



装备科技译著出版基金

Granino A.Korn 著

任翔宇 刘英芝 魏雁飞 刘丽 曲珂 任秋洁 译

Advanced Dynamic-System Simulation

Model Replication and Monte Carlo Studies (second edition)

先进动态系统仿真

——模型复制与蒙特卡罗研究

(第2版)



随书附光盘一张



国防工业出版社
National Defense Industry Press

WILEY



装备科技译著出版基金

先进动态系统仿真

——模型复制与蒙特卡罗研究

(第2版)

Advanced Dynamic-System Simulation

Model Replication and Monte Carlo Studies (second edition)

Granino A. Korn 著

任翔宇 刘英芝 魏雁飞 刘丽 曲珂 任秋洁 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-040 号

图书在版编目(CIP)数据

先进动态系统仿真:模型复制与蒙特卡罗研究:第2版/(美)格拉尼诺·A. 科恩(Granino A. Korn)著;任翔宇等译. —北京:国防工业出版社,2017. 12

书名原文:Advanced Dynamic-System Simulation:Model Replication and Monte Carlo Studies (Second Edition)

ISBN 978-7-118-11455-3

I. ①先… II. ①格… ②任… III. ①动态系统-系统仿真-研究 IV. ①N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 018378 号

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under John Wiley & Sons license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copy-rights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 290 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 75.00 元



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

前言

仿真是指利用模型进行实验。在本书中,我们描述了高效的交互式计算机程序,程序可以模拟动态系统,如控制系统、航空航天器和生物系统等。仿真研究可能会涉及数百个模型的变化,所以程序必须快速,用户界面要友好。

对于利用每个程序动手进行实验的例子,随书光盘含有针对 WindowsTM 和 Linux 的极其有效的开源仿真软件,而不仅仅只是一个小的演示程序。Desire 建模/仿真程序在个人计算机上实现了快速、大型仿真。运行时(Runtime)编译器可以立即显示结果,以进行真实的交互式建模。

可读的数学符号,如:

$$x = 23.4 \mid \alpha = 0$$

$$d/dtx = -x * \cos(w * t) + 2.22 * a * x$$

$$\text{Vector } y = A * x + B * u$$

让读者在无需学习编程语言细节的情况下就可以尝试不同的参数值。注意:读者可以在同一台计算机的显示器上阅读电子书并运行实时仿真。

在第1章中,通过几个熟悉的微分方程模型和一个小型导弹仿真介绍我们的主题。本书其它章节介绍了更高级的主题。我们的绝大多数示例程序都是重新编写的,以明确建模技术,提高计算速度。

第2章以新修订的系统性差分方程编程流程开始,并将该流程应用于带数字控制器的受控体模型。然后,讨论了限幅器、开关和模型等有用的器件,如简单差分方程采样/保持电路、触发电路和信号发生器。最后,但同样重要的,我们提出了简化的开关变量数值积分方法。

先进仿真程序必须利用向量和矩阵赋值处理微分与差分方程。第3章,介绍了 Runtime 向量编译。这加速了常规向量和矩阵运算,但更重要的是,个人计算机现在可以实现模型复制(向量化)(最初为超级计算机技术开发的)。单向量模型运行可以取代数百或数千常规仿真运行。第3章还演示了用户定义的子模型的便利性。

在接下来的章节中,我们描述了向量化的应用。在第4章,讨论了参数影响的研究,并介绍了向量化的统计计算,包括概率密度的快速估计。然后,介绍了蒙特卡罗随机过程仿真。第5章,将蒙特卡罗仿真应用到几个真实的工程系统。向量

化可以使我们去研究随机过程统计的时程。廉价的 64 位 Linux 系统 3GHz 个人计算机可以在 1s 的时间内训练 1000 多个随机输入控制系统模型。

第 6 章和第 7 章,演示了神经网络的向量模型,简单向量符号在短期神经网络培训班上特别有用。在第 6 章,将反向传播、函数连接型和径向基函数网络运用到经典回归与模式分类问题,并介绍了几个竞争学习计划。在此次修订增加的新的第 7 章中,讨论了动态神经网络预测、模式分类和模型匹配。第 7 章包括用于在线预测的新方法和递归网络的简化程序。

第 8 章内容为模糊集控制器、偏微分方程和在风景图上 1000 多个点位上复制的农业生态模型。附录给出了部分正文之外的参考资料。

作者衷心感谢科罗拉多大学的 M. Main 教授(在 Windows 图形上给予了大力协助)、莱布尼兹农业景观研究中心(ZALF)的 R. Wieland 博士(提出了许多很好的建议)以及 Theresa M. Korn(她在此项目及其他项目上给予了持续的帮助)。

格拉尼诺 A. 科恩(Granino A. Korn)
于华盛顿韦纳奇(Wenatchee, Washington)

目 录

第 1 章 动态系统模型与仿真	1
1.1 仿真是指利用模型进行实验	1
1.1.1 仿真与计算机程序	1
1.1.2 动态系统模型	2
1.1.3 实验协议定义仿真研究	3
1.1.4 仿真软件	4
1.1.5 交互式建模快速仿真程序	4
1.2 仿真运行剖析	8
1.2.1 动态系统时程的定期采样	8
1.2.2 数值积分	10
1.2.3 采样时间和积分步长	11
1.2.4 排序定义变量的赋值	11
1.3 简单应用程序	12
1.3.1 振荡器和计算机显示器	12
1.3.2 利用可变步长积分进行空间飞行器轨道仿真	16
1.3.3 种群动态模型	17
1.3.4 拼接多个仿真运行:台球仿真	19
1.4 控制系统仿真简介	20
1.4.1 电机磁场延迟和饱和电气伺服机构	20
1.4.2 控制系统频率响应	23
1.4.3 简单导弹仿真(参考文献[12-15])	23
1.5 停下来思考一下	27
1.5.1 现实世界的仿真:忠告	27
参考文献	28
第 2 章 差分方程、限幅器和开关模型	29
2.1 采样数据系统和差分方程	29
2.1.1 采样数据差分方程系统	29

2.1.2	一阶差分方程求解系统	30
2.1.3	微分方程和采样数据运算相结合的模式	32
2.1.4	简单例子	33
2.1.5	初始化和重置采样数据变量	34
2.2	两个混合连续/采样数据系统	34
2.2.1	数字控制制导鱼雷	34
2.2.2	带有数字 PID 控制器的受控体的仿真	35
2.3	带限幅器和开关的动态系统模型	37
2.3.1	限幅器、开关和比较器	37
2.3.2	开关和限幅器输出、事件预测和显示问题的积分	40
2.3.3	用采样数据赋值	41
2.3.4	阶梯运算符和启发式积分步长控制	41
2.3.5	例子: Bang-Bang 伺服机构的仿真	42
2.3.6	限幅器、绝对值和最大值/最小值选择(参考文献[7-10])	42
2.3.7	输出受限的积分(参考文献[4])	44
2.3.8	模拟信号的量化(参考文献[10])	44
2.4	利用递归赋值的高效器件模型	45
2.4.1	递归开关和限幅器运算	45
2.4.2	跟踪/保持仿真	46
2.4.3	最大值和最小值的保持(参考文献[9])	46
2.4.4	简单的间隙和迟滞模型(参考文献[9])	47
2.4.5	迟滞比较器(施密特触发器)(参考文献[8,9])	48
2.4.6	信号发生器和信号调制(参考文献[7-9])	49
	参考文献	51
第 3 章	快速向量-矩阵运算与子模型	52
3.1	数组、向量和矩阵	52
3.1.1	数组和下标变量	52
3.1.2	实验协议中的向量和矩阵	53
3.1.3	时程数组	53
3.2	向量和模型复制	54
3.2.1	DYNAMIC 程序段中的向量运算: 向量化编译器 (参考文献[1])	54
3.2.2	向量表达式中的矩阵向量积	55
3.2.3	索引-移位运算	57

3.2.4	排序向量和下标变量赋值	58
3.2.5	动态系统模型的复制	58
3.3	更多向量运算	59
3.3.1	和、点积和向量范数	59
3.3.2	最大值/最小值的选择和屏蔽	60
3.4	向量等价声明简化模型	61
3.4.1	子向量	61
3.4.2	矩阵-向量的等价	61
3.5	动态系统模型中的矩阵运算	62
3.5.1	简单矩阵赋值	62
3.5.2	二维模型复制	62
3.6	物理学和控制系统问题中的向量	63
3.6.1	物理学问题中的向量	63
3.6.2	核反应堆的向量模型	63
3.6.3	线性变换和旋转矩阵	65
3.6.4	线性控制系统的状态方程模型	66
3.7	用户定义的函数和子模型	66
3.7.1	简介	66
3.7.2	用户定义的函数	66
3.7.3	子模型的声明和调用(参考文献[5])	67
3.7.4	采样数据赋值、限幅器和开关的处理	69
	参考文献	69

第4章 高效参数-影响的研究及统计数据的计算

4.1	模型复制可以简化参数-影响的研究	70
4.1.1	探索参数变化的影响	70
4.1.2	重复仿真运行和模型复制	70
4.1.3	对参数-影响研究的编程	73
4.2	统计数据	76
4.2.1	随机数据和统计数据	76
4.2.2	样本均值和统计相对频率	77
4.3	通过向量平均来计算统计数据	77
4.3.1	样本均值的快速计算	77
4.3.2	快速概率估计	78
4.3.3	快速概率密度估计(参考文献[2,5])	78

4.3.4 采样范围的估计	83
4.4 复制的均值生成抽样分布	83
4.4.1 通过时间平均计算统计数据	83
4.4.2 样本复制和抽样分布统计数据	83
4.5 随机过程仿真	87
4.5.1 随机过程和蒙特卡罗仿真	87
4.5.2 随机参数和随机初始值的建模	88
4.5.3 采样数据随机过程	89
4.5.4 “连续”随机过程	89
4.5.5 模拟的噪声问题(参考文献[12-14])	91
4.6 简单的蒙特卡罗实验	92
4.6.1 简介	92
4.6.2 赌博回报	92
4.6.3 连续随机漫步的向量化蒙特卡罗研究(参考文献[3])	95
参考文献	98
第5章 真实动态系统蒙特卡罗仿真	100
5.1 简介	100
5.1.1 概述	100
5.2 重复运行蒙特卡罗仿真	100
5.2.1 重复仿真运行的运行结束统计数据	100
5.2.2 例子:火炮仰角误差对 1776 加农炮炮弹弹道的影响	101
5.2.3 顺序蒙特卡罗仿真	103
5.3 向量化蒙特卡罗仿真	104
5.3.1 1776 加农炮炮弹的向量化蒙特卡罗仿真	104
5.3.2 组合式向量化和重复运行蒙特卡罗仿真	106
5.3.3 交互式蒙特卡罗仿真:用 DYNAMIC 程序段 DOT 运算计算统计 数据运行时长	107
5.3.4 例子:鱼雷弹道的离差	108
5.4 含噪控制系统的仿真	110
5.4.1 非线性伺服系统蒙特卡罗仿真:噪声输入测试	110
5.4.2 由噪声引起的控制系统误差蒙特卡罗研究	112
5.5 其他主题	115
5.5.1 蒙特卡罗优化	115
5.5.2 方便的启发式伪随机噪声测试方法	115

5.5.3 蒙特卡罗仿真的备选方法	115
参考文献	116
第6章 神经网络的向量模型	117
6.1 人工神经网络	117
6.1.1 简介	117
6.1.2 人工神经网络	117
6.1.3 静态神经网络:训练、验证和应用	118
6.1.4 动态神经网络	119
6.2 简单向量赋值模拟神经元层	119
6.2.1 神经元层声明和神经元运算	119
6.2.2 神经元层级联简化偏置输入	120
6.2.3 归一化和对比度增强层	120
6.2.4 多层网络	121
6.2.5 运行神经网络模型	122
6.3 有监督的回归训练	124
6.3.1 均方回归	124
6.3.2 反向传播网络	127
6.4 更多神经网络模型	133
6.4.1 函数连接型网络	133
6.4.2 径向基函数网络	133
6.4.3 神经网络子模型	135
6.5 模式分类	136
6.5.1 简介	136
6.5.2 来自文件的分类器输入	136
6.5.3 分类器网络	137
6.5.4 例子	139
6.6 模式的简化	146
6.6.1 模式中心的确定	146
6.6.2 特征约简	146
6.7 网络训练问题	148
6.7.1 学习速率的调整	148
6.7.2 过拟合和泛化	148
6.7.3 逾越简单梯度下降	149

6.8	无监督的竞争层分类器	150
6.8.1	模板-模式匹配和 CLEARN 运算	150
6.8.2	用心学习	153
6.8.3	竞争学习实验	154
6.8.4	简化的自适应谐振仿效	154
6.9	有监督的竞争学习	157
6.9.1	双向分类 LVQ 算法	157
6.9.2	对向传播网络	157
6.10	CLEARN 分类器的例子	158
6.10.1	已知模式的识别	158
6.10.2	学习未知模式	162
	参考文献	164
第7章	动态神经网络	166
7.1	简介	166
7.1.1	动态和静态神经网络	166
7.1.2	动态神经网络的应用	166
7.1.3	神经网络和微分方程模型相结合的仿真	167
7.2	延迟线输入神经网络	167
7.2.1	简介	167
7.2.2	延迟线模型	168
7.2.3	延迟线输入网络	169
7.2.4	使用伽马延迟线	171
7.3	用作动态网络的静态神经网络	172
7.3.1	简介	172
7.3.2	简单的反向传播网络	172
7.4	递归神经网络	173
7.4.1	层反馈网络	173
7.4.2	简化的将上下文和输入层相结合的递归-网络模型	174
7.4.3	反馈延迟线神经网络	176
7.4.4	教师强制	177
7.5	预测器网络	177
7.5.1	离线预测器训练	177

7.5.2	真实在线预测的在线训练	179
7.5.3	预测实验的混沌时序	181
7.5.4	预测器网络图库	182
7.6	动态网络的其他应用	188
7.6.1	时态模式识别:回归与分类	188
7.6.2	模型匹配	190
7.7	其他主题	193
7.7.1	生物-网络软件	193
	参考文献	194
第8章	向量模型的更多应用	195
8.1	用对数图进行向量化仿真	195
8.1.1	欧洲仿真联合会(EUROSIM)1号基准问题	195
8.1.2	用对数图进行向量化仿真	195
8.2	模糊逻辑函数生成器的建模	197
8.2.1	规则表指定启发式函数	197
8.2.2	模糊集逻辑	198
8.2.3	模糊集规则表和函数生成器	201
8.2.4	用模糊基函数简化的函数生成	202
8.2.5	模糊集划分的向量模型	202
8.2.6	多维模糊集划分的向量模型	204
8.2.7	实例:伺服机构的模糊逻辑控制	204
8.3	偏微分方程(参考文献[11,12])	209
8.3.1	直线法	209
8.3.2	向量化直线法	209
8.3.3	柱面坐标中的热传导方程	213
8.3.4	概论	215
8.3.5	简单热交换器模型	215
8.4	傅里叶分析和线性系统动态	217
8.4.1	简介	217
8.4.2	函数表查找和插值	218
8.4.3	快速傅里叶变换运算	218
8.4.4	线性伺服机构的脉冲和频率响应	219

8.4.5 线性动态系统的紧凑型向量模型(参考文献[14])	222
8.5 在地图网格上复制农业生态模型	225
8.5.1 地理信息系统	225
8.5.2 景观特征演变的建模	226
8.5.3 地图网格上的矩阵运算	226
参考文献	229
附录	231
A. 其他参考资料	231
参考文献	236
B. 使用随书光盘	236

第 1 章 动态系统模型与仿真

1.1 仿真是指利用模型进行实验

1.1.1 仿真与计算机程序

仿真是指利用模型进行的实验。它不仅仅通过创建、修改各种各样的模型开展系统设计、研究和教学,而且还要存储和访问大量结果数据。这些只能利用计算机编程的模型实现(参考文献[1,2])。

在本书中,我们用时间模拟系统变量的变化,用仿真时间变量 t 代表物理时间。那么,我们的模型将尝试预测系统变量(如速度、电压和生物量)不同的时程, $y1=y1(t), y2=y2(t), \dots$ 。静态模型只是简单地将同一时间的多个系统变量的值 $(x(t), y(t), \dots)$ 关联起来,例如,气压 $P(t)$ 可能是缓慢变化的温度 $T(t)$ 的函数 $P=aT$ 。

通过把模型系统状态变量 $x1(t), x2(t), \dots$ 的值与它们过去的状态 $[x1(t), x2(t), \dots]$ 关联起来,动态系统模型即可预测出状态变量的值(见 1.1.2 节)。此类系统的计算机仿真最初被应用于航空工业领域,现在,不仅所有工程领域离不开仿真,就连生物学、医学以及农业生态学也离不开仿真技术。同时,离散事件仿真在商业和军事规划方面具有重要意义。

把仿真与数学分析结合起来是最为有效的仿真方法。对于很难或不能进行精确分析的,仿真常常会提供一些灵感和有用的建议。对于许多早期控制系统的优化组合确实如此。再如,蒙特卡罗仿真简单地通过对重复实验的统计数据进行测量,就可以解决利用显式概率理论分析难以解决的复杂问题。最终所有仿真结果必须通过实际实验加以验证,就像分析结果一样。

为了实验人员方便,计算机仿真可以加速,也可以减速,人们可以模拟 1s 内飞至火星或半人马座阿尔法星(Alpha Centauri)。将适当缩比的仿真与实时同步的周期性时钟中断使“硬件在回路”实验得以进行;通过计算机飞行仿真,可以让置于倾斜工作台上的一架真正自动驾驶仪(或一名飞行员)“飞行”。在本书中,我们关注的是快速仿真,因为我们需要研究各种不同模型的快速变化。尤其是我们将:

(1) 在便捷的编辑窗口中输入并编辑程序;

(2) 用键入的命令或图形界面命令启动、暂停和停止仿真,选择显示内容以及参数变化,仿真结果应能立即显示出来,以便对模型变化产生的影响提供直观“感受”(交互式建模);

(3) 对程序进行系统的参数优化,旨在研究、生成交会图和统计数据等。

1.1.2 动态系统模型

1. 差分方程模型^①

将状态变量 $x=x(t)$ 的当前值 $x(t)$ 与过去值 $x(t-\Delta t)$ 关联起来的最简单的方法是差分方程,如简单的递推:

$$x(t) = F[x(t), x(t-\Delta t)]$$

更多的综合差分方程模型能将几个状态变量与它们的过去值关联起来,我们将在第2章详细讨论这类模型。

2. 微分方程模型

许多经典的物理和工程分析建立在微分方程模型的基础上,这种模型将连续的微分方程状态变量 $x_1(t), x_2(t), \dots$ 的延迟的相互作用与一阶常微分方程关联起来(状态方程)^②,即

$$(d/dt)x_i = f_i(t; x_1, x_2, \dots; y_1, y_2, \dots; a_1, a_2, \dots) \quad (i=1, 2, \dots) \quad (1-1a)$$

式中: t 仍然代表时间,以及

$$y_j = g_j(t; x_1, x_2, \dots; y_1, y_2, \dots; b_1, b_2, \dots) \quad (j=1, 2, \dots) \quad (1-1b)$$

是定义的变量。 $a_1, a_2, \dots$ 和 $b_1, b_2, \dots$ 是常量模型参数。

由计算机实现的仿真运行可以执行诸如通过求解状态方程系统(式(1-1))获得系统两个变量 $x_i = x_i(t)$ 和 $y_j = y_j(t)$ 从 $t=t_0$ 到 $t=t_0+T_{MAX}$ 过程的模型。给定一个初始值 $x_i = x_i(t_0)$, 积分例程逐渐增加模型的时间 t , 并对导数(式(1-1a))进行积分,就能得到 $x_i(t)$ 的连续值(1.2.2节)。

每个状态变量 x_i 就是一个模型输出。定义的变量 y_j 有3种类型:

- (1) 模型输入(指定的时间 t 的函数);
- (2) 模型输出;
- (3) 需要计算导数 f_i 的中间结果。

^① 一般来说,我们用微分方程表示回归关系,但是某些作者用显式有限差分这个术语描述这种关系(参考文献[11])。

^② 我们通过引入作为附加状态变量的导数将高阶微分方程换算为一阶系统,这样, $d^2x/dt^2 = -kx$ 变成了 $dx/dt = \dot{x}$, $d\dot{x}/dt = -kx$ (另请参见1.3.1节)。

定义变量的赋值(式(1-1b))必须分类至某个过程中,这样就不需要利用“代数环”,而是通过状态变量 x_i 的当前值、已计算得出的 y_j 的值和/或 t 得到 y_j 的所有更新值(1.2.4节)。

一些动态系统(如汽车工程和机器人中的联动装置等系统)采用微分方程进行模拟,但微分方程不能像方程式(1-1a)那样,显式求解状态变量的导数,那么,仿真就需要在每个积分步长都有一个代数方程解。本书不涉及这样的微分代数方程系统,参考文献[6-11]给出了适宜的数学方法和专用软件。

3. 讨论

许多经典物理学(牛顿力学、电路理论、化学反应)都会用到微分方程,因此,大部分传统仿真程序基本上都是微分方程解算器,并将差分方程归类为附属“过程”程序段。尽管如此,现代工程系统往往要用到数字控制器和采样数据运算,它们都要利用差分方程实现。在本书中,介绍了一个专门为处理此类问题而设计的程序包。在第1章中,引入了微分方程问题,在第2章中,将继续探讨差分方程以及混合连续/采样数据模型。

1.1.3 实验协议定义仿真研究

有效的计算机仿真并非仅仅是设计模型方程这么简单,它还必须真正能便于修改模型并能尝试进行多次不同的实验(另请参见1.1.5节)。除了像1.1.2节中那样列出模型方程的程序段外,每次仿真都需要一个实验协议程序,实验协议程序能设置和改变初始条件及参数,调用微分方程求解仿真运行,并且能显示或列出解答答案。

简单的实验协议可以实现如下一系列连续的命令:

$a = 20.0$ | $b = -3.35$ (设置参数值)

$x = 12.0$ (设置 x 的初始值)

drun(进行一次微分方程求解仿真运行)

reset(重置初始值)

$a = 20.1$ (改变模型参数)

$b = b - 2.2$

drun(尝试另一次仿真运行)

...

每个 drun 命令调用一次新的仿真运行,命令 reset 为每次新的运行重置初始条件。

命令解释器立即执行键入的命令。每次仿真运行结束后,用户可以检查算法输出,然后为下次运行输入新的命令。命令模式操作允许进行交互式编程和程序

调试(参考文献[2])。

图形用户界面(GUI)仿真程序利用窗口进行模型参数输入,利用菜单和/或按键通过鼠标点击执行 run 和 reset 等诸如此类的命令,从而取代键入的命令。这方便了带有简单实验协议的特殊用途仿真程序。在控制窗口(命令窗口)键入的命令和编程命令使操作人员可以有更多的运行操作选择。

编程仿真研究可以将实验协议命令与称为实验协议脚本的存储程序结合起来,这样的程序可下达分支命令和循环命令来重复调用仿真运行程序(如为了进行参数优化或统计研究)。适用的实验协议脚本依赖于成熟的带有函数、过程、程序循环、条件执行和文件操作的计算机语言。

仿真研究涉及许多模型和参数变化,因此程序运行必须及时快速。我们可以解释实验协议脚本,但实现仿真运行的“动态”(Dynamic)程序段成百上千次地更新系统变量,必须对此类时敏操作进行编译^①。

1.1.4 仿真软件

面向方程的仿真程序(如 ACSLTM)接受采用人类可读的符号编写的模型方程,根据需要排序定义变量赋值,并将排序的方程馈入 Fortran 或 C 编译器中(参考文献[1])。伯克利·麦当娜(Berkeley Madonna)和 Desire(见下面内容)拥有运行时方程语言编译器,并能立即执行。框图解释程序(如 SimulinkTM和免费的开源 Scicoslab 程序)使用户能在显示屏上编辑框图模型。这种程序能立即执行解释的仿真运行,但速度相对慢一些。为了提高计算速度,大多数框图解释程序接受为复杂的表达式预编译的方程语言块,正式运行有时被翻译为 C 语言。此外,ACSL、Easy5TM和伯克利·麦当娜都有编译仿真程序的框图预处理程序。微分代数(DAE)模型需要更复杂的软件,这些复杂软件能更好地利用 Modelica 语言(参考文献[3-6])。DynasimTM和 MaplesimTM就是实例。

1.1.5 交互式建模快速仿真程序

本书中的程序采用的是随书光盘中的开源 Desire^② 仿真软件^③,命令脚本和模型描述采用的是一种类似 Basic 的自然数学符号,如:

$$y = a * \cos(x) + b \qquad d/dt \ x = -x + 4 * y$$

① 解释程序将单个命令逐一翻译成计算机机器语言。编译器通过翻译完整的程序段加速程序的执行。

② Desire 代表“实时直接执行仿真”(direct executing simulation in real time)。

③ 程序包的更新版本可从 www.sites.google.com/site/gatmkorn 免费下载。