

# 基于现代电力电子技术的特斯拉高压演示仪

郭鹏伟 李志坚 王浩 韩冠恒

(中北大学 朔州 036000)

**摘要:**特斯拉线圈是一种在教育、科研等领域广泛应用的高压演示仪。为使特斯拉线圈可以更加安全、高效的应用于现代科研和教育活动中,研究给出了一种基于现代电力电子技术对传统特斯拉线圈改良的方案。在遵循其基本科学原理的基础上,对传统特斯拉线圈的火花间隙、高压直流电源进行了取代,对其控制回路进行了闭环设计,增加了逻辑处理、中断控制、功率逆变3大主要电路。经过对电路原理的仿真分析和实际测试,结果表明,本方案对传统特斯拉线圈噪音大、寿命短、效率低等缺点起到了显著的改善效果,在线圈的安全性、可靠性等方面皆有较大的提升,实现了预期改进目标。

**关键词:**特斯拉线圈; LC 振荡; 高电压; 电力电子技术

**中图分类号:** TN710    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Tesla high-voltage demonstration instrument based on modern power electronic technology

Guo Pengwei Li Zhijian Wang Hao Han Guanheng

(North University of China, Shuozhou 036000, China)

**Abstract:** Tesla coil is a kind of high-voltage demonstration instrument widely used in education, scientific research and other fields. In order to improve its security and efficiency, an improved edition of the traditional Tesla coil is given based on modern power electronic technology. Apart from its basic scientific principles being reserved, the spark gap and high voltage DC power supply are replaced, its control loop is closely designed and three main circuits of logic processing, interrupt control, power inverter are added. Simulation and testing of the new edition proves that the proposed scheme can greatly lower the noise, lengthen the life and improves the efficiency compared with the traditional one. Added with the improvement in security and reliability, the expected results are achieved.

**Keywords:** Tesla coil; LC oscillation; high-voltage; power electronic technology

### 0 引言

传统的特斯拉线圈是在1891年由美籍塞尔维亚裔科学家尼古拉·特斯拉发明<sup>[1]</sup>,该种线圈为火花间隙特斯拉线圈。特斯拉线圈一直到今天都被广泛应用于高压试验、闪电形成机理探究、脉冲功率技术、无线电能传输<sup>[2]</sup>等科研生产领域。在电力电子技术发达的今天,火花间隙特斯拉线圈基本原理值得借鉴,但落后的电路结构设计已不适用。基于此,国外曾经出现利用电子真空管代替火花间隙的特斯拉线圈,电子管本身有造价高、寿命低、效率低、发热严重以及极易损坏等缺点,其他一些改良方案也有不同程度的缺陷。本文给出了全新的改进思路及设计方案。

### 1 传统特斯拉线圈简介

#### 1.1 火花间隙特斯拉线圈工作原理

火花间隙特斯拉线圈主要由高压直流电源、主电容、初级电感线圈、火花间隙、次级电感线圈、放电顶端组成,整体结构如图1所示。其工作原理:直流高压电源为主电容充电,当主电容两端电压上升到火花间隙的击穿电压时,隙间空气被电离形成导电通路,主电容中储存的能量通过火花间隙释放。短暂释放后主电容两端电压降低,不足以使电离通路维持,火花间隙停止打火,高压直流电源又开始为主电容充电。如此周而复始,便形成了初级LC回路振荡,初级电感线圈激发出高频的交变磁场。次级电感线圈以一定的耦合度存在于此磁场中,与放电顶端对地形成的等效电容形成次级LC回路,经手动调整后振荡频

收稿日期:2017-02

率与初级 LC 回路保持一致。大地中电荷大量积聚到放电顶端,形成高达几十万伏的电压,击穿空气放电,电弧长度(单位:cm)为  $4.318 \times \sqrt{P}$  (单位:W)<sup>[3]</sup>。

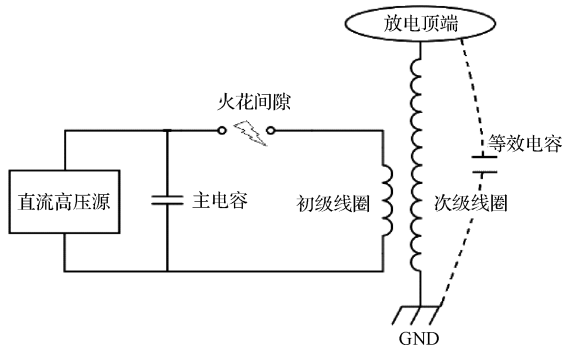


图1 火花间隙特斯拉线圈结构

### 1.2 火花间隙特斯拉线圈主要缺点

传统的火花间隙特斯拉线圈虽然结构简单,成本低廉,但其毕竟发明于半导体技术尚未诞生的19世纪末,落后的电路结构暴露出了诸多的缺点:

- 1) 噪音大,寿命短。火花间隙工作时噪音极大,且金属触点在有限次工作后会烧蚀损坏,寿命很短。
- 2) 直流电源要求很高的电压,增加了电路的绝缘要求,降低了安全可靠。直流高压的获取,本身也很困难。
- 3) 系统处于开环,可调节性差。次级 LC 回路的振荡频率需要手动调节才能和初级 LC 回路保持一致,达到同频谐振。这一过程繁琐且效果不理想。

## 2 针对传统特斯拉线圈的改进思路

### 2.1 火花间隙的取代

分析火花间隙在特斯拉线圈中的作用可知,其与直流高压电源整体可看作一个振荡激励源,产生的振荡能量输入到初级 LC 回路中。火花间隙的取代可通过运用电子电路产生逆变控制信号,控制功率电路工作使其成为一个方波振荡激励源,即可产生与火花间隙相同的效果。

### 2.2 电源的安全获取

在火花间隙特斯拉线圈中,高压直流电源的获取是很困难的,通常要求电压达到 2 kV 以上<sup>[4]</sup>。常用的方法有专用高压变压器、多倍压整流等,无论哪种方法,对原件参数要求高、安全性差。改进后的方案由于取代了火花间隙,不需要直流高压供电,市电经整流滤波后即可作为线圈的供电电源。

### 2.3 闭环系统设计

火花间隙特斯拉线圈在工作过程中处于开环状态,初次级 LC 回路的振荡频率需要手动调整才能达到一致,且不借助专业仪器的情况下效果很不理想。改进后将次级 LC 回路的振荡信号采样后返回控制电路,控制电路控制功率电路产生与次级 LC 回路同频的激励能量,且激励频率实时与 LC 回路振荡频率相同,实现了闭环控制。经

以上改进后的系统整体结构如图 2 所示。

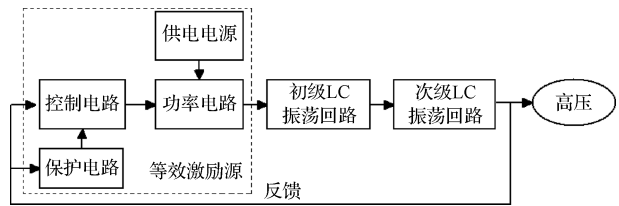


图2 改进后系统整体结构

## 3 电路设计方案

### 3.1 逻辑处理电路

对反馈信号的逻辑处理如图 3 所示。反馈信号来自次级电感线圈,通过电流互感器取样获得。取样信号经 R1 衰减、C1 耦合后,由 2 个开关二极管 D1、D2 钳位,使其保持在电源电压 VCC 以下,防止对逻辑门造成损坏。信号向后经过一级非门(U1A)整形,再经过一级非门(U1B)得到与反馈信号同相的信号。这个信号一路进入一级与门(U2A),另一路经过一个非门(U1C)进入另一级与门(U2B),以保证 2 个与门得到的信号互为反相。2 个与门的另一个输入端接中断控制信号。这样,由反馈信号就得到 2 路互补的驱动信号输出(信号 A、信号 B)。

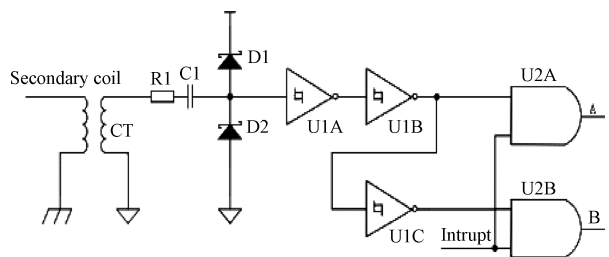


图3 逻辑处理电路原理

### 3.2 中断控制电路

分析初级 LC 谐振回路,可知其工作时处于串联谐振状态,初级 LC 回路的复阻抗接近于 0,如果不加以限制,经过几个振荡周期后,谐振电流会上升到无限大,直至超出原件参数极限。因此,逻辑处理中必须加入中断控制信号,在合适的时间点关闭驱动信号的输出,即关闭图 3 中的 2 个与门(U2A、U2B),此时初级 LC 回路停止工作,待中断信号跳变后又恢复工作,实现特斯拉线圈的正常工作<sup>[5]</sup>。

NE555 是一款使用广泛的时基发生器(Timer IC),只需简单的电阻器、电容器即可完成特定的振荡延时作用<sup>[6]</sup>。中断控制由 NE555 配合外围电路实现,应用电路如图 4 所示。NE555 构成一个直接反馈型多谐振荡器。C3 为定时电容,R1、R2 与 R1、R3 通过 D3、D4 构成 2 条充放电回路,3 脚通过这 2 条回路对定时电容充放电,调整可变电阻 R2、R3 的值,即可改变充放电的时间,从而得到脉宽、频率可调的矩形脉冲,此脉冲即可作为中断控制信

号与逻辑处理电路融合。融合后的驱动信号输出波形如图5所示,波形密集处为工作状态,波形空白处为中断间歇状态。

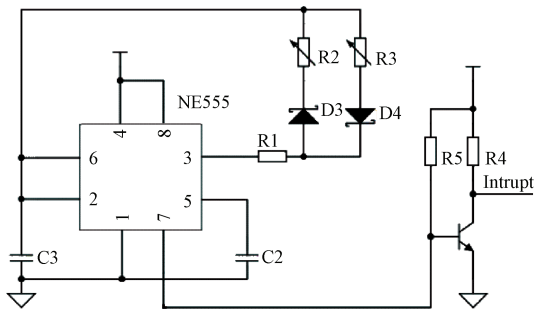


图4 中断控制电路原理

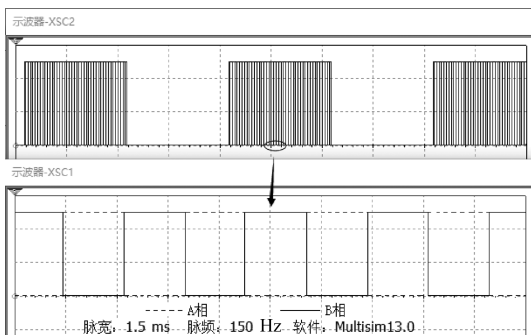


图5 逻辑处理电路输出波形

### 3.3 功率逆变电路

直接由逻辑门输出的驱动信号(A、B)不足以驱动功率逆变电路,需要对其进行功率放大以保证对功率逆变电路的可靠控制。TC4426是一款双高速功率MOSFET驱动器,1.5A高峰值输出电流,具有很强的容性负载驱动能力(25ns内1000pF)。驱动信号A、B经2片TC4426放大后进入门驱动变压器(Gate drive transform),输出4路与A、B相位相同的隔离驱动信号,接入功率逆变电路。其应用如图6所示。

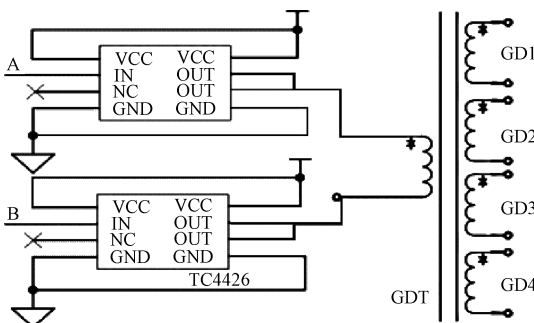


图6 功率放大电路原理

全桥拓扑是电力电子技术中广泛采用的一种变换结构,在电源技术、变频技术、电机驱动等领域中都发挥着重大的作用。全桥式拓扑在本设计中的应用如图7所示。

市电经整流、滤波后作为逆变桥主电源。特斯拉线圈运作时处在高频、高压和大电流的恶劣电气环境下,需要开关管具有很高的开关频率且耐压高、损耗低等特性<sup>[7]</sup>。综合考虑后功率元件选用电气性能优异的IGBT,其兼具了MOSFET的高输入阻抗和GTR的低导通压降。C1~C7作为IGBT器件吸收和母线吸收电容<sup>[8]</sup>,用于吸收电路中由寄生参数引起的尖峰浪涌,保护电路安全工作。逆变全桥的输出接入初级LC回路,激发LC回路的振荡,对比图1可知目前为止的设计已取代火花间隙及直流高压源构成的振荡激励源,改进思路也逐一得以实现。

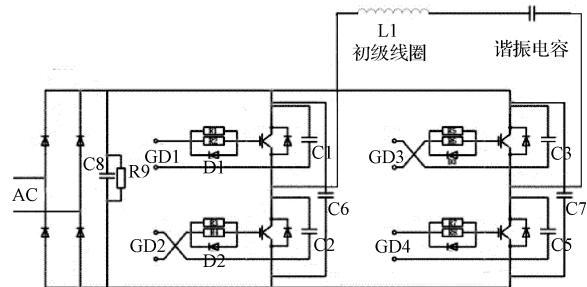


图7 功率逆变电路原理图

## 4 电路验证及效果观测

以设计思路为指导,制作实物一台进行实际的电路验证及效果观测。次级线圈采用0.13mm聚酯漆包线单层密绕,匝数N的选取较为关键,其决定了线圈的品质因数Q值,Q值又决定了电弧生成长度。经试验得出N=1500时Q达到最大值,此时如果再增加匝数,Q值表现为略微下降<sup>[9]</sup>。由单相调压器低压上电,逐渐改变中断控制器的脉宽(On time)和频率(BPS),来实现对线圈单次放电的能量和放电频次的控制。实物及演示效果如图8所示。

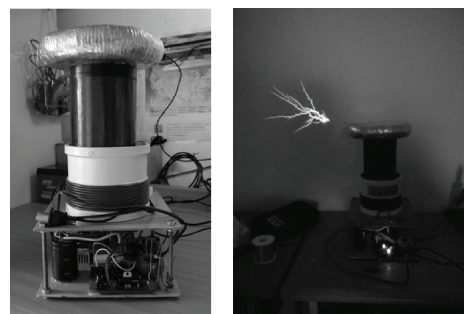


图8 实物及演示效果

## 5 结论

特斯拉线圈作为一种成本低廉、应用广泛的高压试验仪器,高频化、紧凑化、智能化是其必然的发展趋势。同时,可编程器件和微处理器的发展使特斯拉线圈智能化的实现成为可能,无线输电技术也将得到越来越广泛的应

用,已有研究者可将 60 W 的电能以 40% 的效率传输 2 m 以上距离<sup>[10]</sup>。特斯拉线圈未来仍是一个良好的科研载体。

#### 参考文献

- [1] 王毅伟,郭颖. 基于特斯拉线圈的无线充电模型设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(9):34-36.
- [2] 孙文军,芮国胜,张嵩,等. 基于自激振荡系统的混沌稳健检测模型[J]. 仪器仪表学报,2015,36(12):2657-2665.
- [3] 程胜利. 区域性办公环境的无线电力应用[J]. 科技信息,2012(19):93-94.
- [4] 牟春阳,李世中,梁国强. 基于特斯拉线圈的无线电力传输系统[J]. 科学技术与工程,2015,15(13):77-81.
- [5] 黄文婷,郑婧,黄海,等. 电力变压器振动信号分离方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(1):111-117.
- [6] 韩焱. 数字电子技术基础[M]. 第2版. 北京:电子工业出版社,2014:201.
- [7] 熊洋志. 基于特斯拉线圈的高压发生器技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [8] 刘维罡,董慧芬. 串联谐振逆变器在无接触电能传输技术中的研究与应用[J]. 国外电子测量技术,2004,23(5):29-32.
- [9] 冯帆,王国东,舒明辉. 小功率无线电能传输系统谐振线圈设计优化[J]. 电子测量技术,2017,40(1):12-16.
- [10] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science,2007,317(5834).

#### 作者简介

郭鹏伟,1994 年出生,大学本科。主要研究方向为逆变电源、高压设备、嵌入式系统等。  
E-mail: guopengwei.chat@qq.com