

文章编号:1007-2780(2016)12-1137-06

提高外场重频激光光斑测量距离的研究

胡林亭^{1*}, 李佩军¹, 姚志军²

(1. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;

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:为评定激光指示器对运动目标的指示精度, 通常使用激光光斑测量系统, 测量照射在靶标上波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 的激光光斑位置。而现用激光光斑测量系统的最大探测距离仅为 500 m, 需要大幅提高。本文通过分析制约激光光斑测量距离的因素, 研究了提高外场重频激光光斑测量距离的技术途径, 在选用可精确控制快门曝光的近红外高量子效率摄像机的基础上, 设计了快门最优控制策略。在保证激光光斑录取率 99.9% 的同时, 通过控制摄像机曝光时间, 将激光光斑图像信噪比提高了约 2 倍多。外场测量时, 对重频激光光斑的测量距离达到了 2 000 m, 满足了对运动目标测量的精度要求。

关键词: 重频激光; 激光光斑; 摄像法; 测量距离

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163112.1137

Improvement of the measuring distance of repetitive-frequency laser spot in field

HU Lin-ting¹, LI Pei-jun¹, YAO Zhi-jun^{2*}

(1. Baicheng Weapons Test Center of China, Baicheng 137001, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: To evaluate laser pointer's localization accuracy of moving objects, a laser spot measurement system is typically used to measure the spot of a $1.064\ \mu\text{m}$ -wave-length laser on the target. However, the maximum measuring distance of existing laser spot measurement systems is only 500 m, which needs to be substantially increased. This essay analyzes the constraints of laser spot distance measurement, studies the methods for increasing the measuring distance of repetitive-frequency laser spot in field, designs a shutter optimal control strategy based on the use of a high-quantum-efficiency near-infrared camera which is able to precisely control the shutter exposure. A 99.9% laser spot admission rate is guaranteed, meanwhile the laser spot image SNR is increased about 8 times by controlling the camera exposure time. In field, the measuring distance of frequency-repetitive laser spot reaches 2 000 m, which meets the precision requirements for moving target measurement.

Key words: repetitive-frequency laser; laser spot; imaging method; measuring distance

收稿日期: 2016-09-06; 修订日期: 2016-11-09.

* 通信联系人, E-mail: qitiandasheng 0002@com.com

1 引言

半主动激光制导武器通过追踪照射在目标上的激光光斑实现对目标攻击^[1-2],因此激光指示精度不仅体现了激光指示器的性能,也影响激光制导弹的命中精度^[3],是一项关键指标,需要精确测量。挂载于飞机的激光指示吊舱,用于识别、跟踪地面目标并对目标连续照射激光,受跟踪精度和激光指示器光轴一致性误差影响,激光指示位置相对预定瞄准位置是有一定偏差的^[4]。在外场通常用摄像法测量照射在靶标上的激光光斑位置,计算激光指示误差,评定激光指示器的性能^[5-7]。

测量中使用反射系数 0.2 的漫反射靶,受成像器件性能制约,在正午阳光直射靶标时,当靶面上激光光斑能量密度约为 3.1 mJ/m^2 ,在用的激光测量系统有效测量距离约为 $400 \text{ m} \sim 500 \text{ m}$,该测量系统对于固定目标的测量是可以满足使用要求的。对于直线运动目标,运动靶标的行进测量范围大于 $1\,200 \text{ m}$,测量点位于目标行进路线的侧方,航路捷径要求大于 $1\,200 \text{ m}$,测量起点和终点非对称设置,为完成运动靶标行进过程中激光照射位置的全程测量,计算可知激光测量系统的有效测量距离大于 $1\,500 \text{ m}$,因此需要采用行之有效的办法,大幅提高激光测量系统的有效测量距离,解决激光指示吊舱对运动靶标指示精度的测量需求。

2 摄像法测量激光光斑的原理

激光导引头追踪的是靶标上的激光光斑能量中心,测量时以激光光斑能量中心作为激光指示位置,靶标反射特性影响反射的激光光斑能量值分布,因此测量时使用均匀漫反射材料制成的平面靶,以便提高测量精度^[8-9]。激光指示器的照射频率一般为 $10 \sim 20 \text{ Hz}$,与测量摄像机的帧频是不同步的,为保证激光光斑录取率,一种方法是使摄像机快门工作在最长曝光模式,另一种方法是控制摄像机工作在外触发模式,在激光发射前开始曝光,与激光器的发射模式同步工作。

目前通用激光指示器的激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$,太阳光在此波段的辐射也很强。设激光脉冲能量为 100 mJ ,束散角为 0.5 mrad ,脉宽 20 ns ,

脉冲频率 20 Hz ,照射距离 10 km ,平面靶架设倾角 60° ,阳光直射靶面,航路高度 5 km 时大气衰减率估为 20% ,该照射时刻靶面上激光脉冲能量均值约为 4.076 mJ/m^2 。以国内北纬 45° 平原地区为例,查太阳光谱能量曲线可知,地面此波段太阳光谱能量最大值约为 $0.6 \text{ W/m}^2/\text{nm}$,为抑制激光附近波段太阳光干扰,提高激光光斑信噪比,测量摄像机需要加装窄带滤光片,滤光片带宽可估为 20 nm 。

第一种方法,摄像机工作在最长曝光模式,以常用的 CCD 像机(CCIR 制式)为例,每帧最长有效积分时间约为 38.5 ms ,晴天正午阳光直射靶面时,可计算出每帧图像对应靶面上太阳光能量约为 462 mJ/m^2 ,激光照射频率为 20 Hz 时,每帧图像最大可测量一个激光光斑,由此可知每帧图像对应靶面上激光光斑的信噪比约为 0.076 dB ,CCD 像机不能对激光光斑有效成像。目前的工艺水平若进一步降低滤光片带宽,透过率也随之下降,降低探测器接收到的激光光斑能量,将减小激光光斑测量距离。因此有效的方法是减小摄像机曝光时间,降低接收的太阳光能量。

第二种方法,使用有外触发功能的 CCD 像机,设置在外触发模式,通过控制快门曝光时间减小每帧图像积分时间,降低每帧图像接收的太阳光能量。激光脉宽约为 $10 \sim 20 \text{ ns}$,摄像机快门响应时间约为 $1 \mu\text{s}$,因此探测到激光脉冲后,再对摄像机进行积分控制的方法是行不通的,只能用预测的方法,在激光脉冲到达前开启摄像机电子快门并开始积分,这样才能完整的测量激光光斑。

为提高半主动激光制导武器的抗干扰性能,目前使用的激光指示器采用精确频率码模式,精确控制激光脉冲的发射时间,按照等时间间隔发射激光脉冲,导引头也按照约定的编码时序探测激光脉冲。利用半主动激光制导武器激光照射的时域特性,是外场提高重频激光光斑图像信噪比的有效途径。我们现在采用的是预测法,该测量方法是以起始 3 个激光脉冲作启动信号,计算相邻激光脉冲间隔时间,从第 4 个激光脉冲开始,以前一个激光脉冲的照射时刻为基准,按照设定的间隔时间在下一个激光脉冲照射前开启 CCD 像机快门,曝光时间 $100 \mu\text{s}$ 。晴天正午阳光直射靶面时,在该曝光时间下每帧图像接收的太阳光能量折算到靶面上约为 1.2 mJ/m^2 ,靶面上激光光

斑的信噪比约为 12.8 dB。该型号 CCD 像机的快门开启时刻误差约为 $30\ \mu\text{s}$,在摄像前设置曝光时间,在摄像过程中不能改变每帧图像的曝光时间,考虑激光指示器发射激光脉冲的时序抖动和生成 CCD 像机快门启动方波信号的时序误差,为保证激光光斑录取率 99.9% 的测量要求,每帧图像 $100\ \mu\text{s}$ 的曝光时间是一稳妥控制参数,近一步减小曝光时间会降低激光光斑录取率。CCD 像机接收到的激光脉冲能量反比于测量距离的平方,增加测量距离对激光脉冲能量衰减很大,因此目前使用的测量系统有效测量距离约为 500 m。

3 提高激光光斑测量距离的方法

3.1 测量技术分析

由外场摄像法测量靶标上的重频激光光斑原理可知,提高激光摄像系统测量距离的方法大约有五种^[10-15],一是减小窄带滤光片带宽,降低阳光背景干扰;二是减小摄像机曝光时间,降低阳光背景干扰;三是选用高灵敏度摄像机,增加信号幅值;四是增加摄像机光学系统的相对孔径(D/F),提高摄像机的光通量,增加信号幅值;五是使用弱信号识别技术。从目前窄带滤光片的工艺水平分析,显著降低窄带滤光片带宽近期难以实现;受目前近红外光学系统设计水平和加工工艺制约,增加摄像机光学系统的相对孔径成本巨大,不符合测量系统的设计要求;弱信号识别技术适用于测量后的图像处理,不满足激光指示性能试验中对激光光斑的实时监测要求;因此第二种和第三种方法是我们考虑的重点。

目前使用的摄像机的探测器一般为 CCD,对 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光的探测灵敏度较低,因此我们选用了某型高灵敏度的短波红外摄像机,该像机对 $1.06\ \mu\text{m}$ 光谱量子效率约 60%,是在用测量系统中摄像机灵敏度的 6~8 倍。采用与在用测量系统类似的光学系统、窄带滤光片及曝光时间等参数条件,按照前述的激光指示器的照射条件进行激光光斑测量试验,有效测量距离约增加 30%~40%,与预期效果差距很大。在夜间进行同样的激光光斑测量比对试验,有效测量距离增加约 4~5 倍,这说明对于 2 000 m 测量距离,该型红外摄像机的灵敏度应是够用的,白天不能对激光光斑清晰成像,是因为太阳光产生的背景干扰造成激

光光斑图像信噪比下降,因此在摄像机灵敏度达到一定值后,仅仅提高摄像机灵敏度对提高激光光斑测量距离的作用已不明显,此时增加激光光斑图像信噪比是进一步提高激光光斑测量距离的最佳途径。

3.2 提高测量距离的技术途径

根据上述分析及验证试验结果,摄像机灵敏度和信噪比是制约激光摄像系统测量距离的主要因素,我们提出了一种提高外场重频激光光斑测量距离的方法,确定了选用有外触发功能的高灵敏度摄像机和精确控制曝光时间的方案。测量系统的技术方案中,首先选用高灵敏度短波外摄像机,该摄像机具备外触发控制模式,可精确控制快门曝光时间;其次使用具有外触发控制模式的图像采集卡,同步采集红外摄像机测量的激光光斑图像;再次设计了高精度的激光脉冲时序测量和摄像机快门控制系统,实现了摄像机快门的精确控制;最后根据激光指示吊舱照射在目标上的激光脉冲时域特性,设计了摄像机曝光时序的最优控制策略,自适应激光照射时序波动和激光脉宽抖动,显著提高了激光光斑图像信噪比。验证试验表明该方法在满足激光光斑录取率的同时,有效提高了激光摄像系统的测量距离,解决了昼间远距离测量运动靶标上重频激光光斑位置的难题。

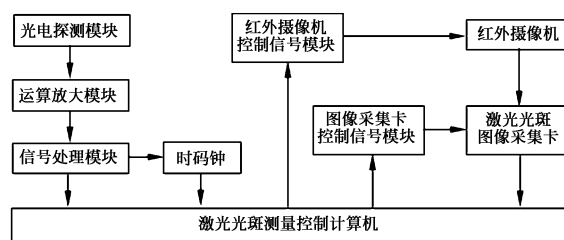


图 1 激光光斑测量系统工作原理

Fig.1 Working principle of laser spot measurement system

激光光斑测量系统的组成及工作原理如图 1 所示。光电探测模块接收到激光脉冲信号后,放大处理并生成与激光脉冲上升沿和下降沿对应的方波信号,输出到时码钟和激光光斑测量控制计算机;时码钟输出此刻时间信息到激光光斑测量控制计算机;激光光斑测量控制计算机用方波信号的下降沿作为激光脉冲的截止信号,用前 3 个激光脉冲到达时刻信息计算激光脉冲的发射时

序。从接收的第 4 个激光脉冲开始,根据前 3 个激光脉冲的到达时刻预测下一个激光脉冲到达时刻,在下一个激光脉冲到达前 J_N 时刻,激光光斑测量控制计算机输出一个高电平脉冲,触发图像采集卡控制信号模块生成激光光斑图像采集卡的启动信号,激光光斑图像采集卡开始采集图像,根据摄像机快门控制策略,在下一个激光脉冲发射前 K_N 时刻,激光光斑测量控制计算机输出一个高电平信号,触发红外摄像机控制信号模块生成红外摄像机的快门开启信号,开始拍摄激光光斑图像;检测到方波信号下降沿后,激光光斑测量控制计算机输出一个低电平脉冲,触发红外摄像机控制信号模块生成红外摄像机的快门关闭信号,关闭快门,暂停拍摄激光光斑图像,激光光斑图像采集卡采集不到红外摄像机的视频数据后,自动停止图像采集,至此完成了一个激光脉冲发射时刻测量和激光光斑图像拍摄;这个过程一直持续下去,直到连续 1 min 没有探测到激光脉冲信号或收到停止测量指令,激光光斑测量控制计算机停止激光光斑的测量。

3.3 摄像机的最优控制策略

激光光斑测量系统工作时序如图 2 所示。 T_1 和 T_2 间隔为激光脉冲 L_1 与 L_2 的发射时间间隔, T_1 和 P_1 间隔为激光脉冲 L_1 的脉宽;信号处理模块输出的方波信号上升沿和下降沿与对应的激光脉冲上升沿和下降沿在时序上是一致的。以测量激光脉冲 L_4 为例,激光光斑图像采集卡在 J_4 时刻进入图像采集等待状态, P_4 时刻后自动停止该激光光斑图像的采集,红外摄像机在 K_4 时刻开快门, P_4 时刻关快门,后续激光脉冲的测量以此类推。

目前常用的有外触发功能的图像采集卡的启动时间为 $1\text{ ms} \sim 3\text{ ms}$, J_N 时刻的确定原则是保证红外摄像机快门开启前激光光斑图像采集卡进入工作状态,控制图像采集卡的图像采集时间是为抑制干扰信号影响。

红外摄像机的快门控制策略是在保证激光光斑探测率的前提下,尽量降低每帧图像的曝光时间。前 3 个激光脉冲用于测量激光照射时刻和照射时序,从第 4 个激光脉冲开始测量激光图像,因此该测量系统可以测量每个激光脉冲的照射时刻和除去前 3 个激光脉冲的每个激光光斑图像。摄像机快门控制策略需要考虑三方面因素,一是激光光斑图像探测率;二是照射在靶标上的激光脉

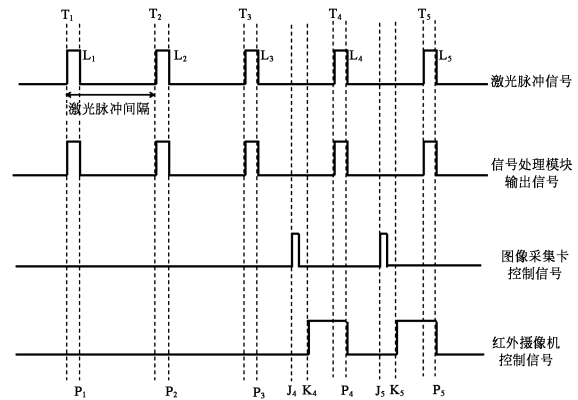


图 2 激光光斑测量系统工作时序

Fig. 2 Working sequence of laser spot measurement system

冲时序抖动;三是测量系统的时序测量误差和控制误差。第一因素,激光指示器的测量要求是除去前 3 个激光脉冲,激光光斑图像探测率为 99.9%,一个激光照射周期 1 min,激光脉冲总数 1 200 个,只允许漏测一个激光光斑,因此设计摄像机快门控制策略时余量要充分。第二因素,因靶标运动速度较低(约为 16 m/s),可忽略靶标运动对测量激光脉冲照射时刻的影响,若载机与靶标相对运动速度 600 m/s,这将使相邻激光脉冲照射在靶标上的时刻与激光指示器发射时刻相差 $0.1\text{ }\mu\text{s}$,同时激光指示器的照射时序也有一定误差,因此载机飞行航路的变化和激光指示器照射时序误差需要精确计算,以便优化摄像机快门控制策略。第三因素,激光脉冲时序测量误差、控制信号上升沿和下降沿时序误差、红外摄像机快门控制误差是测量系统自身误差,可以根据硬件参数确定,这些误差对测量过程影响很大。不同的激光指示器,激光脉冲宽度是变化的,用每个激光脉冲的下降沿作为摄像机快门的关闭信号,自适应激光照射时序波动和激光脉宽抖动,实现摄像机快门的最优控制。制定摄像机快门控制策略,需要综合考虑上述三方面因素,才能达到最佳测量效果,为实现激光光斑图像探测率 99.9% 的要求,摄像机快门控制参数计算如下。

见图 2,测量第 $N(N \geq 4)$ 个激光光斑图像,红外摄像机开快门时刻 K_N 为:

$$K_N = T_{N-1} + \frac{10^6}{Q_L} - \frac{10^6}{Q_L} \times \frac{U}{3 \times 10^8} - \delta_T - \delta_L - \delta_K - \delta_C, \quad (1)$$

式中: T_{N-1} 为第 $N-1$ 个激光脉冲照射在靶标的时刻, (μs); Q_L 为激光脉冲发射频率(Hz); U 为载机与靶标相对运动速度(m/s); δ_T 为激光脉冲时序测量误差(μs); δ_L 为激光脉冲发射时序误差(μs); δ_K 为红外摄像机快门控制误差(μs); δ_C 为测量系统时钟误差(μs)。

见图 2, 测量第 N 个激光光斑图像, 红外摄像机曝光时间 τ_N 为:

$$\tau_N = P_N - K_N, \quad (2)$$

式中: P_N 为测量第 N 个激光光斑图像, 红外摄像机快门时刻(μs)。

见图 2, 若激光指示器的激光脉冲发射时序误差满足指标要求, 可得 P_N 的最大值为:

$$P_N = T_{N-1} + \frac{10^6}{Q_L} - \frac{10^6}{Q_L} \times \frac{U}{3 \times 10^8} + \delta_T + \delta_L + \delta_K + \delta_C. \quad (3)$$

由公式(1)、(2)、(3), 测量第 N 个激光光斑图像, 红外摄像机曝光时间最大值 τ'_N 为:

$$\tau'_N = 2\delta_T + 2\delta_L + 2\delta_K + 2\delta_C. \quad (4)$$

见图 2, 测量第 N 个激光光斑图像, 激光光斑图像采集卡启动时刻 J_N 为:

$$J_N = T_{N-1} + \frac{10^6}{Q_L} - \frac{10^6}{Q_L} \times \frac{U}{3 \times 10^8} - \delta_T - \delta_L - \delta_C - \eta, \quad (5)$$

式中: η 为激光光斑图像采集卡启动时间(μs)。

4 应用实例

以某型号激光光斑实时测量系统为例说明该方法的实用性。该测量系统选用 Pacific Silicon Sensor 公司的 AD1500-10 型号光电探测器, 对 $1.064 \mu\text{m}$ 激光脉冲响应率高; 选用 $0.2 \mu\text{s}$ 精度时钟卡和对 $1.064 \mu\text{m}$ 激光量子效率约 60% 的某型短波红外摄像机及 Matrox 公司的 solios 采集卡; 采用工业控制计算机控制激光脉冲信号采集、时钟卡, 数字图像采集卡、红外摄像机、通讯卡等模块工作和数据收发。

选用的短波红外摄像机可以实时开启快门, 但曝光时间只能预先设定为固定值, 为实现曝光时间的最优控制策略, 对摄像机电子快门控制模块进行了二次开发, 实现了电子快门的开门和关门时刻的实时控制。

设激光指示器的参数为:

激光脉冲发射频率 $Q_L = 20 \text{ Hz}$, 激光脉冲发射时序误差 $\delta_L = 5 \mu\text{s}$; 载机与靶标相对运动速度 $U = 300 \text{ m/s}$ 。

激光光斑测量系统的参数为:

激光脉冲时序测量误差 $\delta_T = 0.5 \mu\text{s}$; 红外摄像机快门控制误差 $\delta_K = 1 \mu\text{s}$; 测量系统时钟误差 $\delta_C = 0.1 \mu\text{s}$; 激光光斑图像采集卡启动时间 $\eta = 2 \text{ ms}$ 。

由公式(1), 红外摄像机开快门时刻 K_N 为:

$$K_N = T_{N-1} + 49993.25. \quad (6)$$

为提高红外摄像机快门控制的准确性, 实现最优控制策略, 以激光光斑测量系统测量的前一个激光脉冲照射在靶标的时刻 T_{N-1} 为基准零时, 设置红外摄像机开快门时刻 K_N , 则有:

$$K_N = 49993.25 \mu\text{s}. \quad (7)$$

若激光指示器性能正常, 由公式(4), 红外摄像机曝光时间最大值 τ'_N 为:

$$\tau'_N = 13.2 \mu\text{s}. \quad (8)$$

由公式(5), 激光光斑图像采集卡启动时刻 J_N 为:

$$J_N = T_{N-1} + 47994.25. \quad (9)$$

当红外摄像机曝光时间为最大值 $13.2 \mu\text{s}$, 按照前述的测量条件, 晴天正午阳光直射靶面时, 每帧图像接收的太阳光能量折算到靶面上约为 0.16 mJ/m^2 , 靶面上激光光斑的信噪比约为 28.5 dB 。外场实际测量时, 每帧图像曝光约为 $9 \mu\text{s} \sim 10 \mu\text{s}$, 测量距离大于 2000 m 。

上述红外摄像机快门控制策略适用于多种频率和不同脉宽激光指示器的激光光斑测量, 可有效控制快门曝光时间, 提高激光光斑图像的信噪比。

5 结 论

摄像机灵敏度和信噪比是制约激光摄像系统测量距离的二个主要因素, 二者是相辅相成的, 仅提高一个参数值效果不显著, 需要统筹考虑, 合理搭配这两个参数, 才能达到最佳测量效果。

该方法选用某型高灵敏度短波红外摄像机, 针对其外触发控制特性, 设计一种实时高精度控制摄像机快门曝光时序的方法, 在保证激光光斑录取率 99.9% 的同时, 通过减小摄像机曝光时间, 将激光光斑图像信噪比提高了约 2 倍多。外场测

量时,对重频激光光斑的测量距离达到了 2 000 m,解决了昼间外场远距离测量靶标上重频激光光斑位置的难题,为评定激光指示吊舱对运动目标的照射性能提供了依据。

参 考 文 献:

- [1] 马锐.激光制导武器的发展分析[J].红外与激光工程,2008,37(S3):266-270.
MA R. Development analysis of the laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 266-270. (in Chinese)
- [2] 王狂飙.激光制导武器的现状、关键技术与发展[J].红外与激光工程,2007,36(5):651-655.
WANG K B. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655. (in Chinese)
- [3] 沈浩,祁载康.激光光斑抖动对激光半主动制导精度的影响[J].北京理工大学学报,2008,28(2):108-110,172.
- [4] SHEN H, QI Z K. Fluence of laser spot random flutter on the precision of laser semiactive guidance [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(2): 108-110, 172. (in Chinese)
- [5] 李富栋.机载红外搜索与跟踪系统的现状与发展[J].激光与红外,2008,38(5):409-412.
LI F D. Status and development of airborneIRST systems [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 409-412. (in Chinese)
- [6] 姚志军,韩秋蕾.激光制导动靶照射精度测量系统[J].液晶与显示,2014,29(6):1124-1130.
Yao Z J, Han Q L. Laser radiation accuracy measurement system of moving target in laser guidance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1124-1130. (in Chinese)
- [7] 李刚,汪岳峰,董伟,等.激光照射指示器整机性能检测方法研究[J].红外与激光工程,2004,33(5):462-464,492.
LI G, WANG Y F, DONG W, et al. Digital method to checkout complete appliance of laser radiation indicating meter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 462-464, 492. (in Chinese)
- [8] 岱钦,毛有明,吴凯旋,等.脉冲激光测距中高速精密时间间隔测量研究[J].液晶与显示,2015,30(1):83-87.
- [9] DAI Q, MAO Y M, WU K X, et al. High speed and high precision time-interval measurement system in pulsed laser ranging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 83-87. (in Chinese)
- [10] 孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J].红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
KONG B, WANG Z, TAN Y S. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)
- [11] 胡林亭,卢显葵,金俊坤,等.CCD测量激光光斑方法研究[J].激光技术,2001,25(2):154-157.
HU L T, LU X K, JIN J K, et al. Laser facula measurement with CCD [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(2): 154-157. (in Chinese)
- [12] 张少迪,孙宏海.远距离激光光斑位置高精度测量方法[J].中国激光,2012,39(7):0708003.
- [13] ZHANG S D, SUN H H. High precision method of long-ranged laser spot position measurement [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, 39(7): 0708003. (in Chinese)
- [14] 张海庄,姚梅,雷萍,等.远场激光光斑图像处理研究方法研究[J].激光技术,2013,37(4):460-463.
- [15] ZHANG H Z, YAO M, LEI P, et al. Research of image processing method of far-field laser spots [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 460-463. (in Chinese)

作者简介:胡林亭(1964—),男,山东青岛人,高级工程师,主要从事光学测量工作。E-mail: qitiandasheng0002@sina.com