

文章编号: 1001-4322(2003)06-0621-04

用磁开关产生重复频率多路同步高压脉冲*

谢 敏, 马成刚, 丁伯南, 冯宗明, 刘云涛, 马 军

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍一种重复频率多路同步高压脉冲产生装置。该装置利用一个高压脉冲变压器对并联的多根脉冲形成线谐振充电, 每根脉冲形成线用一个磁开关作为它的脉冲形成开关, 通过调整每个磁开关的伏·秒数并使其一致, 从而获得同步输出的多路高压脉冲, 整个系统的重复频率则由调控氩闸流管来控制。该装置具有 kHz 重复频率、同步精度小于 2ns。

关键词: 磁开关; 脉冲变压器; 多路脉冲; 同步; 重复频率

中图分类号: TN782 **文献标识码:** A

大型的脉冲功率系统中, 常常需要多路同步高压脉冲, 并对脉冲的波形、同步精度、稳定性、可靠性等都有严格的要求。例如直线感应加速器的加速电压^[1], 要求脉冲波形为方波, 各脉冲顶部电压变化小于 ±1%; 系统时间抖动小于 2ns; 各次电压幅值波动小于 ±1%; 系统失控率要小于 0.02%。对火花隙开关的触发电压^[2]而言, 也要求高压脉冲的电压上升陡度至少要大于 5kV/ns, 甚至要求 10kV/ns 以上, 且要求多路精确同步。

产生多路重复频率同步高压脉冲的基本原理如图 1 所示。系统中的每根脉冲形成线都有对应的脉冲形成开关, 这使每路的输出脉冲电压上升前沿不随系统路数的增减而变化。要产生 n 路的同步高压脉冲, 就需要控制 n 个脉冲形成开关使其同步工作。而整个系统的同步精度、稳定性、可靠性、重复频率等, 均由 n 个脉冲形成开关的性能决定。

在这样的系统中, 磁开关用作脉冲形成开关具有显著的优点。第一, 磁开关的重复频率理论上可达 10^5 Hz 量级; 第二, 磁开关的开关延时的一致性可预先调节且开关抖动小; 第三, 磁开关的可靠性高; 第四, 不需外加同步控制触发系统。本文将介绍就这一问题开展的研究工作及原理性实验结果。

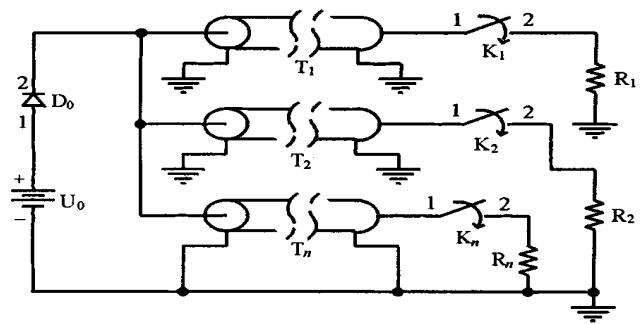


Fig. 1 Circuit of the multi-pulse high-voltage synchronous discharge
图 1 产生多路同步高压脉冲的基本原理图

1 基本原理

磁开关实质上是由非线性可饱和电感器和复位电路等组成的阻抗变换系统。它具有极高的可靠性、几乎是无限的使用寿命、GW 量级的峰值功率和可达 10^5 Hz 量级的重复频率。

它的基本原理是利用了铁磁材料饱和时, 其饱和磁导率 (μ_{sat}) 要较铁磁材料的未饱和磁导率 (μ_{unsat}) 小数个量级的现象。因为磁路元件的电感与它的磁导率成正比, 所以磁开关有两个电感值, 它们分别由 μ_{unsat} 和 μ_{sat} 来决定。当铁磁材料未饱和时, μ_{unsat} 很大, 对应的电感值也很大, 此时磁开关在线路中表现为开路状态; 当铁磁材料饱和时, 它的 μ_{sat} 很小, 对应的电感值也很小, 此时磁开关在线路中表现为闭合状态。

磁开关的饱和电感 L_{sat} 由下式决定

$$L_{sat} = \mu_0 \mu_r N^2 A / l = 3.77 N^2 A / l \quad (1)$$

式中: L_{sat} 的单位为 μH , μ_0 为真空导磁率, μ_r 为相对导磁率(磁芯饱和时, $\mu_r = 3$), N 为磁开关的线圈匝数, A_c 为磁开关线圈的横截面积 (m^2), l 为磁开关铁芯的等效圆周长 (m)。

假设磁开关用 6 块外径 500mm、内径 300mm、高度 20mm 的铁芯组成, 则其饱和电感 L_{sat} 为

$$L_{sat} = \mu_0 \mu_r N^2 A_c / l = 0.036 N^2 \quad (2)$$

* 收稿日期: 2002-07-17; 修订日期: 2003-02-10
基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目资助课题(96-910-02-01)
作者简介: 谢 敏(1965-), 男, 副研究员, 从事高功率脉冲技术研究; 绵阳市 919 信箱 107 分箱。

当磁开关的线圈匝数为 5 匝时, L_{sat} 为 900nH。

单脉冲形成线的输出脉冲电压上升前沿 t_r 由下式决定

$$t_r = 2.2L / (R + Z) = 2.2(L_{\text{sat}} + L_{\text{load}}) / (R + Z) \quad (3)$$

式中: L_{load} 为放电回路的杂散电感; R 为负载阻抗; Z 为脉冲形成线阻抗。

假设脉冲形成线阻抗和负载阻抗都等于 75 Ω , 要求高压脉冲的上升前沿小于 20ns 时, 则 $(L_{\text{sat}} + L_{\text{load}})$ 应小于 1.363 μH 。当 L_{sat} 为 900nH 时, $(L_{\text{sat}} + L_{\text{load}})$ 小于 1.363 μH 的条件应不难满足。

磁开关还有一个重要的参数就是伏-秒数, 定义为

$$= N B A C_0 S = \int_0^t U(t) dt \quad 0.5 UT \quad (4)$$

式中: S 为磁开关铁芯的填充系数; $B = B_s - B_r$, B_r 为剩余磁感应强度, B_s 为饱和磁感应强度; U 为脉冲形成线上的峰值电压; T 为脉冲形成线的充电时间。

当磁开关的铁芯大小、铁芯数量、线圈匝数确定以后, 磁开关的伏-秒数就是一定的, 对脉冲形成线的充电时间越长, 则在脉冲形成线上可获得的电压就越低。

假设磁开关用 6 块外径 500mm、内径 300mm、高度 20mm 的铁基非晶磁环作铁芯, 线圈匝数为 5 匝, B 为 2.6T, S 为 0.7, 则其伏-秒数为 0.109 2V \cdot s。若脉冲形成线的充电时间为 1 μs , 则脉冲形成线上电压可达 200kV 以上; 若脉冲形成线的充电时间延长为 3 μs , 则脉冲形成线上电压只能达到 70kV。

因此, 在不影响脉冲形成线的充电均匀性的前提下, 应尽量缩短对脉冲形成线的充电时间。要实现高重复频率, 用传统的 Marx 线路给脉冲形成线充电是不行的, 改为使用氢闸流管和脉冲变压器技术对脉冲形成线充电^[3-5], 其基本原理如图 2 所示。

这样的脉冲形成线充电线路, 不会影响输出脉冲的上升前沿。只是在充电时间太快而导致脉冲形成线的充电均匀性不好时, 才会影响输出脉冲的波形平顶。而充电时间的长短, 主要受限于氢闸流管的最大峰值电流值, 即脉冲变压器原边的最大放电电流值。

若选择 10kA/40kV 的氢闸流管作放电管 (K_2), 将对脉冲形成线的充电时间控制在 3 μs 内, 那么至少

可输出 16 路脉冲宽度为 150ns 的 100kV 高压脉冲到 16 路 75 Ω 的匹配负载上, 一只功率系数为 100×10^9 (即氢闸流管峰值阳极电压、峰值阳极电流和重复频率三者的乘积) 的氢闸流管可使该系统具有 250Hz 的重复频率。

在进行系统设计时, 首先应完成脉冲形成线充电回路的设计, 设计原则是在保证脉冲形成线的充电均匀性的条件下, 使充电时间尽可能的短 (即让 L_{unsat} 尽可能的大)。对脉冲形成线充电期间, 应使下列条件同时得到满足

$$L_{\text{unsat}} \gg 1/\omega \quad (5)$$

$$L_{\text{unsat}} \gg R \quad (6)$$

式中: C 为脉冲形成线的电容, ω 为谐振角频率。

满足 (5) 式的条件, 使磁开关表现为高阻状态。此时相对于脉冲形成线充电回路, 脉冲形成线的放电回路表现为开路, 从而保障系统的能量传输效率。满足 (6) 式的条件, 则可尽量减小负载上的预脉冲。当将预脉冲尽量减小后, 磁开关由断路状态转为闭合状态 (由大电感跳变为小电感) 的响应时间, 就只是作为一段固有开关时延而存在, 而不会影响输出脉冲电压上升前沿 (前提条件是预脉冲小于输出脉冲电压幅值的 10%)。

在确定了 L_{unsat} 之后, 进而可确定磁开关的伏-秒数。在磁开关的伏-秒数为一定值的情况下, 还可通过调整磁开关的铁芯大小、铁芯数量和线圈匝数等手段, 改变磁开关的电感值, 来满足 (5) 式和 (6) 式的要求。

用磁开关来作脉冲形成开关, 要使 n 个磁开关同时动作, 要求它们要有相同的伏-秒数。在磁开关铁芯的生产过程中, 不可能保证每个磁开关铁芯的填充系数和 B 均一致, 在设计时须对铁芯进行挑选和合理搭配。

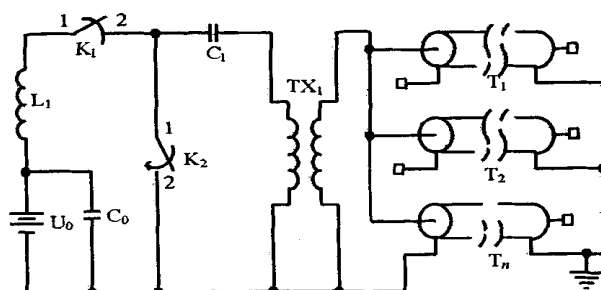


Fig. 2 Charge circuit of the multi-pulse forming line by pulse-transformer

图 2 利用脉冲变压器给多根脉冲形成线高重复频率充电的基本原理图

2 实验研究

如前所述,实现多路同步高压脉冲的关键是调整多个磁开关的伏-秒数使其一致。为此安排的原理性实验线路如图 3 所示。去掉了图 2 中的谐振充电线路(充电管 K_1 控制的部分),用一个直流高压源直接加在中间储能电容器 C_0 上, K_f 为一个氢闸流管, TX_1 是变比为 1 1 的脉冲变压器,脉冲变压器的副边并联两根 25 的脉冲形成线,脉冲形成线的电长度为 175ns,每根脉冲形成线后接一个磁开关,磁开关后接 25 的匹配电阻。测试方法是:用两个 P6015A 高压探头(分压比为 1 1000)分别监测两个电阻负载(R_1 和 R_2)上的脉冲电压波形,用一台 TDS744A 示波器进行记录。

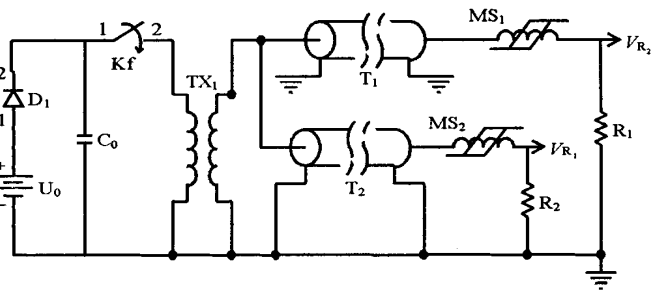


Fig. 3 Experimental circuit of the multi-pulse high-voltage synchronous discharge by magnetic switch
图 3 用磁开关产生多路同步高压脉冲的原理性实验线路图

安排这样的原理性实验线路的理论依据是:两根脉冲形成线上的充电电压波形是一致的,若两个磁开关的伏-秒数相同,则两个磁开关将会同时动作,在电阻 R_1 和 R_2 上会分别监测到相同脉冲宽度的电压波形;若两个磁开关的伏-秒数不相同,则两个磁开关不会同时动作,在电阻 R_1 和 R_2 上会监测到脉冲宽度不相同的电压波形。理论数值模拟计算的典型结果见图 4(a)和图 4(b)。图 4(a)是伏-秒数完全相同时的计算结果;图 4(b)是伏-秒数相差很大时的计算结果。

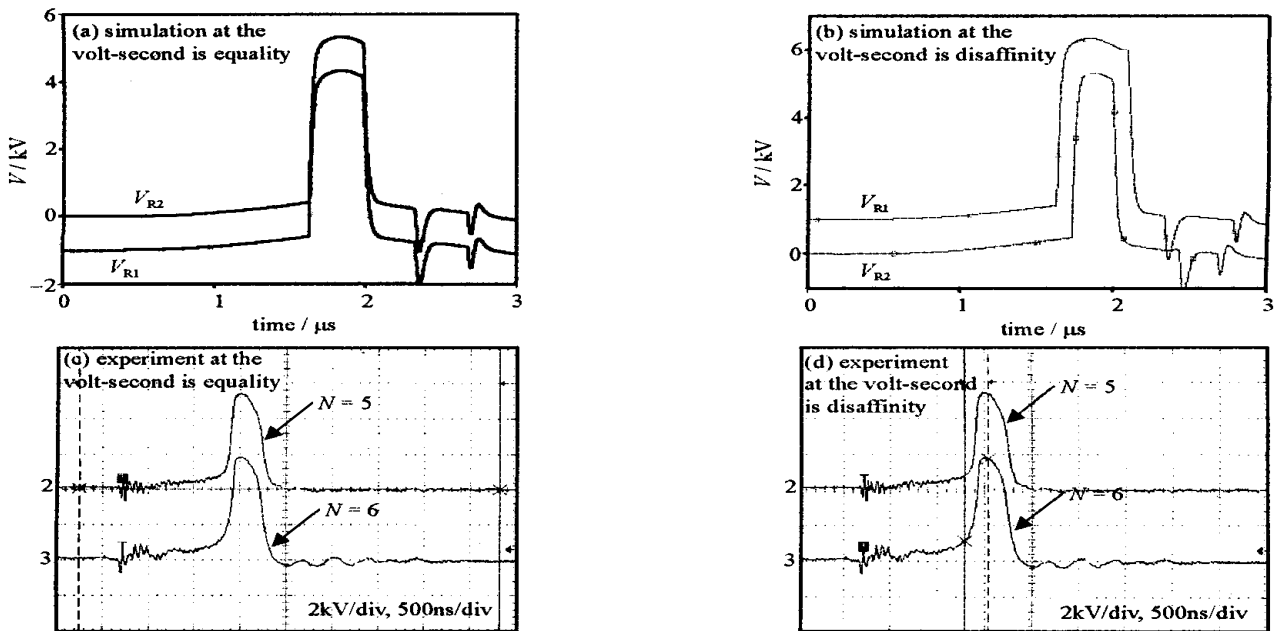


Fig. 4 Typical simulation and experimental oscillograms
图 4 典型的模拟计算波形和实验示波图

两个磁开关都用一个外径 100mm、内径 60mm、高度 20mm 的铁基非晶磁环作铁芯,线圈用电缆芯线绕制而成。由于两个磁环的填充系数和 B 存有差异,导致两个磁开关的线圈匝数不一样,一个是 5 匝线圈,一个是 6 匝线圈。两个磁开关的线圈匝数不一样是极端情况,当用多个磁环作铁芯时,由填充系数和 B 引起的差异是容易消除掉的。

实验时电容器 C_0 上充电到 12kV,示波器记录到的脉冲电压波形典型示波图见图 4(c)和图 4(d)。图 4(c)是伏-秒数相同时的实验结果,图 4(d)是伏-秒数相差很大时的实验结果。通道 2 记录的是 5 匝线圈的磁开关,得到的输出脉冲电压幅值为 5.44kV,脉冲宽度为 357ns,上升前沿为 73ns;通道 3 记录的是 6 匝线圈的磁开关,得到的输出脉冲电压幅值为 5.88kV,脉冲宽度为 354ns,上升前沿为 98ns。

根据 (1) 式可以计算出两只磁开关的饱和电感,5 匝线圈的磁开关的饱和电感是 150nH,6 匝线圈的磁开关的饱和电感是 216nH,它们对输出脉冲电压上升前沿的影响分别是 6.6ns 和 9.5ns。而实际测量的输出脉冲电

压上升前沿分别是 73ns 和 98ns。

产生如此大差距的原因,是没有将负载上的预脉冲(在给脉冲形成线充电时产生的)压缩在输出脉冲电压幅值的 10% 以下造成的,从示波图上可清楚地分辨出来。

若两个磁开关完全同步动作,则两条脉冲形成线输出的脉冲电压宽度应相同;若两个磁开关的同步有时间差存在,则两条脉冲形成线输出的脉冲电压宽度不相同,时间差等于脉冲宽度差的一半^[6](见图 4(b)所示)。实验结果两条脉冲形成线输出的脉冲电压宽度分别是 357ns 和 354ns,它们的同步时间差则为 1.5ns。这证明了两个磁开关的伏-秒数是一致的;同时也证明了两个伏-秒数一致的磁开关,是可以同步工作的;还证明了尽管磁开关铁芯的填充系数和 B 存有差异,仍可通过调整磁开关的线圈匝数,将多个磁开关的伏-秒数调整到一致。

这样的线路设计,系统的重复频率将完全由氢闸流管的功率系数大小来决定。在不超过氢闸流管的功率系数的条件下,氢闸流管本身的重复频率最高可达 10kHz。

3 结 论

通过一个脉冲变压器给多根并联的脉冲形成线充电,用磁开关作为每根脉冲形成线的脉冲形成开关,可以产生多路的同步高压脉冲。这样,就将几百 kV、甚至上 MV 的脉冲形成开关的同步控制问题,转变成几十 kV 的脉冲调制开关同步控制问题;将大量的开关同步控制问题,转变成小数量的开关同步控制问题。

当需要高重复频率时,可使用氢闸流管来进行脉冲调制,给脉冲形成线充电,从而使整个系统具有高重复频率。若不需要高重复频率,可用吹气式火花隙开关替代氢闸流管来进行脉冲调制,氢闸流管只能传输 10kA 的脉冲电流,火花隙开关可以传输上百 kA 的脉冲电流,这样就可实现更大的脉冲功率。

参考文献:

- [1] Downing J, Parsons W M, Earley L M, et al. Pulsed power systems for the DARHT accelerators[A]. Eighth IEEE International Pulsed Power Conf[C]. San Diego, CA, 1991.
- [2] Platts D. 10Joule 200kV mini Marx[A]. 5th IEEE Pulse Power Conference[C]. Arlington, Virginia, USA, 1985. 834—836.
- [3] 丁伯南, 戴光森, 尹华碧. 磁脉冲压缩器用脉冲变压器的设计[J]. 强激光与粒子束, 1989, 1(3):220—228. (Ding B N, Dai G S, Yin H B. The design of pulse-transformer for magnetic pulse compression. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989, 1(3):220—228)
- [4] Cook E G, Ball D G, Birx D L, et al. High average power magnetic modulator for copper lasers[A]. Eighth IEEE International Pulsed Power Conf[C]. San Diego, CA, 1991.
- [5] 谢 敏, 丁伯南, 刘云涛, 等. 脱硫用重复频率脉冲电源设计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):434—436. (Xie M, Ding B N, Liu Y T, et al. Design of pulse voltage generator with repeat frequency for DeSO₂. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3):434—436)
- [6] 米夏兹 A. 大功率毫微秒脉冲的产生[M]. 北京:原子能出版社, 1982. 77—79. (Mec . . . The generation of high-power Nanosecond pulse. Beijing: Chinese Atomic Energy Press, 1982. 77—79)

High repetition rate and synchronous multi-pulse generated by magnetic switch

XIE Min, MA Cheng-gang, DING Bo-nan, FENG Zong-ming, LIU Yur-tao, MA Jun
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 107, Mianyang 621900, China)

Abstract: Parallel pulse-forming lines are charged through the high voltage pulse-transformer. Each of these lines includes a magnetic switch acting as pulse-forming switch. Adjusting the volt-second characteristic of the magnetic-switch, high voltage synchronous multi-pulses are generated. The frequency change is under the control of the thyatron. The whole system is thus characterised with high repetition rate, high synchronous precision, high stabilization and credibility.

Key words: Magnetic switch; Pulse-transformer; Multi-pulses; Synchronous; Repetition rate