

VOLTAGE REFERENCES
From Diodes to
Precision High-Order Bandgap Circuits

集成 基准源电路 设计

从二极管到高阶带隙基准源

[美] Gabriel Alfonso Rincón-Mora 著
黄晓宗 译



科学出版社

013031595

TN402

57

集成基准源电路设计

——从二极管到高阶带隙基准源

〔美〕 Gabriel Alfonso Rincón-Mora 著

黄晓宗 译



科学出版社

北京



北航

C1636431

TN402
57

图字: 01-2013-0909 号

内 容 简 介

本书是集成电压基准源(Voltage Reference)设计的经典参考书籍和教程,阐述了集成电压基准源大量设计实例背后蕴藏的理念以及更多的思考。全书共分为5章,详细介绍了基准源设计相关的基础知识、电流基准源设计、电压基准源设计、高精度基准源电路设计,以及系统和应用环境分析等方面的内容。

全书以理论分析作为基础,结合工程产品开发的实际情况,从产品的性能、成本和应用多方面讨论产品开发过程中的细节问题。书中各章节具有较强的独立性,可以满足读者不同方面的需求,对于刚入门的数字和模拟电路设计师以及经验丰富的工程师均具有重要的借鉴意义。

本书可作为高等院校电气工程、微电子和集成电路设计等相关专业师生的参考用书,也可以供相关科研工作者和工程人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

集成基准源电路设计:从二极管到高阶带隙基准源/(美)林康-莫莱(Gabriel Alfonso Rincón-Mora)著;黄晓宗译.—北京:科学出版社,2013.4

书名原文:Voltage references:from diodes to precision high-order bandgap circuits

ISBN 978-7-03-036714-3

I.集… II.①林…②黄… III.集成电路-电路设计-研究 IV.TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 030037 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013年4月第一次印刷 印张: 9 1/2

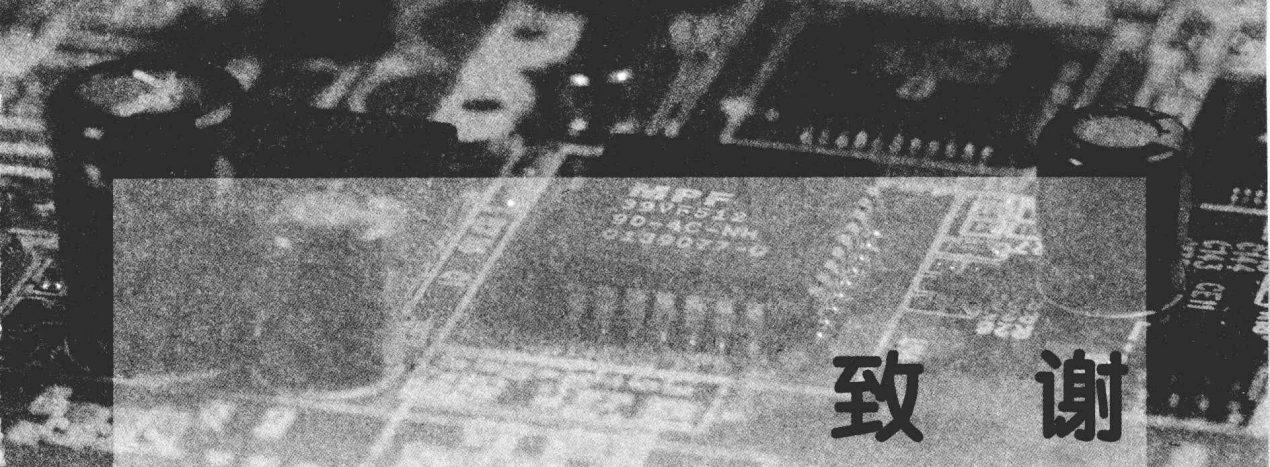
印数: 1—4 000 字数: 180 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Voltage References: From Diodes to Precision High-Order Bandgap Circuits, ISBN 978-0-471-14336-9, by Gabriel Alfonso Rincón-Mora, Published by John Wiley & Sons . No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.



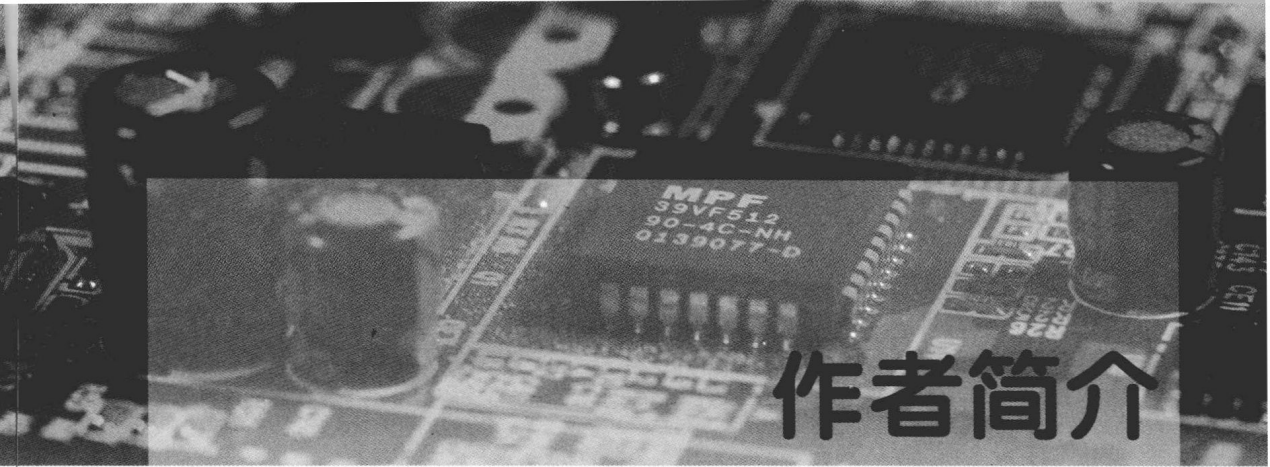
致谢

首先,我要感谢上帝,因为只有上帝的眷顾,我才有机会使这本著作面世,同样我也真诚感谢我的父母 Gladys Mora, Gilberto Rincón 和兄弟 Gilberto Alexei Rincón-Mora,他们的鼓励和支持是我创作激情的不竭来源。

另外,我要诚挚地感谢德州仪器(TI)公司多年来对我一如既往的支持。我还要特别感谢如下人员:佐治亚理工大学的 Philip Allen 教授和 J. Alvin Connelly 教授,TI 公司的 Nicolas Salamina,David Briggs 和 Ramanathan Ramani,在本书写作过程中他们不断给予我鼓励,并提出宝贵的建议。我也要感谢 Buddhika Abesingha 在封装对带隙基准源性能影响方面开展的研究和所做出的贡献。

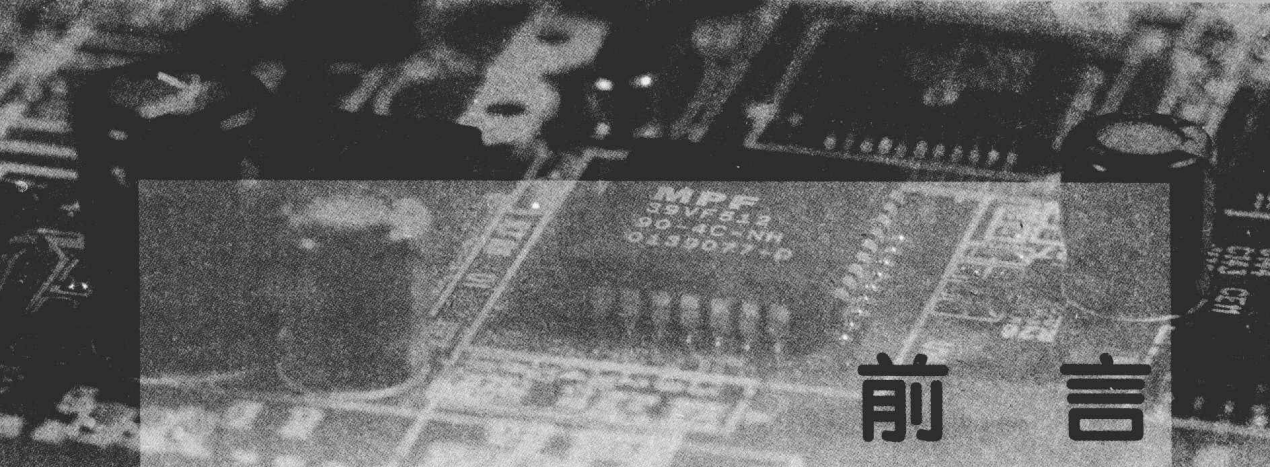
G.A.R.M

Dallas, Texas



作者简介

Gabriel Alfonso Rincón-Mora(B.S.,M.S.,Ph.D.)博士,1994 年加入业界领先的德州仪器公司(Texas Instruments,TI),1999 年被聘任为佐治亚理工学院(Georgia Tech)兼职教授,并且在 2001 年受聘为全职教授,其间仍在 TI 兼职,作为原来所属部门和 TI 公司的技术顾问。其学术成就包括 5 本著作、1 本书的部分章节(one book chapter)、26 个专利和超过 100 篇学术论文,而且他还成功设计了 26 款商用功率管理芯片,在全世界销售。他是 IEEE CASS 的杰出演讲人(Distinguished Lecturer),IEEE TCAS II 的副主编(Associate Editor)和 IEEE SSCS-CASS 分部的主席,并获得多项奖励。



前言

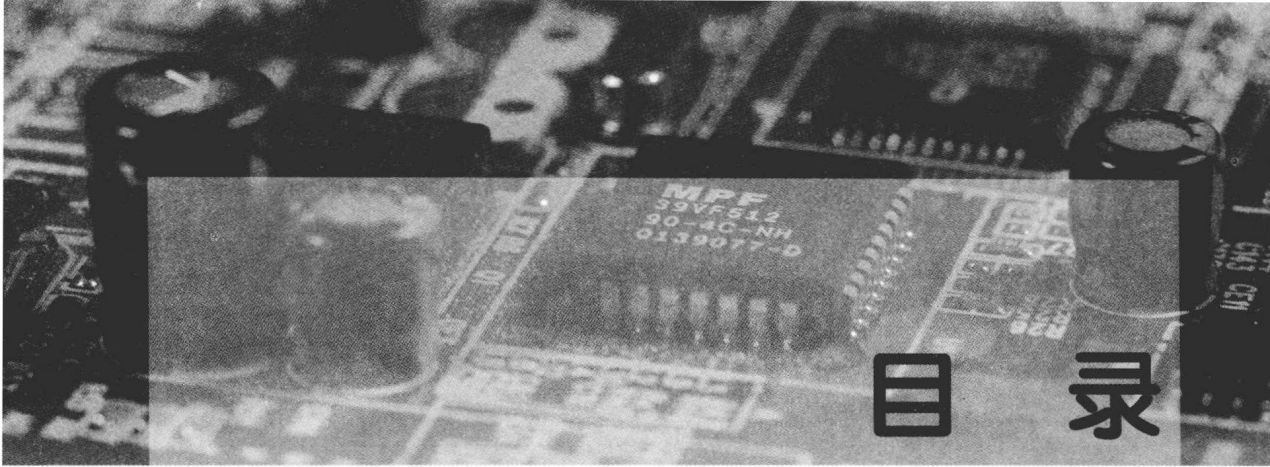
本书是集成电压基准源(Voltage Reference)设计的参考书籍和教程,其目的是阐述集成电压基准源大量设计实例背后蕴藏的理念以及更多的思考。本书可供电路设计领域的相关技术人员参考,对于刚入门的数字和模拟设计师以及经验丰富的工程师均具有重要的借鉴意义。

无论在何种系统中,电压基准源总是扮演着重要角色,因此它也是人们长期以来不断探索的重要课题。过去几十年里,电路集成度越来越高,以及混合信号应用的出现,要求所有电路设计师都必须深入了解电压基准源这一重要电路(例如,模块之间接口的要求和负载情况、输出阻抗、温度系数等参数设计都必须考虑)。因此,基于双极工艺、CMOS 工艺和 BiCMOS 工艺的设计以及相关领域的研究也随之展开。随着电池供电便携式应用的不断涌现,低电压和低功耗成为电子系统设计面临的重要挑战,同时也是电路设计的焦点问题。

本书的内容分为以下五个部分:基础知识、电流基准源、电压基准源、高精度基准源电路设计,以及系统和应用环境分析。第 1 章对基准源电路的基本原理和所用器件进行了定义和介绍;第 2 章介绍了电流基准源的设计,包括基本的 CMOS PTAT 电路和复杂的 BiCMOS 电流源产生电路;第 3 章说明了如何采用前两章所介绍的相关器件来设计电压基准源,包括从基本的零阶补偿电路到高阶补偿电路;第 4 章分析了设计实际高精度电路所需要考虑的因素,例如,工艺偏差、负载影响和应用环境的影响;第 5 章作为全书的结尾,考虑了实际应

用中需要处理的问题,例如,修调(Trim)、封装应力对性能的影响(Package-shift Effects)、版图考虑(Layout Considerations)和产品特性描述(Characterization)等,而这些都是市场上销售的集成基准源产品必须考虑的问题。

G.A.R.M
Dallas, Texas



目 录

绪 论	1
-----------	---

Chapter 1 基础知识

1.1 二极管	7
1.1.1 击穿区域	8
1.1.2 正向偏置区域	9
1.2 电流镜	10
1.2.1 简单电流镜	11
1.2.2 共源共栅电流镜	12
设计实例 1.1	13
1.2.3 调整型共源共栅电流镜	15
1.3 小 结	17
附录 二极管电压的温度特性	17
参考文献	20

Chapter 2 电流基准源

2.1 PTAT 电流基准源	24
2.1.1 双极工艺实现方式	24
2.1.2 CMOS 实现方式	26

2.2 启动电路和频率补偿	29
2.2.1 连续导通启动电路	29
2.2.2 与电路状态有关的启动电路	31
2.2.3 频率补偿	32
2.3 CTAT 电流基准源	33
2.4 与温度无关的电流基准源	34
2.5 PTAT ² 电流源产生电路	35
2.5.1 双极工艺实现方式	35
2.5.2 CMOS 工艺实现方式	36
设计实例 2.1	37
2.6 小 结	40
参考文献	41

Chapter 3 电压基准源

3.1 零阶基准源	45
3.1.1 正向偏置二极管基准源	45
3.1.2 齐纳电压基准源	45
设计实例 3.1	46
3.2 一阶基准源	48
3.2.1 正向偏置二极管基准源	48
3.2.2 齐纳基准源	50
设计实例 3.2	51
3.3 二阶电压基准源(曲率校正)	54
3.4 曲率校正技术当前的发展情况	57
3.4.1 与温度相关电阻比例技术	57
3.4.2 二极管环路技术	59
3.4.3 β 补偿技术	60
3.4.4 分段线性电流模技术	61
3.4.5 非线性匹配校正(Matched-Nonlinear Correction)	62
3.4.6 精确补偿方法	65

3.5 小 结	70
参考文献	71

Chapter 4 高精度基准源电路的设计

4.1 误差来源	75
4.1.1 定性的影响	75
设计实例 4.1	78
4.2 输出级	80
4.2.1 电压模式输出级	81
4.2.2 电流模式输出级	82
4.2.3 混合模式输出级	83
4.2.4 稳压基准源和未稳压基准源	83
设计实例 4.2	85
4.3 电源电压抑制和线性调整性能的设计	90
4.3.1 共源共栅技术	90
4.3.2 伪电源电压技术	92
设计实例 4.3	94
4.4 小 结	97
附录 1 典型一阶带隙基准源的误差来源	98
附录 2 电阻温度系数对电流模式输出级基准源的影响	103
参考文献	104

Chapter 5 系统和应用环境分析

5.1 修调网络的设计	106
5.1.1 修调范围	107
5.1.2 修调技术	110
设计实例 5.1	112
5.2 封装应力的影响	115
5.3 系统相关的问题	118

5.3.1 电路设计考虑 118

5.3.2 版图设计考虑 119

设计实例 5.2 120

5.4 特征描述 121

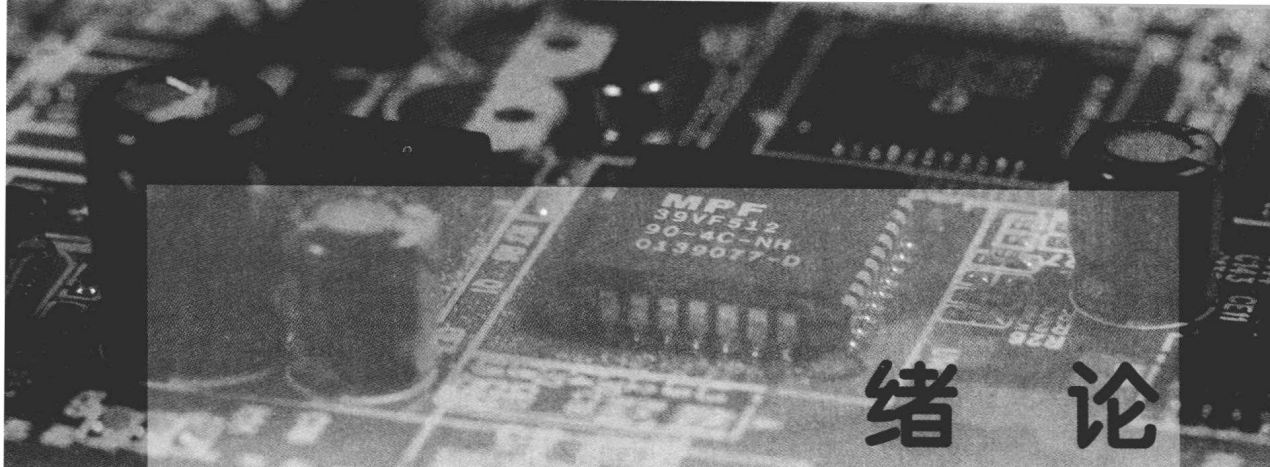
5.5 小 结 125

附录 1 带有混合模式(同时具有电压和电流模式)输出级的带隙
 基准源的修调流程 126

附录 2 封装应力对带隙基准源电路的影响 130

附录 3 基准源电路对输入阶跃信号的有限冲激响应所需时间
 的讨论 134

参考文献 135



绪论

一般说来,基准源是大多数电子系统的重要组成部分,虽然人们通常希望得到高精度基准源,但是在很多应用中并不要求过高的精度。通常情况下,基本的基准源就可以满足大多数系统应用的精度要求。虽然,不同电路的复杂程度肯定不同。但是,一个简单的基准源却不会随着工作环境的改变而出现显著的波动。因为这些基准源并不需要设计师投入额外的精力去提高初始精度,所以称其为零阶补偿基准源。但是,精密基准源可以通过抵消线性效应(一阶效应)和非线性效应(二阶和高阶效应)来提高设定电压的精度。由于设计中存在更加严格的约束,这些高阶补偿电路必须考虑电源电压和电路中寄生效应的影响。这些寄生效应包括电阻偏差、电阻失配、晶体管失配、漏电电流和封装的影响,在电路、版图和修调等每一个设计阶段都需要仔细考虑这些寄生效应对电路性能的不利影响。

针对精度要求不太高的应用,零阶或者一阶补偿电路通常是成本最低的解决方案。高阶补偿基准电路显然要比低阶补偿电路复杂得多,因此,也就需要更大的芯片面积、更大的静态电流,甚至可能需要更高的输入电压。虽然低阶补偿基准源能够满足许多应用的需求,但是在高性能系统中,曲率校准补偿电路的应用也越来越广泛。高性能基准源的需求日渐强烈有多种原因,例如,动态范围越来越低(由输入电压下降导致的),系统复杂度越来越高等。随着电池供电系统和更精密光刻技术的发展,电路需要在低电源电压条件下工作,而噪底(Noise Floor)却并不改变,从而导致有效动态范围降低。

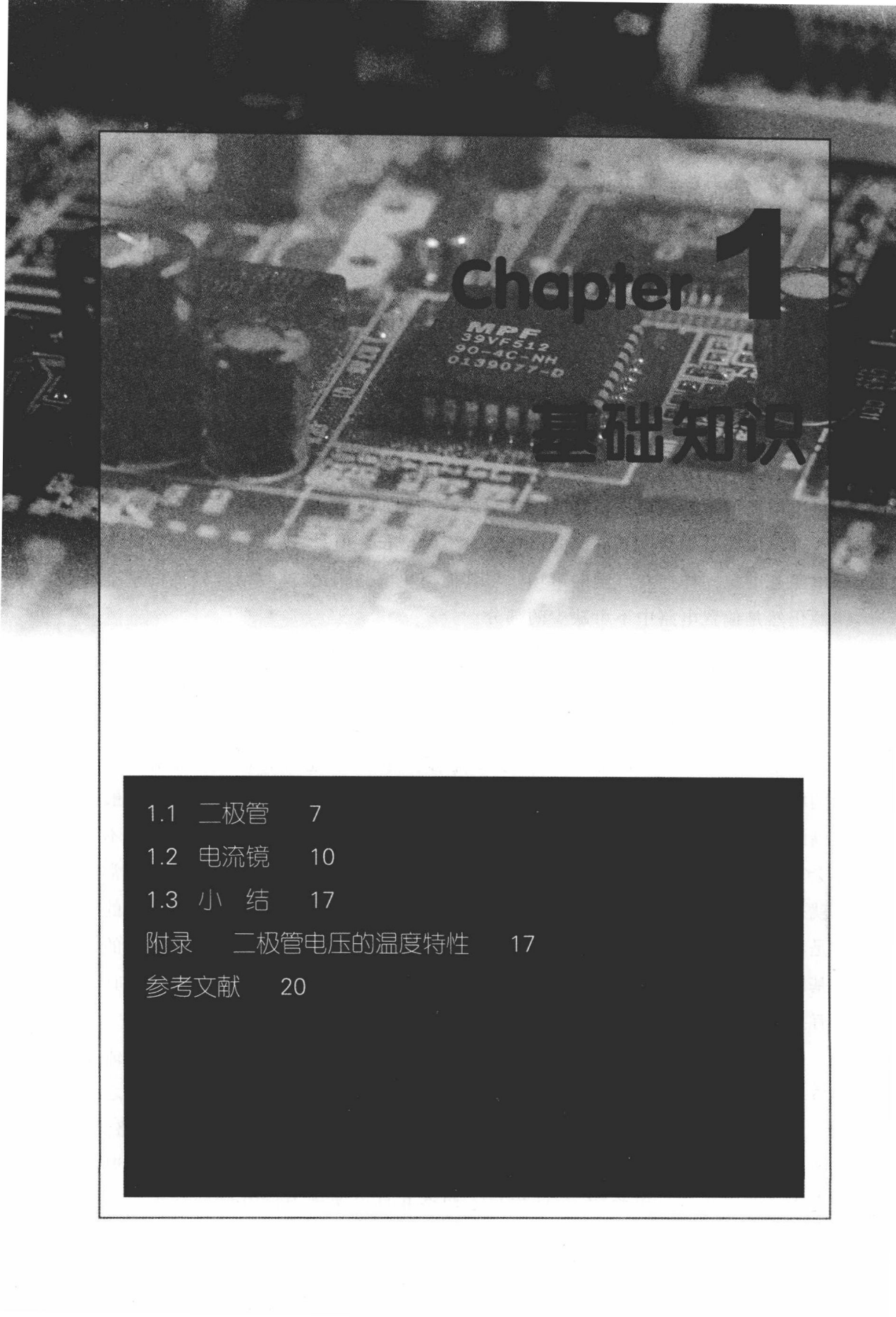
许多高精度基准源通过产生一个非线性项的方法来补偿某一电压的非线性温度特性,产生的非线性项的温度特性没有必要与自然存在的电压非线性特性完全一致。例如,基准电路的校正项与温度的平方成正比,而二极管电压的

非线性特性与温度呈现对数关系(即 $T \ln T$, 其中 T 表示温度)。当校正项的温度特性与所需电压的温度非线性特性良好匹配(例如,能够很好地匹配基准源的 $T \ln T$ 温度项)时,电路就能得到最佳的性能。另一种曲率补偿的方法是通过获得自然存在的电压本身的非线性温度特性来完全抵消其影响。后一种方法比前一种方法更有可能得到相对更好的性能。总体来说,这些曲率补偿分量的产生都需要深入理解特定工艺中可选用元器件的温度特性。

在基准源设计过程中,还需要考虑其他参数,它们与温度系数同等重要。例如,输出级决定了电路的输出阻抗,同时输出特性在一定程度上表征了电路受瞬态噪声(无论是随机的还是系统的)影响的程度,也表征了电路输出电流和吸入电流的能力。在设计过程中,必须通过优化电源抑制(PSR)和线性调整性能来减小电路对于输入电源电压稳态变化和系统噪声的敏感程度,共源共栅和伪预稳压(pseudo-preregulate)结构都可以有效满足这个要求。同时,设计也必须考虑到芯片与芯片、晶圆与晶圆,以及批次与批次之间的工艺偏差,因此,就需要仔细考虑修调网络设计的问题,从而减小这些工艺偏差的影响。设计师必须从系统上进行分析,确定模块电路之间接口对参考电压源的影响。例如,系统噪声可能会通过衬底、电源线和(或)其他电路模块注入电路,所以电路设计和版图设计就需要进一步优化。最后,对设计参数特征的描述必须谨慎,以确定并定义各种影响因素,当然也需要确定出哪些因素不会对电路造成影响。这一步对于深入理解基准源在系统中的应用至关重要。

大多数高精度基准源的温度系数都基于二极管(基极-发射极,即 BE 结)电压的温度系数。但是,本书所涉及的理念和设计方法扩展到了任何可以进行特征描述的自然存在的电压。设计一个与温度无关的基准源的重要之处在于调整和产生数个与温度有关的分量,将它们叠加后得到低温度系数(Temperature Coefficient, TC)的输出电压。该相加的结果可以通过电流和(或)电压信号的运算来实现。此外,电路设计还需降低带隙基准源对输入电源电压、输出负载变化和工艺波动等因素的敏感程度。在电路设计过程中将这些因素都考虑进去后,一款高精度、极具市场前景的商用基准源产品就完成了。

G.A.R.M
Dallas, Texas



Chapter 1

基础知识

1.1 二极管 7

1.2 电流镜 10

1.3 小 结 17

附录 二极管电压的温度特性 17

参考文献 20

从根本上说,模拟和数字电路都需要基准源,它可能是电压、电流或者时间基准信号。基准源为其他子电路提供稳定的工作点,使其得到可预测并且能重复的结果。基准源的输出信号不应随着电源电压、温度和瞬态负载的变化而有显著的波动。数模转换器、模数转换器、DC-DC 转换器、AC-DC 转换器、运算放大器和线性稳压器等子系统都离不开基准源,而这些子系统又是构成移动电话、传呼机、笔记本电脑以及其他流行电子设备的基础。

虽然基准源在讨论中经常被忽略,但是在集成电路设计中它确实起着至关重要的作用。实际上,随着各种应用情况对基准源整体性能要求的提高,对基准源精度的要求比以往要严格得多。将来,随着更复杂和紧凑系统的出现,高性能需求的趋势将会一直持续下去。高性能需求的一部分决定性因素是电池供电电路的不断涌现,这样的电路都要求高精度、低电流和低电压工作。另外一部分原因是高精度基准源的市场需求不断增长。但是,不可否认精度较低的电压基准源同样拥有广阔的市场。与其他模块电路相比,这些精度较低的基准源仍然是偏置电路中不可缺少的部分。

系统中其他电路模块对基准源的负载效应是基准源设计的主要约束。例如,随时间变化的电流源负载就要求基准源能够对负载快速瞬态变化作出迅速响应。事实上,根据瞬态变化的快慢,基准源也可能需要一个负载电容来防止基准电压下降过大。因此,电路不仅要能够快速响应,还要能够驱动相对较大的电容负载。这些特性都要求电路在瞬态变化时能够稳定工作,并且具有足够高的环路带宽响应。对基准源电路来说,需要承受的负载电流瞬态变化通常不会很大(即小于 $100\mu\text{A}$ 峰-峰值的电流变化)。如果负载要求超过 $100\mu\text{A}$,通常就采用电压稳压器,即可以使输出电压不随负载条件的变化而变化,最重要的是不随负载电流的变化而变化。电压稳压器本质上来说就是带有缓冲能力的基准源,换句话说,其可以等效为电压基准源级联一个单位增益放大器,使其具有提供更大驱动电流的能力。

设计一个电压基准源需要考虑多方面的因素,而这些因素主要是由整体系统的需求决定的。温度漂移(Temperature-drift)是最基本的性能指标之一。当然对于强调精度的基准源电路来说,通常采用温度补偿基准源电路。这一类基准源通用的设计方法是将已被良好表征(Well-characterized)的与温度相关的电压或者电流相加,产生易于调整并且可实现温度补偿的结果。例

如,将一个随着温度升高而增加(具有正温度系数)的电压与另一个随温度升高而降低(具有负温度系数)的电压相加,就可以产生一个与温度无关的电压。当然,两个信号相加的比例需要达到平衡,以使得得到的电压能够在要求的工作温度范围内,例如 $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$ (商用产品的温度范围)变化很小。最后,对于高精度基准源电路来说,可以利用与温度呈抛物线关系的分量(如二次温度)近似抵消二极管电压温度特性的二阶效应。设计流程的第一步就是找到已被良好表征并且几乎不随工艺波动而改变的电压和(或)电流量。典型情况下,PN结二极管电压便可实现这一目的。因为二极管电压不仅具有很好的预测性,其偏差仅为 $\pm 2\%\sim \pm 5\%$,而且针对其温度特性已进行了深入的研究,能够被良好表征。虽然从理论分析上来看,金属氧化物半导体(MOS)器件的阈值电压也可以用作基准源设计的基本物理量,但是因为其初始精度不如PN结二极管,典型偏差在 $\pm 15\%\sim \pm 20\%$,所以在高精度应用方面不具有优势。

一般说来,集成电路的制造工艺有标准双极工艺和标准互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺,以及最新的绝缘体上硅(SOI)和BiCMOS工艺。因此,基准源可以针对不同工艺来选择不同的电路结构。随着应用要求的精度越来越高,电路结构也因为要实现一阶、二阶甚至三阶寄生效应的补偿而变得越来越复杂。同样的道理,需满足低静态电流和(或)低电压工作条件的基准源也比没有这些苛刻要求的基准源要复杂得多。当然,无论电路的复杂程度如何,所有的基准源电路都遵循相同的基本原理,均采用相同的基本器件来实现。事实上,大多数半导体工艺都支持PN结二极管,这也是大多数高精度基准源的基本组成器件。虽然基于不同工艺设计的基准源,可能在设计技术上会稍有差异,但是在设计理念上都是相同的。例如,采用双极工艺设计和制造的基准源,可以采用NPN晶体管的发射结(BE结)二极管作为基准源的基本器件,而CMOS工艺中可以利用P型MOS晶体管的源极和衬底之间的二极管来实现,这些都是PN结二极管。至此,即使某些工艺可以支持比二极管电压更加稳定的电压或者电流分量,基准源的设计方法和技术在本质上也都是一样的,只是电路模块稍有差异而已。

基准源的性能是通过其输出信号变化量和保证正常工作所需的条件来衡量的。基准源的技术指标包括线性调整性能、温度漂移特性、静态电流、输入电