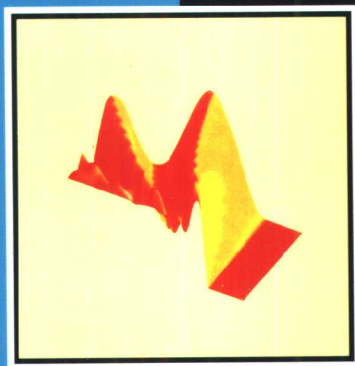


THOMSON
LEARNING™
汤姆森学习出版集团



BookWare 系列丛书



机 构 动 态 仿 真

► 使用 *MATLAB*®
和 *SIMULINK*®

[美] 约翰·F·加德纳

周进雄 张陵 译

西安交通大学出版社

THOMSON
LEARNING™
汤姆森学习出版集团

 Book Ware 系列丛书

机构动态仿真

——使用 MATLAB 和 SIMULINK

Simulations of Machines
Using MATLAB and SIMULINK

[美] 约翰·F·加德纳

周进雄 张陵 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

内 容 提 要

本书系 Brooks/Cole 出版公司(Thomson Learning 出版集团的下属子公司)2001 年推出的 BookWare 系列丛书(BookWare Companion Series™)之一。该书提出了利用 MATLAB 及 Simulink 工具箱在计算机上解决机构动态建模及仿真问题的分析思路、方法、MATLAB 脚本文件和 Simulink 仿真模块框图以及供学生自主学习研讨的习题。全书包括 9 章内容和一个关于 Simulink 入门辅导的附录,分别是引言和概述、矢量环及矢量链方程、位置问题的求解、运动学的 Simulink 仿真、动力学引论、联立约束法、双连杆平面机器仿真、可变机构仿真、抛石机仿真。

本书可作为已具备 MATLAB 基本知识的机械、能动、土木、汽车、力学、航空航天等专业高年级本科生和研究生相关课程的参考书和补充教材,也可供有关教师、工程技术人员参考使用。

First published by Brooks/Cole, a division of Thomson Learning.

All Rights Reserved.

Authorized Translation/Adaptation of the edition by Thomson Learning and XJUP. No part of this book may be reproduced in any form without the express written permission of Thomson Learning and XJUP.

Simulations of Machines Using MATLAB and Simulink/John F. Gardner)

本书中文简体字版由美国 Thomson Learning 出版集团授权西安交通大学出版社出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

机构动态仿真:使用 MATLAB 和 Simulink/(美)加德纳(Gardner, J. F.)著;周进雄,张陵译. —西安:西安交通大学出版社,2002.9
(BookWare 系列丛书)

书名原文:Simulations of Machines Using MATLAB and Simulink

ISBN 7-5605-1564-9

I. 机… II. ①加… ②周… ③张… III. 计算机
辅助计算—软件包, MATLAB, Simulink
IV. TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 058477 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

陕西省轻工印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:727 mm×960 mm 1/16 印张:9 字数:155 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印数:0001~5 000 定价:13.50 元

陕版出图字:25—2002—078 号

发行科电话:(029)2668357,2667874

中译本出版者的话

Brooks/ Cole 出版公司(Thomson Learning 出版集团的下属子公司)于 2000 年推出的系列丛书 BookWare Companion Series,大致涵盖的都是电子信息和电气工程类大学本科的主干课程。参加这套丛书编撰工作的大多是一些目前仍活跃在教学第一线的知名教授。组织出版这套丛书的初衷和每一位作者的想法可在“出版者的话”和每本书的作者“前言”中略见其详,这里不再赘述。

概括起来,原丛书出版者的意图大致有二:一是探讨如何将基于计算机的学习工具融于教学;二是给学生提供另外的学习空间,让他们能自主学习。总的目的就是要让学生积极主动地学习,这样会学得更好。由于课程性质和每位作者的想法有些差异,每本书在具体构成方式上会各有不同,但综合来看,这套丛书具有如下特点:

- 不求过细,而强调内容的系统性并注重相互联系。提纲挈领,注意总结,联系实际。因此,一般来说最好用作辅助性教材。

- 用“解说题”、“例题”、“强化题”、“探究题”等这些目的各异的题来演绎和深化概念,联系实际,并在重要概念的深度和广度上作适当延伸。这比“硬灌”会收到更好的效果。

- 全部题都有答案(或题解),如有必要均配有相应的 MATLAB 脚本,便于学生在学习中及时获得反馈。

- 丰富的 MATLAB 脚本资源和可随时进入的在线网站为广大读者提供了很大的学习空间。使他们的精力不再耗在编程上,而在探究上;他们可以利用这些脚本资源做他们想做的事;他们可以在计算机仿真上得到初步训练和更大的领悟,并为他们的创新意识和才能的发挥提供无限的空间。

根据我国当前高等学校的具体情况,我们组织出版这套丛书的中译本大致有如下几点考虑:

- 近几年来经国家和各级政府的重点建设和投资,高等学校的计算机硬件条件大为改善, MATLAB 软件已较为普及,有的学校已将宽带接入因特网联到学生宿舍,个人拥有一台 PC 机已不再稀罕,这都为使用这套丛书准备了必要的硬件和软件环境。

• 以 CAI 开始的教学手段现代化改革已持续了十多年,当今多媒体教学、电子教材、网络大学和网络课程等发展势头方兴未艾,其核心问题就是如何有效地利用计算机作为辅助教学工具,改进教学方法。这套丛书提供了一种可供大家借鉴的方式。

• 减少课内学时,精简内容,重组课程体系就是为了给学生留下更多的空间让他们自主学习。这套丛书为他们提供了这方面的素材。

• MATLAB 是一种集成度很高的语言,由于其功能强,使用方便和适用的计算机平台宽而被大家所接受,已在教学、科研和工程实际中广泛采用。这套丛书为学生熟悉、掌握和熟练应用 MATLAB 提供了一个载体,丛书中所给出的各种 MATLAB 脚本和仿真软件是科学研究工作者和工程实践人员不可多得的宝贵资源。

• 对于非全日制大学的那些成人教育、继续教育和自学考试的学生来说,这也是一套很有参考价值的辅助教材。

我社早在 20 世纪 80 年代中期就组织翻译出版了一套“外国教材精选”系列丛书,90 年代又陆续推出了《信号与系统》、《离散时间信号处理》等多本很有影响的外国优秀教材的中译本。这些都取得了良好的经济效益和社会效益。当前在国家教育主管部门正大力倡导在计算机等信息学科积极引进并直接采用外国优秀教材进行教学的时候,我们将一如既往,争取在较短的时间内将这套丛书的中译本奉献给大家。我们感谢广大读者过去对我社组织翻译出版的外国教材的青睐,并继续期望得到你们的支持。如有任何建议和要求,请与我们联系。E-mail: Shadwell.qin@163.com 或 lp-zhao@sohu.com

西安交通大学出版社

2001.8

译者的话

本书作者约翰·F·加德纳(John F. Gardner)教授现为美国博伊西州立大学机械工程系主任。他是机械建模、仿真与控制领域的专家。有关这本书的情况已集中在“中译本出版者的话”中作了介绍,更详细的可参看作者“前言”。

本书的翻译分工如下:第1、2章由张陵翻译,第3章由张红艳翻译,第7章由王学明翻译,第9章由张艳芬翻译,其余各章及附录由周进雄翻译。最后,全书由周进雄、张陵校对统稿。

由于译者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者及同行批评指正。

周进雄 张陵
2002年4月
于西安交通大学

出版者的话

——关于这套丛书

计算的目的在于它的内涵,而不在数字。

—— R. W. 海明(Hamming), 选自《面向工程师和科学家的数值方法》(Numerical Methods for Engineers and Scientists, McGraw-Hill, Inc.)

正是由于心灵的驱使,我们才推出了这套“BookWare 系列丛书”(BookWare Companion Series™)。

新技术和现代方法正日益融入业已浓缩并具有重要理论的课程,因此,很多教师现在要问:“我们只是将这些最新技术教授给学生呢?还是教会他们如何推理?”我们深信,这两方面不应互相排斥。事实上,本丛书就是基于这样的信念:计算机求解和基本理论是能够互补的。应用恰当,计算结果可以阐明理论,并帮助学生以各种富有意义的方式进行思考、分析和推理。它也能够帮助学生理解新的信息和现有知识之间的关系和联系,以及培养他们解决问题的技巧、感性认识和积极主动思考的能力。为此使命,这套“BookWare 系列丛书”便应运而生了。

具体地说,本丛书是专为这样的教师——他们想要把计算机辅助学习融合到课程之中去——而编写的;也是为想比仅从教科书中学到更多知识的学生编写的。教师可以从中发现,功能很强的软件工具是支撑他们课程活动的各种手段,而不会限制他们的应用。学生会发现,可以迅速获得各种相关的习题和例题,并具有电子接入方法。对教师和学生来说均为重要的是这套丛书基于这样的前提:如果学生积极主动学习,他们会学得更好。“BookWare 系列丛书”定会受到学生的青睐,为他们提供一种对现实问题的感受,展示解决实际问题的清晰方法,并在理解和应用这些方法上挑战自我。

为了更好地满足你的需要,我们将继续寻找使这套丛书日臻完善的方法。为达此目的,请加入到我们的“BookWare Companion Resource Center”中来,我中心的网址是:<http://www.brookscole.com/engineering/bookware/>^①

① 原书提供的网址是 <http://www.brookscole.com/engineering/ee/bookware.html>——译者注。

你推荐的方法都会使这套丛书更加令人满意,在课堂教学中与同仁们分享你如何使用技术的见解,为下一版提出具体的习题或例题,或者将你的想法告诉我们。务请不吝赐教。

我们恭候你的回音,谢谢你的持续不断地支持。

Bill Stenquist	出版人	<i>bill.stenquist@brookscole.com</i>
Heather Woods	责任编辑	<i>heather.woods@brookscole.com</i>
Nathan Wilbur	市场经理	<i>nathan.wilbur@brookscole.com</i>
Christina DeVeto	市场助理	<i>christina.deveto@brookscole.com</i>

前 言

本书主要是为大学生学习机械知识而提供的一本辅助教材。并且,本书也可以作为高年级学生学习动力学的一本人门选修课教材,如同我们在宾夕法尼亚州立大学的做法。本书的观点来源于我和我的同事关于如何在大学生运动学课程中引入动力学知识的讨论。通常,大学生运动学的学习是严格按部就班的,学生被一步步地引导去求解位置、速度和加速度。只是当详尽的运动分析掌握之后才引入力以及动力学的基本概念。在分析力之前就分析物体的运动,这种很明显的矛盾是由机构的约束特性以及某些通常未阐明的假设所产生的,这些假设认为存在一个理想的原动机,能够提供维持某个连杆匀速运动所需任意大小的扭矩或力。真正意义上的约束机构动态仿真被认为超出了大学经典运动学知识的范围。然而,这些看法已经有些过时。

在本书中,我们将利用一类以 MATLAB 及其附加软件 Simulink 为代表的面向运动学的计算机软件包。通过综合闭环矢量方程(描述运动约束)、数值仿真(在加速度已知时计算速度和位移)以及矩阵代数(同时计算加速度和约束反力)等内容,本书将引导学生掌握完成一个机构多功能动态仿真所需的基本步骤。这类仿真是很重要的一种设计工具,同时它可为工程技术人员提供设计轴承和构件尺寸时所需的机构内力。

尽管有些教师可能会把本书作为一本独立使用的教材或者作为有实践经验的工程人员的一本参考书,但本书主要是作为大学机械类课程的一本辅助教材。虽然本书的内容是按章依次介绍的,但各章内容相对独立且其先后顺序并不与前面章节的内容相关,例如第 2 章概述了闭环矢量方程及其导数,如果学生已经对这部分知识很熟悉了,就可以跳过这章内容。类似地,第 3 章论述了使用 MATLAB 求解运动学中的非线性位置问题,由于这一问题已在仿真软件隐含求解,因而该章内容也可以跳过去。

下列表格的内容可指导教师如何利用该书各章的内容辅助这一领域其他教科书的学习。

本书与其他作者的通用运动学教材内容的章节对照表

本书 (章)	Shickley & Uicker (章)	Erdamn & Sandor (章)	Mabie & Reinholtz (章)	Norton (章)	Waldron & Kinzel (章)
2	2,3	3	2	2,4	3
3	2	3	2	4	2,3
4	3,4	3,4	8	6,7	2
6	14,15,16	5	9	10,11	11,12
例子研究	5,17,18	6,8	3,11,12	8,9,13,15	

当我写此书时, MATLAB 和 Simulink 已经升级了好几个版本。写作初期我主要依据 MATLAB 4.3 和 Simulink2.0。当书稿完成时, 我已经开始使用 R11.1 版本的 MATLAB/Simulink 软件了。我曾经试图使编写的程序能够向下兼容, 但写作期间版本的升级已经影响了 Simulink 核心的数值积分算法。因此, 为了获得最佳的仿真效果, 我建议读者使用最新版本的软件。

致谢

我要感激帮助过我的朋友和同事, 从他们那里我得到了许多帮助和支持, 由于人数太多, 这里已无法一一列举。我要感谢 John Lamancusa、Joe Sommer 和 Marty Trethewey, 他们的意见和观点启发了本书的写作思路。加州大学戴维斯分校的 Steve Velinsky 在我公休假期间接待了我, 在这段时间完成了本书的大部分内容。本书 Brooks/Cole 公司的编辑 Jonathan Plant 和 Bill Stenquist 鞭策和鼓励我完成了本书的写作。加利福尼亚工业大学(圣路易斯-奥比斯波)的 Bill Murray 在他的课程教学中试用了本书的初稿, 他和他的学生为本书提出了许多很好的意见和建议。Rensselaer 工学院的 Stephen Derby, 佐治亚理工学院的 Imme Ebert-Uphoff, 衣阿华州立大学的 Greg Luecke, 马奎特大学的 Mark Nagurka 和罗得岛大学的 William J. Palm 也提出了意见和建议。我也要感谢 Dina Berkhoff, Matt Lichter, Jenny Rincon, Will Reutzler 和 Gayathri Vijayakumar, 这几位耐心的学生参与了本书初稿的多次修改, 他们的建议使本书的终稿增色不少。

最后, 我必须感谢我的妻子 Barbara Bowling 和我的女儿 Sarah 和 Beth, 她们的支持、关爱和耐心是我永恒的力量源泉。

约翰·F·加德纳

博伊西, 爱达荷

目 录

中译本出版者的话

译者的话

出版者的话

前 言

第 1 章 引言和综述

- 1.1 为何要对机构进行仿真 (1)
- 1.2 运动学仿真 (2)
- 1.3 机构的动力学仿真 (2)
- 1.4 小结 (3)

第 2 章 矢量环与矢量链方程

- 2.1 引言 (4)
- 2.2 平面矢量 (4)
- 2.3 单个闭环方程 (5)
- 2.4 矢量方程的求导 (6)
- 2.5 其他常见的机构 (10)
- 2.6 矢量链 (10)
 - 2.6.1 两连杆平面机器人 (10)
 - 2.6.2 用矢量链描述任意点的运动 (12)
- 2.7 小结 (14)
- 第 2 章习题 (14)

第 3 章 位置问题的求解概述

- 3.1 概述 (16)
- 3.2 非线性代数方程的数值解法 (16)
- 3.3 四连杆机构的位置问题 (17)

3.4	四连杆机构位置问题的 MATLAB 求解	(18)
3.5	位置解与初始估计	(21)
3.6	小结	(24)
	第 3 章习题	(24)

第 4 章 运动学仿真——Simulink 的使用

4.1	什么是运动学仿真	(25)
4.2	通过运动学仿真求解速度	(25)
4.2.1	曲柄滑块机构的闭环矢量方程	(25)
4.2.2	曲柄滑块机构运动学的 Simulink 仿真	(27)
4.2.3	建立初始条件	(30)
4.2.4	仿真结果	(32)
4.3	通过运动学仿真求解加速度	(34)
4.3.1	考虑加速度的仿真	(34)
4.3.2	运行曲柄滑块机构的仿真	(37)
4.4	相容性检验	(40)
4.5	四连杆机构的运动学仿真	(43)
4.6	小结	(47)
	第 4 章习题	(47)

第 5 章 动力学引论

5.1	概述	(49)
5.2	第 1 步:滑块在斜面上的仿真	(49)
5.3	第 2 步:添加摆	(51)
5.4	第 3 步:矩阵方程的组装	(53)
5.5	第 4 步:建立动态仿真	(53)
5.6	第 5 步:设置初始条件并运行仿真程序	(55)
5.7	小结	(57)
	第 5 章习题	(57)

第 6 章 联立约束法

6.1	引言	(59)
6.2	方法概述	(59)
6.2.1	力方程	(60)

6.2.2	闭环矢量方程	(61)
6.2.3	质心加速度的矢量方程	(61)
6.2.4	动态仿真的实现	(62)
6.3	联立约束法在曲柄滑块机构中的应用	(62)
6.3.1	力方程	(63)
6.3.2	闭环矢量方程	(65)
6.3.3	质心加速度	(65)
6.3.4	系统方程的组装	(65)
6.4	曲柄滑块机构的动态仿真	(65)
6.5	曲柄滑块机构的仿真研究	(70)
6.6	小结	(73)
第6章习题		(73)
第7章 两连杆平面机器人		
7.1	概述	(75)
7.2	矢量方程	(75)
7.3	动力学方程	(76)
7.4	联立约束矩阵	(78)
7.5	动态仿真	(79)
7.6	机器人坐标控制	(82)
7.7	小结	(83)
第7章习题		(83)
第8章 可变机构的仿真		
8.1	间歇机构	(84)
8.2	小结	(89)
第9章 抛石机		
9.1	概述	(90)
9.2	矢量环	(92)
9.3	运动方程的建立	(93)
9.4	矩阵方程	(94)
9.5	动态仿真	(94)
9.6	仿真结果	(97)

9.7 小结	(99)
第9章习题	(99)

附录

Simulink 入门辅导	(100)
A.1 启动 Simulink	(100)
A.2 一个简单模型的建立	(101)
A.3 仿真运行	(104)
A.4 仿真运行时间参数	(104)
A.5 初始条件	(106)
A.6 多路信号	(108)
A.7 Simulink 和 MATLAB:返回数据到工作环境	(110)
A.8 使用 MATLAB plot 命令	(113)
A.9 在 Simulink 中使用 MATLAB 函数	(115)
A.9.1 MATLAB 函数	(115)
A.9.2 从 Simulink 中调用函数	(118)
A.9.3 使用多输入和多输出	(120)
A.10 结束语	(125)

索引

第 1 章 引言和综述

1.1 为何要对机构进行仿真

计算机仿真一词是指在研究中利用数学模型来获取系统的一些重要特性参数,这些数学模型通常是由以时间为变量的常微分方程来描述,并用数值方法进行计算机仿真求解的。利用计算机仿真可以对整个机械制造系统及过程进行广泛地研究,如从内燃机到原料市场。本书的宗旨是研究如何利用计算机仿真技术进行机构的运动与动力分析。

一般而言,机构设计的目标之一是能够实现某一预先设定的运动轨迹。在研究机械系统的运动规律时,借助于计算机仿真是十分有益的。但是,大多数有关动力学方面的教科书较少涉及到计算机仿真,只是某些需要对研究对象进行运动方程精确描述的高等动力学教材(如拉格朗日力学或哈密尔顿力学)才对计算机仿真有所体现。本书的主线有两条:一是帮助读者使用已有的计算机仿真软件包来求解动力学方程,即动力学仿真;二是帮助读者利用在大学二年级力学课程中所学的牛顿力学方法建立起完整的动力学仿真数学模型。

在本书中,计算机仿真工具将分为两个层次加以介绍。第一,采用数值积分这一计算机仿真的核心技术,从而回避了机械构件的位置问题,而该问题被认为是运动分析(包括位置分析、速度分析和加速度分析)最困难的部分。在这一部分,读者将了解到如何使用 Simulink 仿真工具箱对具有恒定输入速度和可变输入速度两种工况的机构进行仿真和分析,甚至加速度分析。第二,拓展和提高部分:借助文献^①所述的方法,将闭环矢量方程与动力学的牛顿-欧拉公式相组合,构成一组线性方程并写成矩阵形式,然后进行数值积分,计算出仿真时域内每一时刻的加速度和作用力。这种方法所附带的好处就是提供了更为详尽的运动坐标,其数目多于能够唯一确定机构位置所需的坐标个数。通过对坐标之间的相容性检验,就能够对程序调试和数值积分在执行过程中各自产生的误差进行监测。

^① Huang E J. Intermediate Dynamics. Englewood Cliffs, N J; Prentice Hall, 1992.

1.2 运动学仿真

在本书中,运动学仿真一词的含义是指利用计算机仿真软件包求解机构在所计时间域内的运动学方程,以此确定机构在连续运动过程中各个构件的速度和加速度。运动学仿真要预先知道机构的几何特性,即各构件的长度。图 1-1 为运动学仿真的流程图,它描述了诸如 MATLAB 仿真工具箱 Simulink 等仿真软件包的仿真步骤和流程。

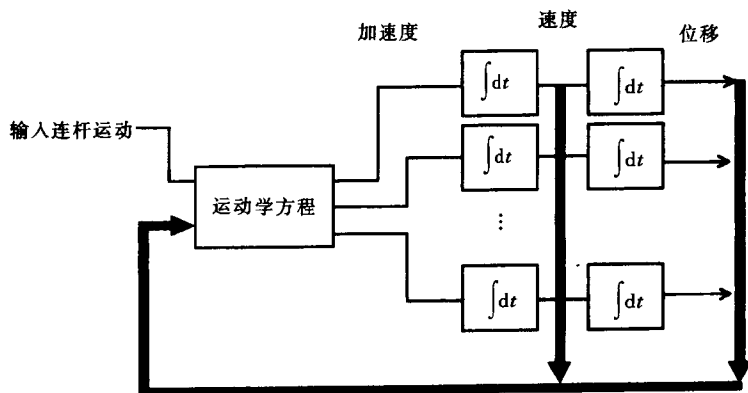


图 1-1 运动学仿真流程框图

在图 1-1 中,标有“运动学方程”的模块为用户自定义程序块,主要用于求解描述机构各构件相互之间加速度关系的运动方程。在第 2 章将要介绍的闭环矢量方程是计算这些运动方程的基础。

运动学仿真方法与传统的运动学问题计算机求解存在着显著的区别。在本书中,仿真软件包中所用的数值积分算法需根据加速度来计算速度和位移。换言之,在该功能模块中必须含有加速度分析和计算。此外,数值积分还应能提供所需的全部速度和位移信息。第 4 章将详尽地讨论这一方法,并以曲柄-滑块机构和四连杆机构为例来阐明其实现过程。

1.3 机构的动力学仿真

如前所述,根据以往的观点,机构的动力学全过程仿真超出了大学低年级学生的动力学教科书范围。实际上,对于含约束系统使用经典的拉格朗日方法进行分析更适合于研究生的教学。另一方面,大学低年级学生对于将牛顿力学用于多刚

体系问题则显得更为熟练。因此,一种更为合理的动力学仿真方法就是应用牛顿力学对每个单独的构件进行力学分析,根据描述机构构件加速度的约束条件建立起力与加速度之间的关系,由此构成关于构件加速度(平动和转动)和约束力的齐次线性代数方程组。再将方程组写成矩阵形式,就可以由仿真软件包求出每一时间的力与加速度。

值得注意的是,该方法与经典的拉格朗日力学或哈密顿力学有一点本质上的区别。在经典方法中,运动方程需要进行降阶。换句话说,由于一个四连杆机构只有一个自由度,因而它的动力学表达式是单一的二阶运动微分方程;另一方面,本书描述的计算机仿真对每一个构件进行二阶运动微分程的求解,因而这些方程的解是彼此相关的。因此,如同本书第4章和第6章所述,这实际上提供了仿真正确性和一致性的外在检验。

图1-2所示的流程框图描述了系统的计算机仿真过程。

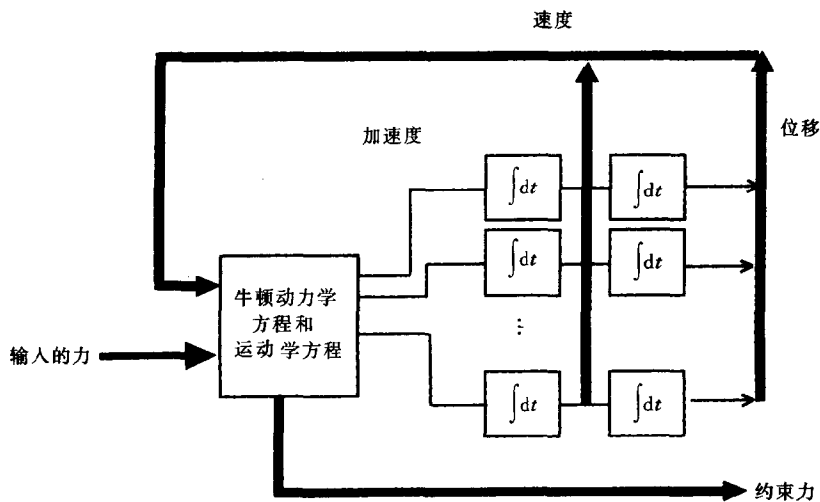


图 1-2 使用联立约束法的机构动力学仿真流程框图

1.4 小结

本书介绍了一种含约束机械系统或机构动力学分析和设计的新方法。本书主要集中阐述利用 MATLAB 仿真工具箱 Simulink 进行动力学仿真,而在第2~第4章和第6章中所介绍的基础理论,对用计算机求解动力学方程的方法而言,这并不是唯一的方法。