

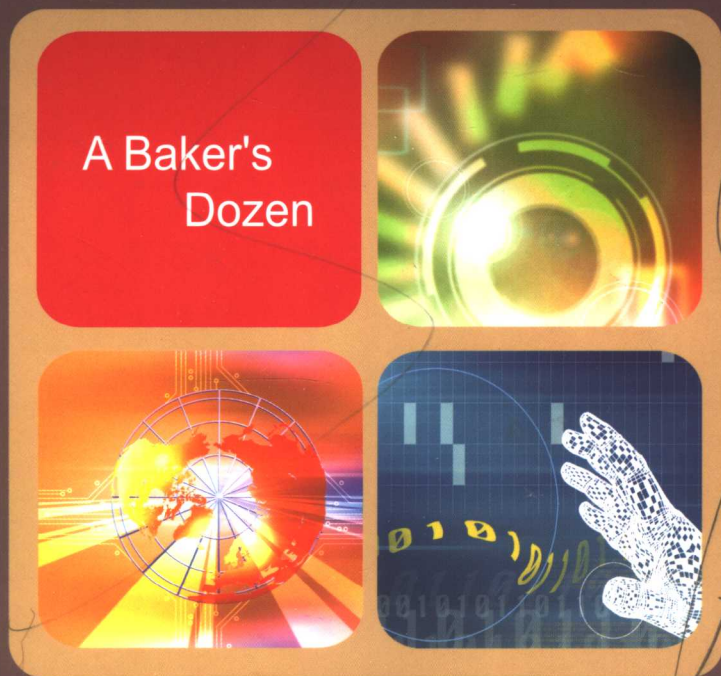
● 嵌入式系统译丛

ELSEVIER

# 嵌入式系统中的 模拟设计

A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers

[美] Bonnie Baker 著 李喻奎 译



北京航空航天大学出版社

TP360.21

17

嵌入式系统译丛

# 嵌入式系统中的模拟设计

**A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers**

[美] Bonnie Baker 著

李喻奎 译

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书为那些希望掌握基本模拟知识的数字工程师而写,内容包括 A/D 转换器、D/A 转换器、运放、滤波器以及模拟和数字系统集成设计。本书共分为 13 章。作者采用工程师喜欢的谈话、交流方式,第 1 章从分析数字和模拟设计的鸿沟开始,阐述两者之间的联系;第 2~7 章中详细介绍了 SAR 和  $\Sigma-\Delta$  A/D 转换器、运放的基本知识,并结合实际应用讲解如何选择合适的 A/D 转换器、运放以及线性系统中运放电路的设计和 SPICE 仿真;第 8~12 章介绍模拟和数字电路协调工作所关注的噪声、电源和地分割、PCB 布局的技巧和策略以及选择合适的工具进行电路调试,在理论介绍时,结合真实模拟设计实例,让数字工程师对这些模拟工具有真实的感受,并进而去思考模拟,以及如何利用它来解决电路问题;第 13 章总结全书的内容,并以模拟/数字混合电路板设计为例,让工程师体会到模拟技术最本质的“艺术”。

本书特别适合那些从事信息家电、工业控制和机电控制系统等模拟/数字混合系统设计的数字工程师、学生、教师及应用工程人员。本书是一本有用的参考资料,既可以帮助读者完成数字系统中的模拟设计,也可以作为掌握许多模拟电子方面重要内容的指导手册。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统中的模拟设计/(美)贝克(Baker, B.)  
著;李喻奎译. —北京:北京航空航天大学出版社,  
2006. 8

ISBN 7-81077-862-5

I. 嵌… II. ①贝…②李… III. 微型计算机—系  
统设计 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 078983 号

### 嵌入式系统中的模拟设计

**A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers**

[美] Bonnie Baker 著

李喻奎 译

责任编辑 孔祥燮

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:17.75 字数:398 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-862-5 定价:32.00 元

## 版 权 声 明

北京市版权局著作权登记号:图字:01-2006-0907

**A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers**

Bonnie Baker

ISBN: 0-7506-7819-4 ISBN-13: 978-0750678193

Copyright © 2005 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized translation from English Language edition published by the Proprietor.

ISBN: 981-259-540-6 ISBN-13: 978-981-259-540-9

Copyright © 2006 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

**Elsevier (Singapore) Pte Ltd.**

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65) 6349-0200

Fax: (65) 6733-1817

First Published 2006

2006年初版

Printed in China by Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由北京航空航天大学出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

# 译者序—— 将模拟技术最本质的“艺术”介绍给数字工程师

---

不管你从事哪项工作，也许包含数字设计、模拟设计，我都要感谢你购买并阅读本书。也许你会问，我为什么要翻译这本书，并将它介绍给中国的读者？这个问题也是我在阅读或翻阅各种书籍时同样要问或思考的问题。那么现在我就给你答案。

首先，是由于我与原书 *A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers* 的作者——Bonnie Baker 为 Microchip Technology 公司模拟与接口产品部门同事的缘故。2004 年我在美国参加 Master 年会时听了 Bonnie 的“电源、地和噪声”培训课程，恰好公司安排我在中国 Master 年会上讲授这个课程。在这个课程准备过程中，我得到她的大力帮助，也慢慢对她有所了解。她是 EDN 杂志的专栏作家，同时也撰写了多达 200 余篇的文章、设计笔记和应用笔记。其中很多文章、设计笔记被翻译成中文，并出现在诸多中文杂志和网站上。如果你在 google 中使用“Bonnie Baker”作为关键词进行中文网页搜索，你会得到 20 200\* 个搜索结果，其中约 50% 是关于她的署名文章。

第二点原因，也是促使我将原书翻译成中文，并介绍给中国工程师的真正原因。在我近 6 年的应用工程师职业生涯中，我自

---

\* 这是本人在撰写译者序时搜索到的结果，当你重新搜索时，结果会有所变化。



已逐渐完成了从使用单片机和数字电路的工程师到模拟应用工程师的转变,深切地感受到模拟电路的复杂和深奥。同时在与许多客户及其工程师(特别是数字工程师)交流中,发现他们在使用和设计数字电路相关的模拟电路,如 A/D 转换器、运放、电源管理时经常会碰到问题。当然,这种情况逐渐在向好的方面转变。当 Bonnie Baker 给我们发邮件并介绍她的新书时,我特别注意了该书的内容和她的写作出发点,进而发现这本书是结合她自己近 20 年的经验,从一个模拟设计工程师的角度,给数字工程师介绍最基本的模拟知识,将模拟技术最本质的“艺术”呈现给数字工程师。正如你将在本书中发现到的,这些内容包含 A/D 转换器、运放、滤波器以及模拟/数字电路的 PCB 板设计。对这些内容的介绍,不是以纯理论的方式,而是通过设计案例,并结合 Microchip 的单片机和模拟产品为实例,以谈话、交流的方式娓娓道来。我相信当你阅读完本书时会有更深刻的体会。

最后,本书对你和我只是一个开端,它可以让你静下心来去了解最基本的模拟知识,进而利用它来作为电路设计的参考和指导。我也欢迎你就本书的内容或其他模拟和数字电路设计的问题与我或 Bonnie Baker 交流,我的 E-mail 地址为 [henry.lee@microchip.com](mailto:henry.lee@microchip.com)。有关 Microchip Technology 公司的单片机和模拟产品,可浏览 [www.microchip.com](http://www.microchip.com) 或 [www.microchip.com.cn](http://www.microchip.com.cn) 或与其各地办事处联系。

在此,我要感谢 Bonnie Baker 和 Microchip Technology 公司的多位同事,以及北航出版社的胡晓柏及其他编辑,在本书的翻译过程他们给了我大力的帮助,使我能够顺利完成本书的翻译。也要感谢威健国际公司的江洁,她帮助我检查了大部分的译文。当然,最为重要的是我的家人,在他们的鼓励下,使我完成了这项工作。

李喻奎

2006 年 6 月



# 前 言

---

我进入大学，学习的课程主要是关于模拟。然后，我开始在一家模拟芯片设计公司——Burr-Brown公司工作。事实上，我当时的目标不是要在一个模拟芯片设计公司工作，而只是要找到一份工作。然而，我有幸能够与世界上最好的模拟工程师一起工作。13年之后，我决定要拓展我的领域，因此我转到一家数字芯片公司。对我来说，13是一个幸运数字，因为它是现实教育的开端。

我学到了什么？我学到了设计的电路只需针对应用，而不是为成为业界最完美的方案。我也学到了使用数字的方法来实现模拟电路同样的功能。更多地，我学到了“有时无知也是一种幸运”。我与之共事的很多数字工程师从来不会认为有些任务是不可能完成的。例如，在Burr-Brown公司，我们利用Nicrome的新技术来微调精密的模拟电路。这种微调过程是针对特定的模拟芯片，而且很准确。我告诉工程师，他们没有Nicrome技术就无法得到精密的产品。然而，我错了。Microchip利用他们数字Flash工艺来微调精密的模拟电路。

我曾经是“不撞南墙不死心”的模拟工程师。但是，我开始转变。我还没有完全转变到数字方面，但是，数字一直都有着吸引力。由于我很熟悉模拟，同时也有广泛的模拟经验，现在有了数字工具来解决我的电路问题，显然这种吸引力更强烈了。通过本



书,也让你能够掌握这些工具,使你的设计比同事或竞争者更具优势。

数字电路和软件在慢慢进入模拟设计领域。但是,模拟并不会在信号调理电路、电源以及电路布局策略方面消失。相反,我知道数字工程师还会受到模拟问题的挑战,即使他们不承认这些问题的存在。

现在,让我们看看数字工程所面临的挑战的复杂性。微控制器和微处理器芯片设计正在向各个方向发展。增加速度和扩展存储器容量只是这些芯片发展的一个方面。然而,最感兴趣的变化是一些外设,包括模拟和接口电路的增加。不仅要求工程师了解这些外设实现的具体细节,也需要工程师了解基本的布线策略。今天的数字工程师要求具有更高层次的知识,来解决软件设计之外的各种问题的挑战。

进一步的展望,数字工程师需要在他们的工具箱中增加一些基本的工具。我写这本书,主要针对那些从事设计的数字工程师以及学生、教师和应用工程师,他们急切地需要获得一些基本的模拟知识,来帮助自己处理日常工作中碰到的棘手的工程问题。本书也可以作为数字系统中模拟设计的有用参考手册。本书针对的读者也包含那些嵌入式设计工程师,他们的设计和发展会更多地涉及模拟电路。





## 致 谢

---

我要感谢所有抽出时间来审阅这些资料的工程师们。主要的审阅者——Kumen Blake (Microchip Technology 公司的工程师) 仔细审阅并给了我很好的建议。Paul McGoldrick (Analog-Zone 的主编) 也抽出时间审阅了本书, 确保内容的准确和简洁。Microchip Technology、Texas Instruments 和 Burr-Brown 三家公司的很多工程师也帮助审阅, 以保证技术的准确性。

也要感谢 Newnes 出版社的采编 Harry Helms 和 Borrego 出版社的 Kelly Johnson。有一年多的时间, Harry 建议我坐下来写些东西, 最后我告诉他, 我需要两年的时间才能写完, 而他说只需一年就可以完成。正因为 Harry 从一开始就给我热情的鼓励, 我实际上只花了 10 个月的时间就完成全书的写作。Kelly 帮助我完成了最后的编辑。

特别感谢我在 Tucson, Arizona 的支持者, 他们是这群支持者的拉拉队。有了他们的支持, 我们最终完成了这本书!

## 关于作者

---

Bonnie Baker 为 EDN 杂志每月的“Baker's Best”专栏撰写文章。她在模拟和数字电路以及系统设计方面有近 20 年的经验。Bonnie 最初是以 Burr-Brown 公司支持模拟产品的生产工程师开始其职业生涯的。之后,她逐渐成为 IC 设计工程师、模拟部门的策略市场工程师以及公司的应用工程经理。1998 年,她加入 Microchip Technology 公司,任职模拟部门的模拟/混合信号应用工程经理和其 PIC 微控制器部门的系统架构工程师。这使她的经验从模拟应用扩展到微控制器应用方面。

Bonnie 在亚利桑那大学(Tucson, AZ)获得电子工程硕士学位,在北亚利桑那大学(Flagstaff, AZ)获得音乐教育的学士学位。除了模拟设计方面的深厚经验,Bonnie 共撰写了 200 余篇的文章、设计笔记和应用笔记,来与工程师分享她的知识和应用技巧。除作为 EDN 杂志的专栏作家外,她也是各类技术研讨会和展览会上的演讲嘉宾。

# 目 录

---

## 第 1 章 跨越模拟和数字的鸿沟

1.1 测量温度并数字化 .....	4
1.2 设计中的拦路石 .....	5
1.3 不关我的事 .....	5
1.4 给我重要的数据 .....	6
1.5 不要让这些小事来麻烦我——只给我数据 .....	9
1.6 模拟设计成功的关键因素 .....	11
1.7 模拟和数字设计的区别 .....	12
1.7.1 精 度 .....	13
1.7.2 硬件和软件 .....	13
1.8 时间及其倒数 .....	17
1.9 组织工具箱 .....	17
1.10 了解最基本原理并继续提升,跳出思维定势 .....	18

## 第 2 章 模/数转换器基础知识

2.1 A/D 转换器的关键参数 .....	20
2.1.1 A/D 转换器的输入范围 .....	20
2.1.2 模拟信号的数字编码 .....	21
2.1.3 吞吐率与精度及准确度的关系 .....	24
2.1.4 准确度与精度关系 .....	25



2.2 逐次逼近型(SAR)转换器 .....	29
2.2.1 CMOS SAR 拓扑结构 .....	31
2.2.2 SAR 转换器的输入接口 .....	33
2.3 $\Sigma-\Delta$ 转换器 .....	36
2.3.1 $\Sigma-\Delta$ 转换器的工作原理 .....	36
2.3.2 $\Sigma-\Delta$ 转换器中的可编程增益放大器 .....	37
2.3.3 多级电荷平衡 ADC .....	39
2.3.4 数字低通滤波器 .....	41
2.3.5 抽取滤波器 .....	44
2.3.6 $\Sigma-\Delta$ 转换器的最大好处 .....	44
2.3.7 $\Sigma-\Delta$ 转换器参数——数字滤波器设定时间 .....	46
2.3.8 不同厂家 $\Sigma-\Delta$ 转换器的区别 .....	46
2.4 结 论 .....	47

### 第3章 为应用选择合适的 A/D 转换器

3.1 输入信号的分类 .....	48
3.2 使用 RTD 的温度测量:采用 SAR 转换器,还是 $\Sigma-\Delta$ 转换器? .....	55
3.2.1 SAR 转换器的 RTD 电流激励电路 .....	57
3.2.2 使用 SAR A/D 转换器的 RTD 信号调理电路 .....	58
3.2.3 SAR A/D 转换器适合这个温度测量应用吗? .....	59
3.3 使用 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器的 RTD 信号调理 .....	59
3.4 压力测量:选用 $\Sigma-\Delta$ 转换器,还是 SAR 转换器? .....	60
3.5 使用 SAR A/D 转换器的压力传感器信号调理 .....	61
3.6 使用 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器的压力传感器信号调理 .....	62
3.7 光敏二极管应用 .....	63
3.8 使用 SAR A/D 转换器的光电检测信号调理 .....	63
3.9 使用 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器的光电检测信号调理 .....	65
3.10 电动机控制方案 .....	66
3.11 结 论 .....	69

### 第4章 模拟滤波器的使用与设计

4.1 模拟低通滤波器的关键设计参数 .....	73
--------------------------	----



4.2	抗混叠滤波器原理	80
4.3	模拟滤波器的实现	82
4.3.1	无源滤波器	83
4.3.2	有源滤波器	83
4.3.3	单极点滤波器	84
4.3.4	双极点 Sallen-Key 滤波器	84
4.3.5	双极点多反馈滤波器	85
4.4	如何选择运算放大器	85
4.5	为接近直流的模拟信号设计抗混叠滤波器	86
4.6	复用系统	89
4.7	连续模拟信号	91

## 第 5 章 为你的电路选择合适的运放

5.1	明智的工艺选择	94
5.2	运放电路的基础知识	95
5.2.1	电压跟随器	95
5.2.2	放大模拟信号	97
5.2.3	差分放大器	98
5.2.4	加法器	99
5.2.5	电流-电压转换	100
5.2.6	仪表放大器	101
5.2.7	浮空电流源	102
5.3	运放设计的技巧	103
5.3.1	一般的建议	103
5.3.2	单电源轨对轨运放的设计	104

## 第 6 章 线性系统中的运放

6.1	运放直流特性基础	105
6.2	高输入阻抗会有区别	109
6.3	运放输出不能摆至轨对轨	110
6.3.1	正确使用运放的输入和输出	113
6.3.2	直流参数: $V_{OS}$ 、 $A_{OL}$ 、CMRR 和 PSRR	115



6.4 每个运放都会振荡,每个振荡器都会放大	118
6.4.1 运放内部框图	118
6.4.2 闭环运放系统的稳定性	120
6.4.3 闭环传递函数	121
6.4.4 运放电路中 $1/\beta$ 的计算	121
6.5 确定系统的稳定性	123
6.6 时域性能	126
6.6.1 压摆率(SR)	126
6.6.2 设定时间( $t_s$ )和过冲	127

## 第7章 SPICE 仿真

7.1 “纸和笔”的传统设计流程	133
7.2 仿真的结果可靠吗?	136
7.3 宏模型	139
7.4 结论	143

## 第8章 从数字域解决模拟问题

8.1 PWM 实现 D/A 转换器	145
8.1.1 从时域的角度了解参考电压	145
8.1.2 将数字信号变成模拟信号	146
8.1.3 为 PWM D/A 转换器确定模拟低通滤波器	147
8.1.4 将时域和频域合在一起	149
8.2 使用比较器实现 A/D 转换	150
8.2.1 比较器的输入范围( $V_{IN+}$ 和 $V_{IN-}$ )	150
8.2.2 输入迟滞	150
8.3 窗口比较器	152
8.4 比较器和定时器合在一起	153
8.5 利用定时器和比较器来设计 $\Sigma - \Delta$ A/D 转换器	154
8.5.1 $\Sigma - \Delta$ 原理	154
8.5.2 微控制器实现	156
8.5.3 微控制器实现的 $\Sigma - \Delta$ A/D 转换器的误差分析	158
8.5.4 其他输入范围	159



8.6 结 论 .....	162
<b>第 9 章 模拟和数字电路协同工作</b>	
9.1 为应用选择适合化学特性的电池 .....	163
9.2 转换电池电压为系统所需电压 .....	165
9.3 定义电源转换效率 .....	166
9.3.1 Buck 降压电路的效率 .....	166
9.3.2 电荷泵电路的效率 .....	167
9.3.3 低压差线性稳压器的效率 .....	168
9.4 3 种电源器件的比较 .....	170
9.5 电池供电系统的最佳电源方案 .....	172
9.6 微控制器应用的低功耗实现 .....	173
9.6.1 模拟和数字电路协同工作 .....	173
9.6.2 控制时钟 .....	174
9.6.3 休眠模式下数字电路的工作 .....	177
9.6.4 结 论 .....	178
<b>第 10 章 器件、传导和辐射噪声</b>	
10.1 噪声参数的定义和术语 .....	180
10.2 电路噪声示例 .....	181
10.3 器件噪声 .....	184
10.3.1 电阻噪声 .....	184
10.3.2 运放噪声 .....	188
10.3.3 A/D 转换器噪声 .....	193
10.3.4 电源噪声 .....	194
10.3.5 减小器件噪声 .....	197
10.4 传导噪声 .....	198
10.4.1 信号路径上的噪声 .....	198
10.4.2 电源总线上的噪声 .....	199
<b>第 11 章 高速、精密数字电路的布板和铺地</b>	
11.1 模拟和数字布线策略的相似之处 .....	203





11.1.1	旁路或去耦电容	203
11.1.2	电源线和地线要布在一起	204
11.2	地平面可能是一个难题	206
11.3	电路板和元件的寄生效应会产生巨大危害	207
11.3.1	寄生电容的危害	207
11.3.2	PCB设计产生的寄生电感	212
11.4	A/D转换器精度和分辨率提高时所使用的布局技巧	212
11.4.1	逐次逼近型A/D转换器的布线	213
11.4.2	高精度 $\Sigma-\Delta$ 转换器布线策略	215
11.5	双面电路板的布局艺术	216
11.6	有/无地平面时的电流回路设计	220
11.7	12位传感系统的布局窍门	221
11.8	布线的一般准则——器件布局	222
11.9	布线的一般准则——地和电源策略	222
11.10	信号线	225
11.11	旁路电容和抗混叠滤波器的使用	226
11.12	旁路电容	226
11.13	抗混叠滤波器	226
11.14	PCB设计检查表	226

## 第12章 选用正确的工具调试混合信号设计

12.1	解决问题的基本工具	228
12.2	电源噪声	232
12.3	使用运放不正确	236
12.4	不要忽略细节	237
12.5	结论	239

## 第13章 同一个电路板上的数字/模拟混合设计

13.1	连接真实世界的信号链	240
13.2	可选的工具	241
13.3	考虑模拟的数字电路设计	245
13.4	结论	249





**附录 A A/D 转换器的参数定义和公式****附录 B 读懂 FFT**

B.1 读懂 FFT 图 .....	256
B.2 基频输入信号 .....	257
B.3 输入信号容限 .....	258
B.4 信噪比 .....	258
B.5 无失真动态范围(SFDR) .....	258
B.6 平均噪声门限 .....	259
B.7 FFT 图中的其他参数 .....	259
B.8 FFT 精度 .....	259
B.9 窗口函数 .....	260

**附录 C 运放参数定义和公式**