

DC-DC 开关变换器的 建模与设计

解光军 程 心 著



科学出版社

DC-DC 开关变换器的建模与设计

解光军 程 心 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统论述了各类主要 DC-DC 开关变换器的建模方法及其控制技术,并设计了相关的电路,主要内容包括:DC-DC 开关变换器主电路建模、电压型开关变换器的建模与设计、峰值电流型开关变换器的建模与设计、开关变换器的右半平面零点与稳定性分析、单电感多输出 DC-DC 开关变换器、DC-DC 软开关变换器,以及数字 DC-DC 开关变换器的建模与仿真等。本书力图通过上述内容的探讨,使读者将电路分析与设计、电力电子技术、自动控制理论,以及数学建模知识结合起来,掌握对 DC-DC 开关变换器的复杂系统进行仿真分析与电路设计的方法。

本书可作为高等院校电子科学与技术专业、微电子科学与工程专业和电气工程及其自动化专业高年级本科生以及相关专业研究生的教学参考书,也可供从事集成电路设计、电力电子技术研究的广大科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

DC-DC 开关变换器的建模与设计/解光军,程心著. —北京:科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046907-6

I. ①D… II. ①解… ②程… III. ①开关—变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 317806 号

责任编辑:余 丁 闫 悦 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:274 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

DC-DC 开关变换器是所有开关变换器的基础和核心,近年来发展迅速、应用广泛,但作为一个高阶、多环路、多变量的闭环系统,其设计需要考虑多种参数和因素的影响,同时,它又是一个强非线性时变系统,不能直接运用拉普拉斯变换等经典的线性分析方法,因此,为揭示 DC-DC 开关变换器的电学特性和物理本质,必须建立与之等效的数学模型,并通过仿真分析,进而指导电路设计。

本书针对 DC-DC 开关变换器,研究了其不同类型实现电路的建模分析方法,包括功率级主电路、电压控制型、峰值电流控制型、单电感多输出型、软开关结构以及数字 DC-DC 开关变换器,并考虑了各种非理想因素的影响,深入研究了右半平面零点和稳定性问题。目前已出版的同类书籍多属电气工程领域,注重控制技术的实现,建模部分往往只作为其中的一个环节,尚无专门论述 DC-DC 开关变换器建模方面的书籍,本书则从系统设计的角度出发,关注 DC-DC 开关变换器电路本身的分析、设计与实现。书中含有大量的理论公式推导和分析,研究方法系统、全面,数学严谨、细致,示范性好,可操作性强。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(61401137、61271122)及合肥工业大学精品课程项目的资助。在本书的编写过程中,合肥工业大学集成电路设计研究中心电源组的徐慧芳、李军、宣传、陈琳、方海彬、沈勇、丁德彬、毛佳佳、梁风霞、杜龙杰、陈洋、邓飞、方晓斌等提出了宝贵的意见并做了大量的工作,作者在此一并表示感谢。

本书凝结了作者及团队多年来的科研积累和设计经验,并借鉴了该领域国际学术界的最新进展,在许多问题的求解与分析方面有独特之处,希望这些研究方法对从事相关研究的同行有一定借鉴价值。

鉴于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2015 年 5 月

目 录

前言

绪论	1
第 1 章 DC-DC 开关变换器及控制系统	5
1.1 DC-DC 开关变换器的基本结构	5
1.1.1 非隔离型 DC-DC 开关变换器	5
1.1.2 隔离型 DC-DC 开关变换器	9
1.2 DC-DC 开关变换器的其他结构	16
1.2.1 嵌套型 DC-DC 开关变换器	16
1.2.2 改进型 DC-DC 开关变换器	17
1.2.3 双向 DC-DC 开关变换器	19
1.3 DC-DC 开关变换器的控制系统	20
1.3.1 电压型控制	21
1.3.2 电流型控制	25
1.3.3 磁通型控制	27
1.3.4 电荷型控制	28
1.3.5 组合型控制	29
第 2 章 DC-DC 开关变换器的建模	31
2.1 基本建模方法介绍	31
2.1.1 状态空间平均法	31
2.1.2 开关元件平均法	37
2.2 非理想 DC-DC 开关变换器的建模	41
2.2.1 CCM 非理想变换器的建模	41
2.2.2 DCM 非理想变换器的建模	47
2.2.3 CCM、DCM 的统一模型	55
2.3 模型仿真与分析	55
第 3 章 电压型开关变换器的建模与设计	59
3.1 DC-DC 开关变换器系统介绍	59
3.1.1 系统工作原理	59
3.1.2 系统主要性能参数	60

3.1.3	控制电路中的补偿网络	67
3.1.4	开关变换器系统设计	71
3.2	电压型开关变换器的建模与设计	72
3.2.1	系统建模	73
3.2.2	系统分析与设计	80
3.2.3	设计实例与仿真分析	83
第 4 章	峰值电流型开关变换器的建模与设计	88
4.1	峰值电流型开关变换器系统介绍	88
4.1.1	系统工作原理	88
4.1.2	斜坡补偿	90
4.2	峰值电流型开关变换器的建模与设计	96
4.2.1	系统建模	96
4.2.2	系统分析与设计	102
4.2.3	设计实例与仿真分析	106
第 5 章	开关变换器的右半平面零点与稳定性分析	111
5.1	右半平面零点及其影响	111
5.2	改善右半平面零点的方法	113
5.2.1	增加耦合电感	114
5.2.2	三态变换器	115
5.2.3	自适应电压定位控制	118
5.2.4	改进型迟滞电流控制	124
5.2.5	固定占空比控制	129
5.2.6	电流平衡交错控制	133
第 6 章	单电感多输出 DC-DC 开关变换器	145
6.1	多路输出开关变换器的实现	145
6.2	单电感多输出 DC-DC 变换器	147
6.2.1	单电感多输出 DC-DC 变换器结构	147
6.2.2	单电感多输出 DC-DC 变换器的工作模式	149
6.2.3	单电感多输出 DC-DC 变换器的工作原理	150
6.3	降低交叉影响的措施	157
6.3.1	工作在特定时序及模式	158
6.3.2	调制输出电压的共模和差模信号	158
6.3.3	平均电流控制与电荷控制相结合	162
6.3.4	交叉反馈控制	163

6.3.5	模型预测控制	164
6.3.6	利用传递函数的逆函数作为控制函数	167
第 7 章	DC-DC 软开关变换器的建模	170
7.1	软开关技术	170
7.2	ZVZCS 全桥变换器及其建模	173
7.2.1	工作过程分析与有效占空比推导	173
7.2.2	有效占空比推导与模型建立	176
7.2.3	模型仿真	181
7.3	ZVS 变换器及其建模	185
7.3.1	工作过程分析	185
7.3.2	有效占空比推导与模型建立	189
7.3.3	模型仿真	191
第 8 章	数字 DC-DC 开关变换器	193
8.1	数字 DC-DC 开关变换器基本原理	193
8.1.1	模数转换器	194
8.1.2	数字补偿器	198
8.1.3	数字脉冲宽度调制器	199
8.2	数字变换器存在的主要问题及其解决方案	201
8.2.1	采样、量化误差	201
8.2.2	采样、计算延时	203
8.2.3	数字控制技术	207
8.3	数字开关变换器的建模	211
参考文献		216

绪 论

1. DC-DC 开关变换器及其发展

广义地说,凡是以半导体功率器件作为开关,将一种电源形态转变成另一种电源形态的电路都叫做开关变换器。根据变换方式的不同,开关变换器可分为直流-直流(DC-DC,又称斩波器)、交流-直流(AC-DC,又称整流器)、直流-交流(DC-AC,又称逆变器)、交流-交流(AC-AC,又称变频器)四种。其中,DC-DC变换器是所有开关变换器的基础和核心,其他类型的开关变换器,如AC-DC变换器,在整流之后仍包含DC-DC变换部分;AC-AC变换器,可由正反两个DC-DC变换器组合而成。此外,DC-DC变换器在所有变换器中开关频率提高最快,它在提高频率时所遇到的开关工作过程、稳定性、能量损耗等问题,其他几种变换器也都会遇到。因此,研究DC-DC开关变换器具有十分重要的意义。

DC-DC开关变换器的基本工作原理为:通过调节开关晶体管导通和关断的时间比率(即占空比),控制功率从输入电源到输出负载的动态传递,从而得到稳定的输出电压^[1]。与另外两种电压变换器——低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)和电荷泵相比,DC-DC开关变换器具有转换效率高、稳压范围宽、功率密度比大、重量轻、灵活的正负极性和升降压方式等优点,因此获得广泛应用,涉及领域包括远程及数据通信、计算机、办公自动化设备、工业仪器仪表、军事、航天等各行各业。

到20世纪,随着功率开关器件的发展,DC-DC开关变换器的结构和技术已经取得极大成就;在此基础上,DC-DC开关变换器近年来朝着提高集成度、提高转换效率、提高控制精度、小型轻量化和数字化的方向飞速发展。

(1) 提高集成度。早期的开关变换器电源系统以分立元件构成为主。20世纪90年代中后期,出现了由控制芯片、功率开关管和电感、电容元件组成的功率集成电路(power IC)。由于方便地实现了功率调节、远程控制等功能,以及体积、重量得到大幅度降低,功率集成电路顺应了现代便携式电子设备对电源的需求,得到广泛应用和快速发展。集成开关电源在通信行业、工业自动化、汽车制造业、航空航天等领域成为电源设计的主流,代表着稳压电源的发展方向,被誉为高效节能电源。发展到今天,功率集成电路已经把控制电路和功率开关管完全集成于一块芯片,外部仅需少量的电感、电容元件便可构成开关电源系统。可以预测,随着电感集成技术的日渐成熟和工艺水平的不断进步,开关电源系统的集成度将会越来越高。

(2) 提高转换效率。提高转换效率意味着降低变换器的能量损耗,这在便携式电子产品中显得尤为重要。DC-DC开关变换器的开关损耗主要包括:开关器件导通时,

电流流过开关导通电阻所产生的导通损耗；开关器件在导通、截止之间转换时，开关管栅源电容的充放电所引起的开关损耗。针对这两部分损耗，分别出现了同步整流技术和软开关技术。

同步整流技术采用金属-氧化物-半导体场效应晶体管（metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET）代替整流二极管，由于 MOSFET 的导通电阻很小，只有几十毫欧，所以开关导通损耗大大降低，提高了转换效率。同步整流技术尤其适用于低电压、大电流场合。

软开关技术是指在功率开关导通、关断的瞬间，利用辅助开关降低主开关管的电压或电流，近似实现零电压或零电流开关，而在非开关时间内电路仍以传统方式工作，因此主电路的电压、电流幅值仍与传统 DC-DC 变换器相同，且零电压、零电流开关条件不受输入电压和负载变化的影响。这种技术的特点是电压、电流在变换过程中没有波形交叠，开关损耗近似为零，从而可以提高系统的电源转换效率。软开关技术适用于开关频率高、大功率的应用场合。

此外，还有诸如低功耗待机、远程关断、跳周期、轻载时降低开关频率等提高转换效率的措施。

(3) 提高控制精度。随着 DC-DC 开关变换器性能要求不断提高，其控制方式由最初的电压型单环控制发展到电流型、 V^2 型双环控制，再到以 V^2C 为代表的三环控制，以提高控制精度、加快响应速度，从而优化系统性能。

(4) 小型轻量化。随着集成度的提高，开关电源所需的外围元件越来越少；而随着开关频率的提高，系统所需的电感、电容值降低，元件占用的体积、重量减小。此外，还出现了由同一个输入电源实现多路输出的拓扑结构，多路输出电源可以通过并联或串联方式实现。采用单输入多输出结构的 DC-DC 变换器，可有效减小整机体积、改善整机综合性能。

(5) 数字化。与传统的模拟开关变换器相比，数字变换器具有更高的可靠性和灵活性。数字变换器中的模拟元器件较少，因此增加了系统的平均无故障工作时间，并且可以通过增加保护、监视和预警等功能提高系统的工作可靠性。为了实现不同的控制规律，数字控制电路只需通过编程来修改、增加或删除控制参数，大大缩短了设计周期，且设计过程相当灵活。此外，数字变换器易于实现与其他数字设备之间的接口，具有较好的兼容性。鉴于以上各种优点，数字变换器的研究和发展开始受到关注。

综上所述，目前 DC-DC 开关变换器发展的技术趋势为：模块化技术、软开关技术、高频化技术以及数字化技术等，这些新技术的发展迫切要求相应的建模理论与计算机仿真技术的发展。

2. DC-DC 开关变换器建模简介

作为一个高阶、多环路、多变量的闭环系统，DC-DC 开关变换器的设计需要考虑各种参数和众多因素的影响，因此必须对变换器的工作机理以及各参数之间的内在联

系进行深入分析和研究。然而, DC-DC 开关变换器又是一个强非线性时变系统, 不能直接运用拉普拉斯变换等经典的线性分析方法, 因此对其展开分析研究不太容易。为了揭示 DC-DC 变换器的电学特性和物理本质, 必须建立与之等效的数学模型, 并通过仿真分析, 进而指导电路设计。DC-DC 开关变换器的建模是整个设计过程的基础, 人们对此展开了深入的研究并已取得一定的成果。

现有的 DC-DC 变换器建模与仿真方法大致分为两大类: 一是数字仿真法, 其核心是利用一定的算法计算变换器特性的数字解; 二是解析仿真法, 其核心是用解析理论推导变换器特性的解析表达式。前者的优点是准确度高, 可以得到小信号扰动和大信号激励时的响应特性及波形, 不足之处是物理意义不清晰, 对电路设计的指导意义不大。后者则正好相反, 由于用解析式来表示变换器特性, 所以物理意义明确, 可作为设计依据来调节相关参数、控制电路特性的变化, 缺点是使用不太方便, 精度不够高。

1) 数字仿真法

数字仿真法分为直接法和间接法。其中, 直接法直接利用现有的通用电路仿真程序(如 SPICE), 不需要重建电路模型; 而间接法则需要建立专用的数学模型, 用适当的数值方法进行求解。

(1) 直接法 (SPICE 仿真)。

SPICE (包括其派生版本 PSPICE、HSPICE 等) 作为一种通用电路仿真程序, 在开关变换器的时域大信号瞬态和频域小信号仿真中得到广泛的应用。其优点是直接由电路仿真, 不必列写电路方程。但它应用在仿真功率电子电路时存在效率低、不易收敛等问题。

SPICE 与其他高性能的仿真软件(如 MATLAB)相结合, 可为功率电子电路和系统的仿真创建更有力的计算机辅助分析与设计工具, 这也是今后发展的重要方向之一。

(2) 间接法 (离散时域法)。

离散时域法是一种间接法, 其基本思想是将开关变换器作为一个分段线性系统来分析, 利用状态变量法列出系统的分段线性方程, 并利用计算机进行数值求解, 从而较为精确地对系统进行分析 and 研究。

采用离散时域法, 需要解决以下主要问题: ①如何求解状态转移矩阵; ②如何确定拓扑改变的边界条件。各种仿真方法的区别在于求解上述问题的方法不同。可以采用截断 Taylor 级数, 通过以下办法来提高效率: 用查表法求系统的状态微分方程; 用改进的二分搜寻和二次外推法来确定开关切换的时刻。此外, 还可以采用 Chebyshev 级数法计算状态转移指数矩阵, 通过求解简单的代数方程获得拓扑发生改变的时刻, 消除时间量化误差。

离散时域法可用来仿真多环控制系统, 实现不同的控制规律, 快速、准确地研究拓扑变化和元件参数变化对系统瞬态特性的影响。可对开关变换器的稳态过程(如电压、电流纹波)、大信号响应(如启动过程)及小信号响应(如计算变换器的特征值、

稳定性分析、校验控制电路的设计)进行仿真分析。离散时域法的缺点是必须依靠计算机数值求解,得不到解析形式的数学方程,物理意义不清晰。

数字仿真法中各种仿真算法的提出都是以提高仿真效率(即减少仿真时间)或准确性为目的,如何在这两者之间取得更好的折中和协调,将是数字仿真法今后发展的一个重要方向。

2) 解析仿真法

解析仿真法可分为平均连续法、离散法以及两者相结合的平均离散法。此外,等效小参量法也属于解析法的范畴。

平均连续法又分为状态空间平均法和电路平均法。其中,状态空间平均法保持了解析法的优点,使用起来比较方便,因此,自1976年由Middlebrook等提出并完善后便得到广泛应用,它的优点是仍然可以利用波特图来进行校正,较好地解决了DC-DC变换器稳态和动态小信号的分析问题。此后,出现了具有与状态空间平均法同样准确度的电路平均法,如等效受控源法、三端开关器件法、高频网络平均法等。电路平均法的优点是简单以及拓扑不变性,它由最初仅限于PWM(脉冲宽度调制)型变换器向适用于各类变换器发展。其中,高频网络平均法特别适用于准谐振类变换器的分析,它将电路元件分为快变和慢变两部分,用时不变受控源来代替快变元件(开关元件和谐振元件)。

相对于平均连续法而言,离散法的分析过程无须过多的假定,因而准确度较高。但它采用差分方程及 z 变换技术,所得结果非常复杂且不利于电路设计,因而在实际应用中受到限制,近年来朝着与连续法相结合的方向发展。

我国学者丘水生教授和加拿大学者Filanavsky在20世纪80年代初为求解强非线性高阶系统提出了一种精度较高、分析过程简单的符号分析方法——等效小参量法。符号分析法也是一种解析分析法,它用符号表示部分或全部的电路元件,计算一个电路的行为和特性,更适于计算机仿真。等效小参量法是一种近似解析法,可以用于分析开关变换器的稳态情况,得到的稳态符号周期解表达式中,包含变换器状态解的一至二次纹波的近似解析解。

以上介绍的建模与仿真方法大都基于传统的电力电子系统应用而提出,模型的理想化程度较高,对于电路元件的寄生参数以及开关器件的非理想开关特性等,通常不做考虑或考虑不全。随着DC-DC开关变换器广泛应用于便携式设备,高效率、低电压已成为开关变换器的发展要求,在这种情况下,过于理想化的仿真模型会带来较大的偏差,不能完全满足系统仿真的要求,必须进行完善和发展。此外,如前面所述,不断发展的DC-DC开关变换器结构与技术,也对建模理论与计算机仿真技术提出了新的要求。总之,DC-DC开关变换器建模的发展方向为:模型精确度高,能够准确反映开关变换器的实际工作情况,建模过程简明扼要,物理意义清晰,便于设计。

第 1 章 DC-DC 开关变换器及控制系统

1.1 DC-DC 开关变换器的基本结构

根据输入、输出是否实现电气隔离，DC-DC 开关变换器可分为非隔离型和隔离型两大类。其中，非隔离型主要有 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk、SEPIC、Zeta 等结构，隔离型则包括反激、正激、半桥、全桥、推挽变换器等。不同的变换器结构可以实现不同的电压变换功能，如升压、降压、升降压、同向变换、反向变换^[2]。

1.1.1 非隔离型 DC-DC 开关变换器

1) Buck 变换器

Buck 变换器又称为降压变换器，是一种对输入、输出电压进行降压变换的直流斩波器，即输出电压低于输入电压。电路结构如图 1-1 所示，其中， v_i 、 v_o 分别表示输入、输出电压， i_L 表示电感电流， S 为功率开关管， Q 为续流二极管， L 、 C 分别为滤波电感、电容， R 为输出电阻。

Buck 变换器的工作原理是：当驱动信号使开关 S 导通时，续流二极管 Q 由于反偏而截止，如图 1-2(a) 所示，此时负载能量由输入电源提供，电感电压的极性为左正、右负，电感电流线性增加，其储存的磁场能量也逐渐增加，电容 C 开始充电，输出电压的极性为上正、下负；当驱动信号使开关 S 截止时，如图 1-2(b) 所示，由于电感电流不能突变，它所产生的感应电势阻止电流减小，电势极性变为左负、右正，同时使续流二极管 Q 导通，电感储能通过 Q 传递给负载，负载两端电压仍为上正、下负，当负载电压低于电容两端电压时，电容便向负载放电。驱动信号周期性地使电路重复上述过程，确保输出电压趋于稳定值。

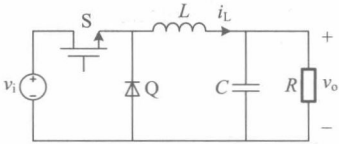
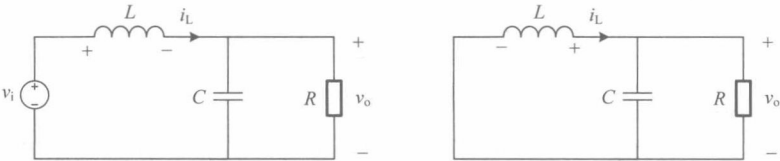


图 1-1 Buck 变换器



(a) S 导通、Q 截止

(b) S 截止、Q 导通

图 1-2 Buck 变换器的工作过程

定义占空比 D 为开关 S 的导通时间与开关周期之比, 则对于 Buck 变换器, 根据电感的伏特-秒平衡关系, 可以得到 CCM 的直流电压增益为

$$M = \frac{V_o}{V_i} = D \quad (1-1)$$

式中, V_i 、 V_o 分别对应输入、输出电压的稳态值。由于占空比 D 满足 $0 < D < 1$, 所以 Buck 变换器实现了降压功能。

2) Boost 变换器

Boost 变换器又称为升压变换器, 即输出电压高于输入电压。Boost 变换器结构如图 1-3 所示, 与图 1-1 中的 Buck 变换器相比, 电路元件完全相同, 区别仅在于开关、续流管、电感的位置不同。

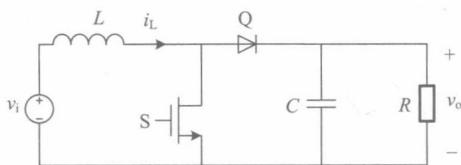


图 1-3 Boost 变换器

工作过程如下: 驱动信号使开关 S 导通时, 二极管 Q 由于反偏而截止, 如图 1-4(a) 所示, 此时能量从输入电源流入, 电感电流线性增加, 电能以磁能形式储存于电感线圈中, 电感电压的极性为左正、右负, 负载 R

由滤波电容 C 提供能量, 负载两端电压为上正、下负; 当 S 截止时, 如图 1-4(b) 所示, 电感电流不能突变, 它所产生的感应电势阻止电流减小, 电感电势变为左负、右正, 并使二极管 Q 导通, 电感在上一阶段储存的磁场能量此时通过二极管流入电容, 并传递给负载, 负载两端电压仍保持上正、下负。CCM Boost 变换器的直流电压增益为

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (1-2)$$

因此 Boost 变换器为升压变换器。

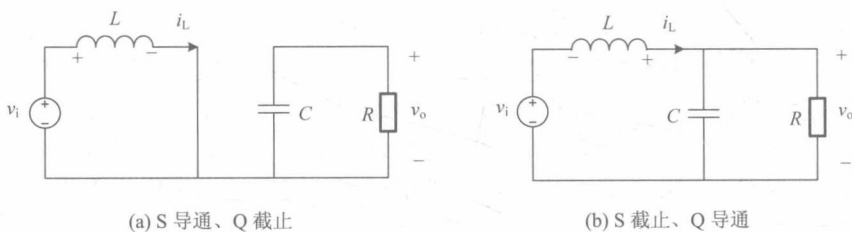


图 1-4 Boost 变换器的工作过程

3) Buck-Boost 变换器

Buck-Boost 变换器既能实现升压, 又能实现降压, 是一种升降压变换器。由于 Buck-Boost 变换器的输出电压与输入电压极性总是相反, 所以又叫做反极性变换器。基本电路如图 1-5 所示。

在图 1-6(a)中，当开关 S 导通时，二极管 Q 因反偏而截止，能量从输入电源流入，电感电流线性增加，其电压极性为上正、下负，此时，负载电流由电容 C 提供，负载两端电压为上负、下正。在图 1-6(b)中，当 S 截止时，电感所产生的感应电势阻止电感电流减小，电势极性变为上负、下正，并使二极管导通，电感储能通过二极管向负载释放，同时向电容 C 充电，负载两端电压仍为上负、下正。CCM Buck-Boost 变换器的直流电压增益满足：

$$M = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1-D} \tag{1-3}$$

因此，Buck-Boost 变换器既能实现升压，又能实现降压，但其输入、输出电压的极性总是相反。

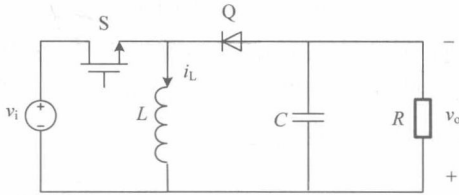


图 1-5 Buck-Boost 变换器

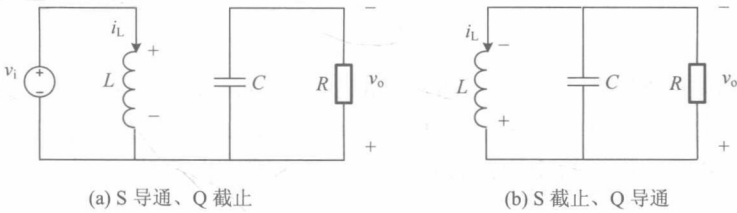


图 1-6 Buck-Boost 变换器的工作过程

4) Cuk 变换器

如图 1-7 所示，Cuk 变换器可以看作 Buck 变换器和 Boost 变换器通过合并开关管串联而成。由于在输入、输出端均存在电感，所以该结构可显著减小输入、输出电流纹波，当然这也增加了电路的体积和重量。Cuk 变换器的电压特性与 Buck-Boost 变换器相同，即实现反向升降压。

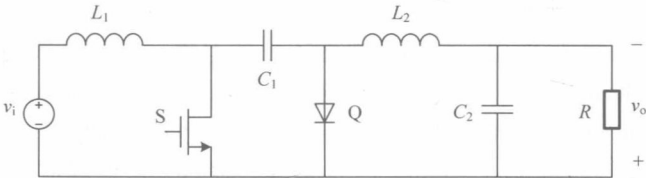


图 1-7 Cuk 变换器

具体工作过程如下：开关 S 导通时，如图 1-8(a)所示，输入电压使电感 L₁ 储能，L₁ 电压极性左正、右负，电流 i_{L1} 线性增加；电容 C₁ 的放电电流使电感 L₂ 储能，L₂ 电压极性左负、右正，电流 i_{L2} 线性增加，同时向负载 R 供电，输出电压上负、下正，

此时二极管 Q 在 V_{C1} 作用下反偏截止；开关 S 截止时，如图 1-8(b)所示， Q 正偏而导通，输入电源和电感 L_1 串联向 C_1 充电，同时 L_2 的释能电流 i_{L2} 维持负载电压， L_1 、 L_2 的电压极性发生变化， i_{L1} 、 i_{L2} 线性下降。与 Buck-Boost 变换器相同，在 CCM 条件下 Cuk 变换器也满足：

$$M = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{1-D} \quad (1-4)$$

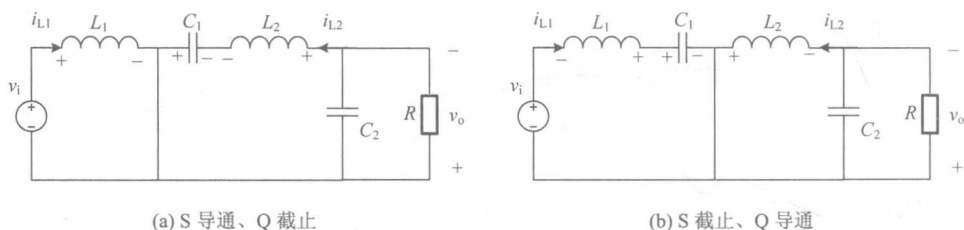


图 1-8 Cuk 变换器的工作过程

5) SEPIC 变换器

单端初级电感变换器 (single-ended primary inductance converter, SEPIC) 如图 1-9 所示，可以看出，它属于电感输入结构，类似于 Boost 变换器，输出部分则类似于 Buck-Boost 变换器，但其输出电压极性为正，即实现同向升降压。

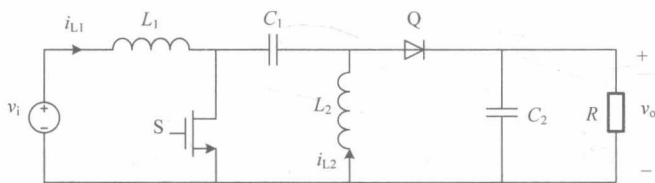


图 1-9 SEPIC 变换器

在图 1-9 中，当开关管 S 导通时，二极管 Q 反偏截止，如图 1-10(a)所示，此时变换器包含三个回路：输入电压使电感 L_1 储能， L_1 电压极性左正、右负，电流 i_{L1} 线性增加；电容 C_1 向电感 L_2 放电， L_2 电压极性下正、上负， i_{L2} 同样线性增加；第三个回路为电容 C_2 向负载 R 供电。当开关管 S 截止时，二极管 Q 正偏导通，如图 1-10(b)所示，变换器形成两个回路：输入电源和电感 L_1 的储能同时向电容 C_1 和负载供电，使 C_1 的储能增加、 i_{L1} 线性减小；此外， L_2 的储能也通过二极管释放到负载， i_{L2} 同样线性减小。CCM SEPIC 变换器的直流增益满足：

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (1-5)$$

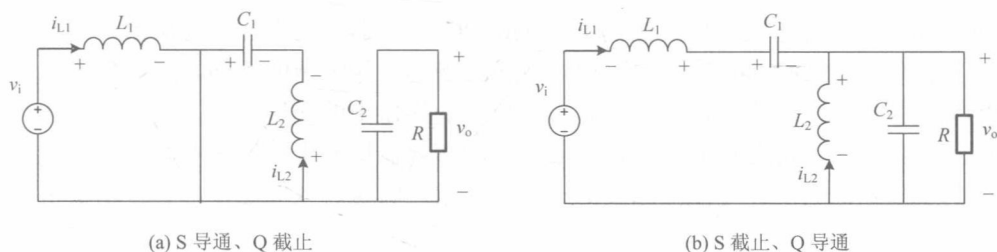


图 1-10 SEPIC 变换器的工作过程

6) Zeta 变换器

图 1-11 为 Zeta 变换器的电路图，其左半部分类似于 Buck-Boost 变换器，右半部分则类似于 Buck 变换器。Zeta 变换器与 SEPIC 变换器均可以实现同向升降压。

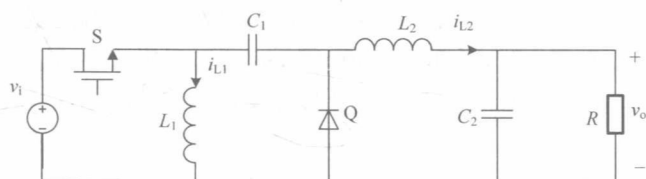


图 1-11 Zeta 变换器

如图 1-12(a)所示，当开关管 S 导通时，二极管 Q 反偏截止，输入电压使电感 L_1 储能， L_1 电压极性上正、下负，电流 i_{L1} 线性上升；同时输入电源与电容电压 V_{C1} 加在电感 L_2 上， L_2 电压极性左正、右负， i_{L2} 线性上升。当开关管 S 截止时，如图 1-12(b)所示，续流二极管导通， L_1 、 L_2 分别承受反向电压 V_{C1} 、 V_{C2} ， i_{L1} 、 i_{L2} 同时线性下降。CCM Zeta 变换器的直流电压增益与 SEPIC 变换器相同，即

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (1-6)$$

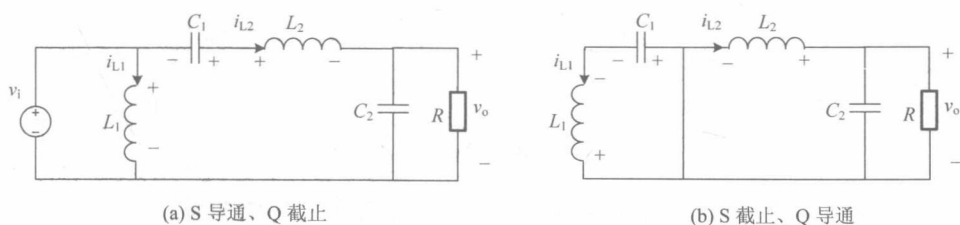


图 1-12 Zeta 变换器的工作过程

1.1.2 隔离型 DC-DC 开关变换器

在某些应用场合，由于电压等级变换、安全、系统串并联等，开关电源的输入、

输出往往需要进行电气隔离。在基本的 DC-DC 变换器结构中加入变压器，便可以衍生出各种隔离型 DC-DC 变换器。根据变压器磁芯工作区域的不同，隔离型变换器分为单端变换器和双端变换器两种。其中，单端变换器中的变压器磁芯仅工作在磁滞回线的第一象限，即磁芯单向磁化，反激、正激变换器均属于单端变换器；而双端变换器中的变压器磁芯工作在磁滞回线的一、三象限，即磁芯双向磁化，它包括半桥、全桥、推挽变换器。

1) 反激变换器

反激变换器又叫做 Flyback 变换器，因其输出端在变压器原边绕组断开输入电源时获得能量而得名。如图 1-13 所示， v_i 、 v_o 分别表示输入、输出电压，S 为功率开关管，T 为高频隔离变压器，其原、副边线圈匝数之比为 $n = N_1 : N_2$ ，Q 为整流二极管，C 为滤波电容，R 为负载。当开关 S 导通时，如图 1-14(a)所示，输入电压加在变压器原边绕组上，原边电流线性上升，变压器储存的磁能增加，此时二极管 Q 反偏而截止，负载电流由输出电容提供；当开关 S 截止时，如图 1-14(b)所示，此时二极管导通，变压器的储能通过二极管向负载释放，同时向电容充电。CCM 反激变换器的直流输入-输出电压变换比为

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{n(1-D)} \tag{1-7}$$

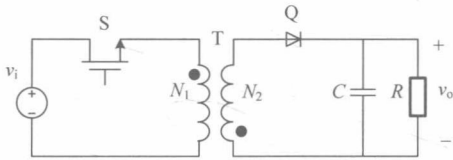


图 1-13 反激变换器

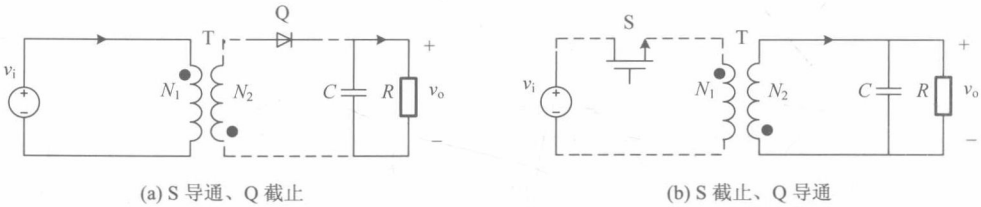


图 1-14 反激变换器的工作过程

反激变换器类似于 Buck-Boost 变换器，在功率开关管导通期间仅进行能量存储，而在功率管截止时才向负载传递能量，因此反激变换器可以看作是带隔离变压器的 Buck-Boost 变换器，变压器在工作过程中既起到隔离、改变输入输出电压比的作用，又相当于储能电感。反激变换器结构简单，成本低，但输出电压纹波较大，适用于多路输出以及对电压、负载调整率要求不高的场合。