4	数值试验 .....	407
8.3.5	在并行计算机上并行算法的效率分析 .....	408
8.4	系统分割的并行算法 .....	409
8.4.1	一类系统分割的并行组合法 .....	410
8.4.2	一类系统分割与方法分割相结合的并行组合法 .....	411
8.5	基于外插的并行算法 .....	416
8.6	一类微分代数问题的并行数值仿真算法 .....	420
8.6.1	并行数值仿真算法 PNSA .....	420
8.6.2	数值稳定性分析 .....	422
8.6.3	数值试验结果 .....	422

# 第一章 动力学系统数字仿真原理

动力学系统又称作动态系统,它研究系统在力的作用下的运动规律.动力学系统包含大量的物理系统、化学系统、生物系统、各种工程系统以及社会经济系统.就表现形式来看,这些系统是千差万别的;但就运动规律来说,它们具有相似的数学模型.动力学系统的数字仿真是指在数字计算机上建立该系统的数学模型,并利用该模型进行实验,研究动力学系统的运动规律.本章对动力学系统和动力学系统数字仿真的基本原理做简单介绍.

## 1.1 动力学系统

所谓系统是指由相互联系、相互制约、相互作用的元件的一个集合,是具有一定整体功能和综合行为的统一体.系统元件的变量之间存在着因果关系.一个系统中的元件的集合可能只是另一个系统的组成部分,这时称它为另一个系统的子系统.系统的这种定义强调系统中各个元件之间的相互作用,不应该对它们进行单独孤立的研究.系统的实际内容将由具体研究的目的确定.

任何系统都存在于一定的物质环境中,都要受到环境变化的影响.这种影响表示为系统的输入.事实上,所谓系统的环境是指系统以外的与之相关联的并对系统的运动产生影响的外界因素.

一般常用下列术语来描述所要研究的系统:

实体:存在于系统中的具有确定意义的物体,即组成系统的具体对象.

属性:实体所具有的每一项有效特征.

活动:系统内部发生的任何变化过程称为内部活动;系统外部发生的对系统具有影响的任何变化过程称为外部活动.

确定了所要研究的问题后,需要准确清晰地确定所要研究的系统的具体内容.特别要考虑下述一些方面:

1)系统或研究对象包含哪些组成部分,如子系统、环节、部件、装置等,以及它们如何相互作用和进行联接.

2)确定系统的环境和系统与环境之间的界面,考虑系统与其它系统或环境如何联结,或如何作用.系统的输入、输出、干扰都可认为是系统的边界,通过它们与其它系统或环境相联接.

3)从研究的需求出发,确定应该考虑哪些因素,忽略哪些因素,哪些是外部因素,哪些是内部因素(系统内部的结构组成、参数,状态变量是内部因素,输入,输出是外部因素),并区分可控因素和不可控因素,确定性因素或随机因素.

4)确定所要研究的系统内部及边界上各变量具有的约束条件.

5)确定系统运动的初始状态.

动力学系统是研究物体在力作用下的运动规律和特性的运动系统. 系统的状态随时间变化, 不仅系统的输入和输出随时间变化, 而且系统的一些变量的导数或变化值还取决于系统变量的瞬时值. 如果动力学系统的状态变量随连续时间变化, 则称该系统为连续系统; 如果系统的状态变量的变化仅发生在离散时刻的序列上, 则称该系统为离散系统. 采样数据系统为连续-离散时间混合系统, 系统中的一部分变量具有连续系统的特征, 另一部分具有离散时间系统的特征. 计算机控制系统是典型的采样数据系统.

导弹(运载火箭)是动力学系统的典型例子. 它的运动包含弹体运动和各个分系统的运动. 弹体运动又可以分解为质心运动、绕质心的旋转运动(姿态运动)和弹性振动等. 导弹和运载火箭一般包含推进系统、控制系统、安全系统、遥测系统、外弹道测量系统等, 并将它们作为它的子系统. 这些子系统又有自己的运动, 组成一个动力学系统. 例如推进系统的功能是产生推力, 推动火箭向前运动. 对于液体火箭, 推进系统包括液体火箭发动机和推进剂输送系统, 它们又是许多子系统的组合, 在导弹的飞行过程中将出现许多复杂的动态过程, 如发动机燃烧室中推进剂的燃烧过程, 推进剂在贮箱中晃动和在输送系统中的流动等. 控制系统的作用是控制火箭的姿态运动稳定性, 使其按照预定的轨道飞行, 并控制火箭发动机关机, 精确地到达目标. 控制系统又由制导和姿态控制等子系统组成. 制导系统是指保证导弹自动地导向目标的一些设备所组成的系统, 它包括对目标和导弹相对位置的探测, 形成制导指令, 控制导弹按预定的路线飞行等项设备. 姿态控制系统的作用为执行制导指令和保证导弹飞行姿态的稳定性. 它按照制导指令改变飞行姿态, 直接控制导弹按照指定的路线飞行. 姿态控制系统包括执行机构、惯性测量组合和校正网络等. 在导弹飞行过程中, 上述的各个子系统的运动过程相互耦合, 并且还与地球引力和大气的变化具有密切的关系. 由此可以看到, 导弹或者运载火箭是一个复杂的动力学系统, 它的飞行性能是导弹的结构, 各系统的性能和飞行环境的综合反映.

通常在研究动力学系统的运动规律时, 并不总是将该系统的所有因素进行综合考虑, 而是根据研究的目的只考虑其中的一些因素, 组成所要研究的动力学系统的子系统, 而略去其它一些因素的运动的详细过程. 在对象如导弹的复杂的动力学系统的研究中, 通常采用两种研究方法, 一种是总体方法, 另一种是局部方法. 所谓总体方法是只考虑组成动力学系统的各个分系统的输入输出特性来研究动力学系统的运动规律, 而忽略各个分系统由输入得到输出的运动过程. 局部方法从各个分系统自身研究开始, 逐步向外延伸, 与其它分系统联结, 构成愈来愈复杂的动力学系统进行研究. 为了说明对动力学系统的这两种研究方法, 我们考虑由图 1.1 给出的动力学控制系统的运动过程. 图 1.2 给出的防空导弹的闭合控制回路就可以归结成图 1.1 所表示的动力学系统, 其中导弹的姿态运动可以看成是中间控制对象, 即系统通过控制导弹的姿态运动来控制导弹的质心运动. 对于图 1.1 或图 1.2 给出的动力学系统采用总体方法进行研究时, 可以忽略其中每一框所表示的实体的暂态运动过程, 而只考虑这些实体的输入输出的稳态特性. 若采用局部方法, 就需要根据研究的目的将动力学系统分割成一些子系统, 研究这些子系统中实体的属性和有关的运动过程以及子系统之间的相互影响. 图 1.1 和图 1.2 中的每一框都可以作为动力学系统的实体来进行研究. 特别由图 1.2 可以看出, 防空导弹闭合控制回路由逐渐复杂的四个回路组成. 由控制部件(舵)自身的运动组成的回路称作舵回路. 它根据系统送来的信号经过调制去控制舵面, 使之偏转, 为改善其性能引入内反馈, 组成回路. 由舵回路加上导弹

姿态运动及其观察器和稳定控制信号的调制组成新的回路. 由于这个回路主要在于稳定导弹飞行时的姿态, 即稳定导弹绕其质心的旋转运动(角运动), 故称为稳定回路. 它主要稳定角运动, 通过速率陀螺和自由陀螺敏感姿态角及其变化速度, 经调制后得到控制量, 输入到舵回路中去, 形成闭合回路.

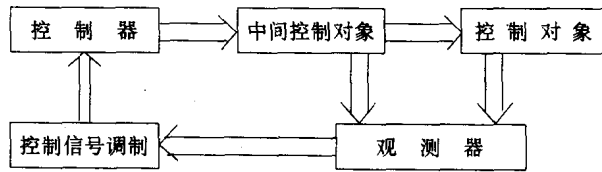


图1.1 动力学控制系统

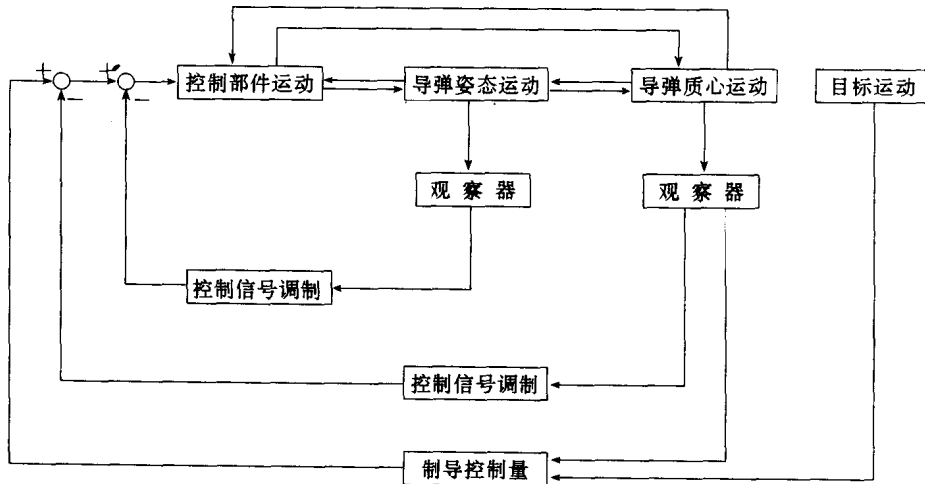


图1.2 防空导弹闭环控制回路

由稳定回路、导弹质心运动、质心运动信息的测量和控制信号的调制等组成一个新的回路. 这个回路的目的是为了控制质心运动的法向加速度, 法向过载或角速度. 由于它由导弹本身组成闭合回路, 故称它为独立控制回路.

由独立控制回路加上目标运动、偏差信号的测量和制导控制量的调制组成制导控制回路. 这是防空导弹在拦截目标过程中的控制过程, 可以这样来直观描述: 由对导弹的弹体运动、质心运动和目标运动的参数的测量, 根据制导的目的, 调制成控制量输到控制的执行部件, 改变执行部件的运动状态, 从而去控制导弹的弹体运动. 通过导弹姿态的改变去控制导弹质心运动的参数(飞行高度、速度、俯仰角等)的改变, 从而形成一个闭合过程. 在导弹的飞行过程中, 图 1.2 给出的各种运动过程可能是互相耦合的. 例如导弹质心运动参数的改变将会影响控制部件和弹体运动的条件, 姿态的改变也会影响控制部件的运动, 所以在图 1.2 中, 我们又引进一个小的环流.

由上述导弹的飞行控制过程可以看出, 实际的动力学系统是很复杂的. 在进行研究时, 必须根据研究的目的确定研究对象, 确定其属性和与环境的关系. 在必要时可以划分成若干个子系统进行研究.



## 1.2 动力学系统的数字仿真

为了设计出一个品质优良的动力学系统,或者对一个动力学系统的运动规律或者其品质进行研究,则必须对该系统进行分析和试验.但是对系统进行实际的试验往往要付出很高的代价,有时甚至是不可能的.例如对于某些正在设计中的系统,已经运行过而又无法复原的系统,或者运行后具有灾害性后果的系统都不能通过对系统的实际运行去得到系统的运动规律、特性和主要的参数.可以通过仿真试验,在没有真实系统(或部分真实系统)参予的情况下,根据仿真试验的结果来推断、估计和评价真实系统的运动过程.

仿真技术是一种间接试验技术,它建立一个与研究对象或过程相似的模型,通过模型间接地研究对象或过程的规律.对动力学系统仿真通常采用下面的定义:动力学系统仿真是建立系统的动态模型(仿真模型),并在模型上进行试验.仿真是一门综合性的技术学科,它为动力学系统的研究、分析、设计和评估等提供了一种先进的手段.特别在下述情况时,应该进行仿真,即不能在实际系统上进行试验,而要在模型上进行试验.

1)系统还处于设计或设想阶段,并没有真正建立起来,或者实际系统的某个时间区间中的运行过程已不能重现,甚至实际系统已经消失,不可能在实际系统上进行试验.

2)在实际系统上做试验时,试验条件很难控制或复现,在实际环境中很难进行试验观测,无法对试验结果的优劣作出正确的判断.例如,如果人是动力学系统回路中的一个环节,在做试验时,其行动可能与实际的行为不同,从而影响试验结果的客观性.最好对人在回路中的活动建立模型,由模型的运行代替人的实际行动.

3)实际系统的试验时间过长,费用太大,希望在较短的时间内能观察到实际系统运行的全部历程,并估计某些参数对系统行为的影响.仿真通过模型的运行可以随意控制时间,缩短或放大时间比例尺,从而适合对长期运行系统或过程进行比较.

4)在实际系统上做试验时,会破坏系统的正常运行,无法复原;或者系统是一次性使用的,试验有危险.

仿真是利用一个模型来模仿实际动力学系统所发生的运动过程,并进行试验的技术.许多工程与科学技术问题都可以通过动力学系统的仿真求得解决.工程上的一个设计方案,社会经济领域中的一种规划,往往都可以建立动力学系统的模型,通过仿真试验来验证方案或规划能否达到预期的目标.如果达不到目标,可以及时发现问题,修改方案或规划.这样既省时,又经济和安全.例如在飞行姿态控制系统的设计过程中,从方案论证开始,元部件的选择,系统初步设计,详细设计,样机生产到最后的系统性能的评估的各个阶段都可以应用仿真技术,通过仿真试验达到以下目的:

1)通过仿真对选择的各总体方案进行比较,以选择合理的系统方案.

2)分析被控对象,元部件的动态特性,以及它们对系统性能的影响,合理地选择系统的结构.

3)确定系统的控制规律,选择合理的控制参数,并对系统的性能进行优化.

4)对初步设计的系统或样机进行仿真,或将实物放到仿真回路中,以检查系统性能指标是否满足要求,并进行修改.

根据仿真中建立的仿真模型的不同,可将仿真分为物理仿真和数学仿真两大类.动力