



图灵电子与电气工程丛书

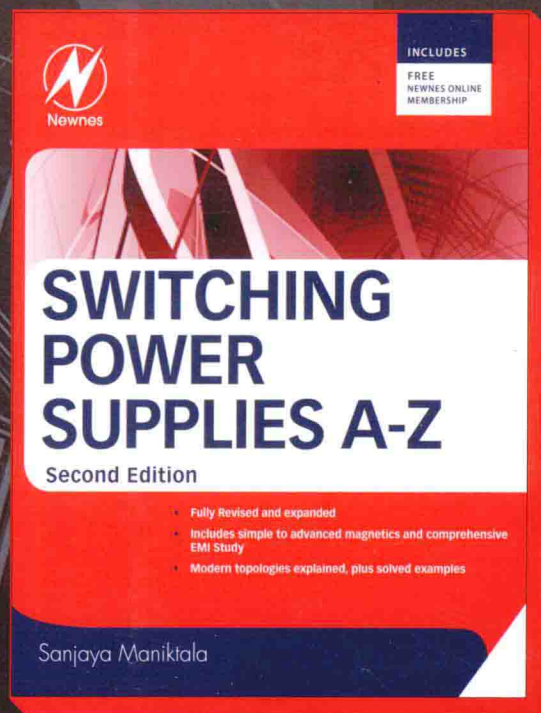


开关电源经典著作全面扩展升级
数万读者的选择

精通开关电源设计

Switching Power Supplies A-Z, 2E (第2版)

[美] Sanjaya Maniktala 著
王健强等 译



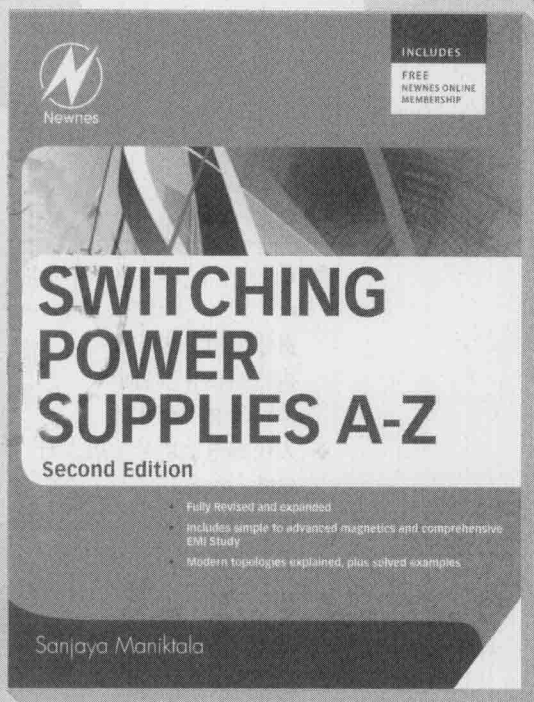
TURING

图灵电子与电气工程丛书

精通开关电源设计

Switching Power Supplies A-Z, 2E (第2版)

[美] Sanjaya Maniktala 著
王健强等译



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 : 第2版 / (美) 马尼克塔拉
(Maniktala, S.) 著 ; 王健强等译. — 北京 : 人民邮电
出版社, 2015. 1

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-36795-2

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第187961号

内 容 提 要

本书基于作者多年从事开关电源设计的经验, 从分析开关变换器的最基本器件——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、反激电源)及其磁性元件设计、功率器件选择和损耗计算、印制电路板布线技术、三种主要拓扑在电压/电流模式下的控制环稳定性, 以及开关电源电磁干扰(EMI)理论和实践等。书中还解答了变换器拓扑的常见问题, 讨论了开关电源设计实例、工业经验和难点对策等。

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

-
- ◆ 著 [美] Sanjaya Maniktala
 - 译 王健强 等
 - 责任编辑 朱 巍
 - 执行编辑 李岩俨
 - 责任印制 焦志炜
 - ◆ 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>
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 32.75
 - 字数: 832千字 2015年1月第1版
 - 印数: 1-4 000册 2015年1月河北第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2012-7216号

定价: 99.00元

读者服务热线: (010)51095186转600 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

译者序

近年来,国内作者编写的开关电源书籍层出不穷,各大出版社争相引进的国外译本也有很多,令人目不暇接,难以选择。但其中图灵电子与电气工程丛书精选国外畅销的开关电源书籍加以编译,是该类图书中的精品系列。这也是译者欣然接手本书翻译工作的原因。

本书虽然是《精通开关电源设计》的第2版,但与前一版相比,至少增加了1/3以上的内容。原书作者具有丰富的开关电源工程设计经验和独到的见解,这些都在本书中得到了充分的体现。因此,本书适合具有基本的电力电子基础知识,对学习开关电源知识有浓厚兴趣的学生,以及急于提高自身理论功底和实用技能的开关电源工程师使用。

本书中,作者并没有面面俱到地介绍所有开关电源拓扑,而是仅选取最基本、最具有代表性的3种基本拓扑(升压、降压和升降压)做深入分析。这使得作者有精力与篇幅去介绍更为精细的开关电源设计方法,达到了以点带面的效果。作者由开关电源中最重要也是最难理解的元件——电感入手,系统介绍了3种基本拓扑演变、磁性元件设计、功率器件选择和损耗计算、印制电路板设计、反馈环路设计、前级电路设计以及开关电源的电磁干扰问题等内容,并结合设计实例做了深入分析。

本书第1章到第4章与前一版内容基本一致,前一版第5章变成本书第8章,前一版第6章变成本书第10章,前一版第7章变成本书第12章,前一版第8章到第14章内容作者已经重新编写成本书第15章到第18章。虽然上述内容与前一版多有重复,但是为了保证本书译文风格统一,我们还是在听取前一版读者评论的基础上,对全书内容重新进行了翻译。然而前一版译本显然是本书最好的参考资料,因此我们在此向前一版译者的辛勤工作致以由衷的敬意!

北京交通大学电气工程学院研究生程鹏天(第2章)、杜秀(第3章和第7章)、周向阳(第4章)、李晓萍(第5章、第10章、第15章、第16章和第19章)、吕超(第6章、第12章和第14章)和白娇娇(第8章、第9章和第13章)参加了部分章节的初译工作,研究生李晶、邓红霞参加了全书的校译工作。我在此对他们的帮助表示衷心的感谢!此外,感谢人民邮电出版社图灵公司的编辑对本书译稿所做的严格而细致的工作!

我们深知读者对科技译文的要求越来越高,虽然始终秉承“信、达、雅”的翻译理念,历时7个多月的高强度工作,数易其稿,然而水平和经验着实有限,敬请读者批评指正。

王健强
于北京交通大学

前 言

很高兴在此向读者介绍本书，该书第1版曾被读者称为“红皮书”。第2版与第1版几乎完全不同。我将解释这是为什么，并与读者分享本书最终得以出版的原因。

2007年停笔后，我非常确信我不会再为这个主题多写一个字。我停止撰写开关电源应用笔记、*EE Times*杂志专栏文章等，这些都是我过去曾经热衷的事情。我自诩已经成为电能变换领域中“凯特·斯蒂文斯”^①一类的人物。在专业上，我涉足了一个完全不同的领域：以太网供电(POE)(这也许是我下一本书的主题)。然而回首过往，我自愿停笔的真正原因或许只是想极力避免遭遇即将到来的“写作瓶颈”，怕被这列货车碾得粉碎(更像把我放在砧板上剁碎)。现在，我终于可以承认，在过去那些紧张、冒险、茫然的时刻里，我甚至曾秘密地思索去写一本小说，而不是本书。我想写一些原创性的东西，也许就像J.K.罗琳那样。改变也许会使我赚一大笔钱(确实是一大笔钱，不是零花钱)。然而，我还是从梦幻中醒来。因此，我转而面对现实，四年之后，我其实高兴地发现我已经差不多在第1版的基础上又完成了一本新书。真的，即使经历了长达九个月的熬夜，以及周末的疯狂写作之后，我仍然无法停笔。我生动地梦想着用令人惊叹的高清晰度希腊字母来装饰出版的Mathcad程序(这在几年前只有Technicolor公司才做得到，究竟发生过什么)。我的妻子和女儿告诉我，那段时间里，我曾经不时地、不断地游离在她们的生活之外。

第2版新加入了6章，噢不，是8章。第1版中有关电磁干扰(EMI)的7章现在改编成4章。但内容并没有压缩，只是重新编排。事实上，采用了更好的图表后，这部分内容反而增强了。另外，新加入了几个详细的设计案例，第1版的错别字和错误也已经订正。

至于磁学部分，读者将看到完整的有关反激磁芯尺寸计算的原始方程，它们在第1版中就像凭空虚构的一样。是的，那些看起来简单得令人生疑，或者好得令人难以置信的方程如今在第5章中均给出了详细的推导过程(特别是考虑到读者在其他文献中根本找不到它们)。这些公式从始至终都是精确的，这对于我这个作者来说是莫大的宽慰，或许对读者也是如此。而且，第5章从独特的三种不同拓扑结构的能量传输图开始，介绍了更多内容。我非常确信功率变换过程从未被相关文献以如此基本的或基础的方式解释过。的确，我喜欢直截了当。所有新资料都能以理服人，尤其是对那些磁学怀疑论者。但为了安全起见，我还是给出了全部方程和原始的Mathcad工作表，放在第1版第3章中曾出现的交流电阻/近似分析图后(本书没有附赠Mathcad程序光盘，只有文本)。第5章利用我提出的独特的“z因数”法对有气隙磁芯做了非常简洁的说明。我承认，这个特殊的点子早在几年前与我的导师G.T. Murthy博士(他当然可称为历史英雄，现已退休)讨论时就出现在我的脑海里。读者可能还记得，我在孟买时曾在他手下工作过5年。的确，孟买就是激发我灵感的城市，虽然在第1版中并未提及，但是它使我提出众所周知的功率变换“火车终点站模拟”法，这在本书第1页就会讲到。我无意中认识到，第1

^① 20世纪60年代著名的流行音乐偶像，在声名如日中天时突然神秘退出歌坛。——编者注

章显然被大多数读者所喜爱，因此除了修正一些图形和若干排版错误外，并未对它进行修改。第 2 章到第 4 章也有了明显的改进，第 1 版中的第 5 章和第 6 章也是如此（第 2 版中是第 8 章和第 10 章）。这些内容已经相当充实（如果过于苛求，保证会引人困惑）。但是，完美主义者可能要在这儿抓我的把柄了。

我一直觉得磁学并不像某些人认为的那样可怕和难懂。但是，即使确实想做一些化简复杂内容的工作，我也并不想走捷径，或是在某种程度上假装它是“如此简单”，因为它真的不简单，任何关于功率变换的东西都不简单。这些年来，我们费尽周折学会了从不单凭封面来评价一本书的好坏，或仅凭尺寸（或元件数量）来评价变换器的优劣。尤其是磁学，有时是违反直觉的，这需要我们时刻警惕。控制环路稳定性也是如此，它也不“简单”，但若有正确指导，它会比你最初想象的要容易一些。我当然不想让年轻的工程师们重蹈我的覆辙，认为理解难以捉摸的功率变换领域的唯一办法就是去疯狂地寻找一张独特的邀请函，凭此加入由有经验（也是相当傲慢的）的设计师们组成的特权俱乐部。在外界看来，那些设计师们在一些散布着闪闪发光的极点和零点的神秘虚平面中过着令人羡慕的生活。因此，为了更加简明地叙述第 1 版的内容，我重新编写了有关控制环路稳定性的全部章节。随后，第 19 章用详细的案例进一步加以解释。我还加入了一部分有关次谐波不稳定性 and 斜坡补偿的新内容，并借此向我曾收到的一篇关于第 1 版的相当热情且富有建设性的网页评论致谢（读者仍然能从 Analogzone 网站中找到这篇评论，现在的网址是 En-genius.net）。

重新架构本书的过程中，大量新增内容的自然衔接（“不拼凑”是我对自己的承诺）和通顺简洁（我知道这是矛盾的）最终使我明显陷入窘境。我力图不在文中插入大公式和通篇推导，以保持第 1 版中经常提到的可读性。我并不想把本书编成一本令人恐惧的教科书，除了痴迷于电气工程的学生外，把其他人都吓跑。我一直期望我的书能对实际生产有用，而不是仅用来得高分。另一方面，我确实想过把所有这些新加的“重头戏”都包含进去，为那些更有经验的、需求更多的从业者和专业人员所用。所以，我选择了显而易见的折中方式：一种乍看起来很繁琐的“挂图”形式。抛开第一印象不谈（我将给读者留出充足的时间来理解它），这个想法其实很简单：作为读者，假如你并不想这么快就了解更多细节，在读第一遍的时候你可以也应当略过这些图。这些图得出的结论在下文中都有很好的概括。然后，在你准备好（或有足够经验）深入探讨时，你可以重读这些图。这时你会发现你所需要的全部信息都触手可及，并以一种比较难懂但是界限清晰的几页——我称为“挂图”的形式给出。你也可以把这些页面作为快速参考或者是备忘录来继续学习。换句话说，我希望读者不是很快地，而是逐渐地喜欢这种形式，不但为本书所用，而且能发扬光大。

本书还包括一些先进的和现代的（新兴的）主题：例如耦合电感（第 13 章）。但是，讨论这些问题需要大量的数学知识，并没有多少直观的知识能用来描述它们。因此，可以暂时略过这些问题，但我认为它们很有用，而且将会得到全面发展（据我了解，还没有一本关于功率变换的书为普通读者提炼这些技巧）。我的分析是基于 IEEE 搜索引擎（IEL）上一些分散的、但很精彩的文章。本书对这些原始资料以更新参考文献方式致以谢意。在我撰写这一特定章节时，我意识到在该主题上我不能毫无保留地接受读到的每一篇文章或论文，这是一个颇费时日才得来的教训。我建议读者也这样做，以避免产生不必要的困惑。我看过一些论文和文章，它们号称行星地球上所有改进的事物都是电感耦合的结果。但我知道功率变换的确如此，如果有差异的话，那也是由于权衡和设计折中。作为工程师，我们几乎本能地希望不论优点还是缺点都能被符合逻辑地列出，就像同一硬币的两个面一样清晰。不然的话，我承认我会担心一些来自优

质企业的潜在的优秀工程报告，首先要经过市场营销才能被大家所接受。

第 9 章较长，介绍了一些非常独特的观点，但我会让读者自己来评判其最终价值。是否能改天换地？请告诉我答案。第 14 章也一样，就看你是否也喜欢这一章。即使作者在某些章节中做了大量探究工作，也永远要允许读者做出最终判断。我对读者的期望是：对于这些很难理解的章节，请不要浏览一次就下结论。

最后，我们随便聊聊。例如，读者可能已经注意到，新版的总体颜色碰巧也是红色。所以，我得以继续用老方式提及它。在我这把年纪，人们很快就会认识到试图改变习惯从来不是一个好主意；建议的改变常常比习惯更快地倒毙在路旁。不信问问陪伴我二十年的妻子！因此，我很高兴仍能称这本书为“红皮书”，而且我依然待在让我舒适的领域中。除了书名以外，这次确实有些东西明显地、彻底地改变了：不只是内容，而是方方面面，事实上可能一切都改变了，唯独封面依旧。噢？没错，这本书的确是老版本的新编。我相信本书能到这一步说明之前的版本很成功。因此，对于这些里程碑式的成就，除了感谢一直支持我的出版商之外，我真的还要诚挚地感谢这些年来我忠实的读者们。尤其是那些原本完全陌生的人，他们从繁忙的工作日程中挤出宝贵的时间，或者给我写信，或者在网站上发表一些非常好的、显然是由衷的四星或五星级评论（由于众所周知的原因，我没有理会一些很明显的长篇大论）。然而，我需要向一些读者致歉，因为我无法做到随时回复你们那些相当鼓舞人心的邮件。但请明确一点：正是因为你们，本书如今才得以面世。是你们创造了这本书，是你们使我振作精神继续写作。因此，本书无论以何种外观或形式出版，无论封面是什么颜色，都会载有我的这句话：非常感谢读者过去的支持和祝愿，我希望读者能够比第 1 版更喜欢这本书。

Sanjaya Maniktala

于加利福尼亚州弗里蒙特市

致 谢

许多人以各种方式参与了本书创作，我衷心地感谢他们。

(1) 首先要感谢忙碌且胜任的技术评论员 Sheshagiri Haniyur。他的确非常仔细地阅读了本书，写下了大量非常恰当的评论。他甚至要求我重写第 14 章，我很快照办了。

(2) 两位非常聪明的读者给了我毫无保留的技术反馈。多年来，他们通过电子邮件与我交流，并且逐字逐句极其仔细地检查了上一版各章中的几乎每一个公式。他们确实帮助我改进了本版的一些重要章节。我必须感谢他们，马来西亚的 Chee How 和意大利的 Meroni Silvano（排名以参与时间为序）。我从来没有见过他们，但是我欣赏他们的态度、技巧和勤奋。他们也多次指正我的错误，他们的意见我在本版中全部接受。所以，请让我知道我所写的是否正确和是否易于理解。

(3) 一位令人喜爱的书评作者，上一版就参与了创作，这次又帮我搞定了许多章节，他就是 Harry Holt。一如既往地感谢非常正直、坦诚的 Harry。他让本书越变越好。感谢那些非常忙碌的、新的书评作者以及本书的支持者，包括我的前同事 Dipak Patel。

(4) 还有一些成就了本书出版的重要读者和书评作者，他们是 Ken Coffman、Gautam (Tom) Nath 和 Inder Dhingra。

(5) 不能忘了我所认识的最优秀的公关经理 Mike He。几年前，我还在国家半导体公司时，他手把手地指导我写作并让我小有名气。此外，他还是我的挚友。

(6) 我发现 Elsevier 出版社的职员们是最好的工作伙伴。我从未忘记我的第一个责任编辑，为人极好的 Chuck Glaser。这次，责任编辑换成了同样可爱、善于给人勇气的 Tim Pitts。要知道，Tim 是对本书出版最重要的人。而且，他派了两名出色的员工 Charlotte (Charlie) Kent 小姐和 Sally Mortimore 小姐帮助我，给了我超乎寻常的支持。

(7) 每次我的妻子都说向她致谢是陈词滥调，这次我本该不再找麻烦。但我真心感谢她。九个月以来，我在她的生活里形同虚设。但她坚忍地承担了一切，完全理解和支持我。我可爱的女儿 Aartika 也是一样。还有我那两个毛茸茸的四脚朋友 Munchi 和 Cookie，两条可爱的马耳他犬。当我快累晕时，它们会体贴地舔醒我。

(8) 我们不应忘记这本书是 G. T. Murthy 博士工作成果的延伸。当今世界上，他对我们中的许多人仍在产生持续的影响。他不仅是我的导师，而且在我最需要的时候给了我一种生活和一份事业。他无疑是一个我所知道的最进步、最高尚和最人性化的管理者。他愿意而且经常用他卓越的影响力为他的战友而战，为他坚定的信仰而战。他不是那种在不幸的现代常规职场意义上只追求识时务、说对话的老好人。我还记得，他似乎一直比我自己还了解我，很不可思议。所以，我至今仍为结识他而感到自豪，希望他健康长寿。

(9) 许多读者给我写信表达诚挚的谢意和鼓励。他们的真诚和热情，使得像我一样的作者感觉一切辛苦都是值得的，这也是我们以新书回报的真正原因。所以，我在此必须同样真诚地感谢他们中的一些人：Gheorghe (Gigi) Plaesoianu、Mark Markell、Chris Themelis、Roberto

Zanzottera、Mirza Kolakovic、Raja Darekar、Sanjay Agrawal、Gene Krzywinski、Ramesh Tirumala、Stephen Blake、Xiaohong Zhu、Charles Potter、Robert Haugum、Xia Heng、Eric Wen、Roc Zhu、Cyril Aloysius Quinto、Sridhar Gurram、Alex Byrley、Meng(Mark) Jianhui、Bingbing Song、Michael Chang、Wei Guan、Ronald Moradkhan、Amalendu Iyer、Georg Glock，以及我可能已经忘记名字的那些人。感谢所有给我写信的读者，他们都推动了本书的出版。

(10) 我还要真诚地感谢 Debbie Clark，Elsevier 出版社的产品主管。依我看来，是她极大的耐心最终使本书得以出版，并且看起来很棒。

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 开关功率变换原理 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 概述和基本术语 | 2 |
| 1.2.1 效率 | 2 |
| 1.2.2 线性调整器 | 4 |
| 1.2.3 利用开关器件提高效率 | 5 |
| 1.2.4 半导体开关器件的基本类型 | 6 |
| 1.2.5 半导体开关器件并非理想器件 | 6 |
| 1.2.6 利用电抗元件提高效率 | 7 |
| 1.2.7 早期RC型开关调整器 | 8 |
| 1.2.8 LC型开关调整器 | 8 |
| 1.2.9 寄生参数的影响 | 9 |
| 1.2.10 高频开关时的问题 | 10 |
| 1.2.11 可靠性、使用寿命和热管理 | 11 |
| 1.2.12 应力降额 | 12 |
| 1.2.13 技术进展 | 12 |
| 1.3 电感 | 13 |
| 1.3.1 电容、电感和电压、电流 | 13 |
| 1.3.2 电感和电容的充放电电路 | 13 |
| 1.3.3 能量守恒定律 | 14 |
| 1.3.4 充电阶段和感应电压概念 | 15 |
| 1.3.5 串联电阻对时间常数的影响 | 16 |
| 1.3.6 $R=0$ 时的电感充电电路和电感方程 | 17 |
| 1.3.7 对偶原理 | 18 |
| 1.3.8 电容方程 | 19 |
| 1.3.9 电感放电阶段 | 19 |
| 1.3.10 反激能量和续流电流 | 20 |
| 1.3.11 电流必须连续,但其变化率未必 | 20 |
| 1.3.12 电压反向现象 | 20 |
| 1.3.13 功率变换中的稳态及其不同工作模式 | 21 |
| 1.3.14 伏秒定律、电感复位和变换器的占空比 | 24 |
| 1.3.15 半导体开关器件的使用和保护 | 25 |
| 1.4 开关拓扑的演变 | 27 |
| 1.4.1 通过二极管续流控制感应电压尖峰 | 27 |
| 1.4.2 达到稳态并获得有用能量 | 28 |
| 1.4.3 升降压变换器 | 29 |
| 1.4.4 电路的地参考点 | 30 |
| 1.4.5 升降压变换器结构 | 30 |
| 1.4.6 交换结点 | 31 |
| 1.4.7 升降压变换器分析 | 31 |
| 1.4.8 升降压变换器特性 | 32 |
| 1.4.9 为什么仅有三种基本拓扑 | 33 |
| 1.4.10 升压拓扑 | 34 |
| 1.4.11 降压拓扑 | 37 |
| 1.4.12 高级变换器设计 | 38 |
| 第 2 章 DC-DC 变换器及其磁性元件设计 | 39 |
| 2.1 直流传递函数 | 40 |
| 2.2 电感电流波形中的直流分量和交流纹波 | 40 |
| 2.3 交流电流、直流电流和峰值电流的定义 | 42 |
| 2.4 理解交流、直流和峰值电流 | 44 |
| 2.5 定义“最恶劣”输入电压 | 45 |
| 2.6 电流纹波率 r | 47 |
| 2.7 r 与电感值的关系 | 47 |
| 2.8 r 的最优值 | 48 |
| 2.9 是电感尺寸,还是电感值 | 49 |
| 2.10 负载电流对电感值和电感尺寸的影响 | 50 |
| 2.11 供应商如何标定成品电感的额定电流,以及如何选择电感 | 50 |
| 2.12 给定应用中需要考虑的电感电流额定值 | 51 |
| 2.13 电流限制的范围和容限 | 53 |

| | | | |
|---|----|------------------------------------|-----|
| 2.14 实例 (1) | 55 | 2.18.9 一般输入电容选择步骤 | 80 |
| 2.14.1 设置 r 值时,对电流限制的考虑 | 56 | 第3章 离线式变换器及其磁性元件设计 | 81 |
| 2.14.2 r 值固定时,对连续导通模式的考虑 | 57 | 3.1 反激变换器的磁性元件 | 81 |
| 2.14.3 使用低等效串联电阻的电容时, r 值应设为大于0.4 | 58 | 3.1.1 变压器绕组的极性 | 81 |
| 2.14.4 设置 r 值以避免器件特殊性带来的问题 | 59 | 3.1.2 反激变换器的变压器功能及其占空比 | 83 |
| 2.14.5 设置 r 值以避免次谐波振荡 | 60 | 3.1.3 等效升降压变换器模型 | 85 |
| 2.14.6 使用 $L \times I$ 和负载缩放法快速选择电感 | 63 | 3.1.4 反激变换器的电流纹波率 | 86 |
| 2.15 实例 (2、3和4) | 63 | 3.1.5 漏感 | 87 |
| 2.15.1 强迫连续导通模式下的电流纹波率 r | 64 | 3.1.6 稳压管钳位损耗 | 87 |
| 2.15.2 基本磁定义 | 65 | 3.1.7 副边侧漏感也影响原边侧 | 87 |
| 2.16 实例 (5) 不增加匝数 | 67 | 3.1.8 测量有效的原边侧漏感 | 88 |
| 2.16.1 磁场纹波系数 | 68 | 3.1.9 实例 (7) 反激变压器设计 | 88 |
| 2.16.2 用伏秒积来分析电压型方程 (MKS单位制) | 68 | 3.1.10 选择线规和铜箔厚度 | 93 |
| 2.16.3 CGS单位制 | 68 | 3.2 正激变换器的磁性元件 | 96 |
| 2.16.4 用伏秒积来分析电压型方程 (CGS单位制) | 69 | 3.2.1 占空比 | 96 |
| 2.16.5 磁芯损耗 | 69 | 3.2.2 最恶劣输入电压 | 98 |
| 2.17 实例 (6) 特定应用中成品电感的特性 | 70 | 3.2.3 利用窗口面积 | 99 |
| 2.17.1 评估需求 | 70 | 3.2.4 磁芯尺寸与其功率吞吐量的关系 | 100 |
| 2.17.2 电流纹波率 | 72 | 3.2.5 实例 (8) 正激变压器设计 | 101 |
| 2.17.3 峰值电流 | 72 | 第4章 拓扑的常见问题和解答 | 113 |
| 2.17.4 磁通密度 | 73 | 第5章 高级磁技术:最优磁芯选择 | 128 |
| 2.17.5 铜损 | 73 | 5.1 第1部分:能量传输原理 | 128 |
| 2.17.6 磁芯损耗 | 74 | 5.1.1 拓扑概述 | 128 |
| 2.17.7 DC-DC变换器设计和磁性元件 | 74 | 5.1.2 能量传输图 | 133 |
| 2.17.8 温升 | 74 | 5.1.3 峰值储能要求 | 138 |
| 2.18 其他极限应力计算及其选择标准 | 75 | 5.1.4 根据预期电流纹波计算电感值 | 141 |
| 2.18.1 最大磁芯损耗 | 75 | 5.2 第2部分:能量与磁芯尺寸 | 143 |
| 2.18.2 最大二极管损耗 | 76 | 5.2.1 磁路和有气隙磁芯的有效磁路长度 | 143 |
| 2.18.3 一般二极管选择步骤 | 76 | 5.2.2 有气隙磁芯的储能和 z 因数 | 145 |
| 2.18.4 最大开关损耗 | 77 | 5.2.3 有气隙磁芯的能量与磁芯体积的关系 | 148 |
| 2.18.5 一般开关管选择步骤 | 78 | 5.3 第3部分:从螺线管到E型磁芯 | 151 |
| 2.18.6 最大输出电容损耗 | 78 | 5.4 第4部分:更多AC-DC反激变压器设计细节 | 153 |
| 2.18.7 一般输出电容选择步骤 | 78 | 5.5 第5部分:更多AC-DC正激变换器变压器设计细节 | 157 |
| 2.18.8 最大输入电容损耗 | 79 | | |

| | | | |
|------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 第6章 元器件额定值、应力、可靠性和寿命 | 163 | 8.10 实例 | 230 |
| 6.1 引言 | 163 | 8.10.1 导通过程 | 231 |
| 6.2 应力和降额 | 163 | 8.10.2 关断过程 | 232 |
| 6.3 第1部分:功率变换器的额定值和降额 | 166 | 8.11 开关拓扑的开关损耗分析 | 233 |
| 6.3.1 工作环境 | 166 | 8.12 开关损耗对应的最恶劣输入电压 | 233 |
| 6.3.2 电源中元器件的额定值和应力系数 | 169 | 8.13 开关损耗随寄生电容变化 | 234 |
| 6.3.3 机械应力 | 177 | 8.14 根据MOSFET特性优化驱动能力 | 235 |
| 6.4 第2部分:平均无故障时间、失效率、保修成本和寿命 | 177 | 第9章 探索新拓扑 | 237 |
| 6.4.1 MTBF | 178 | 9.1 第1部分:恒频同步降压拓扑 | 237 |
| 6.4.2 保修成本 | 180 | 9.1.1 用场效应管(安全地)替代二极管 | 237 |
| 6.4.3 寿命期望和失效标准 | 181 | 9.1.2 死区时间的产生 | 239 |
| 6.4.4 可靠性预测方法 | 182 | 9.1.3 CdI/dr 引起场效应管导通 | 239 |
| 6.4.5 验证可靠性测试 | 183 | 9.1.4 体二极管续流 | 240 |
| 6.4.6 加速寿命试验 | 184 | 9.1.5 外部(并联)肖特基二极管 | 241 |
| 6.5 第3部分:铝电解电容寿命预测 | 185 | 9.1.6 同步(互补)驱动 | 242 |
| 第7章 最优功率器件选择 | 190 | 9.2 第2部分:恒频同步升压拓扑 | 242 |
| 7.1 概述 | 190 | 9.3 第3部分:电流检测的分类及其常规技术 | 246 |
| 7.2 功率变换器的主要应力 | 190 | 9.3.1 直流电阻检测 | 247 |
| 7.3 不同拓扑的波形和峰值电压应力 | 191 | 9.3.2 无感降压单元 | 251 |
| 7.4 电流有效值和平均值的重要性 | 195 | 9.3.3 无损下垂调整和动态电压调整 | 253 |
| 7.5 二极管、场效应管和电感的电流有效值和平均值计算 | 196 | 9.4 第4部分:四管升降压拓扑 | 255 |
| 7.6 电容的电流有效值和平均值计算 | 198 | 9.5 第5部分:辅助端和复合拓扑 | 259 |
| 7.7 蜘蛛状应力曲线 | 204 | 9.5.1 是升压拓扑还是升降压拓扑 | 260 |
| 7.8 降低AC-DC变换器应力 | 206 | 9.5.2 理解Cuk、Sepic和Zeta拓扑 | 261 |
| 7.9 RCD钳位和RCD吸收电路 | 208 | 9.5.3 计算Cuk、Sepic和Zeta变换器的电流波形 | 266 |
| 第8章 导通损耗和开关损耗 | 213 | 9.5.4 Cuk、Sepic和Zeta拓扑的应力和元器件选择标准 | 267 |
| 8.1 阻性负载时的开关转换过程 | 213 | 9.6 第6部分:结构和拓扑形态 | 268 |
| 8.2 感性负载时的开关转换过程 | 216 | 9.7 第7部分:其他拓扑和技术 | 272 |
| 8.3 开关损耗和导通损耗 | 218 | 9.7.1 隐藏的辅助端和对称性 | 272 |
| 8.4 感性负载时用于开关损耗研究的MOSFET简化模型 | 219 | 9.7.2 多输出和浮动降压调整器 | 273 |
| 8.5 寄生电容在交流系统中的表示方法 | 220 | 9.7.3 滞环控制器 | 274 |
| 8.6 栅极阈值电压 | 221 | 9.7.4 跨脉冲模式 | 277 |
| 8.7 导通转换过程 | 222 | 9.7.5 实现正激变换器变压器复位 | 278 |
| 8.8 关断转换过程 | 225 | 第10章 印制电路板设计 | 281 |
| 8.9 栅荷系数 | 229 | 10.1 引言 | 281 |
| | | 10.2 印制线分析 | 281 |
| | | 10.3 设计要点 | 282 |
| | | 10.4 热管理问题 | 286 |

| | | | |
|----------------------------|-----|---|-----|
| 第 11 章 热管理 | 288 | 12.25 等效串联电阻零点 | 332 |
| 11.1 热阻和电路板结构 | 288 | 12.26 高频极点 | 332 |
| 11.2 历史定义 | 290 | 12.27 设计3型运算放大器补偿网络 | 333 |
| 11.3 自然对流的经验方程 | 291 | 12.28 优化反馈环路 | 336 |
| 11.4 两个标准经验方程对比 | 292 | 12.29 输入纹波抑制 | 337 |
| 11.4.1 热动力学理论中的 h | 293 | 12.30 负载的暂态响应 | 338 |
| 11.4.2 印制电路板铜面积估算 | 294 | 12.31 1型和2型补偿 | 339 |
| 11.5 铜印制线尺寸 | 294 | 12.32 跨导运算放大器补偿 | 340 |
| 11.6 一定海拔高度上的自然对流 | 295 | 12.33 更简单的跨导运算放大器补偿 | 343 |
| 11.7 强制空气冷却 | 295 | 12.34 电流模式控制补偿 | 344 |
| 11.8 热辐射传递 | 296 | 第 13 章 高级命题：并联、交错和 负载均流 | 352 |
| 11.9 其他问题 | 297 | 13.1 第1部分：变换器的电压纹波 | 352 |
| 第 12 章 反馈环路分析及稳定性 | 298 | 13.2 第2部分：功率变换器应力分配 及降低 | 357 |
| 12.1 传递函数、时间常数和激励函数 | 298 | 13.2.1 概述 | 357 |
| 12.2 理解 e 并绘制对数坐标曲线 | 299 | 13.2.2 功率变换器的功率缩放 | 357 |
| 12.3 复数表示法 | 300 | 13.2.3 降压变换器的并联和交错 | 360 |
| 12.4 重复和非重复激励：时域和频域 分析 | 301 | 13.2.4 交错式降压变换器的应力 有效值封闭形式方程 | 364 |
| 12.5 s 平面 | 302 | 13.2.5 交错式升压功率因数校正 变换器 | 367 |
| 12.6 拉普拉斯变换 | 302 | 13.2.6 交错式多相变换器 | 367 |
| 12.7 干扰及反馈的角色 | 304 | 13.3 第3部分：交错式降压变换器中的 耦合电感 | 367 |
| 12.8 RC滤波器的传递函数、增益和 伯德图 | 306 | 13.4 第4部分：并联变换器的负载均流 | 377 |
| 12.9 积分运算放大器（零极点滤波 器） | 308 | 13.4.1 被动式均流 | 377 |
| 12.10 对数坐标系下的数学运算 | 310 | 13.4.2 主动式负载均流 | 381 |
| 12.11 后级LC滤波器的传递函数 | 310 | 第 14 章 AC-DC 电源前级电路 | 383 |
| 12.12 无源滤波器传递函数小结 | 313 | 14.1 概述 | 383 |
| 12.13 极点和零点 | 314 | 14.2 第1部分：小功率应用 | 384 |
| 12.14 极点和零点的相互作用 | 315 | 14.2.1 充电和放电阶段 | 384 |
| 12.15 闭环增益和开环增益 | 316 | 14.2.2 电容值增加， t_{COND} 减小， 导致电流有效值增加 | 386 |
| 12.16 分压器 | 318 | 14.2.3 电容电压轨迹和基本阶段 | 387 |
| 12.17 脉宽调制器的传递函数 | 318 | 14.2.4 容忍AC-DC开关变换器中 的高输入电压纹波 | 387 |
| 12.18 电压（输入）前馈 | 320 | 14.2.5 大容量电容电压纹波对开 关变换器设计的影响 | 389 |
| 12.19 功率级传递函数 | 320 | 14.2.6 常用反激电源失效保护 方案 | 389 |
| 12.20 拓扑结构的被控对象传递函数 | 321 | 14.2.7 输入电流波形和电容电流 | 391 |
| 12.20.1 降压变换器 | 321 | | |
| 12.20.2 升压变换器 | 322 | | |
| 12.20.3 升降压变换器 | 323 | | |
| 12.21 反馈部分的传递函数 | 324 | | |
| 12.22 闭环 | 326 | | |
| 12.23 环路稳定性判据及策略 | 328 | | |
| 12.24 绘制三种拓扑的开环增益 | 328 | | |

| | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----|---|----------------------------------|-----|
| 14.2.8 | 如何正确说明 $\mu\text{F}/\text{W}$ | 392 | 15.2.4 | 用于传导电磁干扰诊断的 共模和差模分量 | 432 |
| 14.2.9 | 利用速查数据或“北极模 拟法”的算例 | 393 | 15.2.5 | 用于辐射电磁干扰诊断的 近场嗅探器 | 436 |
| 14.2.10 | 电容公差和寿命 | 394 | 第 16 章 实用电源电磁干扰滤波器及 噪声源 | | 437 |
| 14.2.11 | 保持时间 | 395 | 16.1 | 第1部分: 实用电源滤波器 | 437 |
| 14.2.12 | 两种不同的满足保持 时间要求的反激变换 器设计策略 | 399 | 16.1.1 | 电磁干扰滤波器设计中的 基本安全问题 | 437 |
| 14.3 | 第2部分: 大功率应用和功率因 数校正 | 401 | 16.1.2 | 四种常用的涂层工艺 及其优缺点 | 438 |
| 14.3.1 | 概述 | 401 | 16.1.3 | 总Y电容的安全限制 | 439 |
| 14.3.2 | 如何使升压拓扑呈现正弦 波输入电流 | 404 | 16.1.4 | 实用电源滤波器 | 439 |
| 14.3.3 | 功率因数校正级和脉宽调 制级的反同步技术 | 407 | 16.1.5 | 等效差模和共模电路检查 及滤波器设计要点 | 445 |
| 14.3.4 | 采用或不采用反同步技术 时电容电流有效值计算 | 412 | 16.1.6 | 接地扼流圈 | 446 |
| 14.3.5 | 交错式升压功率因数校正 正级 | 414 | 16.1.7 | 电磁干扰滤波器设计方面 一些值得注意的工业经验 | 447 |
| 14.3.6 | 功率因数校正级的实际设 计问题 | 414 | 16.2 | 第2部分: 开关电源中的差模和 共模噪声 | 447 |
| 14.3.7 | 功率因数校正扼流圈设计 准则 | 415 | 16.2.1 | 差模噪声的主要来源 | 447 |
| 14.3.8 | 功率因数校正扼流圈的磁 芯损耗 | 417 | 16.2.2 | 共模噪声的主要来源 | 447 |
| 14.3.9 | 临界升压有源功率因数校正 正级 | 418 | 16.2.3 | 机壳上安装半导体器件 | 450 |
| 第 15 章 电磁干扰标准及测量 | | 419 | 16.2.4 | 共模噪声源 | 450 |
| 15.1 | 第1部分: 概述 | 419 | 16.2.5 | 高性价比滤波器设计 | 451 |
| 15.1.1 | 标准 | 419 | 第 17 章 电路板电磁干扰治理及输入 滤波器稳定性 | | 453 |
| 15.1.2 | 电磁干扰限制 | 420 | 17.1 | 第1部分: 减少电磁干扰的实用 技术 | 453 |
| 15.1.3 | 一些与成本相关的经验 法则 | 422 | 17.1.1 | 覆地 | 453 |
| 15.1.4 | 组件的电磁干扰 | 423 | 17.1.2 | 变压器在电磁干扰中的 角色 | 453 |
| 15.1.5 | 电磁波和电磁场 | 423 | 17.1.3 | 二极管的电磁干扰 | 458 |
| 15.1.6 | 外推法 | 426 | 17.1.4 | 辐射测试会失败吗 | 460 |
| 15.1.7 | 准峰值、平均值和峰值 测量 | 427 | 17.2 | 第2部分: 电源模块及输入不稳 定性 | 461 |
| 15.2 | 第2部分: 传导电磁干扰测量 | 428 | 第 18 章 电磁难题背后的数学 | | 466 |
| 15.2.1 | 差模和共模噪声 | 428 | 18.1 | 电源中的傅里叶级数 | 466 |
| 15.2.2 | 用线路阻抗稳定网络测量 传导电磁干扰 | 430 | 18.2 | 方波 | 466 |
| 15.2.3 | 用简单的数学方法估算最 大传导噪声电流 | 432 | 18.3 | 辛克函数 | 468 |
| | | | 18.4 | 傅里叶级数的幅值包络线 | 470 |

| | | | |
|-----------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 18.5 实用差模滤波器设计 | 472 | 19.4 第3部分: 场效应管的开关损耗 | 488 |
| 18.5.1 等效串联电阻估计 | 473 | 19.5 第4部分: 电感损耗 | 491 |
| 18.5.2 高电网电压下的差模滤波器计算 | 474 | 19.6 第5部分: 输入电容的选择及其损耗 | 493 |
| 18.5.3 低电网电压下的差模滤波器计算 | 475 | 19.7 第6部分: 输出电容的选择及其损耗 | 493 |
| 18.5.4 滤波器的安全裕量 | 477 | 19.8 第7部分: 总损耗和效率估计 | 495 |
| 18.6 实用共模滤波器设计 | 477 | 19.9 第8部分: 结温估计 | 495 |
| 第 19 章 算例 | 481 | 19.10 第9部分: 控制环设计 | 496 |
| 19.1 算例 | 481 | 附录 | 500 |
| 19.2 第1部分: 场效应管的选择 | 486 | 索引 | 507 |
| 19.3 第2部分: 场效应管的导通损耗 | 487 | | |

第 1 章

开关功率变换原理

1.1 引言

想象一下，在晚高峰时段身处某繁忙的地铁站。数以千计的乘客几乎同时蜂拥而至，准备踏上回家的路。显然，没有什么列车能够大到足以同时运载所有乘客。那该怎么办呢？简单！先把所有乘客按列车载客量分流，再快速连续地运送出去。不久以后，许多出站的乘客会转乘其他交通工具。因此，列车载客量有可能变成公交载客量或出租车载客量等。最终，分流的乘客将再次聚集，目的地会重新出现拥挤的场面。

开关功率变换原理与公交系统运行原理非常类似。不同之处在于运送的是能量，而不是乘客。换句话说，变换器连续不断地从“输入源”提取能量，通过“开关”（晶体管）将输入能量流分成若干能量包，再借助一些元件（电感或电容）运送，这些元件能够容纳这些能量包，并按需求在元件间彼此交换。最后，所有能量包再度汇集，平滑而稳定地输出能量流。

因此，无论运送的是能量还是乘客，从旁观者的视角，看到的都是连续输入和连续输出。只是在运送过程中才把连续的流分成易管理的包。

深入观察地铁站的例子就会发现，一定时间内只能运送一定量的乘客（注意，在电气工程领域，单位时间内运送的能量称为“功率”）。要么用大型列车，发车间隔相对长些，要么用多列小型列车，快速不断地运送。如此看来，开关电源一直工作在高频开关状态不足为奇。其主要目的是减小能量包的大小，从而减小储存、运送能量包所需的元件尺寸。

应用该原理工作的电源称为开关电源或开关功率变换器。

DC-DC 变换器是现代高频开关电源的基本组成部分。顾名思义，它把直流（DC）输入电压 V_{IN} 变换成更满足要求的或更有效的直流输出电压 V_O 。AC-DC 变换器（参见图 1-1）也称为离线式开关电源，一般在交流电压（或电网电压）下工作。它先将正弦交流（AC）输入电压 V_{AC} 整流成直流电压（常称为 HVDC 母线或高压直流母线），再作为后级 DC-DC 变换器（或其派生电路）的基本输入。因此，从本质上讲，功率变换过程几乎就是 DC-DC 电压变换过程。

从经常大范围变化或不同的直流输入电压中获取稳定的直流输出电压也很重要。因此，功率变换器都有一个控制电路来持续监视输出电压，并将它与内部参考电压做比较。如果输出电压偏离给定值，控制电路将采取调整措施。该过程称为输出调整或简称调整。所以，电源领域中常说的电压调整器，无论是开关型还是其他类型，都能完成调整功能。

在实际应用中，工况一般是指外加输入电压 V_{IN} （或电网电压）、输出电流 I_O 和给定的输出电压 V_O 。温度也是一种工况，但对系统的影响一般并不显著，这里暂时忽略。所以，对应给定输出电压，有两种特定工况，其变化会导致输出电压迅速变化（这并非控制电路的原因）。当输入电压 V_{IN} 在其工作范围 $V_{INMIN} \sim V_{INMAX}$ （最小值到最大值）内变化时，保持输出电压稳定的过

程称为电网调整；而 I_O 在其工作范围 $I_{OMIN} \sim I_{OMAX}$ （轻载到重载）内变化时，保持输出电压稳定的过程称为负载调整。当然，任何事情都不是完美的，调整也不例外。调整后的输出电压仍有轻微的但可测量的波动，称为 ΔV_O 。注意，在数学上，电网调整用 $\Delta V_O/V_O \times 100\%$ ($V_{INMIN} \sim V_{INMAX}$) 表示，负载调整用 $\Delta V_O/V_O \times 100\%$ ($I_{OMIN} \sim I_{OMAX}$) 表示。

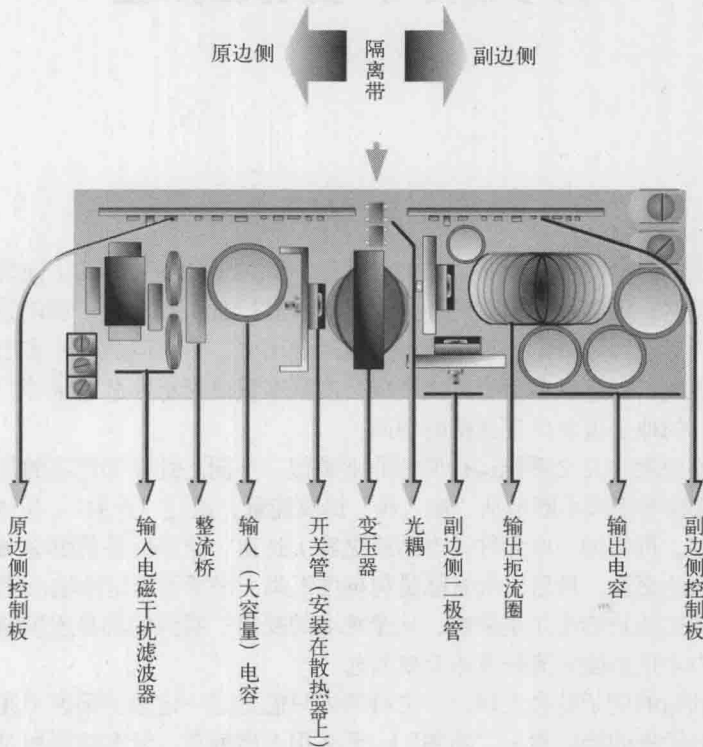


图 1-1 常见的离线式开关电源

电源（在电网电压或负载突变时）的输出调整速率也很重要，因为没有哪一个物理过程能“瞬时”完成。变换器在外部扰动下的快速调整（校正）性能称为环路响应或交流响应。显然，环路响应一般是负载阶跃响应与电网暂态响应的叠加。

接下来，首先向读者介绍一些功率变换的最基本术语及其要点，然后再介绍功率变换中最重要的元件电感的特性。即使是一些富有经验的电源设计人员，也会觉得电感难以应付！显然，如果对元器件及其基本概念缺乏清晰的认识，就无法在电源领域取得实际进展。因此，只有充分认识电感，才能揭开开关电源的神秘面纱。实际上，只要深刻理解电感，许多问题就会迎刃而解。

1.2 概述和基本术语

1.2.1 效率

任何变换器在实现功率变换的过程中都会涉及效率。效率的定义如下：