

基于双 CCD 探测的外场高精度激光光斑测试技术

李艳晓¹, 张磊², 张红刚¹, 胡磊力¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 海军驻洛阳地区航空军事代表室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 激光光斑成像质量是激光制导武器的重要指标之一, 为了考核该指标的符合性, 分析了通用激光光斑测试技术的优缺点, 针对影响外场激光光斑测试精度的几个因素, 提出解决外场测试过程中的有效途径。针对应用中的测试需求, 采用非接触式的间接测量方法, 设计了基于双 CCD 探测的外场高精度激光光斑测试系统, 该系统具备记录保存光斑并进行图像处理、实时监控、解算激光编码及误差值、镜前空间能量密度变化和激光脉冲漏散率等功能, 具有测试动态范围大、分辨率较高、抗外界干扰性强、使用方便等特点, 能够实现外场高精度的激光光斑测试与分析评估。通过外场的测试应用与分析, 该测试系统解决了外场激光光斑测试中的问题, 在外场靶试过程中发挥出了重要的作用。

关键词: 激光光斑采集; 双 CCD 探测; 激光镜前能量密度; 图像处理

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0059-06

Technology of high precision test for laser spot based on double CCD detection in the outfield

Li Yanxiao¹, Zhang Lei², Zhang Honggang¹, Hu Leili¹

(1. Electro-Optical Equipment Research Institute of Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471023, China;

2. Representative Office of Navy at Luoyang Area, Luoyang 471009, China)

Abstract: The laser spot image quality is one of the important index of laser guided weapons. In order to check the index, the advantages and disadvantages of general laser spot testing technology were analyzed. According to the several factors affecting the test precision field of laser spot, a testing system of high accuracy laser spot outfield detection based on the double CCD with the indirect method of non-contact type was designed. The system had various functions like recording the spot and image processing, real-time monitoring, calculation of laser coding and error value, spatial variation of energy density forward lens and the laser pulse leakage rate and other functions. It also had characteristics of testing large dynamic range, high resolution, anti external interference was strong, easy to use etc. It can do the test and analysis of laser facula evaluating field with high precision. The test system can solve the problems in the field of laser spot test through the test analysis and application of the external field, it have played an important role in the process of the field test outdoor.

Key words: laser facula sample; dual CCD detection; laser energy density forward lens; image processing

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-15

作者简介: 李艳晓(1975-), 女, 硕士, 主要从事机载光电系统仿真与测试方面的研究。Email: liyanxiao1234@163.com

0 引言

激光制导武器系统具有制导精度高、抗干扰能力强等优势,因而各军事大国都竞相开展研制,尤其是在最近的几次局部战争中激光制导武器显示出了强大的威力,使其受到了越来越广泛的重视^[1]。激光制导武器装备的作战效能直接取决于发射激光到达目标处光斑的能量密度及分布,因此对激光光斑质量开展测试与研究,可以对激光武器的性能和工作状态做出判断,为激光制导武器系统作战效能的定量评估提供依据。

实验室测试激光光斑存在如下局限性^[2]:

(1) 被测激光系统要发射激光,实验室受场地空间限制加上反射源较多,若保护不当实验室的光学设备和人眼易被激光损坏,造成损伤事故;(2) 随着技术进步,被测激光系统能量较高,实验内测试光斑为保护光斑接收器必须组合多片衰减倍率衰减片,造成试验误差增加;(3) 室内测试脱离了大气路径,无法充分完成对激光在复杂大气路径下光轴指向及相关动态性能测试。

鉴于上述原因,激光光斑的性能测试通常在外场开展。

1 通用激光光斑测试技术

激光光斑质量分析理论已经相当成熟,并且有了相应的测量仪器。主要分为三类:第一类是采用机械扫描法,可测连续和脉冲激光的光斑特性;第二类是采用会向探测器阵列直接测量激光能量分布情况。第三类是采用 CCD/CMOS 面阵探测器件获得激光光斑的图像显示,再经计算机分析得到激光光斑形状参数。

机械扫描法通常用于测量大功率激光^[3],主要采用刀口、狭缝等设备对光束各点用巡回扫描的方法对激光光束进行测量,获得光斑的光强(功率密度)分布数据。机械扫描法的缺点是^[4]:扫描所需要的时间较长,并且缺乏对激光各项性能参数的综合描述和分析,扫描的稳定性和设备的精确度很难把握,它取决于操作者的经验。该测量方法由于操作复杂,容易出错,普通工作人员很难准确操作,要由激光测量领域经验丰富的专业人员进行操作。

探测器阵列直接测量法,即用探测器阵列靶接收激光光斑,靶面按照一定的密度均匀安装激光探测器,通过探测器后续处理电路同时对激光探测器的响应信号进行处理,得到激光光斑空间的绝对能量密度分布。这种测试方法是不受白天晚上的时间限制,具有精度高、实时性好等特点,可广泛应用于多种重复频率的激光器性能测试中,其缺点为若在外场使用时,需要采用很多探测器,且对探测器阵列的均匀性、可靠性、排除杂光等能力均要求较高,才能保证整个测试系统的精度,因此在实施上有较大的难度。

面阵 CCD/CMOS 相机法则是借助固体成像设备 CCD/CMOS 获得激光光斑的图像显示,再经计算机分析得到激光光束形状参数,该方法具有以下突出优点:

(1) 输出噪声低、动态范围大、量子效率高、电荷转移效率高、光谱响应范围宽以及几何稳定性好等;(2) 激光光斑的二维光强(功率密度)分布可以直接测量得到,每一点的光强值都可以用灰度值映射,还可以将二维光强(功率密度)分布形象化为容易被用户感知的三维曲面;(3) 无接触性。传感器不会介入到激光光束内部,因此不会造成对激光光束参数的影响。

基于 CCD 摄像仪的测量系统适合测量脉冲或连续激光,能提供如下光束分析功能:激光束峰值/质心位置、光斑大小、光束椭圆度、高斯拟合、均匀度、光阑设定和比值,并且可以通过设定参数和偏差范围实现在线筛选等功能。

2 影响外场激光光斑测试精度的几个因素

通用的激光功率/能量测量设备多基于近场,并且因接收口径有限,只能检测到很小特定区域内的激光能量,激光制导武器上激光照射目标引导武器攻击时,通常距离较远,通用的激光功率/能量测量设备不能满足激光远场光斑质量的检测需要,对远场强激光的检测必须采用专用的方法和设备。影响外场激光光斑测试精度的几个因素主要有:

(1) 测试结果受强杂光影响比较大^[5]

由于野外存在背景杂光,空气中还可能存在后向散射激光,这些对激光光斑探测来说,都是干扰光噪声。而远距离接收激光能量偏弱,此时信噪比极低,为了确保测量数据的可信度和测量精度,必须消

除环境杂光干扰的影响。

(2) 激光镜前能量密度测试受环境因素影响大^[6]

激光镜前能量密度是体现激光制导武器能力的重要指标,在空中靶试项目中,已知导引头的灵敏度,如果测量的镜前能量密度经距离换算后,大于导引头的灵敏度,依此就可以判断该次空中靶试成功的可能性有多大。在测试激光镜前能量密度的过程中,由于激光光斑测试系统离靶板的距离不同,与靶板之间的光轴夹角不同,地面环境不同,测到的能量密度数值和其精度会有很大的不同。如何确保一定的精度,满足实际使用要求,是能量密度测试的关键技术。

(3) 光斑图像处理算法复杂

通过激光光斑测试系统采集到的激光光斑,需要对其进行图像处理,分析出光斑质心坐标、光斑尺寸、编码误差、镜前空间能量密度变化和激光漏散率等参数,分析制导过程中发射的激光信号对武器制导的有效性。另外,由于图像摄取设备拍摄的光斑图像是一定倾斜角度的漫反射光斑图像,并不是照射在靶板上的直射光斑图像,不能真实反应照射在靶目标处的激光光斑性能,所以在处理算法中要进行相应的图像校正和能量修正。因此高精度的图像处理算法是保证测试精度的主要因素之一。

基于上述因素的影响,在开展外场激光光斑测试的过程中,测试系统必须满足克服上述因素的影响才能达到较高的测试结果。

3 提高外场激光光斑测试精度的技术途径

由于外场测试激光光斑的干扰因素较多,因此在考虑整体的测试精度、测试效率等,重点考虑采用基于 CCD 摄像仪的测量系统,来达到快速高精度的外场激光光斑测试结果。

3.1 抗环境杂光干扰技术

为解决野外测试过程中的杂光干扰,在测试系

$$a = \frac{(\overline{x^2 \bar{x} + \bar{x} y^2} - \bar{x}^2 - \overline{xy^2})(\overline{y^2 - \bar{y}^2}) - (\overline{x^2 \bar{y} + \bar{y} y^2} - \bar{x}^2 \bar{y} - \overline{y^3})(\overline{xy - \bar{x} \bar{y}})}{2(\overline{x^2 - \bar{x}^2})(\overline{y^2 - \bar{y}^2}) - 2(\overline{xy - \bar{x} \bar{y}})^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{(\overline{x^2 \bar{y} + \bar{y} y^2} - \bar{y}^3 - \overline{yx^2})(\overline{x^2 - \bar{x}^2}) - (\overline{x^2 \bar{x} + \bar{x} y^2} - \bar{y}^2 \bar{x} - \bar{x}^3)(\overline{xy - \bar{x} \bar{y}})}{2(\overline{x^2 - \bar{x}^2})(\overline{y^2 - \bar{y}^2}) - 2(\overline{xy - \bar{x} \bar{y}})^2} \quad (3)$$

由公式(2)和公式(3)获得光斑参数后,便可得到各边界点残差及残差平方和,进而可滤掉一些残差较大点,然后利用公式(2)和公式(3)获取光斑参数,

系统设计时要考虑采用双 CCD 阵列探测加窄带滤光片方案,红外激光图像和白光背景图像分别被两组高分辨率的 CCD 接收,再叠加融合,降低了信号处理的难度,可以获得较清晰的激光光斑图像。同时采取接收时间选通、CCD 同步曝光、对采集到的图像信号进行预调整、预设灰度阈值等措施,进一步消除背景干扰。通过这些设计措施,可有效地提高光斑的测量精度。

3.2 镜前能量密度测量技术

通过采用近距离加衰减片和电路增益数字控制的方法,确保了系统具有较大的动态范围,从而保证了测量的线性度。通过采用经标定过的模拟激光光源,可以从小到大连续地对测量电路进行标定。同时,利用测定能量的激光目标指示器在外场进行验证比对,保证了可实用的镜前能量密度测量精度。

3.3 激光光斑图像处理技术

激光光斑位置的准确定位是决定该测试系统测量精度高低的关键因素。而要确定激光光斑中心位置,首先要确定激光光斑边缘位置。光斑边缘检测的方法有很多种,但由于靶板反射率的不均匀性,靶板与激光束之间存在的夹角,激光大气传输引起的散射、紊流扰动、光斑闪烁,以及随机噪声和背景杂光干扰,都会导致光斑变形,强度分布不均匀和边缘模糊,没有一种方法能满足精度或速度的要求,必须采取一种综合的集中各种算法优点的算法。

基于上述因素,系统采用了椭圆拟合算法,该算法是根据最小二乘原理用椭圆来逼近激光光斑轮廓,假设采集的图像大小为 $x \times y$ 像素, E 是光斑边界的集合, $i \in E(x_i, y_i)$ 为光斑边界像素的坐标, (x, y) 满足:

$$\overline{x^m y^n} = \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n / \sum_{i \in E} 1 \quad (1)$$

那么光斑中心的坐标 (a, b) 下式可得:

经多次迭代可进一步提高测试精度。

椭圆拟合算法优点是算法速度快,能够多次迭代,运算精度较高;存在的问题是抗干扰性差,当存

在随机噪声时中心运算精度会明显降低,当干扰较大时所得圆心甚至可能明显错误。

为了消除干扰,提高图像处理精度,系统采用了如下几种措施:

(1) 采用焦距可变的成像光学系统,确保合理的相对孔径,主要保证远距离上的信噪比;(2) 激光白光双 CCD 方案,分光谱探测,解决了为了相互兼顾而两头不理想的问题。并且还可以利用图像叠加相消的原理,消除信号中的背景噪声;(3) 激光接收光学系统设计高透过率窄带滤光片,滤除绝大部分的阳光;(4) 增加接收时间选通功能,在曝光时机上控制杂光的进入;(5) 对采集到的图像信号进行亮度、对比度、白平衡等预调整,使光斑图像清晰、轮廓明显;(6) 预先设定合适的采集亮度阈值,然后只取用亮度值大于设定阈值的光点,而对亮度值小于设定值的点可认为是散射光或杂光干扰,予以滤除。

通过上述排除干扰的措施,和椭圆拟合图像处理算法结合起来进行应用,在外场激光光斑的测试过程中,会达到较为理想的计算结果。

4 激光光斑测试系统设计

激光光斑测试系统由光斑采集组件、变焦成像光学组件、激光信号探测组件、解码与能量密度测量组件、数据处理计算机、GPS、图像处理软件等组成。具备如下功能:

(1) 具有记录保存光斑采集组件采集到的光斑图像功能和视频回放功能;(2) 对激光光斑进行实时监控,具有全天时测量能力,显示分析激光光斑图像变化、解算激光光斑半径、光斑质心坐标、光斑质心与目标靶板十字线的偏移量;(3) 能够完成测量并记录激光器发射的编码序列相邻两个脉冲间隔值,任意组脉冲序列相邻脉冲间隔值均值、最大偏差值;解算出的编码值、激光编码误差值等参数;(4) 能够解算出镜前空间能量密度变化和激光脉冲漏散率等参数;(5) 具有 GPS 接收模块,从 GPS 接收模块获取系统时信号叠加在各路模拟视频输出,使光斑图像上一一直叠加时间,方便进行比对。

4.1 光斑采集组件

光斑采集系统包括一组变焦成像光学系统和两组高分辨率 CCD 阵列探测器,激光和白光经光学系统接收后,经一组分光棱镜,被分成激光与白光两束

测量光束,其中激光光束进入激光光斑 CCD 照相机,白光光束进入白光 CCD 照相机,CCD 输出的图像视频信号由图形采集卡进行记录,激光光斑图像和靶板背景图像融合在一起,得到清晰完整的测量图像和测量数据。光斑采集系统原理框图如图 1 所示。

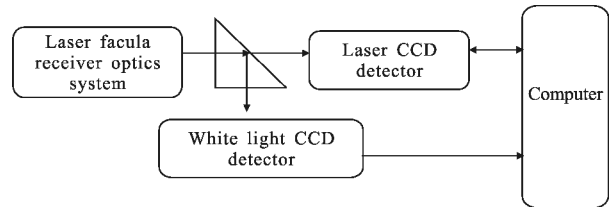


图 1 光斑采集系统

Fig.1 Facula acquisition system

4.2 变焦成像光学组件

根据选定的 CCD 阵列探测器面积,权衡测量精度、抗干扰、灵敏度多方面要求,采用长焦距小相对孔径的光学系统方案,满足远距离探测的要求。

4.2.1 激光光斑 CCD 照相机

激光光斑图像的采集采用高灵敏度、低噪音的硅 CCD 传感器,响应波长从 400~1 700 nm,最小可探测功率是实际到达 CCD 光敏面上功率的 7 倍,满足远距离光斑探测的要求。

4.2.2 白光 CCD 照相机

白光 CCD 照相机选用分辨率与红外 CCD 相机相近的普通 CCD 相机,采用数字面阵 CCD,分辨率高,图像质量好,色彩还原性好,外触发输入,可通过调节包长改变帧率,具有触发后延迟曝光功能。

4.3 激光信号探测组件

激光信号探测组件包括激光接收光学系统、激光接收放大器、峰值保持电路、增益控制电路、整形输出电路等组成。

激光接收光学系统采用图 2 所示的系统,具有滤除背景杂光的窄带滤光片和限制接收视场的小孔光阑,可以满足激光脉冲信号的准确测量。

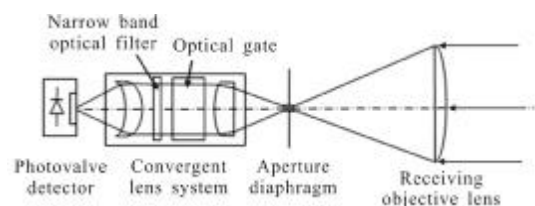


图 2 频率接收光学系统

Fig.2 Frequency receiving optical system

激光信号探测组件采用高灵敏度激光探测器,能够实现对外场激光能量高灵敏度探测。采用低噪声宽带放大器,激光信号经放大电路放大后,由峰值保持电路保持,然后送解码与能量密度测量组件进行镜前能量密度的测量。同时,放大后的激光脉冲送整形电路进行二值变换,送解码与能量密度测量组件进行码型识别,计算编码精度,产生同步脉冲信号。

4.4 解码与能量密度测量组件

解码与能量密度测量组件接收激光信号探测组件送来的脉冲信号和反映激光能量大小的模拟信号。解码与能量密度测量组件对每周期的码型进行识别,一边识别一边输出编码代号,同时进行编码精度和漏码率的计算统计。只要码型准确,系统就每个激光脉冲输出一个同步信号给激光光斑采集组件。激光光斑采集组件利用同步信号,根据已知的频率码周期对下一个激光脉冲进行预测,产生 CCD 快门的激光预测触发信号和背景图像采集预触发信号,实现对曝光时机选择,以及背景图像的采集。

解码与能量密度测量组件在进行激光脉冲参数检测的同时,进行激光能量密度的测量。它利用激光脉冲峰值,计算出激光的能量,再根据接收口径,计算出当时当地的能量密度。如果能量密度低于预先设定的制导能量密度阈值,给出激光报警信号。经过对脉冲峰值与激光能量的标定,获得比较准确的激光能量密度。

4.5 数据处理计算机

数据处理计算机用于激光信息的采集和传输,内含图像采集卡与采集软件、传输软件、操作控制软件、图形显示分析软件以及通信接口等。采集软件接收光斑采集组件摄取的激光光斑图像和解码与能量密度测量组件送来的激光脉冲的频率信息和能量密度信息,操作控制软件和图形显示分析软件完成对图像接收、处理,显示、存储、回放,并通过处理软件,得到测量参数。计算机首先分别对光斑图像和靶板图像进行预处理,与处理后的光斑图像和靶板图像再进行融合,最后求得质心和偏差量等参数^[7],同时对图像进行重新构建,组合成视频图像,供记录和观看分析。

图形显示分析软件对激光光斑直径测量的处理算法采用基线(靶板十字线)校准模式^[9],首先测试测试现场处的信号本底,获得准确的基线,并在激光光

斑测试中加权处理,从而获得更为精准的测试数据,自动计算激光光斑中心位置,并存储每一幅图像的光斑中心点位置,根据设定的靶板中心位置计算出光斑形心的相对偏移量^[9]。

4.6 GPS

GPS 采用市售模块,直接从 GPS 模块中读取数据,提取时基信号。GPS 时基信号通过数据处理计算机的上软件处理,叠加在视频上。

4.7 图像处理算法

在排除随机噪声干扰的情况下,采用经改进的椭圆拟合法来对激光图像进行处理^[10],测量激光光斑的质心和半径,达到了较高的计算精度。

5 外场试验及结果

5.1 激光光斑测试布局及方法

图 3 中,外场激光光斑测试通常采用激光光斑测试系统和漫反射率为 0.2 的激光靶板进行,测试时,激光制导武器系统在距离靶板一定距离处照射,激光光斑测试系统架设在试验靶板前方约 50 m 的距离上,与漫反射靶板构成 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 角度关系。

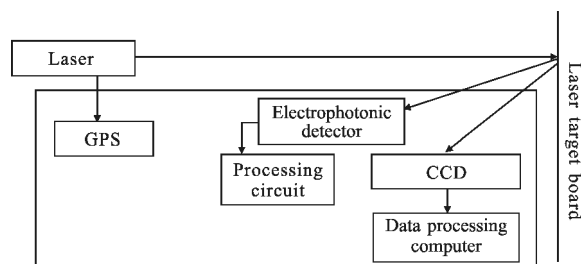


图 3 外场激光光斑测试原理

Fig.3 Outfield laser facula test principle

测试时,被检测激光在一定距离处照射漫反射靶板,同时触发信号送 GPS 时统一记录激光脉冲发射时刻。激光光斑测试系统中的光电探测器接收脉冲激光信号,经测频、延时后向图像摄取设备(CCD 摄像机或热像仪)发出触发信号,使其记录激光光斑图像。记录完毕后由数据处理计算机上的专用软件对各帧图像进行处理,得到各脉冲的远场光斑参数。

5.2 试验结果

如图 4 所示,在外场的靶试测试过程中,在能见度 6 km,照射距离 4 150 km,监测距离 500 m 条件下,测试到的激光光斑的数据见图 4。

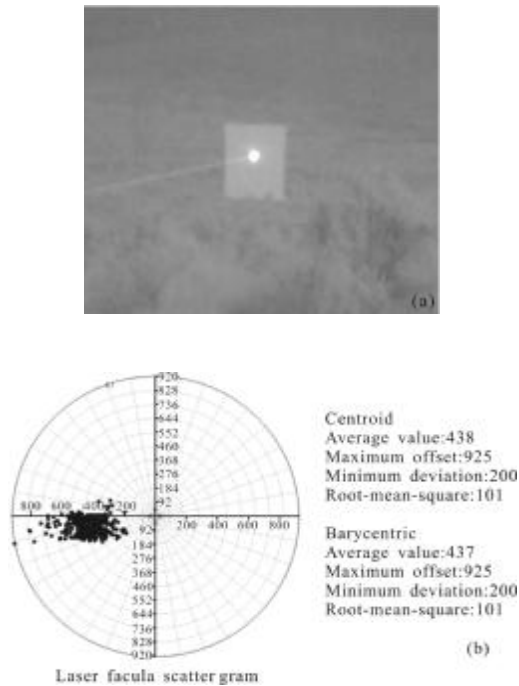


图 4 外场激光光斑采集及分析

Fig.4 Acquisition and analysis of outfield laser facula

因此可以看到,该设备能够清晰地采集激光光斑并将光斑的数据实时分析出来,实现了现场即测即得的目的。

6 结束语

文中针对外场远距离激光光斑测试的各种干扰及困难,通过不同的测试方法对比,采用基于双 CCD 探测、高灵敏度测试、排除干扰的图像处理算法等技术,研制出了高动态范围、高精度的测试系统,解决了外场激光光斑测试中的问题。该测试方法为非接触式的间接测量方法,分辨率较高,在外场靶试过程中发挥出了重要的作用。

参考文献:

- [1] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin, et al. Study on characterization and diagnosis of high power laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 61-64. (in Chinese)
高卫, 王云萍, 李斌, 等. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1): 61-64.
- [2] Lei Hong, Li Qiang, Zuo Tiechuan. Measurement method of high-power laser beam parameters [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2000, 11(4): 372-374. (in Chinese)
雷甸, 李强, 左铁钊. 大功率激光光束参数的测量方法[J]. *光电子·激光*, 2000, 11(4): 372-374.
- [3] Li Qiang, Lei Hong, Huang Minshuang, et al. Research on high power laser beam and focus power intensity distribution directly measuring instrument[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(3): 257-262. (in Chinese)
李强, 雷甸, 黄民双, 等. 大功率激光光束聚焦光斑功率密度分布直接测量仪的研究[J]. *中国激光*, 2002, 29(3): 257-262.
- [4] Pang Changfu, Liu Liudi. Problems and solutions of CCD camera in measurement[J]. *Optical Technique*, 1996(2): 5-8. (in Chinese)
庞长富, 刘榴娣. CCD 摄像机用于测量中存在的问题及解决方法[J]. *光学技术*, 1996(2): 5-8.
- [5] Chen Zhibin, Li Yizhao, Wang Chengyang, et al. Laser spot and it's optic axis collimation detection method for laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 261-262. (in Chinese)
陈志斌, 李义照, 王呈阳, 等. 激光测距机光斑及其光轴平行性检测方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 261-262.
- [6] Ruan Liang, Ma Weihong. Study on laser spot center detection algorithm in outfield[J]. *Optical Instrument*, 2010, 32: 5-8. (in Chinese)
阮梁, 马卫红. 外场激光光斑中心检测算法研究 [J]. *光学仪器*, 2010, 32: 5-8.
- [7] Wang Yunping. Laser facula measurement technology using detector array[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(4): 22-23. (in Chinese)
王云萍. 探测器阵列法测量激光光斑参数关键技术分析 [J]. *激光杂志*, 2007, 28(4): 22-23.
- [8] Zhang Jian, Duan Tao, Liu Aidong. Algorithm research on correction of geometric distortion and its implement of software[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, 1(2): 60-64. (in Chinese)
张健, 段滔, 刘爱东. 全景图像几何畸变校正的算法研究及其软件实现[J]. *光学与光电技术*, 2003, 1(2): 60-64.
- [9] Dai Dede, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Pretreatment for laser spot image in strong noise[J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29: 60-62. (in Chinese)
戴得德, 孙华燕, 宋丰华, 等. 强噪声条件下激光光斑图像预处理方法研究[J]. *计算机应用*, 2009, 29: 60-62.