

高温下紫外光能量在线检测方法与设计

王 辉¹, 王 军^{1,2}, 董兴法¹, 陈海松¹

(1. 苏州科技大学电子信息工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 目前市场上紫外光能量检测中存在辐射大、温度高、测量不便等问题。设计一种针对高温下通过光纤进行导光的紫外光能量在线检测方案。该方案将紫外光通过光纤传输至光电传感器进行光电转换处理, 避免传感器高温下工作, 并采用双传感器进行环境光滤除提高精度, 进而采用高精度 AD 芯片将信号模拟量转换成数字量传输至主控制器 STM32F103, 经数据处理计算出相应的能量值和温度等参数, 通过 RS485 总线传输方式进行数据传输至上位机进而实现实时监测。实验表明: 整个系统运行稳定、耐高温、能够在线实时检测并分析紫外光能量变化, 可广泛应用于工业自动化紫光检测领域。

关键词: 能量检测; 光纤传输; 在线式; 耐高温

中图分类号: TP274 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.05.017

On-line detection method and design of ultraviolet light energy at high temperature

WANG Hui¹, WANG Jun^{1,2}, DONG Xing-fa¹, CHEN Hai-song¹

(1. School of Electronic & Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: At present, there are problems such as large radiation, high temperature and inconvenient measurement in the detection of ultraviolet light energy on the market. An on-line detection scheme for ultraviolet light energy guided by an optical fiber at a high temperature is designed. The scheme transmits ultraviolet light through the optical fiber to the photoelectric sensor for photoelectric conversion processing, avoids the high temperature operation of the sensor, and uses the dual sensor to perform environmental light filtering to improve the accuracy. Then a high precision AD chip is used to convert the signal analog quantity into a digital quantity transmission to the main controller STM32F103. The corresponding parameters such as energy value and temperature are calculated after data processing, and the data is transmitted to the upper computer through the RS485 bus transmission mode to realize real-time monitoring. The experiment shows that the whole system runs stably, withstands high temperature, and can detect and analyze ultraviolet energy changes online and in real time.

Keywords: energy detection; dual sensor; online; high temperature resistance

1 引 言

目前, 印刷行业以及 UV(紫外)固化等行业不

断发展, 各胶黏剂生产商针对 UV 光固化特性, 研制出用于粘接、密封、印刷等系列 UV 产品, 并广泛

基金项目: 江苏省研究生工作站项目; 江苏省研究生科研创新项目(No. KYCX17_2060)资助。

作者简介: 王 辉(1994-)男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电信息处理。E-mail: 2257348671@qq.com

通讯作者: 王 军(1979-)男, 博士, 主要研究方向为光电测控技术与仪器。E-mail: wjyhl@126.com

(收稿日期: 2019-07-19; 修订日期: 2019-08-15) Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应用于通讯、电子、光学、印刷等众多领域。这些产品在 UV 光(特定波长及光能量)照射下,会固化或硬化(聚合),但 UV 灯能量不足会导致固化效果不佳或印刷中油墨不干^[1-3]。此外,UV 固化炉大多使用汞灯,其灯管表面温度不低于 170 ℃,长时间工作发热量大,温度高,现有仪器探头中光电二极管温度范围大多在 100 ℃左右,长时间照射将会降低采集端器件的可靠性甚至造成探头损坏。工业上有时需要实时监测紫外光能量变化情况,分析光源参数变化和固化时间,从而达到更好的固化效果。市场上的紫外光能量检测仪存在测量精度低、紫外光辐射大、实时性差、现有仪器探头易损等。因此,在很多应用中需要一种能够耐高温且实时监测 UV 能量的仪器,针对以上情况,提出光纤导光的紫外光能量在线检测方法,该方法不仅提高测量精度和解决耐高温的问题,还避免测量时紫外光辐射的危害以及能够实时监测分析 UV 光能量。

2 能量检测系统设计

光纤导光的紫外能量计检测系统框图如图 1 所示,主要由 UV 光源、导光装置、光电信息处理模块、AD 转换模块、主控制器以及上位机显示模块组成。紫外光能量计是将光信号通过全方位导光光纤传输至光电器件转换成电信号^[4],再进行滤波放大处理转换为差分信号,主控制器通过驱动 24 位高精度 ADC 进行差分采集,并计算相应的能量值,最后通过 RS485 通信将数据编码传输至上位机进行紫外光能量实时显示^[5]。

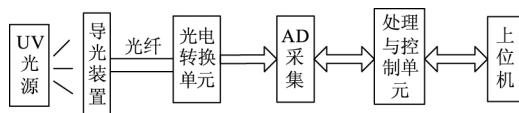


图 1 能量检测系统框图

Fig. 1 Energy detection system block diagram

3 能量检测实现方案

3.1 导光传输处理方法

UV 光照射会散发大量的热,造成周围温度过高,光电二极管长时间工作在高温下易损坏。由于光纤是 SiO₂ 材料具有耐高温性能,同时光纤外壳使用柔性不锈钢^[6-7],其在高温环境下能正常工作,因此可以用光纤取光。在紫外光采集处,均匀打上通

光孔,设计成圆型采光装置,保证在测试使用过程中沿光纤轴线方向旋转移动也影响降到最小。其取光装置如图 2 所示,UV 光照射到光纤轨迹如图 3 所示。

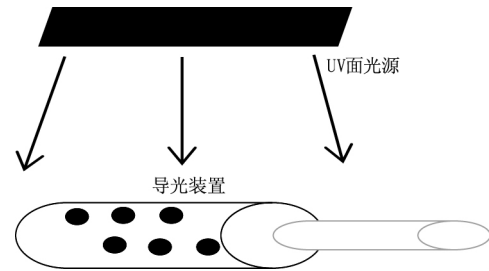


图 2 光纤取光装置

Fig. 2 Fiber optic light extraction device diagram

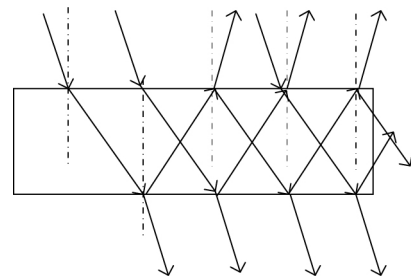


图 3 紫外光轨迹图

Fig. 3 Ultraviolet light trace

3.2 前端信号处理方法设计

该方案针对前端信号设计了一种基于双传感器减法电路滤除环境光中紫外光的处理方法,为了尽可能消除暗电流带来的热噪声的影响下^[8],本方案采用图 4(a) 虚线框电流转换电路,输出噪声小,图中 D₁ 只接受环境光,D₂ 正常采光(其中 R₅ = R₆, R₈ = R₄),电路如图 4 所示。

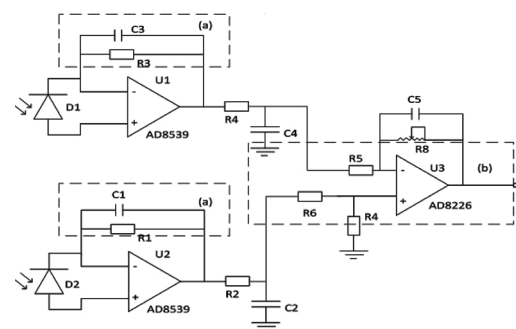


图 4 前端信号处理图

Fig. 4 Front-end signal processing diagram

图 4(a) 中电压与传感器 D₁ 输出电流 I_s 关

系为:

$$V_{out} = - (I_s \cdot R_c) \tag{1}$$

从噪声角度看(1 μA 电流转 1 V 信号)时输出噪声为:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(R_c)_{\text{noise}}^2 + e_n^2 + (i_n \times R_c)^2} \\ & \approx \sqrt{(129\text{nV})^2 + (10\text{nV})^2 + (10\text{nV})^2} \\ & \approx 130 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \end{aligned} \quad (2)$$

减法电路输出电压与双传感器输出电流关系式为:

$$V_{\text{out}} = (I_s R_1 - I_{s0} R_3) \times \frac{R_8}{R_5} \quad (3)$$

式中, I_s 为正常采光产生的电路, 为只接受环境光产生的电流, 通过调整 R_8 和 R_5 比值进行信号放大。

3.3 差分采集与数据处理方法

A/D 采集中使用单端采集较多, 信号受干扰大, 而差分信号变化较大, 为了避免 A/D 采集中接地回路干扰以及环境引起的共模干扰的影响^[9-10], 所以选用差分采集。该方式采用内部含有 3 个差分模拟输入的 24 位高精度 ADC 采集芯片, 其片内低噪声仪表放大器可通过编程控制放大倍数, 可采集小信号。因此, 在高精度采集中增加了单端转差分电路, 加上高分辨率 ADC 差分采集方式提高精度, 除了硬件上的方法, 在软件中使用改进的均值滤波算法, 提高系统稳定性。电路如图 5 所示。前端输出信号 V_{out} 经运放 OP295 转成差分信号, 然后主控制器通过 SPI 接口与 AD7793 进行差分信号采集和处理, A/D 采集流程如图 6 所示。

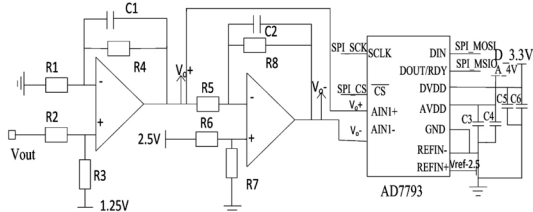


图 5 差分采集电路

Fig. 5 Differential acquisition circuit

图 5 中 $R_2 = R_3$; $R_1 = R_4$; $R_6 = R_7$; $R_5 = R_8$ 。其中输入信号与差分信号之间关系式为:

$$V_+ = V_{\text{out}} + 1.25 \quad (4)$$

$$V_- = -V_{\text{out}} + 1.25 \quad (5)$$

AD 采集参考源 V_{REF} 选用外部 2.5 V 基准源, 最大模拟电压设定 2 V, 其对应功率设为 1 W, 故紫外光能量密度与 AD 采集的数字量之间关系为:

$$E = 500T(V_{\text{REF}} \cdot \text{Code} - 2^N - \text{GAIN}) \quad (6)$$

式中, E 为紫外光能量密度, 单位 mJ/cm^2 ; T 为能量密度累积的时间, 其中能量密度主要有两方面作用, 第一通过时间累积获得的光能量密度, 是减小测量误差的一种手段, 另外也是衡量光源稳定性的指标, 为光源应用提供一种可靠性评价标准, Code 为 AD 采集的数字量, GAIN 为内部增益设为 1, 由芯片手册知 $\text{GAIN} = 1$ 时, 分辨率 $N \approx 20$ 。

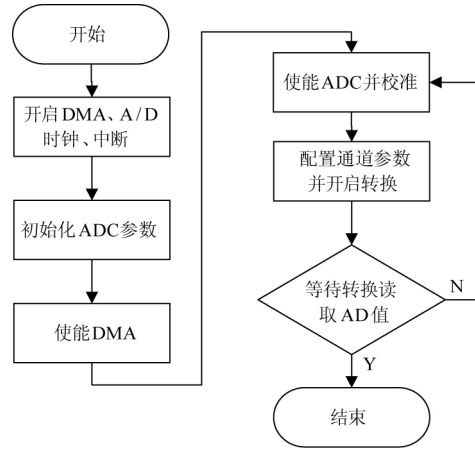


图 6 A/D 采集流程图

Fig. 6 A/D acquisition flow chart

3.4 数字滤波方法

在进行数据采集时, 会遇到数据的随机误差, 随机误差是由随机干扰引起的, 可以通过数字滤波方法, 来提高测量精度以及信号稳定性^[11-12]。数字滤波原理是将输入信号转换成另一组输出信号序列, 设数字滤波器的输入信号为 $X(t)$, 输出信号为 $Y(t)$, 则输入与输出信号可用差分方程表示为:

$$Y(t) = \sum_k^N a_k X(t - k) - \sum_k^N b_k X(t - k) \quad (7)$$

其中 $X(t)$ 可以是 A/D 转换后的数字序列, 也可以是计算机输出信号。由差分方程式组成的滤波器称为递归滤波器。如果将公式中 b_k 取为 0, 则可得非递归型数字滤波器。本方法使用改进的滑动平均滤波法对采集的数据进行数字滤波处理, 其中取 i (当 $i > 49999$ 时, i 取 10) 为采样次数, 当 $i = 9$ 时, 将采样值存放于新建数组 $a[10]$ 中, 此后每次采样的新数据取代数组元素中 $a[m]$ 的数据, 然后对当前数组进行平均处理, 获得新的滤波结果。此算法表示为:

$$Y_l = \frac{1}{10} \left(\sum_{t=0}^{i-9} a[t] + a[m] \right) \quad (8)$$

式中, Y_l 为第 l 次采样经过滤波处理后的输出值; $t \neq m, m = i \% 10$, 此方法与传统的滑动平均滤波相比, 每次计算只需改变一个元素, 大大提高了运算速度, 此方法流程如图 7 所示。

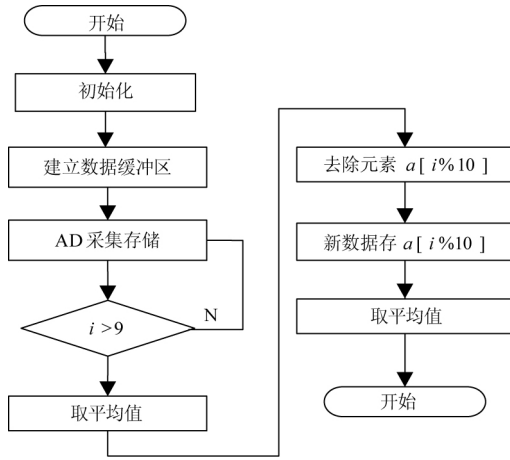


图 7 数字滤波流程图
Fig. 7 Digital filter flow chart

4 系统软件设计方法

4.1 主控制器系统设计

下位机程序流程图如图 8 (a) 所示, 主控制器先进行初始化命令, 开启定时器, 触发 AD 采集命令, 微控制器通过 SPI 接口与 AD7793 进行通信, 对差分信号采集和处理, 并将采集到的数据进行编码, 等待上位机获取命令并根据协议判断获取命令准确性和功能, 最后通 RS485 发送到上位机。

4.2 上位机系统设计

上位机监测系统流程, 如图 8 (b) 所示, 上位机先检查 RS485 连接是否异常并记录, 然后对一些函数模块初始化以后, 发送获取命令, 接收到数据后根据相应的协议进行判断帧格式并进行解码, 计算出相应的能量和温度值, 在显示屏上实时显示, 同时将参数存储在数据库中^[13-15], 获取各能量均匀度曲线拟合图, 检测测量数据稳定性。

5 实验测试结果与分析

设计的实物制版如图 9 (a), 外形尺寸 95 mm × 135 mm, 图 9 (b) 是实验室中使用 UV LED365NM 面光源进行标定的光纤测

试环境图, 取光头全方位入光, 图 9 (c) 是整个系统应用于合作企业产线上位机实测图, 整个系统运行稳定, 紫外能量数据波动最大 10 mJ/cm², 经光

纤导光至光电二极管处温度较小, 能够满足工业产线需求, 图 10 (a) 是单传感器波形图, 杂光干扰大约 46 mV, 且纹波较多, 图 10 (b) 是双传感器波形图, 杂光幅值只有 3.2 mV, 且纹波较少。图 10 (c) 差分信号仿真图, 由图可看出 $V_+ + V_- = 2.5V$ 。表 1 是其中一路测量的数据, 其测量光源选用 UV LED365NM 面光源, 发光强度是 2 W/cm², 测量高度为 5 cm, 时间为 2 s, 通过手动调节其输出光强百分比测量数据如表 1, 从表中可以看出波动范围在 11 mJ/cm² 以内, 且紫外光发光强度越小, 其数据越稳定, 发光强度越大, 光源温度越高, 然而经光纤导光后光电二极管处温度较低, 且变换较慢。

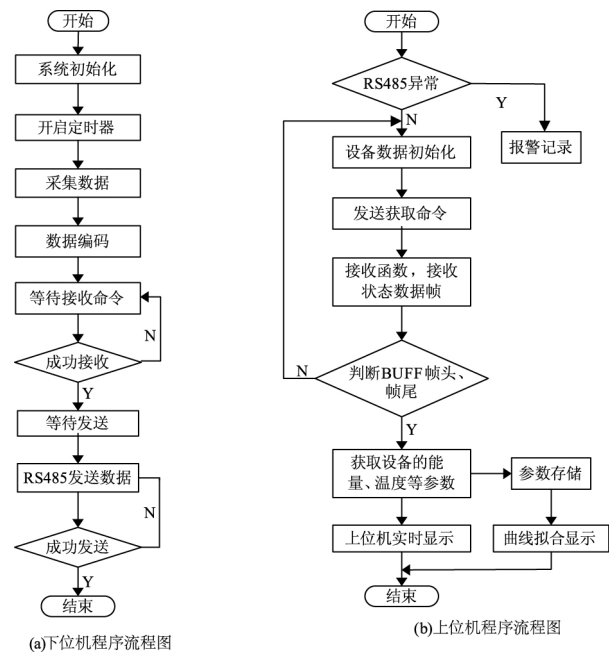


图 8 软件程序流程图

Fig. 8 Software program flow chart

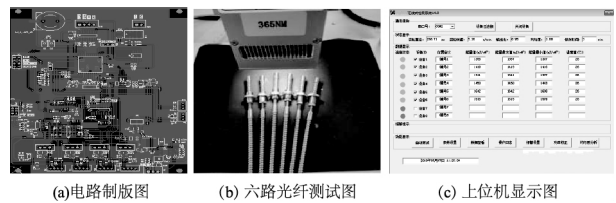


图 9 实物制版及测量图

Fig. 9 Physical plate making and measurement

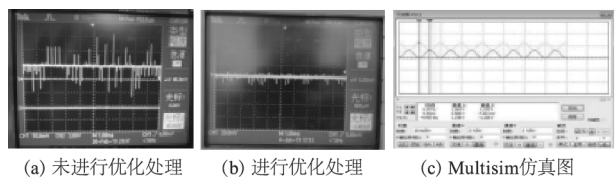


图 10 电路测量波形图

Fig. 10 Circuit measurement waveform

表 1 实验测量数据

Tab.1 Experimental measurement data

紫外光源 $I/(mW \cdot cm^{-2})$	理论值 $I/(mJ \cdot cm^{-2})$	测量最大值 $I/(mJ \cdot cm^{-2})$	测量最小值 $I/(mJ \cdot cm^{-2})$	取光口温度 $/^{\circ}C$	传感器温度 $/^{\circ}C$
10%	131	131	131	35	26
20%	217	217	216	37	26
30%	282	283	281	40	26
40%	353	354	351	45	26
50%	412	413	410	56	27
60%	486	489	483	60	27
70%	556	559	552	66	27
80%	620	623	616	75	28
90%	674	678	669	86	28
100%	739	746	735	102	28

6 结 论

紫外光能量检测在测量方式、高温下、显示等方面进行了很大的改进。设计的前端处理电路,不仅滤除环境光,还降低了噪声,提高了测量精度;光纤导光方式避免了光电传感器高温直射,且光电传感器环境温度较低,变化缓慢;在线式显示避免了强紫外光对人体辐射的问题;而且系统稳定性好,波动范围在 1.5% 以内,能够实时检测紫外光能量大小。因此,该设计可广泛应用于工业紫光检测领域。

参考文献:

- [1] Wang Jun ,Han Li ,Du Bojun et al. Research and design of low power ultraviolet light energy meter [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2017 ,54(7) : 101202.(in Chinese)
王军 ,韩力 ,杜博军 ,等.低功耗紫外光能量计的研究与设计 [J].激光与光电子学进展 ,2017 ,54(7) : 101202.
- [2] Zhou Ruihua ,Tian Xiuyun. Study on UV LED light source system cured by disc ink coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2014 ,51(9) 092203.(in Chinese)
周瑞华 ,田秀云.光盘油墨涂层固化的 UV LED 光源系统研究 [J].激光与光电子学进展 ,2014 ,51(9) : 092203.
- [3] Liu R ,Yang X ,Yuan Y ,et al. Synthesis and properties of UV-curable self-healing oligomer [J]. Progress in Organic Coatings 2016 ,101: 122-129.
- [4] Dai Tingting ,Tang Xinyi ,Wang Shiyong ,et al. Real time transmission system of scanning infrared focal plane detector [J]. Laser & Infrared ,2016 ,46(4) : 476-480.(in Chinese)
- 代具亭 ,汤心溢 ,刘鹏 ,等扫描型红外焦平面探测器图像实时传输系统 [J].激光与红外 ,2016 ,46(4) : 476-480.
- [5] Gao Jing ,He Yigang ,Luo Qiwu ,et al. A kind of on-line monitoring technology for photovoltaic inverter status [J]. Instrumentation Technology and Sensors 2018 ,10(10) : 47-50.(in Chinese)
高镜 ,何怡刚 ,罗旗舞 ,等.一种光伏逆变器状态在线监测技术 [J].仪表技术与传感器 ,2018 ,10(10) : 47-50.
- [6] Geng Junbo ,Xi Dali ,Li Yongqing et al. Noise analysis and circuit implementation of optical fiber sensing photoelectric detection [J]. Optical Communication Technology 2013 ,37(2) : 25-27.(in Chinese)
姜俊波 ,习大力 ,李永清等.光纤传感光电检测的噪声分析与电路实现 [J].光通信技术 ,2013 ,37(2) : 25-27.
- [7] Sun Youming ,Li Xiangcheng ,Shen Xiaoming ,et al. Design of optical fiber guided lighting system based on intelligent dimming [J]. Modern Electronic Technique ,2017 ,40(12) : 97-100.(in Chinese)
孙友明 ,黎相成 ,沈晓明 ,等.基于智能调光的光纤导光照明系统设计 [J].现代电子技术 ,2017 ,40(12) : 97-100.
- [8] Zhang Bing ,Wang Jianghua ,Zhu Yifei ,et al. Research on high signal-to-noise ratio infrared signal acquisition circuit [J]. Electronics Optics & Control ,2018 ,25(3) : 102-105.(in Chinese)
张兵 ,汪江华 ,朱寅非 ,等.高信噪比红外信号采集电路研究 [J].光电与控制 ,2018 ,25(3) : 102-105.
- [9] Deng Ke ,Fan Junfeng ,Yu Ying. Multi-channel single-ended/differential signal acquisition system based on DSP+

- FPGA[J]. Electronic Science and Technology ,2013 ,26 (3) : 33-35.(in Chinese)
- 邓轲 ,范俊锋 ,吝莹. 基于 DSP+FPGA 多通道单端/差分信号采集系统[J]. 电子科技 2013 26(3) : 33-35.
- [10] Li Jing. Design of multi-channel high-precision data acquisition module [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology 2018.(in Chinese)
- 李静. 多通道高精度数据采集模块的设计 [D]. 成都: 电子科技大学 2018.
- [11] Chen Xiaoyan ,Cheng Zhijiang ,Jiang Bo ,et al. Digital filtering method based on multi-sensor signal fusion [J] Electric Drive 2015 45(2) : 54-57.(in Chinese)
- 陈晓燕 ,程志江 ,姜波 ,等. 基于多传感器信号融合的数字滤波方法 [J] 电气传动 2015 45(2) : 54-57.
- [12] Cao Jianshu ,Ji Baoping ,Luo Zhenxing ,et al. Study on denoising method of laser ultrasonic signal [J]. Laser & Infrared 2016 46(2) : 171-176.(in Chinese)
- 曹建树 ,姬保平 ,罗振兴 ,等. 激光超声信号去噪方法的研究 [J]. 激光与红外 2016 46(2) : 171-176.
- [13] Yuan Qunsheng ,Qian Songrong. Design of dynamic monitoring system based on STM32 [J]. LCD & Display 2016 , 31(7) : 681-685.(in Chinese)
- 原群盛 ,钱松荣. 基于 STM32 动态监测系统的设计 [J]. 液晶与显示 2016 31(7) : 681-685.
- [14] Xu Hongyu ,Zhao Xing ,Sun Yanchao. Design of real-time optical power monitoring system based on STM32 [J]. Electronic Science and Technology 2014 27(12) : 85-89.(in Chinese)
- 徐宏宇 ,赵行 ,孙彦超. 基于 STM32 的光功率实时监测系统的设计 [J]. 电子科技 2014 27(12) : 85-89.
- [15] Zhao Xiande ,Gao Zhen ,Chen Zhen et al. Development and testing of portable laser-induced fluorescence telemetry system [J]. Laser Technology 2019 40(5) : 49-53.(in Chinese)
- 赵贤德 ,高振 ,荆振 ,等. 便携式激光诱导荧光遥测系统研发与测试 [J]. 激光技术 2019 40(5) : 49-53.