

基于 DSP 的脉冲电源系统触发时序控制与优化

胡楠^{1,2}, 袁伟群^{1,3}, 刘坤^{1,3}, 马进^{1,2}, 严萍^{1,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为了满足大电流直线驱动技术中对脉冲电源系统按照设定时序触发各电源模块的需求, 本文基于数字信号处理器 TMS320C2812 设计了一套控制系统。该控制系统能够在强磁环境下对脉冲电源系统进行稳定精确的时序触发, 采用优化时序触发从而获得峰值波动较小的脉冲波形。开发了包含时序优化算法的上位机控制系统, 编程控制 DSP 内部定时器产生 30 路脉冲信号, 设计了可靠性高、延时小的通信电路和电源模块驱动电路。最后, 将该控制系统用于大电流直线驱动装置的实验, 实验所用的脉冲电源由 30 个电源模块组成, 最高储能 270kJ。分析实验测得的电流波形, 实际放电的时序与在控制系统中的设定时序相比, 误差分布在 10~18 μ s 之间, 表明该系统可以在大电流强磁场干扰下对脉冲电源系统实现精确可靠的时序触发控制; 对比优化时序、经验时序和同步触发得到的脉冲电流波形, 优化时序得到的电流脉宽最大、电流峰值波动最小, 表明该控制系统具有简化操作、优化电流波形避免峰值电流过高的优势。

关键词: 脉冲电源系统; 控制系统; 软硬件设计; 时序触发策略

DOI: 10. 12067/ATEEE1901064 **文章编号:** 1003-3076(2020)03-0067-07 **中图分类号:** TM8

1 引言

大电流直线驱动技术能够将电枢在 ms 内加速至 km/s 的超高速, 它主要依靠脉冲电源系统产生的脉冲电流所提供的能量。脉冲电源系统是由多个电源模块组成的脉冲形成网络(Pulse Forming Network, PFN)^[1], 与简单的同步触发相比, 通过控制各电源模块的放电时间间隔, 也就是按照一定时序触发, 能够获得不同波形的合成脉冲电流。脉宽较大、峰值波动较小的脉冲电流能够为驱动装置提供更稳定的加速度, 使电枢与滑轨间有更良好的滑动电接触, 因此通过控制系统时序触发 PFN、优化触发时序获得更理想的脉冲电流波形对大电流直线驱动技术具有重要意义。

关于脉冲电源系统的时序触发控制的问题, 国外主要有美国 Austin 先进技术研究所在 2008 年基于可编程逻辑控制器的研究^[2], 国内的主要研究进展包括调节拨码开关实现的双路时序控制电路^[3],

采用激光触发气体开关并联驱动 PFN^[4], 以及基于 DSP 的时序触发控制系统^[2,5-7]。但以上控制系统的设计在硬件方面仅用于完成时序信号发送功能, 在时序的优化算法和系统的易用性、安全性方面并没有进行深入研究。本文考虑以下两方面: ①电源系统与主控电路间距离较远导致触发信号易受干扰、存在时延等问题; ②上位机系统应用时序优化算法和实时仿真计算, 优化电流波形避免电流峰值过高。在此基础上设计了基于 DSP 的时序触发控制系统。本文给出了上位机控制系统的设计, 介绍了仿真计算方法与优化时序的算法, 给出了 DSP 主控电路、通信电路以及 PFN 驱动电路的设计。控制一个 270kJ 的脉冲电源系统对大电流直线驱动装置进行放电实验。该控制系统能够在触发前计算优化时序为操作者提供参考, 对设定的时序仿真预览电流、速度波形, 对 PFN 实现稳定可靠、低时延的时序触发控制, 最终获得脉宽较大、峰值波动较小的脉冲电流波形。

收稿日期: 2019-01-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(51875546; 51577178)
作者简介: 胡楠(1993-), 女, 黑龙江籍, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术;
袁伟群(1976-), 男, 江苏籍, 研究员, 博士, 研究方向为脉冲大电流放电。

2 时序触发控制系统总体设计

大电流直线驱动系统的结构示意图如图 1 所示,主要由电源系统和驱动装置两个部分组成。PFN 对驱动装置放电,驱动其中的电枢加速,驱动装置作为 PFN 的负载。

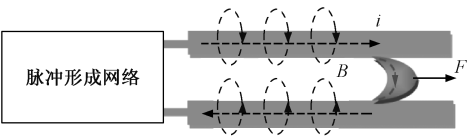


图 1 大电流直线驱动系统示意图

PFN 时序触发控制系统由上位机、下位机和电源模块驱动三部分构成。主要实现功能为:①上位机软件完成时序设定、时序优化、仿真预览功能;②下位机 DSP 根据设定的时序值,顺序触发电源模块的驱动电路;③驱动电路稳定地触发各模块放电。

控制系统的工作原理如下:首先,通过上位机手动设定时序,或给定参数通过仿真计算获得优化后的时序;然后,通过串口发送到 TMS320F2812 型号的 DSP^[2];最后,DSP 按照设定的时序,产生 30 路脉冲信号,分别利用光纤通信传输给单个脉冲电源模块的驱动电路,PFN 驱动电路将脉冲信号进行放大隔离等操作后驱动各电源模块的晶闸管,使得 PFN 按照指定的时序对大电流直线驱动装置放电。

3 上位机控制系统

上位机控制系统中应用了时序触发策略算法和放电过程的快速求解算法,根据输入的期望速度和电枢质量计算出优化时序提供参考;对大电流直线驱动系统的驱动过程进行仿真,出现过峰值电流时给出预警,达到简化操作、提高 PFN 使用效率和系统安全性的目的。设计了如图 2 所示的 PFN 时序触发控制系统的上位机界面。上位机采用 C#编程语言并结合 MATLAB 编程,能够对设置的触发时序进行电枢发射过程的仿真,并在软件界面的对应区域输出放电过程中的电流、电枢速度和电枢受力随时间的变化曲线,实现放电过程预览、过高电流预警等功能。具体如下:

- (1) 时序设定:手动输入时序,控制 DSP 及驱动电路按照该时序,对每一个电源模块产生精确、稳定的脉冲信号,触发电源模块放电。
- (2) 仿真预览:对放电过程进行仿真计算,出现

过峰值电流时给出预警,实现对驱动过程中的电流、电枢受力情况的预览。

(3) 时序优化:控制系统可根据输入的期望速度和电枢质量,计算出优化后的时序自动填入时序栏,提供参考。

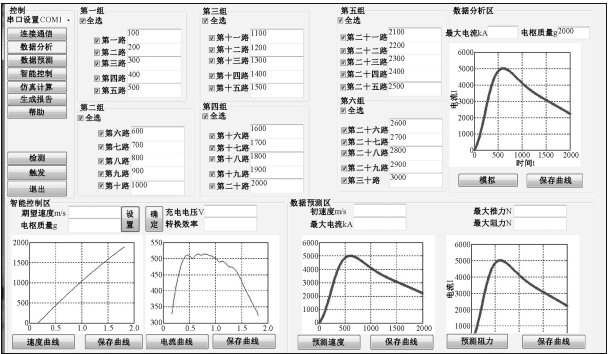


图 2 C#开发的 PFN 时序触发控制系统

Fig.2 Trigger timing control system developed with C# for PFN

3.1 仿真计算

基于大电流直线驱动系统的组成和工作原理,从电源系统和驱动装置两个方面建立电路模型。图 3 为 PFN 中的一个电源模块的电路原理图,其中 C 为储能电容器,TH 为普通晶闸管,D 为续流硅堆, L 为电源模块的电感值和电缆电感的总和, R 为电抗器电阻、电缆和一个模块中的引线电阻之和。

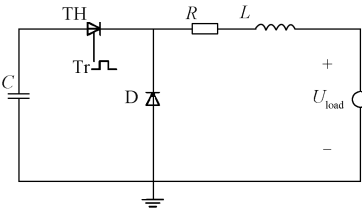


图 3 一个脉冲电源模块的电路原理图

Fig.3 Circuit schematic of pulse power supply module

应用发射过程的快速求解算法,依照上位机设置的触发时序仿真电枢发射过程。该算法的基本思想如下:各模块的放电过程被认为是独立的;将整个驱动过程离散成足够小的时间步长(μs 量级),每个时间步长内,先求解电源侧各模块的放电电流,各模块放电电流之和为馈入轨道的总电流;再求解负载侧的运动控制方程,并将解出的负载侧电压代入下一时间步长中电源侧放电电流的计算;迭代以上计算直到电枢脱离驱动装置,输出放电过程中的电流、电枢速度和电枢受力随时间的变化曲线^[8]。

求解电源侧各模块的放电电流。每个时间步长

$[t, t + \Delta t]$ 内,将负载侧电压视为不变。设 t 时刻电容电压、电感电流、负载侧电压分别为 u_{C0} 、 i_{L0} 、 u_{load} ;
 $t + \Delta t$ 时刻的电容电压和电感电流分别为 u_{C1} 、 i_{L1} ;
根据 t 时刻的电容电压和电感电流,单个电源模块有以下 4 种工作状态:

(1) $U_{C0} = U_0$ 、 $i_{L0} = 0$ 时晶闸管未导通,电容电压为初始充电电压;

(2) $U_{C0} > 0$ 、 $i_{L0} > 0$ 时为二阶放电状态:

$$u_{C1} = u_{load} + (u_{C0} - u_{load})e^{-\alpha\Delta t} \cos\omega\Delta t + \frac{1}{\omega}[\alpha(u_{C0} - u_{load}) - \frac{i_{L0}}{C}]e^{-\alpha\Delta t} \sin\omega\Delta t \quad (1)$$

$$i_{L1} = i_{L0}e^{-\alpha\Delta t} \cos\omega\Delta t + \frac{1}{\omega}(\frac{u_{C0} - u_{load}}{L} - \alpha i_{L0}) \cdot e^{-\alpha\Delta t} \sin\omega\Delta t \quad (2)$$

(3) $U_{C0} = 0$ 、 $i_{L0} > 0$ 时为一阶放电状态:

$$i_{L1} = (i_{L0} + \frac{u_{load}}{R})e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - \frac{u_{load}}{R} \quad (3)$$

(4) $U_{C0} = 0$ 、 $i_{L0} = 0$ 时放电结束。

求解负载侧的运动控制方程。根据电源侧的计算得到了各单个模块的电流后,便可以求得轨道电流,设 $t + \Delta t$ 时刻的轨道电流为 I_1 , 电枢质量为 m , 轨道的电感梯度为 L_r' ; 电枢受到的安培力、摩擦力^[9,10]、电枢加速度、电枢速度、电枢位移分别为 F 、 F_{fl} 、 a_1 、 v_1 、 s_1 , 设 t 时刻的电枢速度和位移为 v_0 、 s_0 , 根据式(4) ~ 式(7),可求出 $t + \Delta t$ 时刻的电枢运动状态:

$$F = \frac{1}{2}L_r'I_1^2 \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{F - F_{fl}}{m} \quad (5)$$

$$v_1 = v_0 + a_1\Delta t \quad (6)$$

$$s_1 = s_0 + v_0\Delta t + \frac{1}{2}a_1(\Delta t^2 + 2t\Delta t) \quad (7)$$

式中,在程序计算时为了增大数值计算的稳定性,将一阶差分公式中的 Δt 更改为 $2\Delta t$ 进行计算。

根据式(8)可得 $t + \Delta t$ 时刻的负载电压:

$$u'_{load} = I_1R_{sum} + I_1L'_rv + (L_r + L_{cabel}) \frac{I_1 - I'_0}{2\Delta t} \quad (8)$$

式中, u'_{load} 和 v 分别为 $t + \Delta t$ 时刻的负载电压和电枢速度; I'_0 为 t 时刻的轨道电流; R_{sum} 包含回路中轨道电阻、电枢电阻、枢轨间的接触电阻^[11,12]、速度趋肤效应^[9, 13-16]产生的电阻和电缆电阻; L_r 、 L_{cabel} 分别为轨道和电缆的电感。

3.2 时序优化

该系统应用触发策略算法对 PFN 的触发时序进行优化。触发策略算法基于 2.1 节对大电流直线驱动过程的快速求解,在系统参数确定的前提下,计算出 PFN 中的电源模块分为几组触发、每次触发的模块数量和触发时刻,优化目标是尽可能获得脉宽较大、峰值波动较小“近似平顶”的放电电流波形,且保证充电模块在电枢加速过程中触发,避免由于触发时序设置不合理导致的电流峰值过高、部分模块未放电等问题。该算法优化了电流波形,简化了操作,提高了大电流直线驱动系统的安全性。

触发策略算法的设计思路为:以电流到达平顶阶段后波动范围在 20kA 内为优化目标,电流上下限为 $\{(I_{min}, I_{max}) | I_{max} - I_{min} = 20\}$,在考虑触发模块数量时,尽可能使轨道电流接近 I_{max} ;当轨道电流下降到 I_{min} 时则触发下一组模块;即根据 I_{max} 确定触发模块数、根据 I_{min} 确定触发时刻^[8]。

触发策略算法流程图如图 4 所示,步骤如下:

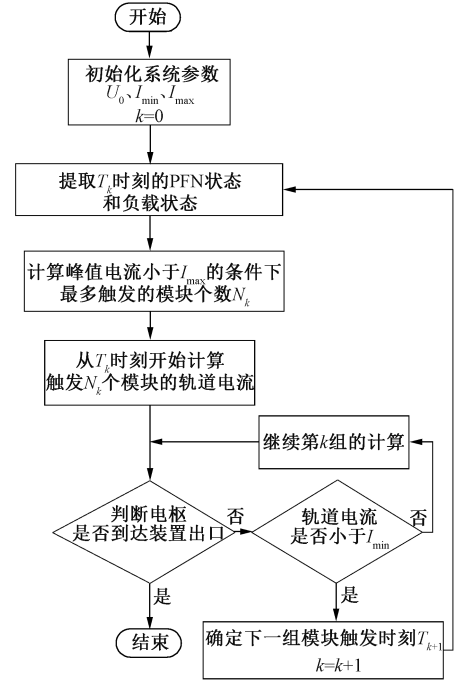


图 4 时序优化算法流程图

Fig.4 Flow chart of trigger timing optimization algorithm

(1) 根据输入的期望速度和电枢质量,计算匀加速条件下达到期望速度需要的电流峰值和相应电压水平 U_0 ;并以围绕该电流值电流波动 20kA 为目标,设置电流平顶阶段的波动范围为 (I_{min}, I_{max}) ;

(2) 提取第 k 组电源模块触发时刻 T_k 时的电源侧状态和负载侧状态;

(3) 将当前组的模块数从 1 开始逐次加 1, 根据 2.1 节给出方法求解电路状态, 并判断出轨道电流峰值; 当轨道电流峰值超出 I_{\max} 时即可以确定第 k 组的触发模块数; 当式 (1) 计算出的模块数已超过剩余的模块数时, 即取剩余的模块数作为结果, 并计算至电枢出膛;

(4) 据式 (2) 确定的模块数从第 k 组电源模块的触发时刻起计算轨道电流和负载状态, 并将计算结果进行储存; 轨道电流下降至 I_{\min} 时, 若仍有未触发模块, 则以这一时刻作为第 $k+1$ 组的触发时刻, 若所有模块均已投入使用, 则持续计算至电枢出膛;

(5) 重复执行步骤 (1) ~ 步骤 (3) 直至电枢出膛。

4 硬件系统研制

4.1 主控电路设计与软件控制流程

应用 CCS3.0 开发软件, 采用 C 语言编程, 实现了 DSP 产生 30 路脉冲信号的目标。触发控制系统的主控芯片选用 TMS320F2812 型号的 DSP, 该芯片具有体积小、计算速度快和性能高等优点。DSP 的主要功能为: 接受上位机发送的指令, 按照需求产生多路脉冲信号。此系统中, 最多用到 30 路触发时序, 因此应用 30 个通用输入/输出 (GPIO) 接口, 使用时通过分别设定 GPxMUX、GPxDIR、GPxQUAL、GPxDAT 等寄存器来达到硬件上的运用^[2]。

4.2 通信电路设计

PFN 驱动电路与 DSP 之间距离较长, 并且比较容易受到外界电磁干扰, 该系统采用玻璃光纤传输时序触发信号, 具有传输带宽高、抗干扰性能强、信号稳定等优点。

DSP 发出的电信号先通过电光转换电路转换为光信号, 通过 30m 玻璃光纤传输到达 PFN 终端后, 再通过光电转换电路转换为电信号, 用于驱动晶闸管。电光转换和光电转换的电路原理图如图 5、图 6 所示, 分别采用 1521 和 2521 模块实现。经过测量, 此过程中脉冲信号的上升延时为 20ns, 相比于 μs 级的模块放电间隔, 表明该通信电路具有稳定可靠性和延时小的优势, 保证了触发时刻的精确性。

4.3 驱动电路设计

DSP 产生的时序脉冲信号, 转换为光信号后经过光纤到达 PFN 驱动电路。驱动电路能够实现在强磁场下稳定、可靠地触发各电源模块, 主要是依靠

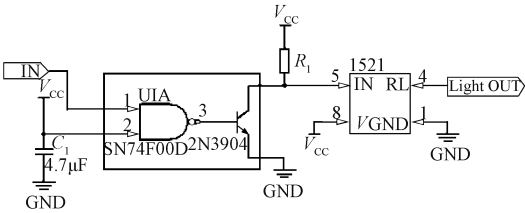


图 5 电光转换电路

Fig.5 Circuit schematic of electro-optic conversion

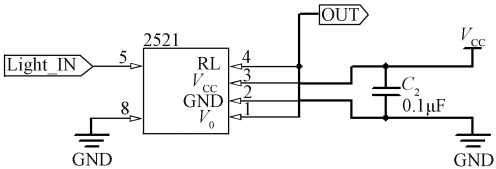


图 6 光电转换电路

Fig.6 Circuit schematic of photoelectric conversion

6N137 高速光耦和脉冲变压器实现触发信号的隔离和整形, 以及电路板的加工和封装工艺。

采用 6N137 高速光耦进行隔离, 能够防止数字信号地与模拟信号地共用, 传输延时低至 45ns, 并且能够起到反向的作用。使用脉冲变压器实现强弱电隔离和晶闸管驱动, 选用铁氧体材料作为脉冲变压器的磁心, 高频励磁线作为原副边绕组的绕线, 并在变压器副边接入快速二极管和高精度电阻作为脉冲整形电路, 实现触发信号的隔离和整形。印制 PCB 驱动电路板, 设置走线宽度为 10mm, 并采用直插式器件, 以避免接入晶闸管后电路板工作电流较大而产生发热问题; 采用金属电磁屏蔽盒封装驱动板, 保护驱动电路不受外界强磁场干扰。

驱动电路原理框图如图 7 所示, 此驱动电路产生一个脉宽 100 μs 、上升沿时间 4 μs 、幅值 18V 的脉冲信号。驱动电路的工作原理如下: 首先, 隔离变压器输入接 220V, 输出端的幅值为 20V, 经过整流桥后给电解电容充电, 此时电解电容的最高电压为 18V, 用于为隔离脉冲变压器供电。当光电转化模块接收到正向光脉冲信号后, 输出一个反向电脉冲, 经过高速转化的光耦芯片输出一个 5V 正向的脉冲信号, 此信号控制 MOS 管的开断, 作为隔离脉冲变压器的开关。当 MOS 管导通时主电路导通, 电解电容开始放电, 经过隔离脉冲变压器, 输出脉冲信号。图 8 为输出信号的上升沿, 可以看出当电流达到最大值时, 其上升时间为 4 μs , 幅值达到 18V。

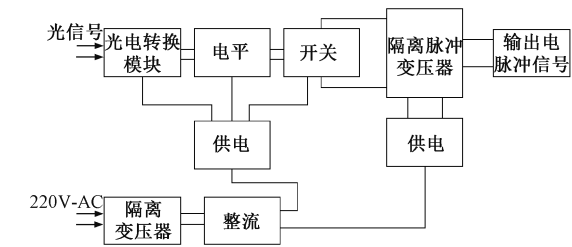


图 7 电源模块驱动电路原理框图

Fig.7 Power module driver circuit block diagram

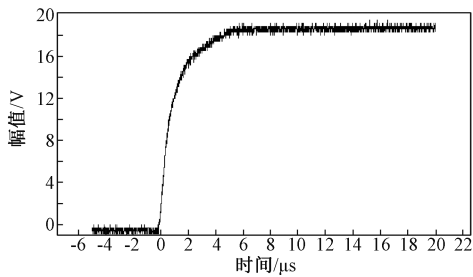


图 8 驱动电路输出信号

Fig.8 Driver circuit output signal

5 实验验证

5.1 系统可靠性验证与误差分析标定

应用该系统控制由 30 个电源模块组成的 PFN 在大电流直线驱动装置上进行放电实验,图 9 为实验测得的放电电流。整个系统储能最高可达 270kJ,峰值电流为 196kA,实际放电时序与设置时序的最大误差为 18 μ s,表明该控制系统可以在大电流强磁场干扰下对 PFN 实现精确可靠的时序触发控制。

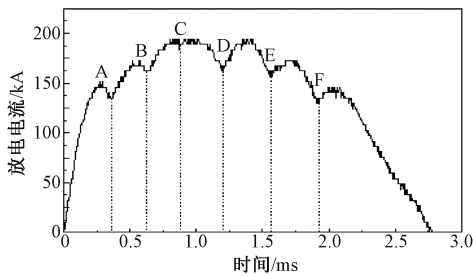


图 9 放电实验电流波形

Fig.9 Current waveform of discharge experiment

将图 9 电流波形中出现拐点的时刻 A~F 作为 PFN 实际放电的时序,设定时序与实际放电时序间的误差如表 1 所示。可以得到本次实验中控制系统最大误差为 18 μ s,平均误差为 13 μ s。误差可能来源于以下:①DSP 内部的定时器产生误差约为 0.5 μ s;②

通信信号采用 30m 光纤传输和两次光电信号转换造成的延时约为 190ns;③驱动电路输出信号会有上升沿 4 μ s 的延时;④从电源模块获得驱动信号到实际输出电流间也有延时存在。因此该系统理论控制误差大于 4.7 μ s。实验得到的实际误差分布在 10~20 μ s 间,结合误差分析,实际应用中可将设置的时序减 10 μ s 进行补偿,进一步缩小系统的误差。

表 1 设置时序与实际放电时序对比

	A	B	C	D	E	F
设定时序	360	660	900	1200	1560	1920
测定时序	372	672	918	1212	1574	1930
误差/ μ s	12	12	18	12	14	10

5.2 仿真与时序优化效果验证

分别采用上位机系统计算得到的优化时序、根据经验设置的时序和所有模块同步触发,分析优化时序对电流波形的影响。在大电流直线驱动装置上进行 3 次放电实验,仅触发时序不同,充电电压、电枢结构、放电模块数等保持不变,时序设置如表 2 所示,3 次放电电流波形如图 10 所示。同步触发的放电电流峰值最高达到 185kA,脉宽最小;经验时序触发的放电电流经过上升沿后波动区间为 113~144kA;优化时序触发的放电电流波动区间为 93~117kA,电流峰值波动最小,脉宽最大,达到了优化放电电流波形的目标。

表 2 触发时序

	时刻/ μ s	0	400	700	1100
优化时序	模块个数	9	3	4	4
经验时序	时刻/ μ s	0	300	500	700
时序	模块个数	10	3	4	3

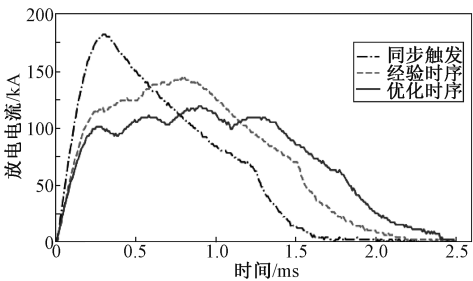


图 10 三种时序触发放电电流波形对比

Fig.10 Comparison of current waveforms generated with different trigger timing

实验中的优化时序是通过上位机系统输入期望

速度 550m/s、电枢质量 8.4g 得到的,放电电流平顶波阶段的波动范围为 24kA,算法中的目标波动范围为 20kA,电流最大值为 117kA,可得到该系统对峰值波动范围的控制误差约为 $(24-20)/117=3\%$;以同样的方式计算经验时序对电流波动的控制误差为 7.6%。以上表明,该系统能够将脉冲电流平顶阶段的波动较精确地控制在 (I_{\min}, I_{\max}) 范围内。

采用优化时序放电的实验中,上位机系统的仿真电流波形与实际电流的对比如图 11 所示。仿真结果与实际值偏差最大为 12.1kA,仿真得到的电流波形峰值变化范围为 19kA。从图 11 可知,仿真得到的电流波形的变化特征与实际的电流变化相符,验证了仿真计算方法的准确性。

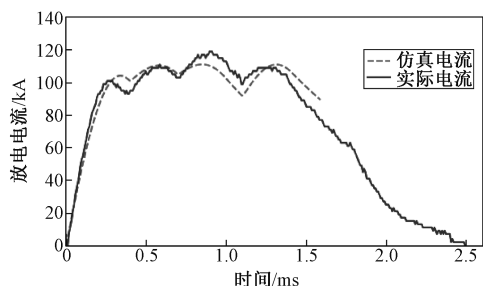


图 11 优化时序的实际放电波形和仿真计算的波形

Fig.11 Current waveform of actual discharging and simulation with optimized timing

电流下降沿拐点为电枢脱离驱动装置的时刻,此时电流越小,电枢脱离驱动装置时产生的电弧对装置损伤越小^[17]。三次放电中,采用优化时序的放电电流,电枢出口时刻电流最小,表明优化时序产生的“平顶波”能减少驱动装置出口处的电弧损伤。

6 结论

本文设计了一套控制系统,该系统能够对脉冲电源系统进行稳定精确的时序触发,并能通过优化触发时序优化 PFN 在大电流直线驱动装置上的放电电流波形。给出了上位机控制系统的设计,介绍了仿真计算方法与优化时序的算法,给出了 DSP 主控电路、通信电路以及 PFN 驱动电路的设计。通过该控制系统控制 270kJ 脉冲电源系统在大电流直线驱动装置上进行发射实验,系统能够按照输入的时序触发,安全稳定地完成大电流直线驱动装置的实验,PFN 的实际放电时序与设定时序相比,最大时延为 18μs,验证了该系统的实用性和可靠性。

采用系统给出优化时序在大电流直线驱动装置上进行发射实验,得到了较为理想的平顶波。对比

采用经验时序和同步触发得到的脉冲电流波形,优化时序得到的放电电流脉宽最大、峰值波动最小,波动范围 24kA,体现了该系统能够简化操作、优化电流波形避免峰值电流过高的优势。

参考文献 (References):

- [1] 周媛 (Zhou Yuan). 脉冲成形网络及其在电磁轨道发射系统中的应用 (Circuit simulation study of electromagnetic rail launcher based on pulse forming network) [D]. 北京: 中国科学院电工研究所 (Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2012.
- [2] 刘福才, 赵晓娟, 何锁纯 (Liu Fucui, Zhao Xiaojuan, He Suochun). 基于 DSP 的 PFN 触发时序控制系统设计及实验分析 (Design and experimental analysis of DSP-based PFN trigger timing control system) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (7): 1778-1783.
- [3] 石晓晶, 董建年 (Shi Xiaojing, Dong Jiannian). 用于电磁发射试验的时序控制电路设计 (Design of firing control for ET experiment) [J]. 仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument), 2004, 25 (S1): 969-970.
- [4] 康强, 李名加, 王朋, 等 (Kang Qiang, Li Mingjia, Wang Peng, et al.). 紧凑型脉冲成形模块的设计与实验研究 (Design and experiment of compact pulse forming module) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2014, 20 (4): 1014-1016.
- [5] 牛颖蓓 (Niu Yingbei). 基于 DSP 电磁轨道炮控制系统设计与实现 (Design and implement of system the electromagnetic launcher based on DSP) [J]. 计算机测量与控制 (Computer Measurement & Control), 2012, 20 (4): 1014-1016.
- [6] 黄海, 高俊山, 李文龙 (Huang Hai, Gao Junshan, Li Wenlong). 电磁发射器 DSP 控制系统的设计 (DSP-based control of the electromagnetic launcher) [J]. 自动化技术与应用 (Techniques of Automation & Applications), 2007, 26 (3): 92-95.
- [7] 刘坤, 马进, 张东东, 等 (Liu Kun, Ma Jin, Zhang Dongdong, et al.). 脉冲功率电源模块时序放电控制系统设计 (Design of time sequence discharging control system for pulse power supply modules) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2018, 30 (3): 035002.
- [8] 刘旭堃, 于歆杰, 刘秀成 (Liu Xukun, Yu Xinjie, Liu Xiucheng). 电容储能型脉冲电源时分分段触发策略自动计算方法 (Researches on an automatic calculation

- method for the triggering strategy in capacitive pulsed-power supply) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (11): 186-193.
- [9] Weeks D A, Weldon W F, Zowarka R C. Plasma armature railgun launcher simulations at the University of Texas at Austin [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25 (1): 580-586.
- [10] Aigner S, Igenbergs E. Friction and ablation measurement in a round bore railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25 (1): 33-39.
- [11] Hsieh K T, Satapathy S, Hsieh M T. Effects of pressure-dependent contact resistivity on contact interfacial conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 313-318.
- [12] 袁瑞敏, 袁伟群, 徐伟东, 等 (Yuan Ruimin, Yuan Wei-qun, Xu Weidong, et al.). 电磁发射中枢轨接触电阻特性研究 (Research on contact resistance between armature and rails in electromagnetic launch) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 45-50.
- [13] Nearing J C, Huerta M A. Skin and heating effects of rail-gun current [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25 (1): 381-386.
- [14] Yu X, Fan Z. Simulation and two-objective optimization of the electromagnetic-railgun model considering VSEC resistance and contact resistance [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39 (1): 405-410.
- [15] Engel T G, Neri J M, Veracka M J. Characterization of the velocity skin effect in the surface layer of a railgun sliding contact [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 (7): 1837-1844.
- [16] 曹昭君, 肖铮 (Cao Zhaojun, Xiao Zheng). 电磁发射系统C型固体电枢的电流密度分布特性及其机理分析 (Current density distribution characters of C-shaped armature in EML system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (2): 23-26.
- [17] 王盟, 赵莹, 袁伟群, 等 (Wang Meng, Zhao Ying, Yuan Wei-qun, et al.). 弧形轨道结构下电流分布特性的仿真研究 (Simulation study on current distribution characteristics of arc rail structure) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (8): 51-55.

Control and optimization of trigger timing of pulse power supply system based on DSP

HU Nan^{1,2}, YUAN Wei-qun^{1,3}, LIU Kun^{1,3}, MA Jin^{1,2}, YAN Ping^{1,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In high current linear drive technology, there are requirements of triggering the power modules in pulse power supply system according to the set timing. This paper designed a control system based on digital signal processor (DSP) TMS320C2812. The control system can trigger the pulse power supply system under strong magnetic environment stably and accurately with the set timing, and optimize the trigger timing to obtain a pulse current waveform with small fluctuation in flat top stage. Firstly, an upper computer control system including the trigger timing optimization algorithm is developed. Secondly, the DSP internal timer is programmed to generate 30 pulse signals. Thirdly, a communication circuit with high reliability and low delay and a power module drive circuit are designed. Finally, the control system is applied to the experiments of high current linear drive. The pulse power supply system used in the experiments consists of 30 power modules with a maximum energy storage of 270kJ. Comparing the actual discharging timing and the set timing, the error of the control system triggering the power modules is found between 10~18μs, which indicates that the system can realize the reliable and accurate trigger under the interference of high current and strong magnetic field. Comparing the pulse current waveform obtained by optimized trigger timing, empirical trigger timing and synchronous triggering, it is found that the first one has largest pulse width and minimal fluctuation. The experiment result indicates that the control system has the advantage of simplified operation, optimizing the current waveform and avoiding the risk of excessive current peak.

Key words: pulse power supply system; control system; software and hardware design; trigger timing strategy