

邵阳职业技术学院

毕 业 设 计

产品设计	工艺设计	方案设计
		√

设计题目: 大功率 LED 开关电源的设计

学生姓名: 夏志旺

学 号: 201810300863

系 部: 电梯工程学院

专 业: 机电一体化技术

班 级: 机电 1182

指导老师: 耿运涛

二 0 二 一 年 六 月 一 日

目 录

一、设计要求.....	1
(一) 设计的目的和意义.....	1
(二) 国内外发展状况和水平.....	1
(三) 设计任务与基本要求.....	2
二、方案设计整体思路.....	3
(一) 开关电源概述.....	3
(二) 开关电源的分类、特点和工作条件.....	3
(三) 开关电源基本结构.....	5
(四) 开关电源的工作原理.....	6
三、硬件方案设计.....	7
(一) 降压斩波电路.....	7
(二) 电力 MOSFET 的结构和工作原理.....	8
(三) 电力 MOSFET 的参数计算.....	9
(四) LC 输出滤波电路设计.....	9
(五) 缓冲电路设计.....	10
四、软件方案设计.....	11
(一) 仿真软件介绍.....	11
(二) 仿真电路的搭建及参数设置.....	11
五、调试与测试.....	13
(一) 系统调试.....	13

(二) 整体电路调试.....	13
六、成果.....	14
参考文献.....	15
致谢.....	16

大功率 LED 开关电源的设计

[摘要]

开关电源是一种新型的电源设备，较之于传统的线性电源，其具有高频率、高功率密度、高效率等优点，而大功率 LED 开关电源已广泛应用于工业、军事和 IT 等领域。本次设计以围绕 12V 大功率 LED 开关电源进行了理论与设计，具有一定的现实意义。

本设计首先对设计的目的、意义和发展状况进行了阐述，并给出了设计的技术指标要求；然后对开关电源设计方案进行了论证；接着详细阐述了 12V 大功率 LED 开关电源的整个设计过程，包括高频变压器的工作模式、MOSFET 的结构和原理、LC 输出滤波电路的设计、缓冲电路的设计以及元件参数计算和选型等；最后对设计进行了仿真研究，达到了设计要求，验证了设计方案的正确性和功能的完整性。

[关键词] 大功率 LED 开关电源 高频变压器 MOSFET

一、设计要求

(一) 设计的目的和意义

全球能源紧张，提高电器的效率是行之有效的方法。照明用电占据全球 21%的总用电量，如果能提高照明用的效率，可以有效缓解能源紧张。如何提高照明系统的能源利用率，延长照明系统的寿命，并且是绿色无污染的？取代白炽灯，荧光灯，节能灯的第四代照明灯具是什么？通常所用的就是 LED 灯照明。LED 照明每瓦流明数可达到 120LM。远高于白炽灯和日光灯，此外LED 灯珠寿命可长达十万小时，并且绿色无污染。LED 照明具备的这些优点决定了其应用前景是非常广阔的。LED 照明应用上的限制在于 LED 有固定的正向压降，电流也有上限(工作电流是影响 LED 寿命的主要因素)。大功率白光 LED 上的正向压降一般为 0.7V，不能直接使用市电驱动。因此一个和LED 灯珠匹配的高效、环保、长寿命的电源是必须的，这正是这次选题的意义与目的所在。

(二) 国内外发展状况和水平

目前常用的直流稳压电源分线性电源和开关电源两大类。线性稳压电源亦称为串联调整式稳压电源。其稳压性能好、输出纹波电压很小，但它必须使用笨重的工频变压器与电网进行隔离，并且调整管的功率损耗较大，致使电源的体积和重量大、效率低。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。开关电源内部关键元器件工作在高频开关状态，本身消耗的能量很低，电源效率可达 80%~90%，比普通线性稳压电源提高近一倍。输入为直流的开关电源称为直流-直流变换器，其分为非隔离型和隔离型。非隔离型包括：降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路等。隔离型包括：正激电路、反激电路、半桥电路、全桥电路、推挽电路等。其都利用高频触发开关管来实现电压变换，不仅能去掉笨重的工频变压器，还可以采用体积较小的滤波元件和散热器，这就为研究与开发高效率、高密度、高可靠性、体积小、重量轻的开关电源奠定了基础。

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。目前，开关频率已从二十千赫兹左右提高到几百千赫兹至几兆赫兹。与此同时，供开关电源使用的元器件也获得长足发展。MOS 功率开关管 (MOSFET)、肖特基二极管 (SBD)、超快恢复二极管 (SRD)、瞬间电压抑制器 (TVS)、压敏电阻器 (VSR)、熔断电阻器 (FR)、线性光耦合器、可调式精密并联稳压器 (TL431)、电磁干扰滤波器 (EMI Filter)、高导磁率磁性材料、非

晶合金的磁珠 (Amorphous alloy magnetic beads)、三重绝缘线 (Triple Insulated Wire)、玻璃珠 (glass beads) 胶合剂等一大批新器件、新材料正被广泛采用。所有这些都为开关电源的推广与普及提供了必要条件。

总的来说，国内外开关电源发展状况主要表现在以下这几个方面：

- (1) 高性能碳化硅 (SiC) 功率半导体器件；
- (2) 高频磁技术；
- (3) 新型电容器；
- (4) 功率因数校正 AC-DC 开关变换技术；
- (5) 高频开关电源的电磁兼容研究；
- (6) 开关电源的设计、测试技术；
- (7) 低电压、大电流的开关电源开发；
- (8) 低电压、大电流 DC-DC 变换器模块。

(三) 设计任务与基本要求

设计任务：LED 照明应用上的限制在于 LED 有固定的正向压降，电流也有上限（工作电流是影响 LED 寿命的主要因素）。大功率白光 LED 上的正向压降一般为 0.7V，不能直接使用市电驱动。因此一个和 LED 灯珠匹配的高效、环保、长寿命的电源是必须的，围绕 12V 大功率 LED 开关电源进行设计，了解 LED 半导体光源原理与特点及其驱动电源的研究现状与技术进展，进行大功率 LED 电源设计过程中的硬件选型与驱动方案设计，并进行软件设计，在设计过程中，强调创新意识，提高设计过程中的创造能力。

二、方案设计整体思路

(一) 开关电源概述

开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源。它运用功率变换器进行电能变换，经过变换电能，可以满足各种对参数的要求。这些变换包括交流到直流(AC-DC，即整流)，直流到交流(DC-AC，即逆变)，交流到交流(AC-AC，即变压)，直流到直流(DC-DC)。广义地说，利用半导体功率器件作为开关，将一种电源形式转变为另一种电源形式的主电路都叫做开关变换器电路；转变时用自动控制闭环稳定输出并有保护环节则称为开关电源(Switching Power Supply)。

将一种直流电压变换成另一种固定的或可调的直流电压的过程称为 DC-DC 交换的电路称为 DC-DC 转换器。根据输入电路与输出电路的关系，DC-DC 转换器可分为非隔离式 DC-DC 转换器和隔离式 DC-DC 转换器。降压型 DC-DC 开关电源属于非隔离式的。降压型 DC-DC 转换器主电路图如图 1 所示。

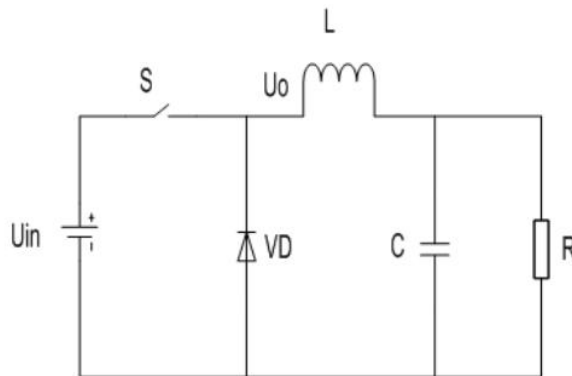


图 1 降压型 DC-DC 转换器主电路

其中，功率 IGBT 为开关调整元件，它的导通与关断由控制电路决定；L 和 C 为滤波元件。开关 S 导通时，负载电压 $U_o = U_{in}$ ，负载电流 I_o 按指数上升；开关 S 关断时，二极管 VD 可保持输出电流连续，所以通常称为续流二极管。负载电流经二极管 VD 续流，负载电压 U_o 近似为零，负载电流呈指数曲线下降。为了使负载电流连续且脉动小，通常串联 L 值较大的电感。至一个周期 T 结束，在开关 S 导通，重复上一周期过程。当电路工作于稳态时，负载电流在一个周期的初值和终值相等。

(二) 开关电源的分类、特点和工作条件

开关电源的结构形式很多，我们可以选用其中的比较合理的一种进行我们的设计，按 PWM

方式来分有以下几种：

(1) 反激式变换器

所谓反激式是指变压器的初级极性与次级极性相反。如果变压器的初级上端为正，则次级上端为负。反激式变换器效率高，线路简单，能提供多路输出，所以得到了广泛应用。但是在次级输出的电压中，有较大的纹波电压。为了解决这一问题，只有加大输出滤波电容和电感，但这样做的结果是增大了电源的体积。

(2) 反激式双晶体管变换器

开关电源的功率在 200W 以上，不宜采用单管反激式电路，这时可以利用反激式双晶体管结构，两管可用双极型晶体管或长效应管。其中场效应管特别适用，无论是固定频率，可变频率，完全和不完全能量传递方式，用场效应管代替双极型晶体管是首选方案。

(3) 正激式变换器

正激式变换器纯粹是个隔离元件，它是利用电感 L 储能及传递电能的。变压器的初级和次级线圈是相同的同名端，由于电感 L 的存在，它的电感折算到初级，使初级电感增大，而电流却减小。正激式变换器的优点是铜耗低，因为使用无气隙磁芯，电感量较高，变压器的峰值电流比较小，输出电压纹波低；缺点是电路较为复杂，所用元器件多，如果有假负载存在，效率较低。它适用于低电压，大电流的开关电源，多用于 150W 以下的小功率场合。它还具有多台电源并联使用而互不影响的特点，而且可以自动均流，而反激式却做不到这点。

(4) 正激式双晶体管变换器

正激式双晶体管是在单管正激式的电路上再串接一只三极管而组成的，这对于高压大功率的开关电源来说更加安全可靠。安全可靠是最大的效益，所以，双管正激式变换器得到了广泛应用。

(5) 半桥式变换器

为了减小开关三极管的电压应力，可以采用半桥式变换器，它是离线式开关电源较好的拓扑结构。

(6) 桥式变换器

(7) 推挽式变换器

推挽式变换器的电路比较复杂，尤其是变压器的初级和次级都需要两个绕组，但是它的利用率高，效率高，输出纹波电压小，适合用于百瓦级至千瓦级的开关电源中。

(8) RCC 变换器

RCC 变换器是节流式阻尼变换器，是一种自激式振荡电路，它的工作频率随着输入电压的高低和输出电流的大小而变化。因此，在高功率、大电流场合，它的工作不很稳定，只适用于 50W 以下的小功率场合。但是其电路简单，成本低，制作、调试容易，因此，有一定的应用价值。

通过我们以上的对变换器的认识，我们选用正激式变换器进行我们的开关电源设计。

1、开关电源特点

- (1) 节能（效率一般可达 85%以上）；
- (2) 体积小，重量轻；
- (3) 具有各种保护功能；
- (4) 改变输出电流、电压容易，稳定，可控。

2、开关电源的工作条件

开关电源的工作条件有三个：

- (1) 开关：电力电子器件工作在开关状态而不是线性状态；
- (2) 高频：电力电子器件工作在高频而不是接近工频的低频；
- (3) 直流：开关电源输出的是直流而不是交流。

（三）开关电源基本结构

第一类：

变换电路（见下图 2）：含开关电路、输出隔离（变压器）电路等，变换电路是开关电源电源变换的主通道，完成对带有功率的电源波形进行斩波调制和输出（如：正激、反激电路）。

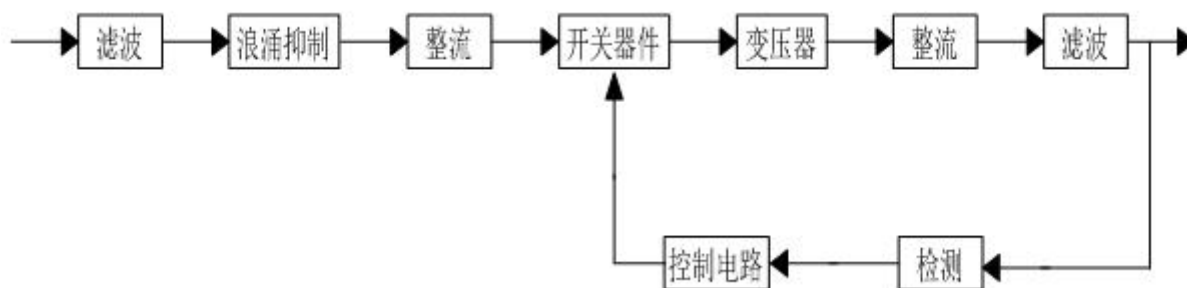


图 2 变换电路图

输入电路的作用：

- (1) 线性滤波电路抑制谐波和噪声
- (2) 浪涌滤波电路抑制来自电网的浪涌电流

控制电路作用：向驱动电路提供调制后的矩形脉冲，达到调节输出电压的目的。TOP 芯

片 (TOPSwitch-II) (见下图 3)

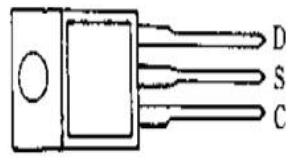


图 3 TOP 芯片

TOPSwitch-II 的三个管脚分别为控制端 C (CONTROL)、源极 S (SOURCE)、漏极 D (DRAIN)。

第二类:

智能开关稳压电源 (见下图 4), 通过我们以上两种方式的比较, 本次设计中我们选用第一类开关稳压电源的原理图。

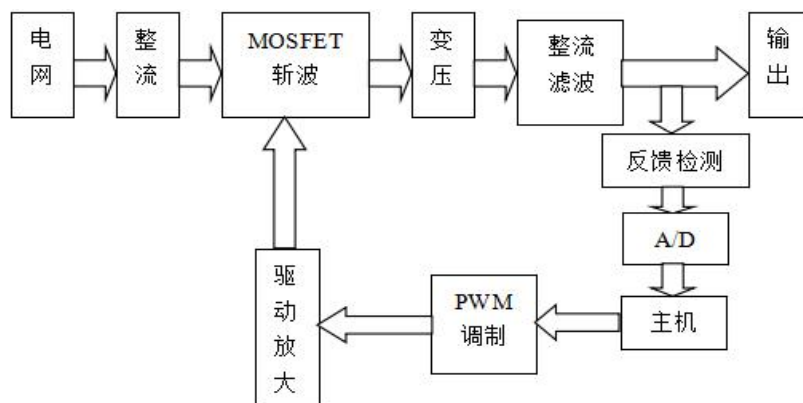


图 4 智能开关稳压电源原理图

(四) 开关电源的工作原理

开关电源就是采用功率半导体器件作为开关元件, 通过周期性通断开关, 控制开关元件的占空比调整输出电压, 开关电源的工作原理可以用下图进行说明。图 5 中输入的直流电压 V_i 经开关 S 加至输出端, S 为受控开关, 是一个受开关脉冲控制的开关调整管, 若使开关 S 按要求改变导通或断开时间, 就能把输入的直流电压 V_i 变成矩形脉冲电压。这个脉冲电压经滤波电路进行平滑滤波后就得到稳定的直流输出电压。

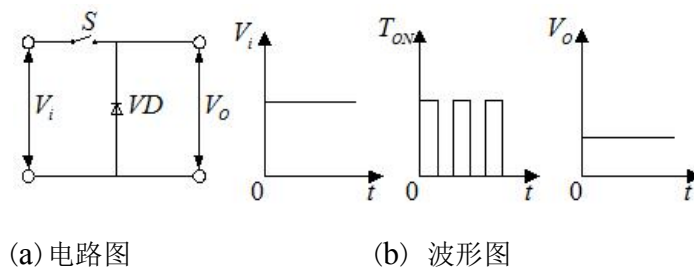


图 5 开关电源的工作原理

三、硬件方案设计

(一) 降压斩波电路

本设计主电路采用的是降压斩波电路，如下图 6 所示为功率 MOSFET 的基本降压斩波电路（Buck 变换器）。在 Buck 电路中，输出电压 V_a 比输入电压 V_S 低。Buck 电路的工作过程根据开关管的动作分为两种模式。根据输出电感中的电流是否连续，Buck 电路可以工作在连续或断续模式。

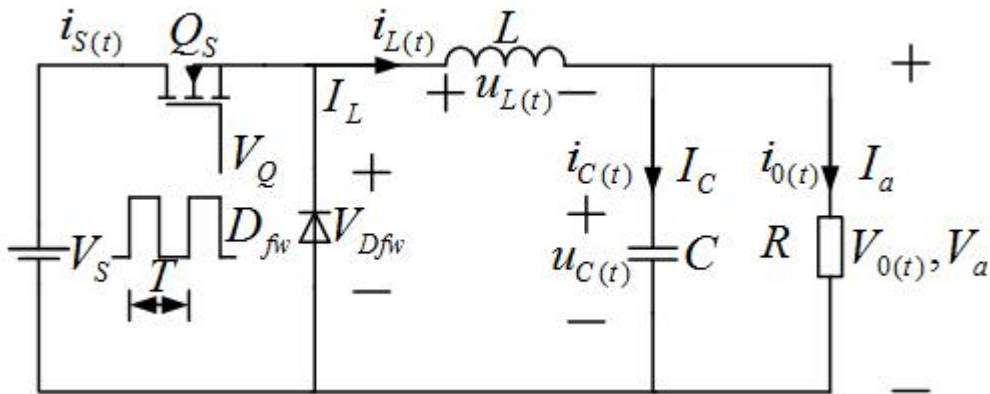


图 6 降压斩波电路

(1) 连续模式

工作在连续模式下的 Buck 变换器由于输入电流不连续，通常需要一个输入滤波器用于减小电磁干扰(EMI)，它由一个串联电感和一个并联电容组成。由于续流二极管的作用，输出电感电流是连续的。在开通时刻，输出电感电流比所需的负载电流小，输出电容首先释放能量，不过由于输出电感电流不断增大，并超过负载所需电流，输出电容开始充电。要注意电容纹波电压滞后于电流 90° 。

(2) 断续模式

断续模式通常应用于小功率，特别是负载变化范围可能很大的场合。在设计开关变换器时，通常会让它工作在连续或者断续模式，而避免在正常工作时从一种模式切换到另一种模式。这是为了避免变换器模式的改变而导致严重的控制与稳定性问题。如果突然去掉 Buck 变换器的负载，那么开环 Buck 变换器的输出电压会增大至输入电压的水平；而闭环 Buck 变换器的输出电压会减小到零。其时间常数由输出电容以及电路中寄生的漏电阻决定。Buck 变换器的优势就在于它在开通、关断以及故障条件下其输出电压和电流很容易控制。

(二) 电力 MOSFET 的结构和工作原理

在低功率开关电源中，开关管一般都采用电力 MOSFET，以提高频率来减小变压器体积及简化滤波器的设计，在此我们先对电力 MOSFET 做些了解。

MOSFET 的种类和结构繁多，按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道。当栅极电压为零时漏源极之间就存在导电沟道的是耗尽型；对于 N (P) 沟道器件，栅极电压大于 (小于) 零时才存在导电沟道的称为耗尽型。在电力 MOSFET 中，主要是 N 沟道增强型。

电力 MOSFET 的种类在导通时只有一种极性的载流子 (多子) 参与导电，是单极型晶体管。其导电机理与小功率 MOS 管相同，但结构上有较大区别。小功率 MOS 管是一次扩散形成的器件，其导电沟道平行于芯片表面，是横向导电器件。而目前电力 MOSFET 大都采用了垂直导电结构，所以又称 VMOSFET (Vertical MOSFET)。这大大提高了 MOSFET 器件的耐压和耐电流能力。按垂直导电结构的差异，电力 MOSFET 又分为利用 V 形槽实现垂直导电的 VVMOSFET (Vertical V-groove MOSFET) 和具有垂直导电双扩散 MOSFET 的 VDMOSFET (Vertical Double-diffused MOSFET)。这里主要以 VDMOSFET 器件为例进行讨论。

电力 MOSFET 也是多元集成结构，一个器件由许多个小 MOSFET 元组成。每个元的形状和排列方法，不同生产厂家采用了不同的设计，甚至因此对其产品取了不同的名称。具体单元形状有六边形、正方形等，也有矩形单元按“品”字形排列的。

下图 7 (a) 给出了 N 沟道增强型 VDMOSFET 中的一个单元的截面图；电力 MOSFET 的电气图形符号如下图所示 7 (b) 所示。

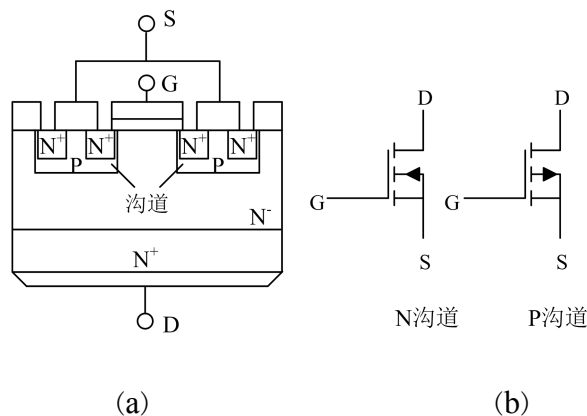


图 7 电力 MOSFET 的结构和电气图形符号

同其他电力半导体器件与对应的信息电子器件的关系一样，与信息电子电路中的 MOSFET 相比，电力 MOSFET 多了一个 N 漂移区 (低掺杂 N 区)，这就是用来承受高电压的。不过，电力 MOSFET 是多子导电器件，栅极和 P 区之间是绝缘的，无法像电力二极管和 GTR

那样在导通时靠从 P 区向 N 漂移区注入大量的少子形成的电导效应来减小通态电压和损耗。因此电力 MOSFET 虽然可以通过增加 N-漂移区的厚度来提高承受电压的能力，但是由此带来的通态电阻增大和损耗增加也是非常明显的。所以一般电力 MOSFET 产品设计耐压能力都在 1000V 以下。

(三) 电力 MOSFET 的参数计算

额定负载下，流过 MOSFET 的最大峰值电流

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

其中 V 取输入电源电压， R 取最大输出功率负载时电阻。

在正常情况 MOSFET 的额定电流可选择 25A，为了尽可能减小通态损耗于是采用 MOSFET IRFP460A，其主要参数，如表 1 所示。

IRFP460A 是增强型的 N 型电力 MOSFET，由表 1 中的数据可知，其完全能适用于本次设计内容。

(四) LC 输出滤波电路设计

表 1 IRFP460A 的主要参数

参数	U_{DS}	I_D	I_{DM}	U_{GS}	C_{iss}	C_{oss}	C_{rss}	t_{on}	t_{off}
大小	500V	20A	80A	±30V	3000pF	480pF	270pF	23ns	150ns

为了减低电压纹波和尖峰电压，在最大输出功率时电路应工作在临界状态或者连续状态。

设计参数：输入电压 12V，输出电压 5~10V，最大纹波电压 0.4V，开关频率采用 60kHz，电感最大纹波电流约为 0.2A，最大功率为 20W。

电容采用的是普通铝解电容，为减小电容的等效串联电阻和等效串联电感，于是采用 2 个 1000uF/50V 铝壳电解电容并联。

为减小管压损耗，续流二极管采用肖特基二极管 FML22S，其主要参数如表 2 所示。

表 2 FML22S 的主要参数

类型	材料	单/双管	额定电流/电压	上升/关断时间	通态压降
肖特基管	硅 (Si)	双管	10A/200V	30ns/40nsV	0.64V

(五) 缓冲电路设计

缓冲电路又称吸收电路。其作用是抑制电力电子器件的内因过电压、 d_u/d_t 或者过电流和 d_i/d_t ，减小器件的开关损耗。缓冲电路可分为关断缓冲电路和开通缓冲电路。关断缓冲电路又称为 d_u/d_t 抑制电路，用于吸收器件的关断过电压和换相过电压，抑制 d_u/d_t ，减小关断损耗。开通缓冲电路又称为 d_i/d_t 抑制电路，用于抑制器件开通时的电流过冲和 d_i/d_t ，减小器件的开通损耗。可将关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起，称为复合缓冲电路。

如无特别说明，通常讲缓冲电路专指关断缓冲电路，而将开通缓冲电路叫 d_i/d_t 抑制电路。下图8(a)给出的是一种缓冲电路的电路图，下图8(b)是开关过程集电极电压 u_{CE} 的波形，其中虚线表示无缓冲电路时的波形。

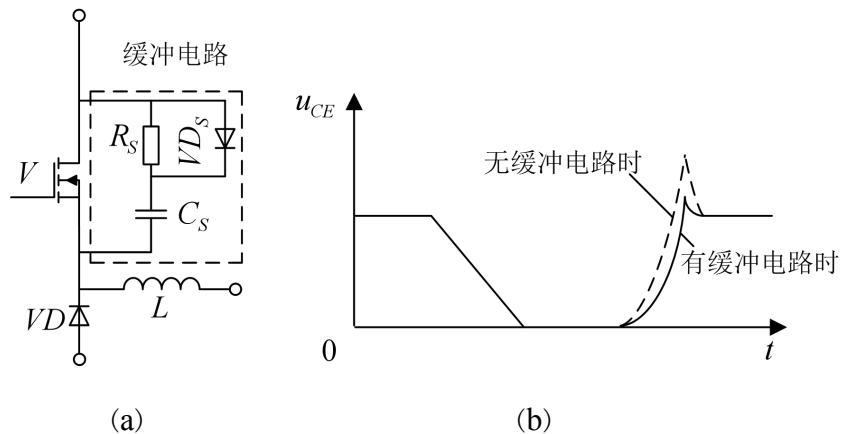


图8 充放电型RCD缓冲电路及波形

四、软件方案设计

（一）仿真软件介绍

MATLAB 是专门为电力电子和电动机控制设计的一款仿真软件。它可以快速的仿真和便利地与用户接触，为电力电子，分析和数字控制和电动机驱动系统研究提供了强大的仿真环境。

电机控制系统包含了 MATLAB 和它的 3 个其它模型：电动机驱动模型，数字控制模型和联结模型。电动机驱动模型已经在机器模型和为驱动系统研究的机械装备模型里建立起来了。数字控制模型为数字控制分析提供了离散的元素，例如：零状态监控，z-domain 转换功能 blocks, 量子化 blocks, 数字滤波器。联结模型为共同仿真再 MATLAB 和 Mimulink 之间提供了相互接触。

MATLAB 仿真软件包括 3 个方面：电路示意图的程序 MATLAB, MATLAB 仿真器，波形形成过程项目 SIMVIEW。

一个电路在 MATLAB 里表现为 4 个部分：电力电路，控制电路，传感器和开关控制器。

电力电路包括转换装置，谐振分支，变压器，联结感应器。控制电路表现在图标里。S 域和 Z 域里的元器件和逻辑元器件（例如：逻辑门和 flip flop）和非线性元器件（例如：乘法器和除法器）被用于控制电路。传感器测量电力电路电压和电流并把数值传到控制电路。门信号经常由控制电路产生并通过开关控制器反馈到电力电路来控制开关。

MATLAB 可在 Microsoft Windows 98/NT/2000/XP 环境下运行，需要的最小内存是 32M。

（二）仿真电路的搭建及参数设置

在了解了 MATLAB 仿真软件后，便可根据软件使用说明进行安装了，安装成功后。

可以通过托选自己所设计的课题所用到的仿真元器件进行仿真电路的搭建了。在仿真电路搭建好了以后，我们可以进行初步的仿真了，但是离本次设计的要求还有一些问题没有解决，那就是我们需要修改适当的参数才能达到我们所需要的仿真数据。如何进行参数设置呢？我们可以通过以下方式修改，达到我们需要的仿真要求。下面我们来介绍下仿真参数的设置，方法如下：

例如：如下图 9 变压器参数设置图所示，我们可以设置变压器 T1 的参数，我们可以通过双击变压器 T1 仿真元件，点击后我们可以看到弹出了对话框，在该对话框中我们就可以设置我们仿真所需要的各种仿真结果。在图中我们可以清晰的看到变压器初级线圈（ N_p

Primary) 与次级线圈 (Ns secondary) 的匝数比为 100:5.6。设置好之后，我们可以直接关掉对话框，该变压器 T1 仿真元件的参数就是我们刚设置的匝数比为 100:5.6。通过如上方法，我们可以设置好我们需要仿真的开关电源中元件参数。

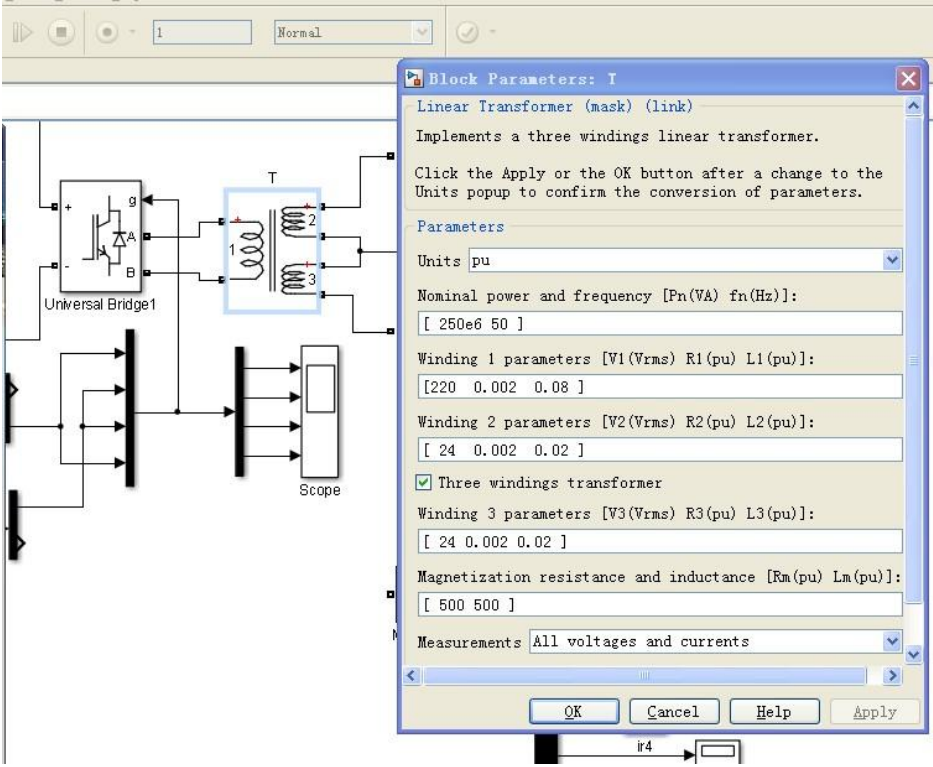


图 9 变压器参数设置图

五、调试与测试

(一) 系统调试

系统调试是利用开发机系统、基本测试仪器(高精度万用表、示波器等),通过执行开发系统有关命令或运行适当的测试程序(也可以是与硬件有关的部分用户程序段),检查用户系统硬件中存在的问题。

(二) 整体电路调试

根据电路的功能单元,对电路的全部元器件进行布局时,要符合以下原则:

(1) 首先要考虑 PCB 尺寸大小。PCB 尺寸过大时,印制线条长,阻抗增加,抗噪声能力下降,成本也增加;过小则散热不好,且邻近线条易受干扰。电路板的最佳形状矩形,长宽比为 3:2 或 4:3,位于电路板边缘的元器件,离电路板边缘一般不小于 2mm。

(2) 以每个功能电路的核心元件为中心,围绕它来进行布局。元器件应均匀、整齐、紧凑地排列在 PCB 上,尽量减少和缩短各元器件之间的引线和连接,去耦电容尽量靠近器件的 VCC。

(3) 在高频下工作的电路,要考虑元器件之间的分布参数。一般电路应尽可能使元器件平行排列。这样,不但美观,而且装焊容易,易于批量生产。

(4) 按照电路的流程安排各个功能电路单元的位置,使布局便于信号流通,并使信号尽可能保持一致的方向。

(5) 尽可能地减小环路面积,以抑制开关电源的辐射干扰。

六、成果

经过几个月的努力，终于顺利完成了毕业设计。毕业设计是每个大学生必须面临的一项综合素质的考验，如果说在过去三年里，我们的学习是一个知识的积累过程，那么现在的毕业设计就是对过去所学知识的综合运用，是对理论进行深化和重新认识的时间活动。在这几个月的毕业设计中，我们有艰辛的付出，当然更多的是丰收的喜悦。知识固然得到了巩固和提高，但我相信在实践中切身体会将会使我在以后的工作和学习中终身受用。

在这次的设计中我的收获还是蛮大的。首先，在选择和设计主电路的过程中，我学会了设计要先把大方向确定，明确自己的设计思路和设计目标。在设计中有问题不用怕，更不要着急，慢慢来，充分利用网络和书上的资源。遇到问题时，勤动脑，勤动手，再大的难题也会得到解决。其次，在设计时，我知道了，设计中有不少的数据是要我们查阅相关资料的，所以设计与其说是在考验你的学习，好不如说是在考验你运用所学知识的能力以及提升所学的境界。最后，也是我感触最深的，学习过程中一定要具有认真细致，重视细节。

参考文献

- [1]王兆安, 刘进军. 电力电子技术(第五版)[M]. 机械工业出版社, 2011: 66-75.
- [2]辛伊波, 陈文清. 开关电源基础与应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 2016:80-87.
- [3]徐德鸿. 开关功率变换器-开关电源的原理、仿真和设计(第2版)[M]. 机械工业出版社, 2015:38-45.
- [4]徐远根, 刘敏, 乔恩明. 现代电力电子元器件识别、检测及应用[M]. 中国电力出版社, 2018:60-63.
- [5]陈永真, 陈之勃. 2011 年全国大学生电子设计竞赛硬件电路设计精解[M]. 电子工业出版社, 2016:110-125.
- [6]余小平, 奚大顺. 电子系统设计-基础篇[M]. 北京航空航天大学出版社, 2017:88-95.
- [7]胡宴如, 耿秋燕. 模拟电子技术基础[M]. 高等教育出版社, 2016:73-85.
- [8]徐远根, 刘敏, 乔恩明. 现代电力电子元器件识别、检测及应用[M]. 中国电力出版社, 2017:106-111.
- [9]周志敏, 周纪海, 纪爱华. 高频开关电源设计与应用实例[M]. 人民邮电出版社, 2015:45-55.
- [10]周志敏, 纪爱华. 经典开关电源实用电路 139 例[M]. 电子工业出版社, 2016:74-80.
- [11]黄智伟. 全国大学生电子设计竞赛系统设计(第2版)[M]. 北京航空航天大学出版社, 2017:101-123.
- [12]朱磊, 杨银堂, 朱樟明, 付永朝. 低压 CMOS 带隙电压基准源设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2018:68-72.

致谢

感谢我的指导老师耿运涛老师，耿运涛老师帮助我解决了本次毕业设计全过程中遇到的各种问题，这篇设计的每一个细节都离不开他的悉心指导。他严谨细致、不辞辛苦的工作作风是我工作、学习的榜样；他循循善诱、不厌其烦的教导和不拘一格的思路给予我无尽的启迪。在此，谨向耿运涛老师表示最真挚的敬意和感谢！

感谢所有的老师，以及我的同学、室友们，自从进入大学，来到这个陌生的地方，是你们给我的大学生活注入了激情和快乐，你们开阔的视野、渊博的知识帮我找到了人生的方向，你们真心的关心的鼓励给了我奋斗的动力。

感谢我的爸爸妈妈，焉得谖草，言树之背，养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。

在毕业设计即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入设计到设计的顺利完成，有多少可敬的师长、同学、朋友给了我无言的帮助，在这里请接受我诚挚的谢意！