

TURING

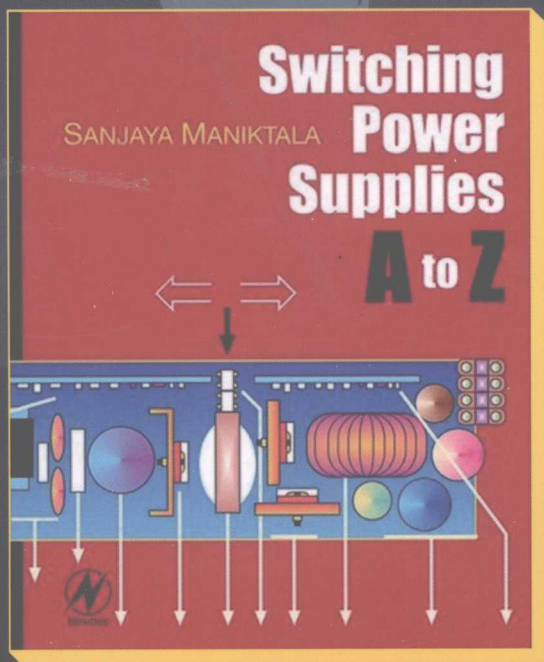
图灵电子与电气工程丛书



# 精通开关电源设计

## Switching Power Supplies A to Z

[美] Sanjaya Maniktala 著  
王志强 等译



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

TN86  
445  
12

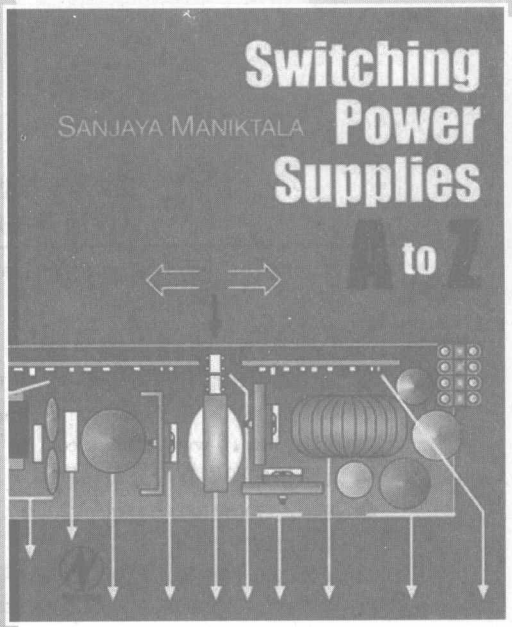
**TURING**

图灵电子与电气工程丛书

# 精通开关电源设计

## Switching Power Supplies A to Z

[美] Sanjaya Maniktala 著  
王志强 等译



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

精通开关电源设计/(美)马尼克塔拉(Maniktala, S.)  
著;王志强等译.—北京:人民邮电出版社,2008.10

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文:Switching Power Supplies A to Z

ISBN 978-7-115-18500-6

I. 精… II. ①马…②王… III. 开关电源-设计 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 102977 号

## 内 容 提 要

本书基于作者多年从事开关电源设计的经验,从分析开关变换器最基本器件——电感的原理入手,由浅入深系统地论述了宽输入电压 DC-DC 变换器(含离线式正、反激电源)及其磁件设计、MOSFET 导通和开关损耗、PCB 布线技术、三种主要拓扑电压/电流模式下控制环稳定性以及开关电源电磁干扰(EMI)控制及测量的理论和实践等。书中还解答了变换器拓扑的常见问题,讨论了开关电源及电子镇流器设计的专家意见、工业经验和难点对策等。

本书不仅可作为各层次开关电源工程人员的教材,也可供开关电源设计人员和高校相关专业师生参考。

## 图灵电子与电气工程丛书 精通开关电源设计

◆ 著 [美] Sanjaya Maniktala  
译 王志强 等  
责任编辑 舒立

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张:21.75  
字数:469 千字 2008 年 10 月第 1 版  
印数:1—4 000 册 2008 年 10 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字:01-2007-4267 号  
ISBN 978-7-115-18500-6/TN

定价:49.00 元

读者服务热线:(010)88593802 印装质量热线:(010) 67129223

反盗版热线:(010)67171154

# 版 权 声 明

本书 *Switching Power Supplies A to Z* by Sanjaya Maniktala, ISBN:0-7506-7970-0.

Copyright © 2006 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN:978-0-7506-7970-1.

Copyright © 2008 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

**Elsevier (Singapore) Pte Ltd.**

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House 1

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2008

2008年初版

Printed 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.

本书简体中文版由人民邮电出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 合作出版。本版仅限在中华人民共和国(不包括香港特别行政区和台湾地区)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

随着电力电子技术的迅速发展,高频开关电源已广泛应用于计算机、电信、工业加工和航空航天等领域。因此,从事开关电源学习研究的高校师生和从事开关电源设计研发的工程人员,迫切需要理论系统、实用性强的学习资料,这便是我们坚持向国内同行介绍国外开关电源设计图书的用心所在。

本书基于作者多年从事开关电源设计的经验,从分析开关变换器最基本器件——电感的原理入手,由浅入深系统地论述了宽输入电压 DC-DC 变换器(含离线式正、反激电源)及其磁件设计、MOSFET 导通和开关损耗、PCB 布线技术、三种主要拓扑电压/电流模式下控制环稳定性以及开关电源电磁干扰(EMI)控制及测量的理论和实践等。书中还解答了变换器拓扑的常见问题,给出了开关电源及电子镇流器设计的专家意见、工业经验和难点对策等。

该书内容详实、材料新颖全面,对有一定电源设计基础的技术人员及电源设计初学者均适用,是一本实用的学习资料和方便的设计参考书。

本书翻译历时半年,翻译工作由华南理工大学电力学院王志强副教授组织完成。该校电力电子专业开关电源方向研究生参加了本书的翻译工作,其中,陈伟、李华、段守胜、农苏美、刘芽芽、邱爽等同学完成了译文的初稿,没有他们的积极参与和认真工作,本书的翻译出版几乎是不可能的。美国 IWATT 公司郑俊杰先生审阅了本书部分章节,并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

还要感谢原作者 Sanjaya Maniktala 先生,感谢人民邮电出版社图灵公司的编辑对本书翻译稿的认真加工。

鉴于译者的水平有限,加之时间仓促,译文的不足和错漏之处在所难免,希望读者予以批评指正。

译者

于广州

## 前言

现在回想起来,我决定放弃物理学、开始从事电子学并非一时心血来潮。我中途转行是一个渐变的过程。随着对介子、拉格朗日乘法器、量子电动力学等兴趣的急速下降,我的分数开始降到谷底。我注意到,我的研究生老师们大都对学生不太关心,好像教学仅仅是他们不得不做的一件事情,获得研究经费才是他们真正想要的。在本科阶段极具魅力的物理学,到了研究生阶段,突然变得非常数学化、过于玄虚,与我要坚定地深入到实际(而非虚幻)的初衷相矛盾。更不幸的是,直到在芝加哥修第二个硕士学位时,我才彻底地觉醒。真是太晚了。可是,当我最后真要和物理学(必须说明,它仍然是我的朋友)告别时,就出现了一个小小的问题:我不知道下一步该干什么。我称之为我的1号问题。

回到炎热而忙碌的印度,我花了几年时间才理出了头绪。谢天谢地!在摆弄三极管、电容、电阻、电感时,我找到了所有问题的答案,也看到了未来的希望,这是我期待已久的生命之舟。在这里我可以感觉、触摸、建造及测试任何我做的东西。不再有在复杂方程和抽象代数的迷雾中不知所措的感觉:这是一个真实的世界,一个我们日常生活的世界。

2号问题又来了:我甚至不了解电子学的基本知识。所以不得不一点点地自学,夜以继日地工作,甚至专门向当地老资格的元件经销商请教“什么是晶体管”这样幼稚的问题。这个过程持续了很长一段时间,我昼夜工作,连续几年我基本上都学习到深夜。当然,如果不是一路上遇到几位非常杰出的学者,我也不可能获得今天的进步(见致谢)。最终在自己的努力及各方面的帮助下,我走进了电子学这个精彩的世界,走进了电力电子学。我可以将百叶窗放下来,不用再经常工作到深夜了。

以上这一连串难忘的经历使我开始有了写这本书的想法。

等等,上面介绍了写书的背景,但还没解释为什么要写本书。我确实还没解释,因为还有一个大问题需要解决,我称其为3号问题——总是有一些人有意或无意阻碍对我们都有益的学科进展。现在,我自己已经走过了人生转折点(感谢电子学),所以很自然地一直认为,自己欠电子学太多,理应回报。但是我发觉不是所有人都这样想,至少不是所有时候。也许有些人家条件优越可以轻松获取光芒四射的麻省理工学院或耶鲁大学的EE学位。而我这样的人就没有如此幸运。不过在有些时候,我们都必须认识到,我们面对着相同的自然力量,它的存在和进一步发展与我们都休戚相关。我们的目标最终是一样的,所以也有共同的责任为此努力。学然后知不足,很奇怪有

人居然无法领会下面牛顿的话中所蕴涵的谦卑之心：

“我不知道在别人看来，我是什么样的人；但在我自己看来，我不过就像是一个在海滨玩耍的小孩，为不时发现比寻常更为光滑的一块卵石或比寻常更为美丽的一片贝壳而沾沾自喜，对于展现在我面前的浩瀚的真理的海洋，却全然没有发现。”

同样，电力电子学也只是浩瀚宇宙中的一部分，我们才开始了解它，还有很多知识等着我们去发现。我们应该在我们微不足道的职业生涯中向前推进它的发展还是阻碍（哪怕是偶尔地）它呢？

最后，当我看得多听得也多了之后，我在网上的专栏里写下了下面几句话，这引起了许多明显不明就里的人的争议（参见附录 1 最后一页）。

“在管理人员说了算的公司里，技术很难获得立足点。因为在这种环境中，如果上面全力支持就会得到慷慨的奖励，如果持有异见，将被无情地打入冷宫。而工程师只有在有确切的事实和无可争议的数据支持下才愿意发表自己的观点。因此他们需要的是‘平等的环境’，在这种环境中评价主要根据从同行那里获得的尊重——上面的意见往往需要放在其次。

当然有时候这会惹恼管理者！所以管理工程师的经理人，自身应该在技术上有相当的能力，并且能平等地尊重数据和事实。他们不能以势压人来赢得技术争论，更不能试图四处打击‘情绪化’和‘不敬上’的工程师。令人惊奇的是，这类事情发生的比我们敢于承认的要多，这不仅让优秀工程师付出了代价，长远来看也会让技术的发展付出代价！”

我怀疑这些言论（大部分基于我敬爱的长期导师和前老板的经验）引起争议的唯一原因，是它已经比我所想象的更击中要害。显然，当人心中有鬼时，远处的报警声就会把他们吓得够呛。事情的结果是，我被告知不要再说我不懂的事情，好好设计电路就行了。我还被公司设立创作奖励基金拒绝了，我认为根据基金的条例——他们无偿地使用我的文章和畅销的电力电子书推广了公司的产品，我理应得到基金奖励。最后我明智地走为上计了。然后怪事发生了，在我辞职之后，他们按我一直宣扬的重组了机构，将以往分开的便携式电源和电源管理合并成一个部门，对内宣称“这样会使工程师们更好地共享资源”——完全是我的原话！现在想想，我的文章最后促成了原本问题多多的公司（不管他们承认与否）能够做出一些更好的设计、更多经过同行评审的产品，我还是感到很欣慰。可以肯定的是，赢家不是我，也不是那些位居高位却缺乏安全感而且心胸狭窄的经理。赢家是电子学，这对我来说已经足够了。

直到不久之前，我还天真地认为一些大公司，特别是某些华丽总部设在硅谷以展示其实力的公司，随着时间推移已经醒悟，管理更专业：不再允许用不客观的批评打击勤奋工程师们的士气，不再允许通过公司邮件发一些不分青红皂白的冷言冷语（使员工们不时怀疑上司是否还有起码的理智），而是能够使工程师公平而不受歧视地得到努力工作的回报。但是事实上，问题太多了，对于我倾注了心血的电子学，我已经不能太肯定它在获得应得的地位。没错，大公司不断在宣布“总利润创记录”之类，但是在

这种纯粹对外宣传的表面之辞背后,你必须记住他们真正的新发现是:(a)让那些极具才能的、听话的、积极的新秀工程师们多干活;(b)停掉那些亏损部门,即非核心竞争力部门(事实上,这些部门自始至终都由于管理缺陷导致工程师们无法做出改进)。另外,很容易就能想到,他们在不断解雇一些有才能或有发展前景的工程师(我认识其中一些人),原因经常是经理太差,又需要在他们同样差劲的上司面前找借口,而这些上司们也需要在他们的上司面前找借口……而最后那个处在最高层的人很可能只顾忙着数百万美金的红利,仅仅是因为他实现了公司(短期)目标!故事的结局是没有人考虑那些离开公司的工程师,事先没有任何警告,也不给机会解释——一点不像世界上任何一个普通法庭。我问自己,如果牛顿和爱因斯坦同样被这些没能力、不诚实的上级管理着,这个世界会变得像今天这么美好吗?当我想到这里时,有多少可能成为牛顿和爱因斯坦的人被这些公司打入地狱,很可能提前退休,而公司却宣称自己的模拟集成电路产品是自然的化身(“能看到听到信息”)?受害者的确切数量可能永远也无法知道。

正如你所看到的,坦率地说我还没有找到3号问题的解决方案。可是我一直在努力,这本书就是我努力的结果。

现在,该告诉大家在这本书中我想达到什么目标了。电源设计的一个很独特的地方,就是“细节决定成败”。也就是说:作为一个技术作者,我也可以写下任何东西(包括背景数学理论),这样会写成一本仅仅专家们喜欢的书;也可以写成一本适合初学者的简单易懂的书,但很有可能会遗漏电源设计最基本的内容——优化和设计时要考虑的利弊权衡。为了做到深浅适中,需要非常仔细地考虑内容的组织和安排,这是我在本书中努力想达到的。例如,市面上的一些书,试图一步步阐述直流变换器的详细设计过程,但是,都无一例外地遗漏了输入很少是固定电压级别这个重要的事实。输入的范围总是很宽的,必须弄清楚哪个变换器的应力在最高输入和最低输入时处于最坏状态,同时还需要知道在此过程中哪个应力需要在特定设计步骤中优先考虑。显而易见,设计一个好的电源不是一件容易的工作。第2章讲述了直流变换器设计的一般过程,希望能同时满足详尽和简单的要求。

第1章主要介绍了什么呢?对于大多数读者来说它仅仅是个可以一带而过的介绍吗?并非如此!这个特别的介绍是从元件级别而不是像其他书一样从拓扑级别开始的。我希望即使是初学者也能理解电容电感的奥妙,然后将它们有效地联系在一起,得出开关变换器的拓扑。一个明显的事实是,所有拓扑都是从对基础元件(特别是电感)工作原理的理解衍生出来的。程度较高的读者应该注意这一点。当面试一些高级工程师时,我发现他们中很多人对电感的准确概念仍然不甚明了,所以,我认为对所有读者,无论初学者还是有经验的,按这本书的章节顺序从第1章开始阅读。但是,读这一章的时候可不要被容易有成见的经理抓住了!直接进入高级的章节看似能节约时间,但这样会使后续的进度慢得多(并且会影响你的自信心)。基本概念需要在合适的时候介绍并加以例证,这样你就能终生牢记。



第3章我试图从相当基础的知识开始讲起,但是接着将马上加大难度,极为详细、按步骤地讲述离线式变换器和相关磁元件的设计过程,其中包含了高难度的邻近效应分析。我将最基本的过程分成两个独立的(迭代)部分——其一为金属薄片线圈,其二为圆形线圈,因为它们各自的最优化过程确实很不相同。这里也有许多曲线图,可以快速地帮助工程师们形象理解磁学设计。

接下来本书用一章来介绍 MOSFET 的开关损耗,因为这个话题随着开关频率的增加变得更加重要。引用了相关文献中一些非常细致和详细的图片——突出了每个开和关独自的状态,需要时也做了一些常用的简化假设。在学习了本章后,读者从事这个本来理解不多的功率变换领域将不会再有困难。本章也有一些有用的参数化绘图信息,不仅可以方便地帮助应用工程师选择外部 MOSFET,也可以帮助集成电路设计者优化芯片的驱动设计。

关于稳定环的介绍也是由浅到深进行的,加上了很多详细的图片。我希望读者能首先容易地理解所有的闭环补偿方程。然后,即使是初学者,也可以很快地深入这个领域(正如我当年一样)。

书中还有七章介绍 EMI,从最基础的开始,上升到全数学的处理。这在许多相关文献里都是个尽量避免提到的话题,但如今又迫切需要。我认为 EMI 领域还需要进一步研究。为了覆盖全面,书中使用了易读的常见问题解答的形式,同时使用了一些 Mathcad 文件和设计电子数据表。

可以看到,本书力求能够做到名副其实——真正符合书名中的“A to Z”<sup>①</sup>。当然那是不可能完全达到的,至少对功率变换这样包罗万象的领域来说不可能。但是我仍然为此做出了努力。现在万事俱备,我希望你喜欢这本书,虽然它只是一部不那么完整的大全。我希望通过阅读本书能对你未来的工作产生影响。在这个前言中,我讨论了对电子工程师职业道路非常重要的一些问题,这些问题从长远看,对技术本身和做技术的人——也就是你我这些工程师们的影响更大。本书谨献给我们这些默默无闻的工程师。

## 致谢

这是一个很好的开始,在一个阳光灿烂的日子我走进 GT Murthy 博士的办公室,这改变了我的一生。博士那时是总部设在孟买的一家大型电子公司的中央研究开发部的总经理。在他世界领先的电子中心,他已经亲自遴选出许多印度最好的工程师(超过了100人),使他们聚集在一个屋檐下。幸运的是他也是学物理出身的,这当然有助于我们拥有更多共同语言。现在他已经退休了,可是他在我心中永远是完全公正、诚实、尊重事实、以身作则的人。我从他身上学到了很多知识,对我的工程师生涯

<sup>①</sup> 本书英文原版书名为 *Switching Power Supplies A to Z*, A to Z 意为大全。——编者注

影响深远。你可以把这本书看成是博士早期在印度开始的工作的延伸,因为如果没碰到博士我绝对不可能走到今天。事实上,最近几年我常见到无礼又自命不凡的经理,他们真应该好好学学博士的技术和人生方面的优点。

还有几位此后在最要紧的时刻在我身边帮助了我。和蔼可亲的 Planet Analog 网站前任主编 Stephan Ohr 非常信任我,他给了我做一名作者的最初的信心,他的文章也给了我很多灵感。聪明、有进取心、直率的美国国家半导体公司的公关经理 Mike He,虽然他不久前去了另一个公司,但一直跟我保持联系并且在任何需要的时候鼓励我。还有令人喜爱的来自 Elsevier 公司的 Charles Glaser,他很突然地邀我写书,并自始至终地鼓励我。

参与本书大部分章节的审稿并且帮我改进了许多的技术人员有 Harry Holt,美国国家半导体公司的一个非常聪明的高级工程师,他那敏锐的眼光和直接了当的技术反馈好几次节约了我很多时间。

我想特别提到我以前公司的一些工程师,当我写这本书的时候他们设法为我提供不可估量的安宁和积极的动力,他们是 Linh Truong, Anne Lu, Michele Sclocchi, Thomas Mathews, Iain Mosley, Ricardo Capetillo, Maurice Eaglin, Shantha Natarajan, Jerry Zheng, Faruk Nome 和 Wallace Ly。在我现在所在的美国飞思卡尔半导体公司,我想感谢由 Tim Herklots 与 Tony Allen 组成的出色的产品定位小组,当然还有我最新的直话直说的经理 Ken Lenks。

感谢 Elsevier 公司的 Carl M. Soares,很晚才从一个突然离职的产品经理手中接过这个项目,并忍受我不时的不耐烦情绪,非常平稳而且专业地将项目纳入正轨。

当然如果没有我美丽的妻子 Disha 和女儿 Aartika 的无限支持和耐心,这本书完全不可能按期完成。同样别忘了我们家最新的成员 Munchi,还有许多年之前给我力量坚持下去的 Chippy 和 Monty,一次又一次,他们在家里创造了良好的环境让我能够在不眠之夜努力下去。

# 目 录

第 1 章 开关电源的基本原理	1	电感方程	19
1.1 简介	1	1.3.7 对偶原理	20
1.2 概述和基本术语	3	1.3.8 电容方程	20
1.2.1 效率	3	1.3.9 电感放电阶段	21
1.2.2 线性调整器	4	1.3.10 反馈能量和续流电流	22
1.2.3 通过使用开关器件提高效率	6	1.3.11 电流必须连续而其变化曲线斜率不必连续	22
1.2.4 半导体开关器件基本类型	7	1.3.12 电压反向现象	22
1.2.5 半导体开关器件并非理想器件	8	1.3.13 功率变换器的稳定状态及不同工作模式	24
1.2.6 通过电抗元件获得高效率	8	1.3.14 伏秒法则、电感复位和变换器占空比	27
1.2.7 早期 RC 型开关调整器	9	1.3.15 半导体开关的使用及保护	28
1.2.8 基于 LC 的开关调整器	10	1.4 电源拓扑的衍生	29
1.2.9 寄生参数的影响	10	1.4.1 通过二极管控制感应电压尖峰	29
1.2.10 高频率开关时产生的问题	11	1.4.2 达到稳定状态并输出有用能量	30
1.2.11 可靠性、使用寿命和热管理	12	1.4.3 buck-boost 变换器	31
1.2.12 降低应力	14	1.4.4 电路地参考点	32
1.2.13 技术进步	14	1.4.5 buck-boost 变换器的结构	33
1.3 认识电感	15	1.4.6 开关节点	33
1.3.1 电容/电感和电压/电流	15	1.4.7 buck-boost 电路分析	34
1.3.2 电感电容充电/放电电路	15	1.4.8 buck-boost 电路的性质	35
1.3.3 能量守恒定律	16	1.4.9 为什么只有三种基本拓扑	36
1.3.4 充电阶段及感应电流理论	17	1.4.10 boost 拓扑	37
1.3.5 串联电阻对时间常数的影响	18		
1.3.6 $R=0$ 时电感充电电路及			

1.4.11 buck 拓扑 .....	40	法则快速选择电感 .....	68
1.4.12 高级变换器设计 .....	41	2.16 实际例子(2,3和4) .....	69
<b>第2章 DC-DC 变换器设计与磁学</b>		2.16.1 强迫连续模式(FCCM)中	
<b>基础</b> .....	42	的电流纹波率 .....	70
2.1 直流传递函数 .....	43	2.16.2 基本磁学定义 .....	71
2.2 电感电流波形的直流分量和		2.17 实际例子(5)——不增加线圈	
交流纹波 .....	44	匝数 .....	73
2.3 交流电流、直流电流和峰值电		2.17.1 “磁场纹波率” .....	74
流的确定 .....	46	2.17.2 与伏秒数相关的受控电压	
2.4 认识交流电流、直流电流和峰值		方程(MKS单位制) .....	74
电流 .....	47	2.17.3 CGS单位制 .....	75
2.5 最“恶劣”输入电压的确定 .....	49	2.17.4 与伏秒数相关的受控电压	
2.6 电流纹波率 $r$ .....	51	方程(CGS单位制) .....	75
2.7 $r$ 与电感量的关系 .....	52	2.17.5 磁心损耗 .....	75
2.8 $r$ 的最佳值 .....	52	2.18 实际例子(6)——特定场合中	
2.9 电感量与电感体积的关系 .....	54	产品电感的特性 .....	77
2.10 频率对电感量和电感体积的		2.18.1 估计必要条件 .....	77
影响 .....	54	2.18.2 电流纹波率 .....	78
2.11 负载电流对电感量和电感体		2.18.3 峰值电流 .....	79
积的影响 .....	55	2.18.4 磁通密度 .....	79
2.12 供应商标定成品电感额定电流		2.18.5 线圈损耗 .....	80
的方式及成品电感选择 .....	55	2.18.6 磁心损耗 .....	81
2.13 在给定应用中我们需要考虑		2.18.7 温升 .....	81
哪些电感电流额定值 .....	56	2.19 计算其他最恶劣应力 .....	82
2.14 电流限制的范围和容限 .....	58	2.19.1 最恶劣磁心损耗 .....	82
2.15 实际例子(1) .....	60	2.19.2 二极管最恶劣损耗 .....	83
2.15.1 设置 $r$ 时需考虑电流		2.19.3 开关管最恶劣损耗 .....	83
限制 .....	61	2.19.4 输出电容最恶劣损耗 .....	85
2.15.2 确定 $r$ 需考虑连续导电		2.19.5 输入电容最恶劣损耗 .....	85
模式 .....	62	<b>第3章 离线式变换器设计与磁学</b>	
2.15.3 当用低 ESR 电容时应将 $r$		<b>技术</b> .....	88
设置得大于 0.4 .....	64	3.1 反激变换器磁学技术 .....	89
2.15.4 设置 $r$ 时应避免装置不		3.1.1 变压器绕组极性 .....	89
平衡 .....	64	3.1.2 反激变换器中变压器功能	
2.15.5 设置 $r$ 应避免次谐波		及其占空比 .....	90
震荡 .....	66	3.1.3 等效的 buck-boost 模型 .....	92
2.15.6 用“ $L \times I$ ”和“负载缩放比例”		3.1.4 反激变换器电流纹波率 .....	94

3.1.5 漏感 .....	94	变化 .....	160
3.1.6 齐纳管钳位损耗 .....	95	5.14 使驱动器相对于 MOSFET 性能最佳 .....	161
3.1.7 二次漏感同样影响一次侧 .....	95	<b>第 6 章 印制电路板的布线</b> .....	163
3.1.8 有效一次漏感电感测量 .....	96	6.1 引言 .....	163
3.1.9 实际例子(7)——反激变压器设计 .....	96	6.2 布线分析 .....	163
3.1.10 导线规格与铜皮厚度选择 .....	101	6.3 布线要点 .....	164
3.2 正激变换器磁学技术 .....	104	6.4 散热问题 .....	169
3.2.1 占空比 .....	105	<b>第 7 章 反馈环路分析及稳定性</b> .....	170
3.2.2 最恶劣电压输入 .....	107	7.1 传递函数、时间常数与强制函数 .....	170
3.2.3 窗口面积利用 .....	108	7.2 理解 $e$ 及绘制对数坐标曲线 .....	171
3.2.4 磁心型号与其所通功率 .....	109	7.3 时域分析与频域分析 .....	173
3.2.5 实际例子(8)——正激变换器变压器设计 .....	110	7.4 复数表示 .....	173
<b>第 4 章 拓扑 FAQ</b> .....	123	7.5 非周期激励 .....	174
问题与解答 .....	123	7.6 $s$ 平面 .....	175
<b>第 5 章 导通损耗和开关损耗</b> .....	140	7.7 拉普拉斯变换 .....	176
5.1 开关接电阻性负载 .....	140	7.8 扰动和反馈作用 .....	178
5.2 开关接感性负载 .....	143	7.9 RC 滤波器的传递函数 .....	179
5.3 开关损耗和导通损耗 .....	146	7.10 积分运算放大器(零极点滤波器) .....	181
5.4 建立 MOSFET 简化模型以研究感性负载时的开关损耗 .....	147	7.11 对数平面中的数学 .....	183
5.5 变换系统中寄生电容的表示 .....	148	7.12 LC 滤波器的传递函数 .....	183
5.6 门极开启电压 .....	149	7.13 无源滤波器传递函数小结 .....	186
5.7 导通转换 .....	149	7.14 极点和零点 .....	187
5.8 关断转换 .....	152	7.15 极点和零点的相互作用 .....	188
5.9 栅荷系数 .....	152	7.16 闭环增益和开环增益 .....	189
5.10 实际例子 .....	156	7.17 分压网络 .....	191
5.10.1 导通时 .....	156	7.18 PWM 传递函数(增益) .....	192
5.10.2 关断时 .....	157	7.19 电压前馈 .....	193
5.11 把开关损耗分析应用于开关拓扑 .....	158	7.20 主电路传递函数 .....	194
5.12 对开关损耗而言的最恶劣输入电压 .....	159	7.21 所有拓扑的调节器传递函数 .....	194
5.13 开关损耗怎样随寄生电容		7.21.1 buck 变换器 .....	194
		7.21.2 boost 变换器 .....	195
		7.21.3 buck-boost 变换器 .....	197

7.22	反馈网络传递函数	198
7.23	闭环	200
7.24	环路稳定性判据	201
7.25	带积分器的开环波特图	201
7.26	抵消 LC 滤波器双重极点	203
7.27	ESR 零点	203
7.28	3 型运算放大器补偿网络的设计	204
7.29	反馈环路优化	207
7.30	输入纹波抑制	209
7.31	负载暂态	210
7.32	1 型和 2 型补偿网络	211
7.33	跨导运算放大器补偿网络	211
7.34	简化跨导运算放大器补偿网络	215
7.35	电流模式控制补偿	217
<b>第 8 章</b>	<b>EMI 基础——从麦克斯韦方程到 CISPR 标准</b>	<b>224</b>
8.1	标准	224
8.2	麦克斯韦到 EMI	226
8.3	敏感度/抗扰性	230
8.4	一些与成本相关的经验	231
8.5	组件的 EMI 问题	231
8.6	CISPR 22 对电信端口的规定——修订意见	232
<b>第 9 章</b>	<b>传导 EMI 限值及测量</b>	<b>234</b>
9.1	差模和共模噪声	234
9.2	如何测量传导 EMI	236
9.3	传导发射限制	240
9.4	准峰值、平均值和峰值测试	242
<b>第 10 章</b>	<b>实际的电源输入 EMI 滤波器</b>	<b>244</b>
10.1	EMI 滤波器设计的安全问题	244
10.2	实际的电源输入滤波器	246
10.3	Y 电容总容量的安规限制	251
10.4	等效 DM 和 CM 电路	252
10.5	一些重要的 EMI 工程经验	254
<b>第 11 章</b>	<b>开关电源的 DM 与 CM 噪声</b>	<b>255</b>
11.1	主要 DM 噪声源	255
11.2	主要 CM 噪声源	256
11.3	地电抗器	263
<b>第 12 章</b>	<b>电路板 EMI 解决方案</b>	<b>264</b>
12.1	变压器的 EMI 问题	264
12.2	二极管的 EMI 问题	269
12.3	磁珠的工程应用——抑制肖特基二极管的 $dV/dt$	270
12.4	基本布线方案	271
12.5	最后的 EMI 抑制措施	272
12.6	能否通过辐射测试	274
<b>第 13 章</b>	<b>EMI 滤波器的输入电容和稳定性</b>	<b>275</b>
13.1	DM 扼流环是否饱和	275
13.2	DC-DC 变换器模块的实用电网滤波器	278
<b>第 14 章</b>	<b>电磁难题的数学基础知识</b>	<b>284</b>
14.1	数学基础知识之傅里叶级数	284
14.2	矩形波	285
14.3	矩形波分析	287
14.4	梯形波	288
14.5	梯形波的 EMI 问题	290
14.6	高性价比滤波器的设计	291
14.7	实际 DM 滤波器设计	293
14.8	实际 CM 滤波器设计	295
14.8.1	第一种方法(快速)	295
14.8.2	第二种方法(详细法)	296
<b>附录 1</b>	<b>聚焦实际问题</b>	<b>298</b>
<b>附录 2</b>	<b>设计参考表</b>	<b>330</b>
<b>参考文献</b>		<b>332</b>

# 第 1 章

## 开关电源的基本原理

### 1.1 简介

想象在某个傍晚的交通高峰时刻,我们站在一个川流不息的地铁站,几乎同时,成千上万的旅客涌向这个车站准备回家。当然,不可能有一辆车大到足以同时装载所有的旅客。我们该如何解决这个问题?很简单,我们把这些旅客进行分流,然后陆续地把他们运送出去。此后,许多要去外地的旅客还会选择其他可能的交通工具。这样,地铁的运输量就会转变为公交车或出租车等等的运输量。但是,最终人群还会再次汇合,我们就能看到巨大的人流从目的地出口涌出来。

开关电源和一个大规模的运输系统非常相似。不同的是,从一个地方传输到另一个地方的是能量而不是人。也就是我们从一个输入源连续地获取能量,用一个开关(晶体管)把这些能量截成一个一个能量包,然后通过一些元件(电容和电感)进行传输,从而可以按照要求在其中调整和转换这些能量包。最后,我们再把这些能量包汇合,从而在输出端得到平稳的能量。

在上述运送旅客和传输能量两种情况下,从观测者的角度看,我们可以看到一个连续的输入和一个类似的连续输出。但是在中间阶段,是把连续的输入截断成更容易处理的包来完成这种输入输出。

深入分析车站的例子,我们还可以发现要在规定时间内运输一定数量的旅客(在电子工程学中,单位时间内传输的能量称为功率),一种方法是使用大型列车,相隔时间相对长一些,另一种方法是使用一些小型列车,相隔时间就很短。因此,开关电源工作频率通常很高就不足为奇了。最根本的目的就是减少能量包的大小,从而减少用来存储和传输能量的元件的尺寸。

应用这种原理的电源就称为开关电源或者开关型功率变换器。

DC-DC 变换器是现代高频开关电源最基本的构件。顾名思义,它把已知直流输入电压  $V_{in}$  转换成所需要的或易于使用的直流输出电压  $V_o$ 。图 1-1 所示 AC-DC 变换器,也称为离线式电源,其特点是从输入电网(或输入接电网)取电。它们首先将输入的正弦交流电压  $V_{AC}$  整流为直流电压(通常称为 HVDC 或者高压直流母线),作为后级 DC-

DC 变换电路的输入。因此,从本质上说功率转换几乎就是 DC-DC 电压变换过程。

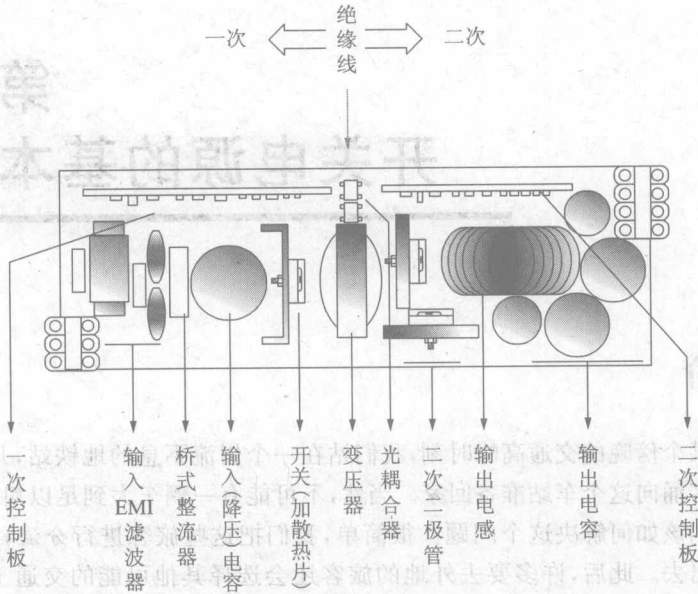


图 1-1 典型的离线式电源

然而,从可能会有很大波动的直流输入电压或者从不同的直流输入电压得到稳定的直流输出电压都很重要。因此,在所有功率变换器中都会使用控制电路来实时监测输出电压,并将其与内部参考电压进行比较。如果输出电压与其设定电压值有偏差,就采取调整措施。这个过程叫做输出调整或简称调整。因此,行业里将可实现调整、开关等作用的电源称为电压调整器。

实际应用中,电源工作条件包括输入电压  $V_{IN}$  (有时是网压), 所要得到的输出电流  $I_O$  和输出电压  $V_O$ 。温度也是工作条件之一,但它对系统的影响通常不那么明显,这里暂忽略。这样,对给定输出电压,存在两个典型工作条件,其值的改变能够不通过控制电路而直接引起输出电压迅速变化。当输入电压  $V_{IN}$  在规定工作范围  $V_{INMIN} \sim V_{INMAX}$  内变化时,保持输出电压稳定的过程称为网压调节;当  $I_O$  在其工作范围  $I_{OMIN} \sim I_{OMAX}$  内变化时,调节稳压的过程称为负载调节。当然,事情不可能尽善尽美,调节功能也如此。因此,尽管有调节环节,输出电压仍会有微小可测的波动,称为  $\Delta V_O$ 。网压调节用数学式子表示为  $\Delta V_O / V_O \times 100\% (V_{INMIN} \sim V_{INMAX})$ , 类似地负载调节表示为  $\Delta V_O / V_O \times 100\% (I_{OMIN} \sim I_{OMAX})$ 。

然而,由于任何物理过程都不能瞬时完成,所以,当网压和负载突然变化时电源调整输出的速度就很重要。变换器在外部扰动下能否快速调整输出取决于其环路响应。如前所述,环路响应是变换器对阶跃负载的响应和瞬态输入的响应之综合。

以下,我们将首先向读者介绍功率变换器的一些最基本术语及其关键性影响参



数。然后,介绍功率变换器中最重要的器件——电感的特性,甚至有相当经验的电源设计人员对电感的应用也会感到困难。显然,如果对关键器件及基本理论没有清楚的理解就无法进行开关电源的进一步设计。只有在对电感性能有了足够的理解之后,才能更好地理解开关变换器本身理论。事实上,理解了电感,开关变换器技术也就迎刃而解了。

## 1.2 概述和基本术语

### 1.2.1 效率

任何完成功率转换功能的调整器都涉及效率,将其定义为

$$\eta = \frac{P_O}{P_{IN}}$$

其中, $P_O$  是输出功率

$$P_O = V_O \times I_O$$

$P_{IN}$ 是输入功率

$$P_{IN} = V_{IN} \times I_{IN}$$

这里, $I_{IN}$ 是输入电源提供的平均电流或直流电流。

我们期望  $\eta=1$ ,这表示效率为 100% 的理想转换器。但在实际转换器中效率  $\eta < 1$ ,  $P_{IN} - P_O$  的差值就是功率损耗  $P_{LOSS}$ ,或称损耗,它在变换器内部产生。通过简单计算可以得到

$$P_{LOSS} = P_{IN} - P_O$$

$$P_{LOSS} = \frac{P_O}{\eta} - P_O$$

$$P_{LOSS} = P_O \times \left( \frac{1-\eta}{\eta} \right)$$

这是用输出功率表示的损耗,如果用输入功率表示,类似地可以得到

$$P_{LOSS} = P_{IN} \times (1-\eta)$$

损耗在变换器中表现为热量,并产生高于室温(或环境温度)的可测量温升  $\Delta T$ 。注意该温升会影响系统的稳定性。经验表明,温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ,系统失效的可能性就会加倍。因此,作为设计人员的技能之一就是尽量减少温升,由此提高效率。

再看变换器的输入电流,假定效率为 100%,可以得到

$$I_{IN\_ideal} = I_O \times \left( \frac{V_O}{V_{IN}} \right)$$

在变换器中,实际输入电流是其理想值的  $1/\eta$

$$I_{IN\_measured} = \frac{1}{\eta} \times I_{IN\_ideal}$$