

1

基于 MATLAB 6.X

MATLAB

工 程 应 用 丛 书

控制系统设计与仿真



赵文峰 等编著



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

MATLAB 工程应用丛书

控制系统设计与仿真

赵文峰 等编著

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书是 MATLAB 工程应用系列丛书之一。书中系统地讲述了控制系统的相关理论,动态系统的建模,以及如何运用 MATLAB 6. X 软件中的控制工具箱进行控制系统的设计和仿真。本书主要内容包括: LTI 系统的建模、设计和仿真,鲁棒控制系统的设计和仿真,以及线性模型预测系统的设计和仿真等。书中通过大量实例展示了使用 MATLAB 6. X 进行控制系统工程设计的一般方法和设计技巧。

本书可作为高等院校自动控制和机电工程等专业师生的参考教材,对从事上述领域工作的广大科技工作人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统设计与仿真/赵文峰等编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2002. 3

(MATLAB 工程应用丛书)

ISBN 7 - 5606 - 1099 - 4

I. 控… II. 赵… III. ① 控制系统—系统设计—软件包, MATLAB6. X ② 控制系统—系统仿真—软件包, MATLAB6. X IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 091140 号

策划编辑 毛红兵 陈宇光

责任编辑 龙 晖

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16. 25

字 数 380 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 20. 00 元

ISBN 7 - 5606 - 1099 - 4/TP · 0549

XDUP 1370001-1`

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

从事控制系统分析和设计的技术人员常常会为系统分析和设计带来的巨大、繁琐的计算工作量而苦恼。例如,在进行校正器设计时,经常需要绘制系统对数频率响应曲线,而在采用根轨迹方法配置系统期望极点时,也需要首先绘制出系统的根轨迹图。然而,如果借助计算机本身强大的计算和绘图功能,这些问题都可以很容易地解决,从而极大地提高了系统分析和设计的效率,直接导致了控制系统计算机辅助设计这一学科的建立。

目前适用于控制系统计算机辅助设计的软件很多。在众多仿真语言和仿真软件包中,MATLAB 以其模块化的计算方法,可视化与智能化的人机交互功能,丰富的矩阵运算、图形绘制、数据处理函数以及模块化图形组态的动态系统仿真工具 Simulink,成为控制系统设计和仿真领域最受欢迎的软件系统。

MathWorks 公司最新发布的 MATLAB 6.1 包含了功能强大的控制产品集,它支持控制系统设计过程的每一个环节,从系统建模、仿真到控制器设计和实现等等,可以用于各种不同的领域,如汽车、航空航天、计算机和通讯行业。

使用 MATLAB 高级编程语言,只需花很短的时间就可以开发出控制算法;通过强大的绘图能力,对你的数据、方程和结果进行显示,可绘出根轨迹、Bode 图、响应和谱等。

与控制相关的工具箱涵盖了许多前沿的控制设计方法,如 LQG、根轨迹、 H^∞ 以及模糊逻辑。MATLAB 语言提供的图形界面使控制系统的设计和分析更加方便,如 Control System Toolbox 中包含一个根轨迹设计工具(用于补偿器的设计)和一个 LTI 观察器(用于分析时域和频域的响应)。

使用框图式动态系统仿真工具 Simulink 可以方便地建立控制系统原型和控制对象模型,通过仿真不断地优化和改善用户的设计。无论是离散的、连续的、条件执行的、多采样的或混杂的系统,Simulink 都是描述动态系统模型的最佳工具。

目前 MATLAB 软件包已经成为控制系统领域的标准设计和计算工具,然而介绍 MATLAB 使用方法的书中,大多只是介绍 MATLAB 软件及其工具箱的使用方法,而很少针对某一个具体的问题作详细深入的探讨。读者只能在脱离具体应用的环境下了解 MATLAB 语言的使用和某些工具箱函数的调用方法,而对一般控制系统的设计流程和函数的运用方法总感到不得要领。此外,在介绍控制系统分析和设计的相关著作中,又很少以 MATLAB 作为专门的辅助设计工具,因此,广大控制系统的技术人员迫切需要一本集中讲述如何运用 MATLAB 进行控制系统分析和设计的书,这便是作者撰写此书的动机。

本书不同于一般介绍 MATLAB 和工具箱的书,而是结合大量的具体实例,从系统建模、控制器设计、误差分析和系统仿真等几个方面讲述了运用 MATLAB 进行控制系统分析和设计的全过程。所列举的实例紧贴工程实际,具有很强的代表性。通过阅读此书,读者可以学到大量控制系统设计和仿真的技巧和基本方法,使控制系统设计人员迅速掌握 MATLAB 这一强大工具的使用方法。

参与本书编写的人员有赵文峰、吴为、谢光、陈兰蓉、沈铸、李明、谢涛、田杰、江雪平、杨力保、郭建伟、毛艳霞、钱江红、吴大维、燕湘、陈琼、张克、谢南天等；吴令达、王雪峰绘制了本书的部分图片；本书的写作得到了王德军、林哲辉、施晓红、叶缓缓、陈颖文等人的大力协助与支持，毛红兵老师对本书的策划与编写工作给予了有效的指导，在此一并表示感谢！

感谢西安电子科技大学出版社给本书提供写作出版的机会！

由于作者水平有限，书中错误与不当之处在所难免，恳请专家、读者指正。

编 者

2002年2月

符号说明

本书中涉及大量的程序和公式。由于程序中无法输入斜体和希腊文字母，因此我们对书中的符号作如下约定：本书正文和公式中采用的符号均使用斜体，程序中相应的符号采用正体；对公式或程序相应的说明采用斜体或正体；叙述中采用的希腊文字母如 β ，在程序中用 B 代替；叙述中使用的上下标符号如 a_1 ， ω_s ， F_b ， T_b 等，在程序中采用 a1，Ws，Fb，Tb 代替；叙述中的矩阵向量与矢量采用黑斜体，程序中采用正体。

目 录

第一章 概述	1	2.2.8 系统的频域仿真	44
1.1 控制系统简介	1	2.2.9 Z 变换与离散系统	45
1.1.1 控制理论的发展	1	习题	46
1.1.2 经典控制理论	2	第三章 控制系统建模	48
1.1.3 现代控制理论	2	3.1 简单机械系统的建模	48
1.1.4 控制系统的计算机辅助设计	3	3.1.1 弹簧振动系统的建模	48
1.2 MATLAB 6.X 中的控制产品集	4	3.1.2 摩托车缓冲系统的建模	49
1.2.1 概述	4	3.2 简单流体系统的建模	52
1.2.2 控制系统工具箱简介	4	3.2.1 单个蓄水槽的动态模型	52
1.2.3 Simulink 4.1 产品介绍	5	3.2.2 双蓄水槽系统的模型建立	57
1.2.4 其它控制相关产品	7	3.3 永磁体直流电机的建模	60
1.2.5 MATLAB 6.X 开发控制系统 流程	7	3.3.1 物理描述	60
1.3 数学准备	8	3.3.2 数学模型	61
1.3.1 微分方程的求解	8	3.3.3 仿真分析	63
1.3.2 差分方程的解	10	3.4 光源跟踪伺服系统的建模与 系统分析	64
1.3.3 矩阵代数与矩阵运算	11	3.4.1 物理模型	64
习题	15	3.4.2 数学模型	65
第二章 控制系统的时域和频域描述	16	3.4.3 仿真分析	66
2.1 状态方程与时域描述	16	习题	72
2.1.1 控制系统的状态空间描述	16	第四章 控制系统的设计与仿真	74
2.1.2 状态方程的创建	17	4.1 系统建模与仿真框图的创建	74
2.1.3 非线性系统的线性化	21	4.1.1 问题描述	74
2.1.4 线性系统的解析解	22	4.1.2 物理模型	78
2.1.5 线性系统的离散化	25	4.1.3 时域仿真	78
2.1.6 状态方程的数值积分	26	4.1.4 模型转换	80
2.1.7 实例	27	4.1.5 留数定理	81
2.2 传递函数与频域描述	32	4.1.6 频域仿真	81
2.2.1 线性系统的输入输出关系	32	4.1.7 仿真框图及系统建立	81
2.2.2 Laplace 变换	34	4.2 控制系统设计	84
2.2.3 Laplace 反变换	36	4.2.1 经典比例控制器	85
2.2.4 微分方程的解	38	4.2.2 状态反馈控制器	86
2.2.5 卷积	39	4.2.3 完全可控性	86
2.2.6 Laplace 变换与状态方程	40	4.2.4 极点配置	88
2.2.7 系统传递函数矩阵与 方框图实现	41	4.2.5 带全观测器的状态反馈控制	89
		4.2.6 完全可观性	91

4.2.7 观测器增益的确定	92	6.1 鲁棒控制工具箱介绍	163
4.2.8 对偶系统	96	6.1.1 鲁棒控制工具箱简介	163
4.3 控制系统的时域仿真	96	6.1.2 系统的分层数据结构表示	164
4.3.1 经典比例控制器设计	97	6.2 鲁棒控制系统概述	166
4.3.2 状态反馈控制器	97	6.2.1 奇异值、 H^2 和 H^∞ 范数	166
4.3.3 混合控制器	98	6.2.2 标准的鲁棒控制问题	167
4.3.4 参考输入增益的调整	101	6.2.3 结构与非结构不确定性	168
4.4 实例：倒摆系统的建模与仿真	102	6.2.4 鲁棒控制分析	168
4.4.1 引言	102	6.2.5 系统鲁棒分析	171
4.4.2 基本方程	103	6.3 鲁棒控制系统的设计方法	173
4.4.3 非线性状态方程描述	104	6.3.1 概述	173
4.4.4 线性状态方程描述	105	6.3.2 H^2 和 H^∞ 设计方法	174
4.4.5 倒摆系统的 MATLAB 仿真	106	6.3.3 奇异值回路设计：混合 灵敏方法	175
4.4.6 仿真程序源代码	115	6.3.4 μ 综合问题	178
习题	126	6.3.5 双线性变换与鲁棒控制 系统设计	180
第五章 LTI 系统的 MATLAB 辅助设计 与仿真	127	6.4 鲁棒控制系统设计实例	181
5.1 控制系统工具箱的使用	127	6.4.1 二阶系统的经典回路设计 与 H^∞ 综合	181
5.1.1 创建 LTI 模型对象	127	6.4.2 双积分系统的 H^∞ 鲁棒设计	185
5.1.2 设置 LTI 对象的属性	133	6.4.3 弹簧振动系统的双线性变换 与 H^∞ 鲁棒控制	186
5.1.3 LTI 模型之间的相互转换	134	6.4.4 弹簧振动系统鲁棒控制器 的 μ 综合方法	188
5.1.4 Simulink 中的 LTI 系统模块	135	习题	190
5.1.5 LTI 模型的运算	136	第七章 模型预测控制系统的计算机 辅助设计	191
5.1.6 系统分析工具	137	7.1 模型预测控制工具箱概述	191
5.1.7 模型属性的分析	138	7.2 基于阶跃响应的模型预测控制	191
5.2 LTI 模型数组	141	7.2.1 阶跃响应模型	191
5.2.1 基本概念	141	7.2.2 模型辨识	193
5.2.2 LTI 数组的维数和形状	142	7.2.3 无约束模型预测控制	195
5.2.3 创建 LTI 数组	143	7.2.4 闭环回路分析	198
5.2.4 LTI 数组的下标运用	144	7.2.5 有约束的模型预测控制	199
5.2.5 LTI 数组的相关运算	145	7.3 基于状态空间模型的模型预测控制	200
5.3 LTI 系统分析和设计的图形 操作环境	146	7.3.1 MPC 表示的状态空间模型	200
5.3.1 LTI 观测器(LTI Viewer)	146	7.3.2 基于状态空间模型的 无约束 MPC 设计	203
5.3.2 SISO 系统设计工具 (SISO Design Tool)	148	7.3.3 基于状态空间模型的 有约束 MPC 设计	205
5.4 LTI 控制系统的设计实例	150	习题	207
5.4.1 LQG 调节器的设计	150		
5.4.2 Kalman 滤波器的设计	156		
习题	162		
第六章 鲁棒控制系统的计算机辅助 设计与仿真	163		

第八章 控制系统应用设计与

仿真实例	208
8.1 汽车运动控制系统的设计	208
8.1.1 问题提出	208
8.1.2 模型描述	208
8.1.3 PID 控制器设计	209
8.1.4 根轨迹设计方法	211
8.2 跷跷板控制系统的设计	213
8.2.1 系统模型	213
8.2.2 全状态反馈控制器的设计	216
8.2.3 数字控制器的设计和实现	218
8.3 直流(DC)电机调速系统的计算机 辅助设计	220
8.3.1 问题描述	220
8.3.2 系统设计	220
8.4 电磁驱动水压伺服机构的 根轨迹设计	225
8.4.1 问题描述	225

8.4.2 打开 SISO 设计工具	226
8.4.3 增大系统的增益	226
8.4.4 增加控制器的零极点	227
8.4.5 系统的阻尼比约束	229

习题	230
----------	-----

附录 A MATLAB 6. X 常用命令

A.1 基本命令	232
A.2 常用函数	233
A.3 控制工具箱函数	234

附录 B MathWorks Release 12. 1 的

新特点

B.1 Release 12.1 版本中的新产品	241
B.1.1 Release 12.1 中的全新产品	241
B.1.2 Release 12.1 中产品的更新	241
B.2 MATLAB 6.1 新特性	245
B.3 Simulink 4.1 新特性	246

附录 C 各章习题答案

参考文献	250
------------	-----

第一章 概 述

本章要点:

- * 控制系统简介
- * MATLAB 6.X 中的控制产品集
- * 数学准备

1.1 控制系统简介

1.1.1 控制理论的发展

进入 20 世纪以来,现代科学技术的发展对自动控制的精度、速度和适应能力的要求越来越高,从而推动了自动控制理论和控制技术的迅速发展。特别是 20 世纪 60 年代以来,计算机技术的迅猛发展,奠定了自动控制理论和控制技术的物质基础。于是,现代控制理论逐步形成了一门现代科学分支。

控制理论的发展过程是由简单到复杂、由量变到质变的辩证发展过程。从发展的不同阶段来看,控制理论的发展大致经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段。

经典控制理论主要研究简单的单输入单输出(SISO)系统,所涉及的系统大多是线性时不变(LTI)系统,即使是用于解决非线性系统问题的相平面法,也只能处理两个状态变量的情况。常接触到的系统,如电机的位置和速度控制、冶炼炉的温控系统都被简化成 SISO 线性定常系统来处理。控制系统设计的常用方法包括频域法、根轨迹法、奈奎斯特稳定判据、期望对数频率特性综合等。这些方法在精确度、准确度不高的情况下是完全适用的。经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的,具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点。这个特点是与 40~50 年代生产发展的状况以及计算机技术的发展水平尚处于初期阶段密切相关的。

现代控制理论可以用来解决多输入多输出(MIMO)系统的问题,系统可以是线性或非线性的,定常或时变的。实际控制系统往往需要同时控制多个系统变量。例如在精密加工机械的使用中,有的控制变量多达 7 个,经典控制理论显然是无能为力的。因此,现代控制理论不仅在航天、飞行器的控制方面得到广泛应用,而且还深入到工业生产过程中。现代控制理论的研究方法采用状态空间法,它的分析不仅限于单纯的闭环,而且可以扩展为适应环、学习环等。总之,现代控制理论是 60 年代人类探索空间的需要,也是计算机飞速发展和普及的结果。

大系统理论和智能控制理论的出现,使控制理论发展到一个新阶段。所谓大系统,是

指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统,涉及生产过程、交通运输、生物控制、计划管理、环境保护和空间技术等多方面的控制和信息处理问题。而智能控制系统是具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统,其中最典型的是智能机器人。

1.1.2 经典控制理论

经典控制理论对 SISO LTI 系统的分析和综合是有成效的。它主要以 Laplace 变换和 Z 变换为数学工具,用传递函数方法描述系统的动态特性,用频域响应、根轨迹分析和极点配置等理论研究设计控制系统。

经典控制理论主要有以下特点:

(1) 经典控制理论本质上是一种频域方法,它以系统的输出输入特性作为研究的依据,着眼于系统的输出;而现代控制理论本质上是一种时域方法,它是建立在状态变量描述方法的基础上的。

(2) 经典控制理论是在一类特定的输入情况下分析输出的响应。在综合问题上,是根据给定的某种指标来设计系统的校正网络的。

(3) 经典控制理论的控制器即校正装置,是由能实现典型控制规律的调节器构成的。而现代控制理论的控制器则是能实现任意控制规律的数字机。

(4) 经典控制理论的基本内容有时域法、频域法、根轨迹法、描述函数法、相平面法、代数与几何判据、校正网络设计等,研究的主要问题是稳定性问题。

1.1.3 现代控制理论

现代控制理论以线性代数为数学工具,用状态空间方法描述系统内部的动力学性能,研究系统的稳定性、能控性、能观性等问题,用极点配置、最优控制、状态方块等理论研究设计控制系统。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,主要有以下特点:

(1) 现代控制理论是以多变量、线性及非线性系统为研究对象的。在近代的工业过程控制、飞行器控制等许多领域中,被控对象变得日益复杂,其中包括了多变量耦合问题、参数时变问题和非线性问题。现代控制理论正是为了处理这样的复杂控制系统而发展起来的。

(2) 现代控制理论以时域中的状态空间方法对系统进行数学描述,并在此基础上对系统进行各种定性和定量的分析以及希望的控制规律设计。

(3) 现代控制理论以现代数学方法为主要分析手段,如线性代数、微分方程和微分几何等现代数学理论在最优控制、非线性系统的控制问题中都有广泛的应用,甚至像模糊数学、混沌及神经网络等最新的数学方法也已经在许多控制领域得到应用。

(4) 现代控制技术的研究是以计算机为主要计算和分析工具的,计算机技术的发展极大地促进了控制理论研究的广泛应用与推广。

(5) 现代控制技术的研究对象还包括没有或不能用精确数学模型进行描述的广泛意义上的非线性系统,其中诸如神经网络控制、自适应控制等先进控制技术已成功应用到卫星、航天等大系统的控制中。现代控制技术能够处理复杂非线性、相互耦合、外界干扰、多输入多输出、参数时变等复杂对象,研究的范围与经典控制理论相比有了极大的扩展。

现代控制理论的内容十分丰富,而 MATLAB 软件中包含了控制理论与控制系统常用的和基本的分析技术,这为现代控制理论的研究和工程应用带来了极大的方便。

1.1.4 控制系统的计算机辅助设计

控制系统计算机辅助设计是一门以计算机为工具进行的控制系统设计与分析的技术。

大部分从事科学研究和工程应用的技术人员常常遇到并为之困扰的是,当计算涉及矩阵运算或画图时,利用 FORTRAN 和 C 语言进行程序设计是一件比较麻烦的事情。不仅需要对所利用的算法有深刻的了解,还需要熟练掌握程序语言的编程方法。有时这种编程并不是一件容易的事情。例如,当我们需要计算矩阵的逆矩阵时,首先必须选择一个稳定的求逆算法,然后采用某种编程语言经过艰苦繁琐的编程调试工作实现该算法。这使得我们经常将精力花费到这种看起来与工作并无多大关系且经常是重复性劳动的工作中去。

从事控制系统分析和设计的技术人员则常常会为系统分析和设计带来的巨大、繁琐的计算工作量而苦恼。例如,在进行校正器设计时,经常需要绘制系统对数频率响应曲线;在采用根轨迹方法配置系统期望极点时,也需要首先绘制出系统的根轨迹图。而如果借助计算机本身强大的计算和绘图功能,这些问题都可以很容易地解决,从而极大地提高了系统分析和设计的效率。

控制系统计算机辅助设计的软件包是从 20 世纪 70 年代发展起来的,最初是由英国的 H. H. Rosenbrock 学派将线性单变量控制系统的频域理论推广到多变量系统,随后 Manchester 大学的控制系统中心完成了该系统的计算机辅助设计软件包;日本的古田胜久主持开发的 DPACS-F 软件,在处理多变量系统的分析和设计上也很有特色。同时,国际自动控制领域的一些学者用状态空间法发展了多变量系统控制理论,在控制系统设计软件上提供了命令式的人机交互界面,在控制系统设计与仿真中给设计者以充分的主动权。

1980 年前后,美国的 Cleve Moler 博士在 New Mexico 大学讲授线性代数课程时,发现应用其它高级语言编程极为不便,便开发了 MATLAB (MATrix LABoratory,即矩阵实验室),这便是采用 FORTRAN 程序语言编写的萌芽状态的 MATLAB。经过在该大学进行了几年的试用流传之后,在 Little 的推动下,由 Little、Moler、Steve Bangert 合作于 1984 年成立了 MathWorks 公司,并推出了该软件的正式版本。从这时起, MATLAB 的内核采用 C 语言编写,后来的版本又增加了丰富的图形图像处理及多媒体功能,使得 MATLAB 的应用愈来愈广泛。

为了准确地将某个控制系统的复杂模型输入给计算机,然后对其进行进一步的分析和仿真,1990 年 MathWorks 公司为 MATLAB 4.X 提供了新的控制系统模型图形输入与仿真工具,并定名为 SIMULAB,该工具很快在控制界得到了广泛的应用。但因此其名字与著名的软件 SIMULA 类似,所以在 1992 年正式改名为 Simulink。此软件有两个明显的功能:仿真与连接,即可以通过鼠标在模型窗口中画出所需的控制系统模型,然后利用该软件提供的各种功能对系统进行仿真分析。这种方法使得对一个很复杂的系统的输入变得简单。Simulink 的出现,更使得 MATLAB 为控制系统的仿真与其在 CAD 中的应用打开了崭新的局面。

20 世纪 80 年代以来,在众多仿真语言和仿真软件包中, MATLAB 以其模块化的计算方法,可视化与智能化的人机交互功能,丰富的矩阵运算、图形绘制、数据处理函数以及

模块化图形组态的动态系统仿真工具 Simulink, 成为控制系统设计和仿真领域最受欢迎的软件系统。

1.2 MATLAB 6.X 中的控制产品集

1.2.1 概述

MATLAB 6.X 控制产品集支持控制设计过程的每一个环节, 可以用于不同的领域, 如汽车、航空航天、计算机和通讯等领域。MathWorks 提供的控制产品集, 提供了如下能力:

使用 MATLAB 高级编程语言, 只需花很短的时间就可以开发出控制算法、强大的绘图能力以对数据、方程和结果进行显示, 如根轨迹、Bode 图、响应和谱等。

与控制相关的工具箱涵盖了许多前沿的控制设计方法, 从 LQG 和根轨迹到 H^∞ 和模糊逻辑。MATLAB 语言提供的图形界面使控制系统的设计和分析更加方便。如 Control System Toolbox 中包含了一个根轨迹设计工具, 用于补偿器的设计; 一个 LTI 观察器, 用于分析时域和频域的响应。

使用框图式动态系统仿真工具 Simulink 可以方便地建立控制系统原型和控制对象模型, 通过仿真不断地优化和改善你的设计。无论是离散的、连续的、条件执行的、多采样的或混杂的系统, Simulink 都是描述动态系统模型的最佳工具。

结合有限状态机、状态转移图和流程图多种技术手段, Stateflow 使用户能够建立复杂响应式系统的清晰、简明的描述。通过 Simulink 和 Stateflow, 可以在单一的集成环境下对包括顶层控制逻辑、物理对象和控制器的整个系统进行建模与仿真。

Real-Time Workshop 和 Stateflow Coder 直接从 Simulink 模型和 Stateflow 图中生成高质量的代码, 并自动地编译、链接和下载可执行文件到目标处理器上。通过将 MathWorks 代码生成工具与先进的实时系统集成, 用户可以快速、方便地实现快速控制原型, 实时地仿真和分析自己的设计。

1.2.2 控制系统工具箱简介

控制系统工具箱(Control System Toolbox)是 MATLAB 软件包中专门针对控制系统工程设计的函数和工具的集合。该工具箱主要采用 M 文件形式, 提供了丰富的算法程序以完成一般控制系统的设计、分析和建模。

控制系统工具箱主要用于反馈控制系统的分析、设计和仿真, 所涉及的领域涵盖经典控制理论和现代控制理论的大部分内容, 包括根轨迹、极点配置和 LQG(线性二次最优)控制器设计等。另外, 还提供了友好的图形界面环境(GUI), 大大简化了控制系统的分析和设计过程。

通过控制系统工具箱, 用户可以创建线性时不变(LTI)系统的传递函数、零极点一增益模型或状态空间模型。既可以操作连续时间系统, 也适用于离散时间系统, 并且可以实现不同模型间的相互转换。用户还能够轻松绘制系统的时域或频域响应和开环系统的根轨迹图。其中的控制系统设计函数能够快速完成系统的极点配置、最优控制器设计等。

MATLAB 本身提供的开放式环境可以让用户通过 M 文件建立自己的控制模型和控制算法。

随着 MATLAB 的发展, 控制系统工具箱本身也得到不断升级。随 MATLAB 6.1 一起发行的是最新的 Control System Toolbox 5.1, 它的主要组成和特点包括:

- (1) LTI 观测器(LTI Viewer), 用于分析和仿真 LTI 系统的交互式图形环境。
- (2) 单输入单输出系统设计工具(SISO Design Tool), 用于 SISO 系统分析和仿真的交互式图形环境。
- (3) 可以控制系统的时域和频域绘图属性, 例如曲线颜色和类型等。
- (4) 采用专门的数据结构来表示系统的各类模型, 称之为 LTI 对象。
- (5) 支持 MIMO 系统、连续时间和采样系统、具有时间延迟的系统。
- (6) 用户复杂框图操作的函数和运算, 例如串联、并联和反馈连接等。
- (7) 可以采用不同方法实现连续—离散模型之间的转换。
- (8) 通常只需要一条指令即可实现系统的时域和频域仿真。
- (9) 大量基于经典控制理论和现代控制理论的控制系统设计工具, 例如根轨迹设计、极点配置和 LQR/LQG 最优设计等。

1.2.3 Simulink 4.1 产品介绍

Simulink 4.1(如图 1.1 所示)是用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境, 包括连续系统、离散系统和混杂系统。Simulink 提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互界面。通过 Simulink 提供的丰富的功能块, 可以迅速地创建系统的模型, 不需要书写一行代码。Simulink 还支持 Stateflow, 用来仿真事件驱动过程。

1. 交互建模

Simulink 提供了大量的功能块以方便用户快速地建立动态系统模型。建模时只需使用鼠标拖放库中的功能块并将它们连接起来。你可以通过将块组成子系统来建立多级模型。对块和连接的数目没有限制。

2. 交互仿真

Simulink 框图提供了交互性很强的非线性仿真环境。可以通过下拉菜单执行仿真, 或使用命令行进行批处理。仿真结果可以在运行的同时通过示波器或图形窗口显示。有了 Simulink, 可以在仿真的同时, 采用交互或批处理的方式, 方便地更换参数来进行“What-if”分析。

3. 能够扩充和定制

Simulink 的开放式结构允许用户扩展仿真环境的功能:

- (1) 用 MATLAB、FORTRAN 和 C 代码生成自定义块库, 并拥有自己的图标和界面。
- (2) 将用户原有 FORTRAN 或 C 语言编写的代码连接进来。

4. 与 MATLAB 和工具箱集成

由于 Simulink 可以直接利用 MATLAB 的数学、图形和编程功能, 用户可以直接在 Simulink 下完成诸如数据分析、过程自动化、优化参数等工作。工具箱提供的高级的设计和 分析能力可以通过 Simulink 的屏蔽手段在仿真过程中执行。

5. 专用模型库(Blocksets)

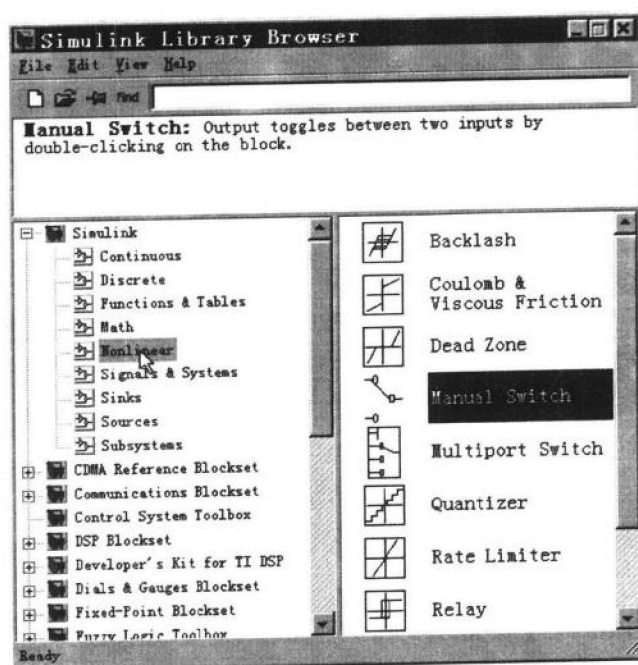


图 1.1 Simulink 中的库浏览器

Simulink 的模型库可以通过专用元件集进一步扩展。DSP Blockset 可以用于 DSP 算法的开发。Fixed-Point Blockset 扩展了 Simulink，用于建立和模拟数字控制系统和数字滤波器。MATLAB 6. X 中的 Simulink 及相关模块如表 1.1 所示。

表 1.1 MATLAB 6. X 中的 Simulink 及相关模块

产品名称	描 述
Simulink	可视化建模、仿真环境
Simulink Performance Tools	性能调试工具
Stateflow	事件驱动系统建模仿真
Stateflow Coder Stateflow	Stateflow 自动代码生成器
Real-Time Workshop	实时代码生成工具箱
Real-Time Workshop Ada Coder	实时 Ada 代码生成工具箱
Real-Time Workshop Embedded Coder	嵌入式实时代码生成工具箱
Real-Time Windows Target Windows	Windows 的实时代码生成和仿真
xPC Target PC	PC 实时仿真工具箱
xPC Target Embedded Opt xPC	嵌入式实时应用
Simulink Report Generator	Simulink 文档生成器
Requirements Mgmt Interface	需求管理接口

1.2.4 其它控制相关产品

MATLAB 中的控制系统工具箱(Control System Toolbox)主要是运用经典控制理论(包括时域和频域方法)处理线性时不变(LTI)系统的函数集合。除了 Control System Toolbox, MathWorks 公司还在 MATLAB 6. X 软件包中集成了控制系统分析和设计的其它相关工具箱和软件包, 这些工具箱有的是作为 Control System Toolbox 的补充, 有的是独立的软件包, 主要以控制系统为研究对象。借助这些工具箱和软件包, 用户可以完成诸如系统辨识、系统建模、仿真以及鲁棒控制、模糊控制和神经网络控制等系统设计的任务。所包含的内容几乎涉及到现代控制理论的所有内容, 使 MATLAB 广泛运用于控制系统设计和制造的各个领域。关于这些工具箱和软件包的简要说明如表 1.2 所示。

随着控制理论和控制工程的不断发展, 不少第三针对控制领域内的某些特殊系统和应用领域设计和开发了其它的专有工具箱, 这些工具箱不少是目前该领域的最新研究成果, 例如机器人控制、最优控制等等, 这些工具箱一般还没有被收录进 MATLAB 集成软件包中, 读者可以在网上获得它们的说明文档或源代码。

表 1.2 MATLAB 6. X 中的其它控制系统相关工具箱

名 称	描 述
Fuzzy Logic Toolbox	该工具有助于掌握模糊逻辑技术, 并将它运用到控制问题中去, 即进行所谓的模糊逻辑控制系统的设计
LMI Control Toolbox	求解线性矩阵不等式(LMI)的凸优化算法, 适用于鲁棒控制、多目标控制等
Model Predictive Control Toolbox	模型预测控制工具箱。用于包括具有时延和约束变量的模型预测控制(MPC)系统的分析和设计
μ -Analysis and Synthesis Toolbox	结构奇异值 μ 的计算算法。用于具有建模和参数不确定性的鲁棒系统
Nonlinear Control Design Blockset	Simulink 模块库之一。主要为系统设计提供时域优化方法, 基于用户自定义时域约束自动完成参数的调整
Robust Control Toolbox	鲁棒控制工具箱。运用 H^∞ 理论完成鲁棒的多变量反馈控制系统的建模、分析和设计
Simulink	动态系统的建模和仿真的交互集成环境(GUI)
System Identification Toolbox	系统辨识工具箱。从包含噪声的复杂系统数据中建立准确、简单的系统模型

1.2.5 MATLAB 6. X 开发控制系统流程

采用 MATLAB 6. X 进行控制系统的辅助设计和仿真一般分为建模、分析、仿真和实现等四个部分, 针对每个部分 MATLAB 6. X 都提供了强有力的辅助工具, 其良好的交互

界面、强大的计算功能使控制系统的设计和实现轻松快捷,极大地提高了系统开发的速度和效率。

图 1.2 显示了利用 MATLAB 6.X 进行控制系统开发的不同阶段以及相应的 MATLAB 工具。

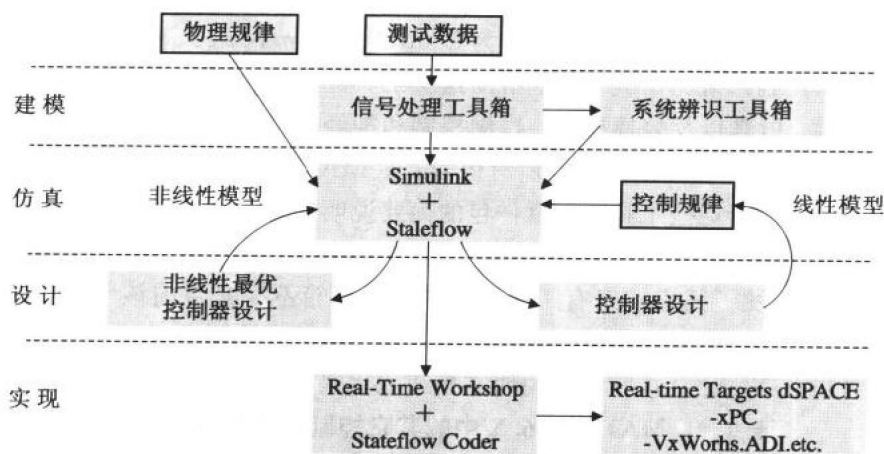


图 1.2 基于 MATLAB 6.X 控制系统开发流程

1.3 数学准备

1.3.1 微分方程的求解

多变量连续动态系统一般可以采用微分方程或微分方程组来描述。线性非齐次微分方程的一般形式可以写成

$$\frac{d^n}{dt^n}y(t) + a_{n-1}(t)\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}y(t) + \cdots + a_0(t)y(t) = g(t) \quad (1.1)$$

对于某个时间段内的连续函数 $a_i(t)$ 和 $g(t)$, 方程对下面的初始条件存在唯一的解析解:

$$y(0) = b_0, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_0 = b_1, \quad \cdots, \quad \left. \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}} \right|_0 = b_{n-1} \quad (1.2)$$

要得到唯一的微分方程解, 必须有 n 个初始条件。已知 n 个初始条件对微分方程进行求解的问题称为 n 阶初值问题(IVP)。

非齐次方程的一般解的形式由齐次方程的解再加上满足方程(1.1)的特殊解组成:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t) \quad (1.3)$$

其中齐次方程的解是指当 $g(t)=0$ 时方程(1.1)的解。将方程的初始条件代入一般解的形式中, 可以求出方程(1.1)的唯一解的形式。

对于系数时变的系统, 求出它的解析解的形式一般是很困难的。但是对于简单的常系数方程而言, 可以通过下面的方法来确定方程的齐次解。

设齐次方程为