

ELECTRONIC
ENGINEER

XIDIAN UNIVERSITY PRESS

Principles, Development and Applications
of Programmable Analog Devices

可编程模拟器件

原理、开发及应用

赵曙光 段廷瑞 赵明英 陈丽萍 编著

Programmable Analog Devices



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

可编程**模拟**器件 原理、开发及应用

赵曙光 殷廷瑞 赵明英 陈丽萍 编著

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书内容包括:可编程模拟器件的基本概念、工作原理、设计流程和实现技术;Lattice 公司的 ispPAC 系列器件的内部结构、工作原理与典型应用,开发工具软件 PAC-Designer 的使用方法与开发实例;FAS 公司的 TRAC 系列器件的内部结构、工作原理与典型应用,开发工具软件 TRAC 的使用方法与开发实例;SILICA 公司的数模混合片上系统(SOC)FIPSOC 系列器件的内部结构、工作原理、典型应用与开发方法等。

本书内容全面,取材新颖,叙述清楚,既可用作高等学校有关课程和企业单位培训讲座的教材和参考书,也可作为相关专业工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可编程模拟器件原理、开发及应用/赵曙光等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2002.4
ISBN 7-5606-1092-7

I. 可… I. 赵… III. 可编程序控制器-模拟元件 IV. TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 082121 号

责任编辑 云立实 马晓娟

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 陕西画报社印刷厂

版 次 2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.75

字 数 395 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 20.00 元

ISBN 7-5606-1092-7/TP·0544

XDUP 1363001-1

*** 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

可编程模拟器件(Programmable Analog Device)是近年来崭露头角的一类新型集成电路。它的最大特点就是现场可编程(Field Programmable),即可在出厂后由用户通过编程来配置器件的内部连接和元器件参数,以获得所需的电路功能。另一特点是,它又属于模拟集成电路,即电路的输入、输出甚至内部状态均为时间连续、取值连续的模拟信号。这两大特点相结合,使得可编程模拟器件具有许多独特的优势。

首先,与数字器件(包括可编程逻辑器件)相比,可编程模拟器件与自然万物连续变化、无限可分的模拟本质最为吻合,实现同样功能所需的电路规模较小,成本和功耗也较低,因而更为简洁和经济。

其次,可编程模拟器件的内部连接和电路功能均由配置(编程)数据所决定,一种器件便可实现多达数十种的电路类型和功能。先进的电路结构和丰富的参数变化使可编程模拟器件能够提供较常规模拟集成电路更为理想的电路特性,从而获得更为宽广的应用领域。无论是电路设计、调试还是样机制作,使用可编程模拟器件与相应的开发工具软件相配合,都可以像设计数字电路那样方便、快捷地完成模拟电路的设计、修改、编程和验证,甚至于产品的升级换代亦可在工作现场完成。事半功倍,何乐而不为?

再次,可编程模拟器件既具备标准集成电路使用灵活和开发费用低、周期短的优点,又具备专用集成电路(ASIC)保密性强、针对特定应用的优点,可作为 ASIC 开发的中间媒介和过渡途径。即在样机研发和小批量试生产阶段使用可编程模拟器件,待产品成熟后再平滑地移植至相应的 ASIC 芯片,从而最大程度地降低产品的开发成本,缩短上市时间,增加产品的竞争力。

因此,可以预期,随着模拟可编程技术的不断进步和器件品种的逐步丰富,可编程模拟器件将会与可编程逻辑器件一样得到迅速发展,逐步成为实现模拟电路的首选器件和有力工具,其应用也将会日益广泛。

本书作者长期从事电子技术应用方面的教学和科研工作,在科研实践中深感模拟电路作用重要但却难以设计和调试。和许多读者一样,我们也一直梦想有朝一日模拟电路的设计和使用能够像数字电路一样容易和方便。可编程模拟器件的问世使我们看到了实现这一梦想的希望所在——这种革命性的新型器件将会深刻地改变未来的电路设计和实现方式,开辟模拟电路应用的新阶段。为使更多的人能够及早了解可编程模拟器件的最新进展及主流产品,掌握其开发和应用技术,我们在大量阅读和参考有关资料的基础上,结合自己的使用体会,并按照教学和认识规律加以综合和整理,写成此书。

本书第 1 章介绍可编程模拟器件的基本知识,包括可编程模拟器件的特点、作用、基本原理和关键技术等,对 IMP 公司的 EPAC 系列、Motorola 公司的 MPAA 系列(即 Anadigm 公司 AN10E40 器件)等典型器件的结构和特点也做了简要的介绍。随后,针对市场现有的两种主流器件系列——ispPAC 系列和 TRAC 系列,详细介绍其器件内部结构、工作原理、指标参数和典型应用,通过大量的图例和应用实例说明配套的开发工具软件的使用方法和器件开发全过程;第 2、3 章相配合介绍了 Lattice 公司的 ispPAC 系列器件及其

14/5 74/08

开发工具 PAC-Designer; 第 4、5 章相配合, 介绍 FAS 公司的 TRAC 系列器件及其开发工具 TRAC。最后在第 6 章中, 对 SIDA 公司推出的数模混合片上系统(SOC)FIPSOC 系列器件进行了详细的介绍, 以便读者了解数模混合可编程器件的工作原理, 掌握相应的数模混合片上系统的开发方法。

本书是国内第一本系统介绍可编程模拟器件原理与开发方法的专著。全书内容全面, 取材新颖, 叙述清楚, 既可用作高等学校有关课程和企业单位培训的教材, 也可作为有关教师和专业人员学习现代电子设计技术的参考书。

本书第 1、4、5 章由赵曙光编写; 第 2、3 章由赵明英编写; 第 6 章由殷廷瑞编写; 陈丽萍参加了资料编译和部分章节的修改工作; 全书由赵曙光策划和统稿。西安电子科技大学出版社的云立实、马晓娟编辑和有关工作人员为本书的出版付出了艰辛的劳动, 作者的家人也给予了充分的理解和支持, 有关公司也慷慨提供了所需的软件 and 资料, 在此一并表示衷心的感谢。

由于可编程模拟器件问世不久且变化迅速, 有关资料特别是应用类文献奇缺, 加之作者的水平和经验有限, 书中难免存在错误与不足之处, 恳请读者和同行批评指正。

如果需要本书有关的软件和资料, 可直接访问下列公司的网站, 免费下载或者索取有关资料光盘:

Lattice 公司: <http://www.latticesemi.com>

FAS 公司: <http://www.zetex.com>

SIDA 公司: <http://www.sidsa.com/fipsoc>

Anadigm 公司: <http://www.anadigm.com/>

也可与作者联系:

zhao_shu_guang@sohu.com 或 zmy9912@263.net

作者谨识

2001 年 8 月

目 录

第 1 章 可编程模拟器件概述	1
1.1 可编程模拟器件的价值与作用	1
1.2 可编程模拟器件的基本原理	3
1.2.1 可编程模拟器件的组成	3
1.2.2 可编程模拟器件的分类	4
1.2.3 可编程模拟器件的设计流程	5
1.3 可编程模拟器件的实现技术	8
1.4 可编程模拟器件的历史与现状	15
1.4.1 IMP 公司 EPAC 系列器件	15
1.4.2 Motorola 公司 MPAA 系列器件	16
1.4.3 FAS 公司 TRAC 系列器件	19
1.4.4 Lattice 公司 ispPAC 系列器件	20
1.4.5 SIDA 公司 FIPSOC 系列器件	22
第 2 章 ispPAC 系列器件结构及原理	26
2.1 ispPAC 概述	26
2.2 ispPAC10	27
2.2.1 ispPAC10 的特点	27
2.2.2 ispPAC10 的命名与封装	28
2.2.3 ispPAC10 的结构与引脚	28
2.2.4 ispPAC10 的工作原理	30
2.2.5 ispPAC10 的接口规范	38
2.2.6 ispPAC10 的噪声增益	39
2.2.7 ispPCA10 的共模输入范围	40
2.2.8 ispPAC10 的交、直流特性	41
2.3 ispPAC20	43
2.3.1 ispPAC20 的特点	43
2.3.2 ispPAC20 结构及特点简述	43
2.3.3 ispPAC20 的工作原理	47
2.4 ispPAC80 与 ispPAC81	54
2.4.1 概述	54
2.4.2 ispPAC80 的工作原理	55
2.4.3 ispPAC80 的特性曲线	57
2.5 ispPAC30 简介	58
2.5.1 ispPAC30 的特点	58
2.5.2 结构及特点简述	58
2.5.3 ispPAC30 的封装及管脚	58
第 3 章 使用 PAC - Designer 开发 ispPAC	61
3.1 软件安装	61

3.1.1	系统需求	61
3.1.2	安装	61
3.1.3	许可证申请及安装	62
3.2	PAC - Designer 的基本用法	63
3.2.1	主要功能	63
3.2.2	设计过程	64
3.2.3	可修改的参数	64
3.2.4	用户界面	66
3.2.5	PAC - Designer 的库函数	70
3.2.6	设计仿真	71
3.2.7	器件编程	73
3.2.8	设计文档	77
3.3	软件菜单详解	80
3.3.1	File 菜单	80
3.3.2	Edit 菜单	82
3.3.3	View 菜单	90
3.3.4	Tools 菜单	91
3.3.5	Options 菜单	93
3.3.6	Window 菜单	94
3.3.7	Help 菜单	96
3.3.8	Curve 菜单	96
3.4	设计实例	96
3.4.1	双二次电路	97
3.4.2	用 ispPAC10 实现双二次电路	97
3.4.3	实现及仿真	98
3.4.4	单片 ispPAC20 实现电压监控	100
第 4 章	TRAC 系列完全可重配置模拟电路	102
4.1	TRAC 系列概述	102
4.2	TRAC020 结构与原理	105
4.3	TRAC020LH 结构与原理	112
4.4	TRAC - S2 原理与应用	117
4.5	ZXF36Lxx 原理与 CASIC 开发	121
第 5 章	TRAC 软件使用与开发	129
5.1	安装与配置	129
5.2	初识 TRAC 软件	132
5.2.1	软件的基本界面	132
5.2.2	常用术语与规则	135
5.3	基本设计流程	137
5.3.1	案头准备	137
5.3.2	设计输入	138
5.3.3	功能仿真	143
5.3.4	在线配置与编程	146
5.4	深入掌握 TRAC 软件	147

5.4.1	File(文件)菜单	147
5.4.2	Edit(编辑)菜单	150
5.4.3	View(查看)菜单	151
5.4.4	Simulate(仿真)菜单	154
5.4.5	Hardware(硬件)菜单	155
5.4.6	Graph(图形)菜单	156
5.4.7	Option(选项)菜单	158
5.4.8	Window(窗口)菜单	159
5.4.9	Help(帮助)菜单	159
5.4.10	配置文件与设计文件	160
5.5	典型设计实例	165
5.5.1	积分振荡器	165
5.5.2	压控振荡器	167
5.5.3	脉宽调制器	168
5.5.4	理想均方根转换器	170
5.5.5	相位检测器	172
5.5.6	压控放大器	174
5.5.7	可编程模拟滤波器	176
5.5.8	状态变量滤波器	177
第6章	FIPSOC 混合信号片上系统	181
6.1	综述	181
6.1.1	主要特性	181
6.1.2	特点简介	182
6.1.3	FIPSOC 的 CAE 工具	182
6.2	可编程逻辑阵列	183
6.2.1	数字宏单元(DMC)	184
6.2.2	输入/输出模块(IOB)	198
6.2.3	布线资源	200
6.2.4	配置存储器	205
6.3	可配置的模拟单元	206
6.3.1	单元框图以及输入/输出引脚	206
6.3.2	增益模块	210
6.3.3	数据转换模块	213
6.3.4	比较器模块	217
6.3.5	参考源模块	217
6.3.6	配置数据	221
6.4	片内子系统接口	222
6.4.1	8051 存储器组织	222
6.4.2	子系统接口	224
6.4.3	系统映射控制 SFR	225
6.4.4	可编程单元与 μP 的接口	228
6.5	时钟产生单元	231
6.5.1	时钟产生单元的编程	232

6.5.2	内部时钟	234
6.5.3	时钟停止	238
6.5.4	时钟同步	239
6.6	外部中断控制单元	240
6.6.1	中断系统	240
6.6.2	外部中断控制单元的寄存器	243
6.6.3	外部中断控制单元的编程	246
6.6.4	中断服务程序矢量	247
6.6.5	单步执行	249
6.7	软件调试单元	249
6.7.1	功能描述	249
6.7.2	用于调试的专用功能寄存器	250
6.7.3	断点的编程	252
6.7.4	单步执行	253
6.7.5	中断响应时间	254
6.8	FIPSOC 器件引导程序	254
6.8.1	引导模式	254
6.8.2	外部并行 ROM 引导模式	255
6.8.3	串行链引导模式	256
6.8.4	内部 ROM 引导	259

第1章 可编程模拟器件概述

可编程模拟器件(Programmable Analog Device)是近年来崭露头角的一类新型集成电路。顾名思义,该类器件首先属于模拟集成电路,即电路的输入、输出甚至内部状态均为随时间连续变化且幅值未经过量化的模拟信号;同时,该类器件又是现场可编程的,即在出厂后,可由用户可通过改变器件的配置来获得所需的电路功能。利用可编程模拟器件配合相应的开发工具软件,便可以像设计数字电路那样方便、快捷地完成模拟电路的设计、修改、编程和验证,从而极大地缩短产品的研制周期并增强其竞争力。可以预期,可编程模拟器件将会与可编程逻辑器件一样得到迅速的发展,其应用也将日益广泛。

1.1 可编程模拟器件的价值与作用

模拟电路曾经是实现电子系统的惟一形式,也是电子电路的代名词,后来,由于存在处理精度低、设计及调试难度大等严重缺陷,才逐步让位于“后起之秀”的数字电路。现存的大多数电子系统,其主体部分均为数字系统。然而,我们仍应当看到模拟电路具有许多独特的优势。首先,任何电子系统都必须依赖模拟电路作为与外部世界的接口,因为我们所处的世界在本质上是模拟的——时间、空间和各种物理量均连续变化、无限可分,而数字电路则是时间离散采样、数值有限量化,这种明显的差异必须通过模拟电路加以弥合。在微弱信号放大、高速信号采集和大功率输出等应用中,模拟电路的优势地位至今仍不可动摇。其次,与数字电路相比,模拟电路通常更为经济,即实现同样功能所需的模拟电路较为简单(至少可省去用作与物理世界接口的A/D、D/A),因而相应的集成电路制造成本较低、功耗较小,是实现小型中、低精度电子系统的最佳选择。再次,模拟电路的工作速度较高,是高频应用中的最佳甚至是惟一的选择。因此可以预期,尽管电子系统“数字化”的趋势日益明显,模拟电路的作用仍然不可或缺,并将继续在未来的电子系统中占据重要的地位。

另一方面,集成电路制造技术和计算机技术的不断进步,也为模拟电路的改进和创新提供着无尽的动力。特别是集成运算放大器的出现,在很大程度上克服了元件参数的离散性对电路性能的影响,显著降低了模拟电路的设计、调试和维护的难度。由于集成运放具有包括输入“虚短路”、“零”电流,输出“零”内阻等多种理想特性,且以其为核心设计出的电路通常具有十分接近于理论分析结果的电路性能,因而成为模拟电路设计中最常用的标准件,并使得包括自顶向下模块化设计、计算机辅助分析和设计等先进设计方法得以成功引入和应用。如今,可编程模拟器件的诞生将引起模拟电路设计和应用方面的一场新的革命。这样说丝毫不夸张,因为可编程模拟器件具有许多普通模拟电路无法比拟的优点,包括理想的、可预测的电路性能,灵活的可编程特性,产品的一致性,以及较低的综合成本和较高的设计自动化程度,等等。

首先,可编程模拟器件多采用类似于集成运放的电路结构和工艺,而所需的外围元件更少,因而具有更为理想的电路特性,适于用作模拟电路设计的基本模块。

其次,可编程模拟器件的内部资源丰富,电路结构灵活多变,主要的元件参数可分多级进行精细调整,因而用同一种器件可实现多种不同的电路类型和设计目标,具有前所未有的灵活性和适应能力。各种可编程模拟器件均可多次编程和修改,有些还可以在加电工作的同时接受配置和编程,因此特别适合于样机制作和调试,甚至于产品的升级、换代亦可在工作现场完成,非常方便。

再者,与可编程逻辑器件类似,可编程模拟器件内部连接和元件参数的改变均借助于对其内部配置位串的编程,因而便于利用电子设计自动化(EDA)工具进行分析、仿真和配置,提高模拟电路设计的自动化程度。利用可编程模拟器件及其开发工具,系统工程师和数字设计工程师既便缺少模拟电路的设计经验和电路知识,或者欠缺进行电路仿真和复杂数学运算的能力,也仍然能够很快地设计出“专家水平”的模拟电路。这对于解决模拟电路设计任务繁重和合格的模拟设计工程师大量短缺这一矛盾意义重大。

最后,可编程模拟器件属于半定制的专用集成电路(ASIC),即器件本身具有通用性,但用户可对器件进行编程以实现所需的电路功能。它同时具备标准集成电路(off-the-shelf IC)使用灵活、开发费用低、开发周期短,以及 ASIC 保密性强、针对特定应用等优点,可作为 ASIC 开发的中间媒介和过渡途径,即在样机研发和小批量试生产阶段使用可编程模拟器件,待产品成熟后再平滑地移植至相应的全定制 ASIC 芯片,从而最大程度地降低产品的开发成本,并缩短上市时间,增加产品的竞争力。

显而易见,可编程模拟器件同样适合用作模拟电路设计中的标准件,而且其覆盖范围更宽、应用更灵活、集成度更高、性能也更优越。其典型应用包括:

(1) 信号调理。信号调理包括微弱信号放大、有源滤波、增益调整、传感器特性校正等。可编程模拟器件所具有的低工作电压、低功耗等优良特性,可极大地减小便携式电子系统的体积和功耗,拓展其应用范围;而可编程模拟器件所独有的现场可编程能力,对提高仪器仪表的智能化程度和自适应能力等作用非常明显。

(2) 模拟计算。对信号进行相加、相减、对数、指数、相乘、相除,求信号的平均值、绝对值、最大/最小值甚至于功率谱分布等计算,均可利用可编程模拟器件实现。尽管模拟信号处理的精度低于数字信号处理方式,但仍能满足许多重要应用(如简单控制系统)对计算精度的要求,而所需的电路规模较小,成本也较低。

(3) 高频应用。中波、长波波段的高频放大、混频和中频放大、视频检波、低频放大等,均可利用可编程模拟器件实现。利用其可编程特性,可以实现精确的自动调谐和自动增益控制,显著提高通信系统的抗干扰能力。

(4) 人工神经网络。人工神经元是构成人工神经网络的基本单元。模拟生物神经元的工作机理,人工神经元需计算多个输入信号的加权和并输出将该加权和与预设阈值相比较的结果,因此可以使用模拟加法器串接一个比较器来实现。按照一定的拓扑结构将多个神经元相互连接,便可构成相应类型的人工神经网络。利用可编程模拟器件的可配置特性,可修改神经元的加权系数和阈值、判决函数等,从而构成自适应的神经网络。

目前,可编程模拟器件的发展仍处于起步阶段,器件品种较少,每种器件的功能有限(一般可实现至多十余种电路类型),规模也较小。但是,如能根据其各自特点加以合理地

选择和组合, 仍可实现较为复杂的电路功能。目前, 可编程模拟器件已在电子线路实验、传感器匹配、数据采集、信号处理、仪器仪表、控制与监测、人工神经网络等重要领域中得到了初步的应用并展现出广阔的应用前景。新兴的可进化硬件(Evolvable HardWare, EHW)研究领域以硬件在线自适应为目标, 也将可编程模拟器件作为实现模拟电路自动设计和在线自适应的重要评估手段和实现载体。可以预期, 随着模拟可编程技术的不断进步和器件品种的逐步丰富, 可编程模拟器件将会成为实现模拟电路的首选器件和最佳选择。

1.2 可编程模拟器件的基本原理

1.2.1 可编程模拟器件的组成

可编程模拟器件的最大特点在于其可编程性, 即可以接受外部输入的配置数据并相应地改变器件的内部连接和元件参数, 实现用户所需的电路功能。为支持上述可编程能力, 可编程模拟器件需以可编程模拟单元(Configurable Analog Block, CAB)和可编程互连网络(Programmable Interconnection Network, PIN)为核心, 配合配置数据存储单元(Configuration Data Memory)、输入单元(Input Blocks)、输出单元(Output Blocks)或者输入/输出单元(I/O Blocks)等共同构成, 如图 1.1 所示。其中:

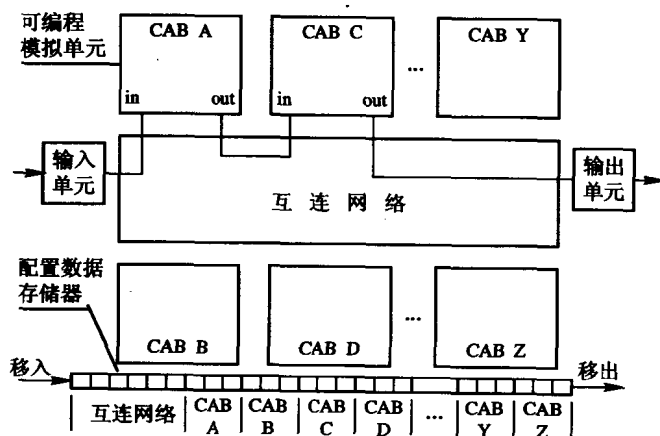


图 1.1 可编程模拟器件组成框图

(1) 输入单元和输出单元(或者输入/输出单元)一般与器件引脚直接相连, 分别负责对输入、输出信号进行驱动和变换(如电平偏移)。

(2) 配置数据存储单元负责接收和保存外部输入的配置数据, 其输出则用于控制可编程模拟单元和可编程互连阵列。具体到每一种器件, 该存储器的类型和容量都各不相同, 可以是长度仅为数十位的串入并出移位寄存器, 也可以是有相当容量的静态随机存储器(SRAM)和非易失的电可擦除电可编程只读存储器(E²PROM)或快闪只读存储器(FLASHROM)。

(3) 可编程模拟单元是可编程模拟器件的核心部分, 一般由 1 个运算放大器、可编程电容阵列以及可编程电阻阵列(存在于连续时间型器件中)或者可编程开关阵列(存在于离

散时间型器件中)等构成。各个电阻和电容的取值,晶体管的组态(如共基、共集、共射、二极管等),以及这些元件与运算放大器的连接关系等,均可通过编程来加以改变。这样,同一个可编程模拟单元,配置不同便呈现不同的电路组态和元件参数组合,从而能够实现不同的电路类型和功能。可编程模拟单元可供选择的电路组态和参数组合的多少,以及性能指标的优劣,是制约可编程模拟器件应用范围和功能强弱的主要因素。

(4) 可编程互连网络可看作是由许多个双向模拟开关构成的多输入、多输出的信号交换网络。该网络的输入可以是经输入单元接入的外部信号、可编程模拟单元的输入或者器件内部的基准信号;其输出则可连接至可编程模拟单元的输入、器件的内部节点或者输出单元。该网络具体的信号连接和传递关系完全由配置数据所决定。这样,设计者可以根据需要将多个可编程模拟单元加以连接和组合,实现较大规模的模拟电路。

(5) 某些可编程模拟器件还需要外接电阻、电容元件,甚至利用外接短路线来完成信号的传递。这些外接电阻、电容元件的取值由设计工具软件自动算出,可看作对可编程模拟单元的扩展,而外接的短路线则可看作简化的可编程互连阵列。

熟悉可编程逻辑器件的读者可以看出可编程模拟器件与之存在许多相似之处:可编程模拟器件中的可编程模拟单元就相当于可编程逻辑器件的逻辑宏单元;可编程互连阵列就相当于可编程逻辑器件的中央开关矩阵。所不同的是,可编程模拟单元远比逻辑宏单元复杂得多——不但电路的连接(组态)可变,而且每个元件都有多达数十至数百种的参数变化;而可编程互连阵列则较为简单——层次较少,规模较小,有些可编程模拟单元(CAB)的输入、输出甚至已预先固定连接,其特殊之处在于必须保证信号能够双向和不失真地传递。

此外,有些可编程器件内部既包含可编程模拟单元和可编程互连阵列,又包含用于实现逻辑电路的逻辑宏单元和开关矩阵,甚至包含嵌入式微处理器。这种器件仅需1片便可实现中、小规模的应用电子系统,即所谓片上系统(System On Chip, SOC)。本书第6章将要介绍的FIPSOC系列器件便是如此。严格地说,这种器件既不属于可编程逻辑器件也不属于可编程模拟器件,而是数模混合的新型可编程器件,但它在结构和用途上都与可编程模拟器件有许多共同之处,可以看作是可编程模拟器件的一种推广形式,其代表了可编程器件未来的发展方向。

1.2.2 可编程模拟器件的分类

衡量可编程模拟器件性能的主要指标包括器件规模、可编程能力、编程方式等综合指标,工作电压、线性范围、额定功耗(电流)等直流参数,以及闭环带宽、频率失真度、共模抑制比、内部噪声等交流参数。通常,用可编程模拟器件所包含的可编程模拟单元的个数来大致表示其规模,用可供选择的结构和元件参数组合的个数来反映其可编程能力。各种直流参数和交流参数的含义与运算放大器的对应参数的含义相近。由于器件整体的交、直流特性因具体应用而异,因此通常给出的是可编程模拟单元的交、直流参数。多数可编程模拟器件在单一的+5 V电源电压下工作,额定功耗为100 mW量级。由于采取了特殊的措施,其输入、输出线性范围通常可达到接近满电源电压量程;闭环带宽已达到数百千赫到数十兆赫;频率失真度、共模抑制比、内部噪声等指标也已达到中、高精度运算放大器的水平。

关于可编程模拟器件的分类方法,目前尚无统一的标准。一种合理的分类方法是根据配置方式的不同,将可编程模拟器件划分为现场可编程模拟阵列(FPAA—Field Programmable Analog Array)和在系统可编程模拟电路(ispPAC—In System Programming Programmable Analog Circuit)两大类:

(1) 现场可编程模拟阵列(FPAA)。该类器件多采用移位寄存器或 SRAM 等易失性存储器保存编程信息,因此,需外接用于编程的存储器或嵌入式微处理器,在每次上电后重新加载编程信息;另一些则利用 E²PROM 或 FLASH ROM 保存编程信息,可利用通用编程器将信息写入。其中,有些器件还配有编程接口,可与微机或微处理器连接,实现在线配置。该类器件的主要优点是器件内部的控制电路简单且可无限次编程,缺点是编程不够方便。

(2) 在系统可编程模拟电路(ispPAC)。以 Lattice 公司的 ispPAC 系列为典型代表,该类器件内部设有兼容 JTAG 标准的串行编程接口,可与微机或嵌入式微处理器连接,对已安装在电路板上的器件进行在线配置或编程。同时,该类器件支持菊花链编程,即同一电路板上的多片 ISP 器件可共用一个编程接口进行编程和校验。该类器件一般利用 E²PROM 或 FLASH ROM 等非易失性存储器保存编程信息,一经编程十年内信息不会丢失。用户可选择加密位来禁止读取芯片中的编程信息,保护自己的设计成果。其缺点是可编程的次数有限(数十次至数万次),内部电路相对复杂且需额外增加器件引脚。

此外,可根据所采用的核心技术的不同,将可编程模拟器件划分为连续时间和离散时间、电压模式和电流模式等不同类型;根据使用时是否需要外接 RC 元件,可将可编程模拟器件划分为单片应用型和非单片应用型两类;根据器件内部是否包含逻辑功能单元,可将其划分为全模拟器件和模数混合器件两类,等等。有关细节和区别将在以后的章节中具体加以说明和比较。

可以预期,随着模拟可编程技术的不断进步和应用需求的增加,可编程模拟器件的类型和品种也会日益丰富和完善。

1.2.3 可编程模拟器件的设计流程

在可编程模拟器件问世之前,模拟电路设计普遍采用试凑法,即按照设计任务给出的性能指标和成本、尺寸等要求,依据设计规则和已有经验来选择可行的电路结构和类型;再通过计算或计算机辅助分析(如 Pspice 仿真)初步确定电路中各元件的取值;而后,通过搭制实验电路和实际测试,反复地对原有设计进行调整和修改,直到满意为止。这一过程无固定的套路可循,能否成功很大程度依赖于设计者的经验、灵感、耐心和细心。忽略细微的实际因素(如元件参数偏差、分布参数)、接线紊乱、接触不良或虚焊等等,都可能导致原理上完全正确的设计无法实施而被迫放弃。因此,模拟电路设计常被看作是只有经验丰富的专家才能够胜任的“艺术性”的工作。

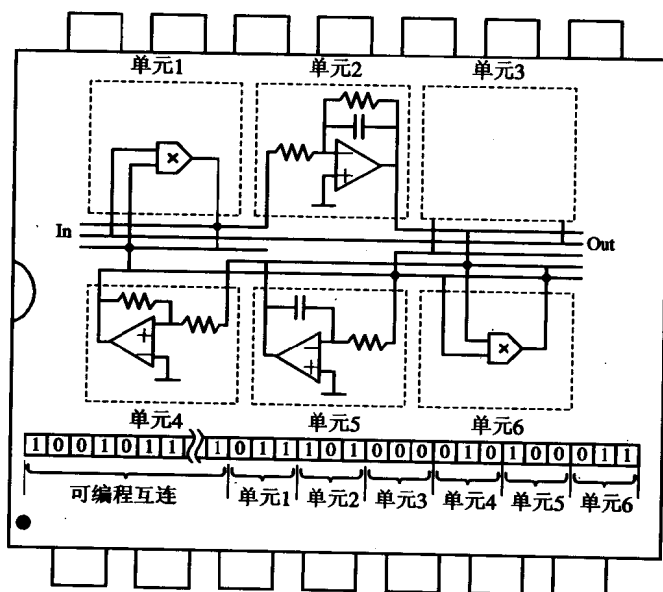
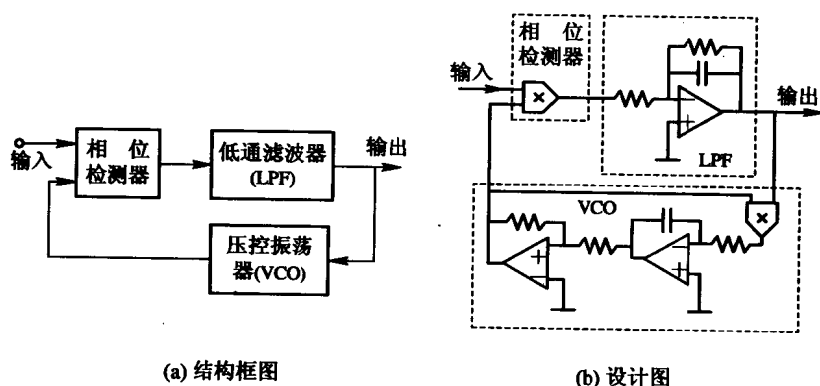
可编程模拟器件的引入将使这一状况大为改善。由于可编程模拟器件具有丰富的内部资源、灵活多变的结构和参数组合以及较为理想的电路特性,因而实现常用电路功能所需的元器件和连线数量、印制板面积均可大大减少,电路的整体可靠性可大大提高;同时,电路的实际性能将非常接近于计算机仿真的结果,甚至可做到“所见即所得”。更为重要的是,多数的修改和调整工作均可借助于计算机和开发工具来完成——通过计算机仿真有目

的地修改设计图纸，而后重新对器件编程便可获得全新的电路结构和参数，不再需要动用镊子和烙铁。这样，由于人为差错带来的延误和返工可大大减少，整个设计过程将变得更加轻松、方便和快捷。

具体地说，基于可编程模拟器件的模拟电路设计过程主要包括下列步骤：

(1) 电路表达。即根据所需的电路功能和性能指标，结合所选用的可编程模拟器件的资源 and 结构特点，初步确定可行的电路实现方案，手工绘制出相应的电路结构框图。在此过程中，应遵循自顶向下、逐层分解的模块化设计思想，合理地划分各功能模块和确定各模块间的信号传递关系。

(2) 分解与综合。利用与所选用的可编程模拟器件配套的开发工具软件，参考成熟的典型电路，逐一对各功能模块进行细化，即确定其所包含的元件、参数和连接关系。这一步骤一般以人机交互绘制电原理图的方式来完成。有些开发工具软件提供了对应于常用功



(c) 器件内部布局与布线示意图

图 1.2 模拟锁相环设计示例

能模块的宏函数,只需设计者给出必要的指标和参数,软件便会自动绘制出相应的电原理图。

(3) 布局与布线。由开发工具软件对已输入的设计方案(如电原理图)自动进行处理,包括确定各电路要素与器件内部资源之间的对应关系,确定器件引脚、内部元件以及可编程模拟单元之间的连接关系等等。有些开发工具软件不进行自动布局、布线,而是要由设计者在“分解与综合”步骤中手工完成分配和映射。在图 1.2 中,以模拟锁相环的设计为例,对电路表达、分解与综合和布局与布线等进行了说明,可供参考。

(4) 设计验证。即在开发工具软件所包含的仿真模型的支持下,对所设计的电路进行仿真(Simulation)。设计者可以指定输入什么样的信号,需要观察电路中哪些节点,而后由软件依据输入信号和仿真模型等自动计算出电路的输出响应,以曲线或表格的形式显示。仿真项目通常包括有关节点的幅频特性、相频特性和电压输出等。设计者应仔细检查仿真结果并与理想的电路输出进行比较,以了解各项设计指标是否得到满足。如果全部设计指标均已得到满足,则可进入下一步骤,否则应返回“分解与综合”步骤,对设计做相应的修改。

(5) 生成编程数据。在仿真结果完全正确的情况下,便可利用开发工具软件产生对应于当前设计的编程数据文件。最常见的格式是可供各种通用编程器使用的 JEDEC 标准格式,在系统可编程类器件则常采取非标准的串行位流格式。

(6) 器件编程。利用已生成的编程数据文件,借助通用编程器或者在系统编程接口完成对器件的配置,即将编程数据写入器件内部的配置存储器。

(7) 电路实测。利用信号源、示波器等对配置后的器件及其外围电路进行实际测试,检查其各项指标是否合乎要求。此时利用厂家提供的评估板进行测试比较方便。如果测试结果全部合乎要求,则本次设计宣告完成,否则,应返回“分解与综合”步骤,继续修改和完善该设计。

如图 1.3 所示,该设计过程主要在微机上借助开发工具软件来完成,自动化程度较高。

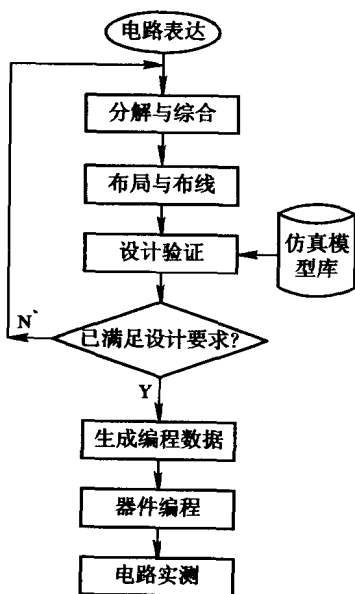


图 1.3 可编程模拟器件的设计流程

对于复杂的设计, 仅用几片可编程模拟器件难以实现, 这时就需要按照上述步骤分别完成各个功能模块的设计、仿真和编程, 最后再组装成完整的电路进行实测。如果要对整个电路进行仿真, 可以利用开发工具软件生成的 Pspice 仿真模型, 按照 Pspice 规定的格式对整个电路进行描述, 而后再进行 Pspice 仿真。

建议读者认真阅读开发工具软件附带的技术文档, 弄清各种库函数和宏函数的作用和用法并善加使用, 方能收到事半功倍的效果。注意总结和搜集已有的成功设计实例, 建立并不断充实自己的用户库, 这也是提高设计效率的一条有效途径。

1.3 可编程模拟器件的实现技术

众所周知, 模拟电路的结构复杂且富于变化, 电路所含元件的种类繁多, 参数变化范围大而精度要求较高。与之相比, 可编程模拟器件的容量和内部资源都极为有限, 奢望可编程模拟器件能够完全包容变化万千的模拟应用极不现实, 我们所能做到的仅是设法优化和充分利用其内部资源, 以改善其性能和拓展其适用范围。围绕着这一目标, 各厂商和研究机构都在努力改进原有技术和探索新的实现技术。

根据是否对信号进行采样(即时间轴离散化), 可将有关处理技术划分为连续时间处理和离散时间处理两大类; 而根据以电压或电流作为主要的信息参量, 又可划分为电压模式和电流模式两类。对取样方式和信息参量的不同选取, 便派生出连续时间电压运算、连续时间跨导运算、开关电容、开关电流等多种核心技术。这些技术各有其特点, 但目标都是改善器件的主要性能并以较低的成本实现足够丰富的结构和参数变化。

1. 连续时间与离散时间

顾名思义, 连续时间处理方式即模拟电路通常所采用的方式, 信号在整个处理过程中都保持随时连续变化的特性; 而离散时间处理方式则需在时钟信号的控制下对信号进行等间隔抽样, 以仅在离散时刻上变化但幅度仍保持连续的采样信号作为处理对象。因此, 如图 1.4 所示, 为防止产生频率混叠需在离散化之前加入“预滤波”低通滤波器, 而在输出之前又需要借助采样—保持电路和“后滤波”低通滤波器, 从采样信号中恢复出随时间连续变化的模拟信号。表 1.1 总结和比较了这两种方式各自的特点, 可供参考。

表 1.1 连续时间处理与离散时间处理的优缺点

比较项目	连续时间	离散时间
预滤波和后滤波	无需	需
采样—保持	无需	需
频率上限	受运放性能限制	仅为运放频率上限的 1/10
四象限乘法器	易于实现	难以实现
参数变化范围	较窄	较宽
时钟噪声	无	有
可编程互连	布线较少	可编程的时钟通道
开关非理想化的影响	敏感	不敏感