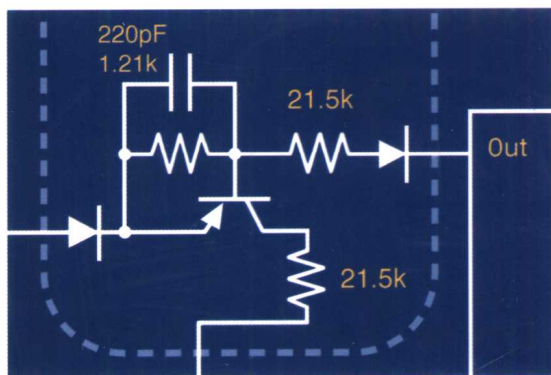


电源系列丛书

Mc
Graw
Hill

*Switching Power Supply
Design & Optimization*

开关电源 设计与优化



- ▲ 散热技术
- ▲ 电源设计主要方程及计算
- ▲ PCB设计
- ▲ 电源设计常见问题解答

[美] Sanjaya Maniktala 著
王志强 郑俊杰 等译

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列丛书

开关电源设计与优化

Switching Power Supply Design & Optimization

Sanjaya Maniktala 著
王志强 郑俊杰 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是作者(国家半导体公司总工程师)凭多年工作经验和学术造诣全面概括开关电源设计与优化技术的结晶。书中系统论述了开关电源电路(设计)的功率变换、EMI滤波器、各功率变换器器件的参数选择和变换器各部分波形、PCB设计、电源温度控制、电源安全、可靠性及检测等内容。书中将开关电源设计的重点方程整理归纳形成1章,并将电源设计常见问题列出并一一作答。它不是含复杂数学推导的教科书,也不是针对某些特定电源设计细节的文献,而是介于两者之间的实用、通俗、严谨且很有价值的工程技术指导书。

本书可供广大从事开关电源设计、开发的工程师作为设计参考书,也可作为高等院校电力、电子专业的教材或参考书。

Sanjaya Maniktala: Switching Power Supply Design & Optimization 1E

ISBN: 0-07-143483-6

Copyright © 2004 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright ©2006

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司合作出版。

未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权合同登记号 图字: 01-2005-2191

图书在版编目(CIP)数据

开关电源设计与优化/(美)玛尼克塔拉(Maniktala, S.)著;王志强,郑俊杰等译. —北京:电子工业出版社,2006.12
(电源系列丛书)

书名原文: Switching Power Supply Design & Optimization

ISBN 978-7-121-03443-5

I.开… II.①玛… ②王… ③郑… III.开关电源—设计 IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第135053号

责任编辑:刘继红

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:20.25 字数:453.6千字

印 次:2006年12月第1次印刷

印 数:5000册 定价:36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:
(010) 68279077; 邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

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、邮电通信、工业加工和航空航天等各领域。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，迫切需要系统、实用性强的学习资料。这便是我向同行介绍国外开关电源设计书籍的用意所在。

Mc Graw-Hill 公司 2004 年出版的《开关电源设计与优化》一书，从开关电源最基础的理论：伏秒法则及电感纹波分析入手，系统论述了 DC-DC 拓扑及离线式开关电源的工作原理，并利用主要方程列表的方法简明介绍了变换器的参数设计。在磁学方面，本书从磁学基础，成品电感的选用到正 / 反激变压器的设计及接近效应和边缘磁通校正等都有详尽的论述。文中还讨论了散热、PCB 设计及 EMI 抑制等与开关电源优化设计有关的问题。

本书内容翔实，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。

本书翻译历时一年，翻译工作由华南理工大学电力学院王志强副教授和美国 IWATT 公司郑俊杰先生共同组织完成。该校电力电子与电力传动专业研究生参加了本书的翻译工作。其中，刘少纯、陈信讯、毛吉亮、王鼎奕、解妮娜、廖鸿飞、宋静娴、李娟、姚月峰、魏晨、李勇权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。华南理工大学电力学院丘东元副教授审阅了本书部分章节，并提出宝贵意见，在此表示感谢。

还要感谢原作者 Sanjaya Maniktala 先生，感谢原出版社 Mc Graw-Hill 公司及其北京代表处王永诚先生。感谢电子工业出版社编辑刘继红女士对于本书翻译的支持和她的辛勤工作。

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

译者

前 言

功率变换是极具魅力的领域。尽管经过多年的深入发展，我们每天还不断地学到新知识。这可能是技术突破，也可能是不同的观点，或仅仅是一些有趣的解释。功率变换最终将跨越不同行业、地域，甚至人群的界限。虽然每次的进步只是少许，但正是我们这样的工程师，或在孟买或在芬兰，整日熬夜工作，有时还要与偏执的上司周旋，最终推动了该领域的发展，使理论得到总结，使学科更趋完善。本书就是献给那些努力奋斗的人们，那些致力于功率变换研究的工程师的。

由于没有接受过电子学专业教育，这颇具挑战性的（工程）学科及本书的写作对我具有相当的意义。我用多年自学的经验在书中组织编撰材料。的确，某些内容在专业出身的工程师看来可能很简单，但对于我并非如此。反之亦然。所以，若书中我将简单的内容说得复杂，或将复杂内容简略带过，我深表歉意。不过读者会看到，我确实定义了几个新的术语，如磁学内容中的气隙系数 z ，DC-DC 变换器及其拓扑中的“LSD”单元，以及有助于理解不连续模式方程的参数 a 等。希望这些术语对论述有帮助，以利于解释功率变换器设计中较难懂的内容。

关于“释疑”——在我写书之前，我曾浏览了一些相关文献。某些公司实行着的“商业策略”使我很吃惊。它们产品的使用说明编写得相当好，但相关的电路图却画得非常糟。或许是这些公司运气差，几年来未聘到能力强的 CAD 员工。但坦率地说，我更相信公司这样做的目的是误导消费者，使顾客相信只要使用了他们的器件，就能得到所有的好处。我确曾在持有这种态度的公司工作过。正是我的这种看法使我将“释疑”作为本书撰写的宗旨。为此，我总是努力研究变换器内在的通用原理，而非某特定产品的应用资料。书中对 DC-DC 变换器及其拓扑的讨论体现了这个想法。

毋庸置疑，磁学是功率变换的重要课题。本书分 4 章讨论磁学理论。从基础概念、成品电感的具体应用，到接近效应解析及边缘磁通校正。书中尽量采用通俗表述并最大程度地涵盖了磁学基础的内容。与其他章节相同，该部分也提供了大量的设计图表。

散热设计一章介绍了各种不同传导方程的归一化研究。归一化变换使各方程看似无关，但它们准确地或近似地表示出同一方程，从而解决了众多不同形式方程引起的混乱。除了自然对流，本章还介绍了强迫对流与海拔校正问题。

“实用电路设计小技巧”一章介绍了一些可以激发读者思考的拓扑思路和实用电路。至于是否涉及知识产权、专利或法定许可等问题，希望读者在使用前核对一下。

我曾在四个洲的七八家公司工作过，从事 IT 及通信用离线式开关电源的研究。最近，我转到功率半导体器件方向，研究用于 DC-DC 变换器和离线式开关电源的开关 IC。我认为这些都有非常好的技术和商业前景。我本想说，我已完全了解了功率变换领域，但事实

上，对掌握功率变换知识来说，人的一生实在是太短暂了。这是一个学到了一定知识反而觉得自己懂得更少的领域。就像面对一片朦胧的云翳，云翳里面的各点互相关联，你很难将其中某些点了解得完全清楚。这可能就是功率变换领域是勇者的天堂、儒者的噩梦的原因吧。

我确实比许多人经历得更多，对不同设计的方法、观点，对不同公司的文化、态度、技术、生产工艺都有一定接触。我看到一些公司的精湛的生产技艺，我遇到许多使我受益匪浅的杰出的同事。但我同样看到，一些公司不允许工程师自行设计电路图或 PCB 布线，认定那应由指定的专家负责。我还看到一些公司解聘在“上班时间”看电子设计或 EDN 杂志的员工。还有一些公司从不允许辛苦开发产品的工程师在其应用论文上署名。他们有时甚至虚构出一个法定专利发明人，将公司所有专利都列于该人名下，而他却对专利毫无贡献。这样就出现了一个可能令爱迪生公司都梦寐以求的拥有 35 项专利的逍遥者，而聪慧、沮丧的工程师们只能无奈地继续埋头苦干。

最后我想说，学习功率变换并学有所成比我们想像的要难很多。更不要说商业竞争给技术人员带来的压力。这些也正是我想把本书献给所有工程师的原因。作为其中的一员，我了解他们的渴望与艰辛，本书的撰写充分考虑了他们的需求。希望工程师能认可本书并从中获益。

撰写本书给我带来了乐趣（当然是在业余时间完成的），也希望读者喜欢读它。

Sanjaya Maniktala

致 谢

在本书付印之际，我想向以下诸位表达我的诚挚谢意。

- Dr G.T.Murthy, (印度) 孟买 (某公司) 前副总裁。感谢他给我时间，给我鼓励，他是我的良师益友。
- Herr Massat, 德国莱比锡西门子公司前总监。感谢他对我的信任、肯定和理解及财政上的支持。
- Dr.Karl.Rinne, 杰出的德国工程师，我的同事，现为爱尔兰教授。本书的一些内容是我们共同研究的成果，是他告诉我 Mathcad 的重要作用，非常感谢他的支持。
- Mike Hongyang He, 我的前同事，至今仍在国家半导体公司工作，是一名公共关系专家。他助我踏上著书之路，与我分享快乐与艰辛，是我的挚友，也是真正的专家。
- Steve Ohr, Planet Analog 杂志主编。他具有发现天才和成就天才的超凡能力，一个天性乐观、可敬可爱的人。
- 感谢我的妻子 Disha 和女儿 Aartika，她们在我熬夜写书的几个月里，任劳任怨地操持家务。
- 还要感谢一直以来支持我的 Ravi Sidhu (“Tribune” 前记者)，Naveen Garewal (“Indian Express” 前记者) 及 C-DOT 前主任 Dr.M.V.Pitke。
- 最后我要感谢国家半导体公司 Suneil Parulekar, Dennis Monticelli, Edward Lam, Paul Greenland, Stephen K.Lee, Fred Wise, Brian Ridgeway, Cole Reif 和 Ajithkumar Jain, 感谢他们长期以来对我的支持。

作者简介

Sanjaya Maniktala 是国家半导体公司总工程师。他持有电源技术方面的两项专利；发表了多篇有关电源设计的论文，分别登载在《Power Electronics Technology》、《EDN》、《Electronic Engineering》及《Planet Analog》等杂志上。他住在美国加州弗里蒙特。

目 录

第 1 章 开关电源概述	1
1.1 简介	1
1.2 伏秒法则	2
1.3 基本波形分析	4
1.4 电流波形系数 r 和 K	6
1.5 电感的基本设计方法	7
1.6 电容有效值 (RMS) 电流计算	8
1.7 拓扑及其最恶劣 (Worst-case) 电容电流	9
1.8 电源的最恶劣输入电压	11
1.9 采用太大电感 (太小 r) 的问题	12
1.10 平顶波近似法	13
1.11 输出电压设置造成的误差	16
1.12 标准电阻的阻值	19
1.13 最佳分压器的参数选择	20
第 2 章 DC-DC 变换器及其结构	24
2.1 简介	24
2.2 地的概念	24
2.3 P 型开关和 N 型开关	25
2.4 LSD 单元	26
2.5 开关调整器拓扑结构	27
2.6 开关 IC 的基本类型	29
2.7 反激/buck-boost/boost IC 的比较	31
2.8 buck 和 buck-boost 开关 IC 的非原本用途应用	33
2.9 几个实例	43
2.10 误差电压的检测	44
2.11 拓扑之间的细微差别	45
2.12 复合拓扑	46

第 3 章 变换器设计参考公式和图表	49
3.1 不同拓扑的电感电流	49
3.2 电流纹波比的定义	49
3.3 电感选择图表	49
3.4 设计公式一览表	54
第 4 章 不连续导电模式 (DCM) 方程	56
4.1 简介	56
4.2 DCM 方程的推导	57
4.3 占空比方程	61
第 5 章 离线式电源的前级设计	62
5.1 普通前级设计	62
5.1.1 输入电压波形	62
5.1.2 输入电流波形	67
5.2 带有 PFC 的前级设计	70
5.2.1 PFC 定义	70
5.2.2 boost 型功率因数校正	71
5.2.3 电容的选择	74
5.2.4 PFC 和 PWM 的同步	76
5.2.5 宽输入电压范围下的同步问题	79
5.2.6 高/低频下的均方根电流的计算	81
5.2.7 时序电路、保护电路及一些相关议题	82
5.2.8 PFC 电路中的磁芯损耗	85
第 6 章 离线式隔离变换器拓扑	88
6.1 正激变换器	88
6.1.1 引言	88
6.2 反激变换器	91
6.2.1 简介	91
6.2.2 集成开关电源控制器	92
6.2.3 等效 buck-boost 模型	92
6.2.4 设计实例	96
6.2.5 多路输出变换器	97

6.2.6	初级漏电感问题	98
6.2.7	次级漏电感问题	100
6.2.8	最优化及其分析	102
6.2.9	损耗估算与效率	111
6.2.10	使用 600V 开关管的反激变换器的设计	114
6.2.11	二极管的选择	114
6.2.12	脉冲丢失和假负载	115
6.2.13	过载保护	118
第 7 章	磁学理论	121
7.1	磁场基本概念 (MKS)	121
7.2	电感方程	122
7.3	独立电压方程	122
7.4	受控电压方程	124
7.5	磁学单位	128
7.6	磁动势 (mmf) 方程	129
7.7	有效面积与有效长度	131
7.8	气隙效应	132
7.9	气隙因子 z	133
7.10	气隙因子 z 的成因和重要性	134
7.11	B 与 H 的关系	136
7.12	E 型磁芯	136
7.13	储能	137
7.14	气隙的功效	140
7.15	电感 L	141
7.16	电感器与 (反激) 变压器的差异	143
7.17	变压器	144
7.18	杂散磁通修正	147
7.19	实例	148
第 8 章	有抽头式电感的拓扑	151
8.1	有抽头式电感的 buck 电路	151
8.2	其他有抽头电感的多级电路拓扑及其占空比	155
第 9 章	DC-DC 变换器的电感选择	157
9.1	概述	157

9.2	确定电流纹波比 r	159
9.3	选择成品电感	160
9.4	伏秒法则	160
9.5	电流纹波比 r 及电感量 L 的选择	161
9.6	磁场强度 B 与电流	164
9.7	通过改变参数来优化铁芯损耗	165
9.8	实例分析	168
9.9	电感的选择	169
9.10	电感实际应用前的评估	170
第 10 章	反激变压器设计	176
10.1	设计方程	176
10.2	实例 1	179
10.3	几个优化措施	182
10.4	反激变压器磁芯的快速选择	183
10.5	实例 2	184
10.6	圆密耳 (cmils)	185
10.7	导线的载流能力	186
10.8	集肤深度	187
10.9	线规简介	192
10.10	数层导线的线径	193
10.11	标准导线线规 SWG	194
第 11 章	正激变换器的磁元件设计	196
11.1	引言	196
11.2	正激变压器与输出储能电感器的比较	196
11.3	邻近效应简介	199
11.4	再谈集肤深度	199
11.5	Dowell 方程	201
11.6	等效铜带转换	207
11.7	几个对正激变换器磁芯快速选择有用的方程	208
11.8	排线与绞线	210
11.9	铁损的计算	211
第 12 章	PCB 及其布线	214
12.1	引言	214

12.2	线路分析	214
12.3	注意要点	216
12.4	反馈线路的布线	220
12.5	地线层	220
12.6	一些制作问题	221
12.7	PCB 供销商及 Gerber 文件	223
第 13 章	散热设计	225
13.1	引言	225
13.2	发热测量及效率估计	225
13.3	自然对流方程	227
13.4	传统定义	228
13.5	适用方程	229
13.6	方程变换	230
13.7	两种标准方程的比较	231
13.8	热力学理论中 h 的计算	232
13.9	如何使用标准方程表	233
13.10	PCB 散热设计	237
13.11	一定高度处的自然对流	238
13.12	强迫风冷	238
13.13	辐射传热	240
13.14	其他问题	241
第 14 章	稳定电流模式变换器	243
14.1	背景	243
14.2	为什么需要斜率补偿	245
14.3	避免次谐波不稳定的一般规则	248
第 15 章	实用电磁干扰 (EMI) 滤波器设计	251
15.1	CISPR 22 标准	251
15.2	LISN	252
15.3	傅里叶级数	252
15.4	梯形波分析	253
15.5	实用 DM 滤波器设计	255
15.6	实用 CM 滤波器设计	257

第 16 章 实用电路设计小技巧	260
16.1 引言	260
16.2 两个 3844 芯片的同步问题	260
16.3 一个自振荡的低成本待机/辅助电源电路	261
16.4 具有电池充电功能的电源适配器	262
16.5 桥式整流器的并联	263
16.6 自身具有浪涌保护的电路	264
16.7 低成本的 Power Good 信号电路	264
16.8 过流保护电路一	265
16.9 过流保护电路二	265
16.10 给 384x 系列增加过温保护	266
16.11 PFC 的开启缓冲器	266
16.12 一个独特的主动型浪涌保护电路	267
16.13 384x 控制器的浮动驱动技术	268
16.14 浮动的 buck 拓扑	268
16.15 对称的 boost 拓扑	269
16.16 从变换器	270
16.17 带可调辅助输出的 boost 前置调节器	271
第 17 章 可靠性、测试、安规及其他	273
17.1 引言	273
17.2 可靠性定义	273
17.3 χ^2 分布	274
17.4 责任失效	276
17.5 保修成本	277
17.6 可靠性计算	278
17.7 电源测试与质量检测	278
17.8 安规问题	280
17.9 工作电压的计算	282
17.10 电容寿命的估计	286
17.11 使用 Y 电容的安全限制	291
17.12 安规和廉价稳压管	292
附录 电路元件和常见问题解答	294

第 1 章 开关电源概述

1.1 简介

开关电源变换器涉及到几个不同的领域。众所周知，当调整电源某一点的性能和参数时，有意无意地就会影响到另一点的性能和参数。这就是为什么很多人认为开关电源设计“难以琢磨”的原因之一。这使作者想起了发生在一个非常有经验的前同事身上的故事。一次，同事的老板非常紧张地交给他一部客户退回的电源，并对他说：“修好它，但不要改动任何东西”。这实际上反映了一种很普遍的恐惧，担心因为改动导致修好一点而影响另一点。这其实是对几个领域的内在联系不甚了解且不相信别人会做得更好的缘故。进而，这种恐惧产生连续不断的噩梦，一个简单的问题会被非常有创造力的工程师们复杂化，导致从设计到生产的每个人都被卷入越来越复杂的情况，最后陷入绝望和迷惑之中。与此同时，客户也等得失去了耐心。

理解开关电源的关键不应仅集中注意某一狭窄方面，而是要顾全比较广阔的领域。本书假设读者均对开关电源有一定的认识，或读过其他基础类电源参考书并希望通过本书对开关电源有更深入的理解。电力电子领域有许多东西要学习，有许多知识要覆盖，仅一本书涉及的内容是很有限的。

本书尽量避免使用少见的拓扑。对于商用电源，大多数设计也仅涉及常用的基本拓扑，如正激变换器、反激变换器及其派生拓扑。通常，把未经广泛测试的新技术投入大批量生产会隐含很大风险。不可否认，有很多此类实例支持这一保守设计观点。同时，我们也不应低估设计和制造典型商用电源应具备的知识和技巧。最大的挑战是在保证产品可靠性和安全性的前提下，如何使设计的商用产品性能超群且成本最低。作者记得在曾经工作过的东南亚一家公司里，关于是否在开关 MOSFET 管（金属氧化物半导体场效应管）栅极放置一只 5 美分的齐纳管引发了一场争论。其中，CEO（也是高级设计工程师）指出“我一个月要生产 50 000 台电源，用来买齐纳管的那些钱够我雇佣另一个工程师”。最终，他并没有雇佣一个新的工程师。当然不是因为他提出的工资太低，而是因为他并没有省下一个 500mW 的齐纳管。其实，放置二极管的目的主要是满足安规 UL1950 的要求，而不是为保护 MOSFET 管。关于这个问题在第 17 章还有更详细的讨论。

如果我们精通数学，那当然很好。可对于数学推导中经常用到的拉普拉斯变换、傅里叶变换，甚至傅里叶级数，大多数电源设计者并不十分熟悉。我们知道，在实际设计中，并没有太多的时间去推导演算每一步。多数情况是在给定的时间里快速地完成原型机设

计，或是调试出复杂的控制，或是给出布线方案。因此，虽然人们也想通过数学演算加深每一步的理解，从而有助于完成更好的设计，但是由于进度的要求，大多数人希望尽量参考应用方程、公式和设计图表以解决设计的困难。基于这个原因，作者经过努力做了很多“辛苦的工作”，利用数学仿真提供了一些实用的公式和设计曲线。

较多人只是关注主要半导体供应商提供的几种常用开关集成电路。作者近几年也一直为这其中一种 IC 提供技术支持。有些人认为这些开关肯定比较简单、易用，事实也确实如此。但那只是对于用户来说，因为 IC 设计工程师总是竭尽全力以制造简单、易用的产品。正如人们所说的“永远不要看香肠的制作过程”。开关集成 IC 就像一根非常大的香肠。你可能不想知道，或者不需要知道它是怎样制作出来的。

1.2 伏秒法则

首先介绍功率变换器最基本的概念。

对一般方波（非谐振）功率变换，总是在开关导通期间（ t_{ON} ）施加一个恒定电压（记为 V_{ON} ）。而后在开关关断期间（ t_{OFF} ）自动得到另一个恒定电压（极性相反，幅值为 V_{OFF} ）。这将形成分段式线性电流，若以幅值形式表示则有

$$V_{ON} = L \frac{\Delta I_{ON}}{t_{ON}}$$

$$V_{OFF} = L \frac{\Delta I_{OFF}}{t_{OFF}}$$

功率变换器中的“稳态”可表示为（幅值形式）

$$\Delta I_{ON} = \Delta I_{OFF}$$

实际上该等式说明在给定开关周期结束时，电流会回到该周期开始时的瞬时值，而且每个周期均如此。因此整体电流（和电压）波形是可重复的，即工作于“稳定状态”。

这意味着

$$V_{ON} \times t_{ON} = V_{OFF} \times t_{OFF}$$

“伏秒”为外加电压与持续时间的乘积，上述公式表述了基本的伏秒法则。

关断时间，即上式中的 t_{OFF} ，是以电感而不是以开关的角度定义的。 t_{OFF} 等于电感电流持续下降的时间，但并不一定等于整个可用关断时间 $T-t_{ON}$ 或 $(1-D)/f$ 。这里 $T=1/f$ 为开关周期。以不连续导电模式（DCM）为例，施于电感的反向电压持续时间小于 $T-t_{ON}$ 。在开关周期剩余的时期内，电感电压保持为零，流过的电流也为零。

如果由于某种原因使每个周期中电感电流不能恢复到零，则反向电压持续时间会增加，虽然该时间可根据需要调节，但最终还是会延长整个可用关断时间。结果，在开环条

件下输出电压会自动升高；在闭环反馈下会调节占空比保持输出电压不变。不管哪种形式，都是力图使电感电流回到其初始值（此时不为零）。这种稳态情况称为连续导电模式（CCM）。

对于单绕组电感，伏秒法则很容易理解，但应如何理解一个多绕组磁元件（如变压器或耦合电感）呢？事实上，可以验证该法则适用于具有任意个绕组的磁件。但在验证时，每一个绕组必须单独考虑；不必考虑是否存在其他绕组，甚至不考虑其他绕组是否有电流流过。这样，当列出伏秒方程时，注意不能将一个绕组导通期间承受的电压与另一个绕组关断期间承受的电压联立。

但是也要注意，这并不是说多绕组总是独立的。事实上，流过每个绕组的电流都在参与建立前面分析的稳态（包括占空比）过程。

应该了解任何存在的拓扑（现有的或将发现的）都一定有自动趋于稳态的能力（否则它们怎么能存在？）。调节的目的仅仅是在输入或负载变化时使输出保持为期望的（精确）值。反馈（所有的信号控制）本身不能“强制”任何不良拓扑工作正常。物理现象不是运放、乘法器等控制器件所能控制的，所以，首要任务是把原始功率从输入传递到输出，而不是仅写出控制理论公式。这样，直接与能量流动有关的伏秒法则成为最基本的理论。尽管它形式简单，但它是证实任何拓扑可行性的基本方法。

任何拓扑的输入/输出传递函数 V_O/V_{IN} 都必须遵循伏秒法则。同样，我们可以用输入/输出电压（幅值）表示占空比 t_{ON}/T ($T=1/f$) 的大小。表 1.1 列出了 buck、boost 和 buck-boost 拓扑的输入/输出关系推导过程（设所有拓扑均工作于 CCM 且忽略寄生参数压降）。

表 1.1 基于伏秒法则的输入/输出传递函数推导过程

	buck	boost	buck-boost
V_{ON}	$V_{IN} - V_O$	V_{IN}	V_{IN}
V_{OFF}	V_O	$V_O - V_{IN}$	V_O
t_{ON}	D/f		
t_{OFF}	$(1-D)/f$		
伏秒数 ' $AB = CD$ '	$(V_{IN} - V_O)D = V_O(1-D)$	$V_{IN}D = (V_O - V_{IN})(1-D)$	$V_{IN}D = V_O(1-D)$
$\frac{A}{C} = \frac{D}{B}$	$\frac{V_{IN} - V_O}{V_O} = \frac{1-D}{D}$	$\frac{V_{IN}}{V_O - V_{IN}} = \frac{1-D}{D}$	$\frac{V_{IN}}{V_O} = \frac{1-D}{D}$
$\frac{A+C}{C} = \frac{D+B}{B}$	$\frac{V_{IN} - V_O + V_O}{V_O} = \frac{1-D+D}{D}$	$\frac{V_{IN} + V_O - V_{IN}}{V_O - V_{IN}} = \frac{1-D+D}{D}$	$\frac{V_{IN} + V_O}{V_O} = \frac{1-D+D}{D}$
因此可得:	$\frac{V_{IN}}{V_O} = \frac{1}{D}$	$\frac{V_O}{V_O - V_{IN}} = \frac{1}{D}$	$\frac{V_{IN} + V_O}{V_O} = \frac{1}{D}$
求倒数	$D = \frac{V_O}{V_{IN}}$	$D = \frac{V_O - V_{IN}}{V_O}$	$D = \frac{V_O}{V_{IN} + V_O}$