

刘杰 周宇博◎著

# 基于模型的设计

——MSP430/F28027/F28335

DSP

篇

JIYU MOXING DE SHEJI

——MSP430/F28027/F28335

DSP PIAN



国防工业出版社

National Defense Industry Press



# 基于模型的设计—— MSP430/F28027/F28335 DSP 篇

刘杰 周宇博 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书分五个部分。第1章为第一部分:主要介绍了基于模型设计的建模基础,包括基于 Simulink 和 Stateflow 的建模方法;第2章为第二部分:主要介绍了 MSP430 系列 MCU 的基于模型设计的快速开发,以及在 Protues 虚拟硬件测试平台上的验证;第3章和附录为第三部分:主要介绍 F28335 DSP 外设模块的功能和使用方法,以及翻译整理了近 1000 页对应外设模块的 F28335 DSP 的技术文档,作为读者加深理解这些外设模块的背景资料;第4章为第四部分:主要介绍了基于模型设计的 F28027/F28335 DSP 的快速开发方法;第5章为第五部分:以步进电机的控制为例,介绍了一个比较完整的基于模型设计的开发流程,主要包括需求分析、需要与模型的双向跟踪、模型的优化、浮点模型到定点模型的自动转换、软件在环测试、处理器在环测试、生成代码的优化设置、模型与代码的双向跟踪、硬件测试等,第5章为本书的核心内容和总结。

本书除第三部分外,其余部分绝大多数内容为我们实验室独立完成。本书可作为汽车、航空、航天、通信、医疗器械、新能源、机电控制、电气工程等领域的工程师从事 MSP430 和 28x DSP 系列 MCU 应用研究时的技术手册,也可作为高校电类专业的 MSP430/F28x DSP 与基于模型设计的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于模型的设计. MSP430、F28027、F28335DSP 篇/刘杰  
著. —北京:国防工业出版社,2011. 8  
ISBN 978-7-118-07605-9

I. ①基... II. ①刘... III. ①单片微型计算机-微控  
器-程序设计 IV. ①TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 148943 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)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 31½ 字数 729 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 69.00 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



## 序(一)

随着嵌入式系统设计越来越复杂,工程师正面临着越来越多的挑战:比如开发的算法如何无缝扩展应用到系统开发中;系统仿真中,如何降低由于建立过程产生的误差对设计精确度的影响;如何在硬件平台上仿真设计的模型系统。

为了解决这些系统开发瓶颈,MathWorks 公司提出了基于模型设计( Model Based Design,MBD)的系统开发理念,其意义在于:用 Simulink 模型描述系统和子系统物理原型,并在统一仿真环境中对整个系统进行仿真,以便及时做出设计改进。核心思想是可执行的规范、快速的控制原型设计、早期验证和代码自动生成,这已经日益成为嵌入式系统开发的主要手段。

MathWorks 公司是世界领先的技术计算和基于模型设计的软件开发商和供应商,全球拥有 2200 多名员工,是一家美国私营公司,成立于 1984 年。MathWorks 公司的客户是世界各大洲 100 多个国家的 100 多万顶级技术人员,这些技术人员工作在最先进的技术公司、政府实验室、金融机构以及 5000 多所大学,他们依靠 MathWorks 公司的产品和服务,因为 MATLAB 和 Simulink 已经成为他们进行工程项目和科学研究的基本工具。

MathWorks 中国公司自 2007 年成立以来,在航空航天、汽车、通信等领域大力推广基于模型设计的理念,但无论是市场上,还是高校教学中,都没有系统的中文教材或书籍可以帮助广大技术人员,在校的研究生和高年级本科生应尽快掌握,尽可能全面学习整个 MBD 流程。刘杰《基于模型的设计——MSP430/F28027/F28335 DSP 篇》一书的出版弥补了上述的不足,尤其是在当前中国教育大力推行“卓越工程师计划”的大背景下,在大力倡导学生掌握工程界必备工具的大环境下,这样一本详细阐述工程界重要工具 Simulink 实现基于模型设计的图书,将会大大帮助老师和学生学习和实践高效的嵌入式系统开发。

整体而言,该书的最大特色就是软硬件结合,在使用最新版本 Simulink 的基础上,结合多型号板卡实现设计开发。书中不仅详细剖析了 MSP430/F28027/F28335 板卡功能,而且使用 Simulink 演示了从建模到模型验证、从定点设计到处理器在环、从代码生成到硬件联调等诸多方面,内容充实,确实是一本学习基于模型设计进行 DSP 开发的较为理想的工程工具书和大学的教辅书籍。

我很荣幸受邀代表 MathWorks 公司写序,并郑重地将其推荐给大家。基于模型设计系列教材的出版,对更新嵌入式系统开发流程,改变传统教学方法,创造互动的教与学环境,会起到很积极的促进作用。希望通过本书的出版,使更多的读者掌握 Simulink 平台下 DSP 的基于模型设计开发过程,共同推动 MBD 在我国的普及和推广。

MathWorks 中国教育业务发展总监 陈炜 博士

2011 年 6 月

## 序(二)

为了帮助用户缩短产品的开发周期,提高开发效率,德州仪器(TI)公司与 MathWorks 公司持续合作为 MSP430、C2000 等系列 MCU 产品优化开发环境,让使用 MSP430 系列和 F28x 系列 DSP 实时控制微处理器的工程师可采用基于模型化的设计方法实现从需求分析到代码验证的整个开发链。MathWorks 的目标支持包新增了对高性能 Piccolo MCU 系列的支持。这里,32 位 Piccolo 系列可提供性能、闪存、模拟集成以及控制导向型外设等各种选项,可充分满足低成本与实时控制应用的不同需求。设计工程师现在可为所有 F2802x/F2803x Piccolo 器件自动生成 Simulink/Stateflow 算法代码,实现嵌入式系统的快速原型设计与生产部署。支持为经过验证的模型自动生成嵌入式实时 C 代码,基于模型设计为开发环境与实施平台之间搭建了一座桥梁,不但可帮助工程师识别并解决系统级设计问题,而且还可帮助其便捷地生成高效的 C2000 专用代码。现在不但可实现快速的交钥匙实施与早期验证,还可为上述领域提供高效可靠的解决方案。

综上所述,基于模型的设计将 MATLAB/Simulink/Stateflow 与 TI 的 Code Composer Studio 集成开发环境 (IDE) 和 C2000 微控制器完美地整合在一起。这些产品的集成使您能够执行自动代码生成、原型设计和嵌入式系统开发。利用这种基于模型的设计,您就可以开发和验证控制设计和 DSP 算法,顺利完成从概念构思到代码实现的整个过程。

这种基于模型设计的嵌入式系统开发技术,在国内还很少有人利用其进行 MSP430/F28027/F28335 DSP 等器件的应用开发。感谢刘杰对国内在基于模型设计方面所做的推动工作。我相信随着本公司和 MathWorks 公司对基于模型设计技术的进一步深入研究和《基于模型的设计——MSP430/F28027/F28355 篇》的正式出版,将大大提高软件开发效率,丰富目前国内嵌入式处理器开发模式。本书较全面地介绍了基于模型设计开发 MSP430/F28x DSP 的方法,是一本较好的工具书和学习基于模型设计开发 MSP430/F28x DSP 的教材,我郑重向各位推荐此书。

德州仪器公司亚洲大学计划部总监 沈洁

2011 年 6 月

# 前 言

随着电子产品集成度的不断提高以及人们对安全性、可靠性的苛刻要求,航空航天、汽车、通信、机电等产品的代码量呈爆炸式增长,传统的开发模式已经不再适应这种发展趋势。特别是在 MSP430/F28027/F28335 DSP 等系列嵌入式器件的应用开发中,目前普遍采用的开发模式是:首先用模拟软件(如 MATLAB 软件等)验证工程师们的想法;然后在自制的硬件平台上进行手工作坊式的编程、排错与调试,以期实现需求分析阶段工程师们的想法;最后才是对整个设计的系统测试。由于整个开发过程相互独立,割裂了它们之间的有机统一;此外,开发者人员较多,每个人对需求文档的理解难免存在偏差,这会造成产品功能与设计预期不符的尴尬情况。这种方式最大的弊病是:前面四个开发阶段,任何一个出现问题,本次工作将以失败告终,而测试工作却恰恰在设计的最阶段才能进行。NASA 在一次报告中指出,需求分析阶段出现的错误占整个开发错误的 60% 以上,而发现这些错误的可能性只有 8%,传统方法发现错误的主要阶段是最后的测试阶段。因此利用传统方法开发新产品一般都会重复多次,既耽误了产品的上市时间,浪费了大量的人力物力,也会严重打击开发者的自信心,让这些人常常处于惶恐之中,导致项目的开发不得不终止。诞生于 20 世纪 90 年代中期的基于模型设计技术,经过 10 多年的发展与逐步完善已被广泛接受。近年来,国外一些大型创新项目都采用了基于模型设计这项新技术,目前显现加速发展的趋势。

基于模型的开发方法是为创造新世界而诞生的,它将传统开发流程中的四个相互割裂阶段有机地结合起来,在可视化的开发平台(如 MATLAB)上,从需求分析阶段就开始验证与测试,让工程师们把主要精力投入到算法和测试用例的研究上,让嵌入式实时 C 代码的编程工作留给计算机去自动完成。这样不仅加快了软硬件的开发速度,提高了生成代码的可靠性和一致性,同时也降低了工程师的入门门槛,解决了嵌入式开发工程师稀缺的难题。真正做到从概念到实现一步完成,规避新产品开发的市场风险,提振工程师们创造性劳动的信心。让我们丢掉“山寨”大国的帽子,有能力跟踪和追赶世界的最前沿技术。

本书是我们实验室撰写的基于模型设计系列丛书中的一本,主要介绍了 MSP430/F28027/F28335 DSP 的快速开发方法,并给出了一个针对步进电机控制问题的比较完整的基于模型设计的开发流程。采用本书介绍的方法可以大大加快 MSP430/F28027/F28335 DSP 的开发进程,开发时间和所需成本只有传统方法的 1/5 ~ 1/2。

实验室已出版了两本基于模型设计的专著,较系统地讲解了 Simulink/Stateflow 的建模、调试与验证方法,以及用户驱动模块的创建。由于编写 inline sfunction 对于初学者难度较大,本书推荐采用 TI 公司提供的器件读写例程或手写这些设备的驱动 C 代码替代用

户驱动模块的编写,这样可以大大降低劳动强度、提高生成 C 代码的运行效率,缩短项目的开发周期。同时也提出了现有产品升级换代的解决方案,书中所设计的演示实验主要是根据实验室的现有条件和提高读者的观赏性而定的,涵盖了 28x 系列 DSP 大部分的应用领域。书中没有提及的部分,读者可以在掌握本书的基础上,参考 MATLAB 软件自带的有关 F28027/F28335 DSP 的演示实验,这些方法同样适合 F2812 DSP 基于模型的开发。为了帮助那些不习惯阅读英文资料的读者能正确掌握 F28027/F28335 DSP 外设模块的使用,我们整理了近 1000 页的 TI 技术文档,将其翻译成了 140 页左右的 F28027/F28335 DSP 外设模块的背景资料。

除封面两位作者外,刘高阳、翁公羽、郭丹也参加了个别章节的撰写和翻译工作,林建材、周贵鸿、张德勇、林寒毅、杨云飞、杨元挺、陈添丁、李晗、史进、吴仪炳、李昌、李燕、胡育涛、翟朝亮、许家胜、胡泽东、朱伟龙、魏莲花、王敬卿、朱宁、李阳、于福海、周勋、张颖、万文青、施文龙、姜慧、刘绍丽、吴玉林、李泳毅、田利平、冯新凯、曹国忠、陈丽红等参加了翻译文稿的修订整理与绘图工作。

本书在撰写过程中得到了 TI 亚洲大学计划部总监沈洁、TI 中国大学计划部经理潘亚涛的大力支持;同时感谢 MathWorks 中国教育业务发展总监陈炜博士为本书所作的序言;感谢 <http://www.ilovematlab.cn> 网站版主张延亮博士为本书提供的交流平台;感谢国防工业出版社李宝东编辑为本书的撰写提出的宝贵意见,正是大家的共同努力才促成了《基于模型的设计——MSP430/F28027/F28335 DSP 篇》的诞生。

本书的大部分内容皆由作者实验室自主创作,由于涉及 MSP430 系列和 28x DSP 系列的器件较多,无法在 500 多页的篇幅中进行全面论述,加上时间紧且作者水平有限,书中的错误或遗漏在所难免,欢迎读者提出自己的宝贵意见。

刘杰

2011 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 MathWorks 软件简介</b> .....	1
1.1 Simulink 模块库 .....	2
1.2 Simulink 模型——流水灯 .....	5
1.2.1 新建模型 .....	5
1.2.2 参数设置 .....	6
1.2.3 仿真结果 .....	8
1.3 Simulink 模型——磁场定向永磁同步电机 .....	11
1.3.1 永磁同步电机原理 .....	11
1.3.2 永磁同步电机的矢量控制方法 .....	13
1.3.3 FOC 的建模与仿真 .....	16
1.4 Stateflow 状态图 .....	26
1.4.1 状态图编辑器 .....	27
1.4.2 状态 .....	27
1.4.3 迁移 .....	29
1.4.4 数据与事件 .....	31
1.4.5 简单的调速控制 .....	33
1.4.6 节点 .....	35
1.4.7 功能测试 .....	36
1.4.8 代码生成 .....	38
<b>第 2 章 基于模型的 MSP430 快速开发</b> .....	42
2.1 MSP430 单片机简介 .....	42
2.2 IAR 集成开发环境简介 .....	43
2.3 入门实例:发光二极管闪烁 .....	46
2.3.1 搭建发光二极管闪烁功能模型 .....	46
2.3.2 软件在环测试 .....	52
2.3.3 代码模型 .....	54
2.3.4 自动代码生成 .....	56
2.3.5 虚拟硬件测试 .....	59
2.4 调速电机(正反转可控) .....	60
2.4.1 搭建电机控制功能模型 .....	60
2.4.2 软件在环测试 .....	67
2.4.3 代码模型 .....	70



2.4.4	自动代码生成 .....	73
2.4.5	虚拟硬件测试 .....	75
2.5	键盘识别 .....	76
2.5.1	搭建键盘识别功能模型 .....	77
2.5.2	软件在环测试 .....	81
2.5.3	代码模型 .....	84
2.5.4	自动代码生成 .....	88
2.5.5	虚拟硬件测试 .....	90
2.5.6	拓展:4×4 矩阵键盘 .....	91
2.6	无刷电机 .....	101
2.6.1	搭建电机控制功能模型 .....	102
2.6.2	软件在环测试 .....	107
2.6.3	代码模型 .....	109
2.6.4	自动代码生成 .....	116
2.6.5	虚拟硬件测试 .....	118
<b>第3章</b>	<b>C28x3x 模块描述 .....</b>	<b>122</b>
3.1	PIE 模块 .....	122
3.2	看门狗模块 (Watchdog) .....	123
3.3	模数转换模块 (ADC) .....	124
3.4	增强型脉冲编码调制模块 (ePWM) .....	126
3.5	增强型正交编码脉冲模块 (eQEP) .....	133
3.6	增强型捕获模块 (eCAP) .....	141
3.7	SCI Receive & SCI Transmit .....	145
3.7.1	SCI Receive 模块 .....	145
3.7.2	SCI Transmit 模块 .....	146
3.8	通用 I/O 接口 (Digital Input & Digital Output) .....	147
3.8.1	Digital Input 模块 .....	147
3.8.2	Digital Output 模块 .....	148
3.9	串行外设接口 (SPI) .....	149
3.9.1	SPI Receive 模块 .....	149
3.9.2	SPI Transmit 模块 .....	150
3.10	I2C 总线 .....	151
3.10.1	I2C Receive 模块 .....	151
3.10.2	I2C Transmit 模块 .....	153
3.11	eCAN 总线 .....	154
3.11.1	eCAN Receive 模块 .....	154
3.11.2	eCAN Transmit 模块 .....	156
3.11.3	CCP 模块 .....	158
3.12	IQmath .....	160

3.12.1	32 位 IQ 数据定标、范围和精度	160
3.12.2	IQmath 函数及其调用	162
3.12.3	IQmath 函数命名	162
3.12.4	IQmath 函数概述	163
3.12.5	IQmath 函数描述	163
3.12.6	IQmath 函数模块	165
3.13	RTDX 设备	175
3.13.1	From RTDX 模块	175
3.13.2	To RTDX 模块	177
3.14	DMC 库	178
3.14.1	Park 转换器(Park Transformation)	178
3.14.2	逆 Park 转换器(Inverse Park Transformation)	179
3.14.3	Clarke 转换器(Clarke Transformation)	180
3.14.4	空间矢量生成器(Space Vector Generator)	181
3.14.5	PID 控制器模块(PID Controller)	182
3.14.6	速度测量模块(Speed Measurement)	184
3.14.7	斜坡控制模块(Ramp Control)	186
3.14.8	斜坡生成模块(Ramp Generator)	187
<b>第 4 章</b>	<b>F28027/F28335 DSP 代码的快速生成</b>	<b>188</b>
4.1	闪烁灯实验	189
4.1.1	传统的手工编程方法	189
4.1.2	用基于模型设计的方法	195
4.2	集成现有 C 代码及创建归档库	208
4.2.1	集成现有 C 代码	208
4.2.2	创建归档库	212
4.2.3	现有 C 代码集成算法模型的 C 代码	220
4.3	用定时器中断实现流水灯(在 MATLAB R2011a 版中完成)	221
4.3.1	搭建流水灯功能模型	221
4.3.2	软件在环测试	226
4.3.3	处理器在环测试	229
4.3.4	代码模型	233
4.3.5	自动代码生成	238
4.3.6	硬件测试	238
4.4	MATLAB 与 CCS 的交互式开发	239
4.4.1	RTDX	239
4.4.2	SCI	248
4.5	用 RTDX 实现直流电机控制	258
4.5.1	搭建直流电机控制模型	259
4.5.2	软件在环测试	263

4.5.3	代码模型 .....	266
4.5.4	创建 GUI 控制界面 .....	270
4.5.5	硬件测试 .....	278
<b>第 5 章</b>	<b>优化与验证 (MATLAB R2011a 实现) .....</b>	<b>282</b>
5.1	基于模型设计简介 .....	282
5.1.1	传统设计的弊端 .....	282
5.1.2	基于模型设计的优势 .....	283
5.1.3	本例的设计流程 .....	283
5.2	步进电机原理分析及功能模型搭建 .....	285
5.3	模型检查及验证 .....	295
5.3.1	Design Verifier 检查 .....	295
5.3.2	Model Advisor 检查 .....	305
5.4	定点模型 .....	308
5.4.1	Fixed Point Advisor .....	309
5.4.2	Fixed Point Tools .....	315
5.5	软件在环测试 .....	319
5.6	处理器在环测试 .....	323
5.7	代码模型 .....	328
5.8	代码优化 .....	335
5.8.1	选择代码优化目标 .....	335
5.8.2	Code Generation Advisor 检查 .....	336
5.8.3	为特定芯片生成代码 .....	339
5.9	创建 GUI 控制界面 .....	339
5.10	硬件测试 .....	348
<b>附录 C28x3x</b>	<b>.....</b>	<b>351</b>
A.1	CPU 内核 .....	351
A.1.1	C28x + FPU 浮点处理单元简介 .....	351
A.1.2	C28x + FPU 浮点处理单元结构 .....	352
A.2	存储器映射 .....	355
A.3	外设中断拓展模块 (PIE) .....	357
A.3.1	PIE 控制器概述 .....	357
A.3.2	外设级中断 .....	357
A.3.3	PIE 级中断 .....	358
A.3.4	CPU 级中断 .....	359
A.3.5	中断向量表 .....	359
A.3.6	PIE 中断源 .....	359
A.3.7	PIE 中断向量表 .....	363
A.4	看门狗模块 (Watchdog) .....	369
A.4.1	Watchdog 原理简介 .....	369

A. 4. 2	看门狗复位/看门狗中断	371
A. 4. 3	仿真模式	371
A. 4. 4	看门狗寄存器	372
A. 5	模数转换模块(ADC)	372
A. 5. 1	ADC 概述	372
A. 5. 2	自动转换排序器的工作原理	374
A. 5. 3	无中断自动排序模式	376
A. 5. 4	ADC 时钟的预定标	377
A. 5. 5	低功耗模式	379
A. 5. 6	上电次序	379
A. 5. 7	ADC 模块的寄存器	379
A. 6	增强型脉冲编码调制模块(ePWM)	387
A. 6. 1	ePWM 概述	387
A. 6. 2	ePWM 子模块	391
A. 6. 3	ePWM 寄存器	408
A. 7	增强型正交编码脉冲模块(eQEP)	421
A. 7. 1	eQEP 概述	421
A. 7. 2	正交解码单元	423
A. 7. 3	位置计数器与控制单元	425
A. 7. 4	eQEP 边沿捕获单元	430
A. 7. 5	eQEP 看门狗	432
A. 7. 6	单位时钟基准 Unit Timer Base	432
A. 7. 7	eQEP 中断结构	433
A. 7. 8	eQEP 寄存器	433
A. 8	增强型捕获模块(eCAP)	444
A. 8. 1	eCAP 概述	445
A. 8. 2	捕获和 APWM 操作模式	446
A. 8. 3	eCAP 捕获模式	446
A. 8. 4	eCAP 寄存器	450
A. 9	SCI Receive & SCI Transmit	456
A. 9. 1	SCI 概述	456
A. 9. 2	SCI 模块的结构	457
A. 9. 3	SCI 寄存器	466
A. 10	通用 I/O 接口(Digital Input & Digital Output)	474
A. 10. 1	GPIO 简介	474
A. 10. 2	GPIO 功能选择框图	474
A. 10. 3	输入量化	475
A. 10. 4	GPIO 寄存器	476
A. 11	串行外设接口(SPI)	478

A. 11.1	SPI 模块概述 .....	479
A. 11.2	SPI 模块寄存器浏览 .....	481
A. 11.3	SPI 操作简介 .....	482
A. 11.4	SPI 中断 .....	483
A. 12	I2C 总线 .....	485
A. 12.1	I2C 模块的特点 .....	485
A. 12.2	I2C 总线接口模块不支持的功能 .....	486
A. 12.3	I2C 模块功能概述 .....	486
A. 12.4	时钟产生 .....	487
A. 13	eCAN 总线 .....	487
A. 13.1	CAN 概述 .....	487
A. 13.2	CAN 网络和模块 .....	489
<b>参考文献</b>	.....	491

# 第 1 章 MathWorks 软件简介

本书的目的是介绍采用基于模型设计的方法，实现 MSP430 系列单片机和 F28027/F28335 dsp 的应用开发。MathWorks 公司已经把 F28027/F28335 dsp 的几乎所有外设等，写成了 Simulink 模块放在模型浏览器中。用户需要做的工作是有关 dsp 的硬件部分，就是根据自己的实际开发，设置这些模块的工作寄存器或状态等，那些算法部分将由 Simulink/Stateflow 模型或手写 C/汇编代码实现，而以 Simulink/Stateflow 模型实现算法为主。那么建模与验证将成为基于模型设计的起点，同样也是本书的核心内容之一，本章将以 MathWorks 公司刚发布的 MathWorks R2011a 版为例，介绍算法的建模过程。更详细的过程读者可以参考 MathWorks 公司相关部分的用户手册。

MathWorks R2011a 最明显的更新是新增了 3 个代码生成工具，新产品与代码生成过程密切相关。

- (1) MATLAB Coder: 可直接从 MATLAB 生成可移植 C/C++ 代码。
- (2) Simulink Coder: 整合 Real-Time Workshop 与 Stateflow Coder 的功能。
- (3) Embedded Coder: 结合了 Real-Time Workshop Embedded Coder、Embedded IDE Link 与 Target Support Package 功能。

本书用到的是控制系统建模与嵌入式代码生成，因此，着重介绍 Simulink 模型与 Stateflow 状态图。

Simulink 是动态和嵌入式等系统的建模与仿真工具，也是基于模型设计的基础。对于机电、航空、航天、信号处理、自动控制、通信、音视频处理等众多领域，Simulink 提供了交互式的可视化开发环境和可定制的模块库，对系统进行建模、仿真与调试等。并可实现与 Stateflow 有限状态机的无缝连接，扩展对复杂系统的建模能力。

通过 Simulink 在模块库自带的 1000 多个预定义模块，基本上可快速地创建基于 MCU 器件应用的系统模型。运用层次化建模、数据管理、子系统定制等手段，即使是复杂的嵌入式 MSP430 和 F28027/F28335 dsp 应用系统，也能轻松完成简明精确的模型描述。

Stateflow 是有限状态机 (Finite State Machine) 的图形工具，它通过开发有限状态机和流程图扩展了 Simulink 的功能。Stateflow 使用自然、可读和易理解的形式，可使复杂的逻辑问题变得清晰与简单，并且还与 MATLAB\Simulink 紧密集成，为包含控制、优先级管理、工作模式逻辑的嵌入式系统设计提供了有效的开发手段。读者在后面的章节将看到 Stateflow 应用于 MSP430 和 F28027/F28335 dsp 的开发中，尤其显得得心应手，一些利用传统方法难于实现的算法，如果采用 Stateflow 建模却非常容易。Simulink 的主要特点如下：

- (1) 众多可扩展的模块库。
- (2) 利用图形编辑器来组合和管理模块图。
- (3) 以系统功能来划分模型，实现对复杂系统的管理。
- (4) 利用模型浏览器 (Model Explorer) 寻找、创建、配置模型组件的参数与属性。

- (5) 利用 API 实现与其他仿真程序的连接或集成用户代码。
- (6) 用图形化的调试器和剖析器来检查仿真结果，评估模型的性能指标。
- (7) 在 MATLAB 命令窗口中，可对仿真结果进行分析与可视化，自定义模型环境、信号参数和测试数据。

(8) 利用模型分析和诊断工具来确保模型的一致性，定位模型中的错误。


Stateflow 的主要功能如下：

- (1) 使用层次化、可并行的、有明确执行语义的元素，来描述复杂的逻辑系统。
- (2) 采用流程图定义图形化函数。
- (3) 利用真值表实现表格形式的功能。
- (4) 使用临时逻辑处理状态转移与事件。
- (5) 支持 Mealy 和 Moore 有限状态机。
- (6) 可集成用户自定义的 C 代码。
- (7) 可用动画的形式显示状态图的仿真运行过程，并可记录数据。
- (8) 调试器使用图形化断点进行单步调试，并可观察其中的数据。

本章主要内容如下：

- (1) Simulink 基本操作。
- (2) 流水灯模型。
- (3) 磁场定向永磁同步电机建模。
- (4) Stateflow 基本概念与调速建模过程。

## 1.1 Simulink 模块库

单击 MATLAB 主窗口工具栏上的按钮  或在 MATLAB 命令行窗口中输入“Simulink”，打开模型库浏览器，如图 1-1 所示。

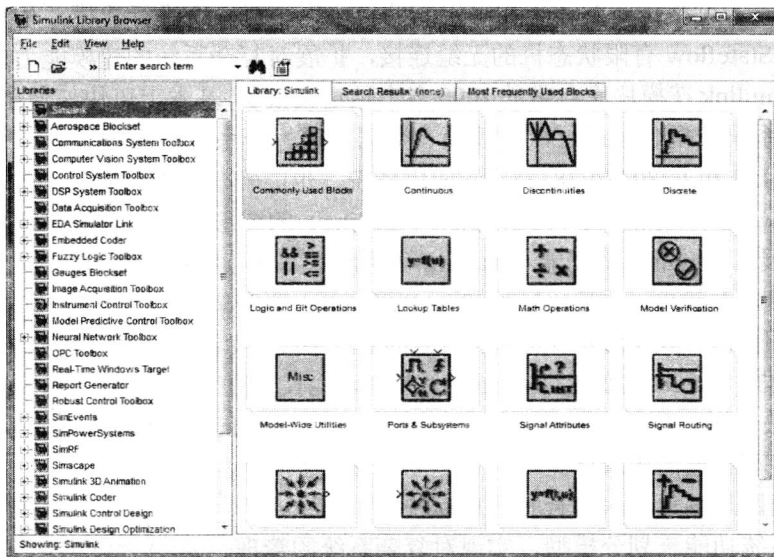


图 1-1 模型库浏览器

## 1. 标准模块库

图 1-1 窗口左侧列出了已安装的所有库文件，其中第一个模块库是 Simulink 标准模块库，它包含了所有常用的模块，见表 1-1。

表 1-1 Simulink 标准模块库

模块集	内 容
Commonly Used Blocks	最常用的模块，如增益、逻辑运算、加法器、示波器
Continuous	连续函数模块，如微分、传输函数、PID 控制器
Discontinuities	非连续函数模块，如死区、饱和、量化
Discrete	离散时间函数模块，如离散传输函数、FIR 滤波器
Logic and Bit Operations	逻辑运算或位运算模块，如逻辑与、异或、移位算法
LookUp Tables	查表模块，如余弦表、正弦表、自定义二维表
Math Operations	数学函数模块，如绝对值、增益、加减乘除
Model Verification	建立自验证模型模块，如 Check Static Range
Model-Wide Utilities	模型信息模块，如 DocBlock、Model Info
Ports & Subsystems	用于建立子系统的模块，如输入/输出端口、子系统
Signal Attributes	信号属性模块，如总线转向量信号、数据类型转换
Signal Routing	信号路由模块，如复用、解复用、开关、选择器
Sinks	显示及信号导出模块，如示波器、导出数据文件
Sources	信号源及信号导入模块，如时钟、常数、随机信号
User-Defined Functions	用户可自定义函数模块，如 S-Function
Additional Math & Discrete	附加的数学函数库、离散函数库

## 2. 其他模块库

与早期版本相比，MathWorks R2011a 将一些功能类似的模块库合并在一起，见表 1-2。

表 1-2 Simulink 其他模块库

模块库	内 容 或 用 途
Aerospace Blockset	进行飞行控制分析、导航分析，可视化飞行建模
Communications System Toolbox	提供了编码、交织、调制解调、均衡、同步、信道模型等设计通信系统时需要用到的模块
Computer Vision System Toolbox	由早期版本的 Video and Image Processing Blockset 模块集扩展而来，提供了特征提取、运动物体检测、目标跟踪等视频算法模块
Control System Toolbox	提供了一个线性时不变模块，用于建立连续或离散系统的传递函数、状态空间等
DSP System Toolbox	由早期版本的 Signal Processing Blockset 与 Filter Design Toolbox 模块集扩展而来，用于数字滤波器设计、数字信号处理与分析



(续)

模块库	内容或用途
Data Acquisition Toolbox	提供了模拟与数字的输入/输出模块, 可以与本地计算机的声卡以及 NI、Agilent 等公司数据采集卡交换数据
EDA Simulator Link	支持 Mentor Graphics ModelSim、Cadence Incisive 以及 Synopsys VCS 与 MATLAB/Simulink 进行联合仿真, 进行算法或模型验证
Embedded Coder	由早期版本的 Embedded IDE Link 与 Real-Time Workshop Embedded Coder 模块集的嵌入式部分扩展而来, 其中的模块可生成直接用于 ADI、Freescale、Infineon C166、TI 2000/5000/6000 多种处理器以及嵌入式 Linux、VxWorks 操作系统的代码; 支持 ADI VisualDSP++、Eclipse、Green Hills MULTI、IAR、TI CCS 等 IDE
Fuzzy Logic Toolbox	进行模糊推理系统建模与分析
Gauges Blockset	提供了仪表盘、数码管、进度条等模块, 使得模型仿真过程更直观
Image Acquisition Toolbox	提供了一个视频读取模块, 可通过视频采集卡、USB 摄像头获取实时图像
Instrument Control Toolbox	提供了 TCP/IP、UDP、串行口收发模块, 可用于通信或设备控制
Model Predictive Control Toolbox	用于设计分析工业自动化算法
Neural Network Toolbox	用于设计前馈网络、径向基网络、动态网络、自组织映射等成熟的神经网络, 并进行可视化仿真
OPC Toolbox	用于 MATLAB 与 OPC 服务器之间的读写操作
Real-Time Windows Target	用于连接实际的传感器等实验设备, 在 PC 上进行模型实施仿真
Report Generator	自动生成模型的报告文档
Robust Control Toolbox	用于分析包含有不确定元素的多输入/多输出控制系统, 获得系统的稳定边界与最坏性能
SimEvents	提供了离散事件仿真模块, 分析端到端的延时、吞吐量等性能
SimPowerSystems	提供了变压器、激励源等模块, 用于建立电力系统模型
SimRF	提供了混频器、放大器、S 参数等模块, 用于建立射频系统模型
Simscape	提供了传动、电子器件、流体、机械模块, 用于建立多作用域的物理系统模型
Simulink 3D Animation	用于制作三维可视化仿真环境
Simulink Coder	由早期版本的 Real-Time Workshop 与 Real-Time Workshop Embedded Coder 模块集的桌面部分扩展而来, 可用于定制生成的代码
Simulink Control Design	用于在 Simulink 环境下设计并分析控制系统
Simulink Design Optimization	使用数值方法, 估计模型参数, 进而提升系统性能
Simulink Design Verifier	使用规范的方法, 检测系统中难以发现的错误, 如被零除、溢出
Simulink Extras	额外的 Simulink 模块, 如连续与离散传递函数、笛卡儿坐标变换
Simulink Verification and Validation	系统需求模块, 用于列出模型中所有已关联的需求
Stateflow	用于设计 Stateflow 状态图与控制逻辑
System Identification Toolbox	用于从已知数据估计线性非线性数学模型或动态系统
Vehicle Network Toolbox	提供了 CAN 协议模块, 用于建立车辆网络模型
xPC Target	提供了各种输入/输出模块, 用于快速样机开发与硬件在环仿真