

摘 要

电击枪是一种重要的防暴和反恐武器，它所涉及到的高压脉冲技术在军事领域有着广泛的应用。同时，在现代化工业中也发挥着越来越重要的作用。

首先，本文对电击枪高压脉冲电路的原理作了简要描述，阐述了系统各部分的工作原理。

其次，本文针对电击枪电源特点，设计了所需要的变压器，包括参数和结构。同时，给出了功率管驱动电路和单片机控制电路，并且分析了各自系统关键元件的工作特性。

最后，本文设计了基于单片机控制电击枪高压脉冲电源系统，包括硬件制作、和软件编写，并进行现场试验。试验分为电路测试和电击枪发射两种情况。电路测试包括电击枪的变压器输出和高压放电模块输出。电击枪发射选在户外进行。试验结果表明，基于单片机控制高压脉冲电源系统设计是比较合理的。

关键词：单片机，电击枪，高压脉冲电源，变压器。

Abstract

TASER is an important riot and anti-terroristic weapon. High-tension technology of TASER is widely used in martial domain. Also, it's applition in modern industry is more and more significant.

(1) This paper introduces principle of high-tension impulse circuit briefly and expatiates every parts of the system.

(2) In consideration of the characteristic of the TASER's power, transformer is designed including the parameters and configuration. The circuit driven by Power MOSFET and controlled by MCU (Microprogrammed Control Unit) is designed respectively.

(3) The design of power system based in MCU includes investigating, choosing and executing hardware. Then the software is programmed. At last, the system is tested out by experiment. The experiment includes circuit testing and TASER shooting. The output data of transformer and discharging of high-tension module are tested. The experimental results indicate that the design of the power system of high-tension impulse based in MCU can satisfy the actual need.

Keywords: MCU, TASER, the power system of high-tension impulse, transformer

声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名：_____

年 月 日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名：_____

年 月 日

1 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

自美国 9.11 事件发生后,“反恐”成为世界性的问题。防暴,“反恐”涉及到一系列的人员生命安全问题,所以各国法律对非致命武器的使用设立了严格的限制,同时随着民事责任的增加和疗伤费用的上升,导致了对安全而有效的非致命(LTL)武器的广泛需求,这使得开发非致命武器势在必行。

世界各国正在使用的非致命武器^{[1][2][3]},大体可分为以下几种:

1) 动能弹:弹头材料多样化(木、塑料、橡皮、水、汽、金属)且具有准确性。主要有多发弹集束以及霰弹。

2) 光能弹:通常是激光、频闪光、强光等。

3) 激光步枪:它是一种用电源提供动力的低能量的激光步枪,射程 1 英里,无声看不见光,能使人暂时丧失视力。

4) 声(次声):美国已研制出一种噪声炸弹,它能产生类似地震时产生的极低频率的声波,能伤害人体组织和内部器官从而引起人恶心、腹泻、内耳震动。

5) 电击枪(微波、电磁脉冲):美国研制的电击枪,它可射出一根 5 米长的特制细微导线,可放出 5 万伏左右的脉冲电波将人击昏。

6) 化学:CN、CS、OC。以色列研制的液体子弹,用按钮操纵子弹可连续射出强有力的化学蒸汽,在 10 英尺内可击倒对方。被击中者呼吸困难,头昏,皮肤像被火烧一样,眼睛睁不开。该武器可不用装弹,没有扳机,没有噪声,便于携带。

7) 止动剂:包括各种超粘物质(粘性泡沫)或超粘胶,它能妨碍人和车辆的前进。有一种是压缩聚合物,用特种枪发射,一经与空气接触就形成粘稠的泡沫,将人(物)围绕起来并将其冻结在原地;另一种是超粘性液体,能够发射到空中粘住汽车的引擎,冷却系统,妨碍它们吸入空气或阻止武器的运动。

其中电击枪由于在防身方面的独特优点,成为受到青睐的装备。目前,电击枪在法国得到了广泛的应用。德国联邦警察局最近也批准配备电击枪。英国内政部也在研究调查用非致命武器来装备本国警察,政府还规定把电击枪和豆包弹作为在欧洲和美国厂家采购的必须产品。最近还派人到美国考察,相中的有电击枪。

在以上背景下,本文选择电击枪作为研究对象,开展了对其关键部件高压脉冲电源的研究。

1.2 国内外研究状况

电击枪,又叫泰瑟枪(TASER)^[4],图 1.2.1 是法国 Taser 公司的新型反恐枪原理图。

目前我国国内还没有正式的生产报道。

国内与其相应的警用器材是电警棍,它是目前我国一种重要的治安防暴器材。通常电警棍的正常输出为 8kV,它接触人体放电时的输出电压为 2kV 左右,同时因为输出能量维持不变所以放电脉宽较宽。根据医学研究,一般人若被点 38 手枪子弹射中非致命部位,平均还能维持十秒至五分钟的意识清醒与肌肉控制。由于输出电压较低,罪犯即使被电警棍击中还有一些反击的时间与机会。根据国外研究,一般人只有被 30-50kV 高压电击中,会立即陷入意识昏迷与肌肉失控状态约三至十五分钟。

从医学人体安全角度考虑,电警棍有以下缺点,存在电热灼伤问题,宽脉冲电击容易诱发心脏疾病,造成致命伤害。

从电学角度分析,国内电警棍在负载突变时,容易产生磁饱和短路,导致功率管过载损坏。同时,倍压整流电路由于采用输出端高压电容储能,存在残余电压放电。

在国外,1974 年第一代泰瑟电击枪就已经问世。现代意义的泰瑟电击枪实际上是从 M26 开始的。1998 年,泰瑟公司开始了一个研制项目专为警察研制一种更具威力的高能电击枪。目的是能够制服那些一时神智失常、极具危险性的暴力分子。1999 年,经过几次大规模的演示活动后,人们发现 M26 在设计和功能上远比老式泰瑟枪先进,而且可靠。从此 M26 在美国广泛推广。目前最先进的是 X26 电击枪。当前泰瑟公司已开始大量生产 X26 电击枪。

X26 采用新型触发驱动拓扑及新原理控制技术,其电源采用 X26 专用的锂电池组供电,输出采用成形脉冲(Shaped Pulse)原理,电击枪击中目标时以前 2 秒每秒 9 个脉冲,后 3 秒每秒 5 个脉冲的方式进入人体内。这就使其以较小的能量产生较好的作用效果。X26 发射 2 个尾部连接金属线的探针。当探针击中人体目标时,枪与目标之间就形成回路,电流流向目标,引起目标剧痛,从而使目标短暂失能。

X26 使用十分安全,已经在动物身上做了大量的试验,研究表明失能是暂时的,不会对目标造成永久伤害。

X26 有多种附加助能,主要包括武器后方的显示面板可以提供有关电池寿命及其他用户关心的重要信息。如当泰瑟枪击发时,显示枪内部的温度等。X26 还设置了由 5s 到 0s 的倒计时计数器,以使用户了解目标开始失能的时间。武器内部的芯片会记录使用情况,按动按钮这些信息就会显示出来。X26 有 2 个发光二极管和一

个激光瞄准器，允许用户选择照明方式和是否打开激光瞄准器。目前 X26 以其崭新的形象，市场反映良好。

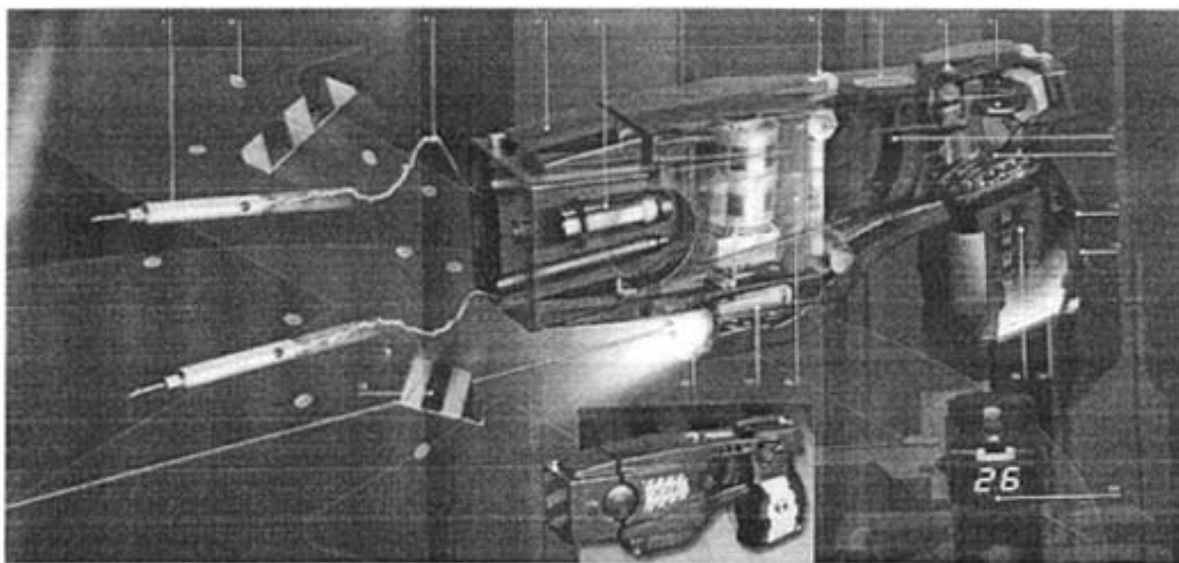


图 1.2.1 法国 laser 公司的反恐枪原理图

1.3 高电压的产生与应用

高电压产生的方法很度多，常见的有变压器直接升压，冲击高压放电发生器产生，LC 谐振，倍压升压产生等以及它们当中的一些组合。

在实际应用中，变压器直接升压应用场合最为广泛，但因所产生的电压与其体积，绝缘等关系密切。高压时体积较大，绝缘要求高。

冲击高压 Max 放电发生器一般情况下用在大电流，极高脉冲电压场合，且体积较大，结构复杂。

倍压升压在高电技术中应用也很广，尤其是高压电源技术中，其结构简单。我国国内警用器材高压放电电源均采用自激型倍压整流电路这种电路输出电压取自电容两段，存在残余放电。

LC 谐振可以产生比电源电压高任意倍的电压，输出为交流电压，LC 谐振对电压波型要求较高^[6]。

本文所研究的电路高电压产生方法采用变压器升压与 LC 谐振相结合的方式产生。

1.4 本文研究的主要内容

本文的主要工作是进行单片机控制电击枪高脉冲电源的设计，主要有以下几方面的内容：

1) 第一章对电击枪国内外的发展现状和发展动向进行了介绍。对通常高电压

的产生方法进行了论述。

2) 第二章对基于单片机控制电源系统的工作原理作了说明。

3) 第三章介绍了变压器的设计方法。针对本电源工作特点, 设计了变压器的结构, 并且给出了相应的参数。

4) 第四章、第五章进行系统电路设计。从硬件和软件两方面进行了设计。硬件方面, 给出了主要元器件的电气性能指标, 并分别设计了驱动电路和智能控制电路。软件方面, 编制了电路的控制程序。

5) 第六章对已研制出的电路板进行测试。通过电压测量和现场试验测试了此系统的性能。并取得了较满意的试验结果。

2 电源系统整体概况

2.1 脉冲高压放电电源主要设计参数

本文所研究的电击枪电源系统构成分为两大模块即隔离升压电源模块和脉冲放电头模块，为了达到预期的效果，对该电源系统参数提出以下要求：

1) 隔离升压电源模块参数：

输入电压：9.6V-15.6V

输出电压：4000Vp-p

脉尖 50-200 μ s

每秒 9-22 个脉冲（随时间变化）

额定功率：30W

输入输出绝缘：20kV/1min

漏电流 $I_{leak} < 10\mu A$ ；

效率：不小于 85%

短路保护：额定电流 150%（过载）

2) 脉冲放电头模块参数：

脉冲信号宽度：44 μ s；

输出脉冲电压：50kV-200kV，

宽度 50~200 μ s；

输入输出绝缘：100kV/1min

漏电流 $I_{leak} < 6-20\mu A$ ；

脉冲电压误差：不大于 5kV。

脉冲放电头模块的性能直接取决于隔离升压电源模块的输出。

2.2 系统的构成

电击枪电源系统是电击枪的核心部分，它直接决定了电击枪的质量。本文所研究电击枪的电源系统构成如图 2.2.1 所示。

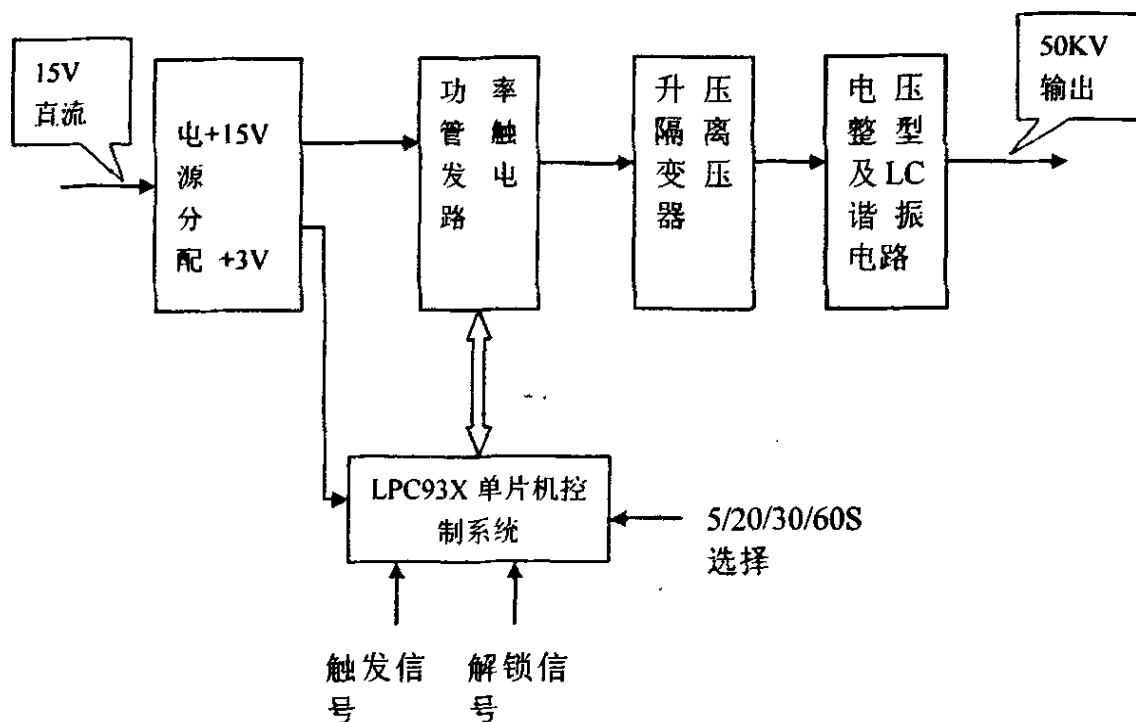


图 2.2.1 电击枪电源系统

从上图可以看出，该系统有六个组成部分构成：供电电源、电源分配、功率管触发电路、LPC93X 单片机系统、脉冲升压变压器、电压整型及 LC 谐振电路。

2.3 工作原理

本文所研究的电路系统有六个组成部分构成即：

1) 供电电源：

供电电源由锂电池产生，通过串联产生所要的电压。

2) 电源分配系统：

电源分配系统由专用电源模块构成。输入端为+15V，输出为+15V 和+3V；提供给功率管触发电路和单片机系统。

3) 功率管触发电路：

功率管触发电路主要是产生低压矩形脉冲，作为升压变压器的输入电源。

4) LPC93X 单片机系统：

LPC93X 单片机系统是电击枪电源系统的控制部分，在 LPC93X 单片机系统的控制下，功率管触发电路在规定的时刻产生低压矩形脉冲。

5) 升压隔离变压器：

升压隔离变压器一方面起着电气隔离作用，另一方面将功率管触发电路产生的

低压矩形脉冲波转换为 4000V 左右的高压脉冲。

6) 整型及谐振电路:

电压整型及 LC 谐振电路即脉冲放电头模块, 该电路首先采用滤波方法提升脉冲前沿电压, 然后经 LC 谐振电路再进一步升压, 最后产生了 50-200kV 脉冲高压输出。

3 变压器设计

3.1 变压器的工作原理

3.1.1 变压器的基本原理

变压器几乎在所有的电子产品中都要用到，它原理简单但根据不同的使用场合（不同的用途）变压器的绕制工艺会有所不同的要求。变压器的功能主要有：电压变换；阻抗变换；隔离；稳压（磁饱和变压器）等。

图 3.1.1 是变压器的原理简体图，当一个正弦交流电压 U_1 加在初级线圈两端时，导线中就有交变电流 I_1 并产生交变磁通 ϕ_1 ，它沿着磁心穿过初级线圈和次级线圈形成闭合的磁路。在次级线圈中感应出互感电势 U_2 ，同时 ϕ_1 也会在初级线圈上感应出一个自感电势 E_1 ， E_1 的方向与所加电压 U_1 方向相反而幅度相近，从而限制了 I_1 的大小。为了保持磁通 ϕ_1 的存在就需要有一定的电能消耗，并且变压器本身也有一定的损耗，尽管此时次级没接负载，初级线圈中仍有一定的电流，这个电流我们称为“空载电流”。如果次级接上负载，次级线圈就产生电流 I_2 ，并因此而产生磁通 ϕ_2 ， ϕ_2 的方向与 ϕ_1 相反，起了互相抵消的作用，使磁心中总的磁通量有所减少，从而使初级自感电压 E_1 减少，其结果使 I_1 增大，初级电流与次级负载有密切关系。当次级负载电流加大时 I_1 增加， ϕ_1 也增加，并且 ϕ_1 增加部分正好补充了被 ϕ_2 所抵消的那部分磁通，以保持磁心里总磁通量不变。

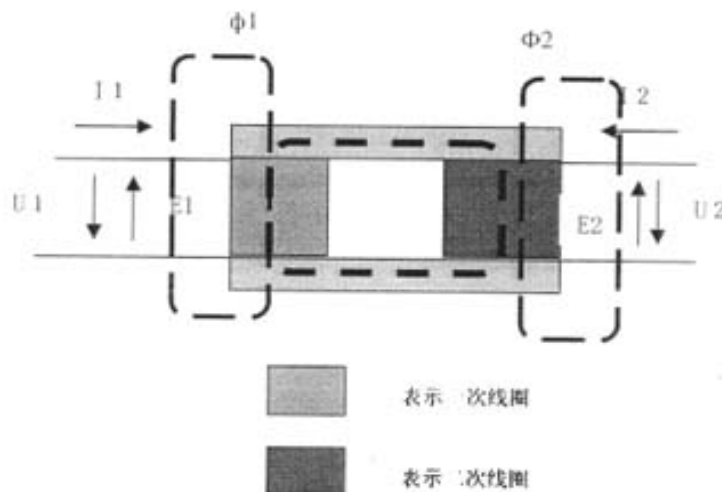


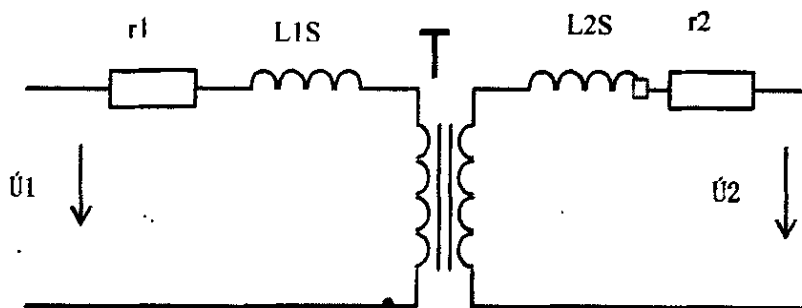
图 3.1.1 变压器的原理简体图

3.1.2 变压器的电路模型

如果不考虑变压器的损耗,可以认为一个理想的变压器次级负载消耗的功率也就是初级从电源取得的电功率。变压器能根据需要通过改变次级线圈的圈数而改变次级电压,但是不能改变允许负载消耗的功率。

实际上,当变压器的初级绕组通电后,线圈所产生的磁通在磁心流动,因为磁心本身也是导体,在垂直于磁力线的平面上就会感应电势,这个电势在磁心的断面上形成闭合回路并产生电流,好象一个旋涡所以称为“涡流”。这个“涡流”使变压器的损耗增加,并且使变压器的磁心发热变压器的温升增加。由“涡流”所产生的损耗我们称为“铁损”。另外要绕制变压器需要用大量的铜线,这些铜导线存在着电阻,电流流过时这电阻会消耗一定的功率,这部分损耗往往变成热量而消耗,我们称这种损耗为“铜损”。所以变压器的温升主要由铁损和铜损产生的。由于变压器存在着铁损与铜损,所以它的输出功率永远小于输入功率,可用一个效率的参数来对此进行描述,即 η , η 为输出功率/输入功率。在电路图中可用绕组电阻来表示这个参数。

变压器初级绕组通电后,线圈所产生的磁通并不能都通过次级线圈,这就产生了漏感。漏感是线圈所产生的磁力线不能都通过次级线圈,因此产生漏磁的电感称为漏感。考虑功率损耗和漏磁的变压器电路模型可用图 3.1.2 表示^[7]。



r_1 为变压器初级绕组电阻 L_{1s} 为变压器初级绕组漏感

r_2 为变压器次级绕组电阻 L_{2s} 为变压器次级绕组漏感

图 3.1.2 变压器电路模型

本文变压器由于要驱动谐振电路,其设计指标要求比一般工频变压器高^{[8][9]},铁芯用铁氧体材料,绕制要求比较严格。在分析变压器工作过程时,除了漏感和磁化电感外,还必须考虑变压器结构元件间的寄生电容。寄生电容分布于各个元件之间,可分为五类:磁心和初级绕组间的寄生电容;初次级绕组间的寄生电容;初级绕组匝间的寄生电容;磁心和次级绕组间的寄生电容;初级绕组匝间的寄生电容;变压器寄生电容可折算为等效电容,变压器寄生电容折算后为等效电容后的电路可

用下面图 3.1.3 描述:

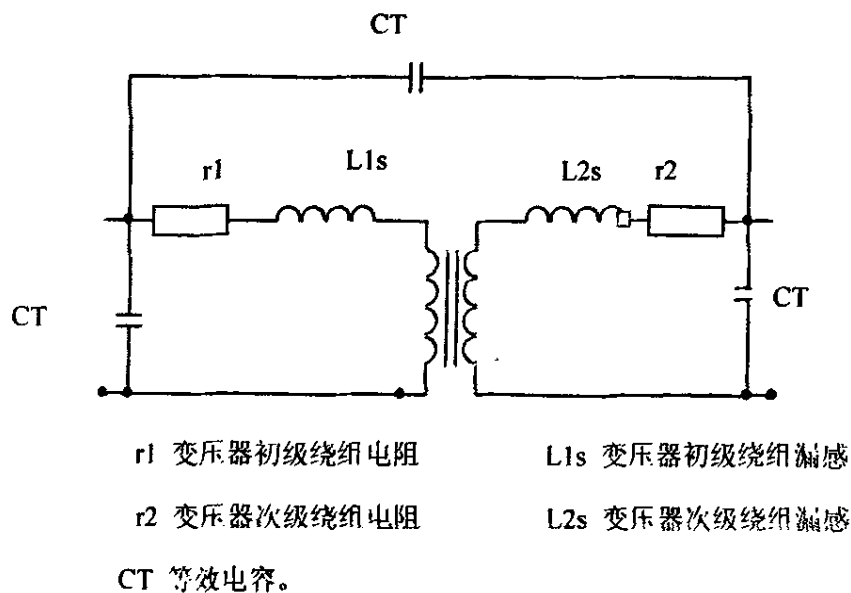


图 3.1.3 折算为等效电容后的变压器电路

3.1.3 变压器的磁滞回线

变压器的磁材料除了具有高的磁导率外,另一重要的磁性特点就是磁滞。设磁性材料已沿起始磁化曲线磁化到饱和,磁化开始饱和时的磁感应强度值用 B_s 表示。如果在达到饱和状态之后使 H 减小,这时 B 的值也要减小,但不沿原来的曲线下降,而是沿着上一条曲线段下降,对应的 B 值比原先的值大,说明铁磁质磁化过程是不可逆的过程。当 $H = 0$ 时, B 不为零,而是 $B = B_r$, B_r 称为剩余磁感应强度,简称剩磁,这是铁磁质的剩磁现象。要消除剩磁,使磁质中的 B 恢复为零,需加反向磁场 H_c , 反向磁场强度 H_c 称为矫顽力。继续增加反向磁场 H_c 。材料又可被反向磁化达到反方向的饱和状态,以后再逐渐减小反方向的磁场至零值时, B 和 H 的关系将沿左下段变化,这时改变线圈中的电流方向,即又引入正向磁场。当磁场强度变化一个周期后,铁磁质的磁化曲线形成一个闭合曲线,该闭合曲线叫磁滞回线,磁滞回线是介质内部磁场强度 H 和磁感应强度 B 的关系曲线。

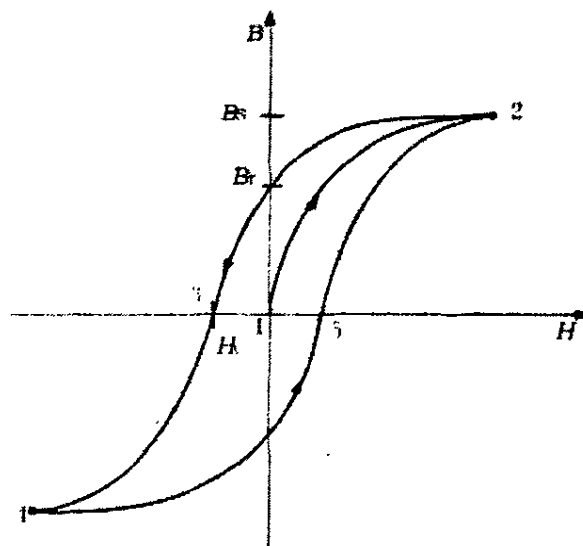


图 3.1.4 极限磁滞回线

不同的磁芯，该曲线的曲线有变化，但其基本形状是一致的。图 3.1.4 中展示的是其中的一条极限磁滞回线，不同的磁滞回线主要区别是磁滞回线的宽、窄不同和矫顽力的大小有别。

要测定材料的磁滞回线，需要根据磁化过程测定材料内部的磁场强度 H 及其相应的磁感应强度 B ，测量过程比较繁复。用示波器显示则比较简便，只需要把待测量的 H 转换为激磁电流 I 在取样电阻 R 上的电压，输入到示波器的 X 轴；把待测量 B 也转换成电流量，并串入适当值的电容 C ，利用 RC 积分电路进行积分，最后取电容 C 两端的电压输入到示波器 Y 轴，则可得到铁磁材料磁滞回线的图形。

磁滞回线与磁心损耗有联系，磁心损耗与磁滞回线环的面积成正比。剩余磁感应强度，简称剩磁 B_r ，简称剩磁。剩磁越高，铁心的利用率就越低，本文中，对变压器输出电压波形要求严格，希望采用的剩余磁感应强度 B_r 低，矫顽力 H_c 小，饱和磁感应强度 B_s 高的磁芯。

3.2 变压器的参数设计

3.2.1 变压器的设计基本要求

变压器的设计包括变压器结构，铁心材料，绝缘方式的选取，绕组线径，匝数，铁心尺寸等。

本文中，由于对输出电压波形有要求，对设计的变压器^[13]提出如下要求：

- 1) 输出脉冲波的畸变不超过规定值；
- 2) 变压器的温升不超过规定值；

3) 变压器的体积应当最小, 重量最轻, 效率最高。

这些要求不可能同时满足, 相互之间有一定的矛盾。要求输出脉冲波的畸变小, 就要求变压器的体积应当最小。在功率一定的情况下, 变压器的温升必然过高。由于这些矛盾的存在, 使设计方法复杂。原则上有一个最佳方案, 但不适合于实际应用^{[17][21]}。本设计偏向于第一条。变压器的设计在重视理论的同时, 实践更重要。

3.2.2 变压器的参数设计

1) 参数设计公式

变压器的参数设计依据经验公式

$$A_c \cdot A_M = \frac{P_{BY} \times 10^6}{2fB_m j \eta K_c K_M} \quad (3.2.1)$$

式中 A_c ——铁心中截面积

A_M ——铁心窗口面积

P_{BY} ——变压器的计算功率

B_m ——磁性材料的最大磁感应强度, 对于用矩形磁滞回线的铁心材料用给定的饱和磁感应强度 B_j (Gs) 带入; 对于非矩形磁滞回线的磁性材料的 B_m 值, 一般可选在磁性曲线开始弯曲的点上。但是一般说来这一点是不明显的, 根据经验一般可取 $B_m \approx (0.6-0.8)B_j$;

J ——线圈的电流密度, 对于一般小型变压器可取 $2-3A/mm^2$;

η ——变压器效率;

K_c ——铁心的填充系数, 对叠片铁心一般为 0.9-0.95, 对于铁氧体可取

$K_c = 1$;

K_M ——窗口的填充系数, 对于电压不甚高的线圈可估计为 0.2-0.3, 对高压线圈的 K_M 约为 0.1~0.2。

2) 变压器参数

变压器的主要参数设计如下:

(1) 铁氧体磁心: 因为铁氧体铁心电阻率高, 损耗小, 制造工艺简单, 价格比较便宜。具体型号 MX-2000, 并取 $B_m = 3500Gs$ 。常见铁氧体磁性材料的性能见表 3.2.1

(2) 磁心尺寸:

$$A_c \cdot A_M = \frac{30 \times 10^6}{2 \times 2 \times 10^3 \times 3500 \times 3 \times 0.9 \times 1 \times 0.2}$$

$$=3.98 \text{ cm}^4$$

磁心尺寸的计算按式 3.2.1 计算。

式中取 $P_{gy}=30\text{W}$, $f=2\text{KHZ}$, $B_m=3500\text{Gs}$, $j=3\text{A/mm}^2$, $\eta=0.9$, $K_c=1$, $K_m=0.2$
变压器结构采用 E 型结构, 圆形截面 E 型结构磁心的主要尺寸见表 3.2.2

选取 E-12 型铁氧体磁心, 经计算, 可得出

$A_c \cdot A_m = 2.8\text{cm}$, 计算结果小于上式。约为上式的 0.7 倍, 这样设计的变压器波形畸变小, 温升大, 但是由于本文电击枪变压器正常工作较短, 本文最后样机选用 E-12 型。

(3) 线圈匝数:

变压器线圈匝数初级 N_1 :

$$N_1 = \frac{U_1 \times 10^6}{4fB_m A_c} = \frac{15 \times 10^6}{4 \times 2 \times 10^3 \times 3500 \times 1.03} = 63 \text{ 匝}$$

变压器线圈匝数次级 N_2 :

$$N_2 = 1.1 \times \frac{U_2 \times N_1}{U_1} = 19000 \text{ 匝}$$

取副边电压最大变化为 4000V

变压器线圈反馈级 N_f :

为了防止电磁脉冲的干扰, 本文中作者反馈电压调的较高, 约 (为 70V) 净可能防止放电时的电磁干扰 N_f 的大小与分压电阻有关, 本文中取 $N_f=300$ 匝。

表 3.2.1 常见铁氧体磁性材料的性能

材料型号及参数	MXD -2000	MX -2000	MXO -400	MXO -800	MXO -2000	MXO -4000
起始导磁率 μ_i	2000	2000	400	800	2000	4000
温度系数 $\alpha_\mu \times 10^8$	+2500 -500	3000	3200	2500	3500	4000
温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	20~60	20~60	20~60	20~60	20~60	20~60
居里温度 θ_f ($^{\circ}\text{C}$)	210	210	180	150	150	110
B_s (G_s)	4000	4000	3200	3000	4000	3500

$B_r(G_s)$	1200	1200	1700	1500	1400	1200
$H_c(O_c)$	0.25	0.25	1.0	0.7	0.3	0.2
电阻率 $\rho(\Omega-cm)$	1×10^2	1×10^2	1×10^3	1×10^2	1×10^2	1×10^2
适用频率(MHz)	0.5	0.5	1.5	1	0.5	0.3
用途	罐形环形	U形罐形	螺纹环形	环形	E形环形	环形罐形

注: B_s ——饱和磁感应强度;

B_r ——剩余磁感应强度;

H_c ——矫顽力。

表 3.2.2 国产 E 型磁心的尺寸

尺寸及 型号	L	L_2	L_1	H	h	B	r
E-5	20 _{1.1}	13 ^{1.1}	5 _{0.6}	10.5 _{0.4}	6.5 ^{0.6}	5 _{0.6}	1.0
E-6	24 _{1.5}	16 ^{1.2}	6 _{0.8}	12 _{1.1}	8 ^{0.6}	6 _{0.8}	1.5
E-7	30 _{1.8}	18 ^{1.4}	7 _{0.8}	15 _{1.1}	9 ^{0.8}	7 _{0.8}	2.0
E-9	36 _{2.2}	23 ^{1.6}	9 _{0.8}	18 _{1.3}	11 ^{0.8}	9 _{0.8}	2.5
E-12	43 _{2.4}	28 ^{1.8}	12 _{1.0}	21.5 _{1.6}	14 ^{0.8}	12 _{1.0}	2.5
E-17	55 _{2.6}	37 ^{2.0}	17 _{1.2}	27.5 _{1.8}	18 ^{0.8}	17 _{1.2}	3.0
E-20	65 _{3.1}	43 ^{2.3}	20 _{1.4}	32.5 _{2.2}	21.5 ^{1.0}	20 _{1.4}	3.5
E-28	85 _{1.0}	55 ^{2.5}	28 _{1.8}	42 _{2.1}	29 ^{1.5}	28 _{1.8}	4.0
E-36	110 _{1.8}	72 ^{3.0}	36 _{2.0}	55 _{2.8}	37 ^{1.8}	36 _{2.0}	4.0

3.3 变压器结构设计

3.3.1 线圈设计

1) 线圈结构

变压器线圈结构常用的一般有两种型式，即层状线圈和盘状线圈^{[31][33][34]}。每种型式，又可根据绕组的排列方式分为交替式和非交替式两种。实际上应用较多的是层状非交替式、层状交替式和盘状交替式三种。在高压线圈中，有时采用层状分段式。

层状线圈结构简单，但分布电容较大。盘状线圈多用于高压绕组，因为这样可以减小每段内的层间电位差，可降低对层间绝缘的要求。

非交替式线圈的结构简单，分布电容较小，但漏感大。交替式线圈的漏感小，但分布电容却比较大。从理论上讲，线圈替的次数越多则漏感就越小。但这将会使制造工艺复杂化，造价提高。所以一般常用的交替式线圈其交替次数不超过 2~3 次。

层状分段式线圈与盘状线圈相比，具有更小的漏感和分布电容^{[27][28][30]}，但工艺复杂，本文所讨论的变压器因对分布参量要求严格，所以采用层状分段式线圈结构。

其结构如图 3.3.1 所示

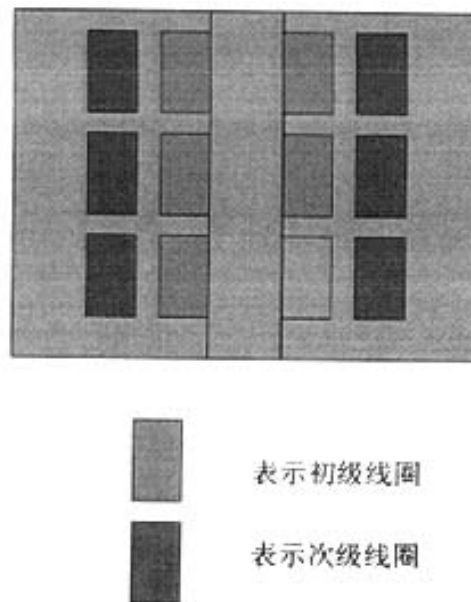


图 3.3.1 层状分段式线圈结构

2) 线圈电路结构

本文中, 变压器的绕组分为三个部分, 它们分别是: 初级线圈 N_1 , 次级线圈 N_2 , 反馈线圈 N_f , 这三个部分可用电路图表示, 其电路结构见图 3.3.2

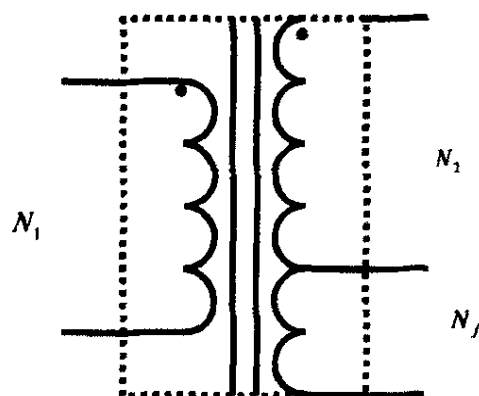


图 3.3.2 变压器的电路结构

3.3.2 磁心外形

本文中, 变压器所用磁心尺寸为 E-12 型, 是一种较常见的磁心。其参数见表 3.2.2, 其外型尺寸见图 3.3.3。



图 3.3.3 E-12 型磁心尺寸

3.3.3 变压器的绝缘

变压器绕组的绝缘材料应当满足下列要求:

- 1) 绝缘材料应当具有足够的抗电强度, 在各种可能的过电压下都不应当发生击穿或飞弧;
- 2) 绕组的寄生时间常数应当尽可能小;
- 3) 在最高工作温度下及规定的使用期限内, 绕组绝缘的电气和机械性能应满

足要求。

因此,所用绝缘材料的抗电强度越高越好,介电常数越小越好。

在本文中,绝缘材料选用聚四氟乙烯薄膜,其参数为标准代号 HG2-537-67,介电常数 1.8-2.2,最高允许工作温度 250(°C),抗电强度 250-600KV/CM。

常用绝缘材料的性能如表 3.3.1 所示。

表 3.3.1 常用绝缘材料的性能

材料名称	标准代号	介电常数	最高允许工作温度 (°C)	抗电强度 KV/CM
变压器油	SYB1351-76	2.0-2.25	95	160
电容器油	SYB1355-60	2.1-2.3	95	200
甲基硅油		2.6-3.3		150
乙基硅油		2.4-2.7		150
苯甲基硅油		2.6-2.8		180
电缆纸	QB131-79	3	130	80
油中电缆纸		4-4.8	95	160
油中电容器纸		4.6-5.2	95	250
电绝缘纸厚				
0.5mm	OB342-73	4.5	95	420
厚 0.1mm	OB342-73	4.5	95	360
绝缘漆布	QBJ306-77	2.8-7.7	105-150	120-300
有机硅漆布			180	120-250
聚四氟乙烯	HG2-537-67	1.8-2.2	250	250-600
聚酯薄膜	JB1256-77	3	120	100
聚酰胺薄膜		3.5-4	180	90
聚酰亚胺薄膜		3	250	100
环氧混合料		3.3-1-4.7	130	200-300
有机玻璃		3.5-4.5	110	180-350

3.4 本章小结

本章主要工作如下:

- 1) 根据本电源的特点, 计算了变压器的参数。
- 2) 设计了线圈的结构。
- 3) 根据设计, 在厂家帮助下制作了变压器元件。该变压器具有相对体积小, 脉冲波形畸变小, 温升限制, 正常连续工作时间较短。

4 功率 MOSFET 驱动控制电路构成

4.1 功率 MOSFET

4.1.1 概述

“MOSFET”是英文 MetalOxide Semiconductor Field Effect Transistor 的缩写,译成中文是“金属氧化物半导体场效应管”。它是由金属、氧化物及半导体三种材料制成的器件。所谓功率 MOSFET(Power MOSFET)是指它能输出较大的工作电流(几安到几十安),用于功率输出级的器件。自 1976 年开发出功率 MOSFET 以来,由于半导体工艺技术的发展,它的性能不断提高工作频率范围从直流到达数兆赫;保护措施越来越完善;并开发出各种贴片式功率 MOSFET(如 Siliconix 最近开发的厚度 1.5mm“Little Foot”系列)。另外,价格也不断降低,使应用越来越广泛,不少地方取代双极型晶体管。功率 MOSFET 主要用于计算机外设(软、硬驱动器、打印机、绘图机)、电源(AC/DC 变换器、DC/DC 变换器)、汽车电子、音响电路及仪器、仪表等领域。

4.1.2 功率 MOSFET 的结构

图 4.1.1 是典型平面 N 沟道增强型 MOSFET 的剖面图。它用一块 P 型硅半导体材料作衬底,在其面上扩散了两个 N 型区,再在上面覆盖一层二氧化硅(SiO_2)绝缘层,最后在 N 区上方用腐蚀的方法做成两个孔,用金属化的方法分别在绝缘层上及两个孔内做成三个电极:G(栅极)、S(源极)及 D(漏极),如图 4.1.1 右所示。

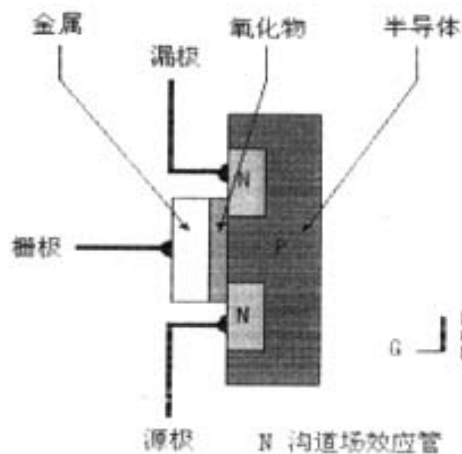


图 4.1.1 平面 N 沟道增强型 MOSFET 的剖面图

当有一个正电压加在 N 沟道的 MOS 场效应管栅极上时，由于电场的作用，此时 N 型半导体的源极和漏极的负电子被吸引出来而涌向栅极，但由于氧化膜的阻挡，使得电子聚集在两个 N 沟道之间的 P 型半导体中从而形成电流，使源极和漏极之间导通。可以想象两个 N 型半导体之间为一条沟，栅极电压的建立相当于为他们之间搭了一座桥梁，该桥梁的大小由栅压决定。

4.1.3 2SK2956 功率 MOSFET

本文中功率 MOSFET 是 RENESAS 公司生产的 N 沟道 MOS 场效应管（2SK2956），其外形及引脚说明如图 4.1.2 所示

2SK2956 最大漏极电流为 50A，场效应管导通时，漏—源极间电阻为 7 毫欧，通过 10A 电流时消耗功率约 0.7W。

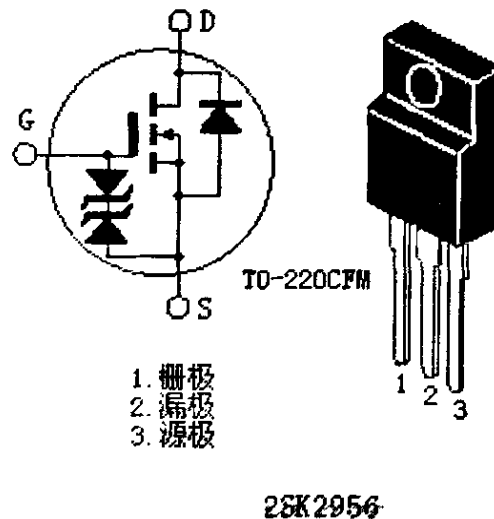


图 4.1.2 2SK2956 外形及引脚

4.2 PWM 控制芯片 SG3525

SG3525 是美国硅通用半导体公司 (Silicon General) 推出用于驱动 N 沟道功率 MOSFET PWM 控制芯片, 按照接反馈电流来调节脉宽的。SG3525 系列 PWM 控制器分军品、工业品、民品三个等级。在脉宽比较器的输入端直接用流过输出电感线圈的信号与误差放大器输出信号进行比较, 从而调节占空比使输出的电感峰值电流跟随误差电压变化而变化。由于结构上有电压环和电流环双环系统, 因此, 无论开关电源的电压调整率、负载调整率和瞬态响应特性都有提高, 是目前比较理想的新型控制器。

4.2.1 SG3525 结构

SG3525 是一个 16 引脚的集成芯片, 其外型如图 4.2.1 所示, 引脚排列如图 4.2.2 所示



图 4.2.1 SG3525 外型

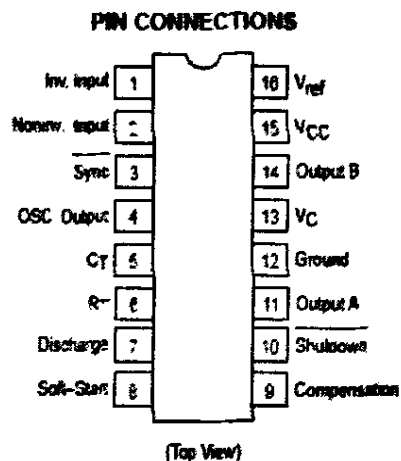


图 4.2.2 SG3525 引脚排列

4.2.2 SG3525 引脚功能

SG3525 引脚功能如图 4.2.3 所示

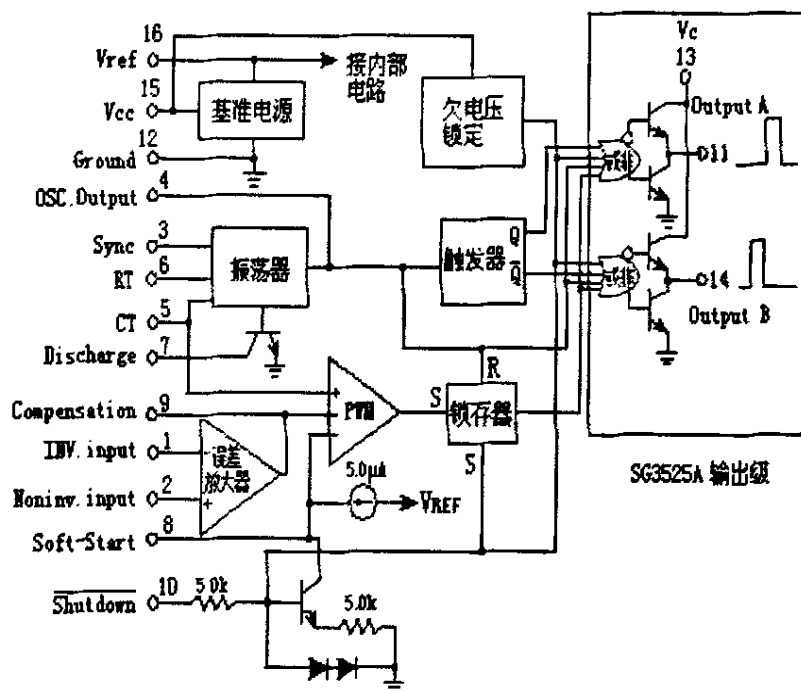


图 4.2.3 SG3525 引脚功能

SG3525 引脚功能及特点简介如下:

1) Inv.input(引脚 1): 误差放大器反向输入端。

- 2) Noninv.input(引脚 2): 误差放大器同向输入端。
- 3) Sync(引脚 3): 振荡器外接同步信号输入端。
- 4) OSC.Output(引脚 4)振荡器外接同步信号输出端
- 5) CT(引脚 5): 振荡器定时电容接入端。
- 6) RT (引脚 6) : 振荡器定时电阻接入端。
- 7) Discharge(引脚 7): 振荡器放电端。
- 8) Soft-Start(引脚 8): 软启动电容接入端。
- 9) Compensation(引脚 9): PWM 比较器补偿信号输入端。
- 10) Shutdown(引脚 10): 外部关断信号输入端。
- 11) Output A (引脚 11) : 输出端 A。引脚 11 和引脚 14 是两路互补输出端。
- 12) Ground(引脚 12): 信号地。
- 13) Vc(引脚 13): 输出级偏置电压接入端。
- 14) Output B (引脚 14) : 输出端 B。引脚 14 和引脚 11 是两路互补输出端。
- 15) Vcc (引脚 15) : 偏置电源接入端。
- 16) Vref(引脚 16): 基准电源输出端。

4.3 功率 MOSFET 驱动控制电路

4.3.1 功率 MOSFET 驱动控制电路

功率 MOSFET 的驱动控制电路^{[25][40]}如图 4.3.1 所示

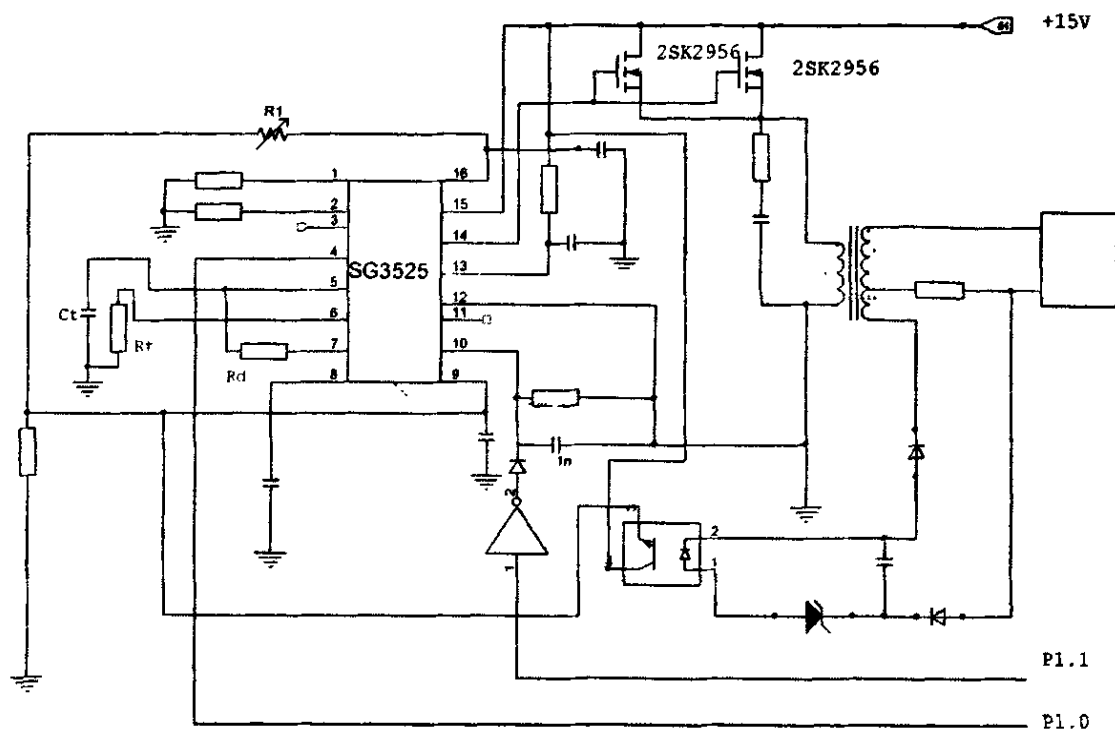


图 4.3.1 功率 MOSFET 的驱动控制电路

4.3.2 功率 MOSFET 驱动控制电路工作原理

1) SG3525 的工作波形

SG3525工作时，比较器的反相端接误差放大器的输出信号 u_e ，振荡器的输出信号 u_c 则加到比较器的同相输入端，比较器的输出信号为PWM信号，该信号经锁存器锁存，分相电路由二进制计数器和两个或非门构成，其输入信号为振荡器的时钟信号，并用时钟信号的前沿触发，输出为频率减半的互补方波，这些方波和PWM信号输入到或非门逻辑电路。其结果是，所有的输入为负时，输出为正。这样 V_a 、 V_b 的输出每半周期交替为正，其宽度和PWM信号的负脉冲相等。脉冲很窄的时钟信号输入到逻辑或非门电路，可使两个门的输出同时有一段低电平，产生了死区时间，具体如图4.3.2所示，图中信号说明见图4.2.2说明。

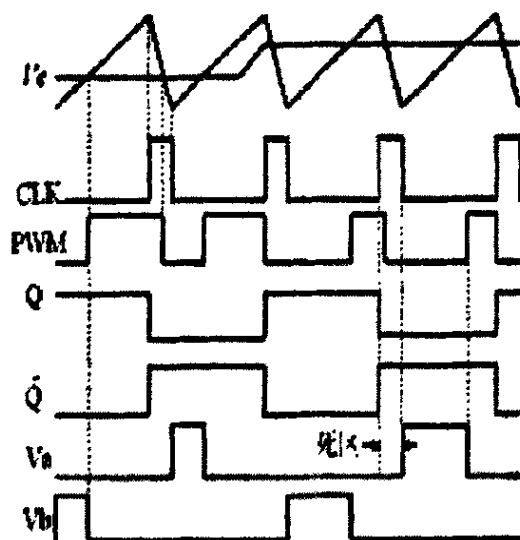


图 4.3.2 PWM 信号产生及分相电路

本机中, 控制信号由 14 管脚引出。

2) PWM 工作电路

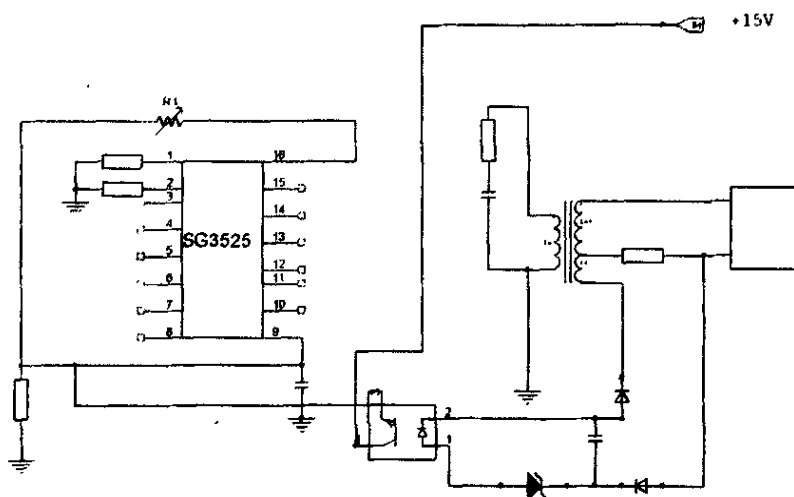


图 4.3.3 PWM 工作电路

根据 SG3525 各脚功能和电路开关管控制规律。接有如图 4.3.4 所示 SG3525 外围电路。脚 5、脚 6、脚 7 的电容、电阻值决定了振荡器的振荡频率。其 PWM 工作电路如图 4.3.2 所示。脚 1 和脚 2 为 SG3525 的误差放大器的反相和相输入端, 现均通过一个电阻接地, 让它处于不工作状态。反馈信号由 PWM 比较器补偿信号输入端进入。隔离反馈电路采用的是比较普遍的光隔离器。虽然光隔离器的电流传送比会随温度而漂移, 也会随着时间增加而逐渐变差, 而且各个光耦合隔离器的误差范围也相差比较大。使用电位器因为本控制电路的工作时间较短, 在样机中, 有一个温度补偿环节。

3) 工作频率

SG3525 工作时, 由一个双门限电压均从基准电源取得, 其高门限电压 $V_H = 3.9V$, 低门限电压 $V_L = 0.9V$, 内部恒流源向 C_1 充电, 其端压 V_{C_1} 线性上升, 构成锯齿波的上升

沿, 当 $V_C = V_H$ 时比较器动作, 充电过程结束, 上升时间 t_1 为: $t_1 = 0.67 R_i C_i$, 比较器动作时使放电电路接通, C_i 放电, V_C 下降并形成锯齿波的下降沿, 当 $V_C = V_L$ 时比较器动作, 放电过程结束, 完成一个工作循环, 下降时间 t_2 为: $t_2 = 1.3 R_d C_i$, 此时间即为死区时间

锯齿波的基本周期 T 为: $T = t_1 + t_2 = (0.67 R_i + 1.3 R_d) C_i$

在本机中, 锯齿波的基本周期也是时钟频率, 为 2KHZ。

4) 电路特点:

(1) 软启动电路

SG3525 的软启动接入端 (引脚 8) 上接一个软启动电容。上电过程中, 由于电容两端的电压不能突变, 因此与软启动电容接入端相连的 PWM 比较器反向输入端处于低电平, PWM 比较器输出高电平。此时, PWM 锁存器的输出也为高电平, 该高电平通过两个或非门加到输出晶体管上, 使之无法导通。只有软启动电容充电至其上的电压使引脚 8 处于高电平时, SG3525 才开始工作。

(2) PWM 锁存功能, 允许单脉冲输出

当 Shutdown (引脚 10) 上的信号来自 LPC936 的 P1.1 口输出, 触发时刻未到时为高电平时, PWM 锁存器 SG3525 的输出, 触发时刻到来时时为低电平时, 允许 SG3525 输出。

(3) 较强的输出能力

变压器原边的开关管各采用两只 2SK2956I 并联, 之所以并联, 主要是因为电源接入负载时, 变压器原边的电流相对较大, 并联可以分流, 可有效地减少开关管的功耗, 不至于造成损坏。

(5) 直接推动功率 MOSFET

由于 SG3525 的输出驱动电路是低阻抗的, 而功率 MOSFET 的输入阻抗很高, 因此输出端 A 和输出端 B 与 SG3525 栅极之间无须串接限流电阻和加速电容, 就可以直接推动功率 MOSFET。

4.4 本章小结

在本章中, 介绍了 SG3525 的工作原理, 并设计了控制电路, 该电路具有如下特点:

由于电路的工作环境恶劣, 所以反馈信号采用光电耦合方式传送, 可隔离高压端的电气干扰, 同时采用变压器隔离抑制了在高压变化时易产生功率管误触发。采用双管并联电路, 这样可提供低驱动阻抗, 约为单管的 1/2, 保证了变压器的输入端有较大的输入电流, 具有 PWM 功能。

5 单片机控制系统

5.1 LPC93X 概述

5.1.1 LPC93X 基本性能

LPC933/934/935/936 是一款单片封装的微控制器, 适合于许多要求高集成度、低成本场合, 可以满足多方面的性能要求。LPC933/934/935/936 采用了高性能的处理器结构, 指令执行时间只需 2 到 4 个时钟周期。6 倍于标准 80C51 器件。LPC933/934/935/936 集成了许多系统级的功能, 这样可大大减少元件的数目、电路板面积以及系统的成本。

1) 主要特点:

8KB 字节可擦除 Flash 程序存储器, 具有 1KB 扇区和 64 字节页。单字节擦除特性使得任何字节都可用于非易失性数据存储。

256 字节 RAM 数据存储器。512 字节附加片内 RAM。

512 字节片内用户数据 EEPROM 存储区, 可用来存放器件序列码及设置参数等。

8 输入多路 10 位 A/D 转换器。2 个模拟比较器。可选择输入和参考源。2 个 16 位定时/计数器 (每一个定时器均可设置为溢出时触发相应端口输出或作为 PWM 输出), 23 位的系统定时器可用作实时时钟 (RTC)。

增强型 UART。具有波特率发生器、间隔检测、帧错误检测和自动地址检测功能。400kHz 字节方式 I2C 通信端口和 SPI 通信端口。

捕获/比较单元 (CCU) 提供 PWM, 输入捕获和输出比较功能。

选择片内高精度 RC 振荡器时不需要外接振荡器件。可选择 RC 振荡器选项并且其频率可进行很好的调节。

VDD 操作电压范围为 2.4~3.6V。I/O 口可承受 5V (可上拉或驱动到 5.5V)。28 脚 TSSOP、PLCC 和 HVQFN 封装。最少 23 个 I/O 口, 选择片内振荡和片内复位时可多达 26 个 I/O 口。

2) 其它特性:

当操作频率为 18MHz 时, 除乘法和除法指令外, 高速 80C51CPU 的指令执行时间为 111~222ns。同一时钟频率下, 其速度为标准 80C51 器件的 6 倍。只需要较低的时钟频率即可达到同样的性能, 这样无疑降低了功耗和 EMI。

串行 Flash 在电路编程(ICP)可通过商用 EPROM 编程器实现简单的编程。Flash 保密位可防止程序被读出。

串行 Flash 在系统编程 (ISP) 可实现已固定在最终应用上的器件的编程。

Flash 程序存储器可实现在应用中编程 (IAP)。这允许在程序运行时改变代码。

看门狗定时器具有片内独立振荡器, 无需外接元件。看门狗定时器溢出时间有 8 种选择。

低电压复位 (掉电检测) 可在电源故障时使系统安全关闭。该功能也可配置为一个中断。

空闲和两种不同的掉电节电模式。提供从掉电模式中唤醒功能 (低电平中断输入唤醒)。典型的掉电电流为 $1\mu\text{A}$ (比较器关闭时的完全掉电状态)。

低电平复位。使用片内上电复位时不需要外接元件。复位计数器和复位干扰抑制电路可防止虚假和不完全的复位。另外还提供软件复位功能。

可配置的片内振荡器, 其频率可通过用户可编程 Flash 配置位进行选择。RC 振荡器选项支持的频率范围为 $20\text{kHz}\sim 18\text{MHz}$ 。

振荡器失效检测。看门狗定时器具有独立的片内振荡器, 因此它可用于振荡器的失效检测。

可编程 I/O 口输出模式: 准双向口, 开漏输出, 推挽和仅为输入功能。

端口“输入模式匹配”检测。当 P0 口管脚的值与一个可编程的模式匹配或者不匹配时, 可产生一个中断。

所有口线均有 20mA 的 LED 驱动能力。但整个芯片有一个最大值的限制。可控制口线输出斜率以降低 EMI, 输出最小跳变时间约为 10ns 。

当选择片内复位时, P89LPC938 只需连接电源和地。

4 个中断优先级。

8 个键盘中断输入, 另加 2 路外部中断输入。

施密特触发端口输入。

双数据指针 (DPTR)。

仿真支持。

其功能可用图 5.1.1 表示:

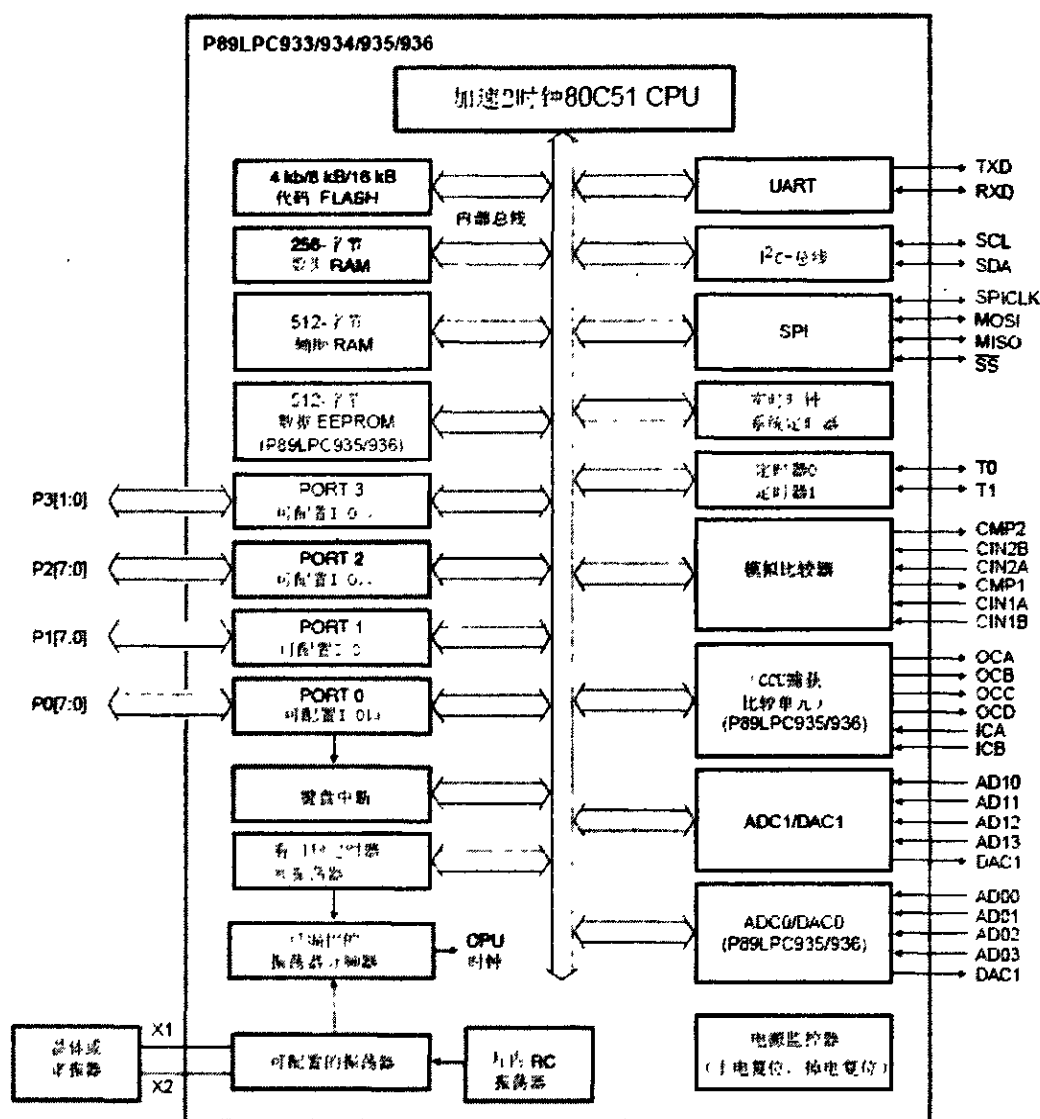


图 5.1.1 LPC93X 功能图

5.1.2 LPC93X 管脚配置

LPC93X 系列单片机是一个具有 28 引脚的单片封装的微控制器，其管脚配置如图 5.1.2 所示。

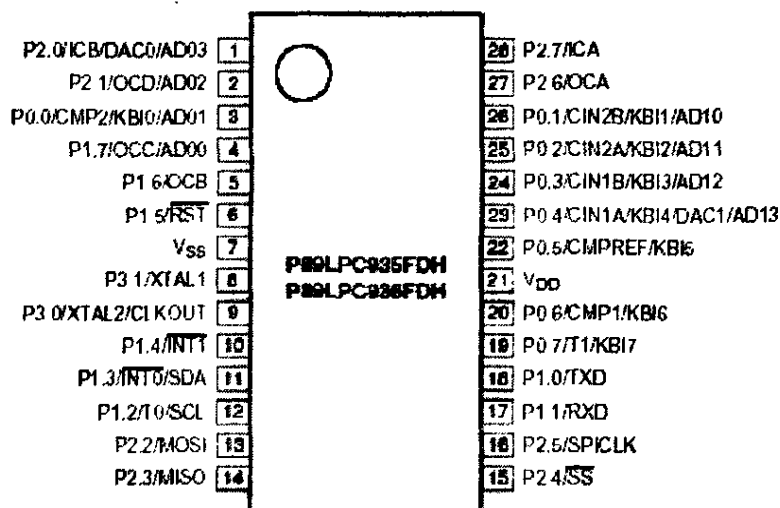


图 5.1.2 LPC93X 单片机的管脚配置图

该单片机还可以用逻辑符号来表示。其逻辑符号如图 5.1.3 所示。

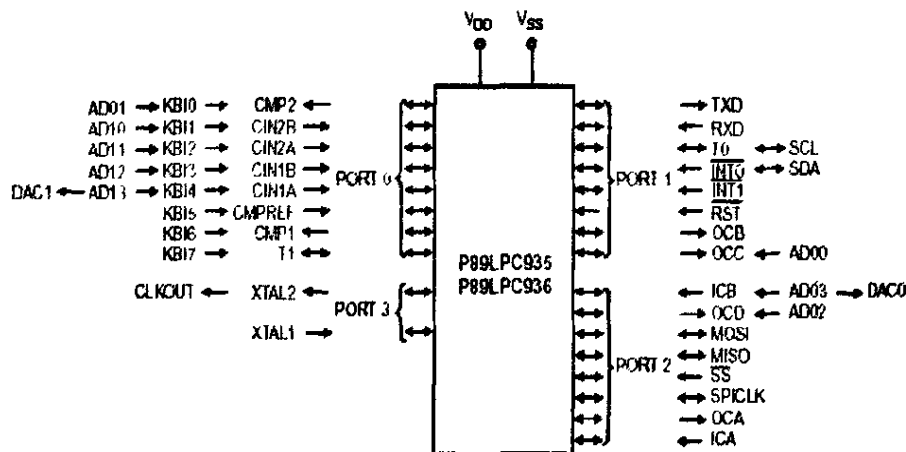


图 5.1.3 LPC93X 单片机的逻辑符号

5.2 单片机控制系统设计

5.2.1 系统原理图

单片机控制系统的原理图如图 5.2.1 所示，图中 5S、20S、30S、60S 分别是射击目标选择按键，根据不同的射击目标选择按键，当射击目标选中时，相应的发光二极管会提示。射击目标在发射键按下以前可以重新选择。解锁按键是用来防止误触发的，解锁按键按下时，相应的发光二极管会提示。每次射击前，必须首先按下解锁按键，否则，禁止发射。发射按键控制最终的发射，按下时，相应的发光二极管会点亮，如果发射不成功，用户可根据具体情况，自行处理。

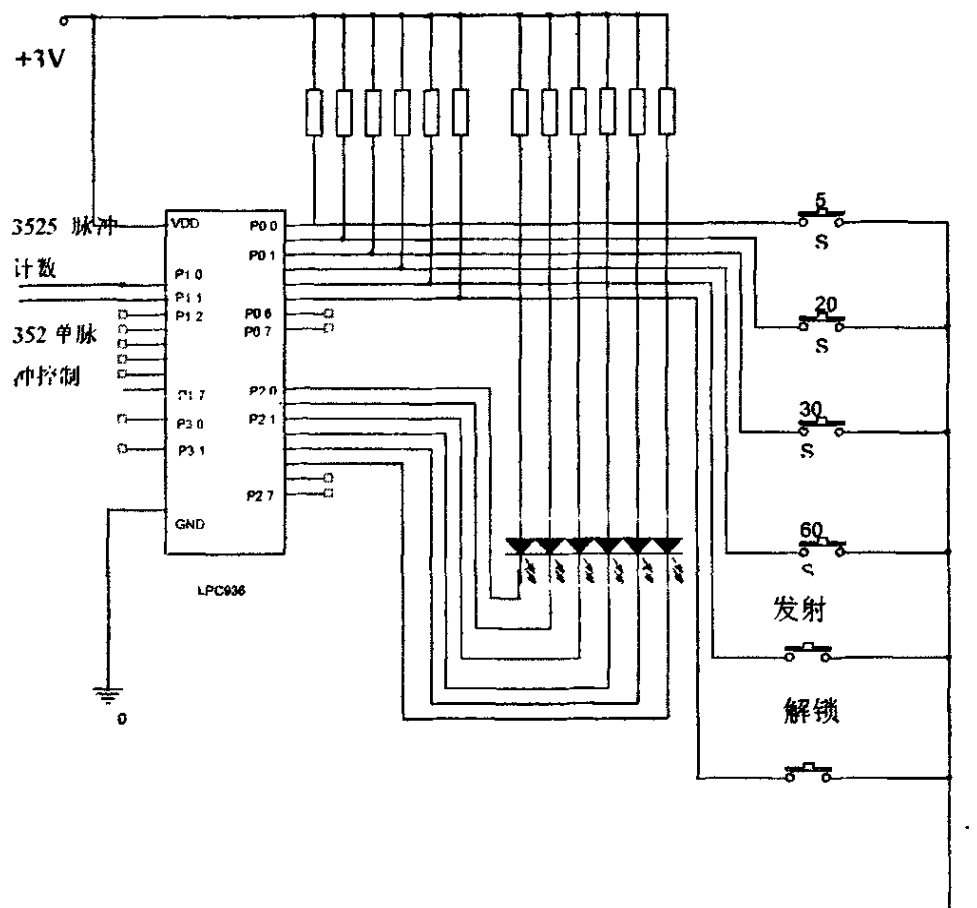


图 5.2.1 单片机控制系统电路图

5.2.2 流程图

根据电击枪的发射特点，本文给出了系统的总流程图，如图 5.2.3 所示

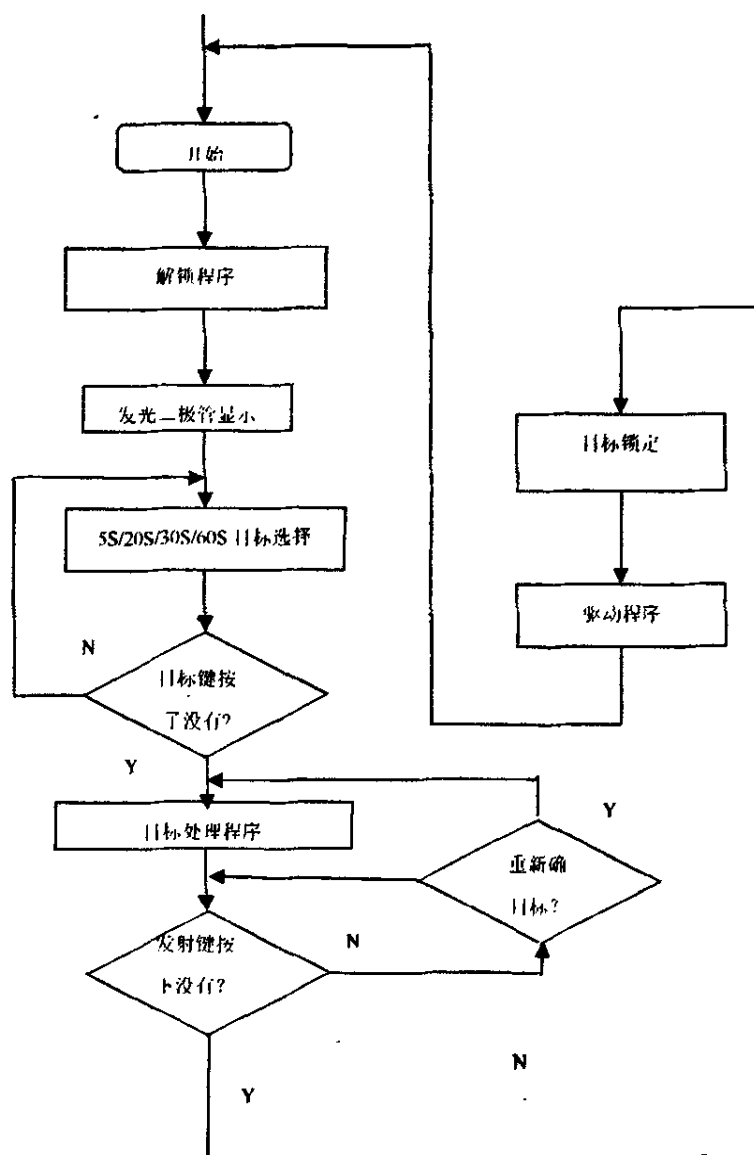


图 5.2.3 系统总流程图

5.3 工作原理

1) 解锁程序

解锁信号来自 P0.5 的低电平信号，为了消除解锁抖动，保证 CPU 对键的一次闭和仅作一次处理，本文采用软件处理。其基本程序流程如图 5.3.1 所示：

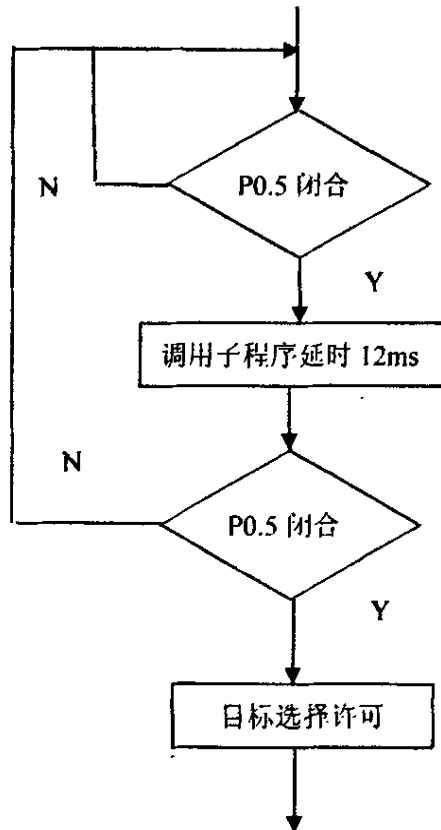


图 5.3.1 解锁程序流程图

2) 目标确认程序

P0.0/P0.1/P0.2/P0.3 分别对映 5S/20S/30S/60S 射击目标, 本机中设计射击目标确认是通过键盘中断功能产生, LPC936 有 3 个特殊功能寄存器用于该功能。

即键盘中断屏蔽寄存器 (KBMASK) 用于定义连接到 P0 口的使能触发中断的输入管脚。键盘模式寄存器 (KBPATN) 用于定义与 P0 口值相比较的模式。当键盘中断功能有效且条件匹配时, 键盘中断控制寄存器 (KBCON) 中的键盘中断标志 (KBIF) 置位。如果通过置位 IEN1 寄存器的 EKBI 位和 EA 位将中断使能, 则会产生一个中断。键盘中断控制寄存器 (KBCON) 中的 PATN_SEL 位用于比较时定义等于或不等于。必须设置 KBPATN=0FFH 和 PATN_SEL=0 (不相等), 这样由 KBMASK 寄存器使能的任何连接到 P0 口管脚按键都将使硬件置位 KBIF 并产生中断 (如果中断使能)。在本文所研究的系统中, 击发按键没有按下时, 随时可以更改击发目标, 其程序流程如图 5.3.2 所示。

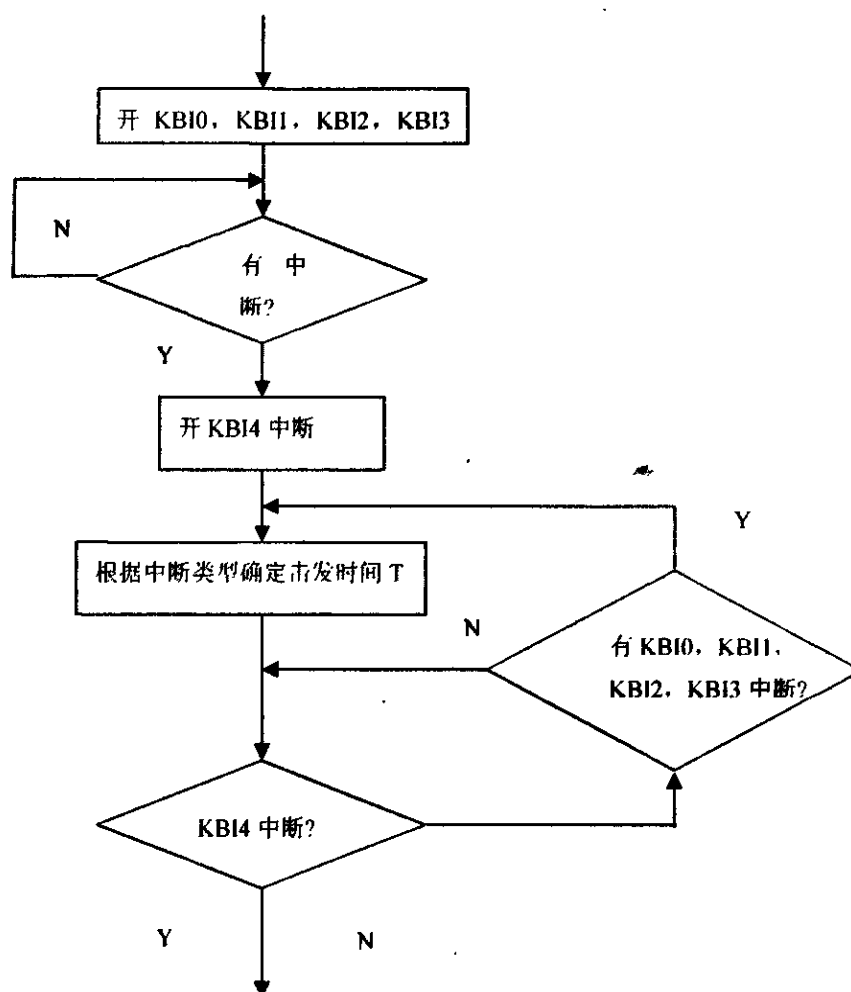


图 5.3.2 目标确认程序流程图

3) 驱动程序

驱动程序主要是计算 SG3525 时钟脉冲个数同时产生单脉冲信号, 其中 SG3525 时钟脉冲个数由 LPC936 引脚 P1.0 输入, 单脉冲控制信号由 LPC936 引脚 P1.1 输出, 经接口电路, 用于驱动 SG3525 的引脚 10。

其程序流程如图 5.3.3。

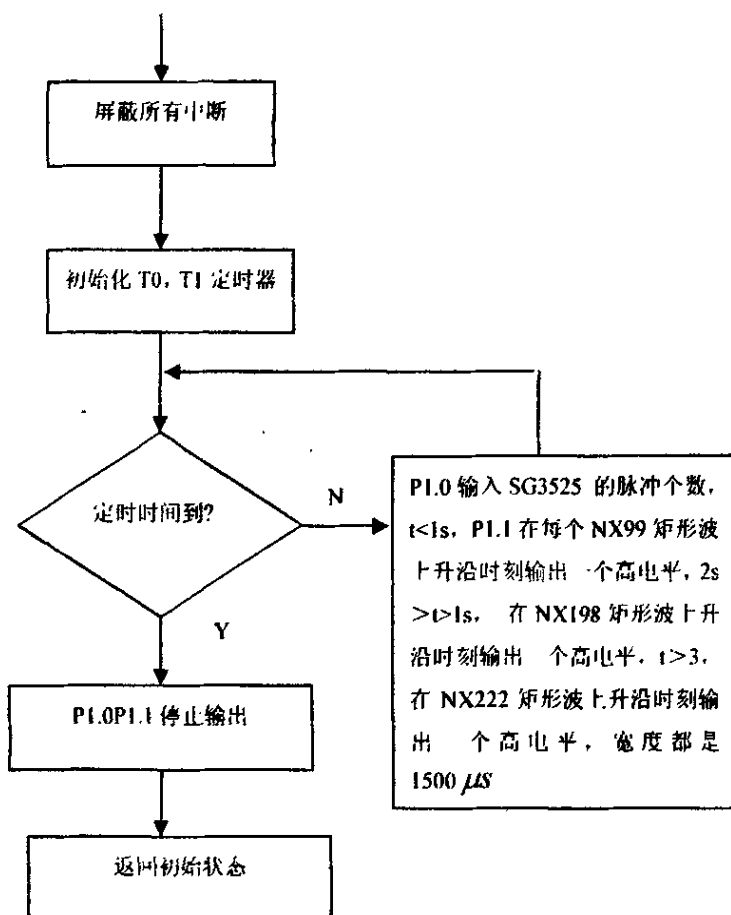


图 5.3.3 驱动程序

5.4 本章小结

本章主要工作如下:

- 1) 采用单片机控制电击枪的解锁、击发时间, 解锁程序可防止抖动引起的误触发, 提高了电击枪的可靠性。
- 2) 在单片机的控制下, 在电路的第 1S 内, 频率为 22HZ, 当电击时间超过 1S 时, 通过 P1.1 口的控制, 频率降为 11HZ, 当电击时间超过 3S 时, 频率降为 9HZ。
- 3) 根据不同的射击目标, 单片机将控制 SG3525 的输出时间长短, 可以限制电击时间, 防止电击时间过长造成的致命伤害。

6 试验及分析

高压脉冲电源样机设计完成以后，针对电击枪电源的技术参数和样机的实际效果，进行了相应的实验，实验分为三部分，即数据测试，电压波形测试，电击枪射击实验。

6.1 测试装置

本试验采用了 TDS3032B 型号的示波器来测试高压脉冲电源的电压输出波形，高压部分采用高压示波器测量。电击枪电源样机如图 6.1.1 所示，示波器如图 6.1.2 所示。

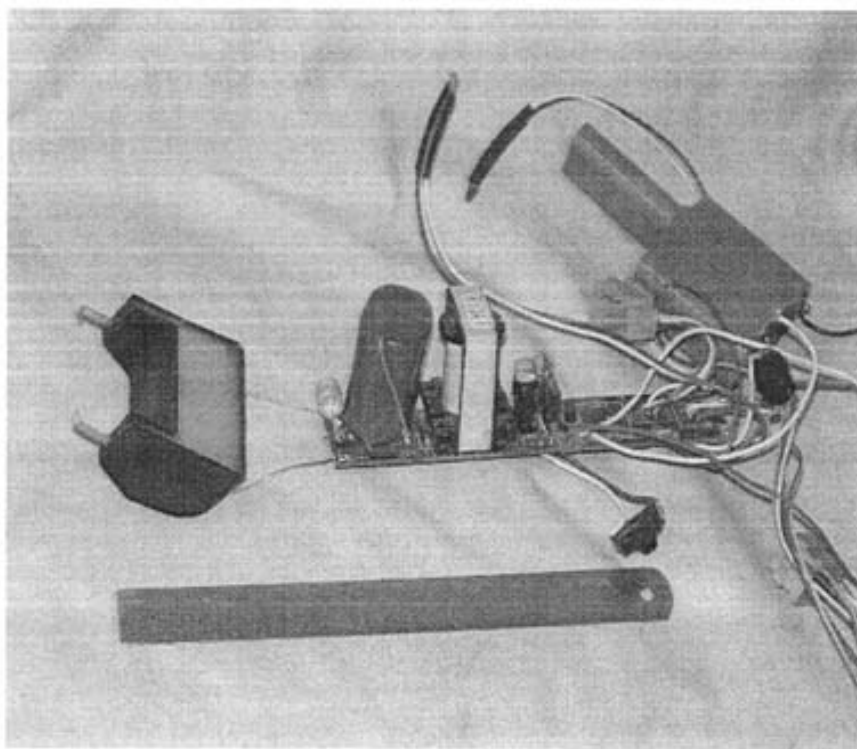


图 6.1.1 单片机控制电击枪高压脉冲电源

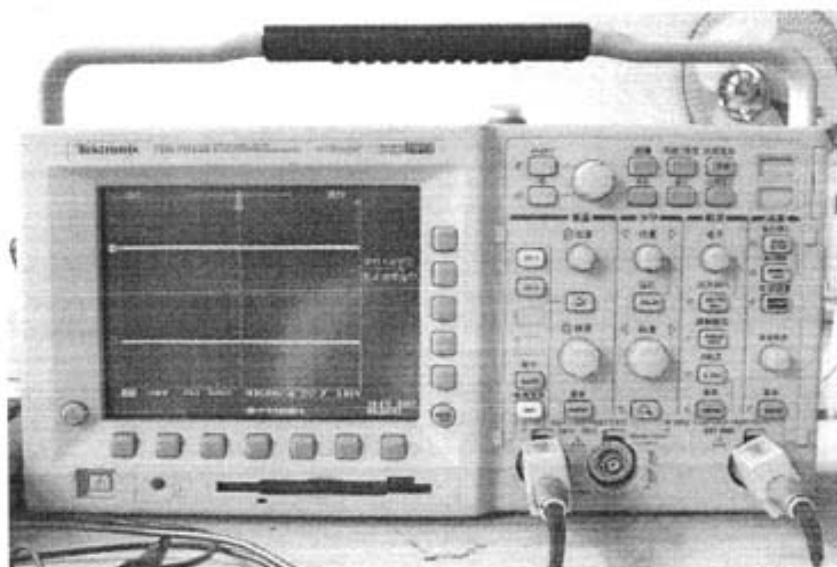


图 6.1.2 TDS3032B 型示波器

6.2 系统实验主要测试数据

在放电样机测试中，作者做了三个实验，即输入电压变化对高压放电的影响试验、驱动电源试验、输入电压绝缘特性试验。

1) 输入电压变化对高压放电的影响试验

输入电压变化对高压放电的影响试验的数据见表 6.2.1，试验表明，输入电压在 9-15V 范围内变化，高压放电头两端的电压变化下降在 14%以内，满足设计要求。对于锂电池供电系统来说，该项实验说明了系统具有较强输出稳定性。

表 6.2.1 输入电压变化对高压放电的影响试验

输入电压(V)	升压变压器两端电压(V)	放电头输出电压(V)
9	3470	156300
12	3964	181200
15	4413	185300

2) 驱动电源试验

驱动电源试验数据见表 6.2.2，其中+3V 输出端电压的电压变化约为 1%，+15V 输出电压变化为+0.4V。驱动电源试验表明，即使供电电源波动较大，电源模块工作稳定。

表 6.2.2 输入电源波动试验

输入电压(V)	+3V 输出电压(V)	+15V 输出电压(V)
9	3.03	+15.3
12	3.03	+15.3
15	3.04	+15.4

3) 绝缘特性试验

本机变压器输出电压达 4000V, 为了验证系统功能, 作者进行了相应的绝缘特性试验, 分为两部分, 即输入电源与输出间绝缘试验和外壳与输出间绝缘试验实验, 绝缘特性试验数据见表 6.2.3, 表 6.2.4。测试结果表明, 在高压放电段输入、输出不超过 50KV 时, +3V 端漏电流不超过 $9\mu\text{A}$, +15V 端漏电流不超过 $13\mu\text{A}$, 输入输出信号端漏电流不超过 $11\mu\text{A}$, 驱动变压器原副边漏电流 $10\mu\text{A}$, 说明电路采用变压器隔离和光电效果较好, 绝缘特性试验表明, 高压端电压变化对电路的控制系统影响较小。外壳与输出间绝缘试验同时也说明, 电击枪在使用时, 对持枪者本人是安全的。

表 6.2.3 输入电源与输出间绝缘试验

输出端电压(V)	+3V 端漏电流(μA)	+15V 端漏电流(μA)
20000	5.2	5.1
30000	8	7.3
50000	9	12.4

表 6.2.4 外壳与输出间绝缘试验

输入电压(V)	输入输出信号端漏电流(μA)	驱动变压器原副边漏电流(μA)
20000	3.4	4.0
30000	6.2	6.4
50000	10.5	9.6

6.3 放电样机的主要测试波形

波形测试是本样机的动态测试部分, 测试中作者分别用示波器对 2SK2956 功率 MOSFET、PWM 控制芯片 SG3525 和变压器以及放电头的输出波形作了测试。

1) 驱动电路输出波形

在进行驱动电路的输出波形测试时, 采用单脉冲方式触发, 宽度 1ms, PWM 控制芯片 SG3525 有两个互补输出, 在本机中, 由于电路的拓扑为单管驱动电路, 触发信号可取两个互补输出的任意一个, 本次驱动电路输出波形实验触发信号来自 PWM 控制芯片 SG3525 的引脚 14, 由试验波形图 6.3.1 可以看出, 功率管驱动电路上升沿最大为 150ns, 该实验测试了 2SK2956 的性能, 说明 2SK2956 的性能非常的优越, 同时也说明 PWM 控制芯片 SG3525 处于正常的工作状态。

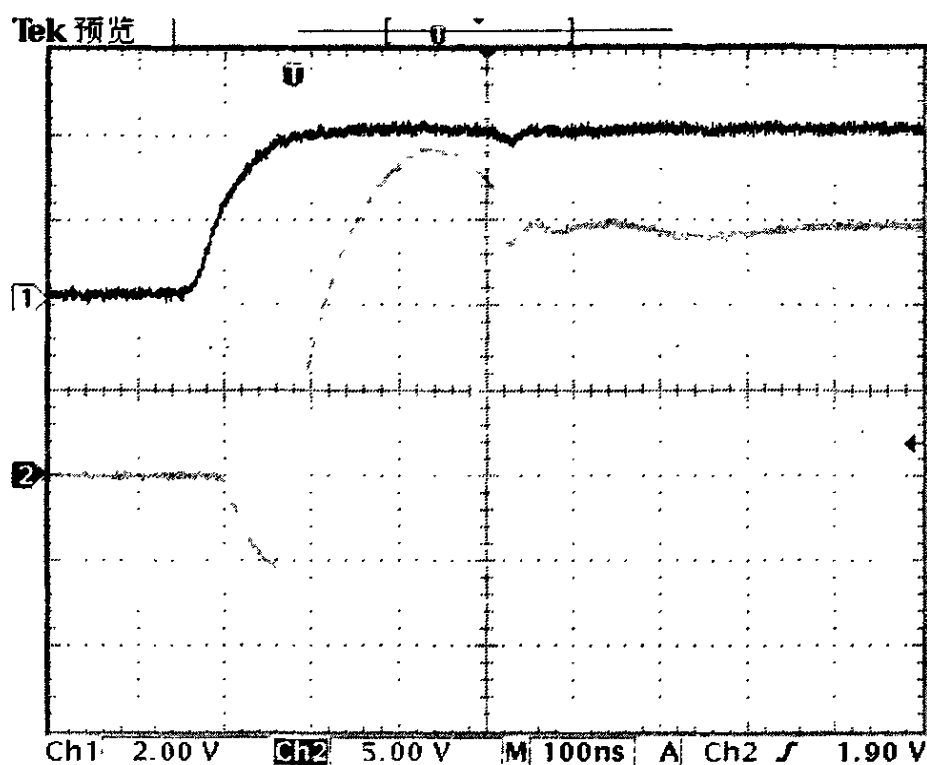


图 6.3.1 功率管触发信号与功率管驱动电压波形

2) 升压变压器输出波形

升压变压器输出波形的测试主要是测试控制电路本身的稳定性，以及变压器本身的性能。

在变压器设计时，其参数要求偏重输出脉冲波的畸变小，在设计时，没有考虑温升。在本文所研究的电路中，最大变压器持续工作时间不超过 1 分钟，所以变压器工作时发热并不明显。从图 6.3.3 可以看出升压变压器副边输出电压为 4012V，上升时间 1500ns，升压变压器的前沿较陡。从图 6.3.3 还可以看出，升压变压器输出的高压脉冲脉宽非常窄，仅为 527.5ns。由于电路满足谐振条件，变压器的输出波形出现了震荡。

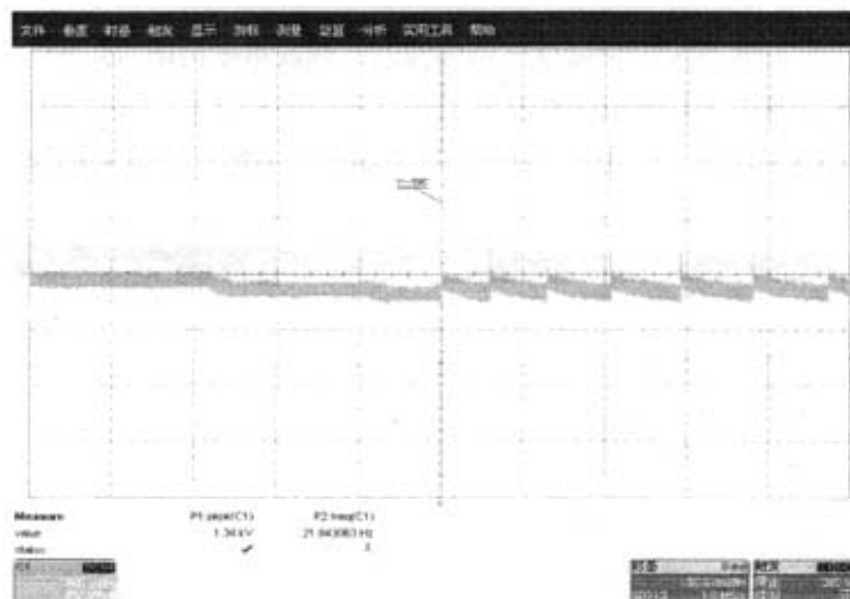
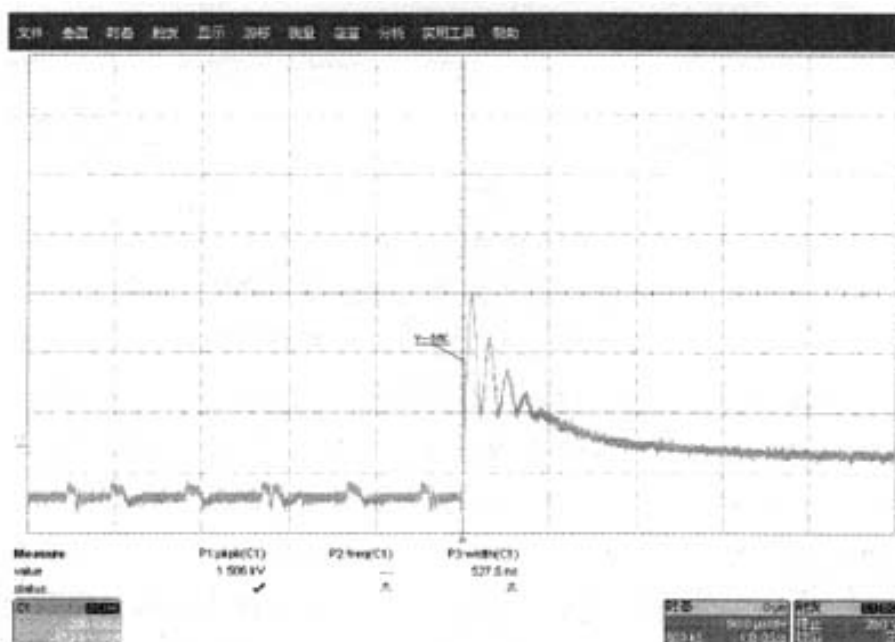


图 6.3.2 升压变压器输出波形



6.3.3 升压变压器输出电压波形

3) 高压放电试验波形

高压放电实验波形的测试，是为了验证系统的整体性能。

目前国内警用器材高压脉冲放电电源均采用自激型倍压整流电路，这种电路在负载突变时，容易产生磁饱和短路，导致功率管过载损坏。另一方面，倍压整流电路由于受到二极管以及电容耐压限制，输出电压通常小于 10kV，据国外试验研究，小于 30kV 的高压，不能使人或大型动物瞬间丧失活动能力。同时，倍压整流电路由于采用输出端高压电容储能，因此，存在残余电压放电，当前，大多数电警棍意外伤人事件都是出于这个原因。由于高压放电枪体积较小，因此，残余电压放电影

响更为严重。所以，国内警用器材高压脉冲放电电源采用的自激型倍压整流电路在体积、输出电压等级、可靠性以及安全性方面均不满足高压放电枪的要求。

本文中高压放电模块输出电压非常高（150-210kV），见图 6.3.4。

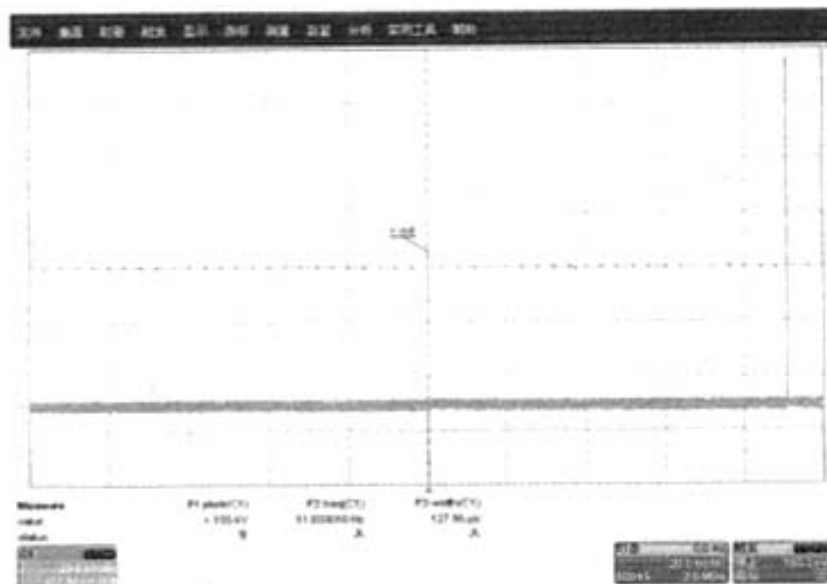


图 6.3.4 高压放电头输出电压波形

对于高压放电枪需要长时间连续可控的窄脉冲放电，传统的自激型倍压整流电路输出电压大小以及脉冲宽度不能控制，不能产生连续的窄脉冲放电。另一方面，自激型倍压整流电路在输出电极接触人体放电时，电压会迅速下降，通常正常输出 8kV 的警棍，接触人体放电时输出电压仅为 2kV 左右，同时放电脉宽变宽（输出能量维持不变），通常这种低压宽脉冲放电不能有效制止罪犯反抗，短时间内罪犯仍会激烈挣扎，而且存在电热灼伤等问题。根据医学研究，一般人若被点 38 手枪子弹射中非致命部位，平均还能维持十秒至五分钟的意识清醒与肌肉控制。也就是说罪犯即使中弹还有一些反击的时间与机会，但是一般人若被 30-50kV 高压电击中，会立即陷入意识昏迷与肌肉失控状态约三至十五分钟。所以连续的 30-50kV 高压窄脉冲电击，可以有效地瞬间使罪犯丧失活动能力，同时，不会对其产生永久性的致命性的伤害。

从高压放电试验波形还可以看出，在单片机控制下，高压放电模块放电频率 3 秒后频率降为 9Hz，见图 6.3.5，从而防止过度电击造成致命伤害。

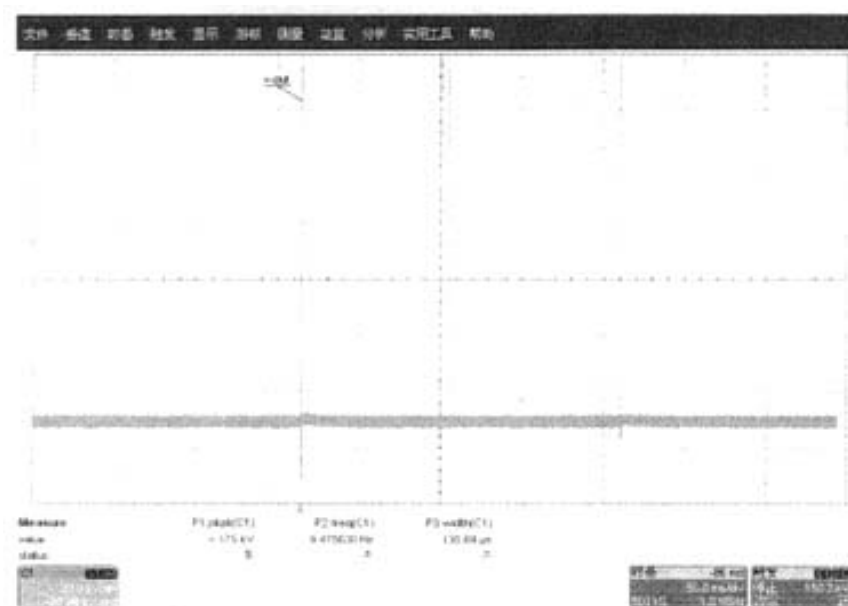


图 6.3.5 放电 3 秒钟后放电头输出电压波形

高压放电现场演示照片如图 6.3.6 所示，由于没有绝缘介质的作用，高压放电模块两个电极之间的空气被击穿，通过演示可以看到距离 3.5cm 的放电电极之间形成了明显的放电电弧，这说明电源样机的工作是正常的。

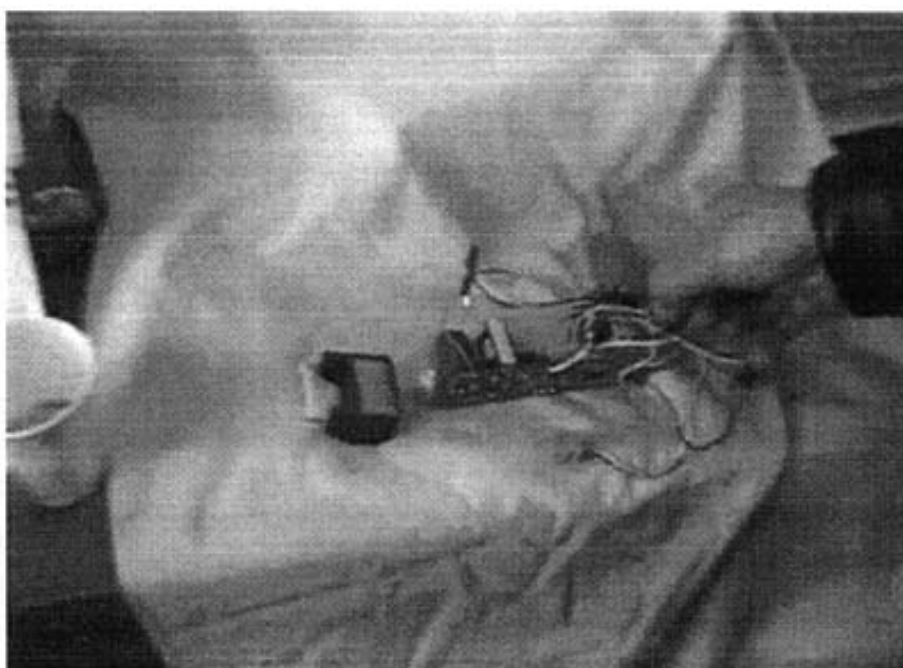
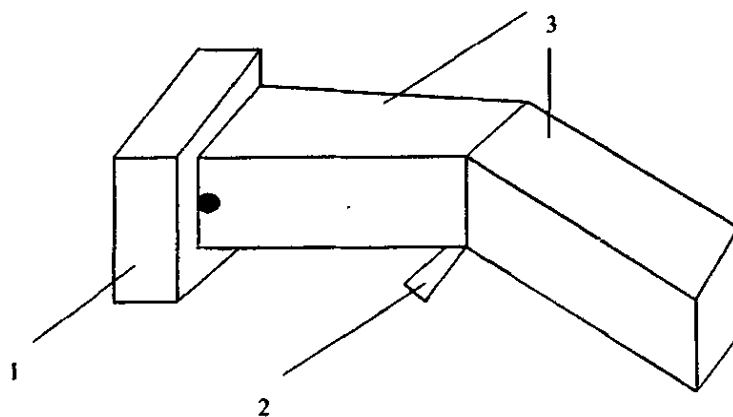


图 6.3.6 放电试验结果

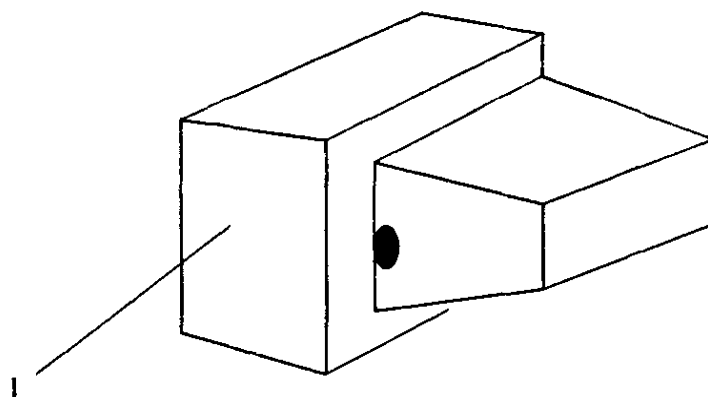
6.4 电击枪装置及演示

为了测试样机的实战性能，电源设计完成以后，本人进行了户外实验，在本次试验中，样机与枪相结合。在户外试验中，采用的电击枪外形结构如图 6.4.1 所示。

电击枪发射的弹丸形似飞镖，镖弹没有发射之前处于封闭状态。其外形如图 6.4.2 所示。



1 镖弹 2 发射键 3 枪身
图 6.4.1 电击枪枪体外形



1 镖弹
图 6.4.2 镖弹外形

试验开始后，当发射键按下时，在电击枪高压脉冲的作用下，火药被点燃，产生高压气体。镖弹在火药高压气体推动下，射向前方（见图 6.4.3）。户外试验达到了预期效果。



图 6.4.3 电击枪发射瞬间

6.5 本章小结

本章主要工作是对高压脉冲电源样机进行一系列的测试，主要包括：

- 1) 数据测试，主要是测试电源的工作稳定性；
- 2) 电压波形测试，主要是观测系统个各元件工作状态是否正常；
- 3) 电击枪射击实验，主要是观察电源的实际工作情况。

通过以上一系列的测试，证明高压脉冲电源样机设计是正确的。

7 总结与展望

7.1 总结

本研究设计了电击枪高压脉冲电源系统，并进行了相应的实验。通过实验，验证了高压脉冲电击枪电源系统的设计方法的正确性，取得了较满意的试验结果。

现将本文工作总结如下：

1) 研制了高压脉冲电击枪的电源样机装置，其主要设计方法是：

(1) 提出并采用了触发电路和单片机控制解锁电路相结合，提高了控制可靠性，同时也可以限制持续电击时间，防止电击时间过长造成的致命伤害，可以准确控制输出高电压的脉冲宽度和频率；

(2) 提出并采用双管并联电路提供低驱动阻抗，有效提高了电源的输出功率；

(3) 采用光电隔离和变压器隔离抑制了在高压变化时易引起功率管误导通。

2) 通过对样机进行的系列实验，证实本样机的研制是成功的。

7.2 展望

当前，国外警用器材的发展迅速，随着民事责任的增加和疗伤费用的上升，导致了对安全而有效的非致命(LTL)武器的广泛需求，这使得开发非致命武器势在必行。我国国内，随着我国的国际和国内的交流更趋频繁，国内警用器材的发展也很迅速。在不久的将来，一些新技术的应用不仅会拯救一些警察的生命，而且可能会在某些场合减少对军队的需求。

致 谢

本论文的完成首先应该感谢陶钢研究员的精心指导，他严谨的治学态度、深厚的学术理论功底、勤恳的工作作风以及孜孜不倦的育人作风，使作者受益非浅。这不仅使得我能顺利地完成毕业论文的撰写，更对我在今后的学习、生活中产生积极而深远的影响。在此对陶钢研究员两年多来的悉心指导表示衷心感谢。

崔艳丽高级工程师在作者试验方面给予了极大的指导，同时提供了良好、完善的试验条件和试验设施。这使得作者的论文有充实的工程背景和丰富的试验素材。

在本文完成的过程中得到了南京理工大学瞬态物理国家重点实验室顾金良教授的大力支持和热情帮助，在此向他表示衷心地感谢。

在整个研究生的学习生活阶段，衷心感谢 806 教研室全体教师和同学给予我的关心和帮助。

参考文献

- 1 谢矿生, 闫博. 非致命武器与警用器材的潜在价值. 武警工程学院学报. 2005(4): 5-10
- 2 薛国安, 王海. 世界新军事变革热点问题解答. 北京: 解放军出版社, 2004
- 3 应运温. 国外警用器材发展状况及趋势分析. 警察技术. 2004(5)
- 4 胡艳军. 全力出新: 泰瑟 X-26 电击枪. 轻兵器. 2003(12): 7-8
- 5 李胜, 刘斌胜. 关于非杀伤性武器和警用器材概念的探讨. 国防科技. 2005(11): 69
- 6 邱关源. 电路. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2002
- 7 贝冠祺. 小功率电源变压器实用设计制作和修理. 第一版. 北京: 人民邮电出版社, 1985
- 8 长谷川彰. 开关式稳压器的设计技术. 第一版. 北京: 科学出版社
- 9 王瑞祺. 稳压电源设计. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1983
- 10 叶慧贞, 杨兴洲. 开关稳压电源. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1990
- 11 吴守篇, 减英生. 电气传动的脉宽调制技术. 第一版. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 12 李峻开. 关集成稳定器的原理及应用. 北京: 人民交通出版社, 1999
- 13 赵效敏. 开关电源的设计与应用. 上海: 上海科学普及出版社, 1995
- 14 阮新波, 严仰光. 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术. 北京: 科学出版社, 1999
- 15 程伟, 李定宣. 开关电源保护电路. 电源技术应用, 2003
- 16 张承志. 不间断供电系统. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 17 孙涵芳. Intel 16 位单片机. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001
- 18 李胜利等. 中频高压变压器动态过程分析及设计结构. 高电压技术. 2001(6): 27-30
- 19 何永辉. 高效节能式电火花脉冲电源的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论. 1995
- 20 于学文. 浅谈电火花线切割精加工电源. 电加工. 1998(3): 29
- 21 张为佐, 白继彬. 电力电子技术发展的新动向. 电力电子技术. 1996(4): 1-5
- 22 汪东艳, 张林昌. 电力电子装置电磁兼容性的研究进展. 电工技术学报. 2000(1): 47-51
- 23 戴育航, 钱照明. IGBT 脉冲电源系统的设计与研究. 电力电子技术. 1998(4): 67-71
- 24 黄健, 高海生. PWM 闭环控制的开关电源系统模型研究. 电子技术应用. 2003(11):

29

- 25 冯宇丽, 戴珂, 曹震, 康勇. 基于SG3525控制的双管正激变换器. 电源技术及应用, 2007 (1) 23-25
- 26 李胜利, 向浩, 李劲. 试验用 ns 级脉冲高压电源的研制. 高电压技术. 2000 (3): 14-15
- 27 李胜利. 中频高压变压器动态过程分析及设计结构. 高电压技术. 2001(6): 28-30
- 28 李希茜. 高频变压器的设计. 现代电子技术. 2001 (9): 26-27
- 29 蒋怀刚, 李乔, 何志伟. IGBT 模块驱动及保护技术. 电源技术应用. 2003(6): 8
- 30 赵正军. 大功率变频可调电源的设计与实现. 电子工程师. 2001(9): 46
- 31 朱莉, 赵莉华, 黄念慈. 开关电源中高频变压器工作模式的研究. 电工技术. 2001(6): 11-12
- 32 Hassallq Smith, P W High. Repetition rate generator for pulsed capacitively coupled discharges. IEE1994
- 33 沙占友, 葛家怡, 武瑞红. 单片开关电源高频变压器的设计要点. 电源技术应用. 2003(6): 7-8
- 34 李春旭, 张学红, 李芳. 高频变压器漏抗对 IGBT 逆变电源工作状态的影响. 电焊机. 2004(1): 10-11
- 35 Shengpei Wet al. DSP-based PDM and PWM type voltage-fed load-resonant inverter with high-voltage transformer for silent discharge ozonizer. IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. 1998(1): 159-164
- 36 Koudriavtsev O. Advanced development of voltage silent discharge tube loads. The Third International Power Electronics. 2000(1): 302-307
- 37 Kamase Yetal. Pulsed high voltage source for ozone generator. IEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1991(1): 693-697
- 38 张琳, 汪建华, 秦道东, 向东. 基于 SG3525 控制的脉冲式微波电源的研究. 仪表技术. 2006(5)
- 39 王军, 丁传东. 用低压 MOS 管设计高压开关电源的实现方法. 西华大学学报(自然科学版). 2006(6)
- 40 张国顺, 孙攀峰. SG3525PWM 控制器在 YAG 激光电源中应用. 电子测量技术. 2004(3)
- 41 倪海东, 蒋玉萍. 高频开关电源集成控制器. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 42 戴晓明, 李振国. 新型高压开关电源的研制. 原子能科学. 2004(2): 17-20.
- 43 魏海明, 扬兴瑶. 实用电子电路500例. 北京: 化学工业出版社, 2004.

- 44 沙占友等编. 特种集成电源最新应用技术. 北京: 人民邮电出版社, 2000.
- 45 杨华. 智能电子测试系统应用研究. 中南大学学报. 2004(3): 23-26.
- 46 闫玉德, 俞虹. MCS-51 单片机原理与应用. 第一版. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 47 张毅刚. 单片机原理与应用. 第一版. 北京: 高等教育出版社, 2003
- 48 邹锦. 一例电击枪“杀伤力”的司法鉴定. 司法鉴定. 2005(2): 52
- 49 孙小进, 魏兵, 胡建华. 电击伴泥沙吸入致死亡 1 例. 法医学杂志. 2007(2)
- 50 王建华. 电流对人体伤害的基本常识. 农业机械化与电气化. 2007(2)
- 51 胥飞, 韩强. 脉冲电场对细胞杀伤效果及其原理的研究. 电工电能新技术. 2007(2)
- 52 卢振. 抢救电击伤并溺水致心跳呼吸停止的体会. 中国中西医结合急救杂志. 1999(4)

电击枪高压脉冲电源的研制

作者: [杨启祥](#)
学位授予单位: [南京理工大学](#)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1154418.aspx

授权使用: 长沙威盛电子有限公司(cswsdzyxgs), 授权号: df9e6640-cfd4-4e78-b722-9da000b796e5, 下载时间: 2010年6月25日