

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.04.022

# LHAASO-WFCTA 硅光电倍增管 增益温度漂移精确补偿方法

胡刚菱<sup>1</sup>, 周 荣<sup>1</sup>, 白立新<sup>1</sup>, 张寿山<sup>2</sup>, 李 尧<sup>1</sup>, 王玉东<sup>1</sup>

(1. 四川大学 辐射物理与技术教育部重点实验, 成都 610065; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘 要:** 大型高海拔空气簇射观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)的广角切伦科夫望远镜阵列(Wide Field of View Cherenkov Telescope Array, WFCTA)采用新型的固态半导体探测器硅光电倍增管(silicon photomultiplier tube, SiPM)作为光敏探测器. 由于 SiPM 的增益对温度较为敏感, 为使 SiPM 增益在变温环境下保持稳定, 本文研究出了 SiPM 增益温度漂移的精确补偿方法. 该方法通过粗调和细调两个数字电位器的方式实现对低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)输出偏压的调节, 并根据刻度出的模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)监测值与真实偏压的关系, 利用 ADC 的监测值进行反馈调节的方法实现偏压的精确调节, 最终实现 SiPM 增益的精确补偿. 通过使用以该方法实现的电路后, 在相似温度变化范围内, SiPM 的增益波动由补偿前的 71.8% 降低至 0.8%. 结果显示该方法能够实现对因温度引起的 SiPM 增益漂移的很好的补偿.

**关键词:** 硅光电倍增管; 增益; 补偿; 刻度; 反馈调节;

**中图分类号:** TH751      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2020)04-0763-06

## Precise compensation method for gain temperature drift of silicon photomultiplier tube of LHAASO-WFCTA

HU Gang-Ling<sup>1</sup>, ZHOU Rong<sup>1</sup>, BAI Li-Xin<sup>1</sup>, ZHANG Shou-Shan<sup>2</sup>, LI Yao<sup>1</sup>, WANG Yu-Dong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

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

**Abstract:** The Wide Field of View Cherenkov Telescope Array (WFCTA) of Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) uses silicon photomultiplier tube (SiPM), a new solid state semiconductor detector, as a photosensitive detector. Since the gain of SiPM is sensitive to temperature, in order to keep the gain of SiPM stable under the environment of variable temperature, a precise compensation method for SiPM gain temperature drift is developed in this paper. The method realizes the bias adjustment of LDO output by means of coarse and fine adjustment of two digital potentiometers. According to the relationship between the calibrated ADC monitoring value and the real bias voltage, we uses the ADC monitoring value for feedback regulation to realize the precise bias adjustment, and finally obtain the accurate compensation of SiPM gain. Using the circuit realized by this method, the gain fluctuation of SiPM is reduced from 71.8% before compensation to 0.8% within the similar temperature variation range. The results show that this method can achieve a good compensation effect for SiPM gain

收稿日期: 2019-04-19  
基金项目: 国家自然科学基金(11475121)  
作者简介: 胡刚菱(1993-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向为核信息获取与处理. E-mail: 975763305@qq.com  
通讯作者: 周荣. E-mail: r.zhou@foxmail.com

temperature drift.

**Keywords:** Silicon photomultiplier tube; Gain; Compensate; Calibration; Feedback regulation

1 引言

大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)<sup>[1]</sup>位于中国四川省的稻城县海子山(海拔 4 410 m)<sup>[2]</sup>,是一个拥有能够探测高能  $\gamma$  射线和宇宙射线的探测器阵列的多目标工程<sup>[3]</sup>,该项目为国家重大科技基础设施建设项目. LHAASO 由 1.3 km<sup>2</sup>簇射粒子阵列(1.3 km<sup>2</sup> EAS Array, KM2A)、水切伦科夫探测器阵列(Water Cherenkov Detector Array, WCDA)和切伦科夫望远镜阵列(Wide Field of View Cherenkov Telescope Array, WFCTA)组成<sup>[3]</sup>. 作为 LHAASO 三大组成部分之一,WFCTA 承担着测量宇宙射线光谱的任务,WFCTA 能够测量的射线能量范围从 30 TeV 到几 EeV<sup>[4]</sup>. WFCTA 由 12 台切伦科夫望远镜组成,每台望远镜包含 32×32 硅光电倍增管(SiPM)阵列、64 块前置放大电路板、128 块模拟电路板(Analog Board, AB)、64 块温度偏压补偿电路板(CLB)、64 块数字电路板(Data Board, DB)和 1 块触发电路板<sup>[5]</sup>,其中每一块前置放大电路板上连接 16 片 SiPM (SiPM 型号: S13361-3050AS-04 from Hamamatsu). 图 1 是望远镜 32×32 硅光电倍增管阵列的正面图,其背面连接望远镜读出电子学系统.

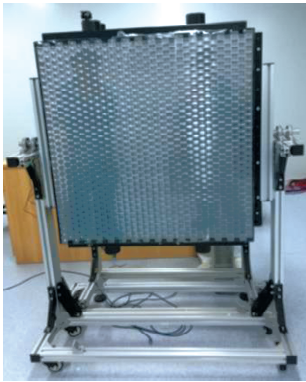


图 1 32×32 硅光电倍增管阵列的正面图  
Fig. 1 Front view of 32×32 silicon photomultiplier array

由于 SiPM 的增益与其偏置电压有关,可以通过调节偏置电压来补偿温度变化对 SiPM 增益的影响<sup>[6-7]</sup>. 对于望远镜而言,其运行环境的环境温度变化较大(约-20~50 ℃),因此 SiPM 的增益受环境影响很大,从而将严重影响整个电子学对光信号的分析 and 处理. 根据项目需求,需要对因温度变

化引起的 SiPM 增益的漂移进行精确补偿,为此提出了 SiPM 增益温度漂移精确补偿的方法,并对方法进行了实现.

2 增益温度漂移补偿方法

2.1 增益补偿分析

SiPM 的增益与温度和偏置电压分别呈负相关和正相关关系,且在测试条件不变的情况下,以上关系保持不变. 因此可以依据 SiPM 增益的温度反向电压系数(为保持增益稳定,温度每变化 1 ℃,偏置电压需要调节的量),通过调节偏置电压的方法来补偿因温度变化引起的 SiPM 增益的漂移<sup>[8-9]</sup>.

为实现 SiPM 增益的精确补偿,最关键的则是需要实现偏置电压的精确调节与 SiPM 工作温度的精确监测.

2.2 项目目标

根据项目需求,提出了以调节偏压实现 SiPM 增益补偿为理论基础的电路实现方法.

望远镜中一块 CLB 连接一块前置放大电路板,即一块 CLB 需要实现对 16 片 SiPM 增益的校正,由于各 SiPM 增益的温度反向偏压系数、工作温度均存在差别,因此一块 CLB 上需要分别包含 16 个相互独立的 SiPM 偏置电压调节通道和工作温度监测通道. 此外为提高电子学系统的可靠性,需要实时监测偏置电压的工作状况,因此还需要 16 个偏置电压监测通道.

CLB 的具体设计指标如表 1 所示.

表 1 CLB 设计指标  
Tab. 1 Design indexes of CLB

| 指标名称        | 指标                                                   |
|-------------|------------------------------------------------------|
| 偏置电压调节      | 16 个通道、<br>54~64 V 可调、<br>调节步长小于 3 mV、<br>精度低于 15 mV |
| 偏置电压监测      | 16 个通道、<br>精度低于 15 mV                                |
| SiPM 工作温度监测 | 16 个通道、<br>精度低于 0.3 ℃                                |

对于电压调节,当调节范围越大时,越难实现小步长的电压调节,而该设计要求实现偏压在满足



偿的关键如下:通过调节数字电位器实现对 LDO 输出的偏压的调节,利用 ADC 的监测值进行反馈调节的方法实现偏压的准确调节,通过刻度出的 ADC 监测值与真实偏压的比例关系,以进一步提高反馈调节的精度。

3 方法实现

3.1 电路实现

3.1.1 实际电路 图 3 为实际电路的正面图。LDO 芯片型号为 LR8N8, 数字电位器 A 为 AD5280BRUZ50(8 位,量程 50 K),数字电位器 B 为 AD5175BRMZ-10(10 位,量程 10 K),ADC 为 AD7606BSTZ(16 位 ADC,8 个输入通道),FPGA 为 XC6SLX25-2FGG484I, CLB 温度芯片为 DS75LV5+。其中 LDO 输入端提供 80 V 直流电源,线性稳压电源(LT3012)与低噪声 LHAASO-WFCTA 数字电路电源模块<sup>[12]</sup>对 80 V 与 5.2 V 输入进行降压并作为 FPGA 等芯片的输入电源。

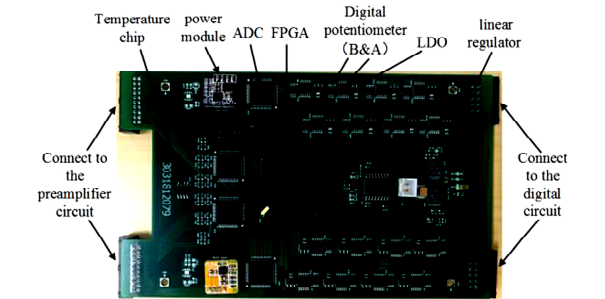


图 3 温度电压补偿电路实际电路板正面图  
Fig. 3 Front view of temperature and voltage compensation circuit board

对于 SiPM 工作温度的监测,WFCTA 中 SiPM 背面附有温度芯片(lm94021),设计使用与偏压监测相同的 ADC 实现 SiPM 工作温度的监测,温度监测精度低于 0.3 ℃。

此外为保证 ADC 监测值修正系数的稳定性,需要选用稳定性较好的电阻,对于图 2 中的  $R_1$  与  $R_2$ ,本设计选用的是规格为精度 0.1%,温漂  $2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  的贴片电阻(产品名:VIKING)。

3.1.2 电路关键设计 由于设计需要实现偏压在 54~64 V 可调范围的 3 mV 的调节步长,因此 LDO 部分的设计非常关键。

对于数字电位器而言,量程越大,电阻调节步长一般也越大。对此,本设计提出了采用两个分别为大量程和小电阻调节步长的电位器搭配的方法(如图 2): 电位器 A 的大量程用以增大偏置电压

的调节范围,电位器 B 的小步长实现偏置电压的细调。图 4 是 LDO 及其配置电路的设计框图。

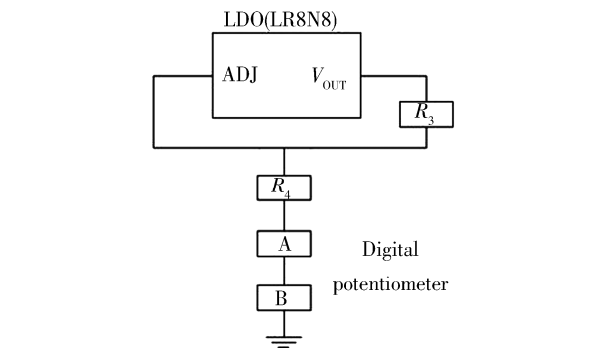


图 4 LDO 及其配置电路的设计框图  
Fig. 4 Design block diagram of LDO and its configuration circuit

LDO 理论输出电压值的公式( $I_{\text{ADJ}}$  典型值为  $1.0 \times 10^{-5} \text{ A}$ )为:

$$V_{\text{OUT}} = 1.2(1 + \frac{R'}{R_3}) + I_{\text{ADJ}} \cdot R' \tag{3}$$

$$R' = R_4 + R_A + R_B \tag{4}$$

公式(4)中, $R_A$ 、 $R_B$  分别代表电位器 A、B 的阻值; $R_3$ 、 $R_4$  的阻值分别 4.87 和 200 K。根据公式可推算电位器 A 的满量程对应偏压调节范围约 12.3 V,电位器 B 的 1 LSB 的变化对应 LDO 输出电压变化约 2.4 mV,LDO 输出电压的理论可调范围达到 51.281~66.665 V。

3.2 监测值修正系数  $k_1$  标定

图 5 是对 ADC 监测值修正系数  $k_1$  进行标定的测试框图。恒温恒湿箱对环境温度进行控制,标定需要使用精度较高的万用表,实验选用的是 6 位半万用表(FLUCK 8846A)。

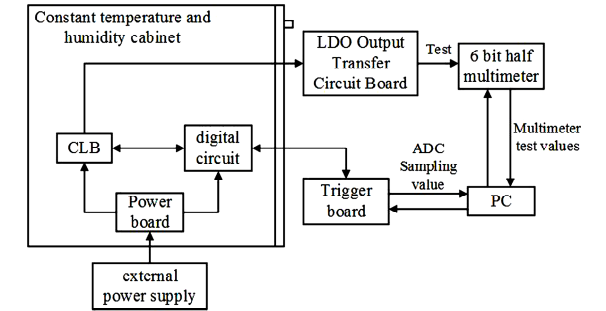


图 5 标定测试实验框图  
Fig. 5 Experimental block diagram of calibration test

具体标定方法为:恒温恒湿箱共设置 5 个温度点(-20、0、20、40、60 ℃),每个温度点下设置 3 组电位器值,3 组电位器值分别为(电位器 A 调节步长,电位器 B 调节步长):(60,240)、(135,540)、

(210,840). 为了减小 ADC 的采样误差,每次偏置电压的 ADC 采样值为连续采样 512 个点的平均值. 由于 LDO 输出电压存在波动,为了减小对 LDO 输出电压值的测量误差,选择每个电位器值设置点下,万用表实测值和 ADC 采样值均重复测试 4 次取平均,测试显示重复测试 4 次的标准差约 0.7 mV.

3.3 偏置电压调节与监测精度测试

实验内容如下:恒温箱依次设置-10、0、10、20、30、40、50 ℃共 7 个温度,每个温度下 CLB 的 16 个通道均依次设置 54、59、64 V 三个电压值,分别统计所有设置值下的调节误差与监测误差.

测试结果显示偏置电压调节误差  $\sigma$  仅约 2.7 mV,各通道最大调节误差值为 9.7 mV;偏置电压监测精度更高,误差  $\sigma$  仅约 2.4 mV,最大误差仅 8.3 mV. 因此偏置电压的调节与监测误差均能满足设计要求.

3.4 增益温度反向偏压系数  $k_2$  测试

SiPM 增益的温度反向偏压系数可由增益与温度以及偏置电压的两个关系得到.

实验首先对 SiPM 增益随温度的变化情况进行测试. 实验框图如图 6 所示. 实验中 SiPM 的偏置电压固定为 57 V,温度测试范围为-10~50 ℃,实验利用函数发生器触发 LED 发光并作为 SiPM 探测的光源,为尽可能消除 LED 光强的温度效应,使 LED 光经过光纤传导至恒温箱内.

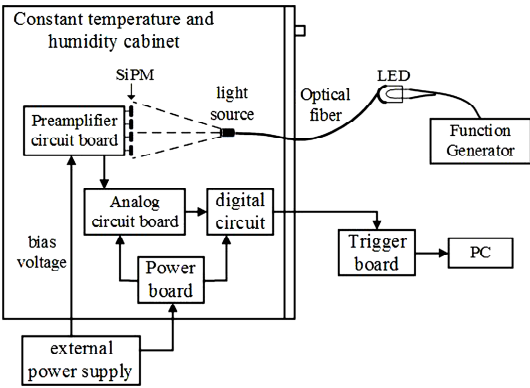


图 6 增益随温度变化测试的测试框图  
Fig. 6 Test block diagram of gain test with temperature variation

SiPM 增益随温度的变化曲线如图 7 所示,图中增益为以 20 ℃为基准的相对增益. 结果显示, SiPM 的增益与温度的线性相关系数  $R^2$  为 0.996, 增益与温度的线性很好,此外可以看到温度每变化 1 ℃,增益约变化 1.2%.

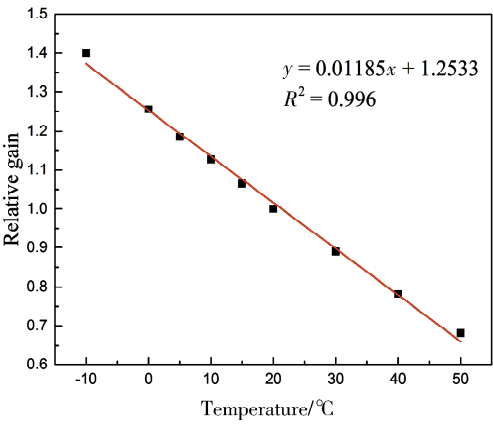


图 7 SiPM 相对增益随温度的变化曲线  
Fig. 7 Variation curve of SiPM relative gain relative to temperature

SiPM 增益与偏置电压关系测试的测试框图不变(如图 6),恒温箱恒温为 20 ℃,偏置电压测试范围为 54~60 V,增益随偏置电压变化测试结果如图 8 所示.

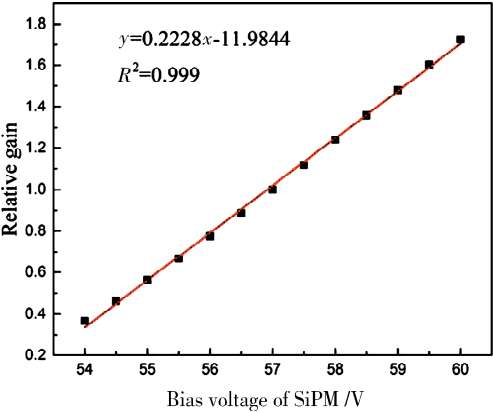


图 8 SiPM 相对增益随偏置电压的变化曲线  
Fig. 8 Variation curve of SiPM relative gain relative to bias voltage

可以看到 SiPM 的增益与偏置电压线性相关度达到 0.999. 电压每变化 1 V,增益约变化 22%.

根据增益随温度变化以及偏置电压变化的测试结果,得出公式 5、6 两个关系式,其中  $G$  代表相对增益.

$$G = 0.01185T + 1.2553 \tag{5}$$

$$G = 0.2228V + 11.9844 \tag{6}$$

根据公式 5、6,求微分后得到系数  $k_2$  的值:

$$k_2 = \frac{dV}{dT} = 0.0532 \tag{7}$$

由此得到 SiPM 增益的温度反向偏压系数为 53.2 mV/℃,即温度每上升(下降)1 ℃,偏置电压需要减小(增大)约 53.2 mV. 测试结果与 SiPM

在 20 ℃ 下的标称值近似,标称值为 54 mV/℃.

4 SiPM 增益温度漂移补偿结果

根据测试得到的 SiPM 增益的温度反向偏压系数,对温度变化范围-10~50 ℃ 下的 SiPM 进行增益温度漂移补偿测试,测试结果如图 9 所示,图中增益为以 20 ℃ 为基准的相对增益.

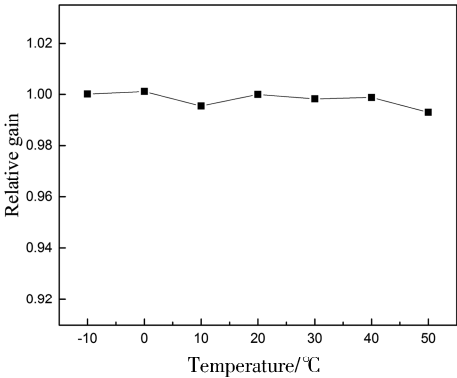


图 9 SiPM 增益校正后增益测试结果  
Fig. 9 Test result of SiPM gain after correction

从结果可以看出,经过补偿后,SiPM 增益随温度变化而变化的程度明显减小,在 60 ℃ 温度变化范围内,增益最大波动仅 0.8%,相对于补偿前增益 71.8%的波动,补偿后的增益变得非常稳定.因此本文所设计的温度偏压补偿电路对 SiPM 的增益温度响应有很好的抑制作用.

5 结 论

本文实现的 SiPM 增益温度漂移精确补偿方法的特点在于:(1)采用粗调和细调两个数字电位器,对 LDO 输出进行调节的方法;(2)根据输出电压目标值,利用 ADC 的监测值进行反馈调节的方法实现偏压准确调节;(3)对 ADC 监测值与 LDO 实际输出电压值的比例系数  $k_1$ ,进行了随电路板温度和 LDO 输出电压变化的标定,保证了反馈调节的精度.

通过使用以本方法为原理设计的电路后,SiPM 增益波动由补偿前的 71.8%降低至 0.8%,

增益补偿效果优于现有的 SiPM 增益校正系统设计. 本设计能够实现 SiPM 增益温度漂移的精确补偿,满足了 WFCTA 中 SiPM 增益温度漂移补偿的需求. 通过本方法能够提高 SiPM 在 PET 等领域的应用价值.

参考文献:

[1] 何会海. 大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)计划[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告—中国核学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国核会, 2009.

[2] Cao Z. Status of LHAASO updates from ARGO-YBJ [J]. Nucl Instrum Meth A, 2014, 742: 95.

[3] He H H. Design of the LHAASO detectors [J]. Radiat Detect Techn Method, 2018, 2: 7.

[4] Bi B Y, Zhang S S, Cao Z, *et al.* Performance of SiPMs and pre-amplifier for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO [J]. Nucl Instrum Meth A, 2018, 899: 94.

[5] 黄九余, 申丰兆, 周荣, 等. LHAASO-WFCTA 多通道数据高速传输方案设计[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36: 1259.

[6] 黄敏敏, 朱兴龙. 硅光电探测器的发展与应用[J]. 机械工程与自动化, 2011, 12: 203.

[7] 戴泽, 全林, 程晓磊, 等. 硅光电倍增探测器温度特性分析与实验[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34: 298.

[8] 李正伟, 徐玉朋, 刘聪展, 等. 硅光电倍增管的增益控制装置、系统及增益控制方法: CN201410797762.9 [P]. 2014-12-18.

[9] 王忠海, 刘飞, 李磊, 等. 一种修正温度对 SiPM 增益影响的方法: CN201710695358.4 [P]. 2017-08-15.

[10] 范鹏, 许天鹏, 王石, 等. 硅光电倍增器件(SiPM)的自动增益校正[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33: 4.

[11] PET 探测器温度补偿系统的研究与设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

[12] 张进文, 周荣, 张京隆, 等. LHAASO-WFCTA 数字电路电源模块设计[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35: 909.

引用本文格式:

中 文: 胡刚菱, 周荣, 白立新, 等. LHAASO-WFCTA 硅光电倍增管增益温度漂移精确补偿方法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 763.

英 文: Hu G L, Zhou R, Bai L X, *et al.* Precise compensation method for gain temperature drift of silicon photomultiplier tube of LHAASO-WFCTA [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 763.