



·脉冲功率技术·

## 基于高压模块供电的 MCP-PMT 高压击穿 故障分析及设计改进\*

马烈华, 龙继东, 陈永涛, 王 城, 丁明军, 李 波, 李晏敏, 艾 杰

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为克服 MCP-PMT 传统高压供电设备体积大、便携性差的问题, 采用了基于小型化高压模块的高压供电方式。该系统在实际使用过程中发生了一起 MCP-PMT 高压击穿故障。详细分析了该系统的故障原因, 将问题定位为 MCP-PMT 内部真空度下降导致的耐压性能下降, 同时还发现了导致故障发生的诱因是高压模块在加电时刻存在的高压过冲现象。针对高压模块的过冲问题, 本文提出了较为巧妙的设计改进方法并取得了良好的效果, 进一步提高了 MCP-PMT 系统的工程应用可靠性。

**关键词:** MCP-PMT; 高压模块; 高压击穿

中图分类号: O461; TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210475

## Analysis and design improvement of MCP-PMT high-voltage breakdown fault based on high voltage module power supply

Ma Liehua, Long Jidong, Chen Yongtao, Wang Cheng, Ding Mingjun, Li Bo, Li Yanmin, Ai Jie

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-120, Mianyang)

**Abstract:** To overcome the large size and poor portability of MCP-PMT traditional high-voltage power supply equipment, a high-voltage power supply mode based on miniaturized high-voltage module is adopted. During the practical use of the system, a high-voltage breakdown fault of MCP-PMT occurred. In this paper, the fault causes of the system are analyzed in detail, and the problem is identified as the decline of withstand voltage performance caused by the decline of internal vacuum of MCP-PMT, and it is also found that the high voltage overshoot of the high voltage module at the time of power-up is the cause of this fault. Aiming at the overshoot problem of high-voltage module, this paper puts forward a more ingenious design improvement method and achieves good results, which further improves the engineering application reliability of MCP-PMT system.

**Key words:** MCP-PMT, high-voltage module, high-voltage breakdown

光电倍增管(PMT)是一种十分经典的弱光探测器件,根据倍增系统的不同,PMT可以分为打拿极型、网栅型、微通道板(MCP)型等<sup>[1]</sup>。其中MCP-PMT是一种相对较新的PMT<sup>[2-3]</sup>,它是20世纪70年代在单通道电子倍增器的基础上发展起来的一种多通道电子倍增器,具有体积小、时间特性好、抗振、抗电磁干扰等优点<sup>[4-5]</sup>。MCP是布满了微型圆孔的特种玻璃板,其微孔管道带有一定的倾斜角度,当光电子进入微孔管道后在高电压的加速下与孔壁碰撞,从管壁上打出更多的电子,形成电子倍增的效果。

MCP的电子倍增系数受高压的影响非常大,需要特别稳定的高压电源才能保证倍增管灵敏度的稳定性。传统上一般使用外接高压电源设备对MCP-PMT进行供电,但高压电源设备往往体积及质量较大,灵活性较差,携带不便。近年来,随着电源技术的不断发展,小型化开关电源模块<sup>[6-7]</sup>技术逐渐成熟,使其为MCP-PMT提供工作高压成为可能。前期我们选用了一款国内生产的高压模块,与MCP-PMT配合集成在探测器内部构成光子测试系统,通过相关实验测试,其各方面的稳定性均能满足使用要求<sup>[8]</sup>。但在某次使用中,出现了系统通电瞬间MCP-PMT后

\* 收稿日期:2021-11-09; 修订日期:2021-12-26  
联系方式:马烈华, 69488054@qq.com。  
通信作者:艾 杰, aj\_caomu@126.com。

端电子学损坏的现象。后经故障排查, 原因为该 MCP-PMT 样品的耐压性能相对较差, 而高压模块在通电瞬间存在较大的高压过冲现象, 直接导致了该 MCP-PMT 发生内部击穿。本文针对高压模块的过冲特性, 对电路作了改进设计, 取得了良好的效果。

## 1 系统情况介绍

### 1.1 F 系列高压模块介绍

系统使用的 F 系列高压模块是一款国产超小型平面高压供电模块, 其主体尺寸(长、宽、高)为  $33\text{ mm}\times 22\text{ mm}\times 8.5\text{ mm}$ , 工作电压范围为  $18\sim 36\text{ V}$ (典型  $24\text{ V}$ ), 输出高压最高可达  $2.5\text{ kV}$ (负高压), 输出电流可达  $0.5\text{ mA}$ , 具有温度稳定性好、输出纹波小的特点。该高压模块通过外接可调电阻控制高压模块取样反馈电路电压值, 进而控制高压模块的输出高压。图 1 为 F 系列高压模块的实物图片。

### 1.2 MCP-PMT 介绍

系统使用的 GDB 系列 MCP-PMT 是国内生产的小型化改进型产品, 如图 2 所示, 其主体尺寸为  $\phi 27\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ , 有效光阴极直径为  $\phi 11\text{ mm}$ , 典型工作高压为  $1.5\text{ kV}$ , 典型电子增益为  $1\times 10^5$ , 典型阳极蓝光灵敏度为  $1000\text{ A/W}$ 。该 PMT 带有 4 根引出线, 其中白线引线内部连接 PMT 的光阴极; 黄色引线连接 MCP 输入极, 较粗黑色引线连接 MCP 输出极, 各引线需要施加不同的电压, 以在 PMT 内部各极之间构建工作所需的高压电场, 另一较细黑色引线为接地线。高压模块输出的高压通过分压器分配至 PMT 的各极。该型 PMT 仅有一个阳极, 信号通过阳极自带的金属针引出, 送至后续电子学放大器。

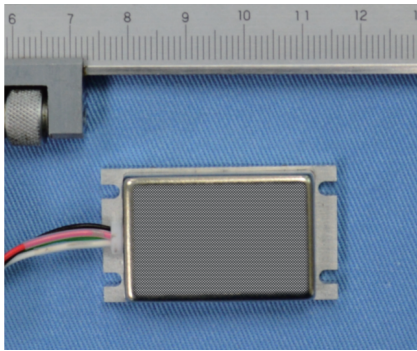


Fig. 1 Photograph of F series high-voltage module

图 1 F 系列高压模块实物图

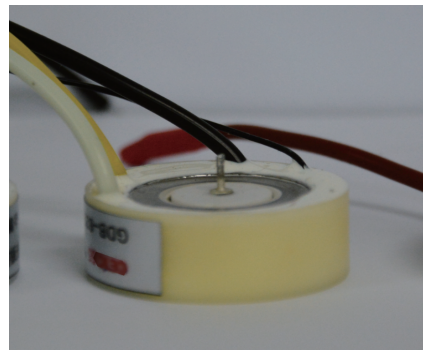


Fig. 2 Photograph of GDB series MCP-PMT

图 2 GDB 系列 MCP-PMT 实物图

### 1.3 电路系统介绍

电路系统框图见图 3。高压模块的供电电源为  $0\sim 36\text{ V}$  输出电压可调的直流低压电源。高压模块的输出高压接至分压器输入端, 由分压器按照  $1:16:1$  的分压比分别将高压分配至 PMT 三个工作级: PMT 的阴极至 MCP 输入 ( $V_{C-M}$ )、MCP 输入至输出 ( $V_{M-M}$ ), 以及 MCP 输出到 PMT 阳极 ( $V_{M-A}$ )。分压器总电阻约为  $18\text{ M}\Omega$ , 另有一个  $10\text{ k}\Omega$  的取样电阻, 用于对总高压进行监测。分压器的稳态工作电流较小, 按总工作高压  $1.5\text{ kV}$  计算, 稳态工作电流不到  $0.1\text{ mA}$ 。在此工作高压下,  $V_{C-M}$ 、 $V_{M-M}$ 、 $V_{M-A}$  分别为  $83.3\text{ V}$ 、 $1333.3\text{ V}$  和  $83.3\text{ V}$ 。PMT 的灵敏度随高压变化非常敏感, 为保证 PMT 在脉冲工作模式下的性能稳定性, 分压器各极均并接了一只  $10\text{ nF}$  的稳压电容。

PMT 阳极输出信号在  $200\ \Omega$  负载上形成电压信号, 供后续放大器进行放大。同时, 阳极与地之间接了一个保护二极管(ESD 管), 可对放大器起到一定程度的保护作用。

## 2 故障现象及原因分析

### 2.1 故障现象及定位

在某次实验中对光电测试系统整机进行加电时, 发现整机无信号输出。经测试发现电子学放大电路输入端的 ESD 管已被击穿损坏, 呈现双向导通的现象。将故障二极管取下后, 由工信部电子五所元器件可靠性研究中心按照失效分析方法对该损坏样品进行了系统分析。分析认为, 该故障“属于过电压或静电应力, 导致二极管的反向雪崩电流过大, 从而发生过功率烧毁而失效”。

放大器及其后端电子学系统均工作在不超过  $15\text{ V}$  的低压下, 损毁二极管的可能性极小, 而放大器自身功能正常未发生损坏, 因此可以排除放大器及后端电子学损坏 ESD 管的可能性。ESD 管的前端是工作在高压下的 PMT,

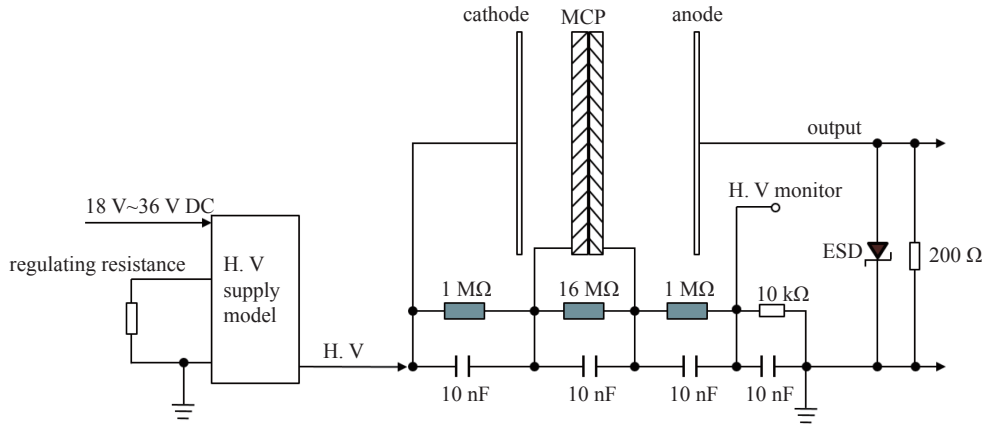


Fig. 3 Block diagram of circuit system

图3 电路系统框图

当 PMT 发生内部放电甚至高压击穿时,有可能在极短时间内通过阳极输出较大的能量导致二极管发生击穿损坏。因此故障定位为 PMT 在加电时产生了异常输出,导致二极管发生功率烧毁。

## 2.2 MCP-PMT 测试检查

### 2.2.1 阳极耐压测试

将 PMT 从整机中拆下后,利用 X 光无损测试系统对其进行了内部结构扫描。从扫描图像观察,PMT 内部阴极与 MCP 间隙、MCP 与阳极的间隙与同批次产品相近,均在正常范围内。对该 PMT 进行了粒子碰撞噪声检测试验(PIND),也未发现管内存在小颗粒、碎片残渣等多余物的征候。因此判断由于 PMT 内极间接触导致高压放电的可能性不大。

对该 PMT 进行了电性能测试检查时发现,该 PMT 的暗电流和阴极灵敏度均出现异常增大的情况,其中暗电流由出厂时检测值 0.01 nA 增加至 0.13 nA,阴极灵敏度也增加了 3 倍。根据汤姆逊(Townsend)气体放电理论和帕邢(Paschen)定律,当 PMT 内真空度较差(通常在  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  Pa)时,光阴极尚未被完全破坏,加电工作时由于气体电离倍增,会表现出光阴极灵敏度变大的现象<sup>[9]</sup>。如果确实存在真空度较差的情况, PMT 各极之间的耐压必然出现下降。作为验证,对该故障 PMT 进行了极间耐压测试。首先对 PMT 阳极与管壳之间的耐压能力进行测试(阳极与管壳金属封接环之间约有 1 mm 的设计间隙)。

测试时采取外接高压电源设备供电,逐渐升高电压,同时用微电流计记录两极之间的电流。初始阶段,极间电流随着高压升高缓慢上升,但均在 1 nA 以下。当电压升至 1.95 kV 时,电流发生急剧跳变,并超过微电流计的设置量程,呈现出高压击穿的征候。图 4 比对了故障 PMT 与另一只正常 PMT 样品的阳极耐压情况。可以发现,对于正常的 PMT,阳极与管壳之间的耐压在 5 kV 以上。故障 PMT 与之相比,耐压严重降低,且极间电流也显著增加,这与管内真空度下降的推测吻合。

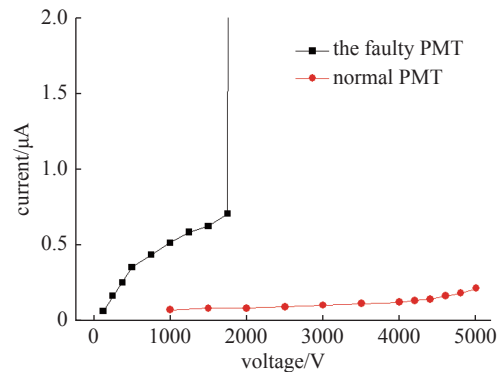


Fig. 4 Abnormal withstand voltage of faulty PMT anode

图4 故障 PMT 的阳极耐压异常现象

### 2.2.2 各工作级耐压测试

MCP-PMT 有三个工作级,即 PMT 阴极至 MCP 输入、MCP 输入至 MCP 输出以及 MCP 输出至 PMT 阳极,为叙述方便,后文分别以“C-M 级”、“M-M 级”和“M-A 级”代称,各级电压分别为  $V_{C-M}$ 、 $V_{M-M}$  和  $V_{M-A}$ 。

在本次测试中,使用高压模块供电,对三个工作级逐个进行耐压能力测试,即测试一个工作级时,其余两个工作级均不施加电压。高压模块的输出高压通过其反馈电阻进行调节,从最小输出电压开始,逐步加大反馈电阻使电压升高,并稳定保持一段时间。保压时使用高压探头及示波器对高压进行实时监测。

通过试验发现,C-M 级、M-M 级和 M-A 级的耐压值分别在 1.4 kV、1.2 kV 以及 1.5 kV 左右。图 5 分别为 C-M 级和 M-M 级耐压试验时测试到的高压击穿波形。其中 C-M 级在高压升至 1.42 kV 时立即发生了击穿,并连续

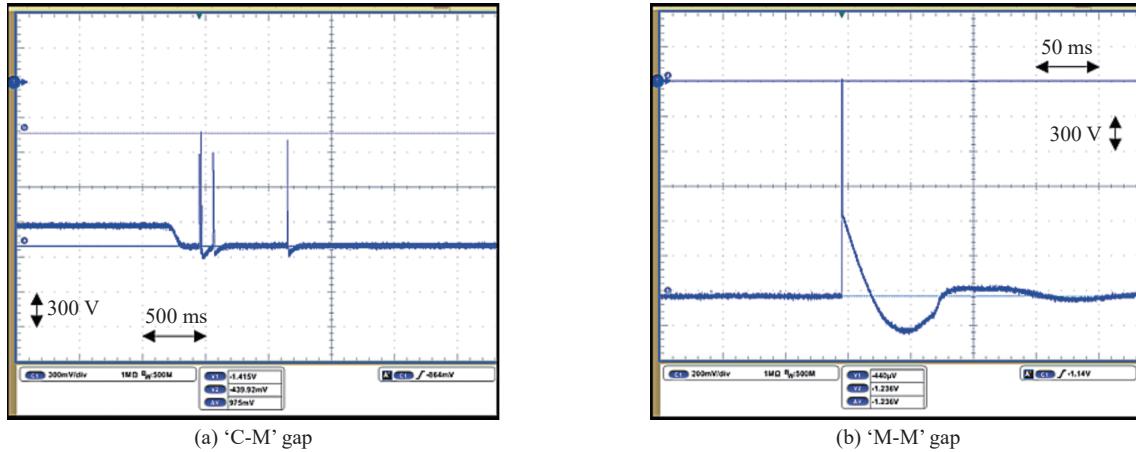


Fig. 5 High-voltage breakdown waveform at different times of voltage withstand test

图5 C-M级(a)和M-M级(b)在耐压试验的不同时刻出现的高压击穿波形

出现了3次(见图5(a))。M-M级在高压升至1.23 kV并保持数分钟后才发生了一次高压击穿的现象(见图5(b))。

通过试验现象推测,1.42 kV对C-M级来说已经明显超过其耐受能力;而1.23 kV对M-M级来说属于“临界”耐受电压,在临界电压下,击穿现象的发生具有一定的随机性。

### 2.2.3 整管耐压测试

将系统按照图3的方式进行连接,即高压模块通过分压器对PMT整体进行加电。加电方式与2.2.2相同,即逐步提高高压模块调节电阻使高压从低到高阶梯式上升。

当调节电阻提高至118 k $\Omega$ 时(高压模块输出高压约为1.77 kV),整管发生了连续放电,放电波形如图6所示。根据分压器的分压比计算,此时 $V_{C-M}$ 、 $V_{M-M}$ 和 $V_{M-A}$ 分别为98.3 V、1573.3 V和98.3 V。显然,VM-M已超过该级1.23 kV的临界耐受电压,因此出现了连续性的击穿。

### 2.3 高压模块输出异常测试

高压模块在整机内使用时,事先已经调节好输出高压值,只要整机一通电,就会立即输出高压,这与前文试验中逐渐提高高压的方式存在一定的区别。由于本次故障发生在加电时刻,因此有可能是加电瞬间的高压输出异常导致了PMT发生击穿。

作为验证,使用一只正常的PMT替换故障PMT,对系统进行加电时刻高压波形的测量。图7为试验中在PMT光阴极、MCP输入极以及MCP输出极上测得的高压波形,其中光阴极上的波形实际上就是高压模块的输出高压波形。从图7中明显可以看到,在加电初始时刻,各极高压均存在一个明显的过冲,光阴极和MCP输入极的高压在加电200 ms后才趋于稳定。以光阴极高压为例,其稳定后的高压为-1.5 kV,但是加电瞬间的峰值电压达到了-2.3 kV(出现在加电后约40 ms时刻),过冲电压达到了0.8 kV。显然,高压模块在加电时刻产生的过冲电压对PMT是个不利因素。如果PMT本身的耐压就比较低,那么在加电瞬间出现高压击穿的风险就会显著上升。

再次将故障PMT替换正常PMT接入测试系统,重复上述试验,测得加电时刻的高压波形如图8所示。图中可以看到,故障PMT在加电时刻高压模块输出过程期间发生了击穿。发生击穿时刻高压模块的输出高压为1.84 kV,而其稳定后的输出高压为1.17 kV,过冲比例超过50%。示波器上测得,击穿时刻M-M级上的电压(即图中MCP in电压减去MCP out电压)为1.27 kV,与图5(b)测得的临界耐压(1.23 kV)吻合,因此首先击穿的部位应该是M-M级,即MCP内部发生了击穿。MCP击穿形成短路,进而诱发了整管的击穿。当高压模块输出稳定后,PMT内部各级之间的电压均在耐压范围之内,因此不再出现击穿现象。

### 2.4 故障原因分析结论

综上所述,本次故障是两方面原因共同作用的结果:一方面由于PMT内部真空度下降导致MCP耐压性能下降;第二方面由于高压模块在输出时存在大幅过冲,从而导致PMT在加电时刻出现高压击穿。

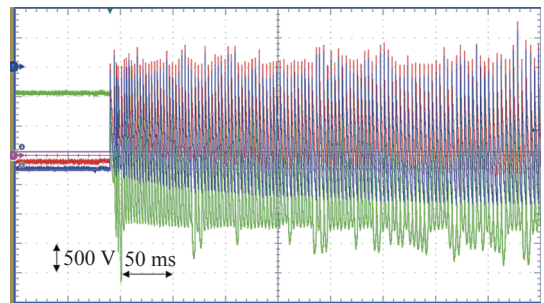


Fig. 6 Continuous breakdown waveforms of faulty PMT in withstand voltage test

图6 故障PMT在耐压试验中出现的连续击穿波形

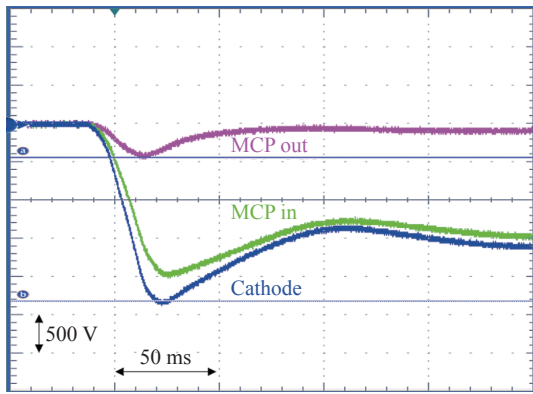


Fig. 7 Changes of each extreme high-voltage at the initial time of power on

图 7 加电初始时刻各极高压变化情况

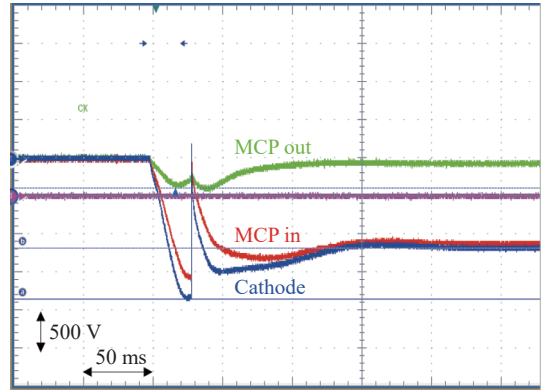


Fig. 8 High-voltage breakdown waveforms of faulty PMT at power on time

图 8 故障 PMT 在加电时刻的高压击穿波形

PMT 真空度下降的原因及改进措施本文不作展开,下面仅就高压电路的过冲改进方法进行简要介绍。

### 3 高压电路改进设计及验证

F 系列高压模块基于开关电源的工作原理,输出电压通过电路反馈给内部的控制电路,控制电路将其与基准电压进行比较,并通过控制振荡器的脉冲宽度以控制电压的输出。控制电路在上述工作过程中存在一定的延迟时间,从而导致在系统上电时刻产生高压过冲的现象。

解决该问题,有以下几种思路:(1)方法一是向上级系统提出要求,采取缓上电的供电方式,但此方法涉及更高层次的设计更改,影响范围较大;(2)方法二是在高压输出端设置稳压电容,但高压稳压电容的体积较大,一定程度上会影响整机集成;(3)方法三是在控制电路回路上设置稳压电容,该方法的原理是通过控制基准电压的上升速度间接控制高压上升速度。相比之下,方法三是较为现实可行的方法。

采用方法三的原理,在图 3 调节电阻端并接了一只  $10\ \mu\text{F}$  的电容器后,对高压模块在加电和断电时刻的输出波形进行了测量,测量结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,高压模块加电时刻(图 9(a))已不存在超过稳态输出电压的点,即过冲得到完全抑制;在断电时刻(图 9(b))尚存在轻微的过冲,但过冲比例很小,几乎可以忽略不计。

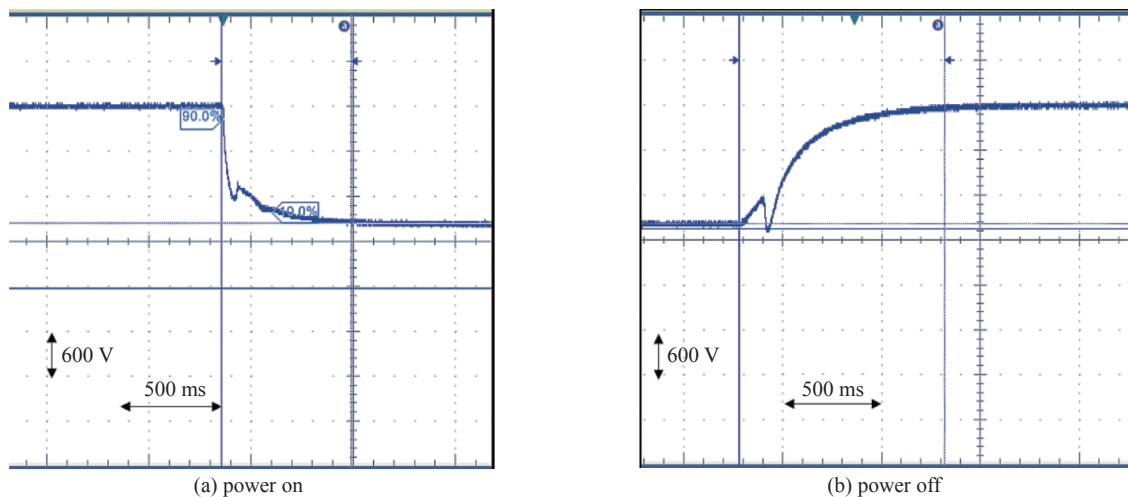


Fig. 9 Output waveforms of high-voltage module at power on and power off time after circuit improvement

图 9 电路改进后高压模块在加电及断电时刻的输出波形

除此之外,还试验了在高压模块电源输入端串接一只  $100\sim 270\ \Omega$  电阻的方法,也可起到一定程度的改善效果,但此方法会导致高压模块的输入电压降低,当外部供电电压降低时有可能导致模块的工作电压过低而不能正常工作,因此该方法需要根据实际应用情况决定是否采用。

### 4 结论

本文介绍了 F 系列高压模块和 GDB 系列 MCP-PMT 组成的光子探测系统在实际应用中发生的一起高压击穿

故障。该起故障原因是两方面原因共同作用的结果:一方面 PMT 内部真空度下降导致了其整体耐压性能下降,其中内部 MCP 的耐压降低至 1.4 kV 左右;另一方面高压模块在系统加电时刻存在高压过冲的现象,峰值最高可达 2.3 kV 左右,超过了稳态输出高压 50% 以上。根据高压模块的高压输出控制原理,采取了在其反馈控制电路中并接一只 10  $\mu\text{F}$  电容的措施,取得了较好的过冲抑制效果。该改进措施将在一定程度上进一步提高 MCP-PMT 系统的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 滨松光子学株式会社. 光电倍增管基础及应用——光探测器开拓光子学的未来[M]. 滨松: 滨松光子学株式会社, 1995: 43-44. (Hamamatsu Photonics Corporation. Foundation and application of photomultiplier tube[M]. Hamamatsu: Hamamatsu Photonics Corporation, 1995: 43-44)
- [2] Lehmann A, Böhm M, Miehl D, et al. Recent progress with microchannel-plate PMTs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 925: 161821.
- [3] Ren Ling, Sun Jianning, Si Shuguang, et al. Study on the improvement of the 20-inch microchannel plate photomultiplier tubes for neutrino detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 977: 164333.
- [4] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 554-556. (Zhao Tianchi. Physical principles and applications of sensors and detectors[M]. Beijing: Science Press, 2008: 554-556)
- [5] 赵文锦. 光电倍增管的技术发展状态[J]. 光电子技术, 2011, 31(3): 145-148. (Zhao Wenjin. Developments in technology of photomultipliers[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(3): 145-148)
- [6] Moshkunov S I, Khomich V Y, Shershunova E A. A high-voltage switching power supply for cold plasma jets[J]. Technical Physics Letters, 2019, 45(2): 93-95.
- [7] Wu Hao, Xiao Linyan. Design of high efficiency dc switching power supply based on soft switch[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345: 052077.
- [8] 张波涛, 彭旭升, 王城, 等. 用于脉冲中子探测器的小型化高压模块性能研究[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 035005. (Zhang Botao, Peng Xusheng, Wang Cheng, et al. Performance study of miniaturized high-voltage module for pulsed neutron detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 035005)
- [9] 邵涛, 严萍, 张适昌, 等. 纳秒脉冲气体放电电机理探讨[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1928-1932. (Shao Tao, Yan Ping, Zhang Shichang, et al. Review on nanosecond-pulse discharge mechanism in gases[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1928-1932)