



 **IEEE WILEY**

理解PWM DC-DC变换器的全面和完整的指南，
内容源于作者近20年教学和研究工作的总结

电子科学与工程系列图书

脉宽调制DC-DC 功率变换——电路、 动态特性与控制设计

Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion:
Circuits, Dynamics, and Control Designs

[韩] 崔秉周 (Byungcho Choi) 著

雷鑑铭 汪少卿 等译

内含大量实际变换器设计案例，给出了详细的设计细节；采用计算机仿真作为辅助工具来证明理论研究的有效性和分析预测的准确性



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

电子科学与工程系列图书

脉宽调制 DC - DC 功率变换 ——电路、动态特性与控制设计

[韩] 崔秉周 (Byungcho Choi) 著

雷鑑铭 汪少卿 等译



机械工业出版社

Copyright © 2013 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Pulsewidth Modulated DC - to - DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, and Control Designs*, ISBN: 978 - 1 - 118 - 18063 - 1, by Byungcho Choi, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2013 - 7864 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

脉宽调制 DC - DC 功率变换: 电路、动态特性与控制设计/(韩) 崔秉周 (Byungcho Choi) 著; 雷鑑铭等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 8

(电子科学与工程系列图书)

书名原文: *Pulsewidth Modulated DC - to - DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, and Control Designs*

ISBN 978-7-111-60325-2

I. ①脉… II. ①崔…②雷… III. ①脉宽调制器 - 功率变换器

IV. ①TN787

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 136290 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

责任校对: 王 延 封面设计: 马精明

责任印制: 李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 32.75 印张 · 669 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 60325 - 2

定价: 139.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010 - 88361066

读者购书热线: 010 - 68326294

010 - 88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

本书是涉及脉宽调制 (PWM) DC - DC 功率变换技术的权威性参考书。

本书为功率电子学领域工程师、研究人员和学生理解 PWM DC - DC 变换器提供全面而完整的指南。全书分为三个部分, 阐述了 PWM DC - DC 变换器电路和工作原理及其动态特性, 同时也深度讨论了 PWM DC - DC 变换器控制设计。主要包括: DC - DC 变换器基础; DC - DC 变换器电路; 动态建模; 功率级动态特性; 闭环性能; 电压模控制及反馈设计; 电流模控制及补偿设计; 电流模控制的采样效应。

本书提供完整的个性化测试题和仿真结果, 以及可下载的 PPT 文件和可直接运行的 PSpice 程序 (下载地址: <http://booksupport.wiley.com>)。本书对于专业领域的工程师、本科生和研究生来说是一本理想的参考书。

译者序

当今电力电子技术及功率变换中,迫切需要具有基于传统电力电子变换架构去构建新的电力电子变换拓扑结构的研发能力。电力电子领域包含处理电力变换中所涉及的所有工程和科学领域。每一个电力电子领域都有各自的理论框架、基本原理、分析方法和工程学科。《脉宽调制 DC-DC 功率变换——电路、动态特性与控制设计》一书对脉宽调制 (PWM) DC-DC 变换器提出一种专门的处理方法,内容涵盖 PWM DC-DC 变换器的建模、动态特性分析与控制设计,是对现有教科书的一种补充。为了推动我国在电力电子技术研究及功率变换领域的发展,使国内更多的设计人员与高等院校学生了解电力电子变换领域,在机械工业出版社的大力支持下,由华中科技大学在电力电子技术领域长期从事一线研究的教师们组织并完成本书的翻译工作,将一本电力电子技术领域的设计参考书籍奉献给读者。

本书内容涵盖三个部分:第一部分介绍 PWM DC-DC 变换器的静态特性,专注于稳态时域操作;第二部分涵盖了 PWM DC-DC 变换器的建模、动态特性分析与控制设计;第三部分介绍了电流模控制的功能基础、动态建模和分析、补偿设计和应用,完整地探讨了电流模控制的采样效应。书中给出了大量实例,并尽可能采用计算机仿真作为辅助工具来证明理论研究的有效性和分析预测的准确性,并提出了可以直接运用于实践的技术内容。本书是一本自成体系、理论性及实践性较强的专著。本书内容涵盖基本理论和工程应用细节。本书适合电气传动、自动化、电机控制及电力电子技术领域的研究人员和技术人员阅读,也可作为高等院校电子信息类专业的教师、研究生及高年级本科生的教材和专业参考书。

本书由华中科技大学光学与电子信息学院及武汉国际微电子学院副院长雷鑑铭博士负责组织并完成全书翻译工作,参与本书翻译工作的还有武汉工商学院信息工程学院汪少卿老师,硕士生王晓龙、李斌、徐明、谭和苗、毛奕陶和刘黛眉等。本书在翻译过程中得到了华中科技大学光学与电子信息学院诸多老师的帮助及支持,在此表示感谢。特别感谢文华学院外国语学院英语系肖艳梅老师的审校。

电力电子变换器涉及的专业面广,鉴于译者水平有限,书中难免有不足及疏漏之处,敬请广大读者批评指正和谅解,在此表示衷心的感谢。

译者

于华中科技大学喻园

原 书 前 言

电力电子领域包含处理电力变换所涉及的所有工程和科学领域。每一个特定电力电子领域都有各自的理论框架、基本原理、分析方法和工程学科。因此，每一个特定电力电子领域都需要专门针对该领域的特定知识、技能和专业，以及坚实的电气工程背景。本书就是为了满足那些工作在电力电子某一特定领域（即 PWM DC-DC 功率变换）的学生、研究人员和工程师的需求而编写的。

本书主要是一本面向本科生的教材，他们正开始专注于 PWM DC-DC 功率变换方向的电力电子研究。本书对 PWM DC-DC 变换器有更专门的处理方法，是现有教科书的一种补充。本书也是工作在 PWM DC-DC 变换器建模、分析与控制领域的研究生和工程师的参考书。

本书根据技术内容及目标读者不同分为三个部分。前 4 章涵盖 PWM DC-DC 变换器的静态特性，专注于稳态时域操作。这部分主要是针对第一次接触到电力电子学的本科生。有经验的工程师或研究生可以快速浏览或跳过该部分的一些章节。

本书的第二部分是接下来的 5 章。这部分对 PWM DC-DC 变换器的动态特性进行了分析。第二部分涵盖了 PWM DC-DC 变换器的建模、动态特性分析与控制设计。虽然大部分内容适合有一定学术背景的初级或高年级学生，但是对于没有经验的本科生而言，可以忽略其中一些较深的主题。这部分内容可以作为工作于 PWM DC-DC 变换器的建模和控制领域的工程师们的参考。

最后 2 章讲的是 PWM DC-DC 变换器的一个非常重要的主题——电流模控制。这部分介绍了电流模控制的功能基础、动态建模和分析、补偿设计 and 应用。其中一章完整地探讨了电流模控制的采样效应。本书的最后一部分是针对有经验的工程师和研究生的。工程师可能会对电流模控制有深入的了解。对于研究生来说，这部分可以作为他们对相关主题开展研究的基础。

本书适合作为本科生或研究生一个学期的电力电子学课程教材。典型的本科生和研究生课程的教学大纲将包含如下内容。

本科生课程

- 第1章: PWM DC-DC 功率变换
- 第2章: 功率级元器件
- 第3章: Buck 变换器
- 第4章: DC-DC 功率变换器电路
- 第5章: PWM DC-DC 变换器建模
- 第6章: 功率级传递函数
- 第8章: 闭环性能和反馈补偿

研究生课程

- 第3章: Buck 变换器
- 第5章: PWM DC-DC 变换器建模
- 第7章: PWM DC-DC 变换器的动态性能
- 第8章: 闭环性能和反馈补偿
- 第9章: PWM 变换器的建模、分析与设计的实际考虑
- 第10章: 电流模控制——功能基础及经典分析
- 第11章: 电流模控制——采样效应及新型控制设计流程

在编写本书的过程中,在如下两个方面做出特别努力:

- 1) 尽可能采用计算机仿真作为辅助工具来证明理论研究的有效性和分析预测的准确性。
- 2) 提出了可以直接运用于实践的技术内容;给出了带工程细节的变换器设计案例,以致每个设计可以立即用于实践。

以下材料用于辅助使用这本书来学习和讲授 PWM DC-DC 变换器的学生和教师。

章后习题:除第1章外的每一章包含大量习题来强化正文中的技术内容。这些习题按照它们的重要性及其意义分为不同等级,不一定体现在难度上。带星号“*”的习题是重要习题,而带双星号“**”的习题是更重要、更基础的习题。

在线教学与学习辅助:授课用的 PPT 文件通过链接 <http://booksupport.wiley.com> 下载。用于模拟仿真的 PSpice 代码也可以通过相同的地址获取。

作者对许多帮助改进本书技术内容的人深表感激。尤其是,电流模控制章节深受作者在弗吉尼亚理工学院和弗吉尼亚州立大学的学习和研究经历的影响。作者对与上述工作相关的人表示特别的感谢,在写本书时这些工作是非常有价值的参考。每一章末尾都给出了有关参考文献的清单。最热诚的感谢要给予作者的大女儿 Jieyeon (她成功地进入电子领域,并成为了一名优秀的工程师),她为完成本书

提供了大量技术支持和编辑帮助。

本书内容源于作者在韩国大邱庆国大学 (KNU) 过去 10 年里的讲课资料。作者要感谢 KNU 的学生们, 是他们鼓励作者承担编写本书的任务。本书的有些材料也源于作者主讲的多个电力电子工业短期课程。作者还要对参与短期课程的工程师们表示感谢, 是他们提供了宝贵的反馈意见。

Byungcho Choi

韩国大邱

目 录

译者序

原书前言

第一部分 DC-DC 功率变换电路

第 1 章 PWM DC-DC 功率变换 … 2

1.1 PWM DC-DC 功率变换	2
1.1.1 DC-DC 功率变换	2
1.1.2 PWM 技术	4
1.2 DC-DC 功率变换系统	4
1.3 PWM DC-DC 变换器的特性和问题	6
1.4 本章重点	7
参考文献	8

第 2 章 功率级元器件 … 9

2.1 半导体开关	9
2.1.1 MOSFET	9
2.1.2 二极管	10
2.1.3 作为单刀双掷开关的 MOSFET-二极管对	11
2.2 能量存储与传输器件	12
2.2.1 电感器	12
2.2.2 电容器	18
2.2.3 变压器	23
2.3 实际应用中的开关电路	28
2.3.1 电磁阀驱动电路	28
2.3.2 电容器充电电路	32
2.4 小结	37
参考文献	38
习题	38

第 3 章 Buck 变换器 … 54

3.1 理想的降压 DC-DC 功率变换	54
3.2 Buck 变换器: 降压 DC-DC 变换器	56
3.2.1 Buck 变换器的演变	56
3.2.2 频域分析	57
3.3 Buck 变换器的启动瞬态	59
3.3.1 分段线性分析	59
3.3.2 启动响应	60
3.4 稳态中的 Buck 变换器	61
3.4.1 电路分析技巧	61
3.4.2 稳态分析	62
3.4.3 输出电压纹波的估算	64
3.5 不连续导通模式 (DCM) 中的 Buck 变换器	69
3.5.1 DCM 工作的缘由	69
3.5.2 DCM 工作的条件	71
3.5.3 DCM 的稳态工作	73
3.6 Buck 变换器的闭环控制	77
3.6.1 闭环反馈控制器	77
3.6.2 闭环控制 Buck 变换器的响应	80
3.7 小结	85
参考文献	86
习题	86

第 4 章 DC-DC 功率变换器电路 … 97

4.1 Boost 变换器	97
---------------	----

4.1.1	Boost 变换器的演变	97
4.1.2	CCM 的稳态分析	99
4.1.3	DCM 的稳态分析	103
4.1.4	寄生电阻对电压增益的影响	104
4.2	Buck/Boost 变换器	107
4.2.1	Buck/Boost 变换器的演变	107
4.2.2	CCM 的稳态分析	109
4.2.3	DCM 的稳态分析	112
4.3	三种基本变换器的结构及电压增益	113
4.4	反激变换器: 变压器隔离 Buck/Boost 变换器	115
4.4.1	反激变换器的演变	116
4.4.2	CCM 的稳态分析	117
4.4.3	DCM 的稳态分析	120
4.5	桥式 Buck 衍生隔离 DC-DC 变换器	122
4.5.1	开关网络及多绕组变压器	123
4.5.2	全桥变换器	126
4.5.3	半桥变换器	130
4.5.4	推挽变换器	130
4.6	正激变换器	134
4.6.1	基本工作原理	134
4.6.2	第三绕组复位的正激变换器	138
4.6.3	双开关正激变换器	142
4.7	小结	145
	参考文献	145
	习题	146

第二部分 PWM DC-DC 变换器的建模、动态特性与设计

第 5 章 PWM DC-DC 变换器建模

5.1	PWM 变换器建模概述	162
5.2	平均功率级动态特性	164
5.2.1	状态空间平均	165
5.2.2	电路平均	170

5.2.3	电路平均技术的一般化	177
5.2.4	电路平均和状态空间平均	178
5.3	线性化平均功率级动态特性	179
5.3.1	非线性函数和小信号模型的线性化	179
5.3.2	PWM 开关的小信号模型——PWM 开关模型	180
5.3.3	变换器功率级的小信号模型	182
5.4	变换器功率级的频率响应	184
5.4.1	功率级的正弦响应	184
5.4.2	功率级的频率响应和 s 域小信号模型	187
5.5	PWM 模块的小信号增益	188
5.6	PWM DC-DC 变换器的小信号模型	189
5.6.1	电压反馈电路	190
5.6.2	PWM 变换器的小信号模型	191
5.7	小结	193
	参考文献	193
	习题	194

第 6 章 功率级传递函数

6.1	传递函数的伯德图	198
6.1.1	基本定义	198
6.1.2	乘数因子的伯德图	200
6.1.3	传递函数的伯德图构建	208
6.1.4	从伯德图推导传递函数	211
6.2	Buck 变换器的功率级传递函数	213
6.2.1	输入-输出传递函数	213
6.2.2	占空比-输出传递函数	216
6.2.3	负载电流-输出传递函数	219
6.3	Boost 变换器的功率级传递函数	220
6.3.1	输入-输出传递函数	220
6.3.2	占空比-输出传递函数和	

右半平面零点	221
6.3.3 负载电流-输出传递函数	224
6.3.4 右半平面零点的物理 起源	225
6.4 Buck/Boost 变换器的功率级 传递函数	228
6.5 小信号分析的经验方法	230
6.6 小结	232
参考文献	234
习题	234

第7章 PWM DC-DC 变换器的 动态性能

7.1 稳定性	241
7.2 频域性能准则	243
7.2.1 环路增益	243
7.2.2 音频敏感度	244
7.2.3 输出阻抗	245
7.3 时域性能准则	246
7.3.1 阶跃负载响应	246
7.3.2 阶跃输入响应	247
7.4 DC-DC 变换器的稳定性	248
7.4.1 线性时不变系统的稳定性	248
7.4.2 DC-DC 变换器的小信号 稳定性	249
7.5 奈奎斯特准则	249
7.6 相对稳定性: 增益裕度和 相位裕度	254
7.7 小结	259
参考文献	260
习题	260

第8章 闭环性能和反馈补偿

8.1 渐近分析法	267
8.1.1 渐近分析法的概念	267
8.1.2 渐近分析法的示例	269
8.2 频域性能	274
8.2.1 音频敏感度	275
8.2.2 输出阻抗	276

8.3 电压反馈补偿和环路增益	278
8.3.1 单积分器的问题	278
8.3.2 电压反馈补偿	280
8.4 补偿设计和闭环性能	282
8.4.1 电压反馈补偿和回路增益	282
8.4.2 反馈补偿设计指南	284
8.4.3 电压反馈补偿和闭环性能	286
8.4.4 相位裕度和闭环性能	295
8.4.5 补偿零点和瞬态响应速度	300
8.4.6 阶跃负载响应	302
8.4.7 非最小相位系统案例: Boost 和 Buck/Boost 变换器	306
8.5 小结	309
参考文献	310
习题	310

第9章 PWM 变换器的建模、分析与 设计的实际考虑

9.1 PWM 变换器模型的一般化	329
9.1.1 带寄生电阻的变换器 建模	330
9.1.2 DCM 工作中 PWM 变换器的 建模和分析	335
9.1.3 隔离 PWM 变换器的建模	343
9.2 带实际电压源系统的 DC-DC 变换器 的设计和分析	348
9.2.1 音频敏感性分析	349
9.2.2 稳定性分析	350
9.2.3 稳压 DC-DC 变换器的 输入阻抗	357
9.2.4 源阻抗引起不稳定性的 起因	360
9.2.5 源阻抗的控制设计	361
9.2.6 源阻抗对环路增益和输出 阻抗的影响	362
9.3 非电阻负载的考虑	362
9.4 小结	365
参考文献	366
习题	366

第三部分 电流模控制

第 10 章 电流模控制——功能基础及经典分析 374

10.1 电流模控制基础	374
10.1.1 峰值电流模控制的演进 ...	375
10.1.2 峰值电流模控制的 优点和问题	382
10.1.3 平均电流模控制和 充电控制	383
10.2 经典分析和控制设计流程	386
10.2.1 峰值电流模控制的 小信号模型	387
10.2.2 环路增益分析	391
10.2.3 稳定性分析	393
10.2.4 电压反馈补偿	396
10.2.5 控制设计流程	400
10.2.6 DCM 中变换器动态 特性分析	407
10.3 峰值电流模控制的闭环性能 ...	411
10.3.1 音频敏感度分析	411
10.3.2 输出阻抗分析	415
10.3.3 阶跃负载响应分析	418
10.4 Boost 和 Buck/Boost 变换器的 电流模控制	428
10.4.1 稳定性分析和控制设计 ...	428
10.4.2 环路增益分析	437
10.5 小结	442
参考文献	443
习题	444

第 11 章 电流模控制——采样效应及
新型控制设计流程 450

11.1 电流模控制的采样效应	450
11.1.1 采样效应的起因和结果 ...	451
11.1.2 采样效应的建模方法学 ...	453
11.1.3 正反馈增益	454
11.1.4 完整的电流模控制 s 域 模型	454
11.1.5 两种流行的电流模控制 s 域 模型	455
11.2 电流模控制 s 域模型 表达式	457
11.2.1 修改后的小信号模型	457
11.2.2 调制器增益 F_m^*	458
11.2.3 采样效应的 s 域表示 $H_e(s)$	459
11.2.4 正反馈增益	466
11.3 电流模控制用新型控制设计 流程	470
11.3.1 新型功率级模型	470
11.3.2 带电流闭环的控制 - 输出 传递函数	472
11.3.3 控制设计流程	477
11.3.4 新型和经典设计流程间的 相关性	489
11.4 带光耦合器隔离电流模控制的 离线反激变换器	493
11.4.1 离线电源	494
11.4.2 带光耦合器隔离反馈的反激 变换器电流模控制	494
11.5 小结	506
参考文献	507
习题	508

第一部分 DC-DC 功率 变换电路

第 1 章

PWM DC-DC 功率变换

DC-DC 功率变换被广泛运用于产生与原直流电压电平不同的直流电压：换句话说，将直流电压的电平转换成另一数值。DC-DC 功率变换有许多不同的方式，每一种方式都有其独特的电路技术。使用脉宽调制（PWM）技术的 DC-DC 变换是众多方案中最常见的一种，被称为 PWM DC-DC 功率变换。

本书广泛涉及 DC-DC 功率变换的各个方面，涵盖工程与学术两个方向。本书前言部分介绍了 PWM DC-DC 功率变换的概述。本章讨论了 DC-DC 功率变换电路的基本原理和独特性质，以及 PWM 概念。本章还介绍了用于现代电子设备和系统的 PWM DC-DC 功率变换系统的特点和问题。最后，本章给出了接下来章节的内容。

1.1 PWM DC-DC 功率变换

通过 PWM 技术实现 DC 电压源变换的过程即为 PWM DC-DC 功率变换。然而对于理解 DC-DC 功率变换电路的特征和性质，需要更明确和更精确的描述。

1.1.1 DC-DC 功率变换

为了系统化准确描述 DC-DC 功率变换，本节讨论两种使灯泡点亮的方法，该灯泡是由电池直流电压供电。假定灯泡需要在恒定的 12V 电压下工作，而电池电压充电状态下在 18~30V 之间变化。第一种使用可变电阻和控制器的方法如图 1.1 所示。假设控制器消耗的电流可忽略。

在图 1.1 中，控制器调整可变电阻 R_x 的阻值，满足以下关系：

$$V_O = \frac{R_O}{R_x + R_O} V_B = 12V \quad (1.1)$$

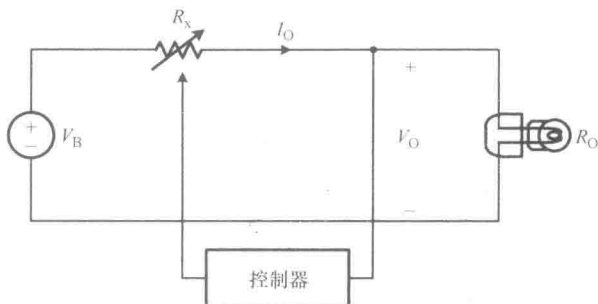


图 1.1 点亮灯泡的典型方法

式中, V_O 是通过灯泡的电压; R_O 是灯泡的电阻; V_B 是变化的电池电压, 满足 $18\text{V} < V_B < 30\text{V}$ 。图 1.1 中的电路的确实现了从可变电压源提供一固定直流电压的目标, 但是其中有一个关键问题使得这种结构不切实际。

可变电阻同时也会消耗欧姆功率

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = I_O V_B - I_O V_O = I_O (V_B - V_O) \quad (1.2)$$

式中, P_{in} 是电池提供的输入功率; P_{out} 是灯泡消耗的功率; I_O 是从电池流向灯泡的电流。功率损耗由流经灯泡的工作电流和电池电压与灯泡工作电压之差的乘积决定。这种功耗很容易变大。例如, 当一额定电压为 12V 、功率为 60W 的灯泡与一电压为 30V 的电池连接时, 功率损耗 $P_{\text{loss}} = (60/12)(30 - 12)\text{W} = 90\text{W}$ 。该功率损耗比灯泡消耗的功率 $P_{\text{out}} = 60\text{W}$ 还要大。

功率损耗总是转化为热量, 必须使用适当的冷却系统来消除所产生的热量。冷却系统通常使用笨重的散热器和嘈杂的风扇, 进而增加了整个系统的尺寸和重量。因此, 图 1.1 中的结构不能用于尺寸和重量受限的应用, 而这又通常是大多数现代电子设备和系统的应用要求。

一种替代方法如图 1.2 所示, 电池和灯泡之间接入开关网络和 LC 滤波器。在每一个开关周期 T_s 内, 开关保持连接 a 点的时间为 T_{on} , 剩余时间 $T_s - T_{\text{on}}$ 保持连接 p 点。该开关称为单刀双掷 (SPDT) 开关, 因为它包含了一个固定点, 并且保持连接到两个连接点 (a 与 p) 中的一个。对应 SPDT 开关的切换动作, 电池电压在 SPDT 开关的输出端被转换为矩形波, 如图 1.2 中的 v_X 所示。然后将矩形波施加到 LC 滤波

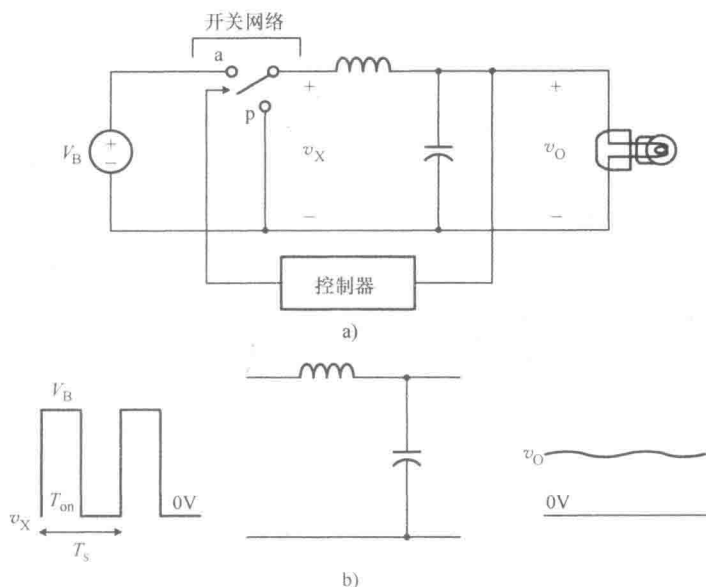


图 1.2 适用于灯泡的 DC-DC 功率转换

a) 电路图 b) LC 滤波器的输入输出波形

器。 LC 滤波器将矩形波变换为平滑的连续电压波形,如图 1.2 中的 v_O 所示。

如果 LC 滤波器充分滤波,则输出电压几乎成为大小等于 v_X 平均值的直流波形:

$$v_O(t) \approx V_O = \overline{v_X}(t) = \frac{T_{on}}{T_s} V_B \quad (1.3)$$

当电池电压变化时,为了保持 $V_O = 12V$,控制器调整 T_{on} 与 T_s 的比率,在保持 T_s 恒定时,控制器改变 T_{on} 以满足条件

$$\frac{T_{on}}{T_s} V_B = 12V \quad (1.4)$$

例如,当电池电压 $V_B = 24V$,开关周期 $T_s = 10\mu s$ 时,控制器调整 $T_{on} = 5\mu s$ 以满足 $V_O = (5 \times 10^{-6} / 10 \times 10^{-6}) 24V = 12V$ 。如果电池电压增大到 $V_B = 30V$,控制器减小 T_{on} 到 $4\mu s$ 以调整 V_O 达到 $12V$,即 $V_O = (4 \times 10^{-6} / 10 \times 10^{-6}) 30V = 12V$ 。

虽然图 1.1 和图 1.2 都实现了同样的目标,但是它们之间存在重大差异。图 1.2 假设为无损耗操作,因为 SPDT 开关和 LC 滤波器中的无功元件不消耗任何功率。无损耗操作解决了与功率损耗相关的所有问题。由于不需要热管理,电路尺寸可以更小并且包装重量更轻,从而使其与现代电子系统能完全兼容。

现在,DC-DC 功率变换的更准确的描述是改变直流电源电平的过程,同时消除或最小化功率损耗。从这个角度来看,图 1.2 是 DC-DC 功率变换电路的典型示例,而图 1.1 所示的常规电路并不是。

1.1.2 PWM 技术

可以从图 1.2 的工作过程设想 PWM 技术的概念,即调节 SPDT 开关的 T_{on} 与 T_s 的比率以保持输出电压恒定。通过改变 T_{on}/T_s 比,矩形电压波形的脉冲宽度被自适应调制,然后通过 LC 滤波器产生其平均值作为输出电压,使得尽管输入电压变化,输出电压仍保持恒定。这种控制方案称为 PWM 技术,基于 PWM 方案的 DC-DC 变换电路称为 PWM DC-DC 变换器。PWM DC-DC 变换器广泛适用于现代工业和消费电子产品,从而成为最流行的 DC-DC 功率变换电路。

1.2 DC-DC 功率变换系统

DC-DC 功率变换系统的基本概念如图 1.2 所示,其框图如图 1.3 所示。该系统由直流电源、DC-DC 变换器和负载组成。直流电源为 DC-DC 变换器提供任意直流电压。然后,DC-DC 变换器将给定的直流电压转换为负载所需的值,并将其传送到负载。负载是以恒定电压工作并最终消耗电量的应用系统。本节介绍直流电源、DC-DC 变换器和负载的特性。

具有非理想特性的直流源

实际的直流源的特性在许多方面都远低于理想电压源。首先,直流电源的电平

随时间而变化,如电池、燃料电池和其他独立直流电源。根据直流电源的特性和条件,电压的变化可能是渐变的或突变的。

其次,整流交流电源通常用作直流电源的替代品。

对于这种情况,整流交流电

源可能包含大量交流成分,称为交流纹波。此外,整流交流电源的输出可能会受各种噪声的影响。因此,直流电源就是其电压可以变化,被交流纹波和噪声污染,并能从一个值切换到另一个值的任何非理想电源。

作为电压源的 DC-DC 变换器

DC-DC 变换器从非理想电源获得任意电压,同时需要为负载提供固定的直流电压。因此,除了改变电平之外,DC-DC 变换器还应具有在电压变化、存在交流纹波分量和输入电压突变的情况下保持其输出恒定的能力。理想情况下,DC-DC 变换器应该起到理想电压源的作用,由非理想电压源供电,并为负载产生所需的直流电压,忽略电压源条件。

虽然实际的 DC-DC 变换器的结构和工作方式比图 1.2 更复杂,但是它们仍然可以分为两个功能模块:功率级和控制器。功率级使用各种电路元器件将输入电压的电平改变为期望值,而控制器为功率级实现其功能提供必要的信号。

DC-DC 变换器的功率级有许多种结构,每个 DC-DC 变换器根据其功率级结构有不同的命名。尽管结构多样,但所有功率级都采用通用电子元器件来完成 DC-DC 功率转换。功率级利用半导体器件来实现 SPDT 开关的功能,能量存储器件进行滤波,并且变压器在功率变换时改变电路的电压和电流。

控制器的结构和功能也不尽相同。尽管如此,所有的控制器提供功率级所需控制信号的功能相同,以产生固定的输出电压,而与输入电压和其他工作条件无关。在 PWM DC-DC 变换器中,这一重要功能以闭环方式采用 PWM 技术实现。闭环 PWM 控制器使用各种模拟和数字集成电路(IC)以及分立元器件来产生所需的控制信号。

动态电流沉负载

DC-DC 变换器的负载可以是任何以固定直流电压工作的电子设备或系统。负载从 DC-DC 变换器中抽取电流以满足其功率要求。因此,负载电流可能会根据负载系统的运行状况而波动。尤其是当高频数字系统连接到 DC-DC 变换器时,电流可能频繁而快速地发生变化,包括两个不同值之间的阶跃变化。因此,就 DC-DC 变换器而言,负载系统就是一个动态电流沉,其电流水平可能会大范围且突然地变化。

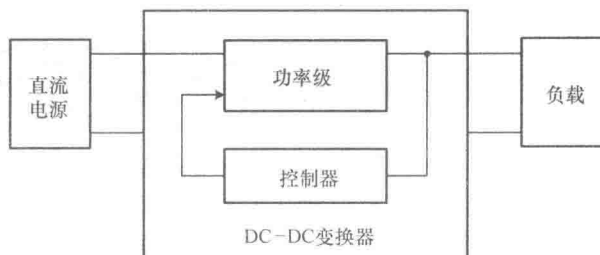


图 1.3 DC-DC 功率变换系统