

文章编号:1001-5078(2024)04-0550-06

· 激光应用技术 ·

激光测距机在线能量监测系统设计

赵宇昊, 陈 硕, 徐广平, 韩 隆, 齐 帅, 翟子昂
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:本文基于无人值守条件下对激光测距机发射能量进行直接人工测量较为困难,为了防止激光器能量下降影响激光测距机性能,需要对测距机工作状态进行实时监控这一需求设计了激光测距机在线能量监测系统。对能量探头的结构与检测位置进行了研究,并设计硬件电路实现能量测量。本文设计的在线能量监测系统可以在不影响测距机测距能力的情况下实现kHz量级重频激光测距机的宽量程实时能量监测,并满足小型化、集成化设计要求。

关键词:激光能量监测;激光测距机;激光能量检测探头;能量信号处理电路

中图分类号:TN249;TP274 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.010

Online energy monitoring system for laser rangefinder

ZHAO Yu-hao, CHEN Shuo, XU Guang-ping, HAN Long, QI Shuai, ZHAI Zi-ang
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, an online energy monitoring system for laser rangefinders is designed to solve the problem of the difficulty of direct manual measurement of laser rangefinder emission energy under unattended conditions. In order to prevent the laser energy decline affects the performance of the laser rangefinder, it is necessary to monitor the working status of the laser rangefinder in real time. The structure of the energy probe and detection position was studied, and the hardware circuit was designed to measure the emission laser energy of rangefinder. The online energy monitoring system designed in this paper can realize the wide-range real-time energy monitoring of kHz repetition frequency laser rangefinder without affecting the performance, and achieve miniaturized and integrated requirements.

Keywords: laser energy monitoring; laser rangefinder; laser energy detection probe; energy signal processing circuitry

1 引言

激光测距技术在军事领域的应用具有重要意义,其迅速、准确地提供目标距离数据,为后续目标捕捉、识别和精确打击提供关键的位置信息,从而提高武器装备在战场上最大有效作用距离下的首发命中率。作为光电侦查探测防御系统的关键组成部分,激光测距技术广泛用于地面防空、机载测距以及卫星测高等无人值守环境,对测距技术的集成化、自动化和智能化提出了更为迫切的要求。

激光器故障导致发射能量下降是激光测距机测

距能力降低的主要原因。在使用过程中,由于内外环境的变化,激光器发射能量可能会受到影响。例如,长期不使用可能导致冷却水和晶体表面受到污染,导致激光能量下降。环境温湿度的变化引起激光器内部机构的机械应力变化,进而造成传输光路偏转,影响激光谐振腔状态。激光泵浦源随着使用时间的增长,输出能量逐渐下降。此外,环境中的污染物质与镜头密封舱中的气体可能相互作用,导致镜面光学膜层污染。这些因素都可能导致激光器发射能量的衰减,从而影响整体性能,在关键时刻使设

备无法正常使用,对原有设备的测距能力产生严重影响,甚至可能造成致命的打击。因此,研究激光测距设备的实时能量监测系统显得尤为必要。传统能量检测方式采用在激光光路前架设能量计实现对激光测距机工作状态的直接测量,然而在无人值守条件下对激光测距机发射能量进行直接人工测量较为困难,无法对测距机工作状态进行实时监控。本文基于这一需求设计了激光测距机能量监测系统,可以实现 kHz 量级重频激光测距机的宽量程在线能量监测。

2 能量检测系统设计

激光测距机能量监测系统拟实现测距机工作过程中对能量的实时监控。要求实时性、小型化,对激光测距机的现有结构改变小、能量无损耗或低损耗,不影响激光测距机的测距能力。本文设计的激光测距机能量监测系统由能量采集装置、光电信号处理电路、数据采集电路组成,最后通过上位机输出能量信息,图 1 为系统总体设计框图。

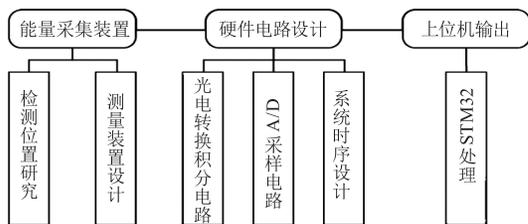


图 1 激光测距机能量监测系统总体设计框图

Fig. 1 Block diagram of the laser rangefinder energy monitoring system overall design

3 能量采集装置设计

3.1 检测位置研究

本文以需要进行能量监测的某激光测距机为例,测距机采用 Nd : YAG 激光器,其结构如图 2 所示。

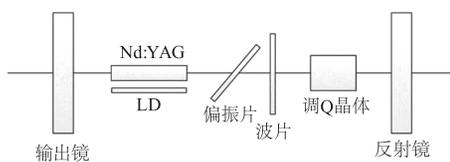


图 2 Nd : YAG 激光器结构示意图

Fig. 2 Nd : YAG laser structure diagram

激光器主要由输出镜、Nd : YAG、泵浦源、偏振片、波片、调 Q 晶体和反射镜组成。激光器工作过程中,激光二极管发射波长 808 nm 的激光,Nd : YAG 晶体中的 Nd 离子在被激光二极管激发后,通过

辐射跃迁产生波长 1064 nm 的激光光子。这些光子在由偏振片、反射镜、输出镜组成的光学谐振腔中来回反射,形成谐振态,激光信号逐渐增大,最终由输出镜输出形成激光束。本文对适用于该激光器的能量检测位置进行了研究。

3.1.1 直接检测法

直接检测法是将标准能量计探头放在发射光路中,通过观察能量计的读数对激光测距机的工作状态进行判断^[1]。如图 3 所示,这种方法较为简单但无法在测距机工作状态下实时监控,并且无法实现无人值守条件下的能量测量。

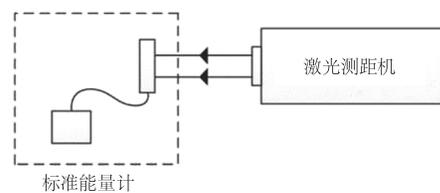


图 3 直接检测法示意图

Fig. 3 Diagram of direct energy detection method

3.1.2 主光路分光检测法

主光路分光检测法是从激光器发射出的激光中分出一束取样光,对其进行能量测量来获得激光器的发射能量。这种方法能够在不影响设备正常工作的情况下获得取样激光,从而监测激光器的工作状态。获得取样光的方法有分束法、旋转光刀法等。

分束法采用在主光路中架设分光镜来获得取样光束,如图 4 所示。根据分光镜的分束比实现对发射能量的计算。这种能量检测仪的好处是可以实现实时检测,但光路结构较为复杂,不利于测距机的小型化,对测距机的结构设计以及装配都提出了较高的要求。

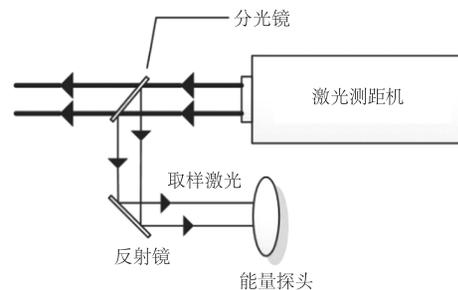


图 4 分束法示意图

Fig. 4 Diagram of split-beam energy detection method

旋转光刀法的结构示意图如图 5 所示,采样光刀由高速电机带动旋转,光刀扫描过光束即将取样

光束反射到聚焦透镜上入射到探测器中。该取样方法能够在不影响设备正常工作的情况下输出取样光束。但是受工作环境和光刀等设备的制造工艺影响,采样的结果有时候会不稳定^[2],但受光刀旋转频率的限制,无法实现对较高重频激光脉冲的取样输出^[3]。该方法多用于对气体激光器的能量采集。

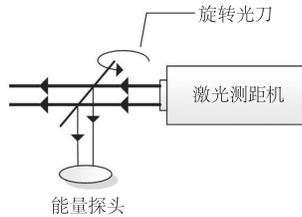


图5 旋转光刀法示意图

Fig. 5 Diagram of rotary cutting mode

综上所述,主光路分光法不适用于实时监测激光测距机的能量。主要由于主光路分光的检测方式对发射能量存在一定损耗,从而影响激光测距机的测距性能。目前,激光测距机更趋向于小能量、高重频的发展方向。对于小能量测距机而言,采用分光法会导致脉冲能量的较大损耗,同时光路结构相对较为复杂,不利于测距机的小型化。实现无损耗或者微损耗的在线脉冲能量检测是系统设计的重点之一。

3.1.3 激光器漏光检测法

激光器漏光检测法通过对激光测距机工作过程中激光器系统主光路内产生的非输出光束漏光进行测量,间接实现对激光能量的准确监测。相较于其他检测方法,具备实时无损监测激光测距机发射能量的优势。激光器系统中产生的漏光主要源于谐振腔,其中包括偏振片处和全反镜后的漏光。为确保能量监测的准确性,关键在于确保取样光能量与发射光能量成线性关系,同时采样光束的质量应保持稳定且易于采集。此外,需要设计合理的光学路径,引入有效的光学隔离手段,以降低其他光学噪声对测量的干扰。

3.1.3.1 偏振片检测

激光器偏振处的漏光测量装置如图所示。偏振处漏光是由于光束的偏振状态不完全导致的。在实际工作状态下,某一时刻偏振片处漏光的偏振态难以确定,各方向的偏振分量强度不同^[4],能量探头无法保证定向采集,因此难以确定偏振片漏光能量与发射光能量成线性关系。由于这种不

确定性,偏振处漏光测量方法在激光能量监测中并不适用。

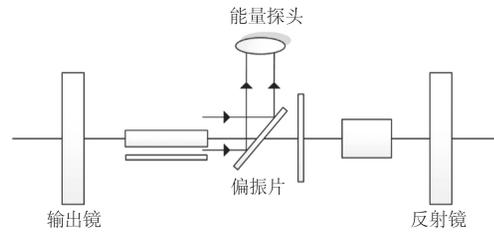


图6 激光器偏振片处漏光测量示意图

Fig. 6 Diagram of laser polarizer leakage measurement

3.1.3.2 全反镜检测

激光器全反镜漏光的测量装置如图所示。当谐振腔内的激光照射至全反镜时,受限于镜片镀膜的工艺因素,全反射膜的反射率无法完全达到100%。这就导致有部分激光从反射镜透射过去,这部分透射光即为反射镜漏光。由于全反射膜的透射比例是固定的,反射镜漏光的能量与激光发射的能量呈线性关系。因此,该方法可用于精确测量激光器的发射能量。

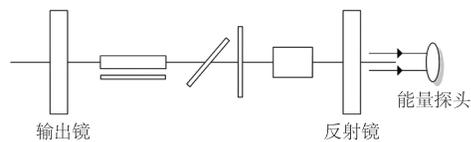


图7 激光器全反镜后漏光测量示意图

Fig. 7 Diagram of laser high reflector leakage measurement

3.2 能量测量装置设计

3.2.1 探测器选择

通过探测器将脉冲激光信号转换为电信号,对电流的幅值进行采集来测定发射能量大小。单个激光脉冲的能量如下:

$$E = \int_0^T P dt \quad (1)$$

其中, T 为脉冲激光的脉宽; P 为激光的瞬时功率。对于三角形脉冲、钟形脉冲、矩形脉冲计算公式可近似如下:

$$E = P_m \cdot \Delta t \quad (2)$$

其中, P 为激光器工作过程中发光最强时的瞬时功率,也就是激光脉冲的峰值功率; Δt 为激光脉冲半峰值全宽度。按照探测原理分类,检测激光能量的主要方法有热释电法和光电法。

3.2.1.1 热释电探测器

热释电探测器基于热释电效应,常被用于激光

能量探测,其原理如下:当激光照射到探测器靶面上,激光能量被吸收时,探测器中的材料会因为光能的吸收而升温,导致材料内部的电荷分布发生改变,从而在探测器的电极上产生电流信号,即热释电电流。热释电探测器对激光的灵敏度较高,对波长范围具有良好的响应,适用于多种不同波长的激光,并能够检测较小的能量变化。然而,热释电探测器对环境温度较为敏感,可能受到环境温度波动的影响,在使用中需要进行温度补偿。此外,热释电探测器的响应速度一般在毫秒级别,难以对脉宽较短、重频较高的激光光源进行单次能量测量。总体而言,热释电探测器在激光能量测量方面表现出良好的性能,但在实际应用中存在一些限制,包括其对环境温度的敏感性和对高频脉冲激光的适用性较差。

3.2.1.2 光电探测器

PIN 光电探测器是一种半导体光电二极管,用于将光信号转换为电信号。PIN 型光电二极管在 PN 结的中间设置一层掺杂浓度很低的本征半导体层,具有高灵敏度、低噪声和广泛的光谱响应范围。高速 PIN 探测器对激光信号的响应时间可达纳秒或亚纳秒级别,较热释电探测器响应速度更快、精度更高^[5],可以满足高重频测距机的能量检测需要。PIN 光电二极管有两种工作模式:

(1) 光伏模式(Photovoltaic Mode),是指在光电二极管工作时不对其施加反偏电压,光电二极管正负两极电位皆为 0V。采用光伏模式可以有效地降低光电二极管的暗电流。适用于微弱光能量的探测。

(2) 光电导模式(Photoconductive Mode)是指在光电二极管工作时对其施加一个反偏电压,使二极管阴极的电位高于阳极,产生偏置电压。这个电压会使得 PN 结耗尽区变宽,使光电二极管更加灵敏,可以降低二极管的结电容,进一步提升探测器的带宽,提升响应速度。但是反偏电压带来的反向电流也会使探测器暗电流增大,无法在光强过弱时实现探测。

3.2.2 能量检测探头设计

能量检测探头主要由匀化装置、滤光片、衰减片和探测器组成。如图 8 所示,激光源发出激光,产生的反射镜漏光首先经过匀化装置。激光光斑多为高斯光斑,其能量呈高斯分布,光斑中心部分的能量较

高,向外逐渐减弱。由于激光光斑直径大于探测器光敏面直径,若仅测量光斑中心位置光强会导致能量测量误差,并可能因激光功率过于集中从而损伤探测器靶面,因此能量检测探头需要加入匀化装置。选用毛玻璃作为匀化装置材料,其表面的不规则微观结构可引发光的散射和衍射。这使得经过毛玻璃的光线以不同方向传播,从而实现激光在辐射范围内的均匀分布,避免了强烈的聚焦效应。

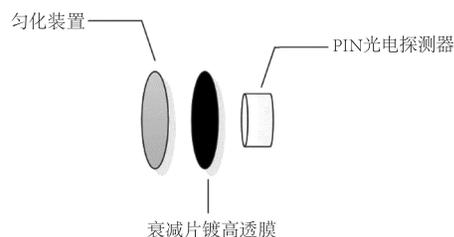


图 8 能量检测探头结构图

Fig. 8 Structure diagram of energy detection probe

激光器中 LD 发射的激光波长为 808 nm,受激辐射产生的激光波长为 1064 nm。这就导致激光舱内同时存在线宽为 808 nm、1064 nm 的两种光源,808 nm 的激光进入探测器会导致探测噪声,采用在镜片上镀高透膜的方法使 808 nm 的激光无法透过,实现光谱滤波。

在进行能量测量时,探测器必须工作在线性区域,当探测器工作在饱和区域时脉冲顶部波形会失真,若长时间工作在饱和状态下,会对探测器像元面造成不可逆的损伤^[6]。探测器的最大线性探测功率为探测器饱和光功率与像元面积的乘积。以脉宽 5 ns,能量 100 mJ,反射镜反射率 99% 的激光器为例,采用反射镜漏光测量法,进入能量探头的瞬时激光功率理论值可达 2×10^5 W,远大于探测器的最大线性探测功率,所以必须在探测器前加一定的衰减。为了进一步减小探头体积,选用镀高透膜的衰减片来实现光谱滤波与能量衰减。

4 硬件电路实现

激光能量监测系统的电路硬件部分主要由光电转换积分电路、数模转换电路组成,后将数字信号输入单片机实现数据采集,连接上位机输出能量。

4.1 跨阻积分模式

对于微弱光电信号的处理,常用跨阻放大电路将探测器输出的光电流信号转化成电压信号并放大,电路如图 9 所示。

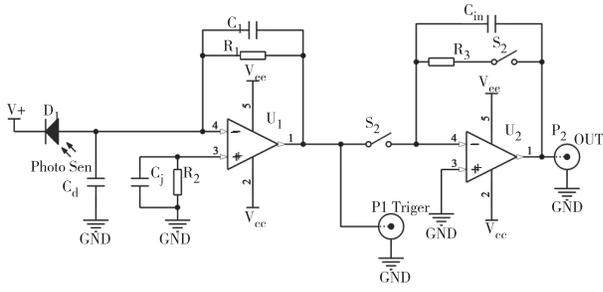


图 9 跨阻积分模式电路图

Fig. 9 TIA integral mode circuit diagram

光电探测器 D_1 工作在光电导模式, C_d 为探测器结电容; C_j 为放大器寄生电容。 R_1 为放大器反馈电阻; R_2 为平衡电阻。脉冲固体激光测距机采用调 Q 技术, 脉冲上升时间短, 激光脉宽数量级为 ns 级^[7], 这就对首级放大器 U_1 的带宽有较高的要求。以本文中需要测量的激光器为例, 激光器脉宽为 10 ns, 激光信号带宽可近似为 $0.35/\tau$, τ 为激光的上升沿时间, 输入信号带宽约为 70 M。为了保证探测器输出电流波形经跨阻放大后不失真, 要求放大器有较高的压摆率以满足上升沿的采集。积分电容 C_{in} 需要满足高频率上限、低温漂的要求用于提升测量精度, 为了降低对 A/D 速度的要求便于采样, 还要求电容的串联等效电阻 ESR 较低, 如聚丙烯薄膜电容^[8]。 P_1 为跨阻放大器输出信号, 可作为积分电路的触发信号, 并可以用于激光测距机主波取样。 I 为光电二极管输出的光电流, R_e 为激光波长对应的探测器响应度, 放大器输出电压 V_1 可用下式计算:

$$P = I \cdot R_e \quad (3)$$

$$V_1 = -I \cdot R_1 + V_{CC}R_2 \quad (4)$$

其中, U_2 为积分电路部分, 当接收到触发信号后, S_1 闭合, S_2 断开, 电路对电容 C_{in} 充电, 实现对跨阻放大器输出电压的积分; 积分时间为 t , 跨阻积分电路输出电压如下:

$$V_{OUT} = -\frac{1}{C_{in}} \int_0^t V_1 dV \quad (5)$$

待积分完成后, S_1 断开, 闭合 S_2 , 对电容 C_{in} 进行放电, 电阻 R_3 的值需要根据激光器的发射重频选择合适的 RC 时间常数以确定放电时间。跨阻积分法测量的积分能量可由下式计算; t 为激光脉宽; K 为系统比例系数, 为一个定值。

$$E = \int_0^t P dt = K \int_0^t I \cdot R_e = K \frac{R_e}{R_1} (C_{in} V_{OUT} - V_{CC}R_2 t) \quad (6)$$

4.2 电荷积分模式

电荷积分模式由光电探测器产生的光电流引起积分电容电荷量变化, 通过采集电容器压降实现对光电流的积分。电荷积分法能量采集电路如图 10 所示: 光电探测器 D_2 工作在光伏模式, 脉冲激光信号到达探测器前, 闭合开关 K , 电源对电容充电, 待电容充满电后断开 K , 探测器接收到激光信号产生光电流 I , 采集电容两端电压变化 ΔV , 其原理如下:

$$Q = \Delta V \cdot C = \int_0^t I dt \quad (7)$$

$$E = \int_0^t P dt = \int_0^t I \cdot R_e = \Delta V \cdot C \cdot R_e \quad (8)$$

使用上式即可计算出激光能量。 U_1 应选择具有高输入阻抗的放大器, 对输入输出电路进行隔离并对 ΔV 进行放大, 防止 C_{in} 上电荷在非积分状态下泄露。电荷积分模式受激光脉宽、探测器响应时间的限制较少, 电路较为简单, 但此方法无法兼顾对激光测距机的主波采样。

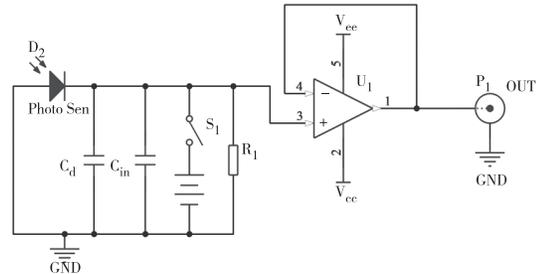


图 10 电荷积分模式电路图

Fig. 10 Charge integration mode circuit diagram

4.3 时序控制设计

能量检测系统设计采用跨阻积分模式, 设计电路时序对积分器的工作与复位, A/D 转换模块的采样进行控制。整体控制逻辑设计为: 激光照射到探测器上产生光电流, 探测器输出一个触发信号 Laser trigger 控制积分电路, 同时给激光测距机一个主波信号。积分器在开始工作前置为高电平, 当接收到触发信号后电容开始充电。当下降沿到达时, 开启 A/D 采样, 待 A/D 采样结束后, 积分电路复位信号置于高电平, 对电容放电, 并完成数据传输、能量计算。

5 能量检测装置标定

基于本文的整体设计, 电路输出的电压信号与激光测距机的发射能量呈线性关系, 但因电路噪声、背景光噪声以及传输过程中造成的损耗, 输出电压

与发射能量之间的比例会有所变化。为了提升系统的测量精度,采用实时比对法,对能量检测装置进行标定,如图 12 所示。使用标准能量计测出激光器发射能量 E , 读出能量监测装置的输出电压 V , 改变激光器二极管电流, 测量激光器发射能量 E_2 , 此时对应的输出电压为 V_2 , 采集多组数据进行曲线拟合, 输入单片机进行能量校准。

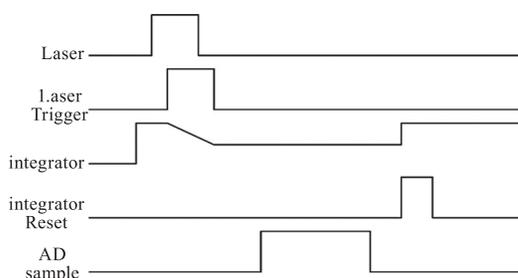


图 11 时序控制设计图

Fig. 11 Diagram of system timing control design

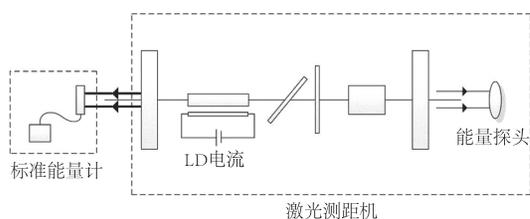


图 12 能量监测装置标定示意图

Fig. 12 Energy monitoring system calibration diagram

6 总结

本文基于无人值守条件下实时监控激光测距机发射能量确保其工作状态这一需求设计了激光测距机能量监测系统,对能量探头与测量电路进行了设计,并对适用于激光测距机的检测位置进行了研究。可以实现 kHz 量级重频激光测距机在无人值守条件下的宽量程在线能量检测。

参考文献:

- [1] Cheng Yanli, Zhan Zhijing, Chen Zhang, et al. Research on the calibration principle of laser energy meter based on the monitoring method of beam splitting ratio[J]. Metrology & Measurement Technique, 2022, 49(3): 12-15. (in Chinese)
程延礼, 展子静, 陈壮, 等. 基于分束比监测法的激光能量计校准原理研究[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(3): 12-15.
- [2] Lu Lijuan. Design of power detection and stability monitoring system on laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
卢丽娟. 激光器功率检测与稳定性监控系统的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [3] Wu Di. The study on real-time monitoring system of high power laser power [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018. (in Chinese)
吴迪. 高功率光纤激光器功率实时监控系统研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [4] Liu Peng, Wang Shupeng, Li Ling, et al. The laser polarization state probe based on PIN type silicon photodiode [J]. Journal of Changchun University of Science & Technology, 2016, 39(5): 9-12, 19. (in Chinese)
刘鹏, 王书朋, 李玲, 等. 基于 PIN 型硅光电二极管的激光偏振态探头[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2016, 39(5): 9-12, 19.
- [5] Li Wenjie, Zhao Duliang, Lin Ying, et al. Design of highly sensitive on-line detecting system for ultraviolet pulse lasers energy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 137-142. (in Chinese)
李文洁, 赵读亮, 林颖, 等. 高灵敏紫外激光脉冲能量在线检测系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 137-142.
- [6] Huang Yina. Research on rapid measuring key technology for laser-induced damage threshold of optical thin films [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
黄一芮. 光学薄膜激光损伤阈值快速测量关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [7] Tan Wei, Zeng Wenfeng, Wang Xiaobing, et al. Pulse width testing technology of laser range finder [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(4). (in Chinese)
谭威, 曾文峰, 王小兵, 等. 激光测距机脉宽测量技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 37(4).
- [8] Wang Qi, Wang Xiaoman, Zhao Haili, et al. Research on weak laser energy detection system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 39(2): 62-66. (in Chinese)
王奇, 王晓曼, 赵海丽, 等. 微弱激光能量监测系统的研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2016, 39(2): 62-66.