



ELSEVIER
爱思唯尔


凌力尔特公司模拟电路设计实例应用大全

凌力尔特公司首席技术官Bob Dobkin与模拟电路大师Jim Williams倾力打造

模拟电路设计手册 晋级应用指南

Analog Circuit Design Volume 2
Immersion in the Black Art of Analog Design

[美] Bob Dobkin Jim Williams 编著 / 张徐亮 朱万经 于永斌 译

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



模拟电路设计手册

晋级应用指南



Analog Circuit Design Volume 2
Immersion in the Black Art of Analog Design

[美] Bob Dobkin Jim Williams 编著 / 张徐亮 朱万经 于永斌 译

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

模拟电路设计手册：晋级应用指南 / (美) 鲍勃·道柏金 (Bob Dobkin), (美) 吉姆·威廉姆斯 (Jim Williams) 编著; 张徐亮, 朱万经, 于永斌译. -- 北京: 人民邮电出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-115-42050-3

I. ①模… II. ①鲍… ②吉… ③张… ④朱… ⑤于… III. ①模拟电路—电路设计—技术手册 IV. ①TN710.02-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第135754号

版权声明

Analog Circuit Design, Volume 2: Immersion in the Black Art of Analog Design

ISBN: 978-0-12-397888-2

Copyright © 2013 by Linear Technology Corporation. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by POSTS & TELECOM 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 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予人民邮电出版社在中国大陆地区 (不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

内 容 提 要

本书是一本综合性很强的参考书目, 在凌力尔特应用指南的基础上进行了拓展, 包括了海量电路设计方案和设计技巧, 可用于解决绝大多数模拟电路相关问题。另外, 本书详细剖析了各种应用实例, 为工程师展示了其中的设计细节、设计理论、高水平解决方案等, 是成功设计电路的重要参考。适用于所有对模拟电路设计感兴趣的人。

◆ 编 著 [美] Bob Dobkin Jim Williams

译 张徐亮 朱万经 于永斌

责任编辑 紫 镜

执行编辑 魏勇俊

责任印制 周昇亮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/16

印张: 65.75

2017年1月第1版

字数: 2 552 千字

2017年1月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2013-7013 号

定价: 298.00 元

读者服务热线: (010) 81055339 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第 8052 号

感谢Jerrold R. Zacharias, 是他给了我太阳、月亮和星星。

感谢Siu, 他就是我的太阳、月亮和星星。

纪念Jim Williams，他用电子撰写了动人诗篇。

应用指南

本书是根据凌力尔特 (Linear Technology) 公司出品的应用指南汇编成册的。

这些应用指南经重命名形成了各章。贯穿全文有很多不同应用指南的交叉引用, 不过并不是所有的应用指南都融入了本书。下面给出了章节与应用指南的对照表以待读者参考。

章 号	应用指南
1	2
2	104
3	133
4	29
5	44
6	32
7	118
8	65
9	95
10	107
11	15
12	74
13	132
14	4
15	5
16	10
17	13
18	14
19	16
20	18
21	21

章 号	应用指南
22	27A
23	38
24	79
25	123
26	128
27	131
28	85
29	91
30	129
31	12
32	45
33	52
34	57
35	61
36	67
37	75
38	87
39	98
40	105
41	113

商标

这些商标全部属于凌力尔特 (Linear Technology) 公司。我们将它们罗列在此是为了避免在正文中不断地重复引用。商标确认和保护在任何情况下都适用。如有疏漏，敬请原谅。

Linear Express, Linear Technology, LT, LTC, LTM, Burst Mode, Dust Networks, FilterCAD, LTspice, OPTILOOP, Over-The-Top, PolyPhase, SwitcherCAD, TimerBlox, μ Module 和 Linear logo 都是凌力尔特 (Linear Technology) 公司的注册商标。Adaptive Power, Bat-Track, BodeCAD, C-Load, Direct Flux Limit, DirectSense, Dust, Easy Drive, Eterna EZSync, FilterView, Hot Swap, isoSPI, LDO+,

LinearView, LTBiCMOS, LTCMOS, LTPoE++, LTpowerCAD, LTpowerPlanner, LTpowerPlay, MicropowerSwitcherCAD, Mote-on-Chip, Multimode Dimming, No Latency $\Delta \Sigma$, No Latency Delta-Sigma, No RSENSE, Operational Filter, PanelProtect, PLLWizard, PowerPath, PowerSOT, PScope, QuikEval, RH DICE Inside, RH MILDICE Inside, SafeSlot, SmartMesh, SmartMesh IP, SmartStart, SNEAK-A-BIT, SoftSpan, Stage Shedding, Super Burst, SWITCHER+, ThinSOT, Triple Mode, True Color PWM, UltraFast, Virtual Remote Sense, Virtual Remote Sensing, VLDO 以及 VRS 都是凌力尔特 (Linear Technology) 公司的商标。其他商标都属于各自拥有者的专有财产。

致谢

在《模拟电路设计手册：应用设计指南》发行之后，经过我们专业团队一年的努力，《模拟电路设计手册：晋级应用指南》终于成功问世。本书的撰写历尽艰辛，不过大家都任劳任怨，为 Jim Williams 以及凌力尔特公司众多同人后期编写永恒经典的应用指南提供了基础。首先要感谢所有的作者，他们勇挑重担——在实验室勤奋地工作，同时深入透彻地进行撰写。同时，也要感谢专业的图片和编辑团队，通过他们的努力促使应用指南图片清晰、内

容一致，他们是 Gary Alexander 和 Susan Dale。我们也要感谢 Elsevier/Newnes 专业团队的努力，包括出版人 Jonathan Simpson，以及 Pauline Wilkinson 和 Fiona Geraghty 的辛苦制作。最后，我们要感谢 Bob Dobkin，感谢他对本书的透彻分析、长期坚定的信念与支持。

John Hamburger
凌力尔特公司

为何要撰写本书

1980年初，我们期望未来的用户能知道我们公司的名字以及我们能做什么。其中最主要的问题是如何卓有成效地利用产品面市之前的假死期。读者期望看到系列可靠、图文并茂，并配有大量可用电路的技术文章。

我纠结了几周才找到解决方案。与其坐等产品研发成功，不如走进实验室进行应用开发，然后再撰写文章。其中的关键是利用现有的IC和分立元件，在面包板上搭建目标产品的简易等效电路。这样就能开发出功能应用，并完成本书大部分内容的撰写工作。随后，我们将书稿与面包板束之高阁。当产品最终开发成功时，我们将之插入面包板，并进行相应的调整。完成这项工作之后，我们可以将示波器的图片以及相关描述填入正文补齐空缺，微做调整后打包提交。该方法可以使应用指南的发布提早一年，而且文中内容能够与实际产品完美匹配。

一开始，整个方案让人觉得荒诞不经，不太可行，存在大量技术和编辑空白需要填补。开展工作的难度远远超过我的想象。为未成型的IC进行硬件综合是一项非常棘手的工作；我的方法笨拙无比、跌跌撞撞。用面包板来构建应用不但辛苦，速度也慢，当然主要的原因是因为我自己也无法确定未来IC的性能及其精度究竟能达到什么水准。写作也同样辛苦。正文始终是断断续续的，无法连贯，需要用实际产品的实测结果进行完善。另外，我还必须多加备注，以便在实际产品最终插入面包板时，能提醒我完成相应空白处的填补。

第一篇文章的撰写耗时近两个月，随后才慢慢变得容易起来。随着实验技巧的不断积累，我找到了更有效的写作方法，从而使书稿充分适应了功能的增加和修改。很快，基本上每两周左右我就能完成一篇书稿，在肾上腺素、焊锡、铅笔、纸张和比萨饼的支持下，干劲十足。

在随后的一年中，生活基本变成每周七天没日没夜不停地奔波于公司和家庭实验室之间，不断重复着面包板实验和书稿撰写。我的日常饮食对于心脏病专家来说简直就是噩梦。我不记得在家里吃过晚餐。冰箱中没有食物，存放的都是用于示波器照相机的精选宝丽来胶卷。如此疯狂的工作撕毁了正常社会生活的任何伪装。在旧金山的晚宴上，表面上倾听着女伴对其工作难度的抱怨，心里却在默算复合放大器中的最佳斩波器-通道分频点。这种疯狂生活一直持续了一年左右，取得的成果就是从1983年6月到1987年11月撰写的35篇长篇文章。

现在我仍然在写作，不过远没有当初那么疯狂。如今，当实验室的年轻人向我抱怨不太会写技术文章时，我努力表现成并没有慢慢变成吝啬鬼的样子。我想几近25年前的疯狂泪水是造成如今缺乏感情的主要原因。现代的年轻人，手握完整的产品目录，却不明白他们究竟拥有什么。

Jim Williams
科技研究员
凌力尔特公司

注：该随笔最初发表于EDN杂志。

前言

我们非常感谢读者对于《模拟电路设计：应用设计指南》一书的热切反响。该书的广为接受突出了市场对于优秀电路设计应用的广泛需求。这些文章填补了空白，因为大多数应用指南以及杂志文章都无法深入讲授模拟设计。

在我学习模拟设计的时候，不存在任何一款模拟IC。电路都由晶体管（也可能有些电子管）组成的，杂志以及书籍中对电路的说明相比现在要详细得多。那时，设备使用手册包含了原理图以便进行维修。本人有幸加入了一家大公司，在其巨大的设备校准实验室工作。我花费了大量的午餐时间在模拟系统校准和维修手册之上。感谢HP、Tektronix以及其他许多公司提供的模拟电路设计教程，使我能在校准实验室里进行全面的学习。有一件事值得一提，Jim Williams早年在MIT时常花费大量的时间维修损坏的电子测试设备。现在的用户手册要简略很多。

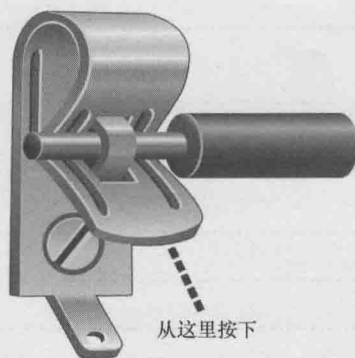
的确很难找到完整的模拟设计资料用来学习。很多书本中也许包含了模拟设计，不过都不包含测试结果，很不完整。同样，很多应用指南中详细介绍了各自产品，但却缺乏模拟世界广泛所需的信息。

我很欣慰这个图书系列成为模拟应用的教学手册。一个应用应该具有可用性，可以使用多年，而且容易复制。而优秀应用指南应对此应用进行描述，并讨论它能用于何处。应用指南应该包含充足的附加信息，比如温度范围、电源系统、生存期以及以基本原理为关注点的教科书中未包含的关键数据。应用模块图也应该解释清楚，使读者能够理解解决方案所采用的具体方法。除非你知道你将要去何方，否则你就很难理解你是如何到达那里的。

用于应用的电路需要充分研究，并提供元器件类型信息和组装信息。解决方案可能包括专用部件，这就要求读者知道它们的功能以及一些特殊属性。所以，指南中必须给出具体电路，必须对它的各个组成部分的特性和功能进行详细描述，使读者可以得到有用信息，用之进行新的设计。

“面包板”一词的出现可以追溯于使用实际面包切割板来将测试所用电路组装起来的时期。各元件用螺丝固定在板

子上，并用法耐斯托克线夹(Fahnestock clip)将它们连接起来，该线夹如下图所示。



很多模拟电路对布局都很敏感，如果布局不当，电路可能无法工作。我见过很多电路受制于该问题。

最后，设计人员需要电路测试的各种详细结果。这些结果说明电路正常工作时的情形，为设计人员仿照设计提供了参照。没有这些测试结果，指南中给出的应用只能沦为教学系统的一部分。

模拟设计很具挑战性。有很多途径可以实现从输入到输出的转换，处于其中的电路可以导致各种各样的结果。模拟设计与学习语言很相似。当你初学一门语言时，首先从词汇表开始，随后会着手分析用这门语言所撰写的著作，遇到生词时会查字典一个一个解决。同样，在模拟设计中，你将先学习电路的基本原理，学习不同设备的基本功能。你可以写出节点方程，通过分析研究各个电路可以确定电路究竟能做什么。

在模拟电路设计中，最终你将用到你曾经学到的基本电路结构——差分放大器、晶体管、场效应管、电阻以及以前学过的电路——以得到最终的电路。正如学习一门语言，学会写诗得花好几年的时间，模拟电路设计也是如此。

当今的系统用户手册很少包含电路设计。其中包含了原理框图以及接线原理图，可能需要上千根连线将不同的模块相连。那么人们如何进行模拟电路设计呢？在电路设计伊始，或者碰到一个你从未遇到过的问题时，很难找到

真正所需的参考资料。希望你能从这些书籍中找到答案，例如电路设计和测试的方法，以及设计和电路模仿练习所需的实验技术。

当前，模拟设计相比以前有了更大的需求。现在的模拟设计是晶体管和IC混合，这些IC有着极强的模拟信号处理能力。本卷主要关注电路设计、布局以及测试的基本问题。我们希望这些应用指南的撰写者能为模拟设计的“黑色艺术”

提供一些启发。

Bob Dobkin

联合创始人，副总裁，工程师，首席技术官（CTO）

凌力尔特公司



目录

应用指南	V
致谢	VII
概述	IX
前言	XI
第1部分 电源管理	1
第1节 电源管理教程	3
第1章 三端稳压器性能增强技术	5
第2章 稳压器瞬态负载响应测试	13
第3章 100A宽带闭环有源负载	25
第2节 开关稳压器设计	33
第4章 关于DC/DC转换器的若干思考	35
第5章 关于降压型开关稳压器的理论思考	77
第3节 线性稳压器设计	115
第6章 高效线性稳压器	117
第4节 高压高电流应用	127
第7章 高压低噪DC/DC转换器	129
第5节 照明设备的供电	167
第8章 第四代液晶显示器(LCD)背光技术	169
第9章 手机和照相机闪光灯的简化电路	271
第6节 汽车及工业电源设计	281
第10章 扩展PowerPath电路的输入电压范围并运用于汽车工业	283
第2部分 数据转换、信号调理和高频/射频	285
第1节 数据转换	287
第11章 单电池供电电路	289
第12章 组件和测量技术发展确保16位DAC的稳定时间	297
第13章 模数转换器的保真度测试	335

第2节 信号调理	341
第14章 新功率缓冲器的应用	343
第15章 测量和控制电路中的热技术	351
第16章 测量运算放大器稳定时间的方法	359
第17章 高速比较器技术	367
第18章 高性能V/F转换器的设计	393
第19章 采用独特的IC缓冲器进行高质量运算放大器的设计并高效使用快速放大器	409
第20章 单片放大器的功率增益级	427
第21章 复合放大器	439
第22章 用级联二阶滤波器节设计多阶全极点带通滤波器的简便方法	449
第23章 Filter CAD用户手册, 版本1.10	465
第24章 宽带精密放大器的30ns稳定时间测量	483
第25章 2GHz差分放大器/ADC驱动器的应用与优化	507
第26章 宽带放大器0.1%分辨率2ns稳定时间测量	533
第27章 关于声学测温法的介绍	551
第3节 高频/射频设计	563
第28章 开关稳压器低噪声变容二极管偏置	565
第29章 低成本耦合方法——RF功率检波器代替定向耦合器	587
第30章 提高RMS功率检波器随温度输出精度	593
第3部分 电路集锦	597
第31章 时钟源电路设计技术	599
第32章 测量和控制电路集锦	607
第33章 电路集锦, 卷I	627
第34章 视频电路集锦	641
第35章 测量和控制的实用电路	669
第36章 电路集锦, 卷III	701
第37章 用于信号调理和功率转换的电路	773
第38章 电路集锦, 卷V	797
第39章 信号源、信号调理器和功率电路	905
第40章 电流检测电路集锦(宝典)	929
第41章 功率转换、测量和脉冲电路	1023

第1部分

电源管理

三端稳压器性能增强技术 (1) 100A 宽带闭环有源负载 (3)

随着功率器件、开关、滤波器和稳压器的不断发展，电源管理技术也在不断进步。本文将介绍一种新的电源管理技术，该技术可以提高电源的效率和稳定性，并降低功耗。

稳压器的负载响应测试 (2)

稳压器的负载响应测试是评估其性能的重要指标之一。本文将介绍一种新的测试方法，该方法可以更准确地测量稳压器的负载响应时间，并评估其在不同负载条件下的性能表现。

在电源管理中，稳压器的性能至关重要。本文将介绍一种新的稳压技术，该技术可以提高稳压器的效率和稳定性，并降低功耗。此外，还将介绍一种新的测试方法，用于评估稳压器的负载响应性能。

第 1 节

电源管理教程

三端稳压器性能增强技术 (1) 100A 宽带闭环有源负载 (3)

本教程描述了一套三端稳压器的电路增强技术，用以扩展电流控制能力、限定功耗、提供高压输出，无需切换变压器绕组即可工作在 AC110V 或 AC220V，并且讨论了很多实用性较强的应用思路。

稳压器瞬态负载响应测试 (2)

半导体存储器、读卡器、微处理器、磁盘驱动器、压电设备以及数字设备都含有瞬态负载，必须使用稳压器。理想情况下，负载瞬态变化期间稳压器的输出不会发生变化。事实上，稳压器输出总会产生一些波动，而当超过允许的工作电压容差时稳压器波动将成为必须解决的问题。瞬态负载响应测试的主要内容是对稳压器及其附属器件进行测试，以验证瞬态负载条件下稳压器能否达到性能要求。目前，有多种方法可以生成瞬态负载，以便进行稳压器响应的观察。本教程给出了开环和闭环瞬态负载测试电路，并对其在多种条件下的性能进行了测试。我们特别讨论了为存储器供电的稳压器所需考虑的一些实际因素。随后的四节讨论了寄生电容及其对瞬态负载的影响，讨论了输出电容的选择、探测技术以及稳定的瞬态负载测试电路。

数字系统，尤其是微处理器，其瞬态负载可达 100A，所以必须使用稳压器。理想情况下，负载瞬态变化期间稳压器的输出不会发生变化。事实上，稳压器输出总会产生一些波动，而当超过允许的工作电压容差时稳压器波动就成为必须解决的问题。微处理器的这种 100A 的阶跃特征，进一步恶化了稳压性能，所以必须对稳压器及其附属器件进行测试。为此，我们将采用闭环的、带宽为 500kHz 的、具有线性响应的 100A 有源负载。在进行测试之前，我们将对传统测试的负载类型进行简要论述，并特别指出其不足之处。

