



·前沿技术与交叉科学·

硅光电倍增管自动增益校正系统设计*

张 琦¹, 王传伟^{1,2}, 李洪涛²

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所,
脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 温度会使硅光电倍增管的增益产生较大的漂移, 进而影响硅光电倍增管的增益精度。为了使硅光电倍增管增益不随温度发生较大变化, 设计了硅光电倍增管的自动增益校正系统, 包括基于单片机的高压电源设计与采集系统设计。高电压模块精确工作的温度范围为 $-10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电源噪声约为 30 mV , 满足硅光电倍增管性能测试的需求。采集系统经过扫频测试与激光照射测试, 可以较好地通过 60 MHz 的交流信号, 并将光信号转变为较明显的电信号。该系统可以向京邦公司的硅光电倍增管阵列 JARY-TP3050-8X8C 提供工作电压与采集电路。

关键词: SiPM; STM32; 自动增益校正; LM2576-ADJ; DS18B20

中图分类号: TP272

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210540

Design of automatic gain correction system for silicon photomultiplier tube

Zhang Qi¹, Wang Chuanwei^{1,2}, Li Hongtao²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

2. Key laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: The gain of silicon photomultiplier tube will drift greatly due to temperature variation, which will affect the gain accuracy of silicon photomultiplier tube. To realize that silicon photomultiplier tube gain does not change greatly with temperature variation, an automatic gain correction system for silicon photomultiplier tube is designed, including the design of a high voltage power supply and an acquisition system based on single chip microcomputer. The high voltage module can accurately operate in the temperature range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the power noise is about 30 mV , which can meet the requirements of silicon photomultiplier tube performance testing. Through frequency sweep test and laser irradiation test, the acquisition system can better pass the 60 MHz AC signal, and transform the optical signal into a more obvious electrical signal. The system provides a working voltage and acquisition circuit to Jingbon Compony's silicon photomultiplier tube array JARY-TP3050-8X8C.

Key words: SiPM, STM32, automatic gain correction, LM2576-ADJ, DS18B20

硅光电倍增管(SiPM)作为一种新型的高性能半导体光电探测器件, 具有许多优于传统光电倍增管(PMT)的性能。如宽光谱响应范围; 低工作偏压($30\sim 100\text{ V}$); 强抗干扰能力; 快速响应能力; 高增益($10^5\sim 10^6$)等。SiPM已在多个研究领域成为替代传统 PMT 的最佳选择, 如医学成像、激光探测与测量、精密分析等。SiPM 的增益依赖于工作温度与偏置电压^[1-2]。在实际使用中, SiPM 增益补偿通常有三种做法: 一类是保证环境温度尽可能恒定^[3-4], 即将系统放入恒温箱中, 或通过水冷系统保持器件温度恒定。这种方法会使系统体积过大, 不利于系统小型化。一类是动态调节前置放大器的放大倍数^[5], Lightfoot P K 等人应用稳压二极管动态调节采集电路的信号幅度^[6]。一类是加入温度补偿电压电路来改变工作电压^[7-9], 兰州大学应用热敏电阻对 SiPM 的工作电压进行温度补偿^[10]。但是稳压二极管、热敏电阻的温度系数需要与 SiPM 相匹配, 使用不同 SiPM 时需要重新挑选稳压二极管与热敏电阻。

* 收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-03-17
基金项目: 国家自然科学基金项目 (11905208)
联系方式: 张 琦, zhangqi19@gscaep.ac.cn。
通信作者: 李洪涛, lihongtao-ifp@caep.cn。

本文设计了基于 ST(意法半导体)公司设计生产的 32 位单片机 STM32(ST 意法半导体, Microelectronics 微控制器, 32 bit) 的增益校正系统, 通过偏压补偿来削弱温度变化对 SiPM 器件增益的影响。与传统方式相比, 本文的系统通过软件编程可以很好的适应不同 SiPM 的使用要求, 系统体积更小, 温度变化更加敏感。

1 SiPM 高压设计原理

温度升高时, 硅材料的晶格震动加剧, 载流子与晶格的碰撞几率增大, 载流子通过电场加速积累动能以达到能发生碰撞电离的概率降低, SiPM 的增益降低。此时, 需要增大反向工作电压以提高耗尽区内的电场强度, 进而提高碰撞电离的概率, 以维持 SiPM 增益不变。同理, 温度降低时需要降低反向工作电压, 以维持 SiPM 增益不变^[11-15]。

当温度固定时, SiPM 的增益与工作电压线性相关。当工作电压固定时, 增益则随环境温度的增加而降低。存在关系式

$$G = -aT + bV_{op} \tag{1}$$

式中: G 为增益, T 为温度, V_{op} 为工作电压。

保证增益不变, 在数学上就是保证全微分 $dG = 0$

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial G}{\partial V}\right)_T dV = -adT + bdV = 0 \tag{2}$$

利用不定积分求出工作电压 V_{op} 关于工作温度 T 的函数关系, 即

$$V_{op} = \frac{a}{b} \times T + c \tag{3}$$

过电压为工作电压与击穿电压(SiPM 恰好发生盖革放电时的工作电压)的差值, 即

$$V_{ov} = V_{op} - V_{br} \tag{4}$$

式中: V_{ov} 为过电压, V_{br} 为击穿电压。

针对京邦公司 JARY-TP3050-8X8C 型 SiPM 阵列进行了电压补偿设计。该型 SiPM 的增益与温度(工作电压 27 V)、增益与过电压(工作温度 25 °C)的关系如图 1 所示。

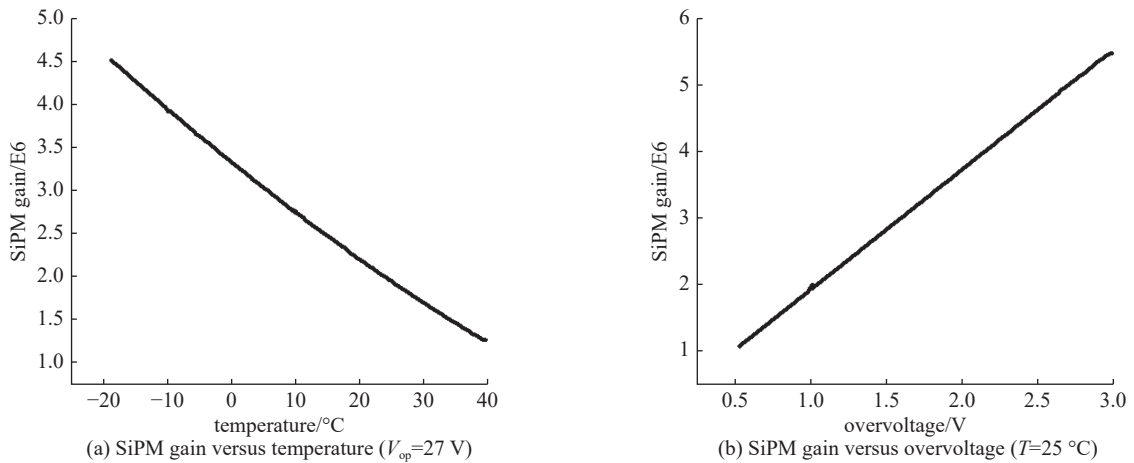


Fig. 1 SiPM gain versus temperature and overvoltage

图 1 SiPM 增益与温度、过电压的关系

SiPM 的增益随温度的升高而线性下降, 拟合后的增益-温度关系为

$$G = (-0.055 12T + 3.807 08) \times 10^6 \tag{5}$$

式中: 环境温度单位为 °C。

SiPM 的增益随过电压的增高而增大, 拟合后的增益-过电压关系为

$$G = (1.602 2V_{ov} + 0.175 18) \times 10^6 \tag{6}$$

式中: V_{ov} 为 SiPM 的过电压, 单位为 V。

由公式(5)、(6)计算得到

$$\frac{dV_{op}}{dT} = 0.0344 \quad (7)$$

同时,根据数据手册,击穿电压 V_{br} 在 25 °C 时取值 25 V,规定过电压为 2 V,即

$$V_{ov} = 2V \quad (8)$$

计算得到工作电压与温度的关系:

$$V_{op} = 0.0344 \times T + 26.14 \quad (9)$$

2 高压电源设计

高压电源的系统结构组成如图 2,主要包括微处理器 (STM32)、温度传感器 (DS18B20)、串行通信模块、DAC、DC-DC Converter (LM2576-ADJ)。

高压电源模块的各部分功能如下:(1)温度传感器将测量得到的环境温度转变为数字信号并传送至微处理器;(2)微处理器根据当前温度以及预设的温度增益曲线实时调整 DAC 输出的模拟电压值;(3)DAC 输出电压影响 DC-DC 电源芯片输出电压,进而实现了 SiPM 偏置电压的调节;(4)串行通信模块主要负责微处理器与上位机之间的数据交换。

LM2576 稳压器内部包含 52 kHz 振荡器、1.23 V 基准稳压器、热关断电路、电流限制电路、开关管、放大器、比较器及内部稳定电路,只需要极少的外围器件便可以构成高效稳压电路^[16],电路组成如图 3。

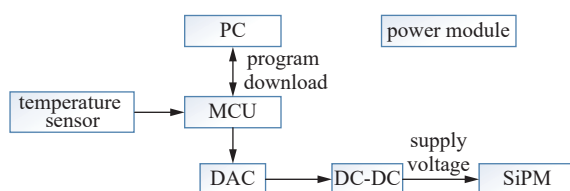


Fig. 2 High voltage power supply structure diagram

图 2 高压电源结构图

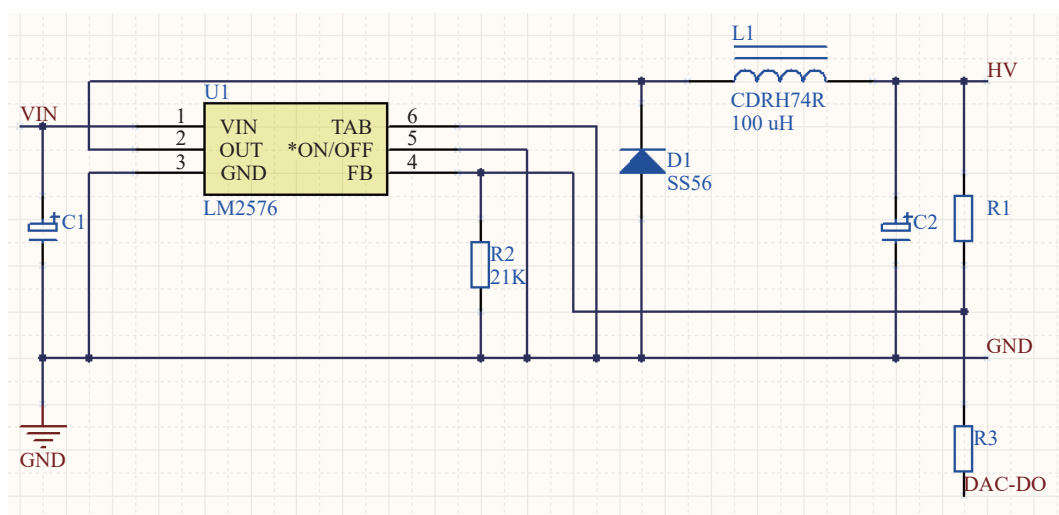


Fig. 3 Circuit diagram of LM2576 - ADJ

图 3 LM2576-ADJ 电路图

输出电压具体计算公式为

$$H_V = \frac{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2}{R_1 R_3} V_{FB} - \frac{R_2}{R_3} V_{DAC} \quad (10)$$

式中: H_V 为 LM2576 输出高压, V_{FB} 为 LM2576 反馈引脚输出电压, V_{DAC} 为设定电压。

由于半导体材料本身特性的限制, SiPM 工作时暗噪声较大,因而 SiPM 对其电源输出精度有较高要求。设计中添加 LC 滤波电路来降低电源噪声。

3 高电压模块验证

3.1 高电压模块噪声测试

应用示波器测量高电压模块的噪声大小。经测量,示波器自身噪声约为 10 mV。将 LM2576-ADJ 输出端连接

至示波器,测量高电压模块的噪声,结果如图4所示。LM2576-ADJ的输出噪声约为30 mV,可以应用于SiPM阵列高工作电压供电。具体实验数据如表1所示。

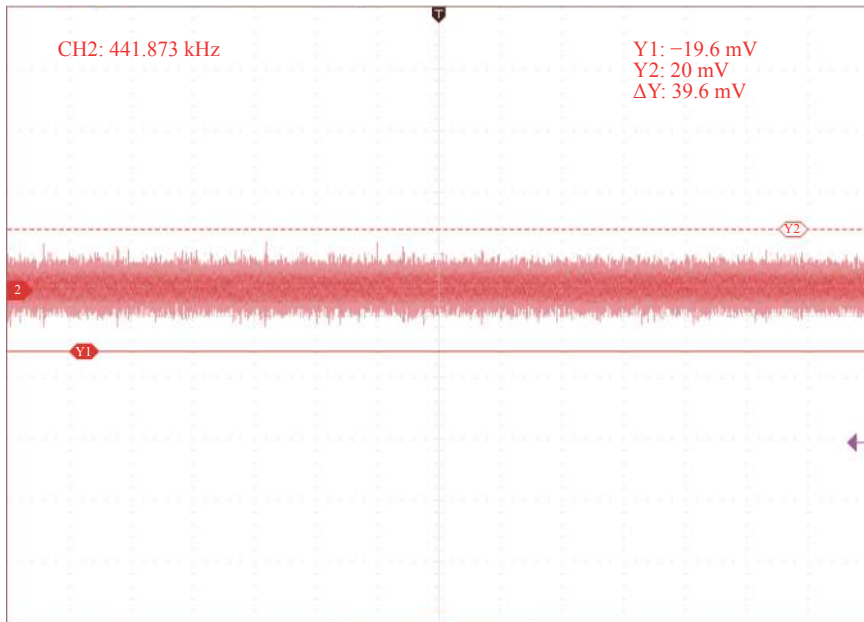


Fig. 4 Output voltage noise of LM2576-ADJ

图4 LM2576-ADJ 输出电压噪声

表 1 测试结果表

Table 1 Results of experiments

designed temperature/°C	test temperature/°C	theoretical output voltage/V	actual output voltage/V
-20	-22.1	25.452	25.52
-10	-10	25.796	25.81
0	0.1	26.14	26.15
10	9.9	26.484	26.48
20	20.0	26.828	26.83
30	30.1	27.172	27.17
40	39.9	27.516	27.52
50	50.1	27.86	27.87
60	60.0	28.204	28.21
70	70.3	28.548	28.61

3.2 高电压模块温控测试

通过恒温箱模拟环境温度变化,并在不同温度下对电源模块进行测试。相关的性能测试主要包括两方面:温度传感器能否精确测量环境温度、高电压模块是否可以提供精准的输出电压。

温度传感器与输出电压模块在-10 °C~60 °C 的温度范围内较精确,温度传感器的测量误差约为 0.17 °C。

结合公式(1)、(5)、(6),温度传感器的误差、高电压模块噪声引起的系统增益误差的理论值为

$$\Delta G = \left| \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_V \right| \Delta T + \left| \left(\frac{\partial G}{\partial V} \right)_T \right| \Delta V \quad (11)$$

计算得到,增益误差理论值为 5.7×10^4 ,满足系统要求。

4 SiPM 阵列采集电路设计

SiPM 阵列采集电路原理图如图 5 所示。

将 JARY-TP3050-8X8C SiPM 阵列分为四大部分，每个通道通过相同阻值的电阻耦合至第一级放大器的输入端，这样每一部分均构成一路加法器。4 路加法器耦合至第二级放大器，最终实现所有通道的加和输出。

采集系统的温度漂移主要来源于电阻的温度系数以及运放的温度漂移。对于电阻，可以选用正负温度系数近似抵消的电阻。对于运放，可以选择温漂系数较低的运算放大器并设计负反馈放大电路。这样能够基本忽略这两方面温度效应对系统采集精度的影响^[17]。

5 SiPM 阵列采集电路测试

5.1 采集电路扫频测试

应用信号发生器对 AD8004 的单个通道施加不同频率的正弦信号，测量 AD8009 的输出信号。经测试，采集系统可以通过 60 MHz 的高频信号。60 MHz 输入信号下的输出波形如图 6 所示。

5.2 激光照射测试

在黑暗条件下，用红色激光笔照射 SiPM 阵列，示波器观察输出，结果如图 7 所示。

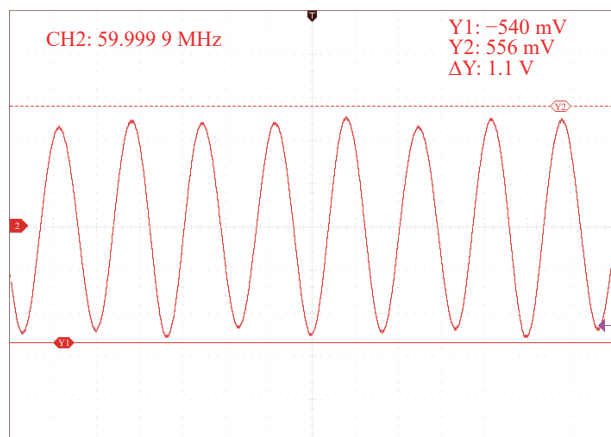


Fig. 6 Output voltage diagram at 60MHz input frequencies

图 6 60MHz 输入频率下的输出电压信号图

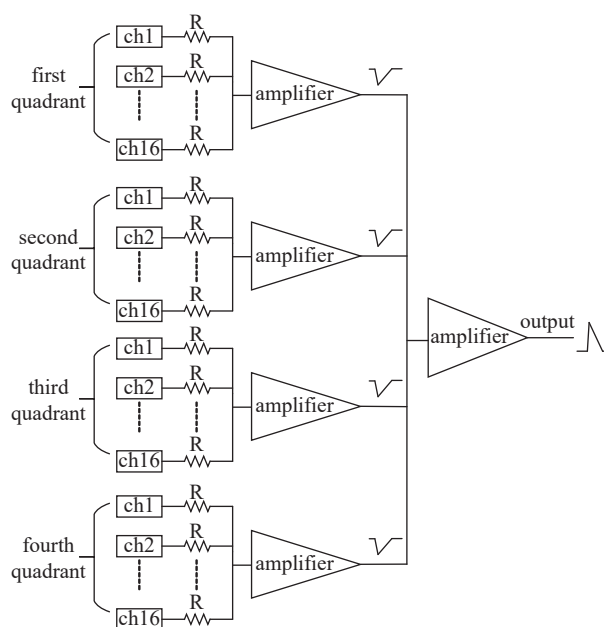


Fig. 5 Circuit diagram of SiPM array

图 5 SiPM 阵列采集电路原理

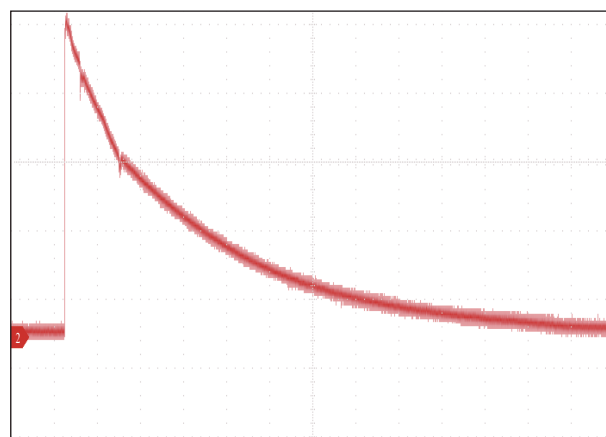


Fig. 7 Circuit output under laser irradiation

图 7 激光照射输出

激光照射前，系统处于黑暗状态下，系统输出暗噪声，数值较小。激光照射瞬间，SiPM 发生盖革放电，系统输出瞬间增大。由于 SiPM 自动淬灭特性，盖革放电自动停止，系统输出逐渐降低至放电前的状态。因而，示波器采集的信号是正常的 SiPM 输出信号。

6 结论

本文针对京邦公司的 SiPM 阵列 JARY-TP3050-8X8C 设计了 SiPM 的自动增益补偿的高电压系统与 SiPM 阵列的采集系统，并进行了相关的实验验证。高电压系统包括温度传感器、STM32、DAC、DC-DC 芯片等，系统精确工作温度范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，电源噪声约为 30 mV，可以满足 SiPM 性能测试的需求。采集系统包括两级运算放大，可以较好地通过 60 MHz 的交流信号，并将光信号转变为较明显的电信号。

参考文献：

- [1] 侯会良, 黄跃峰, 程懋松, 等. 小型智能程控 SiPM 电源设计与验证[J]. 核技术, 2020, 43: 060402. (Hou Huiliang, Huang Yuefeng, Cheng Maosong, et al. Design and verification of small intelligent programmable SiPM power supply[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43: 060402)

- [2] 高峰, 钱森, 宁哲, 等. 光电探测器件的单光电子谱数据获取[J]. *核技术*, 2019, 42: 100404. (Gao Feng, Qian Sen, Ning Zhe, et al. Data acquisition system for single photoelectron spectra of photoelectric detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 100404)
- [3] 韩晓雪, 曾鸣, 龚光华, 等. 针对SiPM探测器的多通道读出电子学设计[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54(6): 695-699,718. (Han Xiaoxue, Zeng Ming, Gong Guanghua, et al. Multi-channel SiPM readout system[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(6): 695-699,718)
- [4] Lightfoot P K, Barker G J, Mavrokoridis K, et al. Characterisation of a silicon photomultiplier device for applications in liquid argon based neutrino physics and dark matter searches[J]. *Journal of Instrumentation*, 2008, 3: P10001.
- [5] 方灿, 衡月昆, 梁静静, 等. 基于温度补偿的多通道MPPC增益稳定性及一致性研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2015, 35(6): 527-530,534. (Fang Can, Heng Yuekun, Liang Jingjing, et al. 4×4 multi-channel MPPC gain stability and uniformity study based on the temperature compensation[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015, 35(6): 527-530,534)
- [6] Eigen G. Gain stabilization of SiPMs and afterpulsing[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2019, 1162: 012013.
- [7] Shukla R A, Achanta V G, Dugad S R, et al. Multi-channel programmable power supply with temperature compensation for silicon sensors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 015114.
- [8] Huh Y, Choi Y, Ho Jung J, et al. A method to stabilize the temperature dependent performance of G-APD arrays[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 772: 83-88.
- [9] 张猛超, 李东仓, 徐小恒, 等. 硅光电倍增管探测器温度补偿电源设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2019, 39(6): 781-785. (Zhang Mengchao, Li Dongcang, Xu Xiaoheng, et al. Design of temperature compensation power supply for SiPM detector[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2019, 39(6): 781-785)
- [10] 范鹏, 许天鹏, 王石, 等. 硅光电倍增器(SiPM)的自动增益校正[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(1): 4-7. (Fan Peng, Xu Tianpeng, Wang Shi, et al. An initial study of automatic gain stability of SiPM[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(1): 4-7)
- [11] 尹士玉, 陈鹏宇, 马丽双, 等. SiPM低压电源模块性能研究[J]. *核技术*, 2019, 42: 090403. (Yin Shiyu, Chen Pengyu, Ma Lishuang, et al. Study of the low voltage power module for SiPM[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42: 090403)
- [12] 陈宗德, 王玥, 李晨晖, 等. PET应用中的硅光电倍增器研究[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(s1): 650-654. (Chen Zongde, Wang Yue, Li Chenhui, et al. Research of SiPM in PET application[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(s1): 650-654)
- [13] 马付平, 张广鑫, 张高龙, 等. 多像素光子计数器(MPPC)的性能测试[J]. *物理与工程*, 2015, 25(3): 38-41. (Ma Fuping, Zhang Guangxin, Zhang Gaolong, et al. Performance test of multi-pixel photo counter (MPPC)[J]. *Physics and Engineering*, 2015, 25(3): 38-41)
- [14] 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(3): 298-302. (Dai Ze, Quan Lin, Cheng Xiaolei, et al. Temperature characteristic analysis and experimental study of SiPM[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 34(3): 298-302)
- [15] 肖风云, 王占军. 多像素光子计数器的性能研究[J]. *工业计量*, 2019, 29(4): 52-53. (Xiao Fengyun, Wang Zhanjun. Study on performance of Multi-pixel photon counter[J]. *Industrial Metrology*, 2019, 29(4): 52-53)
- [16] Hu Tianpeng, Wang Shi. LM2576/LM2576HV Series SIMPLE SWITCHER® 3A step-down voltage regulator[R]. National Semiconductor, 2004.
- [17] 吴哲. 微弱荧光信号检测及处理技术研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015. (Wu Zhe. Research on detection and processing technology of weak fluorescence signal[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015)