

光电倍增管寿命试验研究与系统设计*

赵 艳, 潘 超, 赵一鸣, 刘宇哲, 时志云, 梅艳鹏
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

摘要: 光电倍增管 (PMT) 是空间光学探测应用的重要探测器件之一, 由于制造工艺的限制, 光电倍增管具有很强的个体差异性。设计了一套应用于星载激光大气探测雷达的光电倍增管寿命评估自动测试系统, 并建立科学的测试方法与流程, 通过对光电倍增管光电响应与暗电流等关键参数的试验、监测与分析, 研究评估了其寿命特性。

关键词: 光电倍增管; 寿命试验; 测试系统; 光电响应度

中图分类号: TN152 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)06-0107-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20200721001

引用格式: 赵艳, 潘超, 赵一鸣, 等. 光电倍增管寿命试验研究与系统设计[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 107-112.

Research on life test and system design for PMT photomultiplier tube

ZHAO Yan, PAN Chao, ZHAO Yiming, LIU Yuzhe, SHI Zhiyun, MEI Yanpeng
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: Photomultiplier tube (PMT) is one of the important probe a space optical detection applications. Due to the limitation of manufacturing process, the photomultiplier tubes have great individual difference. This paper designed a set of applied in space-borne laser atmospheric detection radar automatic test system of photomultiplier tube life evaluation, and established a scientific testing methods and processes. Based on key parameters such as photomultiplier tube and dark current and photoelectric response test, monitoring and analysis, the life characteristic of photomultiplier tube was studied and evaluated .

Key words: Photomultiplier Tube; Life test; Test system; Photoelectric response

DOI: 10.12347/j.ycyk.20200721001

Citation: ZHAO Yan, PAN Chao, ZHAO Yiming, et al. Research on life test and system design for PMT photomultiplier tube[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 107-112.

引 言

星载大气探测激光雷达是天基平台获取云-气溶胶分布的有力工具, 其通过发射高功率激光脉冲, 探测后向散射微弱光信号反演获取云-气溶胶的光学及微物理参数。其中, 微弱信号获取能力是激光雷达实现远距离探测的关键, 而实现微弱信号探测的核心之一是采用高灵敏度、高稳定度、低噪声、长寿命的光电转换器件^[1]。对于大气激光雷达系统常用的 532 nm 探测波长, 考虑量子效率、暗噪声、内部增益、寿命等因素, 优选的光电转换器件为光电倍增管 PMT (Photomultiplier Tube)。

光电倍增管是空间光学探测应用的重要探测器件之一, 它利用的是外光电效应、二次电子发射理论, 具有高增益、低噪声、高频率响应等特性, 是一种具有极高灵敏度和超快时间响应的光敏电真空器件, 可以工作在紫外光谱、可见光谱甚至近红外光谱区^[2]。用于星载大气探测激光雷达的光电探测器需要在复杂空间环境条件下保证长期稳定工作, 但由于制造工艺的限制, 光电倍增管具有很强的个体差异性, 因此, 需要对每支探测器的参数指标进行详细的测试, 并根据性能衰退特性, 建立典型浴盆曲线, 经过筛选和预老化后获得高可靠长寿命的光电倍增管探测器。

充分评估光电倍增管的寿命特性, 是确保其空间应用的重要基础。本文设计了一套光电倍增管的寿命测试试验系统, 采用加速寿命试验方法, 对批量光电倍增管核心参数进行长期监测, 高效自动获取光

*基金项目: 中国航天科技集团自主研发基金项目“激光三维海空环境综合测量系统关键技术”

收稿日期: 2020-07-21 收修改稿日期: 2021-06-29

电倍增管关键参数随时间变化的衰减特性, 从而研究评估其寿命特性。

1 寿命试验方案设计

光电倍增管是一种光敏电真空器件, 主要由入射光窗、一个光阴极、若干倍增级与一个阳极组成。其工作原理为: 入射光通过光窗照射光阴极时, 由于光电发射效应, 光阴极受光子激发发射电子, 电子数目与入射光强成正比; 在外加高压作用下, 电场使电子沿一定轨迹运动, 落在各个倍增级上, 由于次级发射效应, 倍增级发射出数目更多的电子; 多级倍增产生大量电子后被阳极收集, 形成较大的输出电流^[3]。其原理框图如图 1 所示。

表征光电倍增管特性的参数包括光电参数、放射学参数和结构机械参数, 其中, 光电参数又分为静态参数与动态参数。静态参数主要包括光照灵敏度、增益、暗电流、线性度等, 动态参数包括脉冲上升时间、光子脉冲宽度、光子分辨率、渡越时间等^[4]。对于星载大气探测激光雷达项目中的应用, 光电倍增管工作在模拟探测模式, 大气后向散射光子在数百微秒内连续进入光电倍增管, 最终阳极输出一个具有散粒噪声起伏的连续电流, 该电流强度与入射光强成线性关系。由于接收到的散射光信号光电转换后信号带宽较窄, 在大气探测应用中小于 3 MHz, 因此, 对于光电倍增管动态特性要求较低, 主要关注光照灵敏度、增益、暗电流、线性度等静态参数及其稳定性。

除去因为机械原因造成的管壳破裂外, 影响光电倍增管寿命和性能的主要因素为各个电极的涂层材料的损耗^[5]。其输出特性长时间下降主要原因为倍增极材料溅射, 特别是电流较大的最后几级倍增极的材料退化导致倍增增益下降, 且增益下降与平均阳极电流有很强的相关性。通过提供稳定的直流光源照射光电倍增管, 监测其阳极输出电流稳定性及试验前后暗计数变化的方式对光电倍增管进行寿命试验验证。本项目应用于激光大气探测中, 光电倍增管工作平均阳极电流小于 1 μA , 工作总时长超过 20 000 h。为提高测试效率, 采用加速寿命试验的方式, 将平均阳极电流增加至 30 μA , 根据器件寿命降额因子, 寿命试验时长设计为 1 000 h。

根据上述分析, 寿命试验在同一批次器件中随机抽样一定数量的光电倍增管, 采用直流法, 光电倍增管在阳极输出为 30 μA 条件下工作 1 000 h, 在试验前后考核其响应度与暗计数变化情况, 检验方法及判定标准如下:

① 监测光电倍增管在寿命考核试验过程中光电响应, 计算试验前后变化量 $\Delta = |\text{试验前} - \text{试验后}| / \text{试验前} \times 100\%$, 要求 $\Delta \leq 20\%$ ^[6];

② 测试光电倍增管在寿命考核试验前后的暗计数变化情况, 计算试验前后变化量 $\Delta = |\text{试验前} - \text{试验后}| / \text{试验前} \times 100\%$, 要求 $\Delta \leq 50\%$ ^[6]。

2 寿命试验系统设计

根据光电倍增管寿命试验测试系统的功能要求, 其设计原理如图 2 所示, 主要由 LED 模块、光电倍增管、高压电源、放大调理模块以及数据采集与控制模块组成。其中, LED 模块用于实现在一定的温度控制下输出一定功率的光信号, 为待测光电倍增管提供稳定光源; 高压电源用于为待测光电倍增管提供工作偏压; 放大调理模块用于实现光电倍增管输出电流到电压的转换, 并将微弱电压信号进一步放大, 提升测试的信噪比^[7]; 数据采集与控制模块是整个测试系统的控制核心, 实现对高压电源输出高压、LED 工作电流、LED 工作温度的高精度控制以及对放大后的模拟信号进行数字化处理。

测试系统的工作流程为: 首先, 系统上电后, LED 模块的 TEC 开始工作, 将 LED 温度控制在

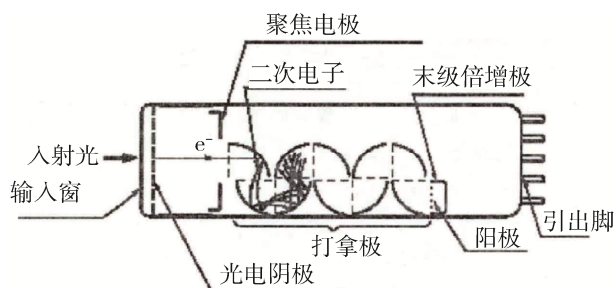


图 1 光电倍增管原理图
Fig. 1 Schematic diagram of photomultiplier tube

(25 ± 0.5) °C，之后进入待机测试状态；其次，上位机下发高压上电指令，高压电源输出 900 V 直流高压，光电倍增管开始工作，等待光信号输入；然后，上位机下发 LED 工作模式为直流，工作电流为 0~50 mA 可调，步长为 0.1 mA，LED 开始工

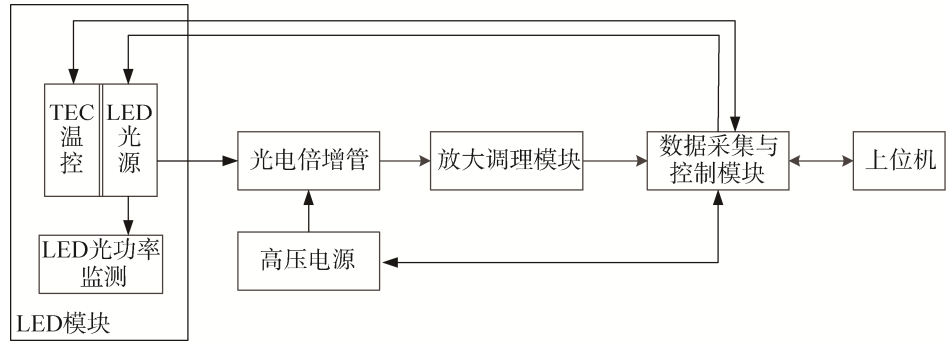


图 2 寿命试验测试原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the life test system

作，输出一定光功率的光信号；最后，上位机将数字化信息进行存储，通过后续的 Matlab 软件进行数据读取，并结合输入光功率 P 、放大链路的增益 G 以及采样电阻 R 计算，得到光电倍增管的响应度 A/W 。

3 硬件设计

3.1 LED 模块设计

LED 模块主要实现在一定的温度控制下使 LED 输出一定功率的光信号，为待测光电倍增管提供稳定光源。该模块主要包含三部分：TEC 温控、LED 以及 LED 光功率监测。其设计原理框图如图 3 所示。

TEC 温控单元包含 TEC 半导体制冷器与热敏电阻，它们安装在 LED 底部，通过导热硅脂与螺钉固定。上电后，数据采集与控制模块输出 TEC 控制信号，同时接收当前温度反馈信号，控制 LED 工作温度为 (25 ± 0.5) °C，从而使 LED 发光稳定。

532 nm LED 是电流型驱动元件，数据采集与控制模块根据上位机设置的 LED 工作参数，输出 0~50 mA 的 LED 电流控制信号，驱动 LED 发光。

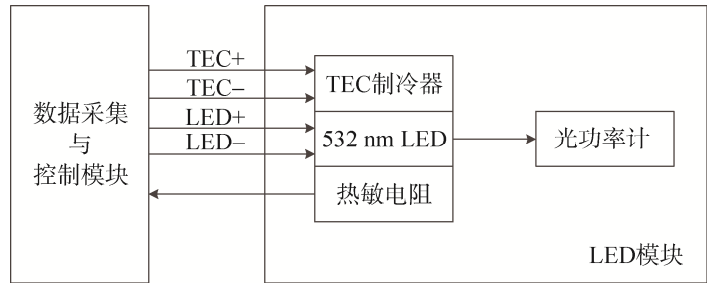


图 3 LED 模块设计原理框图

Fig. 3 Block diagram of LED module design principle

LED 功率监测单元负责检测当前 LED 出光的光功率，为后续光电倍增管的响应度计算提供数据支撑。

3.2 放大调理模块设计

放大调理模块主要实现光电倍增管输出电流至电压的转换以及对转换后的微弱电压信号进一步放大、滤波，以提升测试的信噪比，其设计原理如图 4 所示。放大调理模块由跨阻放大器、第一级放大器、第二级放大器以及滤波器组成。其中，跨阻放大器提供基础增益 50 V/A，实现电流到电压的转换放大；后两级放大器实现电压放大，总增益 $G=40$ ，第二级放大器设计为减法放大器，用于去除因背景光带来的直流偏置，提升动态范围；滤波器采用无源低通贝塞尔滤波器，滤波器阶数为 5 阶，截止频率为 (3 ± 0.5) MHz。

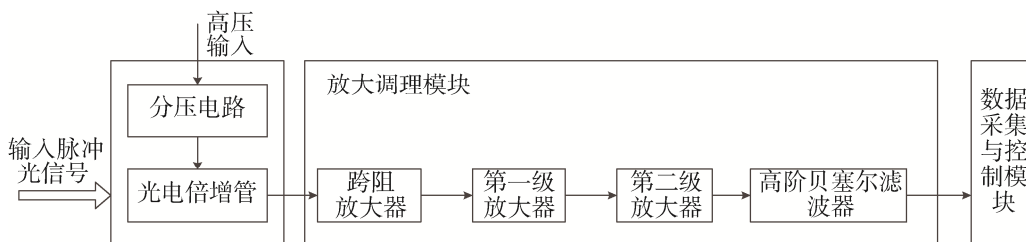


图 4 放大调理模块设计原理框图

Fig. 4 Block diagram of Enlarge the conditioning module design principle

3.3 数据采集与控制模块设计

数据采集与控制模块是整个测试系统的控制核心,负责完成接收上位机的控制指令,设置光电倍增管工作所需的高压,采集当前高压状态;对 LED 工作环境进行控温,设置 LED 工作模式以及工作电流,同时对光电倍增管输出的经调理后的模拟信号进行数字化处理,并进行打包上传,图 5 为数据采集与控制模块的设计原理框图。

① 高压闭环控制:通过上位机向 FPGA 下发高压设置指令,FPGA 收到该指令后,则控制 D/A 输出 0~5 V 的控制信号,高压电源则线性输出 0~1 200 V 的高压,同时输出 0~5 V 的高压状态信号,经 A/D 采集后送入 FPGA,并在上位机显示当前高压。② TEC 温控闭环控制:LED 工作的默认环境温度温度为 $(25\pm 0.5)^\circ\text{C}$,测试

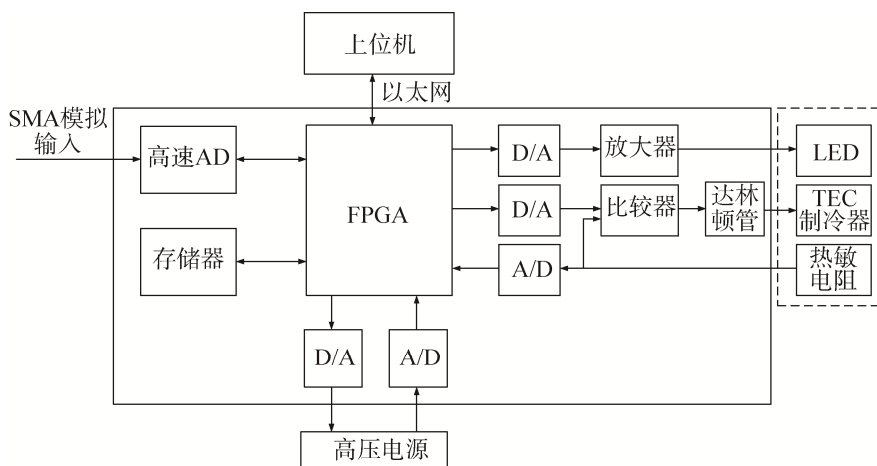


图 5 数据采集模块原理图

Fig. 5 Schematic diagram of data acquisition module

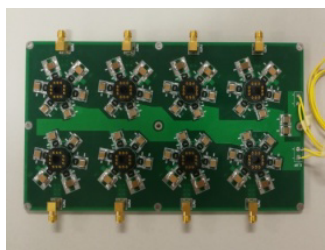
系统上电后,FPGA 控制 D/A 输出 2.5 V 的控制信号,该信号作为比较器正端的输入,对应设置温度 25°C ,比较器负端为反馈的当前温度,比较器的输出则控制达林顿管输出 0~2 A 的电流来驱动 TEC 制冷器。

③ LED 驱动控制:LED 的工作电流为 0~50 mA,其工作参数由上位机设置。FPGA 收到 LED 工作电流设置指令后,控制 D/A 输出 0~5 V 的控制信号,经放大器调理后输出 0~50 mA 的电流信号来驱动 LED。

④ 数据采集:FPGA 将高速 AD 模数转换后的数据与通道标识、当前系统时间等信息打包后发送至上位机,进行实时显示和数据存储。

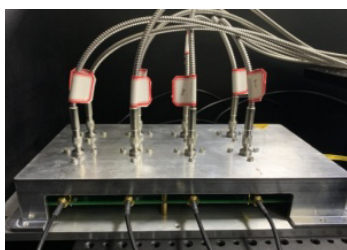
3.4 硬件实物展示

该寿命试验系统的硬件设计实物成果如图 6 所示。其中,图 6 (a) 为光电倍增管测试架,一次试验可以同时测试 8 支光电倍增管;图 6 (b) 为光纤准直模块,光电倍增管测试架放置于该模块中,光束经过光纤准直模块垂直照射到光电倍增管的光敏面;图 6 (c) 为试验暗箱,给光电倍增管提供固定、稳定的试验暗环境。



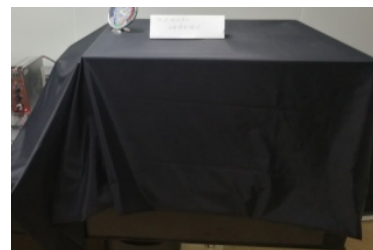
(a) 光电倍增管测试架

(a) Photomultiplier tube test stand



(b) 光纤准直模块

(b) Fiber optic collimation module



(c) 暗箱

(c) Camera obscura

图 6 寿命试验系统实物图

Fig. 6 Photographs of the life test system

4 试验结果与分析

按照 GJB 548 寿命考核试验的方法和 GJB 5022 的抽样要求,进口元器件按照 $LTPD=10(22/0)$ 为一个检验批要抽检 3 支光电倍增管,同时为了检验测试系统的功能性和稳定性,本次试验选出 2 个检验

批即 6 支光电倍增管和 2 支用于数据比对的光电倍增管。

4.1 LED 发光二极管工作温度的监测

经过长达 1 000 h 的寿命试验，LED 发光二极管的工作温度随时间变化的曲线如图 7 所示。

由图 7 可见，LED 发光二极管工作温度稳定在 (25±0.5) °C 之内，满足设计要求，可以为光电倍增管提供稳定的人射光功率。

4.2 光电倍增管响应度和暗计数的监测

寿命试验过程中实时监测光源功率及被测 PMT 样品输出信号幅度并记录，计算实时光电响应度，试验结束后绘制光电响应度时变曲线，并对比寿命试验前后被测 PMT 样品光电响应度及试验前后暗计数变化，作为 PMT 寿命试验结果的判定参数。

图 8 所示为经过寿命试验并解算后的响应度随时间变化的曲线。其中，BNB4845 为未经过电老炼试验的 PMT 样品，作为试验对比样品，观察电老炼对 PMT 工作特性的影响；BNB4874 为做过一次完整 1 000 h 加速寿命试验的样品，作为试验对比样品，进一步补充验证超过设计寿命周期后的样品性能变化情况；其它 6 支 PMT 样品 BNB4883、BNB4890、BNB4892、BNB4893、BNB4894、BNB4895 为经过初步筛选及电老炼试验的抽样待测样品。

BNB4845 作为试验对比样品，该器件未经过电老炼试验，因此在起始阶段响应度变化较大，最终响应度变化量约为 15%。BNB4874 作为试验对比样品，已经过一次完整周期的寿命试验，响应度变化相对平稳，约为 11.6%。其它 6 支抽样检测样品 BNB4883、BNB4890、BNB4892、BNB4893、BNB4894、BNB4895 经过老炼试验，响应度变化曲线相对平滑，曲线衰减趋势一致，其寿命试验的响应度变化量见表 1。6 支抽样待测样品在等效寿命周期内响应度变化均优于 20%，满足设计寿命周期内的使用要求。

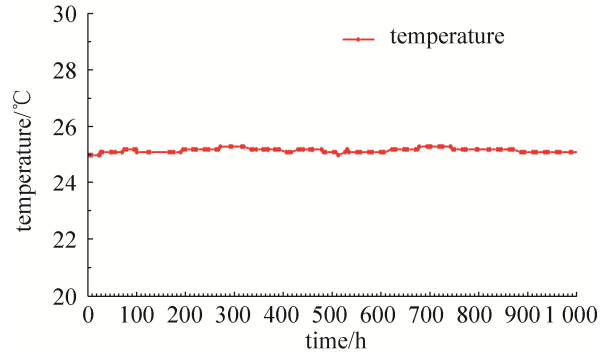


图 7 LED 发光二极管的工作温度曲线

Fig. 7 The operating temperature curve of LED

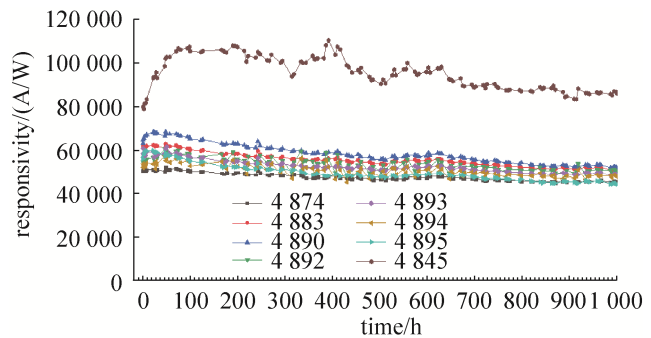


图 8 光电倍增管 1 000 h 寿命试验响应度变化曲线

Fig. 8 Responsivity curve of photomultiplier under 1 000 h life test

表 1 光电倍增管寿命试验前后响应度变化量

Table 1 The responsivity variation of photomultiplier before and after the life test

探测器编号	BNB4874	BNB4883	BNB4890	BNB4892	BNB4893	BNB4894	BNB4895	BNB4845
响应度变化量%	11.6	15.9	17.8	8.4	16.9	9.1	18.3	15.0

图 9 为光电倍增管经过寿命考核试验前后的暗计数对比直方图，其变化量见表 2。

表 2 光电倍增管寿命试验前后暗计数变化量

Table 2 Change of dark count before and after life test of photomultiplier tube

探测器编号	BNB4874	BNB4883	BNB4890	BNB4892	BNB4893	BNB4894	BNB4895	BNB4845
暗电流变化量%	33.3	18.2	6.3	6.3	5.6	27.7	5.0	42.9

试验结果表明，8 支光电倍增管试验前后暗电流的变化量均在 50% 以下，满足使用要求。

4.3 实验结论

测试结果表明，本文设计研制的 PMT 寿命试验系统，具备试验参数配置、光源控制与监测、探测

器输出信号采样监测及数据记录等全过程控制功能,可以满足星载激光雷达系统 PMT 探测器的自动化批次寿命试验测试功能需求。

5 结束语

本文详细地阐述了 R9880U-01 型光电倍增管寿命试验方案的确立和试验系统的设计,通过 1 000 h 约 40 多天的试验,验证了该型号光电倍增管的使用寿命和响应度变化量满足星载激光雷达载荷的使用需求,大大提高了测试和试验的进程。同时,该试验系统不仅具有良好的稳定性和扩展性,还具有较高的工程应用价值,可实现对光电倍增管高效率、自动化的批量测试,适用于其它类型的探测器及组件试验。

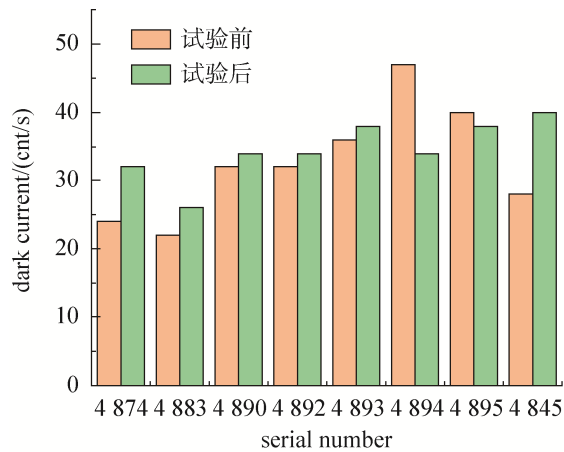


图 9 光电倍增管 1 000 h 寿命试验响应度变化曲线
Fig. 9 Variation curve of responsiveness of 1 000 h life test of photomultiplier tube

参考文献

- [1] 邱宗甲. 激光雷达微弱信号获取关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
QIU Zongjia. Study on key technology of lidar weak signal detection[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [2] 石顺祥, 刘继芳. 光电子技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 周荣楣. 光电发射、次级电子发射与光电倍增管[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2015.
- [4] 吴洪金. PMT 批量测试系统的优化与 PMT 环境效应研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
WU Jinghong. The optimization of PMT batch test system and study of PMT's environmental impact[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [5] 滨松光子. 光电倍增管器件手册[M]. 北京: 滨松中国, 2017.
- [6] 周小燕, 何伟, 梁晨宇, 等. 硅雪崩光电探测器加速工作寿命试验应用研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 199-201,211.
ZHOU Xiaoyan, HE Wei, LIANG Chenyu, et al. The application research of accelerated working life test for silicon avalanche photoelectric detector[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 199-201, 211.
- [7] 赵蓓蕾. 基于 FPGA 的 PMT 模块增益调节控制系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
ZHAO Beilei. Research of PMT module gain regulation control system based on FPGA[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

[作者简介]

- 赵 艳 1983 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光探测设计。
潘 超 1981 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达总体技术。
赵一鸣 1983 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达总体技术。
刘宇哲 1989 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为激光探测设计。
时志云 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为激光探测设计。
梅艳鹏 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达光学设计。

(本文编辑: 杨秀丽)