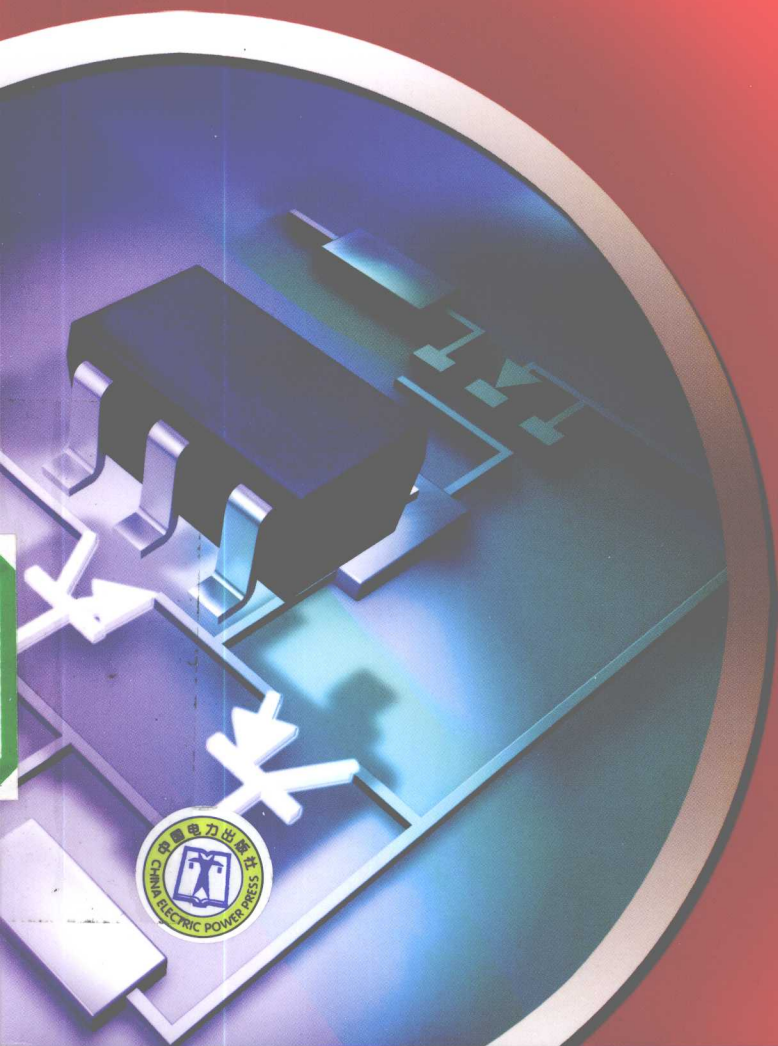


开关电源功率变换器 拓扑与设计

KAIGUAN DIANYUAN GONGLV BIANHUANQI
TUOPU YU SHEJI

张兴柱 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

开关电源功率变换器 拓扑与设计

KAIGUAN DIANYUAN GONGLV BIANHUANQI
TUOPU YU SHEJI

张兴柱 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书作者是国内第一个开关电源方面的博士学位获得者, 书中所述是其二十多年科学研究和技术研发的经验集成。

全书共分为 12 章, 包括功率变换器的主要拓扑介绍和工程设计指南两大部分内容。其中, 拓扑部分主要包括正激、反激、对称驱动桥式、隔离 Boost 等 DC-DC 功率变换器的拓扑和原理分析; 工程设计指南部分包括正激、反激、桥式变换器的稳态分析和具体设计步骤。此外, 还包括 8 个附录, 主要包括电感电压稳态伏秒定律的证明、各种变压器面积积公式的推导过程和方法。

本书理论通俗易懂, 实例针对性强, 适合于从事开关电源研发、设计的工程技术人员及大专院校电子技术相关专业的师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

开关电源功率变换器拓扑与设计 / 张兴柱著. —北京:
中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9015-4

I. 开… II. 张… III. 开关电源-功率变换器
IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 102213 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

1000 毫米 × 1400 毫米 B5 开本 14 印张 255 千字

印数 0001—3000 册 定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

电力电子产品已经越来越广泛地应用于计算机、通信、电力、交通、机械、航空、航天、家电、医疗、仪器等多个不同领域。所有的电力电子产品都是围绕着如何进行高效率的功率变换,如何用更小的体积来实现更大的功率和更多的功能,或者实现更高的功率密度和功能密度而设计制造的。

按功率变换方式,可将电力电子产品分成四大类:① AC-DC 产品;② DC-DC 产品;③ DC-AC 产品;④ AC-AC 产品。前两类的主要产品为开关电源,第三类的主要产品是逆变器,第四类的主要产品是 UPS(不间断电源)和变频器。

当负载需要高要求的直流供电时,其供电电源多采用开关电源。目前的开关电源主要有 AC-DC 开关电源、DC-DC 开关电源两种。

AC-DC 开关电源又有外置式电源和内置式电源之分。最简单的外置式 AC-DC 开关电源,如笔记本电脑及各种手提设备的充电器(或叫 Adapter);复杂的外置式 AC-DC 开关电源,如焊机电源、电动汽车的充电器等;最复杂的外置式 AC-DC 开关电源,如程控交换设备的 AC-DC 开关电源系统。内置式 AC-DC 开关电源则有单输出和多输出两类,台式计算机内的 AC-DC 电源属于多输出,医疗仪器、工业控制和数据通信等设备内的 AC-DC 电源既有单输出也有多输出,移动通信设备内的 AC-DC 电源则还可以是一个单输出电源系统或多输出电源系统。

DC-DC 开关电源多为内置式电源。计算机中的 DC-DC 开关电源叫 VRM 或 VRD。通信设备单板上的 DC-DC 开关电源目前有两种,一种是 DC-DC 模块,有非标准的 DC-DC 模块和标准的 DC-DC 模块;另一种是负载端 DC-DC 变换器(也叫 POL)。在国内的通信行业中,通常将 DC-DC 模块称为二次电源。在电力系统中,也有大量的 DC-DC 开关电源。其中,电力操作电源是一种外置的 DC-DC 开关电源,而继电保护设备中的电源是一种内置的 DC-DC 开关电源。

AC-DC 开关电源和 DC-DC 开关电源的市场非常大,在北美,这两种产品的年销售额为 100 亿美元左右,其平均年增长率超过 10%。在中国,其市场同样非常大且在迅速增长。

第三类产品是逆变器,在那些需要交流供电,但交流电网质量不是很好的地方经常采用的一种电源方案。由于电力供应紧张,导致夏天或冬天在农村的

电力经常被中断，因此逆变器、应急电源已是这些地方不可或缺的临时电源。另外，各种车载电源、太阳能电源等也都可看成是一种逆变器。尽管逆变器本身的市场没有其他三类产品广，但其发展潜力是不容忽视的。

第四类产品是 AC-AC 电源，它有三个主要的分支：① 为那些需要与电网同频且精密稳压的设备提供交流电时，其供电电源被称为交流稳压电源；② 为那些需要与电网同频且不能断电的设备提供交流电时，其供电电源被称为 UPS（不间断电源）；③ 为那些需要改变频率（从而改变其他变量，如电动机的速度）的设备提供交流电时，其供电电源被称为变频器。

目前的多数交流稳压电源采用双向晶闸管作为低频开关，用相控的原理来调节阻抗，从而实现输出稳压。这类电源多被用于电网不够稳定的边远地区或农村，是由于电力紧张所导致的一种中国特色产品。

随着计算机和互联网的迅速发展，UPS 已成为许多重要机构，如商场、银行、企业、学校、机场等计算机系统中不可或缺的供电电源。根据计算机系统的容量及重要性，就产生了各种功率和要求的 UPS 电源，小至数百伏安，大至数百千伏安；有后备式的，在线式的；有短时间的、长时间的等。在一个大功率的 UPS 电源中，通常还包含 AC-DC（前置级功率因数校正器，Power Factor Corrector、电池充电器）、DC-DC（电池升压电路）及 DC-AC（逆变器）等几个功率变换环节。

通过改变电动机的频率来改变电动机的转速，能极大地节约输入电能。由此引入的 AC-AC 变频器已被广泛用于机床、纺织、矿山、油田、机车和家庭等的电动机设备中，如抽油机、数控机床、空调、制冷设备等。变频器的品种非常多，有普通用途的变频器和高压变频器等，功率从数千伏安到数百千伏安不等。内部的功率变换电路采用 AC-DC 与 DC-AC 的级联或直接的 AC-AC。

上述三类 AC-AC 产品，尤其是 UPS 和变频器的市场同样非常大。开关电源、UPS 和变频器在全球的电力电子产品中已呈三足鼎立局面，各占 1/3 左右的市场。

除了这三类外，还有一些电力电子产品也有一定的市场，如感应加热电源，电解、电镀电源和电力牵引电源等。

由于全球性的能源与资源短缺，节约能源已成为各国政府的重大国策。这一要求推动了节能型产品，如电力电子产品的快速发展。为了提高电力电子产品的功率变换效率和节省电力电子产品的原材料，在短短的 40 年中，已在电力电子领域内进行了大量的科学研究和技术创新，开发了一代又一代的新产品，它们的功率密度和功能密度正在快速地提高。

缩小体积、提高功率密度的关键是构成电力电子产品的功率变换电路。功率变换电路要实现电压、电流及功率的变换。为了实现高变换效率，在变换过

程中所产生的损耗要尽量小，这对组成功率变换电路的元件类型和器件工作方式提出了具体的限制。为了实现小的电源体积，在变换电路中所用的元器件要尽量小，这对功率变换电路中的器件工作频率提出了具体的限制。在不断解决这些局限性的努力下，推动了功率变换技术的迅速发展，特别是 DC - DC 功率变换器的飞速发展。

本书将对常用的 DC - DC 功率变换器拓扑进行专门的介绍，并给出目前在产品中用得最多的那些 DC - DC 功率变换器的工程设计指南。

张兴柱

目 录

前言

➔ 第1章 DC-DC 功率变换技术概论	1
1.1 DC-DC 产生的原因	1
1.2 DC-DC 的发展历史	5
1.3 DC-DC 研究概要	6
➔ 第2章 基本 DC-DC 功率变换器拓扑	8
2.1 Buck 变换器	8
2.2 Boost 变换器	11
2.3 Buckboost 变换器	14
2.4 Cuk 变换器	17
2.5 Sepic 变换器	21
2.6 Zeta 变换器	24
2.7 基本 DC-DC 变换器总结	27
➔ 第3章 正激 DC-DC 功率变换器拓扑	28
3.1 基本正激变换器	28
3.2 三绕组去磁正激变换器	32
3.3 谐振去磁正激变换器	38
3.4 RCD 去磁正激变换器	43
3.5 有源去磁正激变换器	48
3.6 二极管去磁双正激变换器	53
3.7 其他去磁的双正激变换器	56
3.8 正激 DC-DC 变换器总结	58
➔ 第4章 反激 DC-DC 功率变换器拓扑	60
4.1 基本反激变换器	60
4.2 三绕组吸收反激变换器	64
4.3 RCD 吸收反激变换器	67

目 录

4.4	其他吸收反激变换器	71
4.5	二极管吸收双反激变换器	72
4.6	反激 DC - DC 变换器总结	74
→	第 5 章 对称驱动桥式 DC - DC 功率变换器拓扑	76
5.1	对称驱动基本半桥变换器	76
5.2	对称驱动半桥变换器	80
5.3	对称驱动全桥变换器	84
5.4	对称驱动推挽变换器	88
5.5	其他对称驱动变换器	91
5.6	对称驱动桥式 DC - DC 变换器总结	91
→	第 6 章 其他驱动桥式 DC - DC 功率变换器拓扑	93
6.1	不对称驱动半桥变换器	93
6.2	不对称驱动全桥变换器	99
6.3	相移控制全桥变换器	103
6.4	其他的软开关全桥变换器	106
6.5	其他驱动桥式 DC - DC 变换器总结	107
→	第 7 章 隔离 Boost DC - DC 功率变换器拓扑	108
7.1	对称驱动电流型推挽变换器	108
7.2	对称驱动电流型全桥变换器	111
7.3	从正激对偶的隔离 Boost 变换器	113
7.4	各种单管隔离 Boost 变换器	114
7.5	隔离 Boost DC - DC 变换器总结	117
→	第 8 章 其他 DC - DC 功率变换器拓扑	118
8.1	高阶隔离 Buckboost 变换器	118
8.2	正反激变换器和它的集成磁版本	121
8.3	各种集成磁变换器	123
8.4	反正激变换器	126

目 录

8.5 其他 DC - DC 变换器总结	127
 第 9 章 正激变换器的工程设计指南	129
9.1 三绕组去磁正激变换器的稳态分析	130
9.2 谐振去磁正激变换器的稳态分析	133
9.3 有源去磁正激变换器的稳态分析	136
9.4 各种去磁正激变换器的工程设计指南	139
 第 10 章 反激变换器的工程设计指南	153
10.1 理想反激变换器的稳态分析	153
10.2 反激变换器的实际开关过程分析	155
10.3 CCM/DCM 边界反激变换器的稳态分析	159
10.4 反激变换器的工程设计指南	161
 第 11 章 桥式变换器的工程设计指南	171
11.1 理想对称驱动半桥变换器的稳态分析	171
11.2 对称驱动半桥变换器的工程设计指南	174
11.3 不对称驱动半桥变换器的稳态分析	182
11.4 不对称驱动半桥变换器的工程设计指南	185
 第 12 章 总结	195
 附录 A 电感电压的稳态伏秒定律及其证明	197
 附录 B 有源去磁正激变换器的变压器面积积公式推导	198
 附录 C 正激变换器的滤波电感面积积公式推导	200
 附录 D 反激变换器中的变压器面积积公式推导	202
 附录 E 对称半桥变换器中的变压器面积积公式推导	205
 附录 F 对称半桥变换器中的滤波电感面积积公式推导	207
 附录 G 不对称半桥变换器中的变压器面积积公式推导	209
 附录 H 不对称半桥变换器中的滤波电感面积积公式推导	211

第 1 章 DC-DC 功率变换技术概论

实现高功率密度电力电子产品的关键是其功率变换电路的高效率和小型化。为了实现高的功率变换效率,在功率变换电路中,只能采用电抗性元件和工作于开关方式的电子器件。其中,电抗性元件主要有功率电感、功率电容和功率变压器,它们用来实现储能、滤波和隔离;开关方式工作的电子器件主要有功率 MOSFET、功率 IGBT 和功率二极管等,它们用来实现对输出电压、输出电流和输出功率的变换及控制。为了实现小的功率变换电路体积,这些电子开关的工作频率应越高越好,以便尽量减小电抗性元件的体积。所以一个合理的电力电子变换电路只能是由功率电子开关和功率电抗性元件组成的高频开关功率变换电路。

输入和输出都为直流的高频开关功率变换电路,也被称为 DC-DC 功率变换器,是所有电力电子产品的功率变换基础。下面先结合几种不同的电源产品结构来阐述 DC-DC 功率变换技术产生的原因,然后再将 DC-DC 的发展历史和 DC-DC 的研究概要作一下总结。

1.1 DC-DC 产生的原因

根据上面的分析,DC-DC 功率变换器的一般结构可用图 1-1 表示。除了粗线框内的功率变换电路外,还有 3 个输入变量。其中两个为环境变量,分别是输入电压和负载电流;一个是控制驱动信号,多为频率固定、宽度可调的(PWM)电压信号。通过改变控制电压信号的宽度来改变 DC-DC 功率变换电路的输出电压,是实现输出稳压的关键。用解析法,可以将上述 DC-DC 功率变换电路的稳态输入/输出电压增益写成

$$\frac{U_o}{U_g} = M(D, R, K) \quad (1-1)$$

式中 D ——控制信号的稳态占空比, $D = \frac{T_{on}}{T_s}$;

T_{on} ——控制信号的稳态宽度;

T_s ——控制信号的周期;

R ——负载端的等效电阻, $R = \frac{U_o}{I_o}$;

$K = K(L, f_s, R)$ ——参变量;

L ——输出滤波电感;

f_s ——开关频率, $f_s = \frac{1}{T_s}$ 。

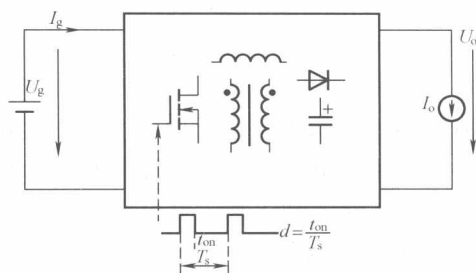


图 1-1 DC-DC 功率变换器的一般结构

从式 (1-1) 可知, 当输入电压或负载电流发生变化时, 其输出电压在占空比不变时也将发生变化。为了保持输出电压不随输入电压和负载的变化而变化, 我们可以改变占空比。这个原理是实现各类电力电子产品输出稳压的基础。下面从不同电源产品的结构方框图来说明, DC-DC 功率变换器是它们中最重要和最基本的功率变换环节。

1. AC-DC 开关电源的结构方框图

传统无 PFC 要求的 AC-DC 开关电源结构方框图如图 1-2 所示。这种开关电源在 20 世纪 90 年代之前, 曾经是开关电源中的主流。它直接将交流电网用二极管桥进行全波整流, 再用一个大的输入电容将其滤波成含有 2 倍网频分量的直流输入, 由于交流输入电压的范围和负载电流的范围都很广, 所以粗线框中的 DC-DC 功率变换器及其控制便是这种开关电源中的核心。它不仅要实现全输入电压和全负载范围内的输出电压稳压, 而且要实现输出电压的低纹波。

利用 DC-DC 功率变换的高频开关, 将包含 2 倍网频分量的输入 DC 电压, 先斩波为高频的 AC 电压, 然后用高频功率变压器, 将其隔离并传递到输出端, 在输出端再对隔离后的高频 AC 电压进行整流和滤波, 并通过闭环控制来实现精度及其他要求的 DC 输出电压。

在 20 世纪 80 年代中后期, 由于 IEC 1000-3-2 的颁布, 对开关电源的输入电流谐波作了具体的限制, 此后开发的 AC-DC 开关电源也发生了许多变化。包含 PFC 的 AC-DC 开关电源结构方框图如图 1-3 所示。它是目前 50W 以上的所有 AC-DC 开关电源所采用的结构方框图。这种 AC-DC 开关电源在 DC-DC 功率变换器之前加了一个 PFC 前置级, 用来实现交流输入电流的近似正弦和 PFC 输出电压的近似稳压。从目前这种 AC-DC 开关电源的前置级 PFC 的实现来看, 其功率级主要有一个全波桥式整流电路和一个 DC-DC 功率变换器

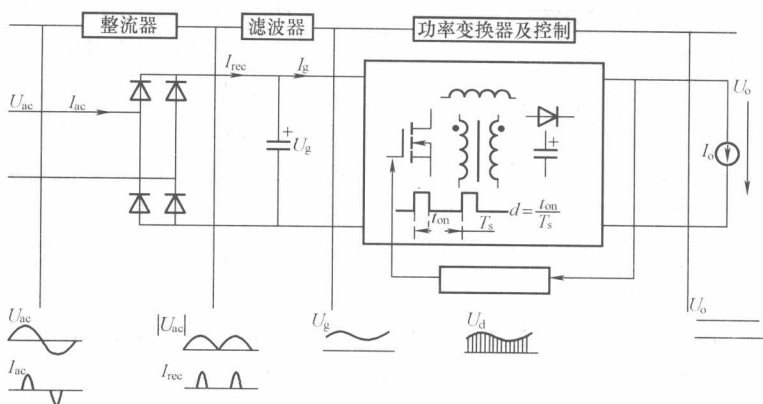


图 1-2 传统无 PFC 要求的 AC-DC 开关电源结构方框图

组成, 关键的电路仍是 DC-DC 功率变换器 (已被固化为 Boost 变换器)。所以包含 PFC 的 AC-DC 开关电源的核心功率变换电路依然是两个 DC-DC 功率变换器。

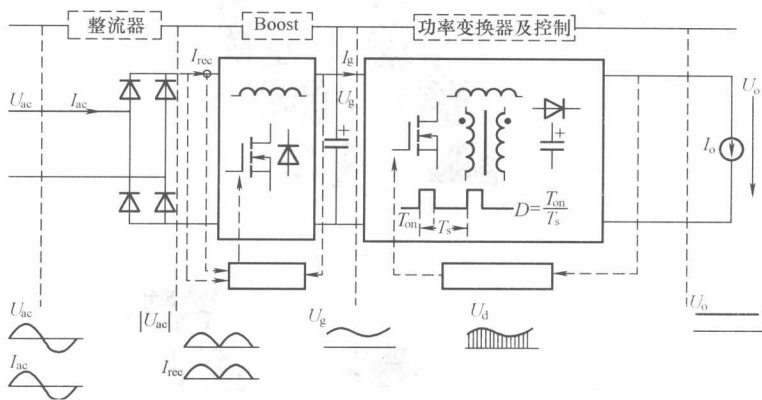


图 1-3 包含 PFC 要求的 AC-DC 开关电源结构方框图

2. DC-DC 开关电源的结构框图

DC-DC 开关电源的结构框图如图 1-4 所示。这种开关电源在通信领域中的应用最多, 它的输入是一个直流, 一般是前一个 AC-DC 开关电源的输出, 其输出通常是通信单板负载所需的直流电压。由于通信单板上的负载非常多, 故这种 DC-DC 的输出电压和输出功率也就非常多, 用它作为模块可构成下面两种最常用的通信设备供电方案。其中方案 1 的 DC-DC 供电采用二次电源模块 (标准 DC-DC 开关电源为主, 如半砖、1/4 砖和 1/8 砖) 实现; 方案 2 的

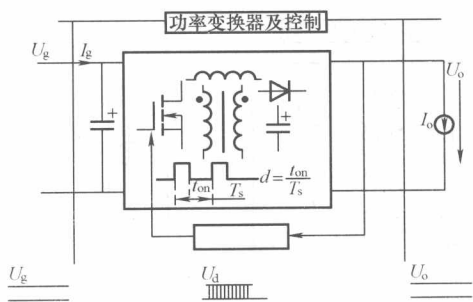


图 1-4 DC-DC 开关电源的结构框图

就是 DC-DC 功率变换器。方案 2 中的 POL，其核心功率变换电路也是一个 DC-DC 功率变换器。

DC-DC 供电采用中间 BUS 二次电源模块（标准 DC-DC 中间 BUS 变换器为主，如半砖、1/4 砖和 1/8 砖等）和 DC-DC 变换器（POL 为主，如 Buck 变换器构成的集成单片开关电源）实现，如图 1-5 所示。无论哪种供电方案，都需采用大量的 DC-DC 开关电源模块，而这些 DC-DC 开关电源模块中的核心功率变换电路

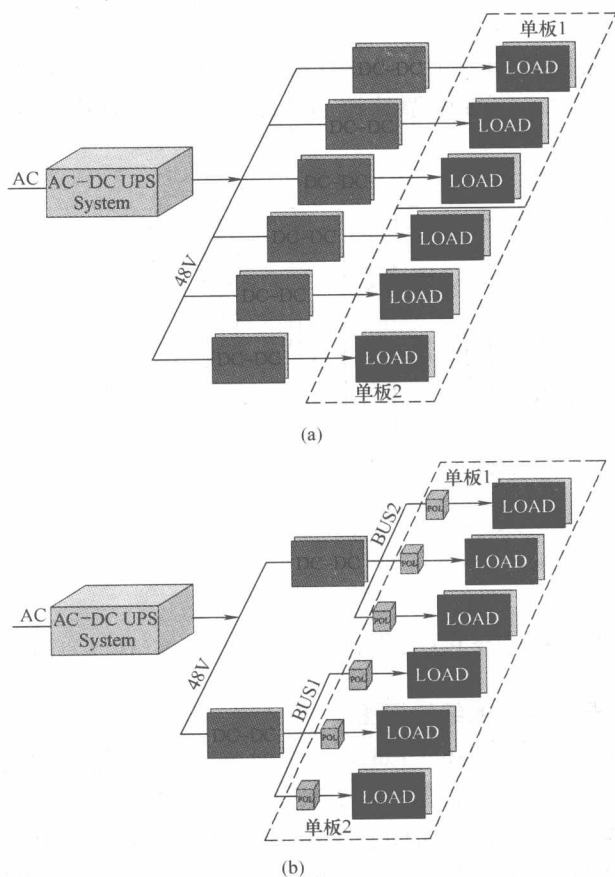


图 1-5 通信设备供电方案
(a) 方案 1；(b) 方案 2

除了 AC-DC 开关电源和 DC-DC 开关电源外,其他常用的电力电子产品,其核心功率变换电路也都包含了 DC-DC 功率变换器。

在 UPS 中,为了实现输出 AC 电压的不间断,当输入电网断电后,要迅速通过电池和逆变器给输出提供与电网同频的 AC 电压。这个系统由输入 PFC、逆变器、电池充电器、电池升压电路和相应的控制及切换电路组成。其中,输入 PFC、电池充电器和电池升压电路的核心功率变换电路就是 DC-DC 功率变换器,而逆变器的功率级电路,从形式上看也是一种 DC-DC 功率变换电路(如半桥逆变器、全桥逆变器),只是将 AC-DC 或 DC-DC 开关电源中的 PWM 控制改成了 SPWM 控制,将直流负载改成了交流负载,将单向电子开关改成了双向电子开关而已。所以 UPS 及逆变器产品中的核心功率变换电路依然是 DC-DC 功率变换器。

在变频器中,为了改变输出交流的频率,一般采用两级变换的方式来实现,第一级是 AC-DC 功率变换,目前这一级采用的多是 PFC 电路;第二级是 DC-AC 功率变换,它是一个逆变器,根据前面的分析,这种方式构成的变频器,其核心功率变换电路依然是 DC-DC 功率变换器。

既然 DC-DC 功率变换器是所有电力电子产品的核心功率变换电路,故它的产生就是节能型社会的必然结果。对 DC-DC 功率变换电路的拓扑、分析和控制的研究,及其具体的应用也就必定成为电力电子领域的主要内容。

1.2 DC-DC 的发展历史

DC-DC 功率变换可以追溯到 20 世纪 50 年代初,晶闸管直流斩波器便是最早的 DC-DC 功率变换器,它被用于直流牵引等领域。在 20 世纪 70 年代,随着计算机的发展和功率 MOSFET 的出现,DC-DC 功率变换技术也开始了它的迅速发展。

DC-DC 功率变换技术的发展可以分成下面几个不同的阶段:① DC-DC 功率变换器的拓扑研究阶段;② DC-DC 功率变换器的控制研究阶段;③ DC-DC 功率变换器的小信号建模研究阶段;④ DC-DC 功率变换器的设计与应用阶段。每个阶段的研究并不是孤立的,而是相互交叉、相互渗透的。

20 世纪 70 年代初到 80 年代末的 20 年中,DC-DC 功率变换技术的研究主要集中在前面的三个阶段。

从拓扑层面上看,主要集中在基本变换器的隔离版本上,如 Buck 变换器的隔离版本(正激变换器、桥式变换器、推挽变换器等),Buckboost 变换器的隔离版本(反激变换器);还有部分的软开关变换器,如相移控制全桥变换器等。

其中被学术界研究最多的拓扑是 Cuk 变换器及它的各种集成磁版本；准谐振变换器及多谐振变换器。

从控制层面上，主要集中在电压型控制和峰值电流型控制上，推出了许多专用的 PWM 控制芯片，如 SG3524、SG3525、TL494、UC3823、UC3825、UC3842 ~ UC3845 等。

从建模层面上，主要集中在 DC - DC 功率变换器的小信号模型上，提出了以状态空间平均法、等效电源平均法和三端 PWM 开关平均法为代表的平均建模技术。通过平均建模技术，对电压型控制的开关电源进行了完整的动态小信号稳定性分析和设计。

从应用层面上，已成功地开发了大量的计算机开关电源、通信 AC - DC 电源模块及系统和第一代标准的 DC - DC 模块电源。

20 世纪 90 年代至今，DC - DC 功率变换技术的研究主要局限在两个重要的方面，一个是高速 CPU 的供电电源，即 VRM (Voltage Regulator Module, 电压调节模块) 的研究与开发；另一个是高功率密度开关电源的研究与开发。

VRM (VRD) 已成为目前计算机 CPU 继续提高速度的瓶颈之一。为了在很低的输出电压 (1V 左右) 下，高精度 (1% 以下) 地跟随负载的快速跳变 ($150\text{A}/\mu\text{s}$ 以上)，其实现难点已变成控制、元器件、工艺、结构和包装等多重因素。

为了不断提高电源的功率密度，就要在已有的元器件基础上，提高开关频率，从而使开关器件的应用更加困难。学术界为此提出了大量的软开关 DC - DC 功率变换器。在 20 世纪 90 年代的 10 年中，研究最多的是各种软开关 PWM DC - DC 功率变换器和低压大电流输出的各种同步整流技术，其中有源去磁正激变换器和不对称驱动半桥变换器是研究的热点。

在 21 世纪的最初 6 年中，在开关电源的功率密度方面，尤其是标准 DC - DC 模块电源的功率密度方面，得到了迅速的发展，尺寸从半砖到 1/4 砖，再到 1/8 砖、1/16 砖只花了短短 5 年的时间。单片集成的开关电源也已开发成功，并被用作负载端 (POL) DC - DC 变换器。

综观近 40 年的 DC - DC 发展历史，其研究也不外乎以下几个方面：功率级的拓扑研究、功率级的分析 (包括稳态分析和动态小信号分析) 研究，功率级的控制研究和功率级的应用研究等。

1.3 DC - DC 研究概要

DC - DC 功率变换的主要研究内容可大致概括为表 1-1。

表 1-1

DC-DC 功率变换的主要研究内容

DC-DC 的拓扑研究	基本 DC-DC 功率变换器拓扑
	从基本 DC-DC 功率变换器衍生的隔离 DC-DC 功率变换器拓扑
	DC-DC 功率变换器的拓扑综合技术
	中大功率 DC-DC 功率变换器的软开关技术
	DC-DC 变换器的并联技术
	DC-DC 变换器的串联技术
	DC-DC 变换器的级联技术等
DC-DC 的控制研究	电压型控制技术
	电流型控制技术（峰值电流控制、平均电流控制、CCM/DCM 控制）
	其他控制技术：电荷控制技术、一周周期控制技术、V 平方控制技术、混合控制技术 技术等
DC-DC 的建模研究	状态空间平均法
	等效电源平均法
	三端 PWM 开关模型法
	其他建模方法
DC-DC 的应用研究	DC-DC 的稳态分析、设计与优化
	DC-DC 的动态小信号分析、设计与优化
	DC-DC 的动态大信号分析、设计与优化等

下面各章将专门介绍常用的 DC-DC 功率变换器拓扑，并给出目前在产品中用得最多的那些 DC-DC 功率变换器的工程设计指南。

第2章 基本 DC-DC 功率变换器拓扑

从第1章 DC-DC 功率变换的一般结构方框图（见图1-1）可知，当输入和输出不需要隔离时，一个最基本的 DC-DC 功率变换器，其组成只能有也必须有下列四个元器件，它们分别是有源开关（一般为 MOSFET）、无源开关（一般为二极管）、滤波电感和滤波电容。

到目前为止，最基本的 DC-DC 功率变换器共有 3 个，它们分别是 Buck（降压式）变换器、Boost（升压式）变换器和 Buckboost（升降式）变换器。在文献中，通常还把另外 3 个变换器，即 Cuk 变换器、Sepic 变换器和 Zeta 变换器也看作是基本 DC-DC 变换器。本章将对这 6 个基本变换器及其各自的家族作详细的介绍。

为了方便推导 DC-DC 功率变换器的稳态关系，在介绍具体的基本 DC-DC 功率变换器之前，先给出电感电压的伏秒平衡定律，以便后续小节中简单地获得 PWM（Pulse Width Modulation，脉宽调制）DC-DC 功率变换器在 CCM 下的稳态关系。

电感电压的伏秒平衡定律：对于已工作在稳态的 PWM DC-DC 功率变换器，有源开关导通时加在滤波电感上的正向伏秒一定等于有源开关截止时加在电感上的反向伏秒，详细的证明见附录 A。

2.1 Buck 变换器

1. 工作原理

Buck 变换器的电路原理图如图 2-1 所示，从电路图可知 Buck 变换器的工作原理为：当有源开关 V 导通时，无源开关 VD 因反偏而截止，此时输入给输出滤波电感储能（或励磁），并向负载提供能量；当有源开关 V 截止时，由于电感电流不能突变，故使无源开关 VD 正偏而导通，此时电感电流经二极管续流，其储存的能量继续供向负载，并由输出电压对其进行去磁。输出滤波电容主要用来限制输出电压上的开关频率纹波分量，使之远小于稳态的直流输出电压。

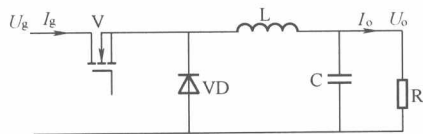


图 2-1 Buck 变换器

2. 稳态关系和特征

在忽略输出电压的开关纹波时，可利用前面介绍的电感电压伏秒平衡定律