



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111921097 B

(45) 授权公告日 2021.06.11

(21) 申请号 202010682865.6

A61N 5/10 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.15

H02M 1/088 (2006.01)

H02M 1/14 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111921097 A

审查员 林丽燕

(43) 申请公布日 2020.11.13

(73) 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

(72) 发明人 秦斌 韩文杰 刘旭 刘开锋

陈曲珊 李冬

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心

42201

代理人 李智

(51) Int. Cl.

H02M 7/217 (2006.01)

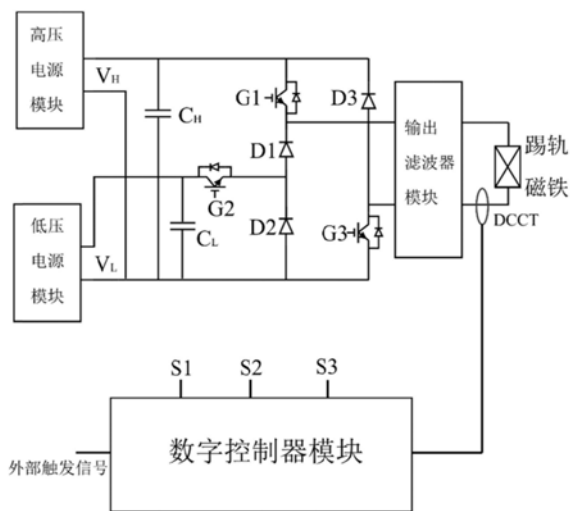
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种踢轨磁铁的脉冲电源

(57) 摘要

本发明公开了一种踢轨磁铁的脉冲电源,包括:高压电源模块、低压电源模块、功率转换单元和数字控制器模块;功率转换单元包括开关管和二极管,用于控制能量在所述踢轨磁铁和储能电容之间有序流动;数字控制器模块一端接收外部触发控制信号,一端连接所述功率转换单元,另一端对输出的电流信号进行采样;脉冲电源输出电流波形由外部触发信号控制,触发信号的上升沿为升流命令,触发信号的下降沿为降流命令,通过数字控制器模块驱动功率转换单元中的开关器件,以实现高电压快速升流,低电压稳流,降低输出电流纹波。如此,本发明的电源输出电流波形可为梯形波,重复频率可达上千赫兹,而且电源可以工作在直流模式。



1. 一种踢轨磁铁的脉冲电源,其特征在于,包括:

高压电源模块和低压电源模块,用于将交流电压信号转换为直流电压信号;

功率转换单元,包括三组IGBT开关管G1、G2、G3和三组二极管D1、D2、D3;每组IGBT开关管至少包括一个IGBT开关管,每组二极管至少包括一个二极管;所述高压电源模块的正极、负极分别与开关管G1的漏极和开关管G3的源极连接,所述低压电源模块的正极、负极分别与开关管G2的漏极和开关管G3的源极连接;二极管D1正极、负极分别与开关管G2的源极和开关管G1的源极连接,二极管D2正极、负极分别与开关管G3的源极和开关管G2的源极连接,二极管D3正极、负极分别与开关管G3的漏极和开关管G1的漏极连接;

数字控制器模块,第一端接收外部触发控制信号;第二端连接所述功率转换单元,输出两路开关信号和一路PWM驱动信号,输出所述两路开关信号的端口分别连接开关管G1和G3的栅极,输出所述一路PWM驱动信号的端口连接开关管G2的栅极;第三端对踢轨磁铁输出的电流信号进行采样;所述踢轨磁铁一端连接开关管G1的源极,另一端连接开关管G3的漏极;

当检测到所述外部触发控制信号的上升沿时,开关管G1和开关管G3打开,使所述高压电源模块工作,从而使所述踢轨磁铁升流;当检测到输出的电流信号达到预设值时,IGBT开关管G1关闭、IGBT开关管G3打开、IGBT开关管G2受PWM信号闭环控制,所述低压电源模块工作,维持输出的电流信号不变;当检测到所述外部触发控制信号的下降沿时,IGBT开关管G1、IGBT开关管G2和IGBT开关管G3均关闭,所述高压电源模块和所述低压电源模块均不工作,由所述踢轨磁铁中的能量对储能电容充电,直至输出的电流信号降为零。

2. 如权利要求1所述的脉冲电源,其特征在于,还包括:一组输出滤波器模块,用于在输出的电流信号降为零后与所述踢轨磁铁形成一个高阻尼振荡。

3. 如权利要求2所述的脉冲电源,其特征在于,所述输出滤波器模块为LCR滤波器。

4. 如权利要求1所述的脉冲电源,其特征在于,每组IGBT开关管G1、G2、G3分别设有缓冲电路。

5. 如权利要求1所述的脉冲电源,其特征在于,所述高压电源模块和所述低压电源模块分别与高压储能电容模块和低压储能电容模块并联,储能电容模块由一个或多个储能电容并联组成。

6. 如权利要求1所述的脉冲电源,其特征在于,所述高压电源模块和所述低压电源模块包括变压器、整流器和滤波电路。

7. 如权利要求6所述的脉冲电源,其特征在于,所述滤波电路为LC滤波器,用于滤除所述整流器输出的直流电压信号中存在的高频电压纹波。

8. 如权利要求1所述的脉冲电源,其特征在于,所述数字控制器模块包括FPGA核心控制芯片、电压采样单元、触发信号接收端口和直流电流传感器。

9. 如权利要求8所述的脉冲电源,其特征在于,所述直流电流传感器为基于磁通门技术的零磁通直流电流传感器。

一种踢轨磁铁的脉冲电源

技术领域

[0001] 本发明属于质子重离子治疗中脉冲功率电源领域,更具体地,涉及一种踢轨磁铁的脉冲电源。

背景技术

[0002] 在基于回旋加速器的质子治疗装置中,通常采用点扫描技术作为治疗终端扫描方式。从回旋加速器引出的250MeV连续束流质子束,经过能量选择段将固定能量质子束变化为70MeV-240MeV连续能量可调的质子束,而后经过相应的束流输运线进入到治疗室中。在采用笔型束点扫描的治疗过程中,质子束需要打入病人几个毫秒,而后需要切换至下一个照射点。在点与点切换和能量切换的过程中,需要一个快速的束流开关来以减小不必要的辐射剂量,而且需要可以工作在直流模式,在故障情况下为治疗系统提供一个快速的安全联锁。为了实现这一功能,通常有两种方式:第一种是静电偏转板方案,采用安装在回旋加速器中心第一圈的静电偏转板,在质子束未加速到高能粒子之前将其踢出回旋加速器;第二种是快速踢轨磁铁方案,应用安装在加速器后的踢轨磁铁系统,将固定束流能量的质子束快速打偏至下游法拉第杯中。在华中科技大学质子治疗系统中,踢轨磁铁系统将作为主要的束流打偏方式,静电偏转板方案作为备选方式和冗余设计。

[0003] 在加速器领域中,踢轨磁铁脉冲电源一般有:注入/引出kicker磁铁脉冲电源,凸轨磁铁脉冲电源和切割磁铁正弦波脉冲电源等。现有的踢轨磁铁电源方案可以实现类梯形波或类正弦波输出,重复频率最高可达千兆赫兹,但是很难同时兼顾输出类梯形波、重复频率达到上千赫兹,而且可以工作在直流模式。

发明内容

[0004] 针对现有技术的缺陷和改进需求,本发明提供了一种踢轨磁铁的脉冲电源,其目的在于实现电源输出电流波形为梯形波,重复频率可达上千赫兹,而且电源可以工作在直流模式。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了一种踢轨磁铁的脉冲电源,包括:

[0006] 高压电源模块和低压电源模块,用于将交流电压信号转换为直流电压信号;

[0007] 功率转换单元,包括开关管和二极管;所述高压电源模块和低压电源模块与所述功率转换单元连接;

[0008] 数字控制器模块,第一端接收外部触发控制信号,第二端连接所述功率转换单元,第三端对踢轨磁铁输出的电流信号进行采样;

[0009] 当检测到所述外部触发控制信号的上升沿时,所述数字控制器模块通过控制所述功率转换单元中开关管的导通与关断,使所述高压电源模块工作,从而使所述踢轨磁铁升流;当检测到输出的电流信号达到预设值时,所述低压电源模块工作,维持输出的电流信号不变;当检测到所述外部触发控制信号的下降沿时,所述高压电源模块和所述低压电源模块均不工作,由所述踢轨磁铁中的能量对储能电容充能,直至输出的电流信号降为零。

[0010] 进一步地,还包括:一组输出滤波器模块,用于在输出的电流信号降为零后与所述踢轨磁铁形成一个高阻尼振荡。

[0011] 进一步地,所述输出滤波器模块为LCR滤波器。

[0012] 进一步地,所述功率转换单元包括三组IGBT开关管G1、G2、G3和三组二极管D1、D2、D3;每组IGBT开关管至少包括一个IGBT开关管,每组二极管至少包括一个二极管;

[0013] 所述数字控制器模块第二端连接所述功率转换单元,输出两路开关信号和一路PWM驱动信号,输出所述两路开关信号的端口分别连接IGBT开关管G1和G3的栅极,输出所述一路PWM驱动信号的端口连接IGBT开关管G2的栅极;

[0014] 当检测到所述外部触发控制信号的上升沿时,IGBT开关管G1和IGBT开关管G3打开;当检测到输出的电流信号达到预设值时,IGBT开关管G1关闭、IGBT开关管G3打开、IGBT开关管G2受PWM信号闭环控制;当检测到所述外部触发控制信号的下降沿时,IGBT开关管G1、IGBT开关管G2和IGBT开关管G3均关闭。

[0015] 进一步地,每组IGBT开关管G1、G2、G3分别设有缓冲电路。

[0016] 进一步地,所述高压电源模块和所述低压电源模块分别与高压储能电容模块和低压储能电容模块并联,储能电容模块由一个或多个储能电容并联组成。

[0017] 进一步地,所述高压电源模块和所述低压电源模块包括变压器、整流器和滤波电路。

[0018] 进一步地,所述滤波电路为LC滤波器,用于滤除所述整流器输出的直流电压信号中存在的高频电压纹波。

[0019] 进一步地,所述数字控制器模块包括FPGA核心控制芯片、电压采样单元、触发信号接收端口和直流电流传感器。

[0020] 进一步地,所述直流电流传感器为基于磁通门技术的零磁通直流电流传感器。

[0021] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案,能够取得以下有益效果:

[0022] (1) 本发明通过数字控制器模块接收外部光纤触发信号以及对输出的电流信号进行采样,脉冲电源输出电流波形由外部触发信号控制,触发信号的上升沿为升流命令,触发信号的下降沿为降流命令,电流信号的脉冲长度由触发信号的脉宽决定;同时,数字控制器模块输出脉冲宽度调制(PWM)波和开关信号驱动功率转换单元中的开关器件,以实现高电压快速升流,低电压稳流,降低输出电流纹波。如此,本发明的电源输出电流波形可为梯形波,重复频率可达上千赫兹,而且电源可以工作在直流模式。

[0023] (2) 本发明还包括一组输出滤波器模块,用于降低输出电压信号的高频电压抖动,以及在输出电流降为零后与踢轨磁铁形成一个高阻尼振荡,减小电流稳定时间。

[0024] (3) 本发明采用IGBT作为电流开关,耐压能力更强,根据具体应用需求,重复频率可以达到上千赫兹;此外,本发明中使用的IGBT开关管和二极管均可以采用多个并联,以实现大电流输出,使得输出电流幅值为单个IGBT开关管的多倍。

附图说明

[0025] 图1为本发明提供的踢轨磁铁的脉冲电源的原理图;

[0026] 图2为本发明实施例提供的外部触发控制信号和开关管时序逻辑图;

[0027] 图3为本发明实施例提供的输出滤波器的电路结构图;

[0028] 图4为本发明实施例提供的滤波前外部触发控制信号和对应的输出电流波形示意图；

[0029] 图5为本发明实施例提供的滤波后外部触发控制信号和对应的输出电流波形示意图。

具体实施方式

[0030] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0031] 如图1所示，为本发明提供的踢轨磁铁的脉冲电源的原理图。其中，踢轨磁铁用于质子治疗装置点扫描过程中电源点切换过程和能量切换过程中的束流快速开关；可工作在直流模式，在紧急情况下为治疗装置提供安全联锁；踢轨磁铁为脉冲电源主要负载，可以等效为一个电阻和一个电感的串联；本发明中踢轨磁铁的脉冲电源方案是使用高电压升流增加踢轨磁铁升流速度，使用低电压稳流降低输出电流纹波。

[0032] 踢轨磁铁的脉冲电源包括：

[0033] 前级稳压电源，包括一个高压电源模块和一个低压电源模块，将外接电网的交流电压信号转换为所需的直流电压信号；所述前级稳压电源包括变压器、整流器和滤波电路；所述滤波电路为LC滤波器，用于滤除所述整流器输出的直流电压信号中存在的高频电压纹波。

[0034] 功率转换单元，包含三组IGBT开关管G1、G2、G3和三组二极管D1、D2、D3，每组IGBT开关管至少包括一个IGBT开关管，每组二极管至少包括一个二极管；

[0035] 数字控制器模块，一端用于接收外部触发信号，一端连接功率转换模块输出两路脉冲控制信号和一路PWM驱动信号，另一端对电源的输出电流信号进行采样。

[0036] 在本实施例中，高压电源模块输出直流电压为400V，低压电源模块输出直流电压为13V；脉冲磁铁负载可以等效为一个60 μ H的电感负载 L_M 和一个4.1m Ω 电阻负载 R_M 的串联；数字控制器模块是踢轨磁铁的脉冲电源控制最主要的部分，基于FPGA研发，用于接受外部光纤触发信号、进行电流波形控制和电流的闭环PI运算、输出脉冲宽度调制(PWM)波和开关信号驱动电路中的开关器件，以及为踢轨磁铁的脉冲电源提供本地/远程控制 and 相应的硬件联锁保护。

[0037] 如图2所示，为本发明实施例提供的外部触发控制信号和开关管时序逻辑图，脉冲电源外部触发控制信号为光纤脉冲信号，外部触发控制信号的上升沿为升流命令，外部触发控制信号的下降沿为降流命令，电流脉冲的长度由外部控制信号的脉宽决定；根据电流控制的过程，整个电流的脉冲过程可以分为升流阶段、稳流阶段和降流阶段。

[0038] 在所述升流阶段，数字控制器模块打开IGBT开关管G1和G3，高压电源模块使踢轨磁铁快速升流，电流流过 C_H ，G1，踢轨磁铁，G3；当电流到达预设值后，G1关闭，而后电源进入稳流阶段，IGBT开关管G2受PWM信号闭环控制，此时相当于一个Buck电路；在降流阶段，所有的IGBT开关管G1、G2、G3都会关闭，踢轨磁铁中有电流通过从而存储了磁场形式的能量，只能通过单向电流，因此开关管关断后踢轨磁铁中的能量通过二极管D3对高压储能电容进行

充能,直至电流降为0。在电流降为0后,输出滤波器与踢轨磁铁形成一个高阻尼振荡,消耗储存在输出滤波器电容中的能量。

[0039] 在本实施例中,电流持续时间由外部触发控制信号脉冲宽度决定,当脉冲宽度无限长时,电源工作在直流模式。

[0040] 在升流阶段,开关管G1的开通时间为:

$$[0041] \quad T = \frac{L_M I_0}{V_H}$$

[0042] 式中, L_M 是踢轨磁铁的电感, V_H 是高压电平, I_0 是为电流预设值。在安装调试过程中,开关管G1的开通时间根据实际负载情况进行调整,以降低输出电流的升流超调量。

[0043] 在稳流阶段,开关器件G2的PI参数的占空比从某一个固定值开始,以降低从升流状态到稳流阶段的过渡时间,减小电流的漂移。

[0044] 在本实施例中,高压储能电容相当于给后面开关电路提供了一个“能量池”,这一方面提高了稳压源电压稳定性,另一方面有利于提高电源运行效率;在升流和降流阶段,高压储能电容中的电压变化应控制在一定范围内,高压储能电容应满足:

$$[0045] \quad C_H \geq \frac{L_M I_0^2}{2\Delta V * V_H}$$

[0046] 此处, ΔV 为高压直流电压变化范围。在本实施例中,与高压电源模块并联的储能电容数值为20mF。

[0047] 在本实施例中,所述二极管D2是作为隔离二极管,其作用是在升流阶段保护低压电压模块。

[0048] 在本实施例中,所述光纤触发接口为多模ST接口。

[0049] 在本实施例中,所述直流电流传感器是基于磁通门技术的零磁通电流传感器,本实施例中采用的电流传感器是LEM公司生产的ITN 600-SULTRASTAB。

[0050] 在本实施例中,所述直流电流传感器输出两端与取样电阻相连接,取样电阻数值范围为0-25 Ω ,在本实施例中采用威世公司生产的VPR系列低温漂无感电阻,取样电阻数值为5 Ω 。

[0051] 在本实施例中,所述数字控制器模块的采样单元两端与直流电流传感器取样电阻相并联。

[0052] 在本实施例中,所述IGBT开关管G1、G2、G3均采用两个1200V/600A的IGBT开关器件并联而成;所述IGBT开关管G1、G3与数字控制器开关控制信号相连,IGBT开关管G2与数字控制器PWM信号相连;所述PWM开关信号开关频率为20kHz。

[0053] 此外,还包括一组输出滤波器模块,用于降低输出电压信号的高频电压抖动,以及在输出电流到达零后与负载形成一个高阻尼振荡。

[0054] 在本实施例中,所述输出滤波器模块为一组LCR滤波器,滤波器两端与电源输出端子相连接。

[0055] 如图3所示,为输出滤波器原理图,在本实施例中,所述输出滤波器电感值一般取值较小,小于负载脉冲磁铁电感的十分之一,在本实施例中电感取2 μ H;R1和C1一般取值较小,其目的是与滤波电感形成一个低通滤波电路,减小由IGBT开关管G1、G2、G3和二极管D1、

D2、D3开通/关断过程引起的高频电压抖动,在本实例中R1取 $1\ \Omega$,C1取 $0.47\ \mu\text{H}$;R2,C2数值较大,在电流降到零后与负载脉冲磁铁形成一个高阻尼振荡,减小电流稳定时间,本实例中R2取 $10\ \Omega$,C2取 $1\ \mu\text{H}$ 。

[0056] 如图4所示,为本实例中无输出滤波器的输出电压波形和输出电流波形,在没有输出滤波器的条件下,输出电压波形存在高频电压振荡的问题,这样很难满足电源电磁兼容设计要求。

[0057] 如图5所示,为本实例中包含完整输出滤波器的电流波形和电压波形,由测试结果可以看出,电压振荡消失,输出电流为 510A ,电流上升时间约为 $61\ \mu\text{s}$ 。从图中可以看出,在电流上升过程中,电流线性上升,电流达到目标值之后,脉冲电源迅速进入稳态阶段,电流几乎无超调;在稳流阶段,由于PI调整器初始值为固定值,可以实现从升流过程到稳流过程的快速转化,而且输出电流无漂移;在电流降为零后,负载与输出滤波器形成一个高阻尼振荡,大概需要耗费 $30\ \mu\text{s}$ 才能将电流降为零。在整个过程中输出电压在多个电平之间无缝切换,实现了输出电流的快速稳定的输出,相比于传统的BUMP、kicker或踢轨磁铁电源,输出电流波形为类梯形波,而且可以一直工作在直流状态。

[0058] 在本实施例中,所述输出滤波器电阻采用无感功率电阻,并安装在一块水冷板上,以降低高频运行过程中滤波器电阻的温度。

[0059] 需要说明的是,上述开关电源模块的数量、电压值的高低、以及开关管的数量仅用于说明本具体实施例,其并非用以限定本公开,任何本领域技术人员,在不脱离本公开的技术思想所做的适应性的调整,均不脱离本公开的保护范围。

[0060] 本发明的踢轨磁铁的脉冲电源是基于高压升流、低压稳流的方案,由此所得到的该脉冲电源的特点如下:其输出电流波形为类梯形波脉冲电流,其工作频率为 $0\text{-}1\text{kHz}$,其电流波形底宽和顶宽可以自由控制,而且可以工作在直流状态;触发脉冲为光纤信号,触发信号的上升沿为升流命令,触发信号的下降沿为降流命令,电流脉冲的长度由触发信号的脉宽决定;采用IGBT作为电流开关,耐压能力更强,根据具体应用需求,重复频率可以达到上千赫兹。此外,本发明中使用的IGBT开关管和二极管均可以采用多个并联,以实现大电流输出,使得输出电流幅值为单个IGBT开关管的多倍。

[0061] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

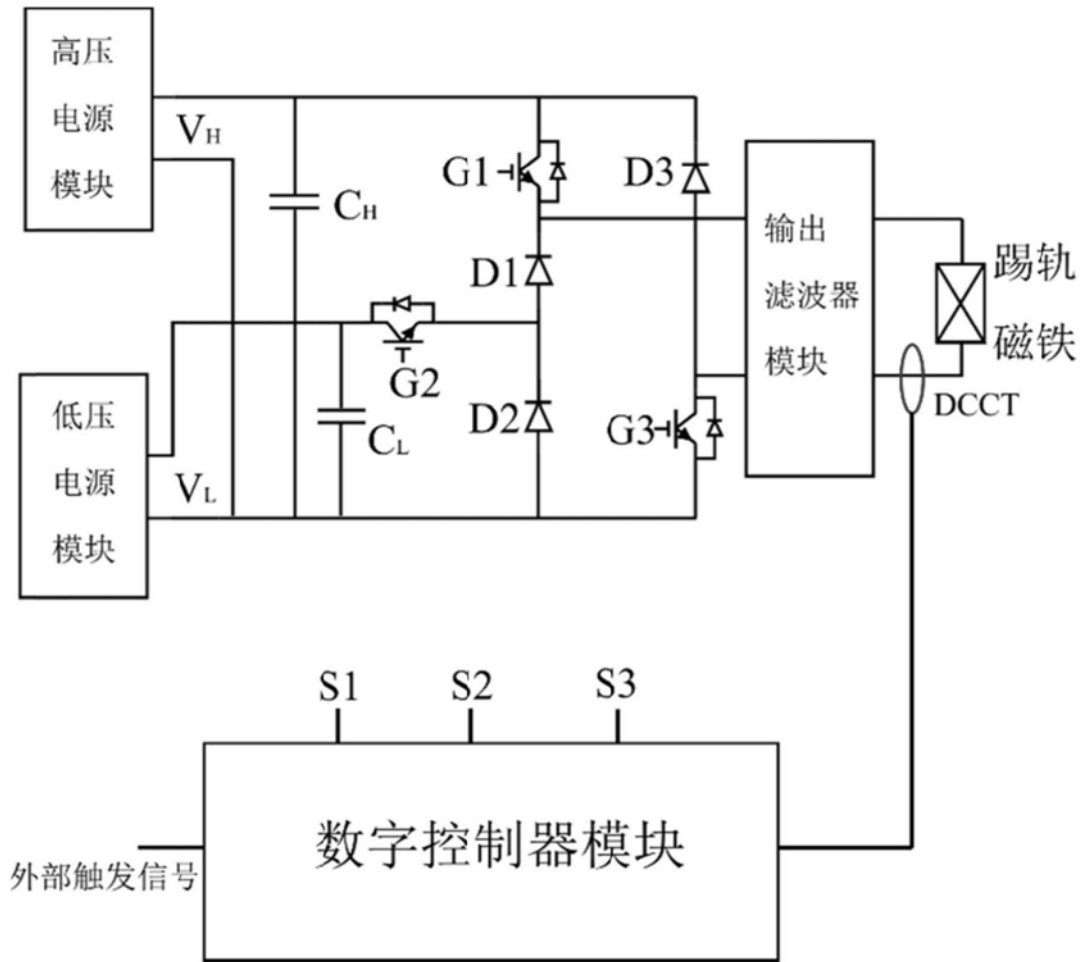


图1

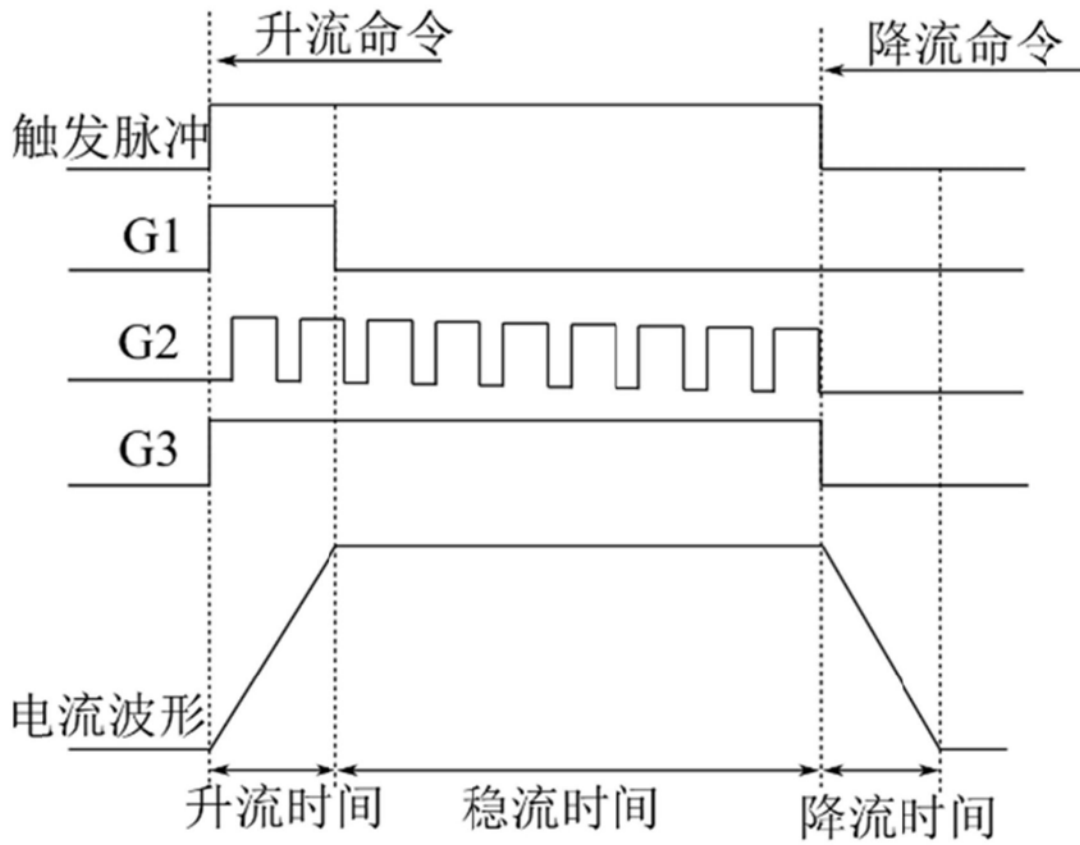


图2

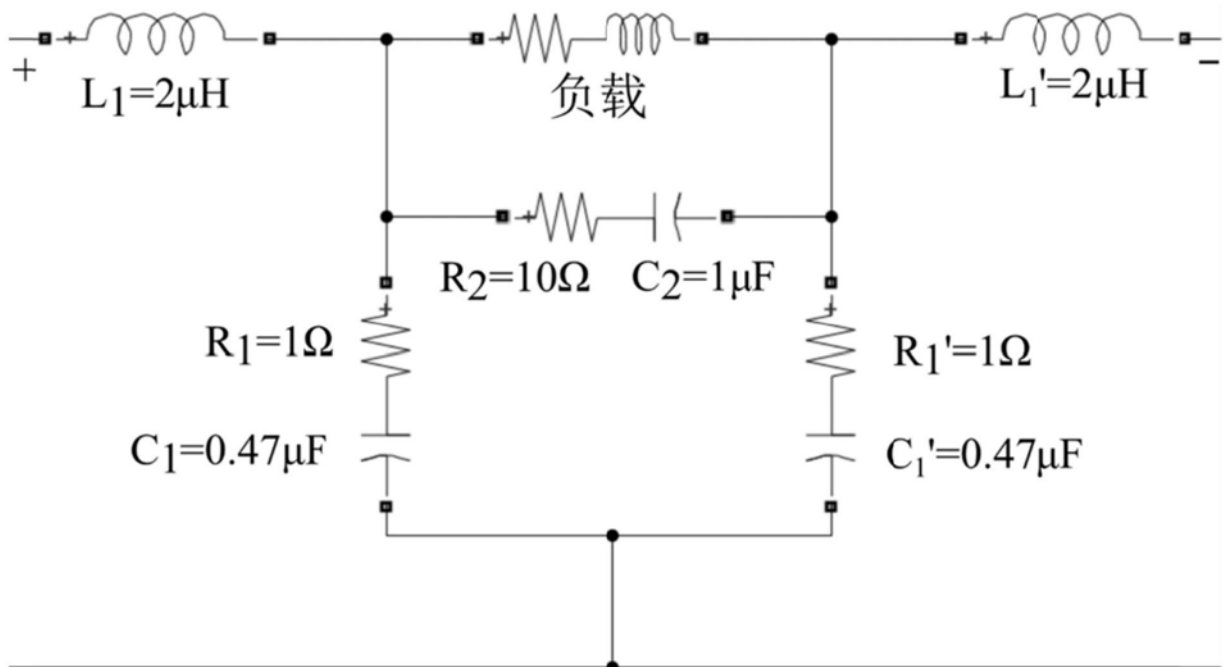


图3

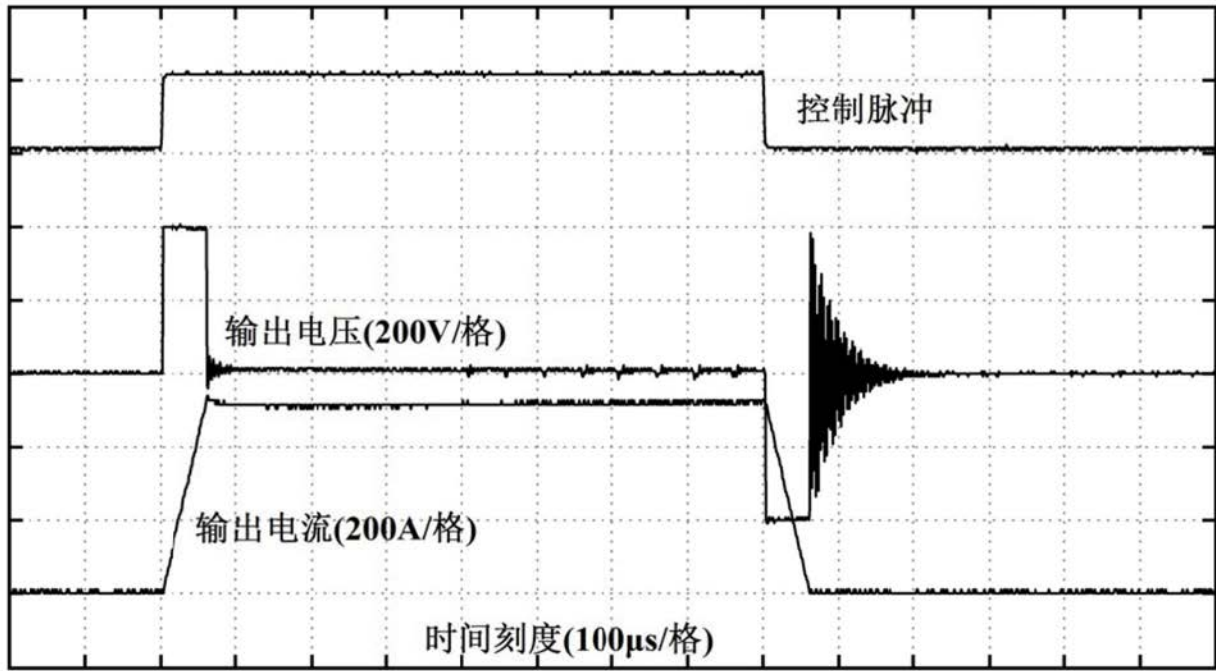


图4

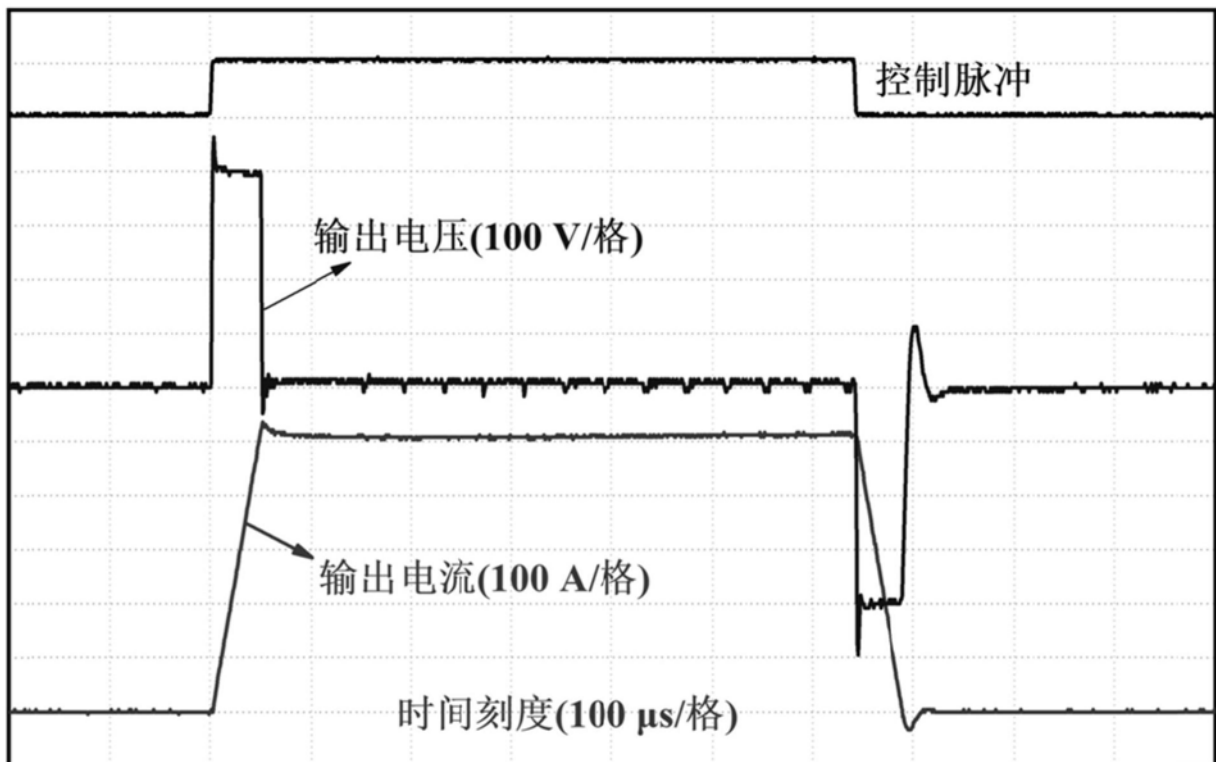


图5