

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23120081153187

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

恒定频率、电流模式的 DC / DC 反激变换器的设计与
研究

The Design and Research of Current Mode Flyback
DC / DC Converter with Constant Frequency

王 帅

指导教师姓名: 邢建力 高级工程师

专 业 名 称: 微电子学与固体电子学

论文提交日期: 2011 年 月

论文答辩日期: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着电子信息产业的飞速发展,传统电源已不能满足今天日益严格的应用要求,开关电源(Switch Mode Power Supply)因其具有体积小、重量轻、效率高、输入输出范围宽、调整精度高等优势,被广泛的应用于电子、通信、航天、医疗等领域。而开关电源的关键就是控制 IC 部分,并且控制 IC 重要的参数指标会对于整个开关电源电路产生极大的影响。

在本论文中,首先阐述了开关电源的基本原理和几种主要的拓扑结构,随后介绍了开关电源的几种不同的调制方式,对比了电流控制模式和电压控制模式,并分析了两种控制模式的优缺点。随后根据设计的要求和指标,选择反激式拓扑、PWM(Pulse Width Modulation)调制方式、峰值电流控制模式、电流连续工作模式做为来电路的总体结构,并完成了各个子模块的原理分析,电路设计和仿真验证,其中重点阐述了带隙基准源电路,电压误差放大电路、电流比较器电路、振荡器电路、PWM 逻辑控制电路、关断与欠压锁定电路,输出驱动电路的设计和验证过程,并利用 EDA 软件 Hspice 对其进行逐一的仿真验证。最后,在整体电路原理分析和子电路设计的基础之上,又对整体电路进行了功能仿真验证。最终仿真结果表明,电路能够稳定工作,基本上达到了设计指标要求。

关键词: 开关电源, PWM, 峰值电流模式, 反激拓扑

ABSTRACT

Along with the rapid development electronic information industry, traditional power supplies can not meet the needs of today's strict application requirement. Switching mode power supply, with its compact volume, small weight, high efficiency, wide input/output range and good line regulation, has been widely applied in the fields of electronics, communications, medical, aerospace, etal. The core of switching mode power supply is the part of control IC, and its important performance parameters have a significant impact on the whole switching mode power supply circuit.

The fundamental principle of switching mode power supply and several main topology architectures are firstly introduced in this thesis, which is followed by an introduction of several modulation mode, then a comparison between voltage-control-mode and current-control-mode, where the pros and cons of both are discussed in detail. Then, according to the design requirement, choosing fly-back topology, pulse width modulation mode, peak-current control mode and current continuous mode as the main architecture of the whole chip circuit. And complete the principle analysis, circuit design and simulation of each sub-block, which forces on several essential sub-blocks such as band-gap reference, error amplifier, current comparator, oscillator, PWM logic control circuit, shutdown and under-voltage lockout circuit and output driver circuit, and all the sub-blocks are simulated by the EDA tool Hspice. Finally, the simulation of whole circuit based on the global circuit principle analysis and sub-block design is completed by HSPICE. According to the results of Hspice simulation, the system is stable and other performance specifications required is attained basically.

Key words: Switch Mode Power Supply, Pulse Width Modulation Mode, Peak Current Control Mode, Fly back

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 开关电源的发展概况.....	1
1.2 电源管理芯片的现状与发展趋势.....	2
1.3 主要工作和本文结构.....	4
第二章 开关电源的理论基础	5
2.1 变换器拓扑结构简介.....	5
2.1.1 Buck 型变换器.....	5
2.1.2 Boost 型变换器.....	7
2.1.3 Buck-Boost 型变换器.....	9
2.1.4 Flyback 型变换器.....	11
2.2 开关电源的调制模式.....	13
2.2.1 PWM 模式.....	13
2.2.2 PFM 模式.....	15
2.2.3 PWM/PFM 混合模式.....	15
2.2.4 PSM 模式.....	16
2.3 开关电源的控制模式.....	16
2.3.1 电压控制模式.....	16
2.3.2 电流控制模式.....	17
第三章 芯片内部电路的整体设计	20
3.1 芯片整体描述及特点.....	20
3.2 芯片的内部电路结构.....	21
3.2.1 电路的各个模块及功能.....	22
3.2.2 引脚功能介绍.....	23
3.3 芯片的工作原理.....	23
第四章 子电路模块的设计与仿真	25
4.1 基准电压源的设计与仿真.....	25
4.1.1 带隙基准的设计.....	26

4.1.2	仿真结果及分析.....	29
4.2	芯片内部电源与电流源的设计与仿真.....	32
4.2.1	内部电源产生电路.....	32
4.2.2	内部偏置电流源.....	35
4.2.3	仿真结果与分析.....	36
4.3	电压误差放大器的设计与仿真.....	37
4.3.1	电压误差放大器的设计.....	38
4.3.2	仿真结果与分析.....	40
4.4	振荡器电路的设计与仿真.....	41
4.4.1	振荡器电路的设计.....	41
4.4.2	仿真结果与分析.....	44
4.5	关断比较器与欠压锁定模块的设计与仿真.....	45
4.5.1	Shutdown 比较器.....	46
4.5.2	欠压锁定电路.....	47
4.5.3	仿真结果与分析.....	51
4.6	斜坡补偿与逻辑控电路的设计与仿真.....	53
4.6.1	斜坡补偿与逻辑控制电路.....	57
4.7	其它子模块电路的设计与仿真.....	60
4.7.1	电流比较器的设计与仿真.....	60
4.7.2	驱动电路的设计与仿真.....	63
第五章	芯片整体仿真及其应用.....	65
第六章	工作总结与展望.....	68
参考文献	69
硕士期间发表的论文	72
致 谢	73

CONTENTS

1	Introduction.....	1
1.1	Development Status of SMPS	1
1.2	Status and Development Trend of Power IC	2
1.3	Main Work and Structure of This Paper	4
2	Theoretical Basis of SMPS.....	5
2.1	Introduction of Converter Topology.....	5
2.1.1	Buck Converter	5
2.1.2	Boost Converter	7
2.1.3	Buck-Boost Converter	8
2.1.4	Flyback Converter.....	11
2.2	Modulation Mode of SMPS	13
2.2.1	PWM Mode.....	14
2.2.2	PFM Mode	15
2.2.3	PWM/PFM Mixed Mode	15
2.2.4	PSM Mode	16
2.3	Control Mode of SMPS.....	16
2.3.1	Voltage Control Mode.....	16
2.3.2	Current Control Mode.....	17
3	The Overall Design of Chip Circuit.....	20
3.1	The Overall Description and Characteristics of Chip	20
3.2	The Internal Circuit Structure of Chip.....	21
3.2.1	The Functions of Each Moudle in Chip.....	22
3.2.2	Introduction of Pin Function.....	23
3.3	The Working Principle Of Chip.....	23
4	The Design and Simulation of Each Subcircuit.....	25
4.1	The Design and Simulation of Reference Circuit	25
4.1.1	The Design of BGR	26

4.1.2	Simulation Results and Analysis.....	29
4.2	The Design and Smulation of Power Supply & Current Source in Chip...32	
4.2.1	The Circuit of Internal Power Supply	32
4.2.2	Internal Bias Current Source.....	35
4.2.3	Simulation Results and Analysis.....	36
4.3	The Design and Smulation of Error Amplifer	37
4.3.1	The Design of Error Amplifer.....	38
4.3.2	Simulation Results and Analysis.....	40
4.4	The Design and Smulation of Oscillator	41
4.4.1	The Design of Oscillator.....	41
4.4.2	Simulation Results and Analysis	44
4.5	The Design and Smulation of Shutdown Comparator & ULVO Block	45
4.5.1	Shutdown Comparator	46
4.5.2	ULVO Block	47
4.5.3	Simulation Results and Analysis.....	51
4.6	The Design and Smulation of Slope Compensation & Logic Control Circuit	53
4.6.1	Slope Compensation & Logic Control Circuit.....	57
4.7	The Design and Smulation of Other Subcircuits.....	60
4.7.1	The Design and Smulation of Current Comparator	60
4.7.2	The Design and Smulation of Driver Block	63
5	The Overall Simulation and Application of Chip	65
6	Summary and Future Work.....	68
	References.....	69
	Published and Accepted Paper List	72
	Acknowledgement.....	73

第一章 绪 论

电源技术的实质是电能的变换,利用电能变化技术将市电或电池等一次电源变换成适用于各种用电对象的二次电源。其中,开关电源在电源技术中占有重要地位,它具有高稳定度、大容量、小体积、输入输出范围宽、输出精度高等一系列优点。开关电源的不断发展,促进了现代电源技术的繁荣和发展。

一般的开关电源由功率器件与控制电路两大部分组成,功率器件将能量传递给负载电路,控制电路则按照输入输出条件控制功率器件工作状态,而将控制电路集成化即成为电源管理 IC。但是随着半导体制造技术的发展与进步,电源管理 IC 的集成度越来越高,部分功率器件也被直接集成在电源管理 IC 内部,从而大大的简化了外围电路的设计,给设计使用者带来了更大的便利。

开关电源被誉为高效节能电源,它代表着稳压电源的发展方向,现已成为稳压电源的主流产品。采用了控制集成电路的开关电源更具有效率高、稳压范围宽、可靠性高,并可实现远程控制等功能,是开关电源的发展趋势^[1]。

1.1 开关电源的发展概况

开关电源的发展已有 30 多年的历史,早期的产品开关频率很低,成本昂贵,仅用于卫星电源等少数领域。20 世纪 60 年代出现过晶闸管相位控制式开关电源,70 年代由分立元件制成的各种开关电源,均因效率不够高、开关频率低、电路复杂、调试困难等原因而难于推广,使之应用受到限制,竞争不过当时的线性电源。自从 70 年代后期以来至今,随着集成电路设计与制造技术的进步,各种开关电源专用芯片大量问世,这种新型的节能电源才重获发展。而将控制、驱动、保护、检测电路等一起封装在一个模块内,由于外部接线、焊点相对以前大为减少,可靠性显著提高,工作频率也显著提高。

开关电源的工作频率可以从几 kHz 到几 MHz 变化,而理论分析和实践经验表明,储能元件的体积随工作频的增加而减小^[2],而功率半导体器的最高工作频率与器件尺寸成反比,所以器件尺寸的缩小有助于降低芯片及其外围电路的 PCB 板面积,继而有利于电器设备体积的减小,节约了材料。而开关电源的集成化^[3]、

模块化使产品体积减小、可靠性提高，给应用带来极大方便，使其逐步取代了线性电源成为主流，并被广泛应用于电子计算机、通信、航天、彩色电视机、便携式电子产品等领域中，应用面之广泛和应用数量之多，是任何电力电子电源都无法比拟的^[4]。随着半导体制造和微电子技术的不断发展，集成度高、功能强大的大规模集成电路的不断出现，使电子设备的体积在不断的缩小，重量在不断的减轻，与之相比，电源要略显笨重。在现代电子产品中，如何减小开关电源的体积，提高频率是现在的开关电源要面临一个主要的问题^[5]。

1.2 电源管理芯片的现状与发展趋势

目前，我国已成为全球增长潜力最大的电子产品消费大国：全球最大的移动电话市场、第三大 PC 市场，未来五年还将成为全球第二大半导体市场。就目前来看，我国的开关电源产业较过去的 30 年有了相当大的发展，国内开关电源自主研发及生产厂家有 300 多家，形成规模的有十多家。国产开关电源已占据了相当的国内市场，并有少量开始出口，但是上游产品芯片稀缺。目前单片开关电源芯片的市场主要被德州仪器、国家半导体、意法半导体、仙童半导体、PI 等几家国外大公司所占据，这些国外的大公司在功率集成技术领域的研究也处于领军地位，所以现阶段国内开关电源产业仍旧与世界先进水平有相当大的差距，这与我国电子消费品大国的地位极不相符。

手机、笔记本、数码相机、MP3 乃至 MP4 等产品近些年的发展保持了高速增长，对于上游电源管理芯片市场起到了很大的推动作用。未来这些产品产量的增长还将继续。但是除了对电源芯片需求量的增长以外，便携式电子产品对电源管理芯片市场的推动将更多的表现为产品和技术的更新。高效率、低功耗、低压大电流、低噪声、良好的动态特性以及宽输入范围，还有整体设计上薄型化、模块化、标准化，使得其更方便的应用于产品中^[6]。

总的说来，现在的电源管理朝着以下几个方向发展：

(1) 高效率、低功耗

如今电子产品日趋小型化，必然要求电源模块减小体积、提高功率密度，而提高效率是与之相辅相成的。目前的新型转换及封装技术可使电源的功率密度比传统的电源功率密度增大不止一倍，效率可超过 90%。之所以能达到这些指标，

应归功于微电子技术的发展使大量高性能的新型高速器件功率 MOSFET、IGBT 涌现出来,从而使损耗降低。较典型的是高性能的功率 MOSFET 的导通电阻相对较小,同步整流中取代了传统的二极管,使压降由 0.4 V 降到 0.2 V;高度的硅晶片集成使外围电路的元件数目减少 2/3 以上,结构紧密、相对于分立元件的布局减小了杂散电感和连线电阻。随着各种整机设备市场规模的不断增长和社会对环保问题的日益重视,功耗问题逐渐成为关注的热点,降低电子产品功耗这一需求,将推动电源管理器件市场的稳步发展。为了满足在同等芯片尺寸内,晶体管的尺寸越来越小,工作电压越来越低,而工作频率越来越高的需求,市场对低电压、高精度、低功耗的电源管理芯片的需求不断增加^[7]。

(2) 低压大电流和电压提供多样化

随着微处理器工作电压的下降,模块电源输出电压亦从以前的 5 V 降到了现在的 3.3 V, 1.8 V 甚至到达 1V 以下。与此同时,集成电路所需的电流增加,要求电源提供较大的负载输出能力。

现在的便携产品通常都会集成视频、音频、照相文件存储等多种功能,比如 PMP,能够完成音视频播放和文件存储等工作,手机能够拍照、听音乐和上网等。不同功能的实现都需要不同的电压供应,而且要求电压稳定可靠、干净、高效,这也是电源管理面临的一个挑战。电源管理系统正在日趋复杂化,一个产品通常会需要 5 V、3.3 V、2.5 V、1.8 V、1.5 V、1.2 V 等多种电压,如何有效地管理多种电压,并且使之互不干扰,是电源设计中正面临的一个难题^[8]。

(3) 轻便化、小型化和成本最小化

储能元件在电源产品占据了较大的体积。理论和实践经验表明,这些储能元件的体积和重量与工作频率的平方根成方比。所以要提高频率以降低储能元件的体积和重量,这也有助于提高系统的动态特性。此外开发用于高频领域的低损耗磁性材料,改进电磁元件的结构和设计方法,提高滤波电容的介电常数及降低其等效串联电阻等对开关电源的小型化有很大的推动作用。在保证性能的前提下,体积更小、成本更低的产品必然更具竞争力。因此,电源管理面临的关键任务之一就是如何最大化产品的性价比。

(4)降低噪声

一味追求高工作频率会引入很大的噪声,同时电子设备用量增加使电磁干扰

越来越严重。所以，尽可能的降低噪声成了开关电源的又一发展方向。

(5) 模块化、标准化工作

现在，标准对电源产业的作用已越来越被重视，标准化可以缩短产品推向市场的周期并降低成本，也有助于电源技术的进步与发展。

1.3 主要工作和本文结构

本论文根据所提出的设计要求，尝试设计了一款恒定频率，反激型直流--直流开关电源芯片，并对它进行了仿真验证。

本论文体系结构如下所示：

第一章，主要介绍了开关电源的发展概况，以及当前国内状况和未来发展趋势，并对论文的章节进行了安排。

第二章，介绍了开关电源的理论基础、常见结构类型及工作原理，着重介绍了反激式开关电源的结构和工作原理。

第三章，详述了本文所设计芯片电路的整体架构及其工作原理，并分析了系统的调制方式、控制方式。

第四章，主要是对系统中各个子电路模块的工作原理做了分析，并进行了相应的仿真验证。

第五章，阐述了外围电路的结构，并且将其与各个子电路联系起来构成整体电路，并对整体电路进行了仿真验证。

第六章，本文的工作总结。

第二章 开关电源的理论基础

电源一般可以分为线性电源和开关电源两种。线性电源最主要的缺点是效率低，而开关电源因其效率高，体积小，重量轻等优点，在中小功率乃至大功率领域都得到了广泛的应用。目前国内通信家电等领域所使用的电源普遍是开关电源。

开关电源按不同的区分标准有不同的分类形式^[9]。开关电源按输入输出电压的类型可以分为 AC-AC 电源、DC-DC 电源、AC-DC 电源、DC-AC 电源。开关电源按输入、输出是否隔离可分为非隔离式开关电源与隔离式开关电源，而隔离式开关电源又主要包含正激式(Forward)开关电源和反激式(Flyback)开关电源，而非隔离式开关电源变换器按照主回路拓扑可分为三种主要拓扑：Buck、Boost、Buck-Boost。开关电源按照调制模式可分为四种：脉冲宽度调制(PWM)、脉冲频率调制(PFM)、PWM/PFM 混合调制方式、脉冲跨周期调制(PSM)方式。开关电源按照控制模式又可分为两种：电压控制模式和电流控制模式，其中电流控制模式又可分为平均电流控制模式和峰值电流控制模式。而根据电感电流连续与否开关电源又可分为 CCM (Continual-conduction-Mode) 和 DCM(Discontinual-conduction-Mode)工作模式。对同一开关电源电路结构可能出现不同的电路名称，但无论如何称呼，都是根据其电路结构特点来命名的。不同的电路结构突出了不同的性能参数。下面将对开关电源的主要拓扑结构、调制控制方式和反馈控制模式做一个简单介绍与分析。

2.1 变换器拓扑结构简介

开关电源变换器由电感 L、电容 C、功率开关管、以及二极管 D 等元件构成，其常用的拓扑分别有 Buck 型变换器、Boost 型变换器、Buck-Boost 型变换器^[10]。

2.1.1 Buck 型变换器

Buck 变换器也称降压(step-down)变换器，最大的优点是效率高、损耗低。

如图 2-1 所示，Buck 变换器由功率开关管 Q1、大功率肖特基二极管 D、储能电感 L、滤波电容 C、负载 R 等组成，假设模型中各个器件为理想器件。设

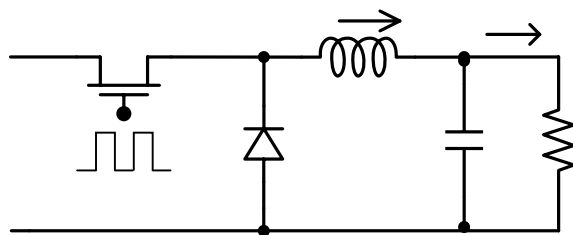


图 2.1 Buck 型变换器拓扑结构

功率管 Q1 的开关周期为 T ，其导通时间为 T_{on} ，截止时间为 T_{off} ，占空比为 $D(D=T_{on}/T)$ 。下面分析 Buck 变换器的工作过程，当电感电流在一个周期内不为零，电感电流的上升时间 T_{on} 与下降时间 T_{off} 之和等于一个周期 T 时，称之为电感电流连续模式(CCM，Continual-conduction-Mode)。

在 T_{on} 时间内时，功率管 Q1 导通，二极管 D 因反偏而截止。电源 V_{in} 通过电感给负载 R 供电并向电容 C 充电。开关节点 S 处的电压等于 V_{in} ，电感电流 I_L 以斜率 $(V_{in}-V_o)/L$ 线性增加，L 的储能也逐渐增加，负载 R 两端的电压即为输出电压 V_o ，极性上正下负。在截止时间 T_{off} 内，功率管 Q1 关断，由于电感上的电流不能突变，使得 L 两端的电压极性改变，产生的感应电势使二极管 D 导通，电感释放储能通过二极管 D 给负载供电，电感电流以斜率 V_o/L 线性下降。经过时间 T_{off} 后，功率开关管 Q1 又再次导通，重复上述过程。S 点的电压与电感电流如下图所示，

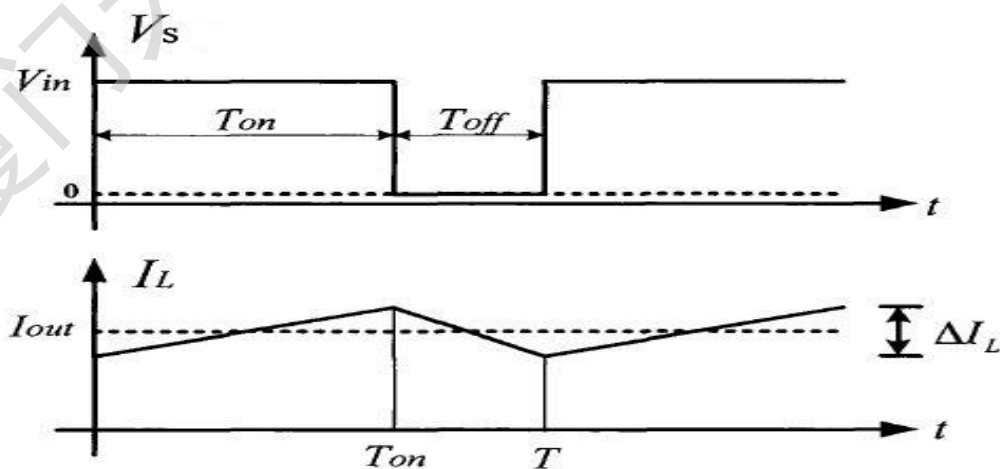


图 2.2 Buck 型变换器的 CCM 波形图

在 Q1 导通和关断时间内，根据电感伏秒平衡原理^[1]，电感电流的变化量及

输出电压可以表示为：

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot T_{on} = \frac{V_o}{L} \cdot T_{off} \quad (2-1)$$

$$V_o = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot V_{in} = D \cdot V_{in} \quad (2-2)$$

当电感较小、负载电流也较小或者开关周期 T 较长时，电感电流下降到零而新的周期尚未开始，此模式称为电感电流断续模式(DCM, Discontinuous-conduction-Mode)。在 DCM 模式下 T_{on} 与 T_{off} 之和小于 T ，设 Q1 的关断占空比为 D_1 ($D_1 = T_{off}/T$)。开关节点 S 的电压和电感电流如下图所示，

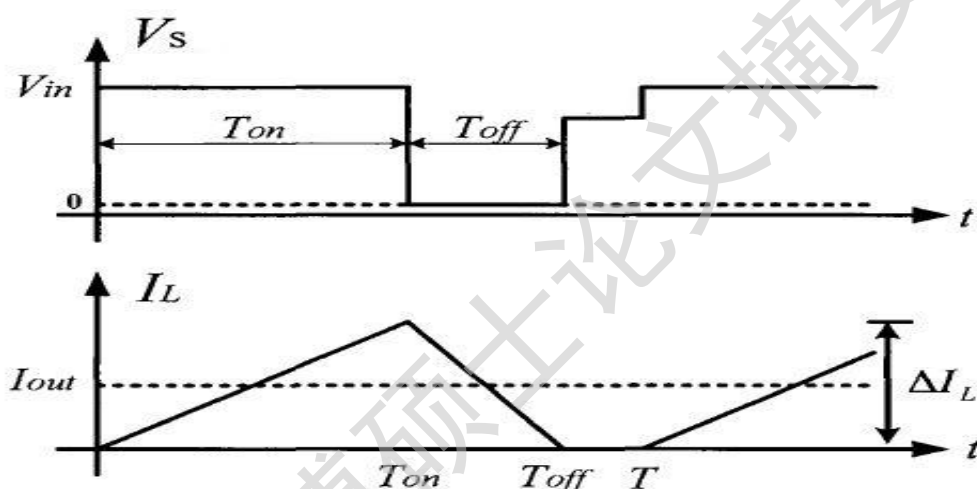


图 2.3 Buck 型变换器的 DCM 波形图

在 T_{on} 时间内功率管 Q1 导通、二极管 D 截止，电感电流线性增加，L 的储能也逐渐增加，电感电流增量同 CCM 下一样。与 CCM 不同的是，电感电流在每个周期从零开始上升，在 T_{off} 时间内 Q1 截止、D 导通，电感电流线性下降，电感释放储能给负载供电。在 T_{off} 时间结束时， I_L 下降到零。在 T_{off} 到 T 的这段时间内 Q1、D 均截止， I_L 保持为零直到周期结束。类似于 CCM 模式，输出电压可以表示为：

$$V_o = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot V_{in} = \frac{D}{D + D_1} \cdot V_{in} \quad (2-3)$$

所以，无论 Buck 变换器处在 CCM 或是 DCM 下， V_o 始终小于 V_{in} 。

2.1.2 Boost 型变换器

Boost 变换器也称为升压(step-up)变换器，通常用于低功率场合(小于 10W)。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库