

大面积光电倍增管地磁场效应测试系统

马毅超¹ 朱 纳¹ 钱 森^{2,3} 高 峰^{3,4} 胡健润^{3,4} 张国庆³ 宁飞鹏³ 党宏社¹

1 (陕西科技大学 西安 710021)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (核探测与核电子学国家重点实验室 北京 100049)

4 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 大面积型光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)广泛应用于各种高能物理实验中,但它对磁场比较敏感,在有地磁场的情况下实验结果的可靠性难以保证。为此,需要在电磁屏蔽间内放置高磁导率磁屏蔽罩定量屏蔽磁场,或在电磁屏蔽室缠绕三围螺线圈定量屏蔽地磁场。利用实验虚拟仪器工程平台,基于常用通信协议,建立了一套光电倍增管磁场效应在线测试系统,实现对光斑尺寸和磁场强度的自动调节,光电倍增管阳极信号的实时采集、存储和显示,可用于研究光电倍增管的地磁场效应。

关键词 光电倍增管, 地磁场, 定量屏蔽, 定性屏蔽

中图分类号 TN492

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.020401

Test system for the earth-magnetic effect of large-area photomultipliers

MA Yichao¹ ZHU Na¹ QIAN Sen^{2,3} GAO Feng^{3,4}

HU Jianrun^{3,4} ZHANG Guoqing³ NING Feipeng³ DANG Hongshe¹

1 (Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

2 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

4 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Large area photomultiplier tubes (PMTs) have been increasingly applied to high energy physics experiments, reliable results of PMTs' parameters may not be obtained without earth-magnetic (EM) shielding. [Purpose] This study aims to build a test system for EM effect of PMT and obtain its properties in different magnetic field intensity. [Methods] Based on the current PMT performance testing system, high-permeability material is used to qualitatively shield the magnetic field; and the EM shielded room entwined with solenoid coil is used to quantitatively shield the magnetic field. Based on the RS-232, universal serial bus (USB) and local area network (LAN) interface communication protocols, test software is developed in LabVIEW. [Results & Conclusion] The high voltage supply, light source intensity, magnet strength can be remotely automatically adjusted. And anode signal of PMT is real-time sampled and stored. It is helpful for studying earth-magnetic effect of large-area photomultipliers with this system.

Key words PMT, Magnetic field, Qualitative shielding, Quantitative shielding

国家自然科学基金(No.11175198、No.11475209)资助

第一作者: 马毅超, 男, 1984 年出生, 2011 年于中国科学技术大学获博士学位, 讲师, 研究领域为高速数字电路设计与 ASIC 设计
通信作者: 钱森, E-mail: qians@ihep.ac.cn

收稿日期: 2017-03-17, 修回日期: 2017-04-29

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11175198, No.11475209)

First author: MA Yichao, male, born in 1984, graduated from University of Science and Technology of China with a doctoral degree in 2011, lecturer, focusing on high speed digital circuit design and ASIC design

Corresponding author: QIAN Sen, E-mail: qians@ihep.ac.cn

Received date: 2017-03-17, accepted date: 2017-04-29

光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)是一种有极高灵敏度和超快时间响应的光探测器件,入射在光阴极的光子通过光电效应产生光电子,进入倍增系统进行倍增放大,经阳极收集,形成阳极电流或脉冲电压。其广泛应用于物理实验、工业生产、医疗器械等领域^[1]。不同尺寸的 PMT 应用不同。小型 PMT 的结构紧凑、抗磁性好、量子效率高,被广泛用于医疗检测领域和各种高能物理实验^[2-3];大直径 PMT 的有效面积大,节约电子通道,被广泛用于中微子实验中,如日本超级神冈探测器^[4]、我国的大亚湾^[5]和江门中微子实验^[6]等。

PMT 是探测器中受磁场影响比较敏感的器件,对大尺寸的 PMT,尽管在设计初期已经对聚焦电极进行了优化,但由于电子在真空中的飞行路径较长,受地磁场的影响也不能忽略。

地磁场对 PMT 性能参数的影响分为两部分:一部分是光电子从光阴极到聚焦极,洛伦兹力使光电子的运动轨迹发生偏转,不能全部到达第一聚焦极,影响 PMT 的收集效率和渡越时间。另一部分是光电子从聚焦极飞到阳极的电子倍增过程中,对于打拿极型 PMT,地磁场使电子偏离倍增轨迹,对增益、能量分辨率和渡越时间的影响较大。对于微通道板型 PMT,光电子在微通道板内壁倍增时,洛伦兹力使电子撞击到内壁的方向与出射方向不同,影响二次电子发射系数,进而影响增益和能量分辨率,相对于打拿极型 PMT,影响程度较小^[7]。

对于大面积 PMT,由于光阴极面积较大,不同位置逸出的光电子受到内部电场作用和地磁场洛伦兹力的合力不一致,影响阳极信号的均匀性(增益和收集效率)。同理,PMT 安装在不同位置时,光阴极面同一位置逸出的光电子受到内部电场力和地磁场也不一致,使 PMT 在不同位置的表现不同^[8]。

另外由于 PMT 内部结构不对称,尤其是聚焦极与打拿极结构不对称,当 PMT 围绕其中心轴旋转一定角度,PMT 内部电场方向和大小相对于地磁场发生变化,受地磁场的影响不相同^[9]。

现有大部分大面积 PMT 在存在地磁场的情况下进行性能测试,得不到可靠结果;或在 PMT 外围缠绕 μ 铁,只能被动地定性分析有无地磁屏蔽对大面积 PMT 性能的影响。本实验针对大面积 PMT,搭建了大型地磁场效应测试系统,定量对比研究地磁场对 PMT 的影响。

1 系统设计

地磁场主要影响大面积 PMT 的阳极性能参数,主要通过单光电子谱来表征,如增益(Gain)、相对

探测效率(Relative Detection Efficiency, RDE)、渡越时间离散(Transit Time Spread, TTS)、峰谷比(the Ratio of Peak to Valley, P/V)等。基于单光电子谱测试系统^[10],借助相关设备改变地磁场强度,并根据设备的不同接口类型,利用 LabVIEW 中的 VISA 工具包与设备通信,实现不同磁场强度下 PMT 性能参数的自动测试。

系统整体方案设计如图 1 所示。在避光良好的暗室内放置电磁屏蔽箱,用来屏蔽空间电磁波。在电磁屏蔽箱内放置用高磁导材料制成的圆桶,用来被动屏蔽地磁场;或者用 HMP2030 三通道直流电源为螺线管线圈供电,主动屏蔽地磁场。磁通计 FVM400(精度为 1 nT)测量磁场强度。AFG3102 脉冲发生器驱动 LD 发光,作为测试 PMT 所用光源。RC 微分电路和低阈甄别器(Low Threshold Discriminator, LT-Dis)把逻辑门电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)电平转换为抗噪容量(Noise Injection Margin, NIM)电平。电荷数字转换器(Charge-to-Digital-Converter, QDC) V965 把阳极电流信号积分为电荷量,并转换为数字量。时间数字转换器(Time-to-Digital-Converter, TDC) V775N 测量光电子的渡越时间,并转换为数字量。高压电源 SY1527 为 PMT 提供电压。

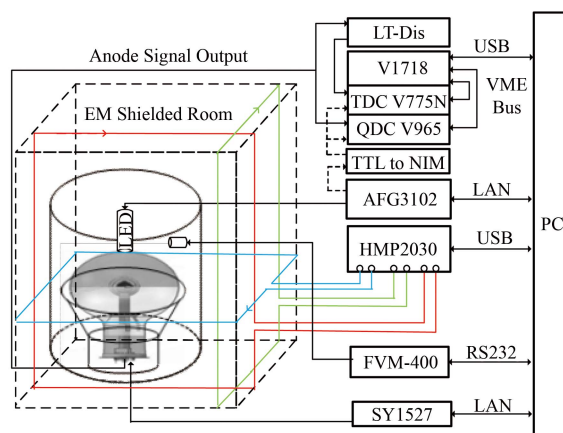


图 1 地磁场效应测试系统整体结构
Fig.1 Framework of geomagnetic field effect test system.

1.1 磁屏蔽效果测试

1.1.1 磁屏蔽罩定性屏蔽

如图 1 所示的屏蔽罩由坡莫合金材料制作,当磁感线从空气进入桶壁时,由于罩壳磁导率比空气磁导率大得多,磁感线对法线的偏离很大,大部分磁场线从罩壳壁内通过,空腔中的磁感线很少,达到屏蔽目的。屏蔽效果如图 2 所示,在磁屏蔽罩的中间位置磁屏蔽效果最好,能达到 80%。

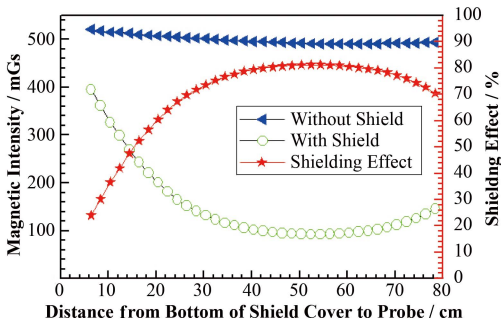


图2 磁屏蔽罩屏蔽效果
Fig.2 Magnetic shielding cover and shielding effect.

1.1.2 螺线管线圈定量屏蔽

由于磁屏蔽罩只能定性屏蔽地磁场，为研究光PMT在不同磁场强度下的性能，在电磁屏蔽箱外面缠绕螺线管线圈，用三通道直流电源HMP2030为线圈供电，每通道最大输出电流为5A（实验室地磁场标量最大为468.38 mGs，理论计算需要的电流为1.455 A），通过调节电流，可以较大幅度地屏蔽地磁场。设计机械图及实物图如图3所示。

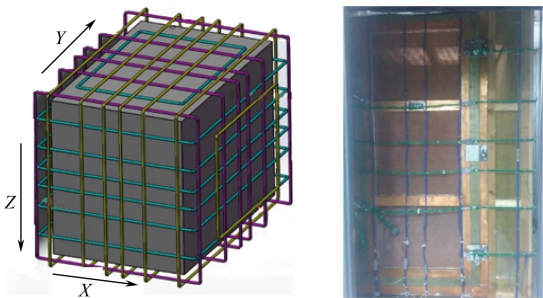


图3 地磁场屏蔽螺线管设计机械图
Fig.3 Mechanical design of magnetic shield with solenoid.

首先调节三维螺线管线圈的电流，使电磁屏蔽间的中心点处磁场为0 mGs，并保持该电流不变，在电磁屏蔽箱选取如图4所示的36个位置，测量每个点的剩磁，得到屏蔽效果均匀性。

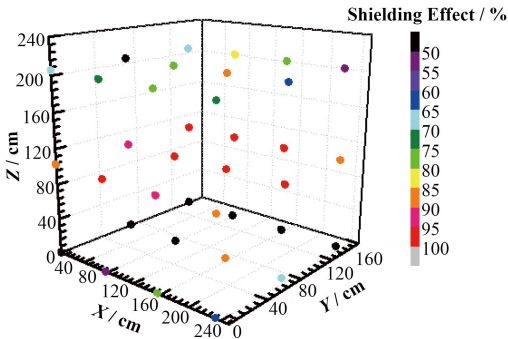


图4 螺线管屏蔽效果均匀性
Fig.4 Uniformity of shielding effect with solenoid.

在电磁屏蔽箱的中间层，屏蔽效果较好，可以达到95%以上，根据电磁屏蔽间尺寸，可同时测试

4只50.8 cm的PMT；底部和顶部屏蔽效果不均匀，有小于50%的点，是由于该处放置的PMT旋转底座、固定高压电线电缆、信号线电缆、光源驱动电缆的位置含铁，靠近螺线管线圈，影响屏蔽效果。实际测试时，使用不带旋转台的支架固定PMT，支架有一定的高度，使得PMT装在支架上之后，处于电磁屏蔽箱的中部，不受顶部和底部的影响。

图1中，取置于支架的PMT光阴极顶点为测量点，在不同的屏蔽情况下测试其剩余磁场强度如表1所示。

表1 不同屏蔽方法屏蔽效果对比
Table 1 Contrast of shielding effect with different method.

屏蔽措施	X / mGs	Y / mGs	Z / mGs	屏蔽效果
With shielding				Shielding effect / %
无 No	229.70	-47.28	464.55	0.00
屏蔽罩	96.64	11.91	31.39	80.3
Shielding cover				
螺线管	-0.30	0.00	0.00	99.9
Solenoid				

以图1中所示PMT光阴极顶点为测量点，完全屏蔽时需要的电流理论计算值为(X, Y, Z)=(1.140 A, 0.545 A, 1.455 A)。使三个线圈电流都从(1.140 A, 0.545 A, 1.455 A)等比例下降到(0.000 A, 0.000 A, 0.000 A)，每次下降10%，得到11组不同电流强度下实际剩磁和理论剩磁的比，如图5所示。

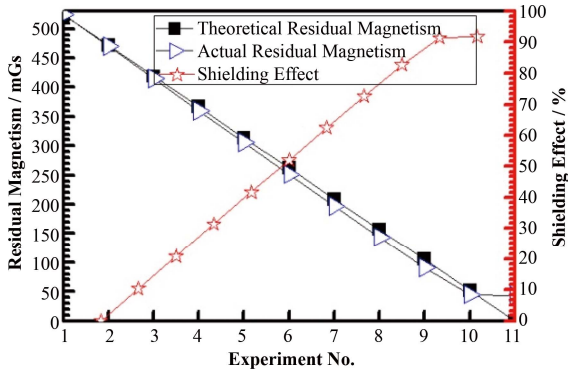


图5 理论剩磁和实际剩磁随线圈电流变化曲线
Fig.5 Residual magnetism-current curve.

理论上，随着电流线性增大，剩磁也呈线性下降，当电流值为图5中第11次设定值时，理论剩磁应该为0，实际还有8%的剩磁。

1.2 PMT 阳极信号采集和处理

PMT 阳极性能大部分是基于单光电子谱得到，其测量过程为：脉冲发生器输出频率较高，较窄的脉冲信号驱动LD发光，入射到光阴极面，从光阴

极面逸出的电子倍增后由阳极输出；脉冲发生器的同步输出 TTL 转换为 NIM 电平后，作为 V965 的对阳极电流积分的门信号和 V775N 的起始时间信号，PMT 阳极信号过阈后送给 V775N，得到两个信号的时间间隔即为渡越时间，再通过 VME 总线把电荷量和渡越时间存入 V1718 的缓存中，PC 通过 USB 总线从 V1718 中读取数据。

在一段时间内按上述流程连续对阳极信号进行采集，做统计直方图，得到电荷谱和时间谱，拟合后计算各参数值。图 6 为阳极电荷谱，横坐标代表电荷量，每一小格是 25 fC，纵坐标为电荷量的统计值。其中： x_2 定义为信号的波谷，以它为分界，左边定义为电子学台阶，右边定义为信号峰。电子学台阶与测量的电子学回路结构相关，满足高斯分布，其中：心值 x_1 为单光电子谱的基线。信号峰也满足高斯分布，其中：心值 x_4 定义为信号的波峰， x_3 和 x_5 为半高宽对应的电荷量值。相对探测效率 E_{RD} 、增益 G 、峰谷比 R_{PV} 、能量分辨率 R_E 的计算如式 (1)–(4) 所示：

$$E_{RD} = \left(\sum_{x=0}^{4096} f_{\text{test}}(x) / \sum_{x=x_2}^{4096} f_{\text{test}}(x) \right) / \left(\sum_{x=0}^{4096} f_{\text{ref}}(x) / \sum_{x=x_2}^{4096} f_{\text{ref}}(x) \right) \quad (1)$$

$$G = (x_4 - x_1) \times 1.5625 \times 10^{-19} \quad (2)$$

$$R_{PV} = f(x_4) / f(x_2) \quad (3)$$

$$R_E = (x_5 - x_3) / (x_4 - x_1) \quad (4)$$

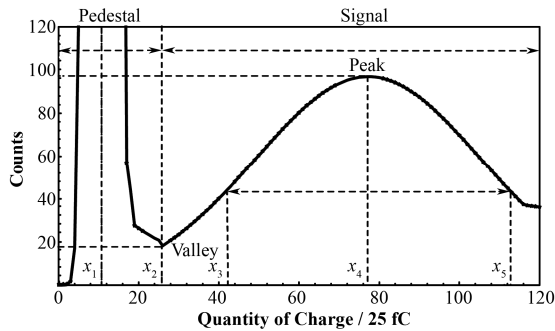


图 6 阳极电荷谱
Fig.6 Single photoelectron spectrum.

2 系统测试研究

2.1 定性屏蔽系统测试

以两只 50.8 cm PMT 为测试样管，在光阴极面一条经线上取纬度为 90° 和 30° 两个位置（由于光电倍增管整个光阴极面是一个椭圆半球，类似于地球的北半球，为方便描述测试位置，定义光阴极面中

心点处的纬度为 90°），分别在有无磁屏蔽罩的情况下，利用点光源 LD 对 PMT 进行测试，以加屏蔽罩的值为参考，测试结果如表 2 所示。

表 2 测试结果对比
Table 2 Contrast of test results.

PMT No.	纬度 Latitude	屏蔽 With shield	相对增益 Relative gain	相对探测效率 RDE
①	90°	无 No	0.96	0.57
①	90°	有 Yes	1.00	1.00
①	30°	无 No	0.82	0.15
①	30°	有 Yes	1.00	1.00
②	90°	无 No	0.94	0.59
②	90°	有 Yes	1.00	1.00
②	30°	无 No	0.90	0.57
②	30°	有 Yes	1.00	1.00

两只 PMT 在加上磁屏蔽罩后，无论是从光阴极面中心点处入射还是纬度为 30° 位置入射，增益和探测效率都有不同程度的提高，且纬度为 30° 位置入射时，性能得到大幅度改善。即在不同入射位置，地磁场对增益和相对探测效率的影响不同，故在大面积 PMT 投入使用前，需要全面测试标定。

2.2 定量屏蔽系统测试

以一只 50.8 cm 的 PMT 为测试样管，用发散球作光源，将发散球置于 PMT 光阴极顶点的正上方，通过步进电机调整光源高度，改变光斑尺寸，随着发散球与光阴极顶点间距离的增加，其光斑会均匀覆盖整个光阴极面，并在图 5 所示的不同磁屏蔽效果下测试 PMT 的性能参数。以 PMT 的增益为例，在不同磁场下，随光源高度的变化情况如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，随着光源高度的增加，由于光斑面积变大，加磁屏蔽后，增益提高得越明显。局部的涨落是由于多次测试及测试周期较长，系统误差导致。

在光源高度一定时，PMT 的增益和能量分辨率随磁场强度变化如图 8 所示，增益随着磁场强度的减小而增大，当屏蔽效果为 90% 时，增益提高了 6.5%；能量分辨率随磁场强度的减小整体上呈下降趋势，最多可下降 11%。

在光源高度一定时，PMT 相对探测效率和渡越时间离散随磁场强度变化如图 9 所示：相对探测效率随磁场强度减小而增大，最大能提高 57%；渡越时间离散随磁场强度而减小，最多可下降 11%。

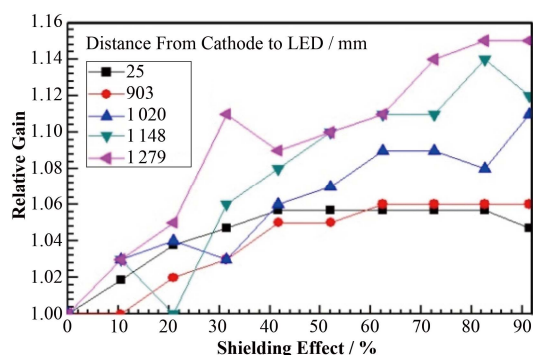


图7 不同光斑尺寸和磁场强度下的增益

Fig.7 Gain-magnetic field intensity & spot size curve.

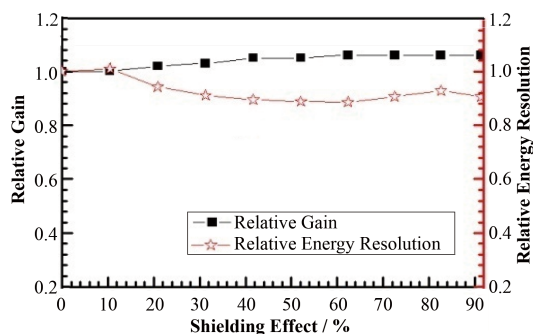


图8 增益和能量分辨率随磁场强度变化曲线

Fig.8 Gain & energy resolution-magnetic field intensity curve.

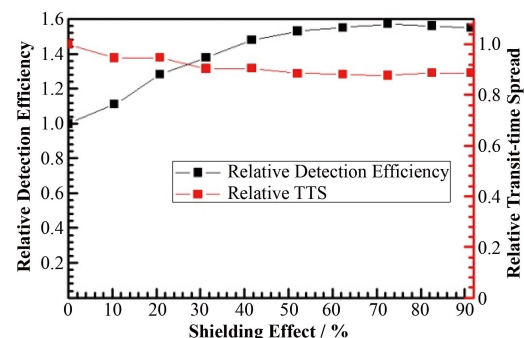


图9 探测效率和渡越时间离散随磁场强度变化曲线

Fig.9 Relative detection efficiency & transit-time spread-magnetic field intensity curve.

3 结语

针对 50.8 cm 大面积型 PMT，分别利用高磁导材料和螺线管线圈来定性和定量屏蔽地磁场，建立了一套光电倍增管地磁场效应在线测试系统，实现了对光源发光强度、光斑尺寸、磁场强度的自动调节和阳极信号的实时采集和处理，系统具有较好的屏蔽效果和均匀性。利用该系统测试研究了在不同地磁场强度和光斑尺寸下 PMT 的阳极性能参数。

参考文献

- 1 Bruno J G, Richarte A M, Phillips T, *et al.* Development of a fluorescent enzyme-linked DNA aptamer-magnetic bead

sandwich assay and portable fluorometer for sensitive and rapid Leishmania detection in sandflies[J]. *Journal of Fluorescence*, 2014, **24**(1): 267–277. DOI: 10.1007/s10895-013-1315-6.

- 2 Inami K, Kishimoto N, Enari Y, *et al.* A 5 ps TOF-counter with an MCP-PMT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2006, **560**(2): 303–308. DOI: 10.1016/j.nima.2006.01.027.
- 3 Straub K, Belcari N, Camarlinghi N, *et al.* Study of UT glasses for pixel identification performance in multi-anode PMT-based detectors for PET[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2013, **718**: 154–156. DOI: 10.1016/j.nima.2012.08.101.
- 4 Wang Y F, Qian S, Zhao T, *et al.* A new design of large area MCP-PMT for the next generation neutrino experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, **695**: 113–117.
- 5 沙薇, 陈少敏, 刘以农, 等. 日本超级神冈探测器的数据分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2008, **28**(1): 185–188. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.01.047.
SHA Wei, CHEN Shaomin, LIU Yinong, *et al.* Analyses the date of super Kamiokande detector in Japan[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, **28**(1): 185–188. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.01.047.
- 6 王贻芳. 大亚湾反应堆中微子实验[J]. *物理*, 2007, **36**(3): 207–214. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2007.03.010.
WANG Yifang. A neutrino experiment using the Daya Bay reactor[J]. *Physics*, 2007, **36**(3): 207–214. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2007.03.010.
- 7 Koblesky T, Roloff J, Polly C, *et al.* Cathode position response of large-area photomultipliers under a magnetic field[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2012, **670**: 40–44. DOI: 10.1016/j.nim a.2011.12.054.
- 8 Leonora E. Terrestrial magnetic field effects on large photomultipliers[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2013, **725**: 148–150. DOI: 10.1016/j.nima.2012.12.056.
- 9 Jeon E J, Kim J Y, Kim Y D, *et al.* Magnetic field effects on the photocathode uniformity of Hamamatsu R7081 photomultiplier tubes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2013, **697**: 46–51. DOI: 10.1016/j.nima.2012.08.112.
- 10 付在伟, 钱森, 宁哲, 等. 时间触发系统用 PMT 性能测试研究[J]. *核技术*, 2011, **34**(3): 227–231.
FU Zaiwei, QIAN Sen, NING Zhe, *et al.* Performance tests of the PMT for a T0 system of high time resolution[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, **34**(3): 227–231.