

基于波形采样的 CEPC 电磁量能器读出 单元测试系统

李明慧¹ 牛萍娟¹ 董明义^{2,3,4} 赵航^{3,4} 胡鹏^{2,3} 于丽媛¹ 胡涛^{2,3,4} 王志刚^{3,4}

1 (天津工业大学 电气工程与自动化学院 天津 300387)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

4 (核探测与核电子学国家重点实验室 北京 100049)

摘要 随着环形正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, CEPC)方案的提出,由硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)和塑料闪烁体组成的读出单元作为电磁量能器的预研方案之一,逐渐成为研究热点。在探测器预研阶段需要对读出单元性能进行充分研究,因此我们设计了一套自动化测试系统用于对读出单元进行测试、分析并改善其性能。利用 DT5751 波形采样插件、SiPM 驱动电路板、步进电机、低压电源、继电器等完成硬件搭建,以 LabVIEW 为开发平台完成了软件的串行协议接口之间的通信,实现了读出单元的自动化测试,编写了相应的数据处理程序。在此基础上进行了 SiPM 刻度、闪烁体发光均匀性以及反射材料对光输出影响的研究。测试结果表明,ESR 反射膜包裹的塑闪条具有最高的光输出,塑闪条耦合 10 μm 像素 SiPM 的光输出为耦合 25 μm 像素 SiPM 的三分之一。

关键词 硅光电倍增管,塑料闪烁体,电磁量能器,环形正负电子对撞机

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010402

A testing system of scintillator readout unit based on waveform sampling for CEPC ECAL

LI Minghui¹ NIU Pingjuan¹ DONG Mingyi^{2,3,4} ZHAO Hang^{3,4} HU Peng^{2,3}
YU Liyuan¹ HU Tao^{2,3,4} WANG Zhigang^{3,4}

1(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

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

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

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

Abstract [Background] In the proposal of the circular electron positron collider (CEPC) scheme, readout unit consisting of a silicon photomultiplier (SiPM) and a plastic scintillator has become a research hotspot as one of the main options of electromagnetic calorimeter (ECAL). [Purpose] This study aims to optimize the detector prototype

国家重点研发计划(No.2016YFA0400400)、中国科学院高能物理研究所科技创新项目(No.542014IHEPZZBS10653)、国家自然科学基金(No.11675196)资助

第一作者:李明慧,女,1992年出生,2015年毕业于天津理工大学中环信息学院,现为硕士研究生,研究领域为光电检测技术

通信作者:王志刚, E-mail: wangzhg@ihep.ac.cn

收稿日期:2017-10-12, 修回日期:2017-11-14

Supported by National Key Programme for S&T Research and Development (No.2016YFA0400400), Science and Technology Innovation Project of Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (No.542014IHEPZZBS10653), National Natural Science Foundation of China (No.11675196)

First author: LI Minghui, female, born in 1992, graduated from Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology in 2015, master student, focusing on electric detecting technique

Corresponding author: WANG Zhigang, E-mail: wangzhg@ihep.ac.cn

Received date: 2017-10-12, accepted date: 2017-11-14

by setup an automated testing system to test, analyze and improve the performance of each readout unit of CEPC ECAL. [Methods] Based on the DT5751 waveform sampling plug-in module, SiPM drive circuit, stepper motor, low-voltage power supply (LVPS), relay, etc., the hardware of CEPC ECAL readout unit was built up whilst the software was developed with the LabVIEW. Repeated measurements were carried out to find the optimized parameters, and the SiPM calibration was performed. [Results] Experimental results show that proposed automated testing system satisfied basic requirements of CEPC ECAL readout unit. Setup of the testing platform of scintillator readout unit based on waveform sampling is option for CEPC ECAL and be used for SiPM calibration, scintillator uniformity of light output and reflective material study. [Conclusion] The experiment result shows that the plastic scintillator strip with the ESR has the highest light yeild and the light yeild of 25 μm coupled with SiPM 3 times than 10 μm .

Key words SiPM, Plastic scintillator, Electromagnetic calorimeter, CEPC

希格斯粒子被发现后^[1-2], 我国科学家于 2012 年 9 月提出建造下一代环形正负电子对撞机 (Circular Electron Positron Collider, CEPC), 并适时改造为超级质子对撞机 (Super Proton-Proton Collider, SppC) 的方案, 即“CEPC+SppC”方案。CEPC 的首要物理目标是深入研究希格斯粒子的性质。CEPC 投入运行后, 10 a 中可以产生约 100 万个希格斯粒子, 与大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 相比至少可以把对希格斯粒子的测量精度提高 10 倍^[3]。

量能器是用来测量入射粒子能量的探测器, 在中国科学院高能物理研究所物理实验中量能器起着非常重要的作用^[4]。CEPC 预研中的电磁量能器备选方案之一为基于塑闪条/钨板的取样型电磁量能器^[5]。硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM) 作为一种新兴的光电探测器件, 与其他光子计数探测器相比, 具有体积小、工作电压低、内部增益高、时间响应快、对磁场和电场不敏感等优势, 目前在微光探测、核物理、高能物理以及核医学领域得到了广泛关注与应用^[6-10]。在该方案中, 厚度为 2 mm、面积为 5 mm \times 45 mm 的长条塑闪末端耦合 SiPM 进行读出, SiPM 有效面积 1 mm \times 1 mm, 具体结构如图 1 所示。

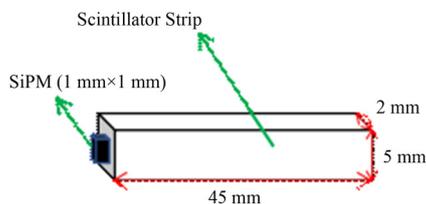


图 1 CEPC 电磁量能器读出单元结构示意图
Fig.1 Readout unit of the CEPC electromagnetic calorimeter.

在该方案的基线设计中, 相邻两层的塑闪条正交排列, 以实现 5 mm \times 5 mm 的有效截面, 这种长条塑闪结构可以使量能器读出通道减少一个数量

级, 有利于降低探测器造价。闪烁光在闪烁体内部传输时, 由于闪烁体对光的吸收、散射等原因, 闪烁光信号将逐渐减弱, 光传输距离越远, 衰减越严重。在长条塑闪中 SiPM 接收到的光子数会随着入射粒子击中位置距离 SiPM 减小而变大, 这就导致读出单元光输出存在一定的不均匀性, 这种不均匀性会影响量能器的能量分辨率。另外, SiPM 耦合在塑闪条末端的读出方式会在塑闪条进行拼接时造成死区, 导致探测效率下降。因此, 需要对读出单元结构进行优化。在该方案的预研中, 为了测试和改进读出单元的性能, 需要对不同的读出单元反复进行位置扫描测试, 因此有必要设计并搭建一套自动化测试系统^[11-12]。

1 测试系统

用于读出单元性能研究的测试系统结构如图 2 所示。待测试样品为圣戈班 BC-408 塑闪条包裹反射层后在其末端耦合滨松公司的 SiPM 组成的读出单元。SiPM 由滨松公司生产的 C11204-01 驱动电路板供电并进行信号放大读出。该驱动电路板提供了 SiPM 温度-电压反馈修正功能, 消除了环境温度对 SiPM 增益的影响。利用放射源 ^{90}Sr 作为入射源, ^{90}Sr 衰变产生连续能量的电子在塑闪条中沉积能量产生闪烁光, SiPM 接收闪烁光信号并转化为电信号。位于塑闪条下方的 ^{90}Sr 放射源经过狭缝准直后入射到塑闪条, 为了进行定位并挑选出穿透塑闪条的入射事例, 在塑闪条上方放置直径 1 mm 的闪烁光纤并由 SiPM 进行读出, 塑闪条和闪烁光纤信号进行符合读出。两路 SiPM 的信号输入由意大利 CAEN 公司生产的采样率为 1 ns⁻¹ 的波形采样插件 DT5751 进行波形采样并存储。利用波形采样插件作为数据获取系统的优势在于信号波形包含了完整的事例信息, 将波形存储之后便于后期进行详细的离线分析。塑闪条和 SiPM 探测单元固定在步进电机上, 由步进电机控制器驱动进行塑闪不同位置光

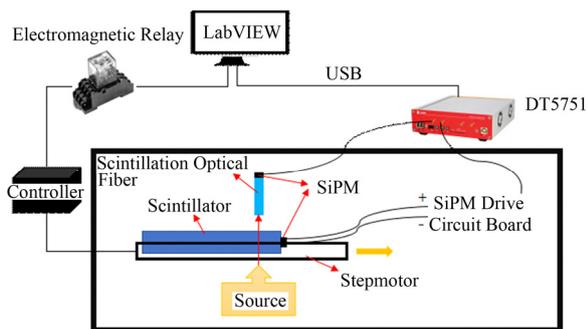


图 2 读出单元自动化测试硬件原理图
Fig.2 Schematic diagram of auto-test system of the hardware.

输出扫描测试。为了消除步进电机控制器产生的电磁干扰，设置了继电器来控制步进电机驱动器的电源通断状态。在测试过程中步进电机驱动器处于关闭状态，塑闪条要移动位置时步进电机驱动器打开按照指令进行移动操作。

2 软件设计

本文所设计的自动化测试系统是以 LabVIEW 为开发工具，完成了 SiPM 数据的采集、显示、存储、步进电机的自动化控制和数据处理应用程序的开发。

读出单元的自动化测试流程如图 3 所示，运行自动化测试程序，步进电机开始进行位置扫描，首先调用“继电器 open”子 VI 打开步进电机控制器，然后调用第二个子 VI “步进电机”，向步进电机端口发送设定好的步长，接着调用“继电器 close”子 VI，继电器掉电，步进电机控制器关闭，最后调用“DT5751 取数”子 VI 进行取数，以此重复，每次循环检测当前取数次数与步进电机移动次数的关系，当取数次数大于步进电机移动次数时跳出循环，测试完毕。采集到的数据自动以时间顺序保存到指定文件夹。

图 4 为自动化测试系统的前面板，该测试系统可以测试不同规格的塑料闪烁体，同时也可以自定义测试步长和测试次数来满足测试需求。面板上实时显示步进电机每次移动步长和取数次数，供实验者观察步进电机是否正常工作 and 实验进展情况。

当程序运行到“DT5751 取数”子 VI 时，会自动调用取数程序前面板，并显示采集数据时的实时波形图，如图 5 所示，横坐标为采样时间，纵坐标为 SiPM 信号波形。为了便于后续处理数据，将采集到的原始波形以后缀名为.txt 的格式储存。

图 6 为数据处理程序界面，该数据处理程序主要是对原始波形进行积分得到信号大小分布图，并

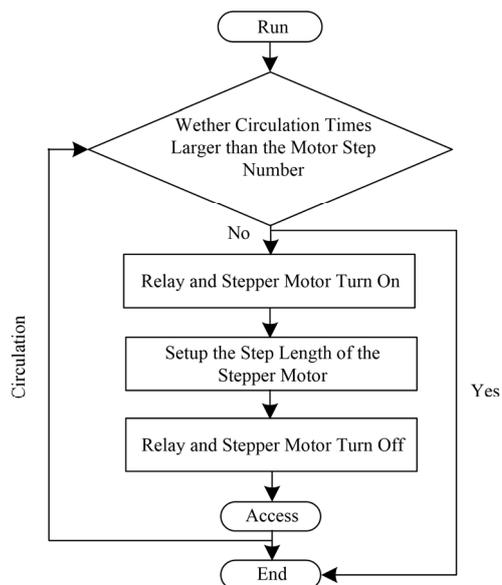


图 3 自动化测试系统流程图
Fig.3 Flow chart of the auto-test system.



图 4 自动化测试程序前面板
Fig.4 Control panel of the auto-test system.

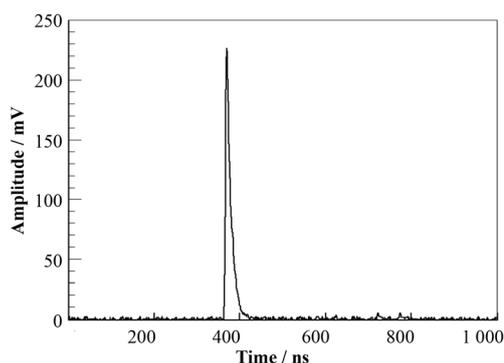


图 5 自动化测试程序测得波形图
Fig.5 Waveform display of the SiPM.

对数据进行拟合分析。数据处理程序会按顺序依次读取每一个子文件夹中的波形文件进行分析。该程序具有设置计算基线的波形长度、拟合区间、拟合参数界限等功能。图 6 中光滑曲线为拟合结果并且

可以显示拟合中心值和标准差。本数据处理程序实现了对批量测试文件的自动化处理, 并对处理结果实现自动保存。

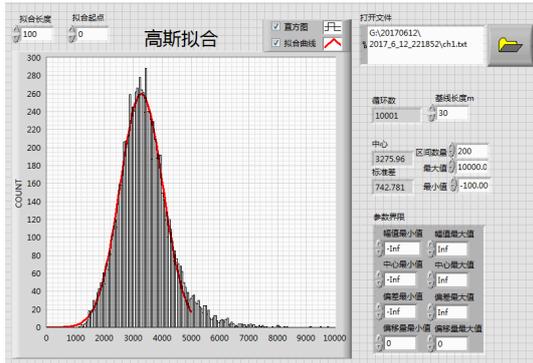


图 6 数据处理程序前面板
Fig.6 Display front panel of the data analyze.

3 读出单元性能研究

在完成该自动化测试系统的建立之后, 进行了读出单元性能研究, 包括 SiPM 刻度以及塑闪条光输出分布测试。

3.1 SiPM 刻度

实验中采用了滨松公司 S12571 系列的两种灵敏面积为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 不同像素个数的 SiPM 进行了测试, 型号分别为 S12571-025 和 S12571-010P, 像素个数分别为 1600 和 10000。

首先对 SiPM 进行刻度, 刻度方法为利用 SiPM 的暗噪声计数获得暗噪声分布谱, 如图 7 所示为 1600 像素 SiPM 在测试过程中所加固定电压下得到的暗噪声谱, 可以看到非常清晰的 4 个峰位, 每个峰位分别对应 1、2、3、4 个光电子, 相邻两个峰之间的读出通道数差值基本相近, 其差值即为单光电子对应 ADC (Analog-to-Digital Converter) 道数。

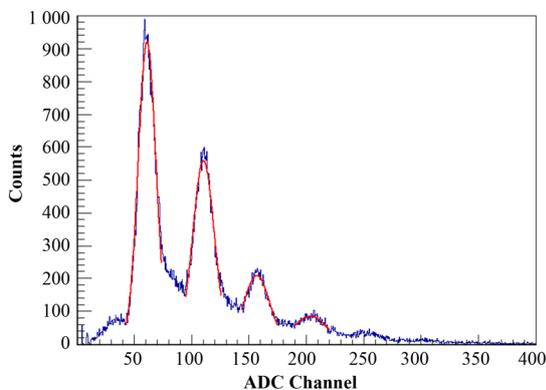


图 7 SiPM 多光子谱
Fig.7 Multiphoton spectrum of SiPM response.

根据测试结果可以得到, 型号为 S12571-025P 的 SiPM 单光子对应 ADC 道数约为 47.91, S12571-010P 型号的 SiPM 对应的 ADC 道数为 13.60。

3.2 不同反射膜对闪烁单元光输出的影响

塑料闪烁条的反射材料对读出单元光输出有直接的影响, 在上述测试系统中对不同反射膜包裹的闪烁单元光输出进行了初步测试研究。

分别测试了同一塑闪条包裹一层 Tyvek 纤维纸、两层 Tyvek 纤维纸和一层 ESR (Enhanced Specular Reflector) 膜三种不同条件下的塑闪条耦合 1600 像素的 SiPM 的光输出以及位置均匀性, 如图 8 所示。由于 SiPM 耦合在塑料闪烁体的一端, 当入射粒子击中塑料闪烁体的不同位置时, 收集到的光子数不同。在塑闪条上靠近 SiPM 的一端, SiPM 收集到的光子数随着击中距离的增大迅速减少, 在距离 SiPM 的位置大于 10 mm 以后, 收集到的光子数趋于平缓。ESR 反射膜在整个可见光谱范围内的反射率都非常高, 所以包裹 ESR 的塑闪条得到的平均光电子数是最高的, 在光输出平坦区间达到了 60 个光电子。由于 Tyvek 纤维纸反射效率低, 所以包裹一层 Tyvek 纤维纸的塑闪条在光输出平坦区只有 20 个光电子左右。包裹两层 Tyvek 的塑闪条光输出比包裹一层 Tyvek 的光输出提高了约 2.6 倍, 但仍然只有 ESR 反射膜的 86%。

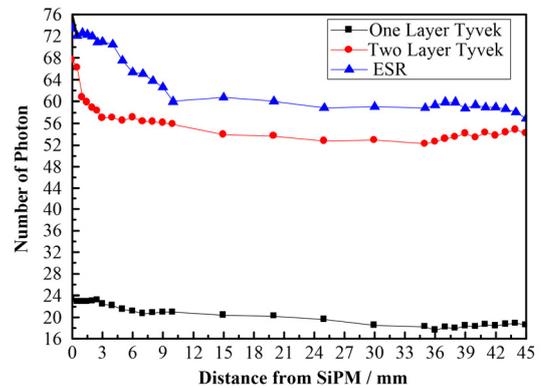


图 8 三种包装方式下的塑闪条均匀性
Fig.8 Uniformity of plastic scintillator strip with the different packaging.

3.3 耦合不同像素 SiPM 闪烁单元光输出及光输出均匀性测试研究

10000 像素的 SiPM 相比于 1600 像素的 SiPM, 具有更大的线性范围, 但是其光子探测效率较低。我们研究测试了塑闪条耦合这两种像素尺寸的

SiPM 的光输出及均匀性, 如图 9 所示。耦合像素数为 1600 (像素尺寸为 25 μm) 的 SiPM 光输出在平坦区平均值为 60 个光电子, 耦合像素数为 10000 (像素尺寸为 10 μm) 的 SiPM 光输出在平坦区平均值为 16 个光电子。测试所用的塑闪发光峰值波长为 425 nm, 由滨松公司提供的手册可知像素数为 10000 的 SiPM 在此波长下的探测效率约为 10%, 像素数为 1600 的 SiPM 在此波长下探测效率约为 36%, 由此可知, 塑闪条耦合这两种型号的 SiPM 得到的光电子数比值与 SiPM 的光子探测效率比值是一致的。10000 像素的 SiPM 具有更大的线性范围, 能更好地满足电磁量能器需求, 是后续研究的重点内容。

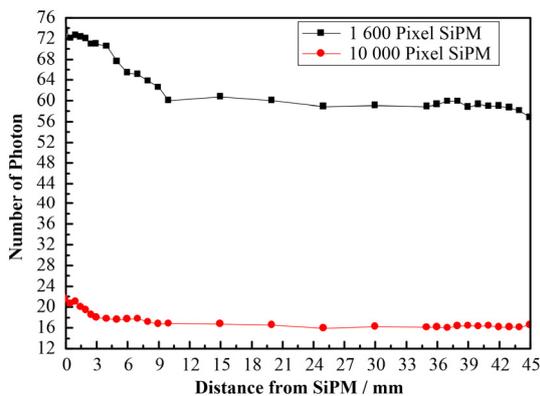


图9 耦合不同像素 SiPM 塑闪条均匀性
Fig.9 Uniformity of plastic scintillator with different coupling pixels SiPM.

4 结语

本文基于 LabVIEW 开发工具设计了一套塑料闪烁体自动化测试系统, 该系统只需要在测试前调试好波形采样参数和塑料闪烁体位置, 在测试过程中不需要手动操作, 节省了大量时间和人力。该程序初步实现了自动化测试, 经过调试后可以稳定测试塑料闪烁体。同时编写了数据拟合处理程序对测试系统获得数据进行处理, 方便了后续研究工作的开展。

基于该测试系统完成了三种不同包裹方式的塑闪条和两种不同像素 SiPM 耦合塑闪条的光输出均匀性的初步测试。通过对比实验发现 ESR 反射膜的反射效果最好, 像素个数为 1600 的 SiPM 光子探测效率更高, 该工作为电磁量能器相关参数的选择提供了参考。

参考文献

1 Aad G, Al E, Bentvelsen S, *et al.* Observation of a new

particle in the search for the standard model higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J]. *Physics Letters B*, 2012, **716**(1): 1–29. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020.

2 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, *et al.* Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC[J]. *Physics Letters B*, 2012, **716**(1): 30–61. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.021.

3 郑翔宇. CEPC 探测器几何模拟验证[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2015.

ZHENG Xiangyu. Validation of CEPC detector's geometry simulation[D]. Shenyang: Liaoning University, 2015.

4 谢一冈. 粒子探测器与数据获取[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 186–486.

XIE Yigang. Particle detector and data acquisition[M]. Beijing: Science Press, 2003: 186–486.

5 CEPC-SppC 合作组. CEPC 初步概念设计报告[J/OL]. 2015-10-16. <http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/volume.html>.

The CEPC-SPPC Study Group. Preliminary conceptual design report[J/OL]. 2015-10-16. <http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/volume.html>.

6 Buzhan P, Dolgoshein B. Silicon photomultiplier and its possible application[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, **504**: 48–52. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00749-6.

7 Golovina V, Saveliev V. Novel type of avalanche photo detector with Geiger mode operation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, **518**: 560–564. DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.085.

8 许浒, 程翀, 刘翎箭, 等. 闪烁体耦合 SiPM 测量 γ 能谱的模拟研究[J]. *核技术*, 2017, **40**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.010401.

XU Hu, CHENG Chong, LIU Lingjian, *et al.* Simulation study of scintillation crystal photocoupling with SiPM for gamma spectrometry[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, **40**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.010401.

9 Cao J, Jiang C Y, Zhao Y F, *et al.* A novel X-ray tube spectra reconstruction method based on transmission measurements[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2016, **27**(2): 45. DOI: 10.1007/s41365-016-0041-6.

10 Wei Q Y, Xu T P, Dai T T, *et al.* Development of a compact DOI-TOF detector module for high performance

- PET systems[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, 28(4): 43. DOI: 10.1007/s41365-017-0202-2.
- 11 Wang Z, Zhao H, Hu T. Performance study for the CEPC ScW Ecal[C]. Proceedings of Science, 38th International Conference on High Energy Physics, Chicago, USA, 2016: 235.
- 12 赵航. CEPC 电磁量能器 ScECAL 方案性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- ZHAO Hang. Performance study on CEPC ScEACL[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.