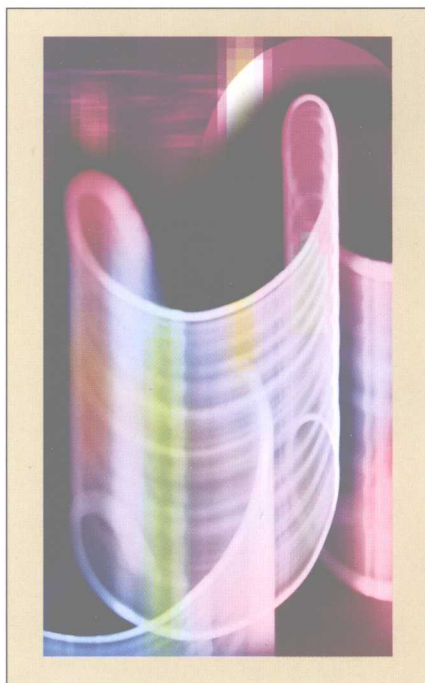


《21世纪高等院校优秀教材》

# 控制系统MATLAB 计算及仿真

(第3版)

黄忠霖 黄京 编著



# MATLAB



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等院校优秀教材

# 控制系统 MATLAB 计算及仿真

(第 3 版)

黄忠霖 黄京 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

控制系统 MATLAB 计算及仿真/黄忠霖, 黄京编著. —3  
版. —北京: 国防工业出版社, 2009.1

21 世纪高等院校优秀教材

ISBN 978-7-118-06061-4

I. 控... II. ①黄...②黄... III. 算法语言—控制系统—应  
用—计算机仿真—高等学校—教材 IV. TP391.9 TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 191128 号

※

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 30<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数 888 千字

2009 年 1 月第 3 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 第3版前言

《控制系统 MATLAB 计算及仿真》已出版了 2 版,在几年的时间里印刷 4 次,发行逾万册,受到了同行与广大读者的欢迎、关心与爱护。与此同时,为适应广大读者的要求,特别是适应自动化类专业教学、仿真实验、课程设计与毕业设计的需要,作者又撰写了《控制系统 MATLAB 计算及仿真实训》。

《控制系统 MATLAB 计算及仿真》第 3 版对以下方面的内容作了修改与补充,并突出本书特色。

1. MATLAB 近年频繁升级版本,根据作者使用的体会, MATLAB 7.1 版的实用性与软件可靠性最佳。故本书再版要介绍功能最新、最全与运行效果最好的版本 MATLAB 7.1 系统与仿真集成环境 Simulink 6.3 及 SimPowerSystems 4.1.1,其程序的 Notebook 执行方式比过去的所有版本都有效而可靠,这给仿真带来了极大方便,节约了时间,提高了效率。

2. 数学模型与实体图形化模型是 MATLAB 的两类仿真模型。在第 3 版中,要介绍实际物体图形化仿真模型库。实体图形化模型库中的模块就相当于实验室或实际工程里图形化的实际物体,例如:电阻、电容、电源、电机、变压器、触发器与晶闸管整流装置、电压表、电流表等,将这些实际物体的图形图标连接就能成为一个电路、一个装置或是一个系统。电气系统模型(SimPowerSystems)虽不是真实物体,而只是实际物体的图形化模型,但它具有实际物体的特质属性与特征。这种实体图形化模型的仿真更具有实用价值与低成本的优势,非常简单方便。

3. 为了省去输入麻烦且易出错的冗长程序,尽可能用 MATLAB 函数命令 `linmod()` 或 `linmod2()` 与系统 Simulink 模型结构图以化简系统模型,并在 Simulink 模型结构图里使用其菜单命令进行仿真。

4. 学好仿真课程,除了要深入掌握相应理论知识与 MATLAB 系统外,对上机操作技能、技巧的熟悉与掌握也是非常重要的。根据作者十多年来接触、学习与研究 MATLAB 的经历、经验与体会,本书给出了使用 MATLAB 系统经常出现的问题及其处理方法、运算某些程序应该注意的问题。对于较复杂上机操作的运算题,特别给出了详细的计算步骤与操作过程,尽力方便读者学习并掌握这些操作方法。

5. 本书的全部(包括调用自编函数的)程序,均已在 MATLAB 7.1 系统中正常运行,并重新绘制了插图,还订正了部分文字印刷错误。

为了让读者掌握主要函数命令的功能与使用方法,删去了不常用且繁琐的命令调用格式。为了突出控制系统仿真的重点,还在每章的内容提要中,特别提示本章使用的最重要的 MATLAB 函数命令(包括作者自编函数)。

6. 作者自编的 MATLAB 函数汇集在书后的附录中,以方便读者查阅、使用。

7. MATLAB 的 Notebook 成功地把 Microsoft Word 与 MATLAB 集成为一体,为文字处理、科学计算、工程设计构造了一个完美统一的工作环境。在本书运行 MATLAB 语句或程序时有 3

种方式:程序的 Notebook 执行方式、程序文件执行方式与在 MATLAB 的命令窗口中直接输入指令或语句的运行方式。请特别关注、学习并掌握程序的 Notebook 执行方式,必将受益匪浅。

#### 8. 增补了新的一章“离散系统分析的 MATLAB 实现”。

在本书编写过程中,作者参阅与借鉴了各种教材与文献,谨对其原作者、学者与专家表示由衷的谢意。

在本书编写过程中,还得到了刘福、吴江陵、许德阳、关大海、黄少铭、盛海平、陈培敦、马男华、姜迎春、李德阳、彭达成、戴同龄、李德瑞、周年庆、吴有方、王国君、孙重任、魏家常、申立方、杨本山、田园亮、王冠先、夏浩先等同志的关爱、支持与帮助,在此一并表示衷心感谢。

在此还要特别感谢国防工业出版社本书的责任编辑,为本书第 3 版的修订提供了全心的帮助,并为本书早日出版竭尽了全力。

由于时间仓促,加上作者学识水平有限,书中难免有错误与疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

为方便读者,欲获取本书作者开发的 MATLAB 函数、解题结构图模型以及了解原 MATLAB 系统函数的功能,可通过以下 E-mail 地址与作者联系:

E-mail:zlhuang41@sina.com

黄忠霖

# 目 录

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 第 1 章 控制系统及仿真概述 .....           | 1 |
| 1.1 自动控制系统的广泛应用 .....           | 1 |
| 1.1.1 电力拖动自动控制系统的应用 .....       | 1 |
| 1.1.2 工业生产过程自动控制系统的<br>应用 ..... | 2 |
| 1.2 控制系统计算机仿真的基本概念 .....        | 2 |

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1.2.1 控制系统计算机仿真 .....              | 2 |
| 1.2.2 控制系统计算机仿真的过程 .....           | 3 |
| 1.3 控制系统 MATLAB 计算与仿真 .....        | 3 |
| 1.3.1 先进的软件 MATLAB .....           | 3 |
| 1.3.2 控制系统的 MATLAB 计算与<br>仿真 ..... | 6 |

## 上篇 MATLAB 语言基础

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 第 2 章 MATLAB 7.1 系统概述 .....                      | 7  |
| 2.1 MATLAB 7.1 安装与启动 .....                       | 7  |
| 2.1.1 MATLAB 7.1 的安装 .....                       | 7  |
| 2.1.2 Notebook 的安装 .....                         | 11 |
| 2.1.3 MATLAB 7.1 的启动 .....                       | 11 |
| 2.1.4 Notebook 的启动 .....                         | 12 |
| 2.2 MATLAB 7.1 的系统界面 .....                       | 13 |
| 2.2.1 MATLAB 7.1 系统的 4 个小<br>窗口 .....            | 13 |
| 2.2.2 MATLAB 7.1 的命令窗口<br>(Command Window) ..... | 14 |
| 2.2.3 MATLAB 7.1 菜单项命令 .....                     | 15 |
| 2.2.4 MATLAB 7.1 工具栏按钮 .....                     | 21 |
| 2.2.5 Start 开始按钮 .....                           | 21 |
| 2.3 MATLAB 7.1 的内容及其查找 .....                     | 21 |
| 2.3.1 MATLAB 7.1 的内容 .....                       | 22 |
| 2.3.2 MATLAB 7.1 内容的查找 .....                     | 25 |
| 2.3.3 MATLAB 7.1 的模糊查询 .....                     | 27 |
| 2.3.4 MATLAB 7.1 的 Work 子目录 .....                | 27 |
| 2.4 MATLAB 的文字处理工具<br>Notebook .....             | 27 |
| 2.4.1 Notebook 菜单命令简介 .....                      | 28 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.4.2 Notebook 的使用 .....     | 28 |
| 2.4.3 Notebook 使用的几个问题 ..... | 29 |
| 第 3 章 MATLAB 数值运算 .....      | 30 |
| 3.1 MATLAB 的数值运算基础 .....     | 30 |
| 3.1.1 常量 .....               | 30 |
| 3.1.2 变量 .....               | 31 |
| 3.1.3 MATLAB 运算符 .....       | 31 |
| 3.2 MATLAB 的数组、矩阵运算 .....    | 33 |
| 3.2.1 数组、矩阵的概念 .....         | 33 |
| 3.2.2 数组或矩阵元素的标识 .....       | 34 |
| 3.2.3 数组与矩阵的输入 .....         | 35 |
| 3.2.4 数组、矩阵的算术运算 .....       | 37 |
| 3.2.5 矩阵的特有运算 .....          | 41 |
| 3.2.6 数组的关系运算 .....          | 48 |
| 3.2.7 数组的逻辑运算 .....          | 48 |
| 3.3 MATLAB 的数组函数与矩阵函数 .....  | 49 |
| 3.3.1 数组函数 .....             | 49 |
| 3.3.2 矩阵函数 .....             | 50 |
| 3.4 多项式及其运算 .....            | 51 |
| 3.4.1 多项式运算函数 .....          | 52 |
| 3.4.2 多项式运算举例 .....          | 52 |
| 3.5 MATLAB 的数学表达式及其书写 .....  | 54 |
| 3.5.1 MATLAB 的数学表达式 .....    | 54 |

|              |                                                      |           |              |                                   |           |
|--------------|------------------------------------------------------|-----------|--------------|-----------------------------------|-----------|
| 3.5.2        | MATLAB 数学表达式的书写                                      | 54        | 5.1          | M 文件、MATLAB 函数与 MATLAB 程序         | 79        |
| <b>第 4 章</b> | <b>MATLAB 符号运算基础</b>                                 | <b>56</b> | 5.1.1        | M 文件                              | 79        |
| 4.1          | MATLAB 符号运算概述                                        | 56        | 5.1.2        | MATLAB 函数                         | 79        |
| 4.1.1        | MATLAB 符号运算入门                                        | 56        | 5.1.3        | MATLAB 命令文件或程序                    | 81        |
| 4.1.2        | MATLAB 符号运算的几个基本概念                                   | 57        | 5.2          | MATLAB 程序设计基础                     | 82        |
| 4.2          | MATLAB 符号对象的基本运算与关系运算                                | 59        | 5.2.1        | MATLAB 程序设计基本规则                   | 83        |
| 4.3          | MATLAB 符号运算的基本函数                                     | 59        | 5.2.2        | 表达式、表达式语句与赋值语句                    | 83        |
| 4.3.1        | 符号变量代换及其函数 subs( )                                   | 60        | 5.2.3        | 程序流程控制语句                          | 84        |
| 4.3.2        | 符号对象转换为数值对象的函数 double( )、digits( )、vpa( )、numeric( ) | 60        | 5.2.4        | 程序流程控制指令                          | 89        |
| 4.3.3        | MATLAB 符号表达式的化简                                      | 61        | 5.3          | MATLAB 程序设计再举例                    | 90        |
| 4.4          | MATLAB 符号微积分运算                                       | 62        | <b>第 6 章</b> | <b>MATLAB 7.1 常用图形命令与符号函数图形命令</b> | <b>92</b> |
| 4.4.1        | MATLAB 符号极限运算                                        | 63        | 6.1          | MATLAB 的常用图形命令                    | 92        |
| 4.4.2        | MATLAB 符号函数微分运算                                      | 63        | 6.1.1        | 绘图函数 plot( )                      | 92        |
| 4.4.3        | MATLAB 符号函数积分运算                                      | 64        | 6.1.2        | 绘图坐标系的调整                          | 93        |
| 4.4.4        | 符号求和函数与 Taylor(泰勒)级数展开函数                             | 65        | 6.1.3        | 图形标注                              | 93        |
| 4.5          | MATLAB 符号矩阵的几种特殊运算                                   | 67        | 6.1.4        | 多次重叠绘制图形                          | 95        |
| 4.5.1        | 矩阵的微分与积分                                             | 67        | 6.1.5        | 图形窗口的分割                           | 97        |
| 4.5.2        | Jacobian 矩阵                                          | 68        | 6.2          | MATLAB 的特殊坐标绘图函数                  | 97        |
| 4.5.3        | 矩阵的 Jordan 标准形                                       | 69        | 6.2.1        | 对数坐标曲线                            | 97        |
| 4.6          | MATLAB 符号方程求解                                        | 70        | 6.2.2        | 极坐标曲线                             | 98        |
| 4.6.1        | MATLAB 符号代数方程求解                                      | 70        | 6.2.3        | 双 y 轴坐标曲线                         | 98        |
| 4.6.2        | MATLAB 符号微分方程求解                                      | 71        | 6.2.4        | 复数的图形曲线                           | 99        |
| 4.7          | 复变函数计算的 MATLAB 实现                                    | 73        | 6.3          | MATLAB 离散数据与步进图形的绘图函数             | 100       |
| 4.7.1        | 复数的概念                                                | 73        | 6.3.1        | MATLAB 绘制离散数据图形的函数命令 stem( )      | 100       |
| 4.7.2        | MATLAB 关于复变量的函数命令                                    | 73        | 6.3.2        | MATLAB 绘制步进图形的函数命令 stairs( )      | 100       |
| 4.7.3        | 复数的生成与创建复矩阵                                          | 74        | 6.4          | MATLAB 符号函数的图形命令                  | 101       |
| 4.7.4        | 复数的几何表示                                              | 75        | 6.4.1        | 符号函数的简捷绘图函数命令 ezplot( )           | 101       |
| 4.7.5        | 复数代数运算的 MATLAB 实现                                    | 76        | 6.4.2        | 符号函数的绘图函数命令 fplot( )              | 103       |
| <b>第 5 章</b> | <b>MATLAB 程序设计</b>                                   | <b>79</b> | 6.4.3        | 符号函数的极坐标绘图函数命令 ezpolar( )         | 104       |

## 中篇 控制系统 MATLAB 仿真基础

### 第 7 章 MATLAB7.1 的仿真集成环境

#### Simulink 6.3 ..... 105

#### 7.1 Simulink 仿真特色与其模型窗口 ..... 105

##### 7.1.1 Simulink 仿真特色 ..... 105

##### 7.1.2 进入 MATLAB 7.1 的 Simulink 6.3 ..... 106

##### 7.1.3 Simulink 6.3 的模型窗口概述 ..... 107

#### 7.2 Simulink 6.3 的界面与组成 ..... 110

##### 7.2.1 Simulink 6.3 功能模块组的 打开与关闭 ..... 111

##### 7.2.2 Simulink 6.3 功能模块的分类 及其用途 ..... 112

##### 7.2.3 有关 Simulink 6.3 的几个问题 ..... 123

#### 7.3 用 Simulink 建立系统模型 ..... 123

##### 7.3.1 打开模型窗口的方法 ..... 124

##### 7.3.2 模块的查找与选择 ..... 124

##### 7.3.3 模块的复制、移动与删除 ..... 124

##### 7.3.4 模块的连接 ..... 126

##### 7.3.5 模块标题名称的修改 ..... 127

##### 7.3.6 系统结构图模型标题名称的 标注与修改 ..... 127

##### 7.3.7 创建模型的取消与复原操作 ..... 127

##### 7.3.8 模型文件的保存与打开 ..... 127

##### 7.3.9 模型框图的打印 ..... 128

##### 7.3.10 Simulink 建模注意事项 ..... 128

#### 7.4 常用 15 个模块内部参数的设置 或修改 ..... 128

#### 7.5 观察 Simulink 的仿真结果 ..... 135

##### 7.5.1 使用示波器模块观察仿真 输出 ..... 135

##### 7.5.2 使用 To Workspace 模块将仿真 输出信息返回到 MATLAB 命 令窗口中 ..... 137

##### 7.5.3 使用 Out 模块将仿真输出信息返 回到 MATLAB 命令窗口中 ..... 139

#### 7.6 Simulink 的分析工具 ..... 140

##### 7.6.1 模型线性化概述 ..... 140

##### 7.6.2 连续系统的线性化模型 ..... 140

#### 7.7 自定义子系统与子系统的封装 ..... 141

##### 7.7.1 自定义子系统 ..... 141

##### 7.7.2 子系统的封装 ..... 143

### 第 8 章 常用电气系统(SimPowerSystems)

#### 实体图形化仿真模型 ..... 147

#### 8.1 基本电路元件的仿真模型 ..... 147

##### 8.1.1 电源 ..... 147

##### 8.1.2 RLC 元件 ..... 149

#### 8.2 常用电机与变压器的仿真模型 ..... 150

##### 8.2.1 电机 ..... 150

##### 8.2.2 变压器 ..... 154

#### 8.3 基本电力电子器件的仿真模型 ..... 156

##### 8.3.1 二极管(Diode) ..... 156

##### 8.3.2 晶闸管(Thyristor) ..... 158

##### 8.3.3 可关断晶闸管(GTO) ..... 159

##### 8.3.4 电力场效应管(MOSFET) ..... 161

##### 8.3.5 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) ..... 162

##### 8.3.6 理想开关(Ideal Switch) ..... 163

##### 8.3.7 多功能桥式整流电路 (Universal Bridge) ..... 164

#### 8.4 电力电子变流器典型驱动装置的 仿真模型 ..... 165

##### 8.4.1 同步 6 脉冲触发器(Synchronized 6-Pulse Generator) ..... 166

##### 8.4.2 同步 12 脉冲触发器(Synchronized 12-Pulse Generator) ..... 167

##### 8.4.3 脉宽调制 PWM 脉冲发生器 (PWM Generator) ..... 167

##### 8.4.4 脉冲信号发生器(Pulse Generator) ..... 169

#### 8.5 常用测量元件的仿真模型 ..... 170

##### 8.5.1 电压测量(Voltage Measure- ment) ..... 170

##### 8.5.2 电流测量(Current Measure-

|                                                       |     |                                                |     |
|-------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------|-----|
| ment) .....                                           | 171 | 10.2.6 用 Laplace 反变换求原函数 ...                   | 197 |
| 8.5.3 万用表(Multimeter) .....                           | 171 | 10.2.7 用 Laplace 变换定义传递函数 .....                | 198 |
| 8.5.4 三相电压电流测量(Three - Phase V - I Measurement) ..... | 172 | 10.2.8 用 Laplace 反变换求解微分方程 .....               | 199 |
| 8.5.5 选路器或选择开关(Selector) ...                          | 173 |                                                |     |
| <b>第 9 章 控制系统数学模型的 MATLAB 实现</b> .....                | 175 | <b>10.3 MATLAB 函数指令方式下的时域响应仿真</b> .....        | 202 |
| 9.1 LTI 3 种对象及其属性 .....                               | 175 | 10.3.1 时域响应 MATLAB 仿真的函数指令格式 .....             | 202 |
| 9.1.1 LTI 对象与 set( ) 函数 .....                         | 175 | 10.3.2 MATLAB 函数指令时域响应仿真示例 .....               | 205 |
| 9.1.2 3 种对象的属性 .....                                  | 175 | <b>10.4 利用 Simulink 动态结构图的时域响应仿真示例</b> .....   | 212 |
| 9.2 控制系统数学模型对象的种类及转换 .....                            | 176 | 10.4.1 利用 Simulink 动态结构图模型指令方式下的时域响应仿真实例 ..... | 212 |
| 9.2.1 控制系统数学模型 .....                                  | 176 | 10.4.2 在 Simulink 窗口里菜单方式下的时域响应仿真实例 .....      | 213 |
| 9.2.2 3 种系统数学模型之间的转换 ...                              | 179 |                                                |     |
| 9.2.3 第 4 种系统数学模型对象 (Simulink 模型) .....               | 181 | <b>第 11 章 连续系统稳定性分析的 MATLAB 实现</b> .....       | 214 |
| 9.3 环节方框图模型的化简 .....                                  | 182 | 11.1 控制系统稳定性分析概述 .....                         | 214 |
| 9.3.1 环节串联连接的化简 .....                                 | 182 | 11.1.1 控制系统稳定性简述 .....                         | 214 |
| 9.3.2 环节并联连接的化简 .....                                 | 183 | 11.1.2 控制系统有关稳定性的几个基本概念 .....                  | 214 |
| 9.3.3 环节反馈连接的化简 .....                                 | 183 | 11.2 代数稳定判据的 MATLAB 实现 ...                     | 215 |
| 9.4 用系统 Simulink 模型结构图化简控制系统模型 .....                  | 184 | 11.3 用根轨迹法判定系统稳定性的 MATLAB 实现 .....             | 217 |
| 9.5 控制系统 3 类基本数学模型及举例 .....                           | 185 | 11.4 用频率法判定系统稳定性的 MATLAB 实现 .....              | 221 |
| <b>第 10 章 连续系统时域分析的 MATLAB 实现</b> .....               | 189 | 11.4.1 用 Bode 图判定系统稳定性 ...                     | 221 |
| 10.1 控制系统时域分析的几个基本概念 .....                            | 189 | 11.4.2 用 Nyquist 曲线判定系统稳定性 .....               | 223 |
| 10.2 Laplace 变换及反变换 .....                             | 191 | <b>第 12 章 连续系统稳态误差计算的 MATLAB 实现</b> .....      | 225 |
| 10.2.1 Laplace 变换与反变换的概念 .....                        | 191 | 12.1 控制系统误差(响应)与稳态误差及其误差传递函数 .....             | 225 |
| 10.2.2 两个特殊函数的表示法 .....                               | 192 | 12.1.1 控制系统误差 .....                            | 225 |
| 10.2.3 计算用图形表示的函数的 Laplace 变换 .....                   | 192 |                                                |     |
| 10.2.4 计算函数的 Laplace 变换 ...                           | 194 |                                                |     |
| 10.2.5 利用留数将象函数表达式展成部分分式 .....                        | 195 |                                                |     |

|        |                            |     |        |                           |     |
|--------|----------------------------|-----|--------|---------------------------|-----|
| 12.1.2 | 控制系统稳态误差                   | 225 | 实现     | 256                       |     |
| 12.1.3 | 控制系统稳态误差的计算原理              | 225 | 14.3.1 | 频域响应 Bode 图的函数指令格式及示例     | 256 |
| 12.1.4 | 控制系统两个重要概念                 | 226 | 14.3.2 | 频域分析 Nyquist 曲线的函数指令格式及示例 | 259 |
| 12.1.5 | 闭环系统的误差传递函数                | 226 | 14.3.3 | 频域分析 Nichols 曲线的函数指令格式及示例 | 262 |
| 12.2   | 控制系统稳态误差的计算                | 227 | 14.3.4 | 频域响应的模值裕度与相位裕度函数指令格式及示例   | 263 |
| 12.2.1 | 控制系统的静态误差系数与动态误差系数         | 227 |        |                           |     |
| 12.2.2 | 三种典型信号给定输入作用下的稳态误差         | 230 | 第 15 章 | 描述函数法分析非线性系统的 MATLAB 实现   | 269 |
| 12.2.3 | 典型外作用信号下的给定输入响应与其稳态误差曲线的绘制 | 233 | 15.1   | 有关非线性系统分析的基本概念            | 269 |
| 12.2.4 | 从输出端定义的非单位负反馈系统的误差计算       | 236 | 15.2   | 典型非线性特性的描述函数              | 271 |
| 12.2.5 | 扰动输入作用下的稳态误差计算             | 237 | 15.3   | 描述函数法分析非线性系统的 MATLAB 实现   | 272 |
| 12.3   | 控制系统稳态误差计算举例               | 240 | 15.3.1 | 非线性系统自振分析                 | 272 |
|        |                            |     | 15.3.2 | 描述函数法分析非线性系统的 MATLAB 实现示例 | 273 |
| 第 13 章 | 连续系统根轨迹分析的 MATLAB 实现       | 241 |        |                           |     |
| 13.1   | 有关根轨迹的几个基本概念               | 241 | 第 16 章 | 离散系统分析的 MATLAB 实现         | 279 |
| 13.2   | 控制系统根轨迹分析的 MATLAB 实现       | 242 | 16.1   | 离散系统的基本概念                 | 279 |
| 13.2.1 | 根轨迹分析 MATLAB 实现的函数指令格式     | 242 | 16.1.1 | 连续系统与离散系统                 | 279 |
| 13.2.2 | 根轨迹分析的 MATLAB 实现再举例        | 244 | 16.1.2 | 采样过程与采样定理                 | 279 |
| 13.3   | MATLAB 基于根轨迹的设计工具          | 247 | 16.1.3 | 信号复现与零阶保持器                | 281 |
| 13.3.1 | 根轨迹设计工具简述                  | 247 | 16.2   | $z$ 变换与 $z$ 反变换           | 282 |
| 13.3.2 | 根轨迹设计工具示例                  | 249 | 16.2.1 | $z$ 变换与 $z$ 反变换的概念        | 282 |
|        |                            |     | 16.2.2 | MATLAB 的 $z$ 变换函数命令与使用    | 283 |
| 第 14 章 | 连续系统频域分析的 MATLAB 实现        | 251 | 16.2.3 | MATLAB 的 $z$ 反变换函数命令与使用   | 287 |
| 14.1   | 有关频域分析的几个概念                | 251 | 16.3   | 差分方程的 $z$ 变换解法            | 289 |
| 14.2   | 控制系统的频率特性                  | 253 | 16.3.1 | 差分的概念                     | 289 |
| 14.3   | 连续系统频域分析的 MATLAB           |     | 16.3.2 | 差分方程的概念                   | 290 |
|        |                            |     | 16.3.3 | 差分方程的求解                   | 290 |
|        |                            |     | 16.4   | 离散控制系统的脉冲传递函数             | 291 |
|        |                            |     | 16.4.1 | 脉冲传递函数的概念                 | 291 |
|        |                            |     | 16.4.2 | 开环系统脉冲传递函数及其举例            | 292 |

|                                            |     |                                    |     |
|--------------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 16.4.3 闭环系统脉冲传递函数及其举例 .....                | 294 | MATLAB 计算 .....                    | 300 |
| 16.5 离散系统稳定性分析的 MATLAB 实现 .....            | 295 | 16.6.1 单位阶跃输入作用时的稳态误差 .....        | 300 |
| 16.5.1 从 $s$ 平面到 $z$ 平面的映射 ..              | 295 | 16.6.2 单位斜坡函数输入作用时的稳态误差 .....      | 300 |
| 16.5.2 $z$ 域稳定条件及稳定判据 ..                   | 296 | 16.6.3 单位加速度函数输入作用时的稳态误差 .....     | 301 |
| 16.5.3 $z$ 平面到 $w$ 平面的映射与在 $w$ 平面应用稳定判据 .. | 297 | 16.7 离散系统动态性能分析的 MATLAB 实现示例 ..... | 303 |
| 16.6 单位反馈离散系统稳态误差的                         |     |                                    |     |

## 下篇 控制系统 MATLAB 计算及仿真

### 第 17 章 自动控制系统的 MATLAB 计算

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 及仿真 .....                               | 308 |
| 17.1 简单闭环控制的 MATLAB 计算及仿真 .....         | 308 |
| 17.1.1 自动控制系统的的基本概念 ..                  | 308 |
| 17.1.2 简单闭环控制系统的数学模型 .....              | 309 |
| 17.1.3 简单闭环控制系统的 MATLAB 仿真实例 .....      | 310 |
| 17.1.4 线性时不变系统(LTI)观测器 .....            | 316 |
| 17.2 多闭环控制系统的 MATLAB 计算及仿真 .....        | 319 |
| 17.2.1 多闭环控制系统概述 .....                  | 319 |
| 17.2.2 多闭环控制系统的数学模型 ..                  | 319 |
| 17.2.3 双闭环调速系统的 MATLAB 计算与仿真实例 .....    | 319 |
| 17.2.4 三环控制系统的 MATLAB 计算与仿真 .....       | 329 |
| 17.3 转速负反馈闭环直流调速系统的实体图形化模型仿真 .....      | 332 |
| 17.3.1 转速负反馈单闭环直流脉宽 PWM-M 调速系统的仿真 ..... | 332 |
| 17.3.2 转速负反馈单闭环无差直流调速系统的仿真 .....        | 334 |
| 17.3.3 转速、电流双闭环直流 V-M                   |     |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 调速系统的仿真 .....                       | 337 |
| 17.4 位置随动系统的 MATLAB 计算及仿真 .....     | 338 |
| 17.4.1 位置随动系统的概念 .....              | 338 |
| 17.4.2 位置随动系统的控制特点 ..               | 338 |
| 17.4.3 位置随动系统的分析方法与品质指标 .....       | 339 |
| 17.4.4 位置随动系统 MATLAB 计算及仿真实例 .....  | 339 |
| 17.5 过程控制系统的 MATLAB 计算及仿真 .....     | 349 |
| 17.5.1 生产过程控制的特点 .....              | 349 |
| 17.5.2 过程控制中被控对象的动态特性 .....         | 350 |
| 17.5.3 过程控制系统的性能指标 ..               | 350 |
| 17.5.4 控制系统中延迟特性的处理 ..              | 352 |
| 17.5.5 简单回路控制系统的 MATLAB 计算及仿真 ..... | 353 |
| 17.5.6 串级控制系统的 MATLAB 计算及仿真 .....   | 355 |
| 17.5.7 前馈控制系统的 MATLAB 计算及仿真 .....   | 358 |
| 17.5.8 大延迟系统的 MATLAB 计算及仿真 .....    | 362 |

### 第 18 章 连续线性控制系统校正设计的

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| MATLAB 实现 .....       | 366 |
| 18.1 控制系统校正设计概述 ..... | 366 |

|                                     |                                    |     |                                    |                             |     |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----------------------------|-----|
| 18.1.1                              | 经典控制系统的校正设计                        | 366 | 19.4                               | 线性系统的可控性与可观性                | 426 |
| 18.1.2                              | 控制系统校正设计的基本概念                      | 366 | 19.4.1                             | 线性系统的可控性                    | 426 |
| 18.1.3                              | 控制系统的无源校正与有源校正                     | 367 | 19.4.2                             | 线性系统的可观测性                   | 431 |
| 18.1.4                              | 控制系统串联校正的基本思路                      | 367 | 19.4.3                             | 线性定常系统的实现问题                 | 435 |
| 18.1.5                              | 控制系统校正设计应注意的几个问题                   | 368 | 19.5                               | 系统状态反馈与状态观测器                | 437 |
| 18.2                                | 控制系统 Bode 图校正设计法                   | 368 | 19.5.1                             | 系统的输出反馈与闭环系统的传递矩阵           | 437 |
| 18.2.1                              | Bode 图超前校正设计                       | 369 | 19.5.2                             | 系统的状态反馈与闭环系统的状态矩阵           | 438 |
| 18.2.2                              | Bode 图滞后校正设计                       | 376 | 19.5.3                             | 系统的极点配置                     | 438 |
| 18.2.3                              | Bode 图滞后—超前校正设计                    | 382 | 19.5.4                             | 系统的状态观测器                    | 440 |
| 18.3                                | 控制系统根轨迹设计法                         | 385 | 19.5.5                             | 系统的状态降维观测器                  | 441 |
| 18.3.1                              | 根轨迹超前校正设计                          | 385 | 19.6                               | Lyapunov 系统稳定性分析的 MATLAB 实现 | 445 |
| 18.3.2                              | 根轨迹滞后校正设计                          | 392 | 19.6.1                             | 系统稳定性概述                     | 445 |
| 18.4                                | 控制系统 PID 校正设计法                     | 395 | 19.6.2                             | 李亚普诺夫意义下的稳定性理论              | 446 |
| 18.4.1                              | PID 调节简述                           | 395 | 19.6.3                             | 线性定常系统的李亚普诺夫稳定性分析           | 447 |
| 18.4.2                              | PID 调节规律                           | 395 | 19.6.4                             | 李亚普诺夫方程的求解                  | 450 |
| 18.4.3                              | PID 调节作用分析                         | 396 |                                    |                             |     |
| 18.4.4                              | PID 校正设计方法                         | 399 |                                    |                             |     |
| <b>第 19 章 线性系统状态空间分析的 MATLAB 实现</b> |                                    |     |                                    |                             |     |
| 19.1                                | 控制系统状态空间分析的基本概念                    | 410 | <b>第 20 章 线性二次型最优控制的 MATLAB 实现</b> |                             |     |
| 19.2                                | 系统状态空间表达式及其状态方程的解                  | 412 | 20.1                               | 最优控制的基本概念                   | 452 |
| 19.2.1                              | 状态空间表达式的建立                         | 412 | 20.1.1                             | 最优控制问题                      | 452 |
| 19.2.2                              | 系统状态方程的解                           | 414 | 20.1.2                             | 最优控制的性能指标                   | 453 |
| 19.2.3                              | 求控制系统的特征方程、特征值及特征向量                | 416 | 20.1.3                             | 最优控制问题的数学分类法                | 454 |
| 19.2.4                              | 连续系统状态方程的离散化                       | 418 | 20.1.4                             | 最优控制问题的求解方法                 | 454 |
| 19.3                                | 系统状态方程的线性变换                        | 420 | 20.1.5                             | 线性二次型最优控制                   | 455 |
| 19.3.1                              | 传递矩阵                               | 420 | 20.2                               | 连续系统线性二次型最优控制的 MATLAB 实现    | 455 |
| 19.3.2                              | 状态方程的线性变换                          | 421 | 20.2.1                             | 连续系统线性二次型最优控制               | 455 |
| 19.3.3                              | Vandermonde(范德蒙德)矩阵与 Jordan(约当)标准形 | 424 | 20.2.2                             | 连续系统线性二次型最优控制的 MATLAB 实现    | 456 |
|                                     |                                    |     | 20.2.3                             | 连续系统线性二次型最优控制的 MATLAB 实现示例  | 456 |

|        |                                 |     |        |                                   |     |
|--------|---------------------------------|-----|--------|-----------------------------------|-----|
| 20.3   | 离散系统线性二次型最优控制的 MATLAB 实现 .....  | 457 | 20.4.3 | Kalman 滤波的 MATLAB 实现示例 .....      | 462 |
| 20.3.1 | 离散系统稳态线性二次型最优控制 .....           | 457 | 20.5   | 线性二次型 Gauss 最优控制的 MATLAB 实现 ..... | 463 |
| 20.3.2 | 离散系统线性二次型最优控制的 MATLAB 实现与示例 ... | 458 | 20.5.1 | LQG 最优控制的求解 .....                 | 463 |
| 20.4   | 最优观测器的 MATLAB 实现 ...            | 460 | 20.5.2 | LQG 最优控制的 MATLAB 实现与示例 .....      | 464 |
| 20.4.1 | 连续时不变系统的 Kalman 滤波 .....        | 460 | 附录     | 作者编写的 MATLAB 函数 .....             | 466 |
| 20.4.2 | Kalman 滤波的 MATLAB 实现 .....      | 461 | 参考文献   | .....                             | 479 |

# 第1章 控制系统及仿真概述

## 内 容 提 要

本章简要概述控制系统计算与仿真的基本知识。主要介绍自动控制系统的广泛应用,包括电力拖动自动控制系统与工业生产过程控制系统的应用;控制系统计算机仿真的基本概念;控制系统 MATLAB 计算及仿真。通过本章的介绍,使读者了解控制系统的广泛应用与 MATLAB 的主要特点,并建立系统仿真与 MATLAB 仿真的初步概念。

### 1.1 自动控制系统的广泛应用

现代自动控制系统应用非常广泛,几乎遍及国民经济与国防工业的所有部门。本书讨论的控制系统不是广义的、泛指的系统,而是工程技术领域里常指的自动控制系统。以控制对象生产工艺过程的性质、特点而论,控制系统大体可分为两大类:一类是以机械运动为主要生产形式,以电动机为执行机构的“电力拖动自动控制系统”;另一类是以化学反应或者热能转换为主要生产形式,以自动化仪表与装置为检测与执行机构的“工业生产过程控制系统”。

这两类控制系统仅仅是生产形式与执行机构不同,其自动控制的理论完全一样,研究的方法以及仿真理论、过程没有什么差别。本书以拖动自动控制系统、过程控制系统为讨论对象,还涉及到了控制系统设计、状态空间分析与最优控制系统等内容。

#### 1.1.1 电力拖动自动控制系统的应用

在现代工业生产中,为了实现各种不同生产工艺过程的要求,需要使用各种各样的生产机械。例如各类机床、轧钢机、矿井提升机、球磨机、造纸机、纺织机械、印刷机械、化工机械、电力机车、压缩机、电梯、起重机、卷扬机、挖掘机、榨油机、碾米机、水泵、电动工具乃至家用电器等,数不胜数。

电动机拖动生产机械运转叫做电机拖动。电机拖动,是电动机将电能转换为机械能的过程,是当代各种生产活动最基本也是最先进的形式。这是新型的电力代替传统而原始的人力或者畜力的历史必然,也是现代文明的标志之一。

作为现代能源主要形式的电能,其生产集中在火力、水力、风力与原子能发电厂进行。电能可远距离输送,简单经济,易于分配、转换与控制,检测方便,价格低廉。电机拖动比其他形式的拖动效率要高得多,原动机与被拖动机械的连接简便。电动机效率高,运转经济。电动机的形式种类与规格很多,具有各种良好的特性,可适应各种不同生产机械的需要。电机拖动易于操作及控制,电动机的起动、制动、反向及调速等控制简便快捷,调节性能良好。电机拖动可实现远距离控制与自动调节,并进而实现生产过程的自动化。

综上所述,电机拖动自动控制系统已经成为现代工业生产电气化及自动化的基础,而实现工业企业的电气化及自动化对于提高产品质量、改善劳动条件、增加工作可靠性以及提高劳动生产率均有着重大的意义。

## 1.1.2 工业生产过程自动控制系统的应用

工业生产过程自动控制是指在冶金、机械、石油、化工、电力、轻工、建材、原子能与环保等部门的生产中,对于温度、压力、流量、液位、成分等物理量实现的自动控制。它是利用过程检测控制仪表、自动化设备与装置、数字计算机等自动化技术工具,对整个生产过程进行自动检测与控制,以期达到各种最优的技术、经济指标,提高经济效率与劳动生产率、节约能源、改善劳动生产条件、保护生态环境等目的。

工业生产过程自动控制系统(简称过程控制系统),是由控制对象与过程控制仪表所组成的。从控制的角度而论,工业生产过程自动控制着重研究串级控制、前馈控制、均匀控制、比值控制、分程控制、选择性控制、多变量控制、多冲量控制以及数字过程控制等方面的课题。

工业生产过程自动控制系统是一门内容极为丰富的综合性应用技术学科,它与工程实践联系紧密,与电机拖动自动控制系统一样,在现代工业生产过程自动化中也得到了十分广泛的应用。

## 1.2 控制系统计算机仿真的基本概念

### 1.2.1 控制系统计算机仿真

控制系统的计算机仿真是一门涉及到控制理论、计算数学与计算机技术的综合性新型学科。这门学科的产生及发展差不多是与计算机的发明及发展同步的。计算机仿真是自从1946年世界上第一台电子计算机问世以后,在20世纪70年代初期发展起来的、用来帮助设计人员进行设计的一种新技术。它包含控制系统分析、综合、设计、检验等多方面的计算机处理内容。计算机仿真依靠计算机无与伦比的运算功能,即计算机能够不厌其烦地进行高速而精确的运算,以实现各种功能。以下介绍几个有关系统计算机仿真的概念。

系统,是物质世界中相互制约又相互联系着的、以期实现某种目的的一个运动整体,这个整体叫做系统。如果系统用于自动控制,则称之为自动控制系统。

模型,是对所要研究的系统在某些特定方面的抽象。通过模型对原型系统进行研究,将具有更深刻、更集中的特点。模型分为物理模型和数学模型两种。数学模型可分为机理模型、统计模型与混合模型。

系统仿真,就是以系统数学模型为基础,以计算机为工具对系统进行实验研究的一种方法。需要特别指出的是,系统仿真是用模型(即物理模型或数学模型)代替实际系统进行实验和研究,使仿真更具意义。仿真所遵循的基本原则是相似原理,即几何相似、环境相似与性能相似。依据这个原理,仿真可分为物理仿真与数学仿真(即模拟计算机仿真与数字计算机仿真)。

所谓物理仿真就是应用几何相似原理,仿制一个与实际系统工作原理相同、质地完全相同但是体积小得多的物理模型(例如将飞机模型放在气流场相似的风洞中以模仿真实的飞机在地球的大气中)进行实验研究;所谓数学仿真就是应用性能相似原理,构成数学模型在计算机上进行实验研究。

由于计算机仿真能够为各种实验提供方便、廉价、灵活而可靠的数学模型,因此凡是要用模型进行实验的,几乎都可以用计算机仿真来研究被仿真系统的工作特点、设计最合理的系统方案 and 选择最佳参数。

随着计算机技术的发展,计算机仿真越来越多地取代纯物理仿真。现在所所谓的仿真,主要是指计算机参与的计算机仿真。计算机仿真是一门综合性的新学科,它既取决于计算机工具本身硬件与软件的发展,又依赖于仿真计算方法在精度与效率方面的研究与提高,还要服从于计算机仿真对象学科领域的发展需要。所以计算机仿真是多种学科互相渗透、相互融合又与多种学科相关联的边缘科学。

而自动控制系统的计算机仿真是一门涉及到计算机技术、计算数学与控制理论、系统辨识、控

制工程以及系统科学的综合性学科。它为控制系统的分析、研究、计算、综合设计以及自动控制的计算机辅助教学提供了快速、经济、科学及有效的手段。

## 1.2.2 控制系统计算机仿真的过程

控制系统仿真，就是以控制系统的模型为基础，主要用数学模型代替实际的控制系统，以计算机为工具，对控制系统进行实验和研究的一种方法。

通常，控制系统仿真的过程按以下步骤进行：

### 第一步 建立自控系统的数学模型

系统的数学模型，是描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式。描述系统诸变量间静态关系的数学表达式，称为静态模型；描述自控系统诸变量间动态关系的数学表达式，称为动态模型。最基本的常用数学模型是微分方程与差分方程。

根据系统实际结构与系统各变量之间所遵循的物理、化学基本定律，例如牛顿定律、基尔霍夫定律、运动动力学定律、焦耳楞次定律等来列写出变量间的数学表达式以建立数学模型。这是解析法建立数学模型。

对于很多复杂的系统，则必须通过实验方法并利用系统辨识技术来建立数学模型。其中考虑计算所要求的精度，略去一些次要因素，使模型既能准确地反映系统的动态本质，又能简化分析计算。这是实验法建立数学模型。

控制系统的数学模型是系统仿真的主要依据。

### 第二步 建立自控系统的仿真模型

原始的自控系统的数学模型比如微分方程，并不能用来直接对系统进行仿真，还得将其转换为能够对系统进行仿真的模型。

对于连续控制系统而言，将像微分方程这样的原始数学模型，在零初始条件下进行拉普拉斯变换，求得自控系统传递函数数学模型。以传递函数模型为基础，等效变换为状态空间模型，或者将其图形化为动态结构图模型，这些模型都是自控系统的仿真模型。

对于离散控制系统而言，有像差分方程这样的原始数学模型以及类似连续系统的各种模型，这些模型都可以对离散系统直接进行仿真。

### 第三步 编制自控系统仿真程序

对于非实时系统的仿真，可以用一般的高级语言，例如 Basic 或 Fortran 或 C 等语言编制仿真程序。对于快速变化的实时系统的仿真，往往用汇编语言编制仿真程序，当然也可以直接利用仿真语言。

如果应用 MATLAB 系统的程序、Toolbox 工具箱及其 Simulink 仿真集成环境作仿真工具，就是 MATLAB 仿真。控制系统的 MATLAB 仿真是控制系统计算机仿真一个特殊软件工具的子集。

### 第四步 进行仿真实验并输出仿真结果

进行仿真实验，通过实验对仿真模型与仿真程序进行检验和修改，然后按照系统仿真的要求输出仿真结果。

## 1.3 控制系统 MATLAB 计算与仿真

### 1.3.1 先进的软件 MATLAB

MATLAB 程序设计语言是美国 MathWorks 公司于 20 世纪 80 年代中期推出的高性能数值计算软件。经过十几年的开发、扩充与不断完善，MATLAB 已经发展成为适合多学科，功能特强、特全的大型系统软件。其在国外 MATLAB 已经经受了多年考验。在欧美高校，MATLAB 已成为线性代数、自动控制理论、数理统计、数字信号分析与处理、动态系统仿真等课程的基本数学工具，成为

高校大学生、研究生必须掌握的基础知识与基本技能。

在科学研究与工程技术应用中常常要进行大量的数学运算。在当今计算机时代,通常的做法是借助高级语言 Basic、Fortran 和 C 语言编制计算程序,输入计算机做近似计算。但是,这需要熟练地掌握所用语言的语法规则与编制程序的相关规定,而且编制程序绝非易事。

当初的 MATLAB 是 Cleve Moler 博士于 1967 年用 Fortran 编写的(第二代的 MATLAB 其主要部分是用 C 语言编写的)。1980 年前后, Moler 开始筹建 MATLAB(Matrix Laboratory 即“矩阵实验室”)。Moler 开发 MATLAB 的最初目的只是为线性代数的矩阵运算提供一个运算工具,但后来功能逐渐完善扩充,以致到如今 MATLAB 可以进行各种科学与工程计算,应用范围也越来越广,而且 MATLAB 的函数命令简单高效,特别容易学习和很方便地使用。于是, Moler 博士等一批数学家与软件专家组建了 Mathworks 软件开发公司,专门研究、扩展并改进 MATLAB,该公司于 1992 年推出了 MATLAB 4.0 版本,相继有 1993 年的微机版,1994 年的 MATLAB 4.2 扩充版,1998 年与 1999 年的 MATLAB 5.1 与 5.3 版,2001 年与 2002 年的 MATLAB 6.0 与 6.5 版,2004 年 9 月公司推出 MATLAB 7.0 版,2005 年 8 月又立即推出 MATLAB 7.1 版,2007 年 8 月还推出了 MATLAB 7.5(R2007b) 版。MATLAB 有以下主要特点。

### 1. 功能强大, 适用范围广

MATLAB 可用于线性代数里的向量、数组、矩阵运算,复数运算,高次方程求根,插值与数值微商运算,数值积分运算,常微分方程的数值积分运算、数值逼近、最优化方法等,即差不多所有科学研究与工程技术应用需要的各方面计算,均可用 MATLAB 来解决。

现有的资料表明,这些运算,在自动控制、生物医学工程、语音处理、图像信号处理、雷达工程、信号分析、计算机技术、汽车制造、建筑业、航空航天、分子模型研究以及半导体制造业等各行各业都有极广泛的应用。可以说,无论从事工程技术方面的哪个学科,在 MATLAB 里都能有相应合适的功能解决该学科的计算问题。

### 2. 编程效率高

MATLAB 程序设计语言提供了丰富的库函数(称为 M 文件),既有常用的基本库函数,又有种类齐全、功能丰富多样的专用库函数(工具箱 Toolbox 就是专门功能库函数)。函数即是预先编制好的子程序。在为进行数学运算编制程序时,这些库函数都可以被直接调用,而不必将其子程序的命令或语句再逐一列出。无疑,这会大大提高编程效率。

MATLAB 的基本数据编程单元是不需要指定维数的复数矩阵的,所以在 MATLAB 环境下,数组(向量或矩阵)的操作如同数的操作一样简单方便,不必像 Basic、Fortran 和 C 等高级语言,因为基本数据单元是数而要事先定义数组,然后才能进行有关操作。这样的编程效率肯定不如 MATLAB 的高。

在科学与工程应用的数值计算领域里,有文献指明,使用 MATLAB 语言的程序设计比使用 Basic、Fortran 和 C 等语言进行程序设计的编程效率要高好几倍。

### 3. 界面友好, 用户使用方便

首先, MATLAB 具有友好的用户界面与易学易用的帮助系统。MATLAB 的函数命令繁多,功能各异。用户在命令窗里通过 help 命令可以查询某个函数的功能及用法,命令的格式极为简单(格式为: help+命令或函数)。用户在命令窗里通过某些命令还可以查询某个函数的路径以及查询某个子目录中的函数集合。这样,面对 MATLAB 的强大功能与各种先进技术,即便是初学者,也不会望而生畏。因为 MATLAB 已为用户提供了学习它的方便之路。

其次, MATLAB 程序设计语言把编辑、编译、连接、执行、调试等多个步骤融为一体。如果直接在命令行输入语句(命令),包括调用 M 文件的语句,每输入一条(语句),就立即完成编译、连接和运行的全过程。如果将 MATLAB 源程序编辑为 M 文件,编辑后的源文件就可与库函数一样直接运行,而不再需要编译和连接。运行 M 文件时,如果有错,计算机屏幕上会给出详细的出错红色信息提示,让用户修改,直到正确为止。