

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 19820081153024

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

降压式电荷泵型开关电源芯片的分析与设计

Design and Analysis of a Step-Down Charge Pump  
Switching Power Chip

陶健

指导教师姓名: 王亚军 副教授

专 业 名 称: 物理电子学

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘 要

随着电子信息产业的高速发展，对电源系统提出了更高的要求，传统的电源已经不能满足日益严格的要求。开关电源作为绿色电源，具有效率高，体积小，精度高等优点，已被广泛应用于各种电子设备。电容型开关电源比起电感型开关电源，具有安装尺寸小，噪声小，成本低等优点。因此在低功率便携设备中，采用电容型开关电源更合适些。

本文设计了一款高频、大功率的降压型 DC/DC 电源芯片。首先阐述了开关电源的基本原理和各种分类，重点说明了降压型电荷泵的工作原理；随后根据设计的要求和指标进行了电路的总体设计，完成了各个子电路的原理分析，电路设计。其中重点阐述了带隙基准源电路，电压误差放大电路、振荡电路、逻辑控制电路、保护电路的设计和验证过程，并利用 EDA 软件 Hspice 对电路的所有部分进行了仿真验证。最后，对整体电路进行了瞬态仿真验证。最终仿真结果表明，电路能够稳定工作，达到了预期目标。

**关键词：**电荷泵；LDO；效率；纹波

## ABSTRACT

Along with the rapid development electronic information industry and the increasing demands of energy saving, the traditional power supply can not meet the increasingly stringent requirements. Switching mode power supply as green power, with its high efficiency, compact volume and good line regulation, has been widely applied in most of electronic fields. Charge Pump than the inductance-type switching power supply, with the installation of small size, low noise and low cost. Therefore, using Charge Pump in low-power portable devices is more appropriate.

In this paper an efficient, high-frequency charge pump DC/DC step-down switching power supply chip is presented. First, types and the basic principles of switching power supply are introduced. The step-down charge pump is discussed in detail. Next, the global system architecture is proposed upon the design requirements and sub-block circuits are also introduced that focuses on several essential sub-blocks such as band gap, error amplifier, Oscillator, logic control, over voltage protection circuit and over temperature protection circuit. All the sub-block is simulated by applying the EDA tool Hspice. At last, based on the whole circuit principle analysis and sub-block design, the author simulated the whole circuit by HSPICE. According to the results of Hspice simulation, the system is stable and other performance specifications required is attained.

**Key Words:** charge pump; LDO; efficient; ripple

# 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	错误! 未定义书签。
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 开关电源发展现状 .....	1
1.2 开关电源的前景与趋势 .....	2
1.3 选题意义 .....	4
1.4 主要工作和本文结构 .....	4
<b>第二章 开关电源的理论基础 .....</b>	<b>6</b>
2.1 电源的种类及其特点 .....	6
2.1.1 线性低压降稳压器 .....	6
2.1.2 电感式开关电源 .....	8
2.1.3 电容式开关电源 .....	8
2.2 电荷泵的降压工作原理 .....	11
2.3 三种 DC/DC 开关电源性能比较 .....	13
2.4 电荷泵的控制方法 .....	17
2.4.1 后调制和预调制模式 .....	17
2.4.2 后调制和预调制模式效率的计算 .....	18
2.5 整体结构设计 .....	19
<b>第三章 子电路模块的设计与仿真 .....</b>	<b>22</b>
3.1 偏置电路的设计与仿真 .....	22
3.1.1 偏置电路的设计 .....	22
3.2 基准电压源的设计与仿真 .....	25
3.2.1 基准电压源的设计 .....	25
3.2.2 带隙电路的仿真 .....	29
3.3 振荡电路的设计与仿真 .....	31
3.3.1 振荡电路的设计 .....	31

3.3.1 振荡电路的仿真.....	34
<b>3.4 逻辑控制电路的设计与仿真 .....</b>	<b>35</b>
3.4.1 施密特触发器的设计.....	35
3.4.2 施密特触发器的仿真.....	37
3.4.3 二分频电路的设计.....	37
3.4.4 二分频电路的仿真.....	38
3.4.5 二相不交叠时钟的设计.....	39
3.4.6 二相不交叠时钟的仿真.....	39
3.4.7 过温保护电路的设计.....	41
3.4.8 过温保护电路的仿真.....	44
3.4.9 欠压保护电路的设计.....	45
3.4.10 欠压保护电路的仿真.....	47
3.4.11 误差放大器的设计.....	48
3.4.12 误差放大器的仿真.....	51
<b>第四章 电路的总体仿真 .....</b>	<b>53</b>
<b>第五章 工作总结与展望 .....</b>	<b>58</b>
5.1 工作总结 .....	58
5.2 设计展望 .....	58
<b>附 录 .....</b>	<b>60</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>67</b>
<b>硕士期间发表的论文 .....</b>	<b>70</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>71</b>

## CONTENTS

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>II</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Development of Switching Power Supply .....	1
1.2 Prospects and Trends in Switching Power Supply .....	2
1.3 Significance of The Topic.....	2
1.4 The Main Work and Structure of The Paper .....	4
<b>2 The Theoretical Basis of Switching Power Supply</b> .....	<b>6</b>
2.1 The Type and Characteristics of Power .....	6
2.1.1 Low Dropout Linear Regulator .....	6
2.1.2 Inductance-Type Switching Power Supply.....	8
2.1.3 Charge Pump .....	10
2.2 The Working Principle of The Step-Down Charge Pump.....	11
2.3 Comparison of Three Types of Switching Power Supply .....	13
2.4 The Control Methods of Charge Pump.....	17
2.3.1 After Modulation and Pre-Modulation .....	17
2.3.2 The Efficiency Calculation of After Modulation and Pre-Modulation	18
2.5 Overall Circuit Design .....	19
<b>3 Design and Simulation of Subcircuits</b> .....	<b>22</b>
3.1 Design and Simulation of Bias Circuit.....	22
3.1.1 Design of Bias Circuit.....	22
3.2 Design and Simulation of Band Gap .....	25
3.2.1 Design of Band Gap.....	25
3.2.2 Simulation of Band Gap .....	29
3.3 Design and Simulation of Oscillator .....	31
3.3.1 Design of Oscillator .....	31

3.3.2 Simulation of Oscillator .....	34
<b>3.4 Design and Simulation of Logic Control .....</b>	<b>35</b>
3.4.1 Design of Schmitt Trigger.....	37
3.4.2 Simulation of Schmitt Trigger .....	37
3.4.3 Design of Two Frequency Divider.....	38
3.4.4 Simulation of Two Frequency Divider .....	39
3.4.5 Design of Two Phase Non-Overlapping Clock .....	39
3.4.6 Simulation of Two Phase Non-Overlapping Clock.....	41
3.4.7 Design of Over Temperature Protection Circuit.....	44
3.4.8 Simulation of Over Temperature Protection Circuit.....	45
3.4.9 Design of Under Voltage Protection Circuit .....	47
3.4.10 Simulation of Under Voltage Protection Circuit .....	48
3.4.11 Design of Error Amplifier .....	48
3.4.12 Simulation of Error Amplifier.....	51
<b>4 Simulation the Overall Circuit .....</b>	<b>53</b>
<b>5 Summary and Future Work.....</b>	<b>58</b>
5.1 Summary .....	58
5.2 Future Work .....	58
<b>Appendix.....</b>	<b>60</b>
<b>References.....</b>	<b>67</b>
<b>Published and Accepted Paper List.....</b>	<b>70</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>71</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 开关电源发展现状

电源实质是电能的变换,将网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。开关电源在电源技术中占有重要地位,它的优点有:高稳定性、大容量、小体积、输入输出范围宽、输出精度高等。广义上说,凡是利用功率半导体器件作为开关,将一种电源形态转变为另一种电源形态的电路都叫做开关转换器电路,利用高频脉宽调制技术或高频脉冲频率调制技术,在转变时通过对开关转换器的自动闭环控制来稳定输出电压,并具有保护与显示环节的,就称为开关电源,实质上它是一个闭环的自动电压调节系统<sup>[1][2][3]</sup>。集成的开关电源更具有效率高、输出稳定、可靠性高,并可实现远程控制等功能,是世界开关电源的发展趋势<sup>[4]</sup>。一般的开关电源电路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,而控制电路则按照输入输出等条件的变化控制功率器件工作状态,开关电源的集成度越来越高,部分功率器件也被直接集成在 IC 内部,从而大大的简化了外围电路的设计,为使用者提供更大的便利的同时 还能增加电路的稳定性以及电路的成本。

开关电源已有 30 多年的历史,早期的产品频率比较低,成本昂贵,仅用于卫星通信等少数领域<sup>[5]</sup>。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。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,由于外部接线、焊点相对以前大为减少,可靠性显著提高<sup>[6]</sup>。集成化、模块化可以使电源产品体积小、可靠性高,给应用带来极大方便。随着半导体技术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,在现代电子产品中,有时候电源体积要比微处理器大几十倍,如何减小开关电源的体积,面临着新的挑战。提高频率是开关电源要面临的主要问题,因为理论分析和实践经验表明,电器产品的体积、重量随工作频率的平方根成反比的减少<sup>[7]</sup>,所以当把频率从 50 Hz 提高到 20 kHz,用电设备的体积、重量

大体上降至工频设计的 5%~50%<sup>[8]</sup>，其主要材料可节约 90%或更高，可节电 30%或更多。

我国对开关稳压电源的研制工作始于 60 年代初期<sup>[9]</sup>。70 年代起，我国在黑白电视机、中小型计算机中开始应用 5 V、20~200 A、20 kHz 的 AC/DC 开关电源。80 年代进入大规模生产和广泛应用阶段，并开发研究 0.5~5 MHz 准谐振型软开关电源。80 年代末，我国通信电源大规模更新换代，传统的铁磁稳压整流电源和晶闸管相控稳压电源被大功率 AC/DC 开关电源所取代，并开始办公室自动化设备中得到应用。90 年代我国又研制开发了一批新型专用开关电源，如卫星上用的开关电源、远程火箭控制系统用的 DC/DC 开关电源等。进入 21 世纪后，我国的开关电源产业进一步发展壮大，国内开关电源研发及生产厂家有 300 多家，形成规模的有十多家。国产开关电源已占据了相当市场，并有少量开始出口，但由于种种原因，在现阶段依然与世界先进水平有一定差距，前景不容乐观。

## 1.2 开关电源的前景与趋势

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。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的增长，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，但是速度相对近几年将会有一定减缓。但是除了产量的增长以外，便携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、低噪音、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，使得其更简便的应用于产品中。

高效率、低功耗。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器件涌现出来，从而使损耗降低。较典型的是高性能的金属氧化物半导体场效应晶体管，其在同步整流器中取代了传统设计中使用的二极管，使压降由 0.4 V 降到 0.2 V；功率 MOSFET 制造商正在开发导通电阻越来越小的器件，其导通电阻已由 180m $\Omega$  降为 18m $\Omega$ 。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<sup>[10]</sup>。

低压大电流。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/录像、文件存储等多种功能,能够完成音视频播放、录像和文件存储等工作,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<sup>[11]</sup>。

小型化。虽然便携产品的体积在不断缩小,成本也在不断降低,但是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。如何使电源管理IC的封装越来越小、封装的厚度越来越薄也是电源管理IC要解决的难题之一。而在缩减成本方面,相信没有哪个商家不精打细算,因为利润永远是商家追逐的目标。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。

低噪声。噪声大是开关电源的主要缺点之一。噪声和开关损耗随着工作频率的变高而严重。由于开关电源产生噪声,而噪声能够祸合到其它电路,从而影响系统的正常工作,因此开关电源的低噪声成为设计时的重要考虑因素。

标准化。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,但目前多数国内企业采用自己的企业标准生产,按照自己的测试规范测试,各个行业标准也存在着技术指标落后,测试方法可操作性差等问题,导致业界没有统一、完善的设计、生产与检测标准,为了推动模块电源的技术进步,提供国内企业生产质量控制的依据,制定科学的国家标准迫在眉睫。

### 1.3 选题意义

如今几乎所有的电子设备都会用到开关电源，如电视机、个人计算机、音响设备、日光灯整流器、医疗设备、通信电源、航空航天电源、UPS 电源、变频器电源、交流电动机的变频调速电源、便携式电子设备的电源等。它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<sup>[12]</sup>。由于许多便携式电子产品电路中都包含有无线电电路和射频电路，对噪声十分敏感，而电感型开关电源产生的噪声在不同程度上对这些敏感电路形成一定的影响。

在低电流小功率应用场合，一种经济可行的方案是使用高效率、低成本、低噪声的无电感型开关电源即电荷泵电路。电荷泵不需要会产生很大电磁干扰的电感元件，只使用电容实现稳定的电压输出，从而就可以避免噪声的影响。电荷泵损耗主要来自电容器的等效串联电阻和内部功率管的导通电阻。因此，具有较高的转换效率，同时电容面积外接在芯片外部，这样成本较低。

本论文中以减小电荷泵的功耗、降低噪声及增大输出功率和稳定输出电压是论文的主要目标。经过改善的电路结构，十分适合便携式电子设备，通过增加一些额外的功能，如模式的自动变化，低电流保护等，可进一步增加电路的转换效率，从而有广阔的市场前景。

### 1.4 主要工作和本文结构

根据提出的设计要求，尝试研发了一个降压型的，直流--直流开关电源电荷泵芯片，并对它进行系统仿真验证。

本文结构体系如下所示：

第一章，主要介绍了开关电源的发展概况、前景和未来发展趋势，并对说明了本论文的选题意义。

第二章，介绍了开关电源的种类和特点着重说明了降压型电荷泵的工作原理以及芯片的整体结构。

第三章，主要是对各个子电路进行分析，阐述了它们的原理，并对它们进行了仿真验证。

第四章，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，对整体电路进行了仿真验证。

第五章，本文工作的总结与展望。

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第二章 开关电源的理论基础

### 2.1 电源的种类及其特点

电源一般可以分为线性电源和开关电源两种。线性电源通常指的是线性低压降稳压器（LDO），而开关电源则包括电容式开关电源（电荷泵）与电感式开关电源。目前国内通信家电等领域所使用的电源普遍是开关电源。而开关电源又可以分为 AC-AC 电源、DC-DC 电源、AC-DC 电源、DC-AC 电源。DC-DC 电源组成的电源系统具有可靠性高、系统升级容易等特点，DC-DC 的应用越来越广泛，尤其最近几年来，由于数据业务的飞速发展和分布式供电系统的不断推广，DC-DC 电源需求更是大大增加。

#### 2.1.1 线性低压降稳压器

线性低压降稳压器因功率调整管工作在线性区而得名。线性低压降稳压器结构如图 2.1 所示<sup>[13]</sup>，由功率调整管 Q1、电阻分压网络、误差放大器和负载电阻组成。输出由负载电阻  $R_L$  和功率调整管 Q1 分压产生，功率调整管相当于一个可变电阻，输出电压通过分压反馈网络  $R_1$ 、 $R_2$  采样后，反馈到误差放大器与参考电压进行比较，控制功率调整管，保持输出电压稳定。

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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库