

塔式太阳能定日镜子镜面形精度 和聚光性能评价的新方法

许文斌, 卢振武

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 应用自行研制的基于法线测量原理的定日镜子镜面形检测系统 检测了用于 100 m^2 定日镜的 1.5625 m^2 的正方形子镜 并基于能流分布仿真分析方法对子镜面形精度和聚光性能进行了评价。这种评价方法是采用激光束偏转测角法获取被测子镜的法线数据 ,用计算机仿真方法 对入射阳光进行光线追击 ,可以分析出子镜在任意时空位置的聚光性能。经与实际聚光斑能流测量数据比对 检测分析数据与对实际日光跟踪聚光数据实测数据一致 ,可应用于子镜面形的在线调整。

关键词: 塔式太阳能; 子镜; 法线检测; 能流分布; 光线追迹

中图分类号: TH741.2 TP391.7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Surface precision test and optical performance evaluation of heliostats in solar tower power system

Xu Wenbin, Lu Zhenwu

(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the help of the self-developed optical testing system for mirror facets of heliostats ,which is based on the principle of normal measurement ,the square mirror facets (1.5625 m^2) of the heliostat (100 m^2) is measured. Using simulation analysis method for corresponding energy flux distribution at the focal spot of the mirror facets ,the surface precision and optical performance of the heliostats are comprehensively evaluated. The principle and outline of the evaluation method are as follows: firstly ,based on the measurement of laser deflectometry ,the normal directions of mirror facets can be obtained. Then the incident rays are traced with the computer programs. Thereafter the light-gathering properties of the mirror facets in any time and space can be analyzed. The energy distribution results obtained in the simulation experiments are identical with those got from the testing system ,which shows the effectiveness and feasibility of the testing system in the online adjustments of mirror facets of heliostats in solar tower power system.

Key words: solar tower power system; mirror facet; normal measurement; energy flux distribution; ray tracing.

1 引言

定日镜是跟踪太阳并将阳光反射会聚到固定位置的聚光装置^[1-8]。塔式电站的定日镜面形偏差使集热器上太阳光斑的位置相对于理想位置出现偏差 ,导致集热效率下降。定日镜面形偏差中镜法线偏差是影响集热效率

的最大因素^[9]。在本研究中抛弃了目前国外通用的镜面轮廓测量方法 ,采用了新的测量方法和定日镜面形精度评价方法:直接测量定日镜反射面法线的方向 ,根据法线方向通过仿真获得的被测镜面聚光光斑的能流分布情况来评价子镜面形。

2 定日镜面形评价原理

2.1 面形精度的数据获取

设计了一种新的光学检测方法,利用激光束偏转法原理检测子镜的法线方向,用于塔式太阳能定日镜检测,并研制了检测仪器^[10]。图1所示为仪器实物照片。该仪器可对镜面各位置的反射法线方向进行测量,法线测量精度优于0.1 mrad^[11]。根据塔式太阳能热发电的技术要求,定日镜面形法线的测量精度保证1 mrad就足够了。因此本仪器获取的原始测量数据是真实可靠的,能够为进一步评价被测定日镜子镜面形精度及聚光性能提供数据支持。

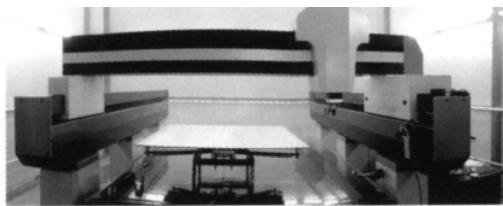


图1 定日镜面形检测专用仪器照片

Fig. 1 Photo of optical testing instrument
for mirror facets of heliostats

2.2 面形精度及聚光性能评价方法的设计

目前定日镜的面形精度检测报道,均给出定日镜面形几何数据或镜面倾角数据图表^[12-14]。根据这些数据分析定日镜聚光性能不够直观,而且分析数据过于繁杂和枯燥。为更加有效地评价定日镜面形精度和聚光性能,应针对行业需求,重新制定评价标准,因此从定日镜最终目的入手,借鉴传统光学设计评价方法中“点列图”的概念,结合已经研发仪器的测量数据,直接计算被测定日镜聚光光斑形状及能量分布。在新版本的定日镜检测专用测量软件中加入了“当前镜面聚光分析”功能。

3 定日镜面形测量数据处理

定日镜面形检测仪器所获取的数据是定日镜镜面测量点的坐标和该坐标位置的反射面法线方向,如表1所示,第1行为测量数据建立时间,第2行为数据长度,第3行为数据表头,第4行开始为按测量顺序写入的测量数据,数据点标号以零为起始,每一行依次是顺序号、坐标(X, Y, Z)、法线方向向量 N_0 的方向余弦 $(\cos x, \cos y, \cos z)$ 。

根据所提出的定日镜面形评价方法,需计算以真实太阳光为光源,并将定日镜放置于工作状态在吸热器腔口处的聚光光斑的“点列图”,即光斑的形状及能量分布。因此需建立太阳光及定日镜和吸热器腔口的数学模

型,进行光线追击仿真。本文设计的软件系统包含了基于实际太阳光线入射状况、镜场参数、定日镜工作位置和姿态的太阳光线追溯模块,用于分析吸热器上光能分布,以直观地评价定日镜面形的优劣,并为镜场效率检测提供定量的依据。

表1 定日镜面形检测仪器测量数据记录

Table 1 Measurement results of the optical testing instrument

测量数据文件建立于: 2010-03-13 15:34:44						
共有记录: 91 条						
#	X	Y	Z	No: cos x	No: cos y	No: cos z
0	600.00	-600.41	0.00	-0.00590	0.00682	0.99996
1	600.00	-399.51	0.00	-0.00549	0.00955	0.99994
:	:	:	:	:	:	:
90	-599.99	600.02	0.00	-0.00094	0.00744	0.99997

首先按图2所示建立仿真分析的坐标系统,设定9个坐标系统参数,以确定被测定日镜在镜场中的工作位置和姿态。坐标以吸热塔为中心,吸热器口中心点 $P(0, 0, H)$,定日镜中心点 $M(X_m, Y_m, h)$,吸热器法线 N_t 在 YOZ 面上与 Z 轴夹角余弦为 C_t 、阳光入射方向向量 $I = (A_s, B_s, C_s)^T$,镜面平行于地面放置时位置绕镜面中心法线旋转 θ 角。在此坐标基础上进一步建立太阳光和定日镜聚光过程的数学模型。根据太阳光束入射主光线 I 、吸热器口中心点 $P(0, 0, H)$ 和定日镜中心点 $M(X_m, Y_m, h)$ 之间的位置关系及反射定律,进行相应的坐标旋转和平移,即可获取待测定日镜任意时刻的工作位置和姿态。

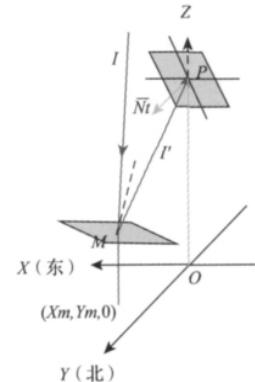


图2 仿真分析所用的坐标系统

Fig. 2 Space coordinate used in simulation analyses

3.1 太阳光的数学模型

模拟定日镜反射的太阳光斑,关心的是太阳光的入射角度和入射光线携带的能量,对太阳光谱并不关心,因此需建立的模型为太阳光的入射方位角和入射光束结构与能量分布。如图2所示 $I = (A_s, B_s, C_s)^T$ 表示太阳入射中心光线的单位向量,由太阳指向投射点。在天文学上太阳的位置可由太阳高度角和方位角确定。太阳高度角 α

定义为太阳入射光的中心光线与水平面的夹角。太阳方位角 A 定义为太阳入射的中心光线在地面的投影与 Y 轴所成的角，规定由 Y 轴正方向绕 Z 轴转向太阳中心光线在地平面投影逆时针测量为负，顺时针为正。

太阳高度角 α 的计算公式为：

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (1)$$

太阳方位角 A 的计算公式为（如果 $\sin \omega > 0$ ，则 $A = -A$ ）：

$$A = \arccos \left(\frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \cos \omega \sin \phi}{\cos \alpha} \right) \quad (2)$$

式中： ϕ 表示观察点所处的地理纬度角，赤道的纬度为 0° ，北极点的纬度为 90° ，南极点的纬度为 -90° ，其他地区的纬度角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。 δ 表示赤纬角，它定义为地球和太阳的中心连线与地球赤道面所成的角。地球绕太阳公转一周按 365 天计算，赤纬角的变化范围为 $-23.5^\circ \sim 23.5^\circ$ ，第 n 天（自 1 月 1 日起计算）的赤纬角计算公式为：

$$\delta = \frac{\pi}{180} 23.45 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{248 + n}{365} \right) \quad (3)$$

ω 表示太阳时角，用来描述地球绕地轴的自转情况，它定义为观察点所在子午面与太阳所在子午面的角距离，其计算公式为：

$$\omega = \frac{15\pi(t_s - 12)}{180} \quad (4)$$

式中： t_s 表示太阳时间，按 24 小时制计算。

根据太阳高度角 α 和太阳方位角 A 的定义及图 2 所示的坐标系统 $I = (As, Bs, Cs)^T$ 可由 α 和 A 表示为：

$$I = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \cdot \sin A \\ -\cos \alpha \cdot \cos A \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(1)~(5) 可计算任意位置、任意时刻的太阳主光线的方向，作为太阳光线建模的基础。太阳的形状从地球上看是一个圆斑，它半角展宽为 4.65 mrad 。太阳的辐射强度自中心向边缘递减，其模型^[7]如下：

$$I(r) = \begin{cases} I_0 \left[1 - 0.5138 \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases} \quad (6)$$

式中： I_0 表示中心光线辐射强度，其数值根据镜面接收的总能量及仿真光线数目来确定； r 表示太阳中心到边缘任意点的展角； R 表示最大太阳展角 ($R = 4.65 \text{ mrad}$)。因此镜面上每一点入射的太阳光束结构为一半顶角 4.65 mrad 的光锥，光束方向为 I ，能量分布为 $I(r)$ 。

为模拟太阳光线，进行镜面上反射阳光的光线追击，在式(1)~(6) 基础上设计了基于蒙特卡洛方法的太阳光锥结构仿真建模，构建如图 3 所示的太阳光锥模型。其中 I_0 为太阳光束主光线方向，光束中其余光线由其经过 2 次旋转产生。首先生成 $0 \sim 4.65 \text{ mrad}$ 间符合均匀分布

的随机数 ξ ， I_0 绕柱坐标系的 $O O'$ 轴旋转 ξ 生成向量 I' ， I' 再绕 I_0 旋转 $0 \sim 2\pi$ 之间符合均匀分布的随机角度 η ，生成向量 I'' ， I'' 即为太阳光束结构中的一条光线方向，再将 $r = \xi$ 代入到式(6) 即得到本条光线的模型。循环上述过程 n 次即可获得包含 $n+1$ 条光线的太阳光束模型。该方法建立的太阳光模型较等分光锥方法产生的太阳光模型的光束更加均匀、更加接近真实阳光。

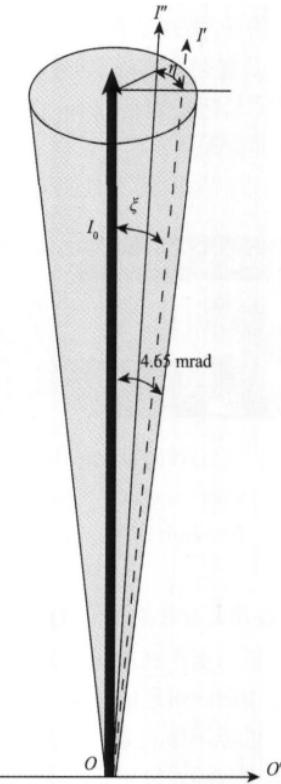


图 3 太阳光束结构的数学模型

Fig. 3 Mathematical model of optical focused solar beam

3.2 聚光过程数学模型

令定日镜工作位置和姿态的全部测量点坐标和相应法线的数据集合分别为 $\{M_i\}$ 和 $\{N_i\}$ ，其中 i 代表测量点序号，测量点数共 m 个。在所有点根据反射定律计算太阳入射主光线 I_{0i} 的反射主光线 I_{0i}' 方向向量，采用 3.1 节太阳光束建模方法，生成反射主光线 I_{0i}' 为中心的反射光锥结构，并结合反射点 M_i 建立反射光锥的方程集合 $\{f_{n+1}(x, y, z)\}$ ，解 $f(x, y, z)$ 和吸热器腔口平面方程所组成的方程组可获得定日镜反射的太阳光线在吸热器腔口的投射点坐标和强度，每个测量点的入射太阳光锥计算 $n+1$ 条光线，共计 m 个测量点，全部仿真过程共获得 $m(n+1)$ 个太阳光线在吸热器腔口的投射点坐标和强度值。在统计吸热器腔口能量分布时，把吸热器开口平面均匀分成若干的小网格单元，统计落入每个网格单元的光线及其能量，输出光能分布统计图表如图 4 所示，每

个统计图分左右2个部分:左侧是能量分布统计图,色调由暖到冷反映了能量多少,红色方框从中心边长2 m,向外以2 m递增;右侧是光能范围统计图,计算时仅考虑了中心光线,红色“*”是实际被测镜面反射光线在吸热口上投射点的范围,蓝色点是理想镜面光线的范围,评价时仅考虑弥散程度,红色“*”的数量在蓝色范围内越多、距离蓝色区域越近表示镜面面形越好。统计图下方附有关键数据统计。

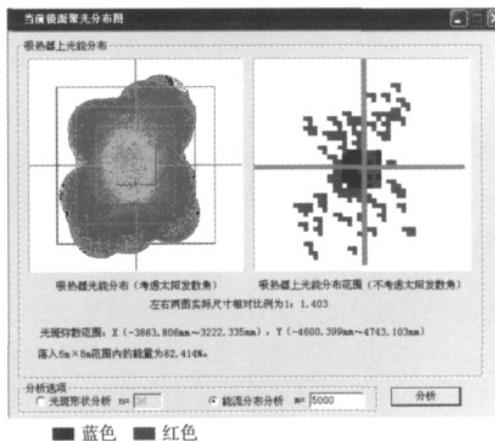


图4 输出光能分布统计图表

Fig. 4 Statistical diagram for the output light energy distribution

上述计算过程只计算了 m 次镜面反射过程,每次反射过程中全部太阳光线除主光线外全部通过主光线的坐标变换得出,在保证仿真真实性同时,大大缩减了计算量。在仪器所配备的2.4 GHz主频的计算机上计算60.5万条光线仅需0.35 s。

4 定日镜面形测量

4.1 标准平面镜检测

为检验测量仪器及测量软件的正确性及测量精度,用仪器测量了一块250 mm × 250 mm的标准平面镜,平面镜面形偏差小于 0.1λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。仪器自动测量了镜面上呈矩阵分布的289点,由于数据量过大,这里仅给出统计结果,测量镜面法线方向余弦的标准偏差仅为 9.86×10^{-8} ,还原成法线角度数据,其测量数据最大误差0.035 mrad,与平面镜所有法线方向余弦应相等的这一常识是一致的。通过测量软件分析其吸热器口处的聚光光斑图形如图5所示,光斑直径3.9 m,能量分布呈对称的条带状,与干涉法检测平面镜时的干涉图类似,经进一步分析发现能量分布的峰、谷位置分别对应平面镜面形微量起伏的谷(聚光作用)和峰(光发散作用),证实了本仪器及面形评价方法是成功的。

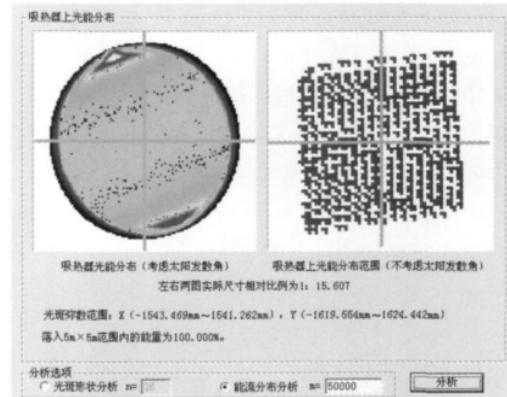


图5 标准平面镜检测图表

Fig. 5 Testing results for standard planar mirror facet

4.2 定日镜面形检测

采用仪器测量了边长1.25 m的正方形子镜,该定日镜整体照片如图6所示。

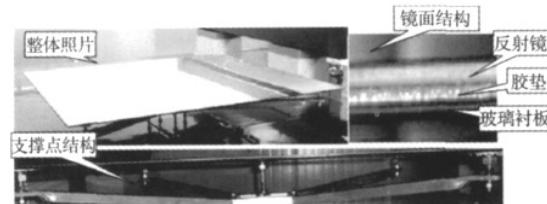


图6 正方形子镜

Fig. 6 The square mirror facet

在镜面上自动测量了961点,并进行聚光性能仿真分析,采取试验地点北纬40.5°,时间3月14日上午11:30,吸热器中心高度10 m,定日镜位置在吸热器正北100 m,中心高度1.5 m作为仿真参数,输出光斑能量分布图如图7所示。由分析图表可知镜面聚光情况符合使用要求,全部光能的95%以上集中于中心5 m × 5 m区域,并且镜面中心为凹点,四角为高点,其余部分在重力作用下自然弯。

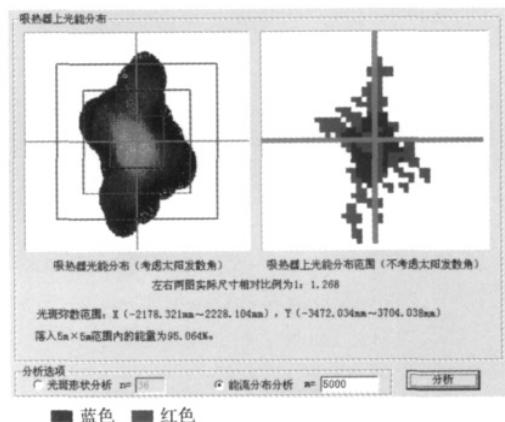


图7 被测子镜聚光光斑仿真图

Fig. 7 Simulation results of the speckle for the under-test mirror facet

室内检测试验时间为3月13日10:00前后,为验证实验结论,将该定日镜置于室外与仿真分析所设定的相同的工作位置和时刻,以相机拍摄吸热器口处的光斑接收屏图像如图8所示。屏上方框区域为5 m×5 m,对比仿真图与光斑照片,二者光斑范围和形态较为接近。

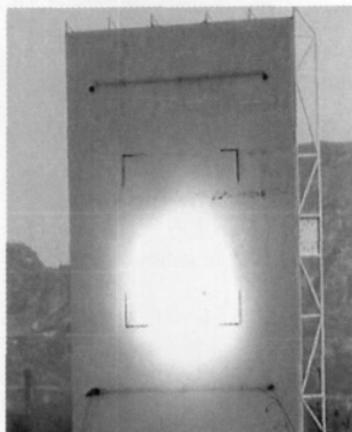


图8 被测子镜聚光光斑照片

Fig.8 Speckle image of the under-test mirror facet

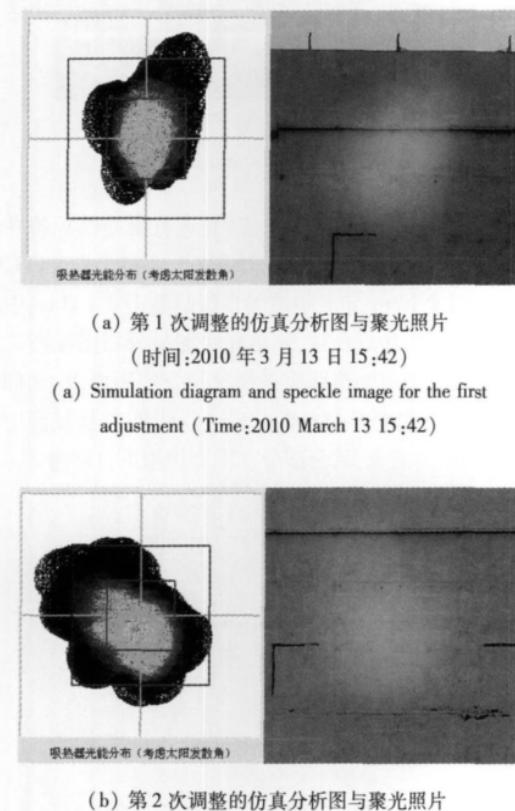


图9 测量分析图表和实地聚光实验照片

Fig.9 The testing diagram and corresponding experimental speckle image

还进行了另一组实验,将定日镜置于检测台上调整5个支点高度,调整前后分别测量和分析,并按相应分析数据进行实地户外聚光实验,测量分析图表和实地聚光实验照片如图9所示。从图中可见仿真分析能够反映真实聚光性能和调整前后聚光光斑的变化情况。目前“1 MWe塔式太阳能热发电示范电站”项目的定日镜子镜装调已经普遍采用了该方法进行抽检。

5 结 论

本文设计了符合行业特点的定日镜面形评价方法,该方法直接计算被测定日镜聚光光斑形状及能量分布。

建立了定日镜聚光仿真分析数学模型,其中关于阳光光束结构模型的数学模型的建模方法更新、更接近真实光线。

在定日镜检测专用软件中实现了上述定日镜面形评价功能,并结合定日镜子镜检测得到了实验数据支持,该方法已经成功应用于国家863重点项目“1 MWe塔式太阳能热发电示范电站”的实施。

该数据分析方法与目前国内已经报道地方法比较,更加直接有效,提高了定日镜检测数据分析的效率。

参考文献

- [1] IGEL E A ,HUGHES R L. Optical analysis of solar facility heliostats [J]. Solar Energy ,1979 ,22: 283-295.
- [2] CHEN Y T ,CHONG K K ,LIM C S ,et al. Report of the first prototype of non-imaging focusing heliostat and its application in high temperature solar furnace [J]. Solar Energy 2002 ,72: 531-544.
- [3] JOHNSTON G ,LOVEGROVE K ,LUZZI A. Optical performance of spherical reflecting elements for use with paraboloidal dish concentrators [J]. Solar Energy ,2003 ,74 (6) : 133-140.
- [4] KRIBUS A ,RIES H. LiMoNAED: A limited motion, non-shading asymmetric ecliptic-tracking dish [J]. Solar Energy 2002 ,73 (5) : 337-344.
- [5] MARTIN K ,WOLFGANG S ,ANDREAS W. Renewable energy: Technology and environmental economics [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg 2007.
- [6] SEGAL A ,EPSTEIN M. The optics of the solar tower reflector [J]. Solar Energy 2000 ,69(4) .229-241.
- [7] SEGAL A ,EPSTEIN M. Comparative performances of ‘tower top’-and ‘tower reflector’-central solar receivers [J]. Solar Energy ,1998 ,65(4) : 207-226.
- [8] SEGAL A ,EPSTEIN M ,YOGEV A. Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands [J]. Solar Energy 2004 ,76(3) : 591-601.

- [9] XU W B ,LU ZH W ,LU H ,et al. Shape and alignment measurement of the heliostat by laser deflectometry. [C]. SPIE ,San Diego ,USA 2008.
- [10] 许文斌 ,卢振武 ,张红鑫 ,等 . 塔式太阳能热发电站定日镜面形检测专用仪器的研制 [J]. 仪器仪表学报 ,2009 ,30(7):1390-1394.
XU W B ,LU ZH W ,ZHANG H X ,et al. Development of the heliostat shape measuring apparatus of solar tower thermal power plant [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2009 ,30(7):1390-1394.
- [11] 许文斌 ,卢振武 张红鑫 定日镜面形精度检测中的三坐标扫描系统的精度分析 [J]. 光学技术 2009 ,9(5):751-758.
XU W B ,LU ZH W ,ZHANG H X ,Accuracy analysis of coordinate measuring machine for the surface shape measurement of heliostats [J]. Optical Technique ,2009 ,35 (5):751-758.
- [12] 乐静 杨洁. 基于多层序列图像的三维表面粗糙度检测 [J]. 仪器仪表学报 2010 ,31(9):2036-2041.
Le J ,Yang J ,et al. Three-dimensional surface roughness measurement based on sequence multi-images [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2010 ,31 (9):2036-2041.
- [13] 郑大腾 ,费业泰. 柔性坐标测量机建模的泛函网络研究 [J]. 电子测量与仪器学报 2009 ,23(4):33-37.
ZHENG D T ,FEI Y T . Research on functional networks of flexible coordinate measuring machine modeling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument ,2009 ,23 (4):33-37.
- [14] 徐胜 ,彭启琮. 一种基于支持向量机的三维物体识别方法 [J]. 电子测量与仪器学报 2009 ,23(4):43-48.
XU SH ,PENG Q C . A method for 3-d object recognition based on support vector machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2009 ,23(4):43-48.
- [15] WALZEL M D ,LIPPS F W ,VANT-HULL L L . A solar flux density calculation for a solar tower concentrator using a two-dimensional Hermite function expansion [J]. Solar Energy ,1977(19):239-353.

作者简介



许文斌 ,光学博士 ,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员 ,主要研究方向为光电检测技术、光电成像及探测技术。
E-mail: xu_wen_bin@ciomp.ac.cn

Xu Wenbin is a Ph. D. in optics and is presently a research assistant in Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,CAS. His research direction is mainly focusing on photo-electronic measuring technology ,optoelectronic imaging and detection technology.

卢振武 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员、博士生导师 ,主要研究方向衍射光学、非成像光学和光学检测等。

E-mail: luzhenwu55@yahoo.com.cn

Lu Zhenwu is a research fellow and supervisor for Ph. D. students in Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics. His research interests are diffractive optics ,non-imaging optics and optical testing.