



科学出版社

集成电路设计

# LDO 模拟集成电路设计

〔美〕 Gabriel Alfonso Rincón-Mora 著

谭 旻 黄晓宗 冯 林 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2010-3986 号

## 内 容 简 介

本书是低压差稳压器(LDO)设计的经典著作,是作者在工业界作为模拟集成电路工程师、在学校作为教授和研究员多方面经验的总结。全书共分8章,详细介绍了稳压器系统级的考虑、微电子器件基础、模拟电路基本模块、负反馈理论、电路设计和保护电路设计等多方面内容,以直观的方式,充分考虑了整体系统目标、集成电路开发流程和电路的可靠性,而且各章节独立性较强,可以满足不同读者的需求。

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技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

LDO 模拟集成电路设计/(美)Gabriel Alfonso Rincón-Mora 著;谭旻,黄晓宗,冯林译. —北京:科学出版社,2011

(集成电路设计)

ISBN 978-7-03-032643-0

I. L… II. ①G…②谭…③黄…④冯… III. 模拟集成电路-电路设计  
IV. TN431.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 225783 号

责任编辑:沈晓晶 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:王 飞

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>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 1—4 000 字数: 365 000

**定 价: 42.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

**Gabriel Alfonso Rincón-Mora**

**Analog IC Design with Low-Dropout Regulators**

**0-07-160893-1**

Copyright © 2009 by McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Science Press Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Science Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译片由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和科学出版社有限责任公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权© 2011 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与科学出版社有限责任公司所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2010-3986

## 著 者 简 介

Gabriel Alfonso Rincón-Mora(B. S. ,M. S. ,Ph. D. )博士,1994~2003 年供职于德州仪器公司(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。其学术成就包括 5 本著作、一本书的部分章节、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。他是 IEEE CASS 的杰出讲师(Distinguished Lecturer)、IEEE TCAS II 的副主编和 IEEE SSCS-CASS 部分的主席,并获得多项奖励。

# 前言

本书介绍、讨论并分析了如何设计、仿真、构建和测试线性低压差(LDO)稳压器集成电路(IC)。LDO 稳压器集成电路在如今市场上占据了重要角色,并且随着片上系统(SOC)集成需求的不断增大,出现了多种应用,在驱动已有市场的同时,开创出更多新市场,这些因素促成了写作本书的动力。事实上,由于噪声的普遍性,输入信号的未知性,以及负载要求负载点(PoL)稳压器仅需要极少的电流就可产生精确并且快速响应的电源电压,因此,现在不包含功率调整特性的传统混合信号芯片必须将系统和 PoL 功率源整合在一起。在稳压器选择方面,由于开关稳压器的输出包含大量噪声,这是不可接受的,因此,线性稳压器在混合信号芯片中占据了重要地位。

因为线性稳压器电路和运算放大器(OPAMP)一样,本质上都是模拟的,所以作为线性稳压器的教学材料,必须包含模拟集成电路基础理论和设计方法,因此,与业界流行书籍的写作方式类似,本书将以介绍线性稳压器为基础,同时回顾模拟集成电路的基本理论。但是,与其他书籍不同的是,本书将从模拟集成电路直观、以设计为目的的角度来设计集成电路,我认为这非常有用,并且很有必要。该理念是在物理层上充分理解器件、电路和系统的特性,不借助公式或者书籍,分析其各自特性以及组合特性,当然由此产生的结论也可以通过公式或者现有书籍中的基础理论得到验证。正因为如此,本书内容包含固态半导体理论、电路设计、模拟电路基本模块分析和反馈理论,并且解释如何将这些基础知识应用于模拟系统,即线性稳压器的交流和芯片设计。换句话说,本书包含了模拟集成电路设计的大部分综合知识。

本书从线性稳压器的角度,借助大量的实例,向初级微电子工程师介绍整个模拟集成电路设计流程,并引导其熟练应用。尽管如此,本书也可以为几乎没有稳压器领域设计经验的工程师起到启蒙引导作用。同时,本书也适合于那些希望不仅能从更直观的但仍然是学术的角度来回顾模拟电路和稳压器理论,而且能深入理解和探知目前线性稳压器的技术发展水平的有经验的稳压器集成电路设计工程师。

本书所展示出来的风格、形式和思考方式是我在工业界作为模拟集成电路工程师、在学校作为教授和研究员多方面经验的总结。例如,从工业界的角度,我发

现了设计的艺术和产品开发的价值,因此,本书强调直观的方式、整体系统目标、集成电路开发流程和电路的可靠性。作为一名教授和研究员,我坚持学习最新的研究成果,理解技术深度的价值,并尝试跳出惯性思维的束缚。读者从本书可以看到,我试图寻找对于模拟集成电路设计和稳压器设计来说,实际可行同时也具有学术价值的方法。但是,必须承认,我仍然有许多东西要去学习,因此,我希望我对本书和该领域的付出最终能够赢得读者的充分支持,并希望读者对书中可能出现的不足、矛盾和不准确描述给予理解。

在本书内容的组织方面,我将其分为 8 章。第 1 章,类似于产品定义阶段(但是以更偏向学术的方式),即当半导体公司通过定义改进系统的作用和工作目标,正确评估设计的难度。但是,在承担某项设计之前,初级工程师必须在模拟集成电路设计领域得到适当的培训,这也就是第 2~4 章讨论的内容,即分别为固态理论和器件、基本电路模块和反馈理论。第 5 章重点分析交流系统设计,以及相应的原型开发,在这个阶段,设计师使用到前两章中讨论的电路和反馈理论。第 6~7 章结合第 2 章的器件知识和之后学习的章节设计真正的芯片,首先是器件级别设计(即第 6 章),然后进入系统级设计(即第 7 章)。从设计者的角度来看,因为所有的模拟电路设计培训以及芯片设计都会重点关注这部分,所以这两章也就是开发流程的重点。最后,第 8 章分析了电路保护,讨论了电路保护的特性,也就是产品开发周期中的最后两个步骤。作为总结,本书是自顶向下再到顶设计方式的一个范例,因为全书刚开始从抽象角度分析系统,然后进入器件级进行基础分析,逐渐上升到电路设计,最后又进入系统设计,最终的设计却是处于晶体管级。

初级工程师可以按照顺序学习本书共 8 章的内容,回顾整体设计流程,充分学习模拟集成电路设计。也可以加强对特定模拟设计原则的理解,第 2~4 章重点分析器件、电路和反馈,第 5 章重点分析交流设计和稳定性。如果几乎未涉足稳压器设计领域但有一定经验的模拟电路设计师希望专门学习一下稳压器设计,那么可以通过学习第 1 章获得系统知识,通过第 5~8 章学习稳压器的特定知识。另外,资深稳压器设计师可以通过第 1 章和第 5~8 章加深对现有技术的理解。基于这样的考虑,我尽量使每一章都独立,将自己认为相关联的内容安排在一起,并且针对特定内容划分小节、合理命名,因此,希望本书的内容可以很容易地分为独立的章、节和小节,便于读者阅读。

Gabriel Alfonso Rincón-Mora, Ph. D.

# 目 录

## 第 1 章 系统分析

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1.1 电源管理中的稳压器 .....      | 1  |
| 1.2 线性稳压器和开关稳压器的对比 ..... | 2  |
| 1.3 市场需求 .....           | 5  |
| 1.4 电 池 .....            | 7  |
| 1.5 电路工作 .....           | 11 |
| 1.6 性能指标 .....           | 19 |
| 1.7 仿 真 .....            | 30 |
| 1.8 总 结 .....            | 31 |

## 第 2 章 微电子器件

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.1 无源器件 .....             | 33 |
| 2.2 PN 结二极管 .....          | 37 |
| 2.3 双极型晶体管 .....           | 43 |
| 2.4 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 ..... | 49 |
| 2.5 结型场效应晶体管 .....         | 57 |
| 2.6 总 结 .....              | 60 |

## 第 3 章 模拟电路基本模块

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 3.1 单晶体管放大器 ..... | 63  |
| 3.2 差分对 .....     | 84  |
| 3.3 电流镜 .....     | 91  |
| 3.4 五管差分放大器 ..... | 101 |
| 3.5 总 结 .....     | 106 |

## 第 4 章 负反馈

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 4.1 基本知识 .....     | 109 |
| 4.2 叠加器 .....      | 112 |
| 4.3 采样器(感应器) ..... | 122 |
| 4.4 负反馈理论的应用 ..... | 129 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 4.5 稳定性 .....          | 131 |
| 4.6 频率补偿 .....         | 132 |
| 4.7 总 结 .....          | 141 |
| <b>第 5 章 交流设计</b>      |     |
| 5.1 频率补偿 .....         | 144 |
| 5.2 电源抑制比 .....        | 152 |
| 5.3 内部和外部补偿的对比 .....   | 169 |
| 5.4 总 结 .....          | 170 |
| <b>第 6 章 集成电路设计</b>    |     |
| 6.1 串联功率开关器件 .....     | 174 |
| 6.2 缓冲器 .....          | 185 |
| 6.3 误差放大器 .....        | 201 |
| 6.4 总 结 .....          | 218 |
| <b>第 7 章 系统设计</b>      |     |
| 7.1 外部补偿 .....         | 221 |
| 7.2 内部补偿 .....         | 225 |
| 7.3 自参考 .....          | 234 |
| 7.4 电流调整 .....         | 242 |
| 7.5 低电流和低压差改进 .....    | 247 |
| 7.6 总 结 .....          | 260 |
| <b>第 8 章 集成电路保护和特性</b> |     |
| 8.1 电路保护 .....         | 263 |
| 8.2 特 性 .....          | 270 |
| 8.3 总 结 .....          | 281 |



# 第 1 章

## 系统分析

### 1.1 电源管理中的稳压器

供电和电源调整是电子系统最基本的功能。没有稳定的供电,任何带负载的应用都不可能正常地工作,不管是手机、寻呼机或者是无线传感节点。原因是变压器、发电机、电池和其他离线的电源所提供的电流和电压在不同时间和不同工作条件下都会发生改变。本质上它们都会产生噪声和抖动,另外,高功率的开关电路更加促使了噪声和抖动的产生,如 CPU 和 DSP。快速改变的负载使得原本没有噪声的电源出现了瞬态偏移,最终的结果会导致原本应是直流的成分出现了不必要的电压下降和频率杂散。稳压器的功能就是把这些不可预测的、有噪声的电压转变成持续不变的、精确的、与负载无关的电压,把这些有害的波动降到更低、使人更加能够接受的程度。

对于集成度更高、更复杂的高性能系统,调整功能的应用就显得尤为重要。举例来说,SoC 通常把许多功能集成到一起,其中的许多功能与时钟具有同时性,这就会在很短的时间内需要电源能够提供很高的功耗和很短的响应时间。电源不能够对负载电流变化(如快速负载突变)做出快速响应会迫使储能电容为负载提供全部供电,从而使电源出现显著的瞬态波动。稳压器的带宽性能,也就是做出迅速反应的能力,决定了瞬态变化的大小和程度。

稳压器通过防止电压超过节点击穿电压,达到保护集成电路(IC)的作用。在当前技术水平下,击穿电压可能小于 2V,所以这样的保护要求就显得尤为苛刻。包括系统级芯片(SoC)、系统级封装(SiP 和 SoP)等小体积、单芯片解决方案需求的持续增长,驱动着工艺向更小的光刻尺寸和金属间距发展。但不幸的是,元件密度的增加使得隔离间距减小,集成电路的击穿电压随着尺寸的缩小而降低。

基准,如同稳压器一样,产生和维持一个精确稳定的不随输入电压、负载环境以及工作条件变化的输出电压。与稳压器不同的是,基准无需提供大量的直流电流。虽然一个好的基准能够屏蔽正负噪声电流的影响,但是它驱动负载的能力仍然十分有限。实际中,基准只能够提供最大 1mA 的电流,而稳压器能够提供从 5mA 到数安的电流。

## 1.2 线性稳压器和开关稳压器的对比

一个稳压器通常是一个带有缓冲的基准:偏置电压和一个可以驱动大负载的运算放大器以并联反馈的方式级联。根据可接负载电流的不同大小,稳压器基本可以分为线性和开关型两大类。如图 1.1(a)所示,线性稳压器也被称为串联稳压器,通过线性地调整连接于输入和输出之间的串联开关器件,从而使得输出电压为参考电压的某个预置的比例值。“串联”就是指连接于未经稳压的输入电源和负载之间的开关器件。由于电流和它的控制变量在时间上是连续的,因此这个电路在本质上是线性的、模拟的。因为它只能通过控制串行的开关元件来提供电源,所以输出电压不能够超过未经稳压的输入电压(也就是  $V_{OUT} < V_{IN}$ )。

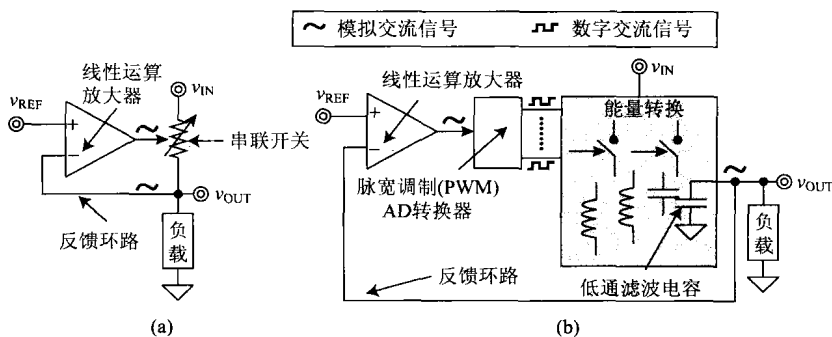


图 1.1 (a)基本线性稳压器电路;(b)基本开关稳压器电路

**注意:**为了补充和扩展本书中的解释,我们对于变量名使用标准的小信号和稳态命名规则。同时具有小信号和直流成分的信号使用小写字母和大写下标。例如,输出电压  $v_{OUT}$ ,当只表示直流成分时全部使用大写,如  $V_{OUT}$ ;类似地,当只表示小信号时,整个命名包括下标都是小写,如  $v_{out}$ 。如前面的例子所示,变量采用比较直观的名称。第一个字母通常描述了信号类型,如  $v$  代表电压, $i$  代表电流, $A$  或者  $G$  代表放大增益, $p$  代表功率等。下标通常表示变量所描述的功能或者节点,如  $out$  通常指稳压器输出, $reg$  则为被稳压的参数等。

与线性解决方案相对应的是开关稳压器。由于它的开关特性,它的输入和输出既可以是交流也可以是直流,这就是为什么它能够支持交流-交流(AC-AC)、交流-直流(AC-DC)、直流-交流(DC-AC)以及直流-直流(DC-DC)转换功能的原因。在集成电路的应用中,DC-DC 转换占据主导地位,因为集成电路的电源通常来自于直流电池以及离线的 AC-DC 转换器,而大多数的集成电路内部和外部的负载应用都需要直流电源。虽然能够进行 AC-DC 转换,开关稳压器也被称为开关转换器,即使它仅仅执行 DC-DC 转换的功能。

从电路的角度看,线性稳压器和开关稳压器的一个很大的不同在于后者的反馈环路既包括模拟模块也包括数字模块[图 1.1(b)]。开关稳压器的基本工作原理是电源对电容和电阻充电及它们对负载放电交替进行,从而通过准无损耗器件

进行能量传输。为了控制这个网络,电路通过反馈的方式把模拟误差信号转化成脉宽调制数字脉冲序列,而这些脉宽调制信号的开关状态则决定了开关的连接状态。从信号处理的角度看,开关网络则使得输入电压摆幅范围的数字脉冲通过低通滤波器转换成纹波仅为几个毫伏的模拟信号,而这个模拟信号的均值即为稳压后的输出。

DC-DC 转换器通常包括一个脉宽调制控制器、电容以及同步和(或)异步的开关[也就是三极管和(或)二极管],大多数情况下还包括一个电感,如图 1.1(b)所示。脉宽调制控制器由一个模拟的线性放大器和一个脉宽调制的模拟-数字转换器组成。很多由开关电容实现的转换器不需要功率电感,从而使得全芯片集成的实现方式在某些情况下成为可能。然而这些集成的、无电感的转换器不能够像离散功率电感一样提供大电流,这就是它们通常只能在低功耗领域满足较小市场的原因。

与线性稳压器不同,开关稳压器能够提供较宽的输出电压范围,既可以低于输入电压,也能够高于输入电压。降压转换器的输出电压要低于输入电压而升压转换器则相反,电荷泵则通常用来指代不含电感的降压或升压转换器。顾名思义,升降压转换器是升压电路和降压电路的组合,它能够把输出电压调整到高于输入或者低于输入。虽然开关转换器有众多的灵活性和优点,但是线性稳压器在消费电子和高性能电子领域仍然十分流行,我们会在下面的章节里进行阐述。

### 1.2.1 速度的折中

线性稳压器通常比开关稳压器简单而且速度要快。如图 1.1 所示,线性稳压器的元件较少,这意味着线性稳压器更简单而且环路延时更短,换句话说就是线性稳压器具有更高的带宽,从而具有更快的速度。脉宽调制控制器,更具体而言是脉宽调制模拟到数字转换器,设计起来比较复杂,通常需要时钟、比较器、非交叠数字驱动器以及锯齿三角波产生器。对于一个稳定工作在负反馈状态下的开关转换器,开关频率往往要比环路带宽高出十倍以上,并把响应时间进一步限制在给定工艺交叉频率的几个数量级以下。由于这个原因以及其相对较高的复杂性(也就是更多的环路延时),DC-DC 转换器比线性稳压器需要更多的响应时间。DC-DC 转换器的响应时间为  $2\sim 8\mu\text{s}$ ,而线性稳压器则可以低至  $0.25\sim 1\mu\text{s}$ 。这些器件的开关频率为  $20\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$ 。虽然更高的频率能够减小输出电压里面的纹波成分或者说降低 LC 滤波器的要求,但是由此产生的开关功率损耗则是不可接受的。更多的功率损耗需要电池提供更多的能量,从而降低其使用寿命。

### 1.2.2 噪声

图 1.1 所示在开关稳压器交流反馈回路里面存在数字信号,表明开关稳压器比线性稳压器具有更大的噪声。功率开关是可以通过大电流的大器件,它们必须工作在较高的频率,从而要求它们的驱动信号速度很快,另外也会向提供负载电压的储能器件注入噪声。噪声在升压模式下更加普遍,这种情况下存在射频噪声将

会更加糟糕。时钟的开关操作使得噪声成分里有更多的低频和高频谐波。

### 1.2.3 效 率

与线性稳压器相比,开关稳压器有一个独有的优势——高转换效率。这是因为开关稳压器中功率管的压降要远低于线性稳压器中功率管的压降。在开关稳压器中,功率管的压降通常为  $10\sim 100\text{mV}$ ;而在线性稳压器中,功率管的压降为输入和输出之间的电压差,通常为  $0.3\sim 2\text{V}$ 。转换效率为输出功率  $P_{\text{OUT}}$  和总功率  $P_{\text{IN}}$  的比值;总功率包括输出功率  $P_{\text{OUT}}$  和稳压器自身的功率损耗  $P_{\text{REG}}$ 。稳压器本身的功耗越大,转换效率就越差。

$$\eta = \frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{IN}}} = \frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{REG}} + P_{\text{OUT}}} \quad (1.1)$$

开关稳压器的转换效率一般为  $80\%\sim 95\%$ 。而线性稳压器自身的静态电流以及稳压前的输入电压( $V_{\text{IN}}$ )和稳压后的输出电压( $V_{\text{OUT}}$ )压差通常使得其转换效率限制在较低水平。

$$\eta_{\text{Lin+Reg}} = \frac{I_{\text{LOAD}} V_{\text{OUT}}}{(I_{\text{LOAD}} + I_{\text{Q}}) V_{\text{IN}}} < \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} \quad (1.2)$$

式中,  $I_{\text{LOAD}}$  为负载电流;  $I_{\text{Q}}$  为静态电流,直接流入接地点而不流经负载。在忽略静态电流的条件下,线性稳压器可达到的最大可能功率为输出电压与输入电压之间的比值。例如,一个输入电压为  $5\text{V}$ 、输出电压为  $2.5\text{V}$  的线性稳压器的最大可能功耗仅为  $50\%$ 。

输入电压和输出电压之间的电压差越低,则线性稳压器的转换效率越高。例如,对于上述的线性稳压器,如果输入电压为  $3.3\text{V}$ ,其转换效率为  $76\%$ ,则当输入电压降至  $2.8\text{V}$  时,此线性稳压器的转换效率则可以达到  $89\%$ 。这个特性仅在负载电流远大于静态电流时成立,当稳压器全负载工作时,这个假设一般成立。而当负载处于待机或者睡眠状态时,则上述假设不一定成立。因此当输入和输出电压差比较低(即  $V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} < 0.3\text{V}$ )时,我们更加倾向于使用线性稳压器,因为此时线性稳压器不仅效率高,而且设计简单、成本低、噪声小、速度快。线性稳压器唯一的、也是最明显的缺点就是它的转换效率。如果转换效率不是一个重要的考虑因素或者对转换效率的要求与开关稳压器相当的话,线性稳压器将是最好的选择。

如果负载电流超过一定程度,我们就需要使用散热孔。然而增加散热孔的代价是昂贵的,一方面增加了一个额外的器件,另一方面则需要更大的印制电路板(PCB)面积。我们可以在PCB上使用多个线性稳压器来对负载进行分流,从而减小单个稳压器的功率损耗。如果指标允许,也就是说如果负载可以容忍更多噪声,也可以用开关稳压器来代替线性稳压器。上述两种方法都是避免使用散热孔的常用方法。高温的另外一个副作用是会增大MOS导通电阻,从而增加导通损耗,降低转换效率。总之,如表1.1所示,线性稳压器结构简单、速度快、噪声小,但是它的转换效率相对较低,使得它不适合用于设计低功耗系统和专用电源系统。开关稳压器效率更高,然而它却需要负载能够容忍较高的噪声强度。这也是高性能模

拟子系统通常采用线性稳压器供电的原因。

表 1.1 线性稳压器和开关稳压器比较

| 线性稳压器                             | 开关稳压器                                                     |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 输出范围受限( $V_{OUT} < V_{IN}$ )      | ✓ 输出范围灵活( $V_{OUT} \leq V_{IN}$ 或 $V_{OUT} \geq V_{IN}$ ) |
| ✓ 电路简单                            | 电路复杂                                                      |
| ✓ 噪声低                             | 噪声高                                                       |
| ✓ 响应快速                            | 响应较慢                                                      |
| 转换效率受限( $\eta < V_{OUT}/V_{IN}$ ) | ✓ 转换效率高( $\eta \approx 80\% \sim 95\%$ )                  |
| 适用于低功耗应用                          | 适用于高功耗应用                                                  |

注：“✓”表示相对优势。

1.3 市场需求

1.3.1 系 统

线性稳压器和开关稳压器在今天的市场中都有它们各自的地位。台式机和笔记本电脑处理器等系统不仅需要与时钟同步的大电流,而且要求低输入电压。这些系统能够充分利用 DC-DC 转换器转换效率高的特点。只具有模拟功能的电路模块不能够承受开关稳压器的噪声,但能够充分利用线性稳压器低噪声、低成本的优势。模拟电路天生比数字模块对电源噪声敏感,这就是它们需要“干净”电源供电的原因。

如今,我们对手机、PDA、MP3、笔记本电脑等便携式电子器件的需求持续增长,精度和转换效率两者都至关重要,这就需要同时使用线性稳压器和开关稳压器。在这些应用中,集成功率管理电路把含有噪声且不断变化的输入电压进行转换,然后驱动对噪声敏感的电 路。在这些条件下,如图 1.2 所示,一个 DC-DC 转换器对输入电压进行降压,产生一个稳定却含有噪声的电压  $v_{NOISY}$ 。线性稳压器则把 DC-DC 转换器的输出电压转换成与高性能、噪声敏感的集成电路兼容的低噪声、无纹波的输出(即  $v_{CLEAN}$ )。这样线性稳压器的输入电压足够低(即如图 1.2 所示的

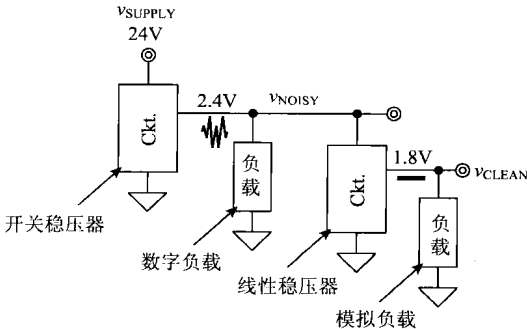


图 1.2 低噪功率管理系统实例

1.8~2.4V),从而降低了功率损耗。开关稳压器的目的就是把输入电压降到足够低,从而降低系统损耗,因为此时线性稳压器的转换效率更高。而线性稳压器的功能则是对噪声进行滤波,产生一个系统所需要的无噪声电压。

类似的工作条件在其他混合信号应用中经常出现,在这些应用中必须对有源供电进行去耦,从而减小和抑制噪声。某些系统,如使用单节或者双节电池的系统,需要比输入电压更高的电压,此时我们就需要使用升压型 DC-DC 转换器。此时我们可能仍然需要用线性稳压器来降低由开关稳压器产生的噪声,与图 1.2 的情况类似。

### 1.3.2 集成

移动通信市场对于稳压器需求的影响非常大。由于电池电压变化范围大,几乎所有电池供电的应用都需要使用稳压器。更加重要的是,大多数设计需要在系统芯片内部加稳压器和其他供电电路从而节省 PCB 面积和改进性能。这种趋势在产品的应用中变得越来越普遍,特别是通常使用 SoC 及 SiP 和 SoP 的形式来达到集成的极限。有限的能量和功率密度是这个市场的副产品,这就要求电路达到较高的功率效率,同时也要求低静态电流,从而在电池的寿命时间内能够达到较好的性能。

### 1.3.3 工作寿命

在重负载情况下,电池的使用寿命最终取决于负载电流;在空载和轻负载情况下电池的使用寿命则取决于稳压器的静态电流。电流效率,也就是静态电流与负载电流的比例,也十分关键。特别地,静态电流在零负载和轻负载时必须越小越好,因为此时它占整个电流的比例比较大。而在重负载时,更高的静态电流则是可以接受的,因为它对于整个电流和电池寿命的影响比较小,这也是为什么是电流效率而不是绝对静态电流的大小是如此重要的原因:

$$\eta = \frac{I_{\text{LOAD}}}{I_{\text{TOTAL}}} = \frac{I_{\text{LOAD}}}{I_{\text{LOAD}} + I_{\text{Q}}} \quad (1.3)$$

最终,在重负载时,负载完全决定了电池寿命;而在零负载和轻负载时,电池寿命则由静态电流决定。

电池容量(定义为安培与小时的乘积, A · h)和平均漏电流决定了电子系统中电池寿命(h):

$$\text{电池寿命} = \frac{\text{电池容量}}{I_{\text{DRAIN(ave)}}} = \frac{\text{电池容量}}{I_{\text{Q(ave)}} + I_{\text{LOAD(ave)}}} \quad (1.4)$$

再加上便携式设备在大多数时间里都是闲置的这一事实,这个公式就表明电池寿命和低负载时的电流(也就是  $I_{\text{Q(ave)}}$ )密切相关。手机通常是闲置的(即处于待机模式而非通话模式),因此在大多数时间里仅仅需要消耗它峰值功率的很小一部分,就如图 1.3 所描述的概率密度函数(PDF)一样,概率最高的区域是零电流到中等负载范围时的情况,此时的漏电流大部分为静态电流  $I_{\text{Q}}$ 。

$$I_{\text{DRAIN(ave)}} = \int (I_{\text{LOAD}} + I_{\text{Q}}) \cdot \text{PDF} \cdot dI_{\text{LOAD}} \approx I_{\text{Q}} \quad (1.5)$$

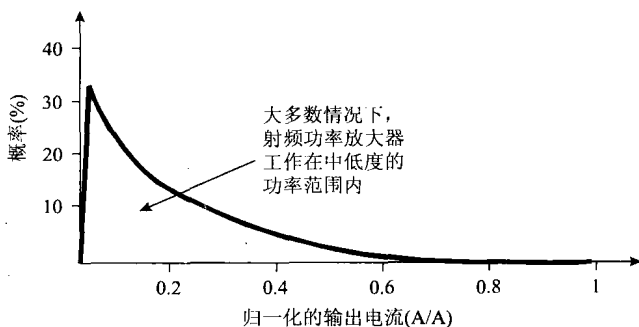


图 1.3 便携式 CDMA 手持设备中射频功率放大器的概率密度函数

### 1.3.4 电压净空

电池电源以及目前的工艺技术都意味着使用低电压工作模式。当前最流行的可再充电电池技术主要是锂离子电池、镍镉电池及镍金属氢电池。完全放电后,锂离子电池电压为 2.7V,完全充电后则为 4.2V。镍镉电池和镍金属氢电池的电压范围则为 0.9~1.7V。微燃料电池的电压则更低,为 0.4~0.7V。这些电池提供的电压比较低,而且具变化而非恒定的特性,会影响电压净空和动态范围,从而对稳压器提出了很高的要求。

低压工作模式也是当前工艺水平发展的结果。更高的器件密度促使我们提高光刻分辨率,制造出击穿电压更低的纳米量级的半导体结。举个例子,一个典型的  $0.18\mu\text{m}$  的 CMOS 工艺所能够承受的电压不能够超过 1.8V。另外,出于经济上的考虑,我们需要尽可能降低工艺的复杂性,也就是减少掩膜的数量,这同时也会减少器件的数量。通常标准 CMOS 以及标准 BiCMOS 工艺(不增加额外类型器件)是需求最大的,但是这同时也减少了设计的灵活性。

低电压环境会对模拟集成电路的设计构成限制。很多的传统设计方式在低电压环境下不再可行,从而限制了设计的灵活性,有些时候也限制了系统性能。级联式设备,如发射极和源极跟随器、达林顿双极晶体管,对提高增益、带宽和驱动能力都有帮助,然而它们却需要额外的电压净空,而电压净空在电池供电系统中是十分宝贵的资源。低电压同时意味着更高的精度,驱动着电路性能向它的极限逼近。例如,一个 1%精度为 1.8V 的稳压器在  $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$  的温度范围内,在包括工艺偏差、噪声、电压偏差以及负载调整率和线性调整率情况之下的总偏差要低于 18mV,其中,线性调整率和负载调整率有 5~12mV 的变化。此外,在低电压下,动态范围会变差,这使得精度要达到高于 1% 的程度。从而集成电路更加昂贵,设计也更加复杂,同时也激励着设计者要更能随机应变、更加具有创新性。

## 1.4 电 池

了解线性稳压器的的工作环境是十分重要的。作为一个集成电路设计师,我们通常需要考虑的电池参数包括容量、循环寿命、内阻、自放电以及物理尺寸和重量。

循环寿命是指电池在其容量显著减小之前能够进行充放电的次数。电池通常有碱性电池、镍镉电池、锂离子电池、锂离子聚合物电池等几种类型。碱性电池可以重复使用。然而不幸的是,虽然电池技术持续进步,但是却没有一种电池能够适合所有的应用。

### 1.4.1 早期的电池

目前大多数便携式电器使用基于镍和锂的化学物质对它们的系统进行供电。可以重复使用的碱性电池以及铅酸电池因为它们集成度和循环寿命的限制不适合于高性能产品的应用。碱性电池虽然存放寿命长,但是循环周期短、能量密度低,它们最适合于那些不经常使用的消费类电子产品和小器件,如闪光灯等。铅酸电池则比较经济且适应于高功耗的应用,但是它们通常体积较大,只有像汽车产业等大规模的应用才能够获得较多的好处。

早期的手机使用基于镍的电池:镍镉电池和镍金属氢电池(NiMH)。基于镍的解决方案通常容易产生一种被称为周期记忆的现象。周期记忆会形成结晶并加快放电速率,为了防止周期记忆的副作用,通常需要对其进行周期性的充放电。图1.4(a)给出了基于镍金属的电池的典型放电曲线,从图中可以看出该电池可用的能源通常为1~1.5V。

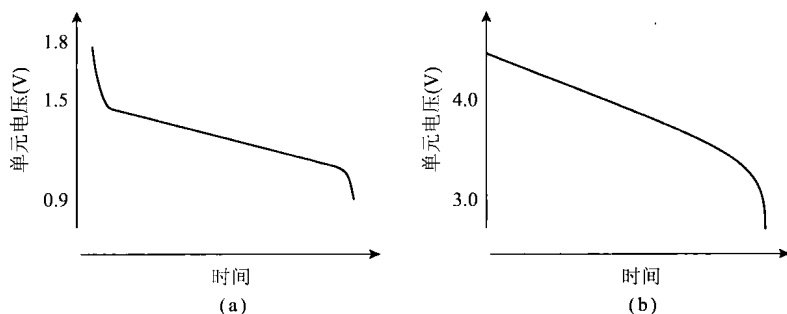


图 1.4 (a)镍镉电池和镍金属氢电池;(b)锂电池在恒定负载电流下的放电曲线

镍镉电池是镍金属氢电池的前身,含有有害的金属,而镍金属氢电池则更加环保,同时也有较高的能量密度以及更小的记忆效应。然而镍金属化合物的这些优势是以牺牲其他性能指标为代价的。图1.5显示镍镉电池几乎在各个方面都要超过镍金属氢电池。镍镉电池不仅内阻低,而且其容量、内阻和自放电时间在整个约为1500次的周期寿命内基本保持不变。镍金属氢电池在刚开始的时候工作很好,经过一定的充电循环之后,大概在镍镉电池寿命时间的20%时,其性能迅速恶化,使得其有效使用寿命仅为镍镉电池的一半。然而,镍金属氢电池对于电子产业仍然具有吸引力,因为它更加环保。更加重要的是,从营销角度考虑,当今大多数电子产品的预期使用寿命都在几年之内,从而使得电池的重复充放电次数处于在镍金属氢电池的能力之内。销售量的增加会促进镍金属氢电池技术的创新和进步,从而使得镍金属氢电池的成本降低到比镍镉电池更具竞争力的水平。



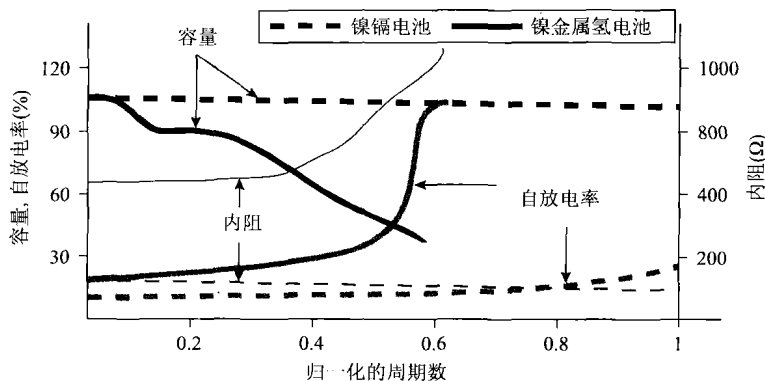


图 1.5 镍镉电池和镍金属氢电池性能比较

### 1.4.2 锂离子电池

可再充电储能器件发展过程中的下一个技术是锂离子电池技术。与镍基化合物的技术相比,锂离子电池有最高的能量密度,而且它不含有害金属以及令人讨厌的记忆效应。在其整个大约 1000 次的寿命周期内,锂离子电池的容量和内阻相对恒定。和镍基化合物的技术相比,它的自放率是微乎其微的。但是这些优势都是以牺牲成本为代价的,此技术会使成本加倍。但是这并不意味着它的成本在近期不会降低,因为销售量增大会使其经济规模增大,这样其成本会相应降低。因为这些原因,大多数手机、笔记本电脑和其他的便携式产品都使用锂离子电池。

以稍高的成本为代价,锂离子聚合物电池提高相同的性能,封装却可以做得更小,这对于手持式、穿戴式以及无线传感器的应用是十分有用的。最终大多数锂离子技术都遵循图 1.4(b)中的放电曲线,在此曲线内,大多数有用能量都分布在 2.7~4.2V 区间之内。因为化合物本质上比较敏感,超过其极限(通常是 2.4~4.7V)的过度充电和放电都会造成不可逆转甚至是灾难性的后果,这就是电池充电电路一般都比其他技术更加复杂的原因。

### 1.4.3 燃料电池

锂离子电池是主流技术,却不是最理想的电池。对于中等功率的微系统应用,它们单位重量或者单位体积的储能太少,这也是燃料电池、能量收集器以及核电池引起全世界关注的原因。图 1.6 给出了各种储能器件的 Ragone 图,从图中我们可以看出它们各自的能量和功率的关系。与核电池和微功率收集器相比,燃料电池在低功率应用中有较高的能量,而锂离子技术则在高功率应用中能够提供更高的能量。换句话说,对于相同的体积要求,在高功率条件下,锂离子电池的使用寿命要长于燃料电池;而在低功率条件下,情况则正好相反。此外,燃料电池具有对负载变化的响应比锂离子电池慢的特性,而其电压也比较低(0.4~0.7V)。可见,没有什么技术是理想的。研究人员对每种技术进行优化,同时也通过混合解决方案来结合不同方式的优势。