

文章编号: 1001-4322(2007)08-1404-05

# 同轴-三平板型水介质脉冲输出开关实验研究\*

夏明鹤, 孟维涛, 丰树平, 王玉娟, 卫兵, 计策, 傅贞, 田青,  
任靖, 卿艳玲, 谢卫平, 李洪涛, 邓建军

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 设计了用于脉冲功率装置的 4 MV 水介质同轴-三平板型输出开关。该脉冲功率装置将由 24 路相同的独立模块组成, 每路模块由 Marx 发生器、中间储能器、激光触发气体开关、脉冲形成线、水介质脉冲输出开关、脉冲传输线等组成。水介质脉冲输出开关是同轴-三平板结构水介质多通道自击穿开关, 由输入输出电极、预脉冲屏蔽板和连接部件组成。进行了有预脉冲屏蔽板结构和无预脉冲屏蔽板结构的自击穿开关实验研究。有预脉冲屏蔽板结构开关的输入、输出电极都是半球电极, 直径分别是 8 cm 和 5 cm; 无预脉冲屏蔽板结构开关为针-板结构, 输入电极为平板电极, 输出电极为直径 3 cm 的电极棒。Marx 发生器充电 70 kV, 开关的击穿电压为 3 MV, 放电电流为 450 kA。在 3 MV 等级的击穿电压下, 有预脉冲屏蔽板结构开关的抖动约 6 ns, 没有预脉冲屏蔽板结构开关的抖动减小至 3 ns。

**关键词:** 自击穿开关; 去离子水; 预脉冲; 抖动

**中图分类号:** TN782      **文献标识码:** A

为了研制多路并联输出、负载电流为数 MA 的超大型脉冲功率装置, 建造了包含 Marx 发生器、脉冲形成单元和脉冲传输单元的单个模块(下称单路样机), 使用匹配水电阻假负载。本文进行的水介质脉冲输出开关实验研究在该单路样机上进行, 实验装置如图 1 所示, 图中的 WS 是脉冲输出开关。脉冲输出开关是脉冲形成线输出开关, 连接脉冲形成线和传输线, 对传输的电脉冲进行二次压缩。由于前面的主同步开关对 Marx 发生器输出电脉冲进行了初步压缩, 脉冲输出开关的输入脉冲前沿上升较快, 故脉冲输出开关常常是多通道开关。在“闪光-”装置上进行了同轴多通道水介质自击穿开关实验<sup>[1-3]</sup>, 开关由 2 个或 4 个开关间隙、预脉冲屏蔽板(PPS)及其支撑结构组成。在此基础上, 设计了水介质脉冲输出开关, 开关为多通道同轴-三平板型水介质自击穿开关<sup>[4]</sup>, 并在 1.5~3.0 MV 电压等级下进行了系列性能实验研究。进行了有和没有预脉冲屏蔽板结构(PPS)状况下的性能实验, 并得出初步的对比判断。



IS; intermediate store; LTS; laser triggered gas switch; PFL; pulse forming line;  
WS; self-breaking water switch; TP; water insulated tri-plate transmission line

Fig. 1 Scheme of the pulse power machine

图 1 实验装置组成示意图

在国内的大型脉冲功率装置中, “闪光-”装置使用单间隙的自击穿水介质开关作为主开关, “强光-”装置使用针型电极的自击穿水介质开关, 但是由于没有多路同步性的要求, 开关的抖动没有特别的要求。在国外, 需要多路同步的大型脉冲功率装置如 Z 和 ZR 装置以及为 ZR 研制主要作为开关实验平台的 Z20 都使用多通道水介质自击穿开关。Z 装置使用的是具有 PPS 的同轴型水介质自击穿开关, 运行电压约 4 MV, 导通电流约 500 kA, 抖动约 3.0 ns。Z20 实验平台使用多通道同轴-三平板型水介质自击穿开关, 其电极间隙为球-球间隙, 实验的间隙数目为 1~8 个, 最后采用 3 个电极间隙, 其运行电压约 4 MV, 导通电流 550~650 kA, 抖动 2.5 ns。

本研究通过 J. C. Martin 经验公式计算, 考虑到开关间隙之间的渡越时间的影响, 结合单路样机的具体参数, 开关间隙数目取为 3, 这时开关电感和电流导通能力为相对最佳。采用同轴-三平板型水介质自击穿开关作

\* 收稿日期: 2006-12-12; 修订日期: 2007-05-18  
基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题  
作者简介: 夏明鹤(1974—), 男, 助研, 从事脉冲功率技术研究工作; xiamh@mail.china.com。

为脉冲输出开关,解决了从同轴形成线到三平板传输线的过渡问题,而间隙的球-板结构减小了开关区的长度和开关电感,抖动较小。小抖动和低电感解决了建造多路并联脉冲功率装置的同步性和开关电流的导通能力等关键问题。开关抖动以及电脉冲的输入参数对开关性能的影响等是文章研究的重点。

### 1 开关设计简介

开关结构设计为同轴直接过渡到三平板传输线结构类型,由预脉冲屏蔽板、多个电极间隙和支撑结构组成。电极间隙间距  $d = U / E_{av}$ ,开关击穿电压  $U$  设计为 4 MV。开关按照正流柱模式、充电时间为 108 ns 设计,其有效作用时间取为 40 ns (大于 63 % 击穿电压的充电时间),由 ZR 装置的设计经验公式<sup>[5]</sup> 计算开关间隙的平均场强  $E_{av}$  (单位 kV/cm)

$$f = E_{av} t_{eff}^2 / 100 \tag{1}$$

式中:  $f$  为常数因子(击穿概率因子);  $t_{eff}$  为有效作用时间(单位  $\mu s$ )。

由 Martin 公式<sup>[6,9]</sup> 推导开关放电通道数目与开关上升时间的关系并结合开关使用条件可得开关导通产生的有效放电通道数目,即开关最多可以安装的电极间隙数目。由装置参数和开关运行条件,计算出开关通道数目大于 4,由于计算需满足实验需求及受装置空间结构限制,开关设计为 3 通道开关,3 个开关间隙线性排列。

开关安装在装置的脉冲形成线和三平板传输线之间,由三对放电电极、预脉冲屏蔽板(PPS)和电流测试环、以及开关支撑结构组成,如图 2(a),去掉 PPS 的结构如图 2(b)。预脉冲屏蔽板可以去掉不使用,电极可以使用不同结构。在实验中,分别进行了有预脉冲屏蔽板结构和去掉屏蔽板结构的开关实验研究。有屏蔽板结构采用球-球间隙,球电极直径为 80 ~ 50 mm;去掉屏蔽板结构后采用针-板间隙,输出电极为  $\phi 30$  mm 棒电极。无 PPS 结构的开关和电极烧蚀状况的照片如图 3 所示,开关电极放电次数约 300,开关性能没有明显下降迹

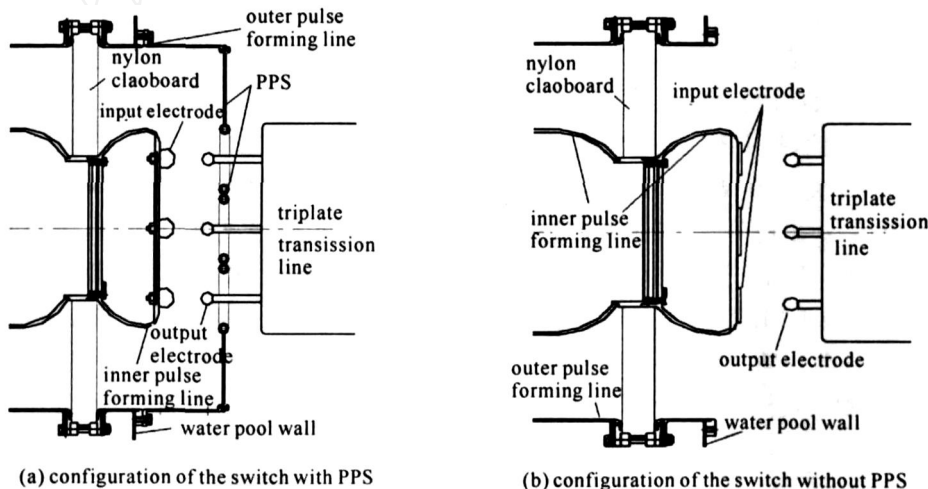


Fig. 2 Scheme of the water dielectric output switch  
图 2 水介质脉冲输出开关示意图

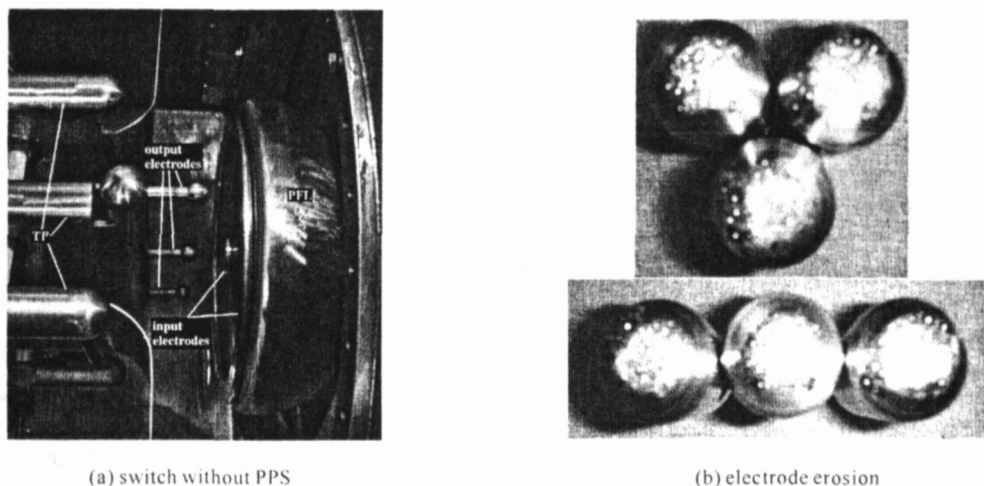


Fig. 3 Photos of the water dielectric output switch  
图 3 水介质脉冲输出开关照片

象。这两种结构都采用等间隙距离,变化间隙距离实验是下一步计划的研究重点之一。

### 2 实验研究

在同轴多通道水介质自击穿开关实验中得出水开关输入波形的最大值就是开关的击穿点的结论同样适用于本文开关的研究<sup>[1-3]</sup>,并采用测试水开关的电流信号加以验证。图 4 给出有和没有预脉冲屏蔽板结构开关的实验波形,开关击穿电压都是 3 MV,输出电压约 1.8 MV,有 PPS 时放电电流为 450 kA,无 PPS 时为 500 kA,有 PPS 的开关输出电压的预脉冲约为输入预脉冲的 25%,没有 PPS 时约 55%。

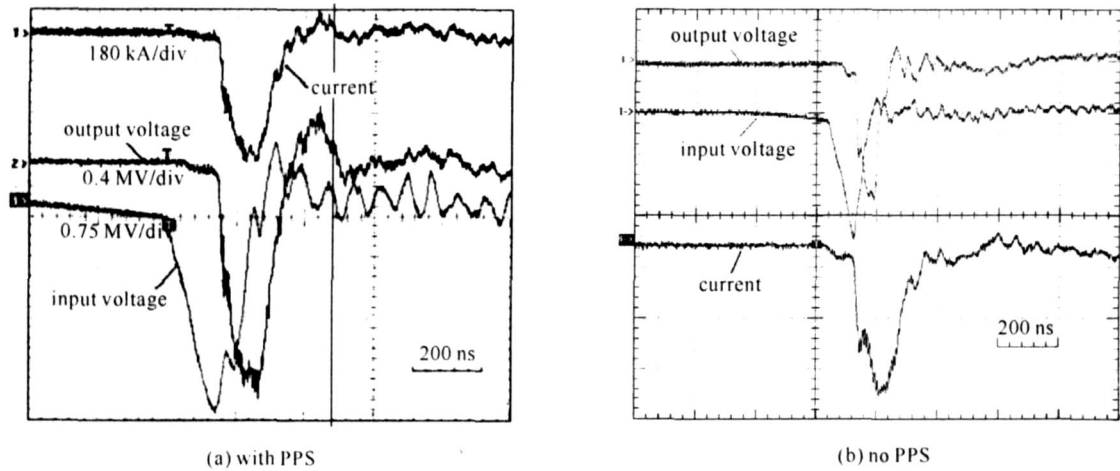


Fig. 4 Experimental waveforms of the water dielectric output switch

图 4 水介质脉冲输出开关的实验波形

在实验中发现,有 PPS 结构时,虽然预脉冲得到较好的压缩,然而开关电感较大,输出电流的上升前沿较大,这是由于有 PPS 时开关区的长度较长和输出电极杆较长。由于开关击穿抖动较大,达到 6 ns,不能较好地满足多路同步的要求。因此,把 PPS 去掉,压缩开关区的和输出电极杆的长度,把输入电极由球电极换为板电极,得到较理想的前沿,开关抖动减小至小于 3 ns。在图 4 中,有 PPS 的输出电流波形较平滑,无 PPS 时电流波形在主脉冲前沿约 25 ns 出现阶段性上升,这是因为开关电感减小,电流先较快上升,由于开关前后阻抗不匹配造成反射,使之出现非平滑上升状态。为了验证这一观点,在实验中,把 3 个间隙改为去掉中间电极间隙的 2 个间隙,得到的实验波形如图 5(a),由于放电通道的减少使得开关电感加大,开关输出电流波形出现类似有 PPS 结构时的状况,这与预期结果吻合,证实了开关确实形成了三个有效放电通道,也验证了使用 Martin 公式估算开关放电通道数目的适用性。图 5(b) 给出安装 3 个电极间隙和 2 个电极间隙时开关输出电压和输出电流波形。

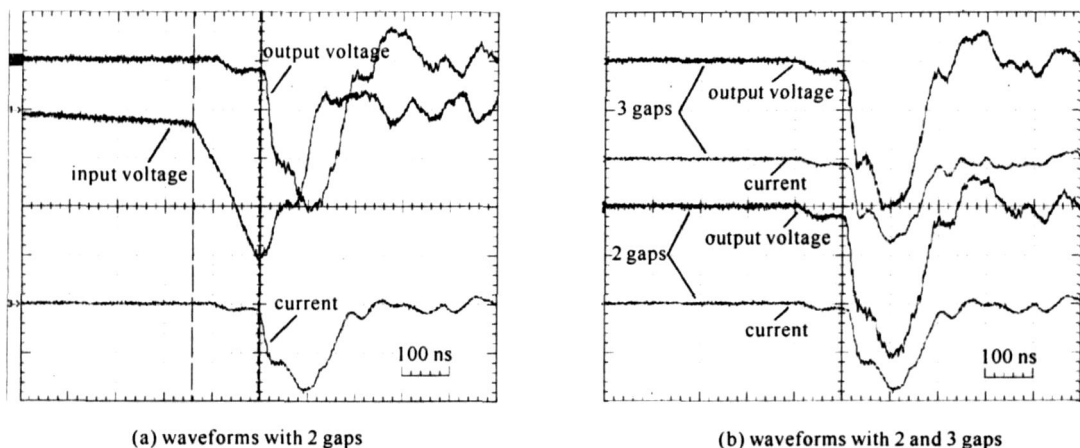


Fig. 5 Comparison of the experimental waveforms of the water dielectric output switch

图 5 水介质脉冲输出开关的实验波形对比

表 1 给出有/无 PPS 结构实验结果的对比情况,表中 break voltage 为脉冲输出开关的击穿电压,current 为脉冲输出开关的导通电流,charge time 为脉冲输出开关的充电时间即击穿迟滞时间,jitter 为充电时间的分散性即抖动,d 为间隙距离,N 为开关间隙数目。开关的通道数目和间隙距离对开关的抖动有影响,通道

数目较多,抖动较小,开关间隙距离较大则抖动较大。因此,在设计开关时应按照有利于形成多通道为准则,以减小开关抖动和开关电感。

表 1 水开关实验结果

Table 1 Result of the experiments

with or without PPS	break voltage/ MV	current/ kA	charge time/ ns	jitter/ ns	d/ mm	N
with	3.0	450	150	6.1	55	3
without	3.0	500	130	2.9	65	3
without	2.8	480	120	1.2	45	3
without	2.8	480	110	2.3	45	2
without	2.4	430	120	4.0	45	2
without	2.4	430	110	3.6	40	3
without	2.0	320	140	3.0	45	2
without	2.0	310	140	2.7	45	3

表 2 给出公式(1)的验证对比状况,表中  $E_{ca}$  为由公式(1)得到的间隙平均击穿场强计算值,  $E_{ex}$  为由公式(1)计算设定间隙距离后得到的间隙平均击穿场强实验值。公式(1)的仅对同轴-三平板结构自击穿水开关适用,有预脉冲屏蔽板结构的自击穿开关是否适用该公式不在研究范围。表 2 中在两个不同电压等级下的计算值和实验值的差别小于 5%,因此公式(1)可以作为该类型自击穿水开关的间隙距离设计及选取的估算依据。

表 2 验证公式(1)

Table 2 Validation of equation (1)

break voltage/ MV	charge time/ ns	d/ mm	N	$E_{ca}/ (kV \cdot cm^{-1})$	$E_{ex}/ (kV \cdot cm^{-1})$
3.0	130	65	3	456	477
2.0	140	45	3	439	444

表 3 给出有/无 PPS 时脉冲输出开关输入和输出预脉冲电压对比状况,有 PPS 时输出预脉冲电压约为输入幅值的 25%,没有 PPS 时输出预脉冲电压约为输入幅值的 50%~65%。然而,脉冲输出开关输出的预脉冲电压还是较大,若需进一步抑制,需添加预脉冲开关。

表 3 脉冲输出开关的预脉冲

Table 3 Prepulse of the water output switch

with or without PPS	break voltage/ MV	charge time/ ns	prepulse/ kV		d/ mm	N
			input	output		
with	3.0	150	266	62	55	3
without	3.0	130	331	210	65	3
without	2.8	120	334	174	45	3
without	2.4	110	320	183	45	3
without	2.0	140	207	107	45	3

### 3 结 论

设计了同轴-三平板结构的水介质自击穿开关,在单路样机上进行了实验研究,开关击穿电压 3.0 MV,导通电流 500 kA,击穿迟滞时间的抖动达到优于 3 ns。开关区域较短,这种结构的强流高功率开关可以较有效地压缩预脉冲,将预脉冲作用时间由约 300 ns 压缩至约 60 ns,幅值压缩至输入的约 50%。使用 PPS 可以将预脉冲幅值压缩至输入的约 25%,但是开关输出电极的引出杆和开关区较长,电感增加,抖动较大。然而,由于去掉 PPS,开关输出的预脉冲较大,在必须保证开关抖动的前提下,在多路并联装置的设计中在脉冲输出开关后的三平板传输线上将设计专门的水介质自击穿开关作为预脉冲开关。实验验证了开关结构主要参数的设计公式的适应性,达到了预期的目的,可以作为指导类似开关设计的依据。本文的实验研究在等间隙距离状况下进行,变化开关间隙距离即改变开关间隙击穿场强域值的研究工作将在此实验的基础上后续进行。

## 参考文献:

- [1] 夏明鹤,谢卫平,李洪涛等.低预脉冲水介质多通道自击穿开关实验研究[J].强激光与粒子束,2006,18(8):1363-1366. (Xia M H, Xie W P, Lih T, et al. Investigation of a lower prepulse water multi-channel self-breaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(8):1363-1366)
- [2] 夏明鹤,谢卫平,李洪涛,等.多通道自击穿水开关测试方法研究[J].强激光与粒子束,2005,17(11):1621-1625. (Xia M H, Xie W P, Lih T, et al. Test methods of multi-channel water self-breaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11):1621-1625)
- [3] 夏明鹤,卫兵,王玉娟,等.水介质自击穿开关放电参数测试研究[J].强激光与粒子束,2006,18(1):150-154. (Xia M H, Wei B, Wang Y J, et al. Investigation of discharge parameters test of water self-breaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1):150-154)
- [4] 夏明鹤,王勤,王玉娟,等.4 MV 同轴-三平板型水介质自击穿开关设计[J].强激光与粒子束,2006,18(3):496-500. (Xia M H, Wang M, Wang Y J, et al. Design of 4 MV Coaxial-triplate water pulse forming line switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3):496-500)
- [5] Struve K W, Corley J P, Johnson D L. Design options for a pulsed power upgrade of the Z accelerator[C]//13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas, Nevada USA, 2001:100.
- [6] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J C Martin on pulsed power[M]. New York:Plenum Press, 1996.
- [7] Harjes C, Elizondo J, Struve K, et al. Circuit modeling for ZR[A]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Texas USA, 2003:917.
- [8] Rosenthat S E, Pointon T D. Investigating the electromagnetic structure of the coax-to-triplate transition for the pulse-compression section of the Z-Accelerator[C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Texas USA, 2003:626.
- [9] Johnson D L, VanDevender J P, Martin T H. Low prepulse, high power density water dielectric switching[C]//2nd IEEE International Pulsed Power Conference. Lubbock, Texas, USA, 1979:191.

## Investigation of coaxial-triplate water dielectric output switch

XIA Ming-he, MENG Wei-tao, FENG Shu-ping, WANG Yu-juan, WEI Bing, JI Ce, FU Zhen,  
TIAN Qing, REN Jing, QING Yan-ling, XIE Wei-ping, LI Hong-tao, DENG Jiar-jun  
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** A 4 MV coax-to-triplate multi-channel water dielectric self-breaking switch is designed for the oil and water section of a pulse power machine. The machine contains 24 modules with identical components. Each module contains Marx generator, intermediate store capacitor, laser triggered gas switch, water pulse forming line, water self-breaking switch, transmission line and water resistance load. The water switch consists of three linear arrayed self-breaking gaps, a prepulse shield (PPS) and supporting hardware. An experiment is conducted to investigate the switch with or without PPS. Each gap of the switch with PPS is made up of two hemispherical electrodes,  $\phi 80$  mm and  $\phi 50$  mm for input and output electrodes respectively, and each gap of the switch without PPS is plane to pin electrode ( $\phi 30$  mm). The length of the switch section and the inductance of the switch without PPS are smaller than those of the switch with PPS. The switch breaks down at about 3 MV with a 450 kA current when the Marx generator is charged to 70 kV. The jitter is 6 ns and 3 ns for the switch with and without PPS, respectively.

**Key words:** Self-breaking switch; Deionized water; Prepulse; Jitter