21 Century 21世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information Science and Technology

计算机仿真技术

——MATLAB在电气、自动化专业中的应用

隋 涛 刘秀芝 编著



附赠电子教案

http:// www.cmpedu.com

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

计算机仿真技术

——MATLAB 在电气、自动化专业中的应用

隋　涛　刘秀芝　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍 MATLAB 与 Simulink 及其在电气、自动化专业的仿真应用。全书分为三大部分：第一部分概述了计算机仿真的基本原理和概念，简单介绍了计算机仿真技术的算法和软件；第二部分介绍了 MATLAB 与 Simulink 的基本用法；第三部分内容包括自动控制原理、过程控制、电力电子技术、交直流调速、电力系统等课程中 MATLAB 的基本应用。

本书涉及面较广，可以作为电气工程及其自动化、自动化、工业自动化、过程自动化等相关专业高校师生及技术研究人员、工程师的教材和实际应用参考书。

本书配套授课电子课件，需要的教师可登录 www. cmpedu. com 免费注册、审核通过后下载，或联系编辑索取（QQ：308596956，电话：010 - 88379753）。

图书在版编目（CIP）数据

计算机仿真技术：MATLAB 在电气、自动化专业中的应用/隋涛，刘秀芝编著 . —北京：机械工业出版社，2015. 7
21 世纪高等院校电气信息类系列教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 50352 - 1

Ⅰ. ①计… Ⅱ. ①隋… ②刘… Ⅲ. ①计算机仿真 - Matlab 软件 - 高等学校 - 教材 Ⅳ. ①TP391. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 112202 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：时 静 责任编辑：汤 枫
责任校对：张艳霞 责任印制：刘 岚
涿州市京南印刷厂印刷

2015 年 7 月第 1 版 · 第 1 次
184mm × 260mm · 14 印张 · 342 千字
0001 - 1… 册
标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 50352 - 1
定价：33.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：（010）88379833	机 工 官 网：www. cmpbook. com
读者购书热线：（010）88379649	机 工 官 博：weibo. com/cmp1952
	教育服务网：www. cmpedu. com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www. golden - book. com

出 版 说 明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21 世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教学情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前　言

随着科学技术的飞速发展，系统的研究已经向着规模化、复杂化和智能化的方向发展，而作为系统研究重要手段的计算机仿真技术也已经深入到科学研究的各个领域。在电气、自动化专业学习和研究中，各种软硬件的仿真手段层出不穷，本书结合目前的教学和工程实际，对计算机仿真技术进行基本的介绍，着重介绍常用的计算机仿真计算软件——MATLAB及其Simulink，并对其在电气、自动化专业课程的相关应用分别进行介绍。考虑到计算机仿真技术通常是在专业课程开始以前进行授课，故在本书中对于专业课程的仿真计算仅仅介绍其基本模块和一些实例及其操作，而对于专业知识的介绍未有涉及。

本书主要包含以下三个部分的内容：

1）计算机仿真技术的基本知识。介绍系统及模型的概念、计算机仿真算法的基础知识及常见的计算机仿真的软件。

2）MATLAB及其Simulink的组成及操作。介绍MATLAB及其Simulink的基本知识、常见的操作，以及一些特殊功能，如符号运算、S－函数等。

3）MATLAB在各个专业课程中的基本操作及应用。主要介绍自动控制理论、过程控制、电力电子技术、交直流调速、电力系统分析等专业课程的基于MATLAB的计算机仿真技术的基本应用。

本书结合作者多年计算机仿真及其他专业课程教学的讲义，适合进行课堂的教学。全书由隋涛和刘秀芝编写完成，其中隋涛编写第1～5、9、10章的内容，刘秀芝编写第6～8章的内容。本书的出版得到了山东科技大学名校工程建设的大力支持，孔维维、宫涛、卢武、刘灿、袁娜、郭红静、孔苓青、王竟沣等同学在本书的编辑工作中也提供了很大帮助，在此表示感谢。本书写作过程中，参考了许多文献，除参考文献中所列的文献以外，还有许多来自于网络，无法一一注明出处，在此向原作者表示感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位读者给予指正。

编　者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　计算机仿真技术 …… *1*
1.1　系统与系统模型 …… *1*
1.1.1　系统的概念 …… *1*
1.1.2　系统研究的方法 …… *2*
1.1.3　模型的建立 …… *3*
1.2　仿真及计算机仿真三要素 …… *6*
1.2.1　仿真的定义 …… *6*
1.2.2　计算机仿真的目的和作用 …… *7*
1.2.3　计算机仿真系统的三要素 …… *7*
1.2.4　仿真的分类 …… *8*
1.3　连续系统仿真概论 …… *8*
1.3.1　连续系统仿真模型 …… *9*
1.3.2　连续系统的仿真数字算法初步 …… *10*
1.3.3　几种常用的积分法 …… *10*
1.3.4　算法误差和稳定性问题 …… *13*
1.3.5　算法的比较和选择 …… *15*
1.4　计算机仿真软件 …… *15*
1.4.1　计算机仿真软件发展 …… *16*
1.4.2　以数学模型为基础的仿真软件 …… *17*
1.4.3　以硬件模型为基础的仿真软件 …… *17*
第 2 章　MATLAB 基础知识 …… *19*
2.1　MATLAB 简介 …… *19*
2.1.1　MATLAB 概述 …… *19*
2.1.2　MATLAB 的构成 …… *19*
2.1.3　MATLAB 的特点及优势 …… *20*
2.1.4　部分 MATLAB 常见窗口界面 …… *21*
2.2　MATLAB 的基本操作 …… *24*
2.2.1　MATLAB 语言结构 …… *24*
2.2.2　MATLAB 常用命令 …… *25*
2.3　MATLAB 变量及运算 …… *28*
2.3.1　矩阵变量及元素 …… *28*

2.3.2 矩阵的基本运算 …… 31
2.4 常用函数和初等矩阵计算 …… 36
2.4.1 常用函数 …… 36
2.4.2 初等矩阵计算 …… 37
2.5 基本绘图方法 …… 39
2.5.1 二维平面图形 …… 40
2.5.2 三维立体图形 …… 46
2.5.3 其他图形函数绘图 …… 49
2.5.4 符号表达式绘图 …… 50
2.5.5 动画 …… 51
2.6 常见人机交流和输入输出函数 …… 52
2.6.1 注释语句的输入和显示 …… 52
2.6.2 输入函数 …… 52
2.6.3 数字与字符串的输出 …… 53
第3章 M文件和MATLAB开发环境 …… 55
3.1 MATLAB的M文件 …… 55
3.1.1 文本文件 …… 55
3.1.2 函数文件 …… 56
3.1.3 变量作用域 …… 57
3.2 流程控制语句 …… 58
3.2.1 顺序结构 …… 58
3.2.2 分支结构 …… 59
3.2.3 循环结构 …… 61
3.2.4 try语句 …… 64
3.3 MATLAB与其他软件的关系 …… 65
3.3.1 操作系统的日期与时间 …… 65
3.3.2 文件的操作 …… 66
3.3.3 图形文件的转储 …… 66
3.3.4 与文字或数据处理系统之间的关系 …… 67
3.4 MATLAB的文件管理系统 …… 68
3.4.1 安装后的MATLAB文件管理系统 …… 68
3.4.2 MATLAB自身的用户文件格式 …… 68
3.4.3 文件管理和搜索路径 …… 69
3.4.4 搜索顺序 …… 69
第4章 其他常规函数库 …… 70
4.1 数据分析函数库 …… 70
4.1.1 数据统计处理 …… 70
4.1.2 用于场论的数据分析 …… 73
4.2 多项式函数库 …… 74

4.2.1 特征多项式 …… 74
4.2.2 多项式运算 …… 75
4.2.3 多项式拟合 …… 76
4.2.4 多项式插值 …… 77
4.2.5 线性微分方程的解 …… 79
4.3 函数功能和数值积分函数库（funfun） …… 81
4.3.1 任意函数的数值积分 …… 81
4.3.2 任意函数的数值微分 …… 82
4.4 字符串函数库（strfun） …… 83
4.4.1 字符串赋值和格式转换 …… 83
4.4.2 字符串语句的执行 …… 84
4.4.3 字符串的输出 …… 84
4.5 符号数学工具箱 …… 84
4.5.1 符号变量和表达式的建立 …… 85
4.5.2 符号表达式的运算和操作 …… 87
4.5.3 符号极限、微积分和级数求和 …… 93
4.5.4 符号积分变换 …… 95
4.5.5 图形化的符号函数计算器 …… 96
第5章 Simulink 基础 …… 98
5.1 Simulink 入门 …… 98
5.1.1 Simulink 模块构造和工作原理 …… 98
5.1.2 Simulink 启动及窗口 …… 99
5.1.3 Simulink 的基本模块简介 …… 101
5.1.4 Simulink 的基本建模过程 …… 105
5.1.5 示波器的设置 …… 107
5.2 Simulink 基本操作 …… 108
5.2.1 模块文件的操作 …… 108
5.2.2 模块的操作 …… 109
5.2.3 子系统的生成与操作 …… 113
5.2.4 仿真运行操作 …… 114
5.3 仿真参数设置 …… 114
5.3.1 仿真算法 …… 115
5.3.2 仿真参数设置 …… 116
5.3.3 Data Import/Export 选项卡参数设置 …… 116
5.3.4 Diagnostics 选项卡参数设置 …… 117
5.3.5 其他选项卡 …… 119
5.4 S－函数 …… 119
5.4.1 S－函数概述 …… 119
5.4.2 S－函数工作原理 …… 120

5.4.3 S－函数的模板程序 …… 120
第6章 MATLAB在自动控制原理中的应用 …… 128
6.1 系统的数学模型 …… 128
6.1.1 连续系统的模型 …… 128
6.1.2 模型转换 …… 129
6.2 控制系统工具箱和LTI对象 …… 130
6.2.1 LTI对象 …… 131
6.2.2 LTI模型对象生成及转换 …… 134
6.2.3 LTI典型对象的生成 …… 135
6.2.4 LTI典型对象模型检测 …… 136
6.2.5 LTI连续系统模型和离散系统模型之间的转换 …… 137
6.3 控制系统模型的组合连接 …… 137
6.4 控制系统分析函数 …… 141
6.4.1 控制系统时域分析函数 …… 141
6.4.2 控制系统频域分析函数 …… 145
6.5 控制系统分析及校正 …… 149
6.5.1 控制系统时域稳定性分析 …… 150
6.5.2 控制系统校正 …… 154
6.6 现代控制论的应用 …… 157
6.6.1 线性系统的标准型及能观能控的分解 …… 157
6.6.2 控制系统李雅普诺夫稳定性分析 …… 161
6.6.3 现代控制系统的校正 …… 162
第7章 MATLAB在过程控制中的应用 …… 166
7.1 过程控制中常用的仿真模块 …… 166
7.1.1 延迟特性的处理及模块介绍 …… 166
7.1.2 PID控制器及模块介绍 …… 168
7.2 MATLAB在过程控制中的具体应用 …… 170
7.2.1 串级控制系统的MATLAB计算及仿真 …… 170
7.2.2 大林算法MATLAB计算及仿真 …… 171
7.2.3 前馈控制MATLAB计算及仿真 …… 172
第8章 MATLAB在电力电子技术中的应用 …… 174
8.1 电力电子器件 …… 174
8.1.1 电力二极管 …… 174
8.1.2 晶闸管 …… 175
8.1.3 门极关断晶闸管 …… 176
8.1.4 绝缘栅双极性晶体管 …… 177
8.2 其他常用电力电子仿真模块 …… 178
8.2.1 整流桥模型 …… 178
8.2.2 同步脉冲触发器 …… 180

8.2.3 PWM 发生器 …… 180
8.2.4 Powergui …… 182
8.2.5 Multimeter …… 183
8.3 MATLAB 在电力电子技术中的具体应用 …… 184
8.3.1 交流电压信号叠加模型 …… 184
8.3.2 晶闸管斩波电路模型 …… 185
8.3.3 直流升压变换器模型 …… 186
8.3.4 晶闸管三相桥式整流器模型 …… 188
第 9 章 MATLAB 在交直流调速中的应用 …… 191
9.1 交直流调速基本模块 …… 191
9.1.1 直流电动机模块 …… 191
9.1.2 交流电动机模块 …… 192
9.1.3 交流电动机测量模块 …… 193
9.2 MATLAB 在交直流调速系统的具体应用 …… 194
9.2.1 开环直流电动机直接起动 …… 194
9.2.2 开环直流调速系统 …… 195
9.2.3 双闭环直流调速系统 …… 197
9.2.4 交流电动机直接全压起动系统 …… 199
9.2.5 交流电动机 PWM 开环调速系统 …… 200
第 10 章 MATLAB 在电力系统中的应用 …… 202
10.1 电力系统基本模块 …… 202
10.1.1 交流电压源 …… 202
10.1.2 交流电流源 …… 203
10.1.3 三相电源元件 …… 203
10.1.4 串、并联 *RLC* 支路元件 …… 204
10.1.5 串、并联 *RLC* 负载元件 …… 204
10.1.6 集中参数输电线路元件 …… 206
10.1.7 分布参数输电线路元件 …… 206
10.1.8 断路器元件 …… 206
10.1.9 变压器元件 …… 207
10.1.10 Park 变换模块 …… 208
10.2 MATLAB 在电力系统中的具体应用 …… 208
10.2.1 单相供电线路 π 型网络系统 …… 208
10.2.2 线性变压器供电系统 …… 210
10.2.3 三相供电负载变化及线路短路分析系统 …… 211
参考文献 …… 214

第 1 章　计算机仿真技术

1.1　系统与系统模型

1.1.1　系统的概念

在生活、工作等各个方面，我们都离不开系统这样一个话题，它是人们认识世界、改造世界的过程中对某个事物、某个事件进行分析研究及改造的一个载体。作为计算机仿真技术的载体和研究对象，系统是计算机仿真技术中不可或缺的部分，只有确定好系统的内涵和外延才能够对科学研究及工程设计的各个方面进行归纳综合、协同、集成等方面的工作，而对于研究对象的本身，由于各个专业、各个层次的研究目标不同，对于系统的定义往往千差万别，作为一般的系统可以定义为：相互关联又相互作用着的对象的有机组合，该有机组合能够完成某项任务或实现某个预定的目标。

从以上定义可以看出，作为科学研究及工程设计的系统主要由以下三个要素组成：

（1）对象

系统是由一些相互联系的对象组合而成的，这些对象又称为实体。它可以是一个物理实体，也可以是一个经济运行的某个模式。例如，一个水温控制系统就是由比较器、调节器、水罐及水、温度传感器等装置组合而成的。

（2）属性

组成系统的每个对象特定的属性。水温控制系统中的温度、偏差值、干扰量、燃料量等就是实体的属性。

（3）活动

对象之间的相互关联、相互作用以及为完成某个目标而进行系统内部和外部之间的互动，都是系统的活动。在温度控制系统中，以调节电压或燃料的输入量作为主要的活动。

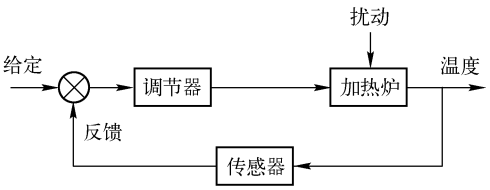


图 1-1　加热炉温控系统框图

以上这些构成了系统的三个要素，系统就可以完成某项任务或实现某个预定的目标，达到研究和设计的目的。例如，控制某个加热的锅炉水温达到 100℃，其系统框图如图 1-1 所示。

系统的定义及分类千差万别，如果从工程应用的角度出发，可以将系统分为工程系统和非工程系统。

1. 工程系统（电气、机电、化工等）

工程系统一般是指可以利用一些物理、化学等客观规律来进行系统的概括和研究的系统。这也是本章主要介绍的部分。例如，一个复杂的电路可以从节点方程入手对其进行研究分析，也可以从网孔方程出发进行研究分析，两者都可以揭示电路的一些基本定律。

2. 非工程系统（经济、交通、管理等）

非工程系统是指由经济、管理等具有一定统计方面的系统，例如，一个工厂管理系统，它可由生产管理部门、原材料仓库、生产加工车间、销售服务部门等组成，各部门是相互联系和相互作用的。

3. 综合系统

综合系统往往是工程系统和非工程系统的综合，例如，对于机电系统，当仅仅考虑机电系统本身的特点时，可以将其看成工程系统。而如果在此基础上考虑人员操作效率、生产调配等则是一个综合系统。

1.1.2 系统研究的方法

随着科学研究和社会发展，人类在认识世界、改造世界的过程中逐渐走向深入，科学技术发展所面临的复杂程度日益加深，类似于阿基米德的金冠故事的科学发现已经不是科学研究和工程设计的主流方式。人们在进行科学研究和工程设计时已经形成了一些行之有效的方法，通过这些方法可以对所要研究或设计的系统进行分析、综合与设计。这些方法归纳起来主要有理论解析法、直接实验法与仿真实验法这三种方法。

1. 理论解析法

所谓理论解析法，就是运用已掌握的理论知识对系统进行理论上的分析、计算。它是进行理论学习的一种必然应用的方法，其通过理论的学习掌握有关系统的客观规律，通过理论分析推导来对系统进行研究。

图 1-2 所示的单容水箱液位控制系统，通过体积和液位的平衡关系，可以得到其数学模型为

$$q_2 - q_1 = C\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} \tag{1.1}$$

然后可以通过局部线性化得到如下单容水箱液位的传递函数模型：

$$\frac{k}{s+a}\mathrm{e}^{-\tau s} \tag{1.2}$$

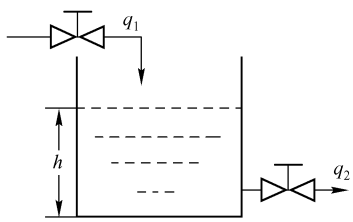


图 1-2　单容水箱液位控制系统

对于式（1.1）和式（1.2）的分析求解显然是一个纯数学解析问题。在具体应用过程中，应该根据实际情况，将系统的分析按照对系统内部状态的分析程度将其分成黑箱、灰箱、白箱等来进行研究。在实际科学研究和工程应用中，由于理论的不完善或对具体的系统的工况的特殊性，采用何种方式要根据情况进行灵活选择。

2. 直接实验法

这种方法是古人常常采用的方法，譬如伽利略的自由落体实验。实验法往往是在系统本身上进行实验，实验者利用各种仪器仪表与装置，对系统施加一定类型的激励信号，利用系统的特性输出来进行系统动静态特性的研究。例如，通过给电动机突然施加供电电压来测量电机的阶跃特性，这种方法具有简明、直观与真实、针对性强的特点，在一些小型系统系统分析与测试中经常被采用。

但是，这种方法采用实际系统进行实验，其费用较高、系统构成复杂、不确定因素太多，并且有些系统由于实现性、安全性等原因不允许进行直接的实验研究，应用的空间、时

间受限较多。

3. 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。系统模型按照模型的形式可以分为物理模型和数学模型，也可以是两者的结合。

例如，可以用欧姆定律、比例环节和惯性环节等得到相关的控制规律，即系统的数学模型来进行研究；也可以对要设计的系统进行一定比例的缩放，得到缩小或放大的物理模型或者具有一定特性替代的模型来进行间接地替代。

在物理模型上所进行的仿真实验研究具有效果逼真、精度高等优点，但是存在相对费用较高，且一致性有时难以保证等问题。而随着计算机技术和数学理论的飞速发展，人们越来越重视利用数学模型或非实物软件模型来对系统进行研究和设计。这一类模型的研究实际上是利用性能相似的原则来进行的，在一定程度上可以替代实际系统来进行“仿真”，是可信的。当然，采用何种手段与方法建立高精度的数学模型并能够在计算机上可靠地计算、运行是这种方法成功与否的关键。

模型的实验应该说是进行系统研究的主要手段，选择在模型上进行实验主要有以下几种原因：

（1）系统尚未设计出来

对于控制系统的设计问题，由于实际系统还没有真正建立起来，所以不可能在实际的系统上进行实验研究。例如，设计一个电气控制系统，可以先进行系统的仿真计算，来选择相应的传感器、电气设备等。

（2）某些实验会对系统造成伤害

实际系统上不允许进行实验研究。例如在化工控制系统中，随意改变系统运行的参数，往往会导致最终产品的报废，造成巨额损失，类似的问题还有很多。

（3）难以保证实验条件的一致性

如果存在人为的因素，则更难保证条件的一致性。

对一些设备的操作，每个人的反应能力不同，很难保证设备标准的一致性。可以采用标准的信号或动作来激励系统工作。

（4）费用高

例如，大型加热炉、飞行器及原子能利用等问题的实验研究。

（5）无法复原

有些实验是破坏性实验，无法复原，例如电气设备的耐压实验、设备结构的耐压实验、电视机跌落实验等。

1.1.3 模型的建立

1. 模型

不管采用何种相似形式，仿真都是在模型的基础上进行的，系统的仿真离不开相关的模型，而模型的好坏与否对系统的仿真是否真正能够和系统“相似”具有决定性的作用。对于不同的专业和研究特点，其模型应用的侧重点是不一样的，并且在系统仿真研究的不同阶段，其模型的应用也是不一样的。例如，在系统的理论学习阶段模型侧重于数学模型，而在

系统的应用实验阶段，物理模型是不可或缺的。另外，随着现代科学技术的发展，一些模型并不能用传统的数学模型来表示，而是需要采用描述性的语言来建立所谓的系统数学模型，如模糊控制的模型。在科学研究的过程中，也需要先有理论模型分析、半实物模型实验分析和实物运行验证等阶段。一个好的模型是工程设计或科学研究的基础，建立一个好的数学模型，需要对所要研究系统的内涵及外延有一个比较清晰的认识，从而使模型能够代表所研究的系统。模型可以是物理模型、数学模型、混合模型甚至是语言描述模型，在本书中主要讲述或应用的是数学模型。

2. 数学模型的建立

建立系统模型就是（以一定的理论依据）把系统的行为概括为数学的函数关系。下面以一种直线倒立摆建模的过程来说明建模的基本步骤。

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。

在忽略空气阻力和各种摩擦后，可将直线一级倒立摆系统抽象成小车和均匀质杆组成的系统，如图 1–3 和图 1–4 所示。

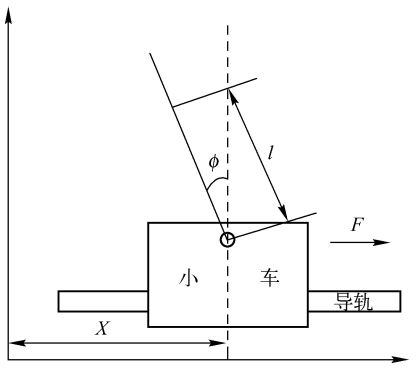


图 1–3　直线一级倒立摆模型

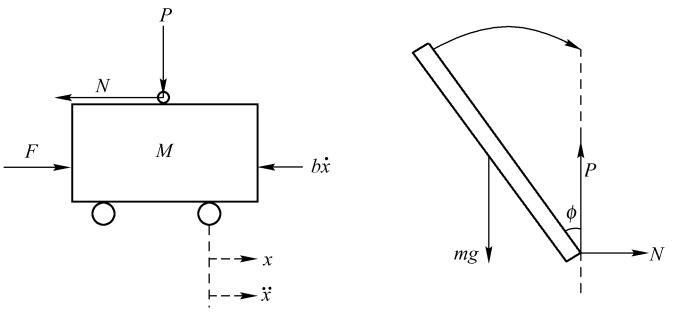


图 1–4　小车及摆杆受力分析

2）检测得到有关的模型数据。

根据力学及运动等物理定律可知，系统主要包含以下参数：

M——小车质量；

m——摆杆质量；

b——小车摩擦系数；

l——摆杆转动轴心到杆质心的长度；

F——小车受力；

x——小车位置；

ϕ——摆杆与垂直向上方向的夹角；

θ——摆杆与垂直向下方向的夹角（考虑到摆杆的初始位置为竖直向下）。

上面的部分参数如小车质量、摆杆质量等是静态得到的，部分参数是在系统运行时动态得到的，如小车位置、夹角等，可通过相应的传感器得到。

3）运用适当理论建立系统的数学描述，即数学模型。

这个系统可以通过拉格朗日、牛顿 – 欧拉等方法对系统进行建模，如采用牛顿 – 欧拉方

法建模时可以得到如下系统运行方程：

$$\begin{cases}(I+ml^2)\ddot{\phi}-mgl\varphi=ml\ddot{x}\\(M+m)\ddot{x}+b\dot{x}-ml\ddot{\phi}=u\end{cases} \tag{1.3}$$

经过一定的化简最终得到系统的状态方程：

设 $\boldsymbol{X}=\{x,\dot{x},\phi,\dot{\phi}\}$，$u'=\ddot{x}$，则可以得到以小车加速度作为输入的系统状态方程如下：

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\\ddot{x}\\\dot{\phi}\\\ddot{\phi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&1&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&1\\0&0&\frac{3g}{4l}&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\\dot{x}\\\phi\\\dot{\phi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\1\\0\\\frac{3}{4l}\end{bmatrix}u' \tag{1.4}$$

$$\boldsymbol{y}=\begin{bmatrix}x\\\phi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\\dot{x}\\\phi\\\dot{\phi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix}u'$$

4）检验所建立数学模型的准确性。

在 MATLAB 中对该模型进行单位阶跃的仿真实验来验证所建模型的准确性：

```
A = [0 1 0 0;0 0 0 0;0 0 0 1;0 0 48.3 0]
B = [0;1;0;4.9]
C = [1 0 0 0;0 0 1 0]
D = [0;0]
IPS = ss(A,B,C,D)
step(IPS)
```

由图 1-5 可以看出该倒立摆系统模型符合倒立摆的特性。

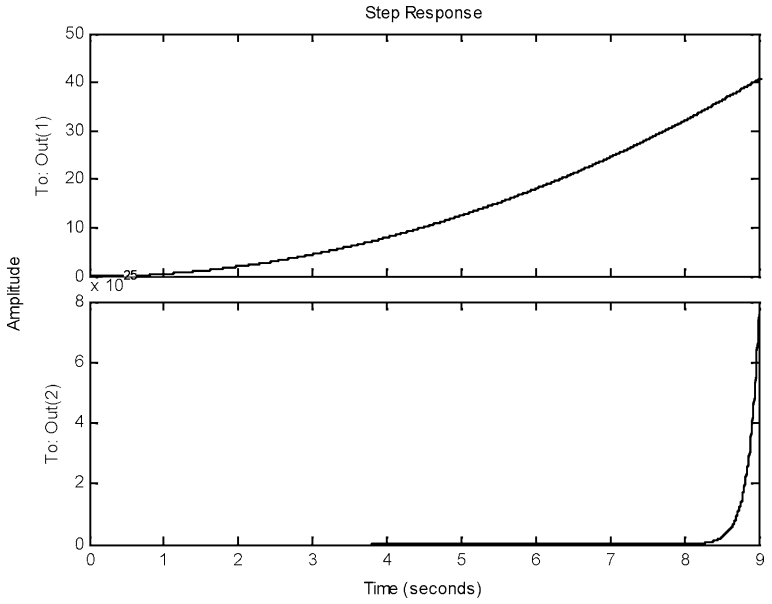


图 1-5　直线一级倒立摆模型的阶跃响应

1.2 仿真及计算机仿真三要素

1.2.1 仿真的定义

广义的仿真技术始终贯穿在人类科技发展的历史长河中，例如，阿基米德的“杠杆原理”、伽利略“自由落体定律”都可以称为仿真的实验。1961 年，G. W. Morgenthater 首次将仿真技术定义为“仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现”；1978 年，Körn 定义“连续系统仿真”为“用能代表所研究的系统的模型做实验”；1982 年，Spriet 进一步将仿真的内涵加以扩充：所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动；1984 年，Oren 给出了仿真的基本概念框架“建模 - 实验 - 分析”，并定义“仿真是一种基于模型的活动”。在现代的科学技术中，不同的领域或范畴对仿真有着不同的描述，可以一般性地概括为：“仿真是指用模型（物理模型或数学模型）代替实际系统进行实验和研究。”

仿真实质是对一个系统由其他系统（模型）代替或模拟该系统来进行研究和设计，这就要求系统和替代系统（模型）之间要有可替代的条件，也就是说实际系统和仿真系统之间应该满足相似性原理。相似性原理贯穿仿真技术的始终，是仿真技术的基础，也是所遵循的基本原则。在实际的科学研究和工程实践中，由于目的和方法不同，相似性的方式可以包含以下几个方面。

（1）性能相似

性能相似可以分为数学性能相似和物理性能相似。

数学性能相似一般是通过原理抽象，利用各个学科内的各类定律和规律，通过数学模型来表征系统，并进行仿真计算研究。图 1-6 所示的弹簧二阶阻尼系统和二阶电路系统，都可以通过各自的工作特点，进行理论分析，形成一个相似的二阶微分方程模型：

$$a\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+b\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+cx=y(t) \tag{1.5}$$

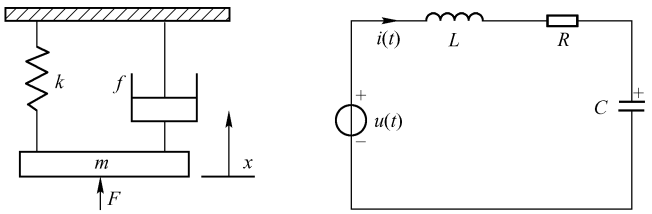


图 1-6　弹簧二阶阻尼系统和二阶电路系统

物理性能相似是指构成模型的元素和原系统的不同，但其性能相似。例如，可用一个电气系统来模拟热传导系统。在这个电气系统中电容代表热容量，电阻代表热阻，电压代表温差，电流代表热流。即图 1-6 所示的用二阶电路代替弹簧二阶阻尼系统对由弹簧及液压装置组成的机械悬挂系统进行仿真研究。

（2）几何相似

根据相似原理把原来的实际系统放大或缩小。例如，12000 t 水压机可用 1200 t 或120 t