

嵌入式系统译丛

电源与供电

Power Sources and Supplies

[美] Marty Brown 著
郭利文 译



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

嵌入式系统译丛

电源与供电

Power Sources and Supplies

[美] Marty Brown 著

郭利文 译



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书从线性稳压器设计入手,逐步介绍开关电源及相应的设计事项。从电源设计的基本概念到电源设计中的各个主要组件分别介绍,从线路到元件,从理论到实践,由浅入深、图文并茂地介绍了电源的设计与应用。内容包括:线性电源与开关电源的基本概念,DC-DC 转换器的设计与磁性的基本概念,电源中的控制线路的设计,非隔离电路以及变压器隔离电路的基本概念、类型及其应用,各种不同的功率半导体以及各自的应用范围、优缺点等,电源设计中的传导和开关损耗,功率因子校正以及在电源设计与效率优化中的重要性,离线转换器的设计与磁性的基本概念,“真正正弦波”逆变器设计实例,在电源中进行热分析与设计。

本书语言生动、实例丰富、结合实际,无论对于刚接触电源设计的新手还是资深设计验证工程师,本书都是案前必备的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电源与供电 / (美)马蒂·布朗著;郭利文译

. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2013.10

书名原文:Power Sources and Supplies

ISBN 978-7-5124-1052-7

I. ①电… II. ①马… ②郭… III. ①电源②
供电 IV. ①TM91②TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 019911 号

版权所有,侵权必究。

电源与供电

Power Sources and Supplies

[美] Marty Brown 著

郭利文 译

责任编辑 刘 晨 刘朝霞

*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:20.5 字数:437 千字

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-1052-7 定价:49.00 元

版 权 声 明

北京市版权局著作权登记号:图字:01-2008-3392

Power Sources and Supplies

Marty Brown

ISBN-13: 978-0-7506-8626-6

Copyright © 2008 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-180-8

Copyright © 2013 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 2013

2013 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(不包括香港和澳门特别行政区及台湾)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

7年前,我加入一家服务器研发公司,并一直工作至今。刚进公司的我便进入了信号完整性测试与验证部门(Signal Integrity, SI),在那里我第一次比较系统地接触了电源及电源完整性方面的概念。随着设计的复杂度和精确度以及电源效率的要求不断地提高,后来电源与电源完整性单独成为了一个部门。随着研究的深入,我不断地发现电源在整个设计过程中至关重要——特别是在云计算领域。云计算使得大量的高功率密度设备集中放置,直接的结果就是能耗成倍增加。目前数据中心运行成本中增加最快、所占份额最大的部分就是能耗成本,而这些能耗中的大部分被服务器和冷却系统所消耗。如果在云计算数据中心建设前期购置设备时,基于10年的生命周期来考虑,假设用户大约需要花费近1亿美元的设备投入。当达到生命周期时,其电力支出也会接近1亿美元,而其他花费大约需要4千万美元左右。因而,其能源成本不可小觑。

今年,在和北京航空航天大学出版社胡晓柏主任聊天时,他问我是否有兴趣帮忙翻译一本关于电源方面的书。没过几天就收到了该书的英文版,顿时如获至宝、相见恨晚。

本书的英文作者 Marty Brown、Nihal Kularatna、Raymond A. Mark Jr. 以及 Sanjaya Maniktala 都是才华横溢的电源设计工程师。在电源设计领域中有有着数10年的工作经验,是电源方面的佼佼者,不论是AC-DC还是DC-DC,不论是线性电源还是PWM电源方面都有着各自独到而深入的见解。本书便是他们各自观点的集中体现,涵盖了电源设计的方方面面。从线性稳压器设计入手,逐渐介绍开关电路以及相应的设计事项。从电源设计的基本概念,到电源设计中的各个主要组件分别介绍,从线路到元件,从理论到实践,由浅入深、图文并茂地介绍了电源的设计与应用。

本书分为12章,其中第1、2章分别介绍了线性电源与开关电源的基本概念。第3章介绍了DC-DC转换器的设计与磁性的基本概念。第4章集中介绍了电源中的控制线路的设计。第5、6章分别介绍了非隔离电路以及变压器隔离电路的基本概念、类型及其应用。第7章重点介绍了各种不同的功率半导体以及各自的应用范围、优缺点等。第8章分别介绍了电源设计中的传导和开关损耗。第9章介绍了功率因子校正以及在电源设计与效率优化中的重要性。第

10 章介绍了离线转换器的设计与磁性的基本概念。第 11 章基于第 10 章的理论基础,具体介绍了“真正正弦波”逆变器设计实例。第 12 章介绍了与电源应用中息息相关的热的概念,怎样在电源中进行热分析与设计。全书语言生动、实例丰富、结合实际,无论对于刚接触电源设计的新手还是资深设计验证工程师,本书都是案前必备的一本参考书!

几个月艰苦的翻译工作是一种磨练,更是对自身知识的一次梳理和升华。尽管每天的设计工作都会与“电”打交道,但并不系统,更多的时候会求助于各电源厂商的数据手册以及应用工程师的指导建议,而国内可以参阅的书籍非常有限。即使有,很多的知识和观点都已经比较陈旧。而由于经常参考的数据手册都是英文版,许多专业术语在日常工作中都是直接使用英文表达,因此在翻译过程中不得不字斟句酌,经常会为如何恰当翻译一个词汇而不断进行推敲。在翻译过程中发现了几处英文原文的错误,经原作者同意,在中文版中得以纠正。

全书主要由笔者翻译并校对。我的同事孙金艳、吴政道(中国台湾)、林韦成(中国台湾)等通读了译稿,并提出了许多修改建议。湖南师范大学王亿芳、唐瑶等同学也为本书的翻译做了大量的工作,从而促成了本书的迅速问世。Lance Lee(美国)、Robert Yuan(美国)是我的上司,和我亦师亦友,他们在英文及工作方面给予了我很多的帮助。在此,谨向他(她)们表示衷心的感谢。

湖南师范大学物理与信息科学学院邓月明老师及湖南省教育厅教学改革研究项目(编号:2012-401-80)成员参加了对译稿的校对工作,在此一并表示感谢。

我还要感谢我的老板 Foo-Ming Fu(中国台湾)。7 年前,我加入了他的公司,在这里,我从一个云计算研发方面的菜鸟成长为一名资深的研发工程师;在这里,我的专业素养、研发与管理技能得以长足进步,从而为翻译工作打下了坚实的专业基础。

我也要特别感谢我的妻子——高芳莉,正是由于她的无私帮助和全力支持,使我能全身心地投入到自己所热爱的工作之中,而由于她的英文专业的背景,令我在翻译过程中如鱼得水,并在短短几个月的时间里完成了此书的翻译工作。

翻译是一件很难做得完美的事。由于时间仓促及水平所限,错误及不妥之处在所难免,欢迎各位读者批评指正,并提出宝贵意见。

郭利文

2013 年 8 月

前言

本书综合了线性和开关电源设计领域的四本书的精华,涵盖了电源设计的方方面面,也包括了这些作者对电源设计的不同观点,使读者对电源领域有更全面的认识。

这个领域的设计者成长为电源工程师都有各自的原因,对于我而言,纯属偶然。在当工程师的5年里,我仅仅使用780X线性稳压器进行过设计。我在航空电子产品设计中负责数字部分的设计。完成这项工作后,我对经理说:“我们需要让这些产品起飞,但不能采用这些测试台上的电源,我们需要进行电源设计。”

他回答说:“我一直在等待看谁能够第一个完成这项任务。”经过一年的时间,相继研发出4个不同的版本,该产品成功起飞了。

这也是我涉足开关电源的开始。1974年还没有PWM控制芯片。要实现PWM的功能,只能通过对线性稳压器提供正反馈,或者使用556芯片实现所需要的功能。当时,功率半导体器件仅有离散双极晶体管和快恢复二极管。

从那以后,该技术取得了长足的发展。半导体供应商提出了虚拟的“即插即用”的方案,例如美国国家半导体公司(National Semiconductors)的Simple Switcher™方案。在线设计和仿真工具使得设计看上去迅速而轻松。其他的供应商同样如此,例如磁性元件供应商,他们使开关电源设计变得比以往更轻松。他们制造并设计了许多标准形状和不同感值的电感和变压器系列。

然而,一旦你的设计超过了简单的PCB层级的开关电路,那些在线工具就会迅速失效。如今大部分刚毕业的工程师都处在数字硬件和软件领域,他们的基础电子课程只涵盖了物理电子学而已。所以,一旦需要设计一个电源,它就变成了一个谁能跑得最快的问题!当然,这些工作通常就会落在最资浅的工程师身上,然后它又成为他或她的下一个任务。

由于“惯性效应”,从此,电源设计通常会贯穿于工程师在公司里整个设计生涯。对我来说,这是幸运的。我总是对那些由射频、数字、模拟以及电源所组成

的未知而又深具趣味性的领域感到好奇。而我所获得的回报就是我能直观地理解那些很少有工程师涉足的领域,而我的电源设计能够在当今世界上许多的产品上应用。

本书的撰稿人都是有着不同经验背景的非常受人尊重的工程师。他们从不同角度讲述电源领域方面的设计。

所以,好好学习,好好设计。

Marty Brown

2007 年 9 月

关于作者

Marty Brown(第 1、9 章和 12 章)是 *Power Supply Cookbook* 和 *Practical Switching Power Supply Design* 两本书的作者。在 11 岁时,他就获得了业余无线电执照,而他已经把电子设计作为了一生中的业余爱好。1974 年,他以优异的成绩毕业于德雷克塞尔大学。他的电子设计生涯包括美国海军部门的水下声学设计、机载气象雷达设计(数字和开关电源(SMPS)部分)、卫星编解码器以及过程控制设备等。他以前是摩托罗拉半导体公司的一位资深应用工程师,在那里他定义了不止 8 款半导体产品并投放在功率转换市场,同时获得了两项专利。接着,他开始组建了电子咨询公司,从此开始为许多半导体公司做从卫星电源系统到电源相关集成电路的设计。目前,他在 Microchip 公司从事数字控制电源领域的研发。他有 8 个小孩,其中 5 个是收养的。他的妻子是一个在跨种族收养领域及相关问题方面的国际知名的作家和演讲家。他目前生活在亚利桑那州斯科茨代尔。

关于撰稿人

Nihal Kularatna(第7章)是 *Power Electronics Design Handbook* 的作者。他作为一名电子工程师,在专业研究领域有超过30年的设计经验。他是 IEE(伦敦)的成员、IEEE(美国)的高级成员以及斯里兰卡佩拉德尼亚大学的荣誉毕业生。目前,他是新西兰怀卡托大学工程系的资深讲师。他曾在斯里兰卡阿瑟·克拉克现代技术研究所(ACCIMT)担任研发工程师,并于1990年担任首席研究员工程师。2000年,他被任命为 ACCIMT 的 CEO。2002—2005年,他成为了奥克兰大学电气与电子工程系的资深讲师。目前,他活跃在电力电子的瞬态延时、功率调节、电力电子技术的嵌入式处理应用以及智能感应系统方面的研究。他已经出版了5本书,而本书将是他的第6本。他的业余爱好是打理仙人掌以及肉质植物方面的园艺研究。

Raymond A. Mack, Jr. (第2、4、5、6和11章)是 *Demystifying Switching Power Supplies* 的作者。

Sanjaya Maniktala(第3、8和10章)是 *Switching Power Suppliers A to Z* 的作者。他是 Fairchild 公司的资深应用工程师以及系统架构工程师。硕士毕业于印度孟买的印度理工学院的物理系以及位于伊利诺州埃文斯顿的西北大学。他曾在好几个大洲工作过,并且在诸如 Artesyn Technologies 公司(如今是 Emerson Electric 公司的一部分)、Siemens AG 公司、Freescale 半导体公司以及 Power Integrations 公司工作并担任工程主管职位。最近连续5年,他是国家半导体公司中最多产的作家,在此期间,他写了许多被人们广泛用来查看和研究的参考文献以及应用笔记。在他的空闲时间里,他也为几个主要的电子出版物如 EDN、Electronic Design、Power Electronics 以及 Planet Analog 等写了几篇文章。在功率转换及控制领域,他也有几项专利,如“悬浮降压稳压器技术”等。

目 录

第 1 章 线性稳压器的介绍

1.1 基本线性稳压器的操作	2
1.2 一般线性稳压器的注意事项	3
1.3 线性电源设计实例	5
1.3.1 基本离散线性稳压器设计	5
1.3.2 基本的三端稳压器的设计	6
1.3.3 悬浮式线性稳压器	8

第 2 章 基本开关线路

2.1 储能基础	12
2.2 降压转换器	12
2.3 升压转换器	14
2.4 反向升压转换器	16
2.5 降压-升压转换器	16
2.6 变压器隔离转换器	17
2.7 同步整流	20
2.8 电荷泵	21

第 3 章 DC-DC 转换器的设计与磁性

3.1 直流传输特性	26
3.2 直流分量和电感电流波形的摆幅	26
3.3 交流、直流和峰值电流的定义	29
3.4 交流、直流和峰值电流的理解	30
3.5 最坏情况输入电压值的定义	32
3.6 纹波电流比 r	34
3.7 关于 r 值与电感感性的关系	35
3.8 r 的最佳值	36
3.9 电感还是电感值	37
3.10 电感感值和尺寸是怎样依赖于频率的	38
3.11 电感感值和尺寸与负载电流的关系	38

目 录

3.12	厂商是怎样规定现有电感的额定功率以及怎样选型	39
3.13	对于指定的应用,需要考虑的电感额定电流是什么	40
3.14	电流限制的外延和容限	42
3.15	样例(1)	45
3.15.1	在 r 值设定上的电流限制的考虑	46
3.15.2	在固定 r 值下连续导通模式的考虑	47
3.15.3	当采用低 ESR 电容时 r 值设定高于 0.4	49
3.15.4	设置 r 值以避免元件“怪癖”	49
3.15.5	设置 r 值以避免次谐波振荡	51
3.15.6	“ $L \times I$ ”和“负载调节”法则下的电感快速选型	54
3.16	样例(2、3 和 4)	55
3.16.1	强制连续导通模式(FCCM)中的纹波电流比 r	56
3.16.2	磁的基本定义	57
3.17	样例(5)——什么时候不要增加匝数	58
3.17.1	场纹波比	60
3.17.2	伏秒形式的电压依赖性方程(MKS 单位)	60
3.17.3	CGS 单位	60
3.17.4	伏秒形式的电压依赖性方程(CGS 单位)	61
3.17.5	磁芯损耗	61
3.18	样例(6)——在具体应用中选择现有的电感	62
3.18.1	估计需求	63
3.18.2	纹波电流比	64
3.18.3	峰值电流	65
3.18.4	磁通密度	65
3.18.5	铜损耗	66
3.18.6	磁芯损耗	67
3.18.7	温升	67
3.19	其余最坏情况下的应力计算	68
3.19.1	最坏情况下的磁芯损耗	68
3.19.2	最坏情形下的二极管功耗	69
3.19.3	最坏情形下的开关功耗	70
3.19.4	最坏情形下的输出电容功耗	71
3.19.5	最坏情形下的输入电容功耗	72

第 4 章 控制线路

4.1	基本的控制线路	75
-----	---------------	----

4.2	误差放大器	77
4.3	误差放大器的补偿	78
4.4	典型的电压模式 PWM 控制器	81
4.5	电流模式控制	85
4.6	典型的电流模式 PWM 控制器	86
4.7	电荷泵电路	89
4.8	多相位 PWM 控制器	91
4.9	谐振模式控制器	92

第 5 章 非隔离电路

5.1	一般的设计方法	94
5.2	降压转换器的设计	94
5.3	升压转换器的设计	101
5.4	反相设计	106
5.5	升压-降压设计	109
5.6	电荷泵设计	112
5.7	布局布线的考虑	116

第 6 章 变压器隔离电路

6.1	反馈机制	119
6.2	反激电路	126
6.3	实用的反激电路设计	131
6.4	离线反激电路的实例	131
6.5	非隔离反激线路的实例	137
6.6	正激转换器电路	140
6.7	实用的正激转换器的设计	141
6.8	离线正激转换器的实例	142
6.9	非隔离正激转换器的实例	145
6.10	推挽式电路	148
6.11	实用的推挽式电路设计	150
6.12	半桥式电路	153
6.13	实用的半桥式电路设计	155
6.14	全桥式电路	158

第 7 章 功率半导体

7.1	导 言	160
-----	-----	-----

7.2 功率二极管及晶闸管	161
7.2.1 功率二极管	161
7.2.2 晶闸管	170
7.3 栅极关断晶闸管	175
7.4 双极型功率晶体管	177
7.4.1 作为开关的双极型晶体管	177
7.4.2 感性负载开关	178
7.4.3 安全工作区和 $V-I$ 特性	179
7.4.4 达林顿晶体管	183
7.5 功率 MOSFET 管	184
7.5.1 简介	184
7.5.2 一般特性	184
7.5.3 MOSFET 管的结构和导通阻抗	185
7.5.4 $V-I$ 特性	186
7.5.5 栅极驱动的考量	187
7.5.6 温度特性	188
7.5.7 安全工作区	189
7.5.8 实用元件	190
7.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	194
7.7 MOS 控制晶闸管(MCT)	195

第 8 章 传导和开关损耗

8.1 切换阻性负载	199
8.2 切换感性负载	203
8.3 开关损耗及传导损耗	205
8.4 研究感应开关损耗的 MOSFET 简化模型	206
8.5 备用系统中的寄生电容	208
8.6 栅极阈值电压	209
8.7 导通转换过程	209
8.8 关断转换过程	213
8.9 栅极电荷因子	217
8.10 样例	219
8.10.1 导通切换	219
8.10.2 关断切换	220
8.11 开关损耗分析应用于开关拓扑	221
8.12 最坏情形时开关损耗的输入电压	222

8.13	开关损耗会怎样随寄生电容而变化	223
8.14	根据 MOSFET 特性来优化驱动能力	224

第 9 章 功率因子校正

9.1	如何指定功率因子与谐波	231
9.2	通用输入、180 W、主动型功率因子校正电路	233
9.2.1	设计规格	233
9.2.2	设计前的考虑	233
9.2.3	电感设计	234
9.2.4	变压器结构	236
9.2.5	启动线路设计	236
9.2.6	电压倍增器输入电路设计	237
9.2.7	电流检测电路设计	237
9.2.8	电压反馈电路设计	238
9.2.9	输入 EMI 滤波器设计	238
9.2.10	印制电路板的考虑	239

第 10 章 离线转换器的设计与磁性

10.1	反激转换器的磁性	241
10.1.1	变压器的线圈极性	241
10.1.2	反激拓扑中变压器的行为及其占空比	243
10.1.3	等效的降压-升压模型	246
10.1.4	反激拓扑的纹波电流比	248
10.1.5	泄漏电感	248
10.1.6	齐纳箝位功耗	249
10.1.7	次级线圈侧泄漏电感也会影响初级线圈侧	249
10.1.8	测量有效的初级线圈侧的泄漏电感	250
10.1.9	样例——设计反激变压器	251
10.1.10	选择线径和铜箔厚度	257
10.2	正向转换器的磁性	260
10.2.1	占空比	260
10.2.2	最坏情形下的输入电压端	263
10.2.3	窗口的利用率	264
10.2.4	磁芯尺寸及其功率吞吐量	265
10.2.5	样例——设计正向变压器	266

第 11 章 “真正正弦波”逆变器设计实例

11.1	设计要求	282
11.2	设计描述	283
11.3	预调节器的具体设计	287
11.4	输出转换器的具体设计	291
11.5	H 桥的具体设计	293
11.6	桥驱动的具体设计	296

第 12 章 热分析与设计

12.1	散热建模	300
12.2	散热器上的功率封装(TO-3、TO-220、TO-218 等)	301
12.3	不在散热器上的功率封装(独立式的)	302
12.4	径向引线二极管	303
12.5	表面贴装零件	304
12.6	一些散热应用的实例	306
12.6.1	确定应用中的最小散热器(或者最大允许热阻)	306
12.6.2	确定在最大指定环温且没有散热器下通过三端稳压器耗散的最大功率	307
12.6.3	在已知导线温度的前提下确定整流器的结点温度	307

参考文献	309
------	-----

第 1 章

线性稳压器的介绍

线性稳压器是最简单的 DC-DC 转换器,但是不要因此而被它的表象所迷惑。要能够稳定地应用线性稳压器,有几个参数很重要,它们是热设计、输出调节、稳态考虑以及瞬态响应。其中的任何一个都可能引起系统行为异常。

线性稳压器比开关稳压器的应用要广泛得多。它们应用在作为负载点的产品中。在这些产品中,本地电路调节、对噪声敏感的线路需要采用“安静”的电压总线以及生成便宜的电压总线。

如果你完全采用线性稳压器来进行设计,那么你能被称为电源设计者。除非你采用开关电源进行设计,否则你不会很清楚地了解这个领域的复杂性。因为你还是只是个菜鸟。

我试着采用简洁而又直接的方法来讲述线性稳压器有多灵活。对这些设计实例进行扩展和稍作修改就能满足许多其他的应用。其他相关的课题,比如热设计,将会在第 12 章进行详述。

——Marty Brown

线性稳压器是电源调整器的最初形式。它主要是通过主动电子器件的电导率来把输入电压降压为相应的输出电压。因而线性稳压器以热能的方式浪费大量的功耗。但是尽管如此,它依旧是“安静”的电源供应器。

线性电源在转换效率不是很重要的场合应用很广泛,包括供电墙、采用空气冷却即可的地面设备、还有对电子噪声很敏感、要求很“安静”的电源的仪器设备中,这些可能包括音频和视频放大器、射频接收器等等。线性稳压器在本地和板级设备中也大受欢迎。在板级应用中,因为只有很少的功耗,所以可以由一个简单的散热器来实现。如果需要对 AC 输入电源进行介质隔离,那么就需要采用 AC 变压器或者大容量电源。

通常而言,线性稳压器在小于 10 W 的输出电源应用中非常有用。如果大于 10 W,散热器将会变得很大而且很贵,因此在这种情况下开关电源将更加吸引人。