

文章编号 1004-924X(2012)04-0789-07

分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计

张 磊^{1,2*}, 郭 劲¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为精确测量强激光发射系统中高功率激光经分体式扩束系统后光束的传输方向,设计了一种新型分体式扩束系统输出光平行度测量装置。根据高功率激光分体式扩束系统及红外激光的特点,该装置采用高分辨率红外 CCD 作为监测成像设备。采用轻质高刚度的优质铝合金对装置的机械结构进行了设计,切换部件搭载在高精度线性位移平台上。基于高分辨率 CCD 和精密线性位移平台,该装置可较好地地完成动态和静态测量。测试结果表明,该平行度测量装置工作稳定、可靠,测量精度优于 $2.0''$;装置设计合理,实用,可为扩束系统的装调及应用提供可靠依据。

关键词:高功率激光系统;分体式扩束系统;平行度测量装置;装调

中图分类号:TH741.14 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0789

Design of parallelism measuring equipment for laser beams from independent laser expanding beam system

ZHANG Lei^{1,2*}, GUO Jin¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhangleiciomp@163.com*

Abstract: To accurately measure the transmission directions of high power laser beams from a laser independent expanding beam system in the laser launching system, the equipment for measuring the parallelism error of independent expanding beam system is designed. Firstly, based on the speciality of the independent expanding beam system and the IR laser, the equipment uses a high resolution IR CCD for measuring and imaging. Then, the mechanical structure of the equipment is constructed by using aluminum alloys with light quality and high rigidity, and its activity parts are building on a linear moving platform with high precision. On the basis of the high resolution CCD and the precise displacement platform, the equipment can implement the dynamic and static measurement. The experimental results show that the equipment works stably and reliably and measuring precision is better than $2''$. It satisfies the requirements of the laser launching system, and can provide basis for the assembly and application of the expanding beam systems.

收稿日期:2011-04-08;修订日期:2011-05-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA04Z367);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 061X20C060)

Key words: high energy laser launching system; independent expanding beam system; parallelism error measuring equipment; assembly

1 引言

随着激光发射系统的发展,其结构越来越复杂,激光功率也不断提高,随之对激光通过发射系统后的光束质量的要求也越来越高。在高功率激光发射系统中,强激光光束由激光器输出经过发射系统时,必须对其进行光束变换及光束整形,才能满足相关工作指标要求^[1-3],因此由激光扩束系统进行光束整形及光束变换是确保激光光束传输质量的重要方法之一。离轴式扩束系统是激光扩束系统的主要形式之一,分体式离轴扩束系统可将扩束系统从跟瞄发射系统中分离出来,具有结构简单、光束整形效果好、反射率高等优点,并且可以大大减小跟瞄发射系统的光学口径从而提高设备的运输性及机动性,已成为当前扩束系统的主要发展方向。但激光器、分体式离轴扩束系统及跟瞄发射系统之间具有复杂的空间角度关系,因此提供精确实时的扩束系统输入、输出光角度关系从而确保经过发射系统的出射激光光轴与跟瞄系统视轴的平行度,是发射系统快速完成装调及正常工作的基础之一。

目前,经过扩束后的光束平行度测量多采用同半径多角度远场光斑测量法,红外-可见基准转换 CCD 自准直测量法等。前者需在远场设立多个基准点而后将跟踪轴与激光光轴进行平行度标定;后者为避免直接测量强激光而引入一束基准光,并将基准光与强激光进行平行度校准,由基准光光轴代替强激光光轴^[4-5]。上述方法操作复杂、成本高、周期长,且不具实时性。

本文基于与发射激光波长相匹配的面阵 CCD 及激光光束传输特性提出了一种非接触式光学平行度测量装置。与远场标定或基准转换等方法需要通过重新设立基准不同,本文提出的装置通过测量发射激光本身或通过分束测量微透的激光来测量扩束系统的平行度,从而大大提高了测量精度。提出的系统操作简单、易实现、可实时动态监测。

平行度测量装置主要由可切换基准镜机构,

动态监测组件组成。其中动态监测组件主要由切换镜组,汇聚镜头,高分辨率 CCD 组成。本装置可为分体式扩束系统与激光器及跟瞄发射系统的对接提供装调的基准,并可在发射系统工作时为快速控制反射镜等光束方向调整装置提供作业依据。

2 平行度测量装置原理

被测光学元件的微小角度偏差是通过测量经过被测光学元件后被准直镜反射的光的投影与理论光轴的横向及纵向的位移偏差得到的。

图 1 所示为平行度测量装置组成图,其主要由可切换基准镜机构,动态监测组件等组成。

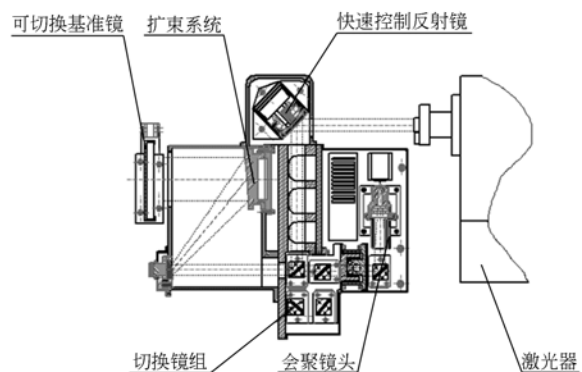


图 1 平行度测量装置组成图

Fig. 1 Mechanical equipment for measuring parallelism error

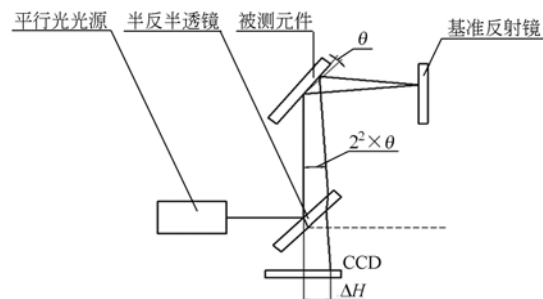


图 2 平行度测量原理图

Fig. 2 Parallelism error measuring principle

如图 2 所示,平行光光源发出的平行光,经半反半透镜反射后,又经被测光学元件到达基准反

射镜。由于被测元件与其理论位置存在角度偏差,所以光线经基准反射镜后不会原路返回,其在第2次经过被测元件时角度偏差会再次被放大,之后经半反半透镜在 CCD 靶面上成像。CCD 靶面以平行光首次经半反半透镜后的反射光线的反向延长线作为中心,成像中心与 CCD 靶面中心的偏差为 ΔH 。 ΔH 与被测元件的角度偏差 θ 的关系如式(1)所示:

$$\Delta H = L \cdot \tan(\theta) + L' \cdot \tan(2^2\theta) - l, \quad (1)$$

式中, L 为平行光经半反半透镜后再经基准反射镜后到达被测元件间的距离值, L' 为平行光第2次经被测元件到 CCD 靶面间的距离值(不含半反半透镜的平移差), l 为反射后平行光经半反半透镜的平移差。

工程上,在角度值很微小时,有 $\theta \approx \tan(\theta)$,于是可得被测元件的角度偏差如式(2)所示:

$$\theta \approx \frac{\Delta H + l}{L + 2^2 L'}. \quad (2)$$

3 装置结构设计

3.1 可切换基准镜机构设计

由于基准镜尺寸相对较大,且发射系统使用过程中需采用基准镜进行发射系统光路复检。所以基准镜及切换机构在设计时应力求结构简单且采用低密度轻质材料,以确保基准稳定性。机构组成如图3所示。

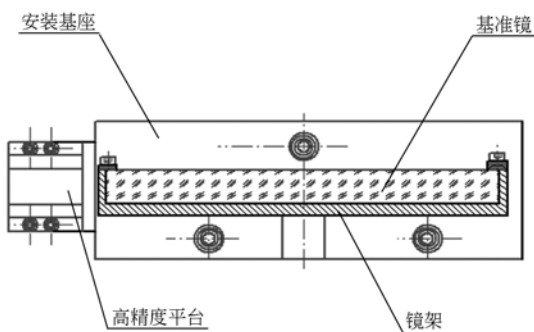


图3 可切换基准镜机构

Fig.3 Structure of switchable reference mirror

通常情况下,在设计和制作高功率激光反射镜时,应主要考虑以下几点:材料的综合热性能比值;材料的加工工艺以及材料的微观结构、缺陷及

晶向等因素^[6]。在常用的激光反射镜材料中,K9玻璃和石英玻璃的线膨胀系数与热传导率的比值就比硅、钼和铜等材料的大得多。

如表1所示,S代表材料的综合热性能,即材料的线膨胀系数(α)与热传导率(λ)的比值^[7]。

表1 K9玻璃及石英激光反射镜的材料综合热性能

Tab.1 Heat performance of K9 glass and quartz laser reflectors

热性能	材料	
	K9 玻璃	石英
$\alpha/10^{-6}$	6.6	0.49
$\lambda/W \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.002 9	0.002 4
S	2 275.9	204.17

虽然在吸收相同热量的条件下,采用 K9 玻璃和石英玻璃作为反射镜材料,其表面热形变将比用硅、钼和铜等材料时大得多。但当反射镜只承受单脉冲或低重复频率短时间作用,且单脉冲功率远低于反射膜损伤阈值时,采用 K9 玻璃或石英玻璃即可,因为二者的比重比金属材质的低得多。相比之下,石英的综合热性能又远优于 K9 玻璃。又由于在石英玻璃表面镀上高反膜后,反射率可达 99% 以上,低吸收率下热变形影响可忽略不计,且其加工性能较好,可获得较大的径厚比,因此,这里采用石英玻璃作为反射镜材料。

可切换基准镜机构的构件采用优质铝合金,并在设计时降低结构重心,使其固定于跟瞄发射系统底部基座入光口处。基准镜及支撑结构安装于直线度小于 $2.5 \mu\text{m}/20 \text{mm}$,重复定位精度小于 $1 \mu\text{m}$ 的精密线性单向平移台上。安装扩束系统前,可切换基准镜机构,利用 $0.2''$ 平行光管及大口径平行光管与跟瞄发射系统光路进行准直。当强激光发射系统工作时,通过精密线性单向平移台将基准镜移动至激光通路外。在发射系统使用寿命内使用可切换基准镜机构配合动态监测组件完成装置的精度复检。

3.2 动态监测组件的设计

动态监测组件主要由切换镜组、发射镜组、会聚物镜及 CCD 组成。动态监测组件底座安装平台同样采用比重小,刚度高的优质铝合金材料。

切换镜组安装于精密线性单向平移台上,平台直线度优于 $2 \mu\text{m}/20 \text{mm}$,重复定位精度小于 $1 \mu\text{m}$ 。激光光束经切换镜组后,由会聚物镜聚焦于高分辨率 CCD 靶面上。

为提高测量装置的保持精度,结构设计时,扩束系统外框架及过渡基座采用轻质高刚度的铝合金材料,将可切换基准镜机构及动态监测组件组分别置于扩束系统的输出端及输入端,采取 3 点小面积接触并用高强度螺栓连接,非接触部分合理布置加强筋,减重的同时提高结构稳定性。以上几点设计确保平行度测量装置准直调整后具有高的保持精度。

为提供实时、精确的平行度测量。将分体式离轴扩束系统置于跟瞄发射系统与激光器之间,利用本文介绍的平行度测量装置将激光器、扩束系统及跟瞄发射系统串联起来,一次性完成分体式扩束系统的对接并提供实时精确的角度偏差值。

激光器出射激光经快速控制反射镜后,首先经过切换镜组上层的半反半透镜,反射光经扩束系统由可切换基准镜准直回扩束系统,经半反半透镜后由一组反射镜反射,并将会聚物镜后成像于 CCD 焦平面上。根据 CCD 测量值可进行扩束系统整体的角度偏差调整。当 CCD 上脱靶量值为 0 时,即完成了角度偏差的调整。此时发射系统的发射光路基准已转移到平行度测量装置上。

发射系统工作时,将可切换基准镜切出,控制位移平台使切换镜组下层镜组进入工作状态,激光经快速控制反射镜后到达替代切换镜组上层的半反半透镜位置的高反微透镜,透射光经反射镜组射入会聚物镜会聚于 CCD 焦平面上,利用高反微透镜的低能量透射光对工作中的激光光束方向进行实时监测,为快速控制反射镜提供数据,而快速控制反射镜将 CCD 上的脱靶量调整至 0,从而确保扩束系统出射光与理论光轴平行。

为防止会聚于 CCD 焦平面上的激光能量过强,在会聚镜头前加装了衰减片镜组,通过标定调试时单脉冲或低重复频率激光通过半反半透镜后的能量确定衰减片总厚度,并在总厚度一定的情况下尽量增加衰减片的数量,增加空气间隔,确保衰减片镜组使用寿命。通过以上设计可确定高反微透镜的透过率。

4 试验及结果

4.1 实验系统组成

如图 4 所示,实验系统组主要由高精度快速控制反射镜、0.2"平行光管、红外激光器、扩束系统、平行度测量装置、PC 主机、液晶显示器、键盘等组成。首先,用经纬仪标校 2 台 0.2"平行光管,即平行光管 I、平行光管 II,使平行光管与切换基准镜在试验平台上平面内成 90° ,在待测扩束系统一侧加装 2 块准直镜,分别与 2 台 0.2"平行光管准直,由此可测得测量系统的测量精度。之后,由 PC 主机控制快速控制反射镜以提供小角度变化,激光经快速控制反射镜产生具有微小角度偏差的光束,光束经基准反射镜准直后进入动态监测组件,分束的一部分进入平行光管 III,由此可得测量系统监测快速控制反射镜的监测精度。

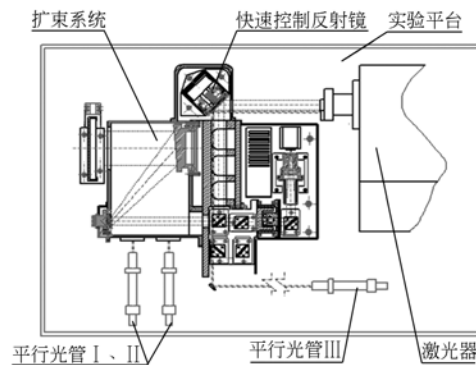


图 4 实验示意图

Fig. 4 Scheme of experiment

4.2 实验结果

将各台 0.2"平行光管分别置于如图 4 所示的位置,其中平行光管 III 前放置分束镜以防止能量损伤光管,快速控制反射镜可提供优于 $1''$ 的角度变化精度。观察 0.2"平行光管的角度变化及 CCD 输出脱靶量的变化可得平行度测量装置的测角精度。在光斑位移均匀变化情况下,装置的角度分辨率 δ 为 $\delta = 2\omega/a$, 式中 2ω 为光学系统视场角; a 为全视场内垂直或水平方向上脱靶量总数,则 δ 即为垂直或水平方向视场角与相应方向

上的脱靶量总数的比值。从而可通过标定脱靶量变化值得出脱靶量变化量代表的角度值。并经图像处理进行细分、线性化等。

实验时需考虑成像系统硬件参数对焦平面上光斑成像质量的影响^[8-10]。PC主机上采集卡在采集图像时的亮度和对比度等参数的设置非常重要,合适的亮度及对比度设置会减小CCD自身自动增益的影响;CCD积分时间会限制装置的有效工作视场,积分时间过短会使图像变得模糊,从而使脱靶量值失真,而CCD积分时间过长会使光斑形状对会聚后小角度变化过于敏感。

微调实验扩束系统,使其出射光与切换基准镜成小角度偏差,实验过程中扩束系统与实验平台上平面平行度不变。之后根据平行光管Ⅰ、平行光管Ⅱ测量值使扩束系统复位。通过多次实验,验证测量系统的重复精度。

表2 实验结果1(10℃)

Tab.2 Measurement results for experiment (1)(10℃)

次数	平行光管Ⅰ 测量值/(")	平行光管Ⅱ 测量值/(")	平行度测量装 置测量值/(")
1	0	0	0
2	0	0.2	0
3	0.2	-0.2	-0.5
4	0	0	-0.5
5	0.2	0.2	0.5

如表2所示,实验结果1显示测量装置的重复定位精度小于1"。

完成上述实验后,将快速控制反射镜置于工作状态下的原点位置,借助监测装置完成扩束系统的调整,此时平行光管Ⅰ、平行光管Ⅱ、平行度测量装置的测量值均为0"。之后通过实验模拟系统工作状态,验证装置的测量精度。即驱动快速控制反射镜进行小角度摆动,模拟工作状态时受环境干扰产生的小角度偏差或模拟为修复发射系统光轴与测量系统视轴的不平行度而人为加入的小角度偏差。实验中基准反射镜不切出。此时,动态监测组件与基准反射镜准直,快速控制反射镜输出的角度偏差 θ_1 经扩束系统后由基准反射镜反射后由平行度测量装置测得角度偏差为 θ_2 ,而 θ_1 经高反微透镜后的透射光被平行光管Ⅲ

接收到的测量值为 θ_3 。由于 θ_2 为 θ_1 经基准反射镜反射并2次经过扩束系统,所以 θ_1 与 θ_2 绝对值相同而符号相反。而 θ_1 与 θ_3 相等。即:

$$\theta_1 = \theta_3 = -\theta_2. \quad (3)$$

驱动快速控制反射镜,使之在原点周围做往复运动。监视平行光管Ⅲ及测量装置测量值,将测量装置测量值与监视平行光管Ⅲ测量值进行对比,可验证测量装置的测量精度。如表3、表4、表5所示,为验证在不同环境温度下的结果。

表3 实验结果2(10℃)

Tab.3 Measurement results for experiment (2)(10℃)

次数	快速控制反射镜角 度变化标称值/(")	平行光管Ⅲ 测量值/(")	平行度测量装 置测量值/(")
1	0	0	0
2	2	2.2	-2.5
3	0	0.4	-0.5
4	-6	-5.6	6.5
5	0	0.2	-0.5

式(4)、(5)为光束经扩束系统及返回扩束系统后的坐标变换矩阵^[11]。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(k-1)\theta & -\sin(k-1)\theta \\ \sin(k-1)\theta & \cos(k-1)\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \cos(1-1/k)\theta' & -\sin(1-1/k)\theta' \\ \sin(1-1/k)\theta' & \cos(1-1/k)\theta' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(4)为激光光束经扩束系统到达切换基准镜的坐标变换矩阵,式(5)为激光光束经切换基准镜返回经扩束系统后的坐标变换矩阵,由2式可见,光束经过扩束倍率为 k 的扩束系统时光束偏转角度会缩小 $(1-1/k)$ 倍或放大 $(k-1)$ 倍。考虑到光束经切换基准镜反射前后的角度的符号关系,测量装置接收到的角度变化值与快速控制反射镜输出角度变化值绝对值相同,而符号相反。发射系统工作时,测量装置输出值经控制系统处理后可作为快速控制反射镜的反馈值,为控制光束输出的调整提供依据。

由表3可知,测量装置的测量精度小于2"。

实验分别在-20、10、35℃等数个不同温度下进行,由于装置基座及外框架均采用同质材料,使装置在不同温度下产生微小角度变化时表现出良好的精度稳定性,如表4、表5所示实验表明装置具有较好的环境适应性。实验数据均显示平行度测量装置的测量精度优于2"。

表 4 实验结果 3(-20 °C)

Tab. 4 Measurement results for experiment (3)(-20 °C)

次数	快速控制反射镜角度变化标称值/(")	平行光管Ⅲ测量值/(")	平行度测量装置测量值/(")
1	0	0	0
2	4	4.4	-4.5
3	0	0.6	-0.2
4	-2	-2.6	2.5
5	0	0.4	-0.5

表 5 实验结果 4(35 °C)

Tab. 5 Measurement results for experiment (4)(35 °C)

次数	快速控制反射镜角度变化标称值/(")	平行光管Ⅲ测量值/(")	平行度测量装置测量值/(")
1	0	0	0
2	2	2.4	-2.6
3	0	-0.4	0.6
4	-2	-2.2	2.5
5	0	0.4	-0.2

参考文献:

- [1] BILLMAN K W, BREAKWELL J A, DUTTA K, *et al.*. ABL beam control laboratory demonstrator [J]. *SPIE*, 1999, 3706: 172-179.
- [2] HIGGS C. Overview of the ABL-firepond active-tracking and compensation facility [J]. *SPIE*, 1998, 3381: 14-18.
- [3] BILLMAN K W, HORWITZ B A. Airborne laser system common path/common mode design approach [J]. *SPIE*, 1999, 3706: 196-203.
- [4] 史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 726-732.
- SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)
- [5] 史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 高能激光发射系统光束监测与装调的新方法 [J]. *光电工程*, 2008, 35(2): 29-33.
- SHI Y L, GAO Y G, DENG W J. Novel method of beam monitoring and alignment for high-energy laser launching system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(2): 29-33. (in Chinese)
- [6] 吴冬良, 戴一帆, 王贵林, 等. 光学面形误差对环围

5 结 论

对应用于红外波段的激光发射系统中的分体式扩束系统, 在无光学闭环的情况下, 激光光束的方向监测十分重要。本文根据分体式扩束系统的装调及使用要求, 设计了一套基于高分辨率 CCD 及精密线性位移平台的平行度测量装置, 可以较好地实现小角度变化的静态和动态测量。装置结构大量采用同质高刚度材料, 较好地克服了温度变形对角度测量的影响。装置测量精度优于 2", 具有非接触、高精度、高灵敏度及优良的环境适应性等特点, 基本满足分体式扩束系统装调及使用要求。

能量比的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 15(9): 1328-1335.

- WU D L, DAI Y F, WANG G L, *et al.*. Influence of optical surface error on encircled energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 15(9): 1328-1335. (in Chinese)
- [7] PAUL R, YODER, J. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- PAUL R, YODER, J. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 668-673.
- AO L, TAN J B, CUI J W, *et al.*. Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 668-673. (in Chinese)
- [9] 任淑艳, 张琢, 刘国栋, 等. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 331-336.
- REN SH Y, ZHANG ZH, LIU G D, *et al.*. Rest raining speckle of laser imaging system in accurate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 331-336. (in Chinese)
- [10] 邵帅, 高云国, 郭劲, 等. 二维快速控制水冷反射镜

装置设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 493-498.

SHAO SH, GAO Y G, GUO J, *et al.*. Design of two dimensional fast-steering cooling mirror equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 493-498. (in Chinese)

[11] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学

精密机械与物理研究所青年职工培训班教材, 2008.

WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Young Employee of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2008. (in chinese)

作者简介:



张磊(1982—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2004年于武汉大学获得工学学士学位,主要从事光机结构及高能激光监测技术的研究。E-mail: zhangleiciomp@163.com

导师简介:



郭劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1986年于吉林工学院获得工学学士学位,1989年、2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光电对抗技术研究和装备研制。E-mail: zhaobingdragon@163.com

● 下期预告

可调对比度目标源装置中对比度的标定

王素华^{1,2,3}, 沈湘衡¹, 叶露¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 长春职业技术学院, 吉林 长春 130033)

为了标定光电设备低对比度目标捕获能力检验装置中的对比度, 得出图像对比度和光学对比度的关系, 提出了用改进的 BP 神经网络标定对比度的方法。首先, 设计了用于对比度标定的 BP 神经网络模型。然后, 利用 LM(Levenberg-Marquardt) 算法结合缩放法(Shrinking-Magnifying Approach)对神经网络进行改进, 提高了网络的收敛速度及泛化能力。最后, 通过可调对比度目标源装置实验平台, 由测量的辐照度得出了对应的图像对比度数据, 使该装置可以通过调节辐照度实时获得规定的对比度。对比度标定实验表明, 改进的 BP 神经网络可用于标定对比度。与传统 BP 神经网络方法相比, 改进后的网络收敛速度快, 泛化能力强。实验结果表明, 本文算法比经典 BP 算法精度提高了 100 倍, 比最速下降法提高 10 倍。训练次数 2 876 次时, 对比度的标定值与目标值的误差最大值是 0.01%, 训练均方误差收敛为 0.000 459 441, 测试误差收敛为 0.000 467 003。算法在训练速度和泛化能力方面都有很大提高, 是切实可行的算法, 满足了对检验装置中对比度标定的需要。