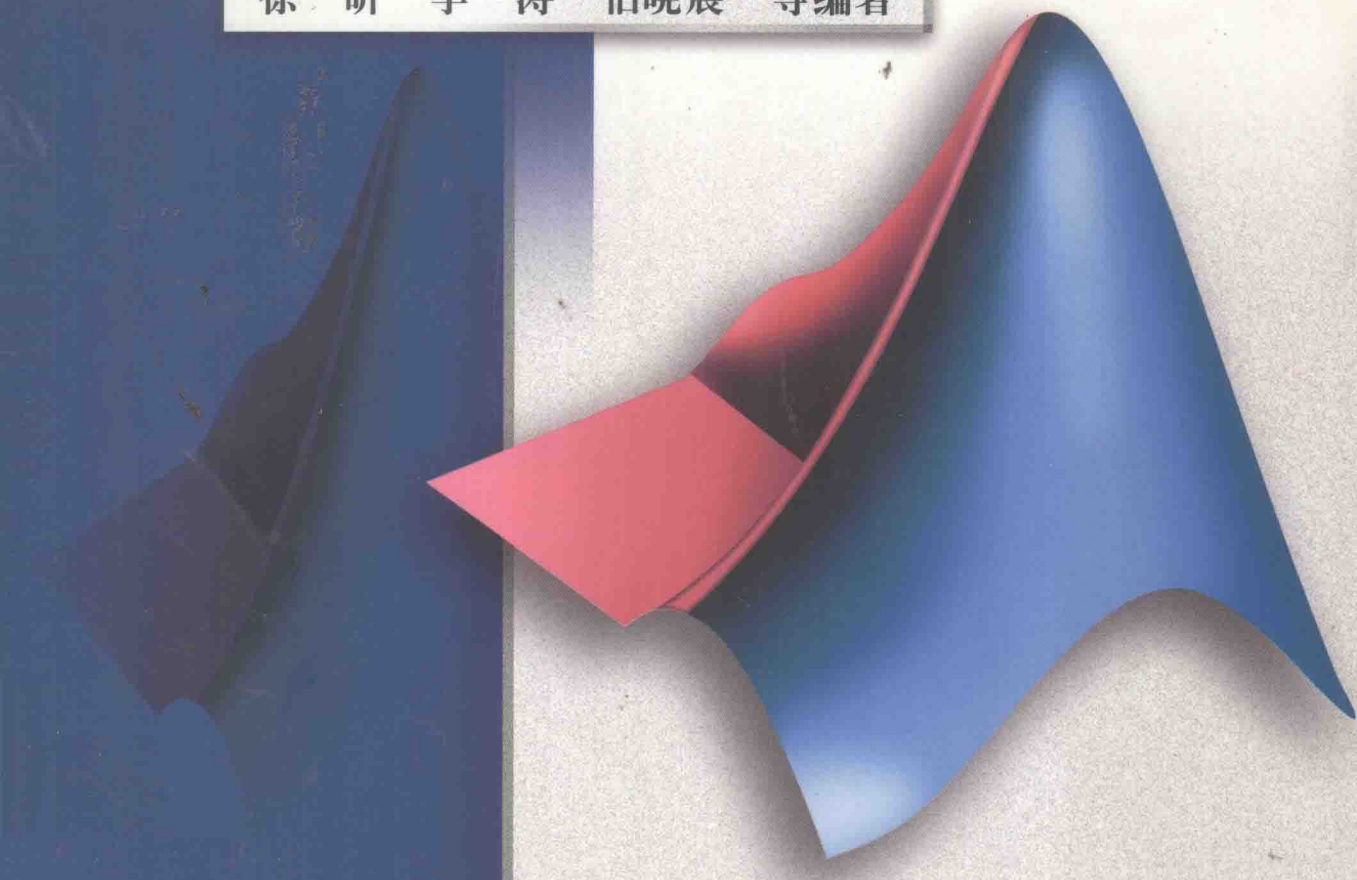
Matlab 工具箱应用指南

——控制工程篇

徐 昕 李 涛 伯晓晨 等编著



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
URL: http://www.phei.com.cn

Matlab 工具箱应用指南

——控制工程篇

徐　昕　李　涛　伯晓晨　等编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书详细介绍与 Matlab 5.2 版本相配套的 6 个控制工程类工具箱，即系统辨识工具箱、控制系统工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、模糊逻辑工具箱和基于 Simulink 的非线性控制设计模块(Nonlinear Control Design Blockset)。本书是较为全面地介绍 Matlab 控制工程类工具箱的科技图书，书中在阐述各个工具箱的学科背景、函数原理和算法的基础上，详细说明函数的使用方法并给出应用实例。本书具有内容新、覆盖范围广和实用性强的特点，可以作为高校控制系统计算机辅助设计的教学参考用书，也可以作为从事控制工程应用的广大科技人员的参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

Matlab 工具箱应用指南：控制工程篇/徐昕等编著．北京：电子工业出版社，2000.5
ISBN 7-5053-5916-9

Ⅰ．M… Ⅱ．徐… Ⅲ．计算机辅助计算－软件包，Matlad－指南 Ⅳ．TP39175

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 07075 号

书　　名：Matlab 工具箱应用指南——控制工程篇
编　　著：徐　昕　李　涛　伯晓晨　等
责任编辑：郭　立
特约编辑：明足群
排版制作：电子工业出版社计算机排版室
印 刷 者：中国科学院印刷厂
出版发行：电子工业出版社　URL：http://www.phei.com.cn
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
经　　销：各地新华书店
开　　本：787×1092　1/16　印张：24.25　字数：621 千字
版　　次：2000 年 5 月第 1 版　2000 年 5 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-5053-5916-9/TP·3083
印　　数：6000 册　　定价：36.00 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者，请向购买书店调换；若书店售缺，请与本社发行部联系调换。电话：68279077

序

1984 年美国的 MathWorks 公司推出 Matlab，到目前为止，它已发展成为国际上最优秀的科技应用软件之一。其强大的科学计算与可视化功能、简单易用的开放式可扩展环境以及多达 30 多个面向不同领域而扩展的工具箱(Toolbox)支持，使得 Matlab 在许多学科领域中成为计算机辅助设计与分析、算法研究和应用开发的基本工具和首选平台。在我国，Matlab 已经拥有许多用户，许多高校陆续开设了有关 Matlab 的课程，清华大学、华中理工大学等高校的 BBS 上还专门设立了 Matlab 讨论区。

Matlab 最初用于自动控制系统的辅助设计，而后采用了开放性开发的思想，不断吸收各学科领域权威人士所编写的实用程序，形成了一系列规模庞大、覆盖面极广的工具箱(Toolbox)。所谓工具箱，其实是一组一组的函数，包括了通信系统、信号处理、图像处理、小波分析、鲁棒控制、系统辨识、非线性控制、模糊控制、神经网络、优化理论、样条、商用统计分析等等大量现代工程技术学科的内容，非常实用。至今，国内有关 Matlab 的书都把内容集中在 Matlab 语言和经典控制系统的设计上，很少涉及 Matlab 工具箱，致使大多数 Matlab 用户难以使用工具箱中丰富的函数。

在长期的学习、应用过程中，我们感觉 Matlab 脚本式的语言其实不难掌握，难点在于如何理解和掌握 Matlab 及其工具箱中大量函数的功能及用法，避免重复性的劳动，尽快地“站在巨人肩上”开展工作。本套书的目的就是希望通过详尽的介绍众多工具箱中的函数功能及使用方法，以帮助用户更好更快地理解、掌握和使用 Matlab 及其工具箱。希望这套书能给 Matlab 用户们一点帮助，让大家在学习和使用过程中少花点力气，少走点弯路。

根据各个工具箱涉及的学科领域，该套丛书分为 3 篇，即信息工程篇、应用数学篇和控制工程篇，共涉及 17 个工具箱。

信息工程篇包括信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)、图像处理工具箱(Image Processing Toolbox)、通信工具箱(Communications Toolbox)、定点运算工具箱(Fixed - Point Blockset)、小波分析工具箱(Wavelet Toolbox)、高阶谱分析工具箱(High - Order Spectral Analysis Toolbox)及地理信息处理工具箱(Mapping ToolBox)。

应用数学篇包括统计工具箱(Statistics Toolbox)、偏微分方程工具箱(Partial Differential Equation Toolbox)、样条工具箱(Spline Toolbox)及优化工具箱(Optimization Toolbox)。

控制工程篇包括系统辨识工具箱(System Identification Toolbox)、控制系统工具箱(Control System Toolbox)、鲁棒控制工具箱(Robust Control Toolbox)、模型预测控制工具箱(Model Predictive Control Toolbox)、模糊逻辑工具箱(Fuzzy Logic Toolbox)及非线性控制设计模块(Nonlinear Control Design Blockset)。

本套丛书在简要阐明函数原理和算法的基础上，给出了详细的函数使用说明，大部分函数给出了应用实例。对于理工科学生和广大科技人员具有重要的参考价值。同时为完整起见，以附录形式给出了 Matlab 标准环境下的所有函数的简单参考，以供用户快速查询。

Matlab 工具箱涉及多个学科的理论知识，内容非常丰富。由于我们水平和时间有限，对于书中出现的错误和不妥之处，恳请读者指正。

编 著 者

1999 年 11 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

前　言

控制科学与工程是一门研究自动控制的理论、方法、技术及其工程应用的学科。它是20世纪最重要的科学理论和成就之一，其各阶段的理论发展及技术进步都与生产和社会实践需求密切相关。利用闭环反馈实现自动控制的思想可以追溯到11世纪我国北宋时代发明的水运仪象台，18世纪西方近代工业采用的蒸汽机调速器则是自动控制技术的首次推广应用。自动控制技术的早期应用实践推动了控制理论的产生和发展，20世纪20年代以频域法为主的经典控制理论的形成及其在工业实践中的成功应用，成为控制科学与工程学科建立的标志。此后，经典控制理论继续发展并在工业中获得了广泛的应用。在空间技术发展的推动下，20世纪50年代又出现了以状态空间法为主的现代控制理论，并相继发展了最优控制、随机控制和自适应控制等若干相对独立的学科分支，使控制科学与工程学科的理论和技术进入工程化、产品化阶段，显著加快了工业技术更新的步伐。

进入20世纪80年代以来，现代社会生产和科技的进步对自动控制系统提出了更高的要求，为控制科学与工程学科的发展提供了强大的动力。在实际控制应用中，大量非线性、不确定对象的控制问题促进了系统辨识、模型预测控制、非线性控制和鲁棒控制理论及技术的发展；针对难以建立精确模型的复杂对象控制问题，模糊控制、专家控制和神经控制等智能控制方法得到了广泛的研究和应用；闭环控制思想向集成制造系统、社会、经济系统的渗透促使离散事件动态系统理论，大系统控制理论和系统工程科学的形成和发展。目前，控制科学和工程的应用遍及工业、农业、交通、环境、军事、生物、医学、经济、金融、人口和社会各个领域。

在控制科学与工程学科的发展过程中，控制系统的计算机辅助设计对于控制理论的研究和应用起着重要的作用。目前推出了多种控制系统计算机辅助分析与设计软件，其中Matlab及其系列控制类工具箱是应用最为广泛的一种。

作为著名的科学与工程计算软件包，Matlab在其发展过程中，一直将面向控制工程应用作为该软件的主要功能之一。Matlab的早期版本提供了控制系统设计工具箱(Control Toolbox)，1991年推出的Matlab 3.5版集成了控制系统仿真软件Simulab(Simulink的前身)和鲁棒控制工具箱(Robust Control Toolbox)，1993年在Matlab 4.0版中提供了基于模块图的控制系统仿真软件Simulink和多个与控制工程相关的工具箱。到目前为止，与Matlab 5.2版本配套的控制工程类工具箱超过10个。

本书作为《Matlab工具箱应用指南》系列丛书之一，介绍常用的6个控制工程类工具箱，即：

1　系统辨识工具箱(System Identification Toolbox)。该工具箱的主要功能包括参数化模型(包括AR、ARX、状态空间和输出误差等模型类)辨识工具、非参数化模型辨识工具、模型验证工具、递推参数估计、各种模型类的建立和转换函数以及集成多种功能的图形用户界面。

2　控制系统工具箱(Control System Toolbox)。主要功能包括线性控制系统的模型建立、时频特性分析和系统设计工具。

3　鲁棒控制工具箱(Robust Control Toolbox)。主要功能包括鲁棒性分析工具(奇异值、特

征根轨迹和结构奇异值分析)、鲁棒综合工具(频率加权 LQG 综合、LQG/LTR、综合、综合工具)、鲁棒模型降阶工具以及采样系统鲁棒控制。

4 模型预测控制工具箱(Model Predictive Control Toolbox)。主要功能包括系统模型辨识函数、模型建立和转换函数、模型预测控制器设计和仿真工具以及系统分析工具。

5 模糊逻辑工具箱(Fuzzy Logic Toolbox)。主要功能包括模糊推理系统的建立函数、图形化的模糊推理系统设计工具、神经模糊推理系统的学习及图形界面、模糊聚类以及与 Simulink 的接口功能等。

6 非线性控制设计模块(Nonlinear Control Design Blockset)。该工具箱以 Simulink 模块的形式,集成了基于图形界面的非线性系统控制器优化设计和仿真功能。

本书按照各个工具箱及其函数功能划分章节,每个工具箱作为一章,全书共 6 章。第 1 至 6 章分别为系统辨识工具箱、控制系统工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、模糊逻辑工具箱和非线性控制设计模块。每章在介绍相应学科背景的基础上分类对函数的原理、功能和用法进行说明,并给出应用实例。

本书具有如下主要特点:

1 内容新。本书介绍的工具箱都是近年来推出的最新版本,并与 1998 年推出的 Matlab 5.2 版相配套。

2 范围广。本书介绍 6 个常用的 Matlab 控制类工具箱,涉及控制工程领域的多个研究和应用方向。目前国内已有的几种介绍 Matlab 工具箱的图书仅仅涉及了控制系统工具箱。

3 实用性。本书在介绍工具箱函数的功能与原理的同时,详细介绍函数的调用格式和参数定义,便于在使用时参考。

本书可以作为高校控制系统计算机辅助设计课程的教学参考书,也可作为国内从事控制工程实践的广大技术人员的参考资料。

本书的第 1、3、4、5、6 章由徐昕编写,第 2 章由李涛编写,全书由徐昕、李涛和伯晓晨审校。参加本书编写的人员还有叶媛媛、薛宏涛、王石、刘秀罗、王建国、高平、陈明、刘锋、冯旭东、姚崎、王军、李相迎等。在本书的编写过程中,得到了唐修俊教授的大力支持。胡德文教授、唐修俊教授阅读了部分书稿,在此向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了电子工业出版社的大力支持,感谢出版社编辑在本书的出版过程中付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

编 著 者

1999 年 7 月于国防科技大学

目　录

第 1 章　系统辨识工具箱 …… (1)

1.1　系统辨识的基本原理和常用辨识模型 …… (1)

1.1.1　系统辨识的基本原理 …… (1)

1.1.2　常用的模型类 …… (4)

1.2　模型类的建立和转换 …… (6)

1.2.1　模型建立函数 …… (6)

1.2.2　模型转换函数 …… (13)

1.3　非参数模型辨识 …… (20)

1.3.1　时间序列协方差函数的估计 …… (20)

1.3.2　对象脉冲响应的辨识 …… (21)

1.3.3　控制对象频谱和传递函数的辨识 …… (23)

1.4　参数模型辨识 …… (28)

1.4.1　AR 模型辨识 …… (28)

1.4.2　ARX 模型辨识 …… (32)

1.4.3　ARMAX 模型辨识 …… (34)

1.4.4　输出误差模型与 BJ 模型辨识 …… (36)

1.4.5　状态空间模型辨识 …… (39)

1.4.6　一般线性输入输出模型辨识 …… (41)

1.5　递推参数模型辨识 …… (43)

1.5.1　基于递推算法的 ARX、ARMAX 模型辨识 …… (43)

1.5.2　输出误差模型的递推辨识 …… (48)

1.5.3　Box – Jenkins 模型的递推辨识 …… (49)

1.5.4　一般线性输入输出模型的递推辨识 …… (49)

1.5.5　基于数据分段的估计和辨识 …… (52)

1.6　模型验证与仿真函数 …… (54)

1.6.1　模型仿真函数 …… (54)

1.6.2　模型预测输出和预测误差的计算 …… (56)

1.7　系统辨识工具箱的交互式图形界面 …… (61)

1.7.1　数据视图 …… (62)

1.7.2　操作选择 …… (65)

1.7.3　模型视图 …… (65)

1.8　系统辨识工具箱的其他功能函数 …… (67)

1.8.1　模型结构选择函数 …… (67)

1.8.2　系统辨识工具箱的绘图函数 …… (70)

1.8.3　获取模型参数信息的有关函数 …… (75)

1.8.4 数据的预处理函数 …… (77)
1.8.5 具有不确定性的模型仿真 …… (80)
参考文献 …… (81)
第2章 控制系统工具箱 …… (82)
2.1 LTI系统模型及转换 …… (83)
2.1.1 LTI系统的模型及转换 …… (83)
2.1.2 LTI对象 …… (85)
2.1.3 模型建立及模型转换函数 …… (86)
2.1.4 LTI对象属性的存取和设置 …… (92)
2.2 系统建模 …… (96)
2.2.1 典型连接 …… (96)
2.2.2 典型系统生成 …… (104)
2.2.3 系统的连续化和离散化 …… (108)
2.3 状态空间实现 …… (112)
2.3.1 系统实现 …… (112)
2.3.2 状态空间实现函数 …… (115)
2.4 系统特性函数 …… (126)
2.5 系统根轨迹 …… (129)
2.6 系统频率响应 …… (133)
2.6.1 频率响应计算 …… (133)
2.6.2 频率响应绘制函数 …… (134)
2.7 系统时域响应 …… (144)
2.8 极点配置与状态观测器设计 …… (150)
2.8.1 极点配置和状态观测 …… (150)
2.8.2 极点配置和状态观测函数 …… (153)
2.9 LQ最优控制 …… (156)
2.9.1 LQ最优控制问题 …… (156)
2.9.2 LQG最优控制问题 …… (158)
2.9.3 最优控制函数 …… (159)
2.10 系统分析的GUI函数 …… (164)
2.10.1 ltiview工具 …… (164)
2.10.2 rltool工具 …… (166)
参考文献 …… (168)
第3章 鲁棒控制工具箱 …… (169)
3.1 鲁棒控制理论基础 …… (170)
3.1.1 鲁棒控制理论概述 …… (170)
3.1.2 系统不确定性和鲁棒性 …… (172)
3.1.3 控制系统的线性分式变换模型 …… (173)
3.1.4 奇异值与 H_∞、H_2 范数 …… (174)
3.1.5 结构奇异值 …… (175)

3.2 系统模型建立与转换工具 …… (176)
3.2.1 控制系统模型的数据结构 …… (176)
3.2.2 模型建立工具 …… (180)
3.2.3 模型转换工具 …… (183)
3.3 多变量波特图 …… (192)
3.3.1 频率响应的特征增益/相位波特图 …… (192)
3.3.2 连续和离散系统的奇异值波特图 …… (194)
3.3.3 结构奇异值波特图 …… (197)
3.4 鲁棒控制综合方法 …… (201)
3.4.1 LQG 优化控制综合 …… (201)
3.4.2 连续/离散 H_2 综合 …… (203)
3.4.3 连续/离散 H_∞ 综合 …… (205)
3.4.4 H_∞ 综合的 γ 迭代方法 …… (207)
3.4.5 LQG 回路传输恢复 …… (209)
3.4.6 μ 综合 …… (211)
3.4.7 Youla 参数化 …… (213)
3.5 模型降阶工具 …… (215)
3.5.1 均衡(Balanced)模型降阶 …… (215)
3.5.2 Schur 相对误差模型降阶方法 …… (217)
3.5.3 最优 Hankel 最小阶逼近降阶 …… (219)
3.5.4 脉冲响应向状态空间模型的转换 …… (220)
3.5.5 系统模型降阶的综合应用举例 …… (222)
3.6 鲁棒控制工具箱的其他功能函数 …… (223)
3.6.1 求解连续(离散)Riccati 方程 …… (224)
3.6.2 连续(离散)代数 Riccati 方程的条件数 …… (224)
3.6.3 矩阵的 Schur 形式 …… (225)
3.6.4 矩阵的内外因子化(Inner – Outer Factorization) …… (226)
3.6.5 计算矩阵的谱因子 …… (227)
参考文献 …… (228)
第 4 章 模型预测控制工具箱 …… (229)
4.1 系统模型辨识函数 …… (230)
4.1.1 数据向量或矩阵的归一化 …… (230)
4.1.2 基于线性回归方法的脉冲响应模型辨识 …… (232)
4.1.3 脉冲响应模型转换为阶跃响应模型 …… (235)
4.1.4 模型的校验 …… (236)
4.2 系统模型建立与转换 …… (236)
4.2.1 模型建立工具 …… (237)
4.2.2 模型转换工具 …… (239)
4.3 基于阶跃响应模型的控制器设计与仿真 …… (247)
4.3.1 输入输出有约束的模型预测控制器设计与仿真 …… (248)

4.3.2 输入输出无约束的模型预测控制器设计 …… (250)
4.3.3 计算由阶跃响应模型构成的闭环系统模型 …… (252)
4.4 基于状态空间模型的预测控制器设计 …… (254)
4.4.1 输入输出有约束的状态空间模型预测控制器设计 …… (254)
4.4.2 输入输出无约束的状态空间模型预测控制器设计 …… (257)
4.4.3 状态估计器设计 …… (264)
4.5 系统分析与绘图函数 …… (266)
4.5.1 计算和绘制系统的频率响应曲线 …… (267)
4.5.2 计算频率响应的奇异值 …… (267)
4.5.3 计算系统的极点和稳态增益矩阵 …… (268)
4.5.4 其他系统分析和绘图函数 …… (269)
4.6 模型预测工具箱的通用功能函数 …… (271)
4.6.1 通用模型转换函数 …… (271)
4.6.2 方程求解函数 …… (273)
4.6.3 离散系统的分析函数 …… (274)
参考文献 …… (275)
第5章 模糊逻辑工具箱 …… (276)
5.1 模糊集合与模糊关系 …… (277)
5.1.1 模糊集合 …… (278)
5.1.2 模糊关系 …… (281)
5.2 模糊推理系统的基本构成与建立步骤 …… (282)
5.2.1 模糊推理系统的基本类型 …… (282)
5.2.2 模糊逻辑系统的构成与主要设计步骤 …… (283)
5.3 利用模糊逻辑工具箱建立模糊推理系统 …… (284)
5.3.1 模糊推理系统的建立、修改与存储管理 …… (284)
5.3.2 输入输出语言变量及其语言值 …… (289)
5.3.3 模糊语言变量的隶属度函数 …… (291)
5.3.4 模糊规则的建立与修改 …… (302)
5.3.5 模糊推理计算与去模糊化 …… (305)
5.4 模糊逻辑工具箱的图形界面工具 …… (308)
5.4.1 基本模糊推理系统编辑器(Fuzzy) …… (308)
5.4.2 隶属度函数编辑器(Mfedit) …… (310)
5.4.3 模糊规则编辑器(Ruleedit) …… (310)
5.4.4 模糊规则浏览器(Ruleview) …… (312)
5.4.5 模糊推理输入输出曲面视图(Surfview) …… (312)
5.5 Matlab 模糊逻辑工具箱的高级应用 …… (313)
5.5.1 基于 Sugeno 型模糊推理的神经模糊系统建模 …… (313)
5.5.2 模糊聚类 …… (323)
5.5.3 基于减法聚类的模糊推理系统建模 …… (327)
5.6 Matlab 模糊逻辑工具箱的接口功能 …… (328)

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

5.6.1 模糊推理系统与 C 语言的接口 …… (328)
5.6.2 Matlab 模糊逻辑工具箱与 Simulink 的接口 …… (329)
5.7 模糊逻辑工具箱的综合应用实例 …… (330)
5.7.1 二关节机械手的逆运动学建模 …… (330)
5.7.2 自适应噪声消除 …… (332)
5.7.3 混沌时间序列预测 …… (335)
参考文献 …… (338)
第 6 章 非线性控制设计模块 …… (339)
6.1 利用 NCD 模块求解各种非线性控制设计问题 …… (340)
6.1.1 具有物理约束和设计约束的非线性系统设计 …… (340)
6.1.2 控制能量的极小化 …… (340)
6.1.3 不确定系统的鲁棒控制器设计与仿真 …… (340)
6.1.4 非线性系统辨识和模型跟随 …… (341)
6.1.5 自适应控制、多模态控制和增益调度 …… (342)
6.1.6 其他控制问题 …… (343)
6.2 NCD 模块的使用方法和步骤 …… (343)
6.2.1 建立 NCD 闭环系统的方框图 …… (343)
6.2.2 设置 NCD 模块的约束条件 …… (344)
6.2.3 设置优化变量 …… (348)
6.2.4 优化计算 …… (348)
6.3 NCD 模块的应用实例 …… (349)
6.3.1 PID 控制器的优化设计 …… (349)
6.3.2 多变量状态反馈系统的优化控制 …… (351)
6.3.3 二维 PI 控制器的优化设计 …… (354)
参考文献 …… (355)
附录 Matlab 函数参考 …… (356)
附录 1 常用命令 …… (356)
附录 2 运算符号与特殊字符 …… (357)
附录 3 语言结构与调试 …… (358)
附录 4 基本矩阵及矩阵处理 …… (359)
附录 5 特殊矩阵 …… (360)
附录 6 数学函数 …… (360)
附录 7 坐标转换 …… (361)
附录 8 矩阵函数 …… (361)
附录 9 数据分析与 Fourier 变换函数 …… (362)
附录 10 多项式处理函数 …… (363)
附录 11 非线性数值方法 …… (363)
附录 12 稀疏矩阵函数 …… (364)
附录 13 图形绘制 …… (365)
附录 14 特殊图形 …… (367)

附录 15　图形处理 …… (368)
附录 16　GUI(图形用户接口) …… (369)
附录 17　声音处理 …… (370)
附录 18　字符串处理函数 …… (370)
附录 19　文件输入输出函数 …… (371)
附录 20　位操作 …… (371)
附录 21　复杂数据类型 …… (372)
附录 22　日期与时间 …… (373)
附录 23　动态数据交换 …… (373)
参考文献 …… (373)

第 1 章　系统辨识工具箱

(System Identification Toolbox,Ver 4.0.4)

控制理论经过数十年的发展，取得了丰富的研究成果，并在工程中得到了广泛的应用。目前控制理论的大量研究成果，如经典控制、现代控制和自适应控制等都是基于对控制对象的动力学特性进行一定精度的数学建模，因此尽可能获得控制对象的精确数学模型是成功地进行控制器设计的重要因素。当对象较为简单时，可以应用有关知识建立对象的机理模型，并能够达到较高的精度。随着人类生产的发展，控制对象日益复杂，建立对象的机理模型往往是困难的，许多情况下只能获得对象的输入输出数据。因此，如何利用对象的输入输出数据建立数学模型就成为控制理论和工程界研究的重要内容。有关这方面的研究逐渐形成了一门相对独立的学科——系统辨识学科。

所谓辨识，就是通过测量研究对象在人为输入作用下的输出响应，或正常运行时的输入输出数据记录，加以必要的数据处理和数学计算，估计出对象的数学模型。系统辨识的理论研究已取得大量的成果，其应用领域也超出了控制工程的范畴。

Matlab 的系统辨识工具箱提供了进行系统模型辨识的有力工具，其主要功能包括：

(1) 参数模型辨识工具，包括 AR、ARX、状态空间和输出误差等模型类的辨识工具；

(2) 非参数模型辨识工具；

(3) 模型验证工具，即对辨识模型进行仿真并将真实输出数据与模型预测数据进行比较，计算相应的残差；

(4) 递推参数估计，针对各种参数模型，利用递推估计方法获得模型参数；

(5) 各种模型类的建立和转换函数；

(6) 集成多种功能的图形用户界面，该界面以图形交互方式提供模型类的选择和建立、输入输出数据的加载和预处理，以及模型的估计等功能。

1.1　系统辨识的基本原理和常用辨识模型

1.1.1　系统辨识的基本原理

1　系统辨识的定义和基本要素

1978 年瑞典著名学者 L.Ljung 给出系统辨识的定义：“辨识有三个要素即数据、模型类

和准则，辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择一个与数据拟合的最好的模型。”该定义强调了系统辨识的三个基本要素，其中数据是指系统的输入输出数据，模型类则定义了模型的基本结构类型，准则即为评价模型与输入输出数据拟合程度的量度标准。

2 系统辨识的等价准则

等价准则也称为误差准则，是系统辨识问题中的基本要素之一，用来衡量模型接近实际过程的标准，通常被表示为辨识模型与实际对象模型的误差的泛函。这里所说的误差可以是输出误差、输入误差或广义误差。

3 辨识的内容和步骤

系统辨识的内容主要包括以下四个方面：

（1）实验设计；

（2）模型结构辨识；

（3）模型参数辨识；

（4）模型检验。

• 实验设计

系统辨识实验设计需要完成的工作包括选择和确定输入信号、采样时间、辨识时间和辨识的模式。其中，输入信号的选择必须保证在辨识时间内使对象的动态特性被持续激励，从谱分析的角度看，就是要求输入信号的频谱必须覆盖对象的频谱；另一方面，输入信号的选择还应尽量提高辨识模型的精度，即具有较好的“优良性”。关于最优输入信号的设计问题，可以参考有关文献。从工程应用的角度出发，输入信号的选择还应考虑下面 3 点要求：

（1） 输入信号的功率或幅度不宜过大，以免对象进入非线性工作区；同时也应避免输入信号的幅值过小，否则将影响辨识的精度；

（2） 输入信号对过程的“净扰动”要小，即正、负向扰动的机会要尽量均等；

（3） 工程上容易实现，成本低。

系统辨识实验设计需要完成的另一项工作是采样时间的选择，这将直接影响到辨识的精度。采样时间的选择一般应遵循如下的原则：

（1） 满足采样定理，即采样频率不低于信号截止频率的 2 倍；

（2） 与模型最终应用时的采样时间尽可能保持一致，并且尽量考虑辨识算法；控制算法的计算速度和执行机构、检测元件的响应速度等问题；

（3） 采样时间过大或过小都不利于获得良好的辨识效果，在工程应用中选择采样时间通常采用的检验公式为

$$T_0 = T_{95} /(5 \sim 15)$$

其中，T_0 表示采样时间，T_{95} 是过程阶跃响应达到稳态值 95%需要的调节时间。

在系统辨识实验设计中还涉及到辨识模式的选择问题，即选择开环辨识或闭环辨识以及选择在线辨识或离线辨识。在开环辨识中，对象不存在反馈控制作用；而在闭环辨识中，对象处于闭环控制回路中。离线辨识是指对象的输入输出数据已经全部获得，对辨识计算不要求实时性；在线辨识则在过程对象的实际运行中完成，辨识结果具有实时性。

• 模型结构辨识

模型结构辨识包括模型类和模型结构参数的确定两部分内容。模型类的确定主要根据经验对实际对象的特性进行一定程度上的假设，如对象的模型是线性的还是非线性的、是参数模型还是非参数模型等。在确定模型类之后，就可根据对象的输入输出数据，按照一定的辨识算法确定模型结构参数。例如，对于如下的以差分方程表示的参数模型类

$$A\ (z^{-1})z(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + e(k)$$

其中，

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_n z^{-n}$$
$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \ldots + b_n z^{-n}$$

对应上述模型类的模型结构参数为阶次 n 和纯时延 d。

• 模型参数辨识

在模型结构确定后，需要进行模型参数辨识。模型参数的辨识方法主要包括各种参数估计方法，如最小二乘法等。最小二乘法的基本结果有两种形式，一种是经典的一次完成算法；另一种是递推算法。最小二乘法及其各种改进算法如增广最小二乘法、广义最小二乘法等在系统辨识中具有重要的地位，是模型参数辨识的基本工具。最小二乘法考虑如下的输入输出关系：

$$z(k) = h^T(k)\theta + n(k)$$

其中，$z(k)$为对象的输出向量，$h(k)$是可观测的数据向量，θ 为对象模型参数，$n(k)$为零均值的随机噪声。参数估计的优化指标为

$$J(\theta) = \sum [z(k) - h^T(k)\theta]^2$$

通过使 J=min 得到θ 的估计值$\hat{\theta}$，$\hat{\theta}$ 称为θ 的最小二乘估计值。

• 模型检验

模型检验是系统辨识不可缺少的步骤之一。模型检验的方法主要有：

(1) 利用在不同时间区间内采集的输入输出数据，分别进行对象模型辨识，如果各个模型的特性基本相同，则说明辨识结果是可靠的；

(2) 利用两组不同的数据分别得到辨识模型，并分别计算它们的损失函数；然后将两组数据交叉使用，再计算各自的损失函数，如果对应的损失函数没有显著变化，则说明辨识模型是可靠的；

(3) 增加辨识中使用的数据长度，如果损失函数不再显著下降，则模型是可靠的；

(4) 检验模型与对象输出残差序列{$e(k)$}的白色性，如果残差序列可以看作零均值的白噪声序列，则认为辨识模型是可靠的。

1.1.2 常用的模型类

作为系统辨识的三个基本要素之一，模型类的选择往往决定能否有效地建立对象的辨识模型。在 Matlab 系统辨识工具箱中提供了对多种模型类的支持，包括非参数模型类中的脉冲响应模型、参数模型类中的 ARX 模型、ARMAX 模型、BJ 模型和状态空间模型等。下面对这些模型类进行简要介绍，更进一步的介绍参见后续章节的函数说明。

1 非参数模型类

在非参数模型类中主要包括脉冲响应模型和频域描述模型。

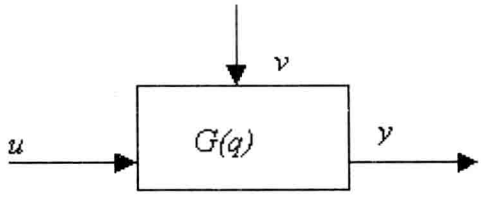


图 1.1.1 线性对象

在图 1.1.1 中，u 为输入，y 为输出，v 为外界噪声信号。对象的输入输出关系可以表示如下：

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t)$$

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k q^{-k}$$

其中，q 为时间平移算子。序列$\{g_k\}$称为对象的脉冲响应模型。

外界噪声信号 v 具有的频率特性设为 $\Phi_v(\omega)$，其计算公式为：

$$\Phi_v(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} R(\tau)e^{-j\omega t}$$

$$R(\tau) = Ev(t)v(t-\tau)$$

对 $G(q)$作傅氏变换得到 $G(e^{j\omega})$，称为对象的频率函数。对象频率函数 $G(e^{j\omega})$和噪声频率特性 $\Phi_v(\omega)$统称为对象的频域描述模型。这两种模型类都不能表示为对象的有限参数模型形式，因此称为非参数模型。

2 参数模型类

参数模型类是指利用有限参数来表示对象的模型，在系统辨识工具箱中支持的参数模型类有 ARX 模型、ARMAX 模型、BJ 模型、输出误差模型和状态空间模型。

- ARX 模型

ARX 模型具有如下的形式：

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com