

# 基于 STM32 的大功率超声间歇式控制信号

周 翔<sup>1</sup>, 沈建国<sup>2</sup>, 陈丽华<sup>1</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学药物科学与技术学院, 天津 300072)

**摘要:** 在石油开发过程中, 大功率超声能够有效地对堵塞的渗透层进行解堵, 提高地层的渗透性, 增加注水井的注水能力或采油井的产液量, 提高原油产量。系统以 STM32 单片机为核心, 产生大功率超声需要的两路间歇式控制信号。这两路信号的相位差为  $180^\circ$ , “死区时间”均为  $3\mu\text{s}$ , 控制大功率超声电源中的 IGBT 驱动电路。将该控制电路接入大功率超声系统后, 大功率超声系统能正常工作, 设备运行稳定, 能基本满足工业应用的要求。

**关键词:** STM32 单片机; 压电换能器; 石油开发; 间歇式; 大功率超声

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-05-0395-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.05.008

## STM32 based intermittent control signals for high-power ultrasound

ZHOU Xiang<sup>1</sup>, SHEN Jian-guo<sup>2</sup>, CHEN Li-hua<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Pharmaceutical Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In oil extraction process, high-power ultrasound can effectively unblock permeable bed, improve stratum's permeability, increase the injection rate of water-injection well or the liquid yield of oil well, and therefore raise the production of petroleum. In this oil extraction system, the STM32 single-chip is taken as the core device to generate two intermittent control signals for the operation of a high-power ultrasonic source. These two signals, of which the phase difference is  $180^\circ$  and the dead time is  $3\mu\text{s}$ , control the IGBT driving circuit in high-power ultrasonic source. It is shown that by connecting the control circuit to this high-power ultrasonic source, the whole system works well, and so the system can basically satisfy the demand of industrial application.

**Key words:** STM32 single chip; piezoelectric transducer; oil development; intermittent-type; high-power ultrasonic

## 0 引言

大功率超声波采油是一项实用的采油作业措施。通过特种电缆给位于井下的压电换能器两端加一个频率为  $20\sim 25\text{kHz}$  的间歇式高电压, 该电压是由调节绝缘栅双极性晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)驱动信号的频率, 目的是使其与压电换能器的谐振频率一致, 激发探头产生高频振动作用于油层<sup>[1]</sup>。在此过程中, 超声波作用于孔隙地层, 巨大的超声波能量可降低地层中的原油粘度, 改善流体渗透特性, 提高原油流速, 增加地层的渗透率, 有效缓解地层堵塞, 达到提高油井采收率的目的<sup>[2-4]</sup>。本文主要研究由 STM32 单片机产生与压电换能器谐振频率一致的间歇式高频驱动信号。

间歇式发射超声波能够增加超声波的振动冲击力, 使地层中产生更多的空化气泡、对堵塞渗透性地层孔隙孔道的颗粒能够产生更大的冲击力, 最终能够增加油层的解堵效果<sup>[5]</sup>。间歇式控制信号如图 1 所示。间歇式长脉冲由一系列子脉冲(Sub-pulse)组成<sup>[6]</sup>, 每个子脉冲的宽度为  $1/f$ , 其中  $f$  为 STM32 单片机产生的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号频率。 $t_1$  时间段包含了一系列的子脉冲, 是驱动信号的有效工作区。 $t_2$  时间段的驱动信号为低电平, 对压电换能器不产生作用。 $T=t_1+t_2$ , 为一个驱动周期, 本文根据超声波解堵的需要设定  $T=1\text{s}$ ,  $t_1=0.5\text{s}$ ,  $t_2=0.5\text{s}$ 。

由于大功率采油设备内部含有积分与微分电路, 设备通电后, 系统容易积累磁场能量, 在高频条件下, 该能量积累的速度很快。当积累到一定程度后, 变压器进入非线性区, 由此产生很大的冲击电流, 会烧毁 IGBT 和功率器件驱动电路, 使仪器无法正常工作<sup>[7]</sup>。所以, 在设计 IGBT 的驱动信号时, 使 PWM 驱动信号在  $t_1$  时间段为脉冲序列, 在

收稿日期: 2012-07-02; 修回日期: 2012-09-27

基金项目: 863 计划资助项目(2007AA06Z226)

作者简介: 周翔(1988—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向为大功率超声电源、压电换能器、ARM 单片机及其 USB 通信。

通讯作者: 周翔, Email: zhouxianghao2006@126.com

$t_2$  时间段为低电平, 这样便于有效释放积累的磁场能量, 保证系统正常运行。

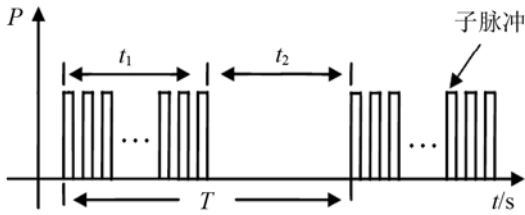


图 1 间歇式控制信号  
Fig.1 Intermittent control signals

### 1 硬件电路设计

#### 1.1 MCU 主控制电路

微控制单元(Micro Control Unit, MCU)主控制电路以 STM32 为核心, 该电路可生成三路不同 PWM 波形的新号。如图 2 所示, 三路波形输出端口分别为 PA11(CTR0), PA8(CTR1), PA9(CTR2), 对应的输出波形分别为 PWM0, PWM1, PWM2, 如图 3 所示。

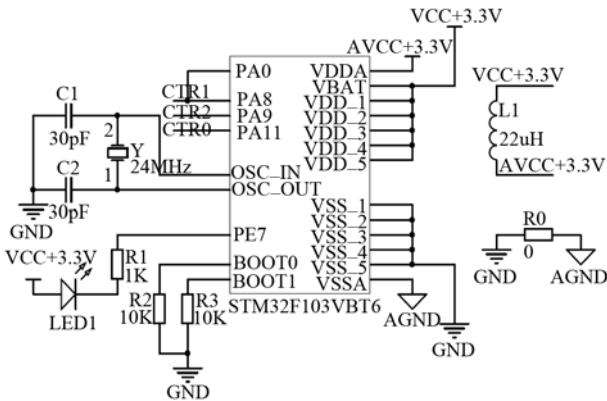


图 2 MCU 主控制电路示意图  
Fig.2 Main control circuit of MCU

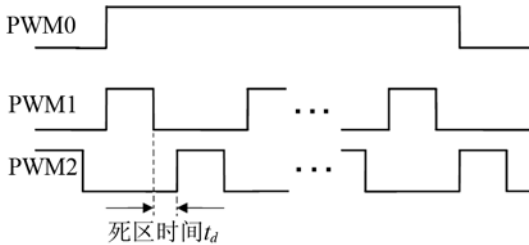


图 3 STM32 生成的三路 PWM 波形示意图  
Fig.3 Three PWM waveforms generated by STM32

图 3 中, PWM0 的周期为 1s, 占空比为 50%, PWM1 与 PWM2 的周期均为  $1/f$ , 它们之间的死区时间为  $t_d=3\mu s$ 。

注意, STM32 主控制电路是一个混合信号电路, 既有数字信号, 又有模拟信号, 同数字信号相比, 模拟信号因其易受噪声干扰, 对印刷板中数字

电路部分的高频信号相当容易受其干扰<sup>[7]</sup>。通常情况下, 数字信号与数字地(GND)相连, 模拟信号与模拟地(AGND)相连, 最终数字地与模拟地通过  $0\Omega$  电阻单点接地, 这样既使数字地和模拟地间无电压差, 又利用了  $0\Omega$  电阻的寄生电感滤除数字部分对模拟部分的信号干扰。如果不是单点接地, 存在压差导致电荷大量积累产生静电, 最终电路将出现由干扰引起的不可预测的问题。

#### 1.2 PWM 信号经过与门电路产生间歇式脉冲

如图 4 所示, HEF4073BP 是一个三路三输入与门芯片, 其输出为全缓冲模式, 不随输出阻抗的变化而变化, 具有很强的抗噪声能力。将 MCU 产生的 PWM0 分别接入 I2(CTR0)与 I4(CTR0)端口, 将 PWM1 接入 I5(CTR1)端口, 将 PWM2 接入 I3(CTR2)端口。CTR0 和 CTR2 输入同一个与门, O1(INA0)为对应的输出; CTR0 和 CTR1 输入另一个与门, O2(INB0)为对应的输出。

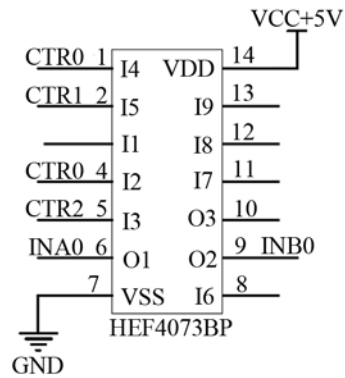


图 4 与门电路  
Fig.4 AND-gate circuit

三路 PWM 信号分别经过与门后, 输出间歇式脉冲 INA0 与 INB0, 如图 5 所示, INA0 或 INB0 的周期均为  $T$ , 在  $t_1$  时间段内有一系列子脉冲, 在  $t_2$  时间段内则为低电平。

#### 1.3 IGBT 驱动电路

本系统采用单相全桥逆变电路, 如图 6 所示, 其工作原理简单, 只有 4 个桥臂, 相比三相电压型桥式逆变电路至少有 6 个, 使用器件较少。单相全桥逆变电路直流侧为电压源  $U_d$ , 并联有大电容  $C$ , 该电容起到缓冲无功能量的作用, 可保证直流侧的电压基本无脉动, 直流回路呈现低阻抗<sup>[8]</sup>。T<sub>1</sub>、D<sub>1</sub> 与 T<sub>2</sub>、D<sub>2</sub> 组成 IGBT 模块 1, T<sub>3</sub>、D<sub>3</sub> 与 T<sub>4</sub>、D<sub>4</sub> 组成 IGBT 模块 2。D<sub>1</sub>~D<sub>4</sub> 为续流二极管, 是负载向直流侧反馈能量的通道。

由 MCU 产生的 PWM 信号, 经过与门后, 可得到两路间歇式脉冲信号。由于这两路信号存在较

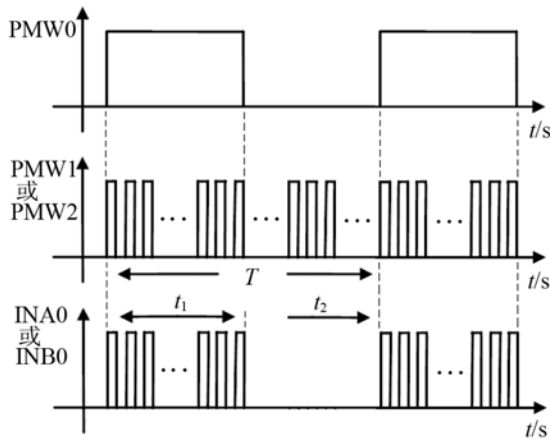


图 5 三路 PWM 波经过与门处理后的波形  
Fig.5 Three PWM waveforms processed by AND-gate

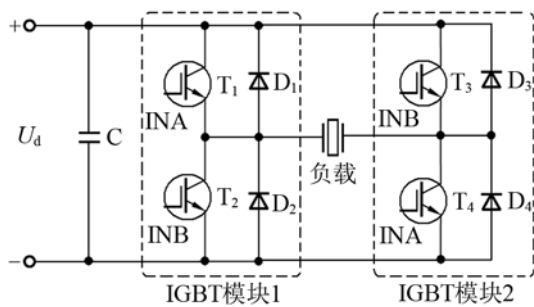


图 6 单相全桥逆变电路  
Fig.6 Single-phase full-bridge inverter circuit

大的波动和脉冲毛刺，不能直接作为 IGBT 的 G 极驱动信号。在本系统中，INA0 与 INB0 经过信号处理模块的滤波、稳压处理后，可得到安全、稳定的驱动信号 INA 与 INB，其波形特性均与 INA0、INB0 保持一致。

图 6 中，INA 作为 T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub> 的驱动信号，INB 作为 T<sub>2</sub> 和 T<sub>4</sub> 的驱动信号，直流侧电压 U<sub>d</sub> 通过单相全桥逆变电路处理后，负载端输出高频大电压脉冲信号，从而激发压电换能器振动，产生超声波振动作用于原油开采。

## 2 软件实现

### 2.1 IAR5.20 及 J-Link 简介

IAR5.20 EWARM 是一款功能强大的编译、链接和调试工具，支持几乎所有的 ARM 核 CPU 系统，包括最新的 Cortex-M3，ARM11 等。IAR5.20 环境与以往版本不同的是，它为许多嵌入式 CPU 提供了相应的例程，且配置相对简单。J-Link 是目前最常用的在线仿真器，可在线调试程序，并能将程序下载至 ARM 单片机中。本系统以 IAR5.20 与 J-Link 为基础，进行项目开发。程序通过 IAR 软件编译以后，可直接生成 .bin 文件，使用 J-Link 直接

进行在线仿真调试。

### 2.2 PWM 信号产生原理

STM32 包含高性能的 32 位 ARM Cortex-M3 RISC 核，采用哈佛结构，使用更高效的 Thumb2 指令集，具有 32 位单周期乘法指令和硬件除法指令，内核支持低功耗模式，在工控网络、电机控制、医疗仪器、手持数码设备、报警系统等应用中，具有广泛的应用价值<sup>[9]</sup>。STM32F103 系列属于中等容量增强型单片机，本系统所使用的单片机型号为 STM32F103VBT6，带有 USB 全速式接口、CAN 控制器，2 个 ADC，7 个定时器，9 个通信接口，80 个快速 I/O 端口，其时钟频率达到 72MHz，带有 128k 字节 Flash，高达 20k 字节的 SRAM，是同类单片机中性能较高的产品。STM32 内嵌有 TIM1 (高级控制定时器) 和 TIMx (通用定时器，x=2~7)，TIM1 与 TIMx 相互独立，不共享任何资源，可以同步工作。本系统所使用的定时器是 TIM1 和 TIM2，由 TIM1 产生两路“死区时间”互补的 PWM1 与 PWM2 信号，由 TIM2 产生 PWM0 信号，这三路波形如图 3 所示。

图 7 显示了程序中 main() 函数的流程，程序中最重要三个部分为系统配置、“死区时间”互补的 PWM1 与 PWM2 信号产生以及 PWM0 信号产生，接下来将分别描述这三部分的工作过程。

(1) 系统配置的主要电路包括：时钟，中断向量表，GPIO，I2C，外部中断/事件控制等。高速外部时钟信号 (HSE) 通过 24MHz 的外部晶振产生，HSE 作为锁相环 (PLL) 的输入时钟<sup>[10]</sup>，PLLCLK 三倍频输出 72MHz。

中断向量表配置，RAM 中断向量表基地址为 0x20000000，FLASH 中断向量表基地址为 0x08000000。

GPIO 口的配置主要包括 PWM 脉冲输出端口与 TIM2 计数器输入端口，其中脉冲输出端口为 PA11、PA8 与 PA9，对应的输出信号分别为 PWM0、PWM1 与 PWM2。TIM2 计数输入端口为 PA0，其信号由 PA8 口输出的 PWM1 脉冲直接提供。在 GPIO 口的配置中，PA0 选用输入浮空模式，PA8 与 PA9 选用复用推挽输出模式，PA11 选用推挽输出模式。

I2C 配置函数中，使能 APB1 外设时钟为 I2C1 时钟。

外部中断/事件控制配置了 8 个外部中断，分别为上升沿触发、下降沿触发以及上升下降沿触发。

(2) PWM 波形初始化及产生部分，实现了生成两路“死区时间”互补的 PWM1 与 PWM2 信号的

功能。这部分的程序流程如图 8 所示，两路 PWM 信号的频率相同，但高低电平互补，且存在一定的“死区时间”。本系统选用的 IGBT 型号为 FF300R12KS4，根据模块的用户手册可知，其正常工作死区时间范围是 0.6~4.1  $\mu\text{s}$ ，为防止四路 IGBT 同时导通，本系统设定死区时间为 3  $\mu\text{s}$ 。通过实际检验，系统能安全运行。

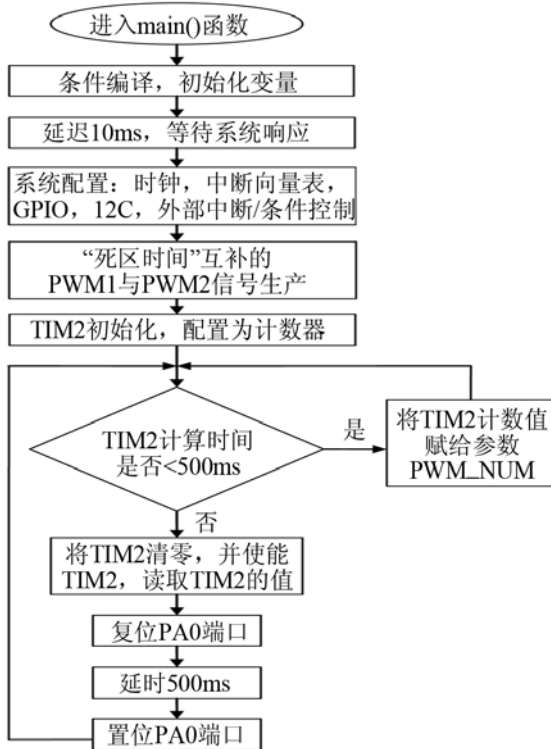


图 7 main 函数流程图  
Fig.7 Main function flow chart

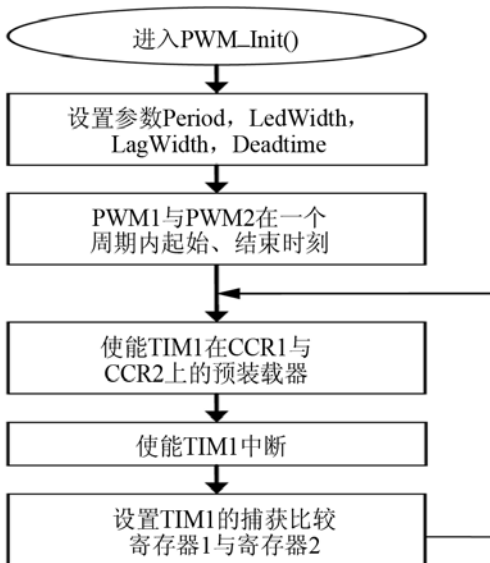


图 8 PWM 波形初始化及产生流程图  
Fig.8 Flow chart of PWM waveform initialization and generation

形由 TIM2 计数器产生，输出端口为 PA0。STM32F10X 固件库封装好了众多函数，直接调用 TIM\_GetCounter(),GPIO\_ResetBits(),GPIO\_SetBits()这三个函数即可输出周期为 1s，占空比为 50%的 PWM 脉冲信号。

### 3 测试结果分析

本系统经过了一系列的实验测试，用示波器测量得到的主要信号如图 9 所示。

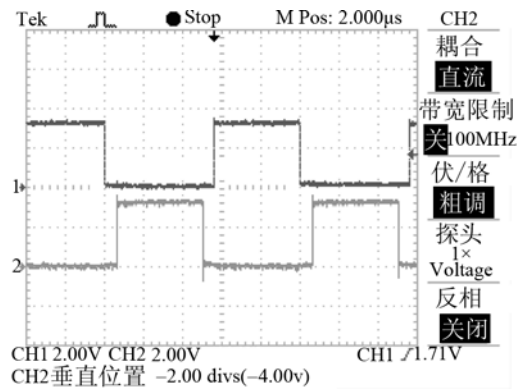


图 9 PWM1 与 PWM2 信号  
Fig.9 PWM1 and PWM2 signals

图 9 所示的 CH1 与 CH2 分别为 STM32 产生的 PWM1 与 PWM2，两路信号的  $T=50 \mu\text{s}$ ， $t_d=3 \mu\text{s}$ ；图 10 所示信号为 PWM0 脉冲， $T=1\text{s}$ ，这三路波形与图 3 示意图中波形一致。

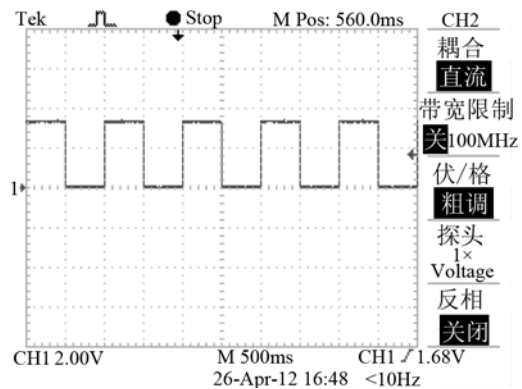


图 10 PWM0 信号  
Fig.10 PWM0 signal

将 PWM1 和 PWM0 作为与门芯片 HEF4073BP 的第一路与门的两个输入信号，INA0 为对应的间歇式输出信号，如图 11 所示的 CH1 信号；将 PWM2 和 PWM0 作为第二路与门的两个输入信号，INB0 为对应的间歇式输出信号，如图 11 所示的 CH2 信号。此时的信号波形与图 5 所示的 INA0 与 INB0 波形基本一致，不同的是，信号的电压幅度

(3) PWM0 信号产生的原理较为简单，这路波

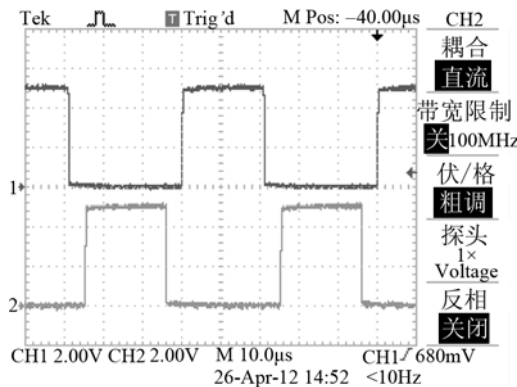


图 11 INA0 与 INB0 波形  
Fig.11 Waveforms of INA0 and INB0

升为 5V。

将上述 INA0 与 INB0 经过信号处理电路后, 输出的信号分别为门极信号, 即 G1 与 G2, 其波形与图 11 所示的 INA0 与 INB0 基本一致。

## 4 结论

一般情况下, 大功率超声波装置易受硬件电路与操作环境的影响。本系统通过电路设计与软件设计, 能产生两路间歇式 PWM 信号, 该信号经过滤波以后能够控制 IGBT 模块安全、稳定地工作, 基本达到了应用要求。由霍尔电压传感器测试, 压电换能器能工作在 380 V 电压条件下, 由霍尔电流传感器输出电流为 8A, 其功率能达到 3.04kW, 达到超声波石油勘探领域的应用水平。

## 参 考 文 献

[1] 陈仁松, 何彬, 李如松. 一种大功率超声发声系统原理与结构设计[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 747-751.  
CHEN Rensong, HE Bin, LI Rusong. Principle and structural design of a kind of high-power ultrasonic generating system[J]. Tech-

nical Acoustics, 2009, 28(6): 747-751.  
[2] 尹文波, 王平, 董怀荣, 等. 大功率超声波采油成套装备的研制及应用[J]. 石油机械, 2007, 35(5): 1-4.  
YIN Wenbo, WANG Ping, DONG Huairong, et al. Development and application of a whole set of high power ultrasonic oil recovery equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(5): 1-4.  
[3] 车小花, 乔文孝. 声波测井信号定向接收处理方法及校验[J]. 声学技术, 2007, 26(1): 66-69.  
CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao. Directional reception and verification of acoustic well logging data[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(1): 66-69.  
[4] 杨锦舟. 声波测井偶极子发射换能器性能的实验研究[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 141-145.  
YANG Jinzhou. Experimental investigation on properties of dipole transmitters for acoustic well logging[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(1): 141-145.  
[5] 肖红兵, 鞠晓东, 杨锦舟. 随钻声波测井仪高效电源设计[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 620-623.  
XIAO Hongbing, JU Xiaodong, YANG Jinzhou. Design of high efficiency power supply for acoustic logging while drilling tool[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 620-623.  
[6] 徐锡强. 间歇式长脉冲 Nd: YAG 医用激光器的研究[D]. 天津大学, 2005, 15-20.  
XU Xiqiang. Study on medical periodic long-pulse Nd: YAG laser[D]. Tianjin University, 2005: 15-20.  
[7] 戈强, 刘鑫. 混合信号 PCB 设计中单点接地技术的研究[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(7): 29-30.  
GE Qiang, LIU Xin. Research on single-point grounding technology in the mixed-signal PCB design[J]. Industrial Control Computer, 2006, 19(7): 29-30.  
[8] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术第 4 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
WANG Zhaoan, HUANG Jun. Power electronics technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.  
[9] KONG Fanxue, LI Shiguang, GAO Zhengzhong, et al. Design of high-voltage electrostatic generator based on STM32[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2011, 2(1): 5-8.  
[10] 王永虹, 徐炜, 郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.  
WANG Yonghong, XU Wei, HAO Liping. Principles and practice of STM32 series of ARM Cortex-M3 micro-controller[M]. Beijing: BeiHang University Press, 2008.