

文章编号 1004-924X(2011)01-0161-07

# 平面几何测量中的图像畸变校正

苏成志,王恩国,郝江涛,曹国华,徐洪吉  
(长春理工大学 机电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:**针对图像畸变对平面图像几何线度精密测量精度的影响,提出一种直接利用标准网格板作为测量基准的畸变校正方法。根据待测物体与网格板处于相同物面时,其图像畸变与网格板图像畸变相同,待测点在网格板图像中相对网格的几何位置不变这一性质,提出直接使用发生畸变的网格板图像作为校正基准来代替通过建模将外部标准转换为摄像机内部基准的畸变校正思路。首先,确定待测点在网格板畸变图像中的初始位置;然后,根据平行线分线段成比例定理确定待测点在网格板畸变图像网格内的精确位置,对两者求和完成待测物体上任意两点的实际几何线度测量。实验证明,当校正网格板间距为 1 mm,精度为 0.2  $\mu\text{m}$  时,使用提出方法得到的畸变误差是现有校正方法的 20%,校正精度可达 4  $\mu\text{m}$ 。该方法省去了建模过程,其校正精度仅与网格板精度有关,具有更高的精度和适应性。

**关键词:**平面图像测量;图像畸变;校正基准;建模校正

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0161

## Distortion correction for images in planar metrology

SU Cheng-zhi, WANG En-guo, HAO Jiang-tao, CAO Guo-hua, XU Hong-ji

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In consideration of the effect of the distortion error of an image on the accuracy of planar geometrical measurement in the precise visual metrology, a method to correct the image distortion by using standard grid board directly as measurement calibration is proposed. As the position of an under-tested point is unchanged relative to that of grid board when an under-tested object and a grid board lay on the same object plane, the grid board is directly used as the correcting calibration of image distortion instead of the way that converts the external standard into the intrinsic parameter of a camera by modeling. Firstly, the primary position of the under-tested point in the image of grid board is determined; then, its fine distance is decided according to the proportion theorem of line segment divided by parallel line. Finally, planar geometrical measurement is fulfilled by calculating the sum of both distances. Experimental results show that the distortion error by the proposed method has reduced to 20% that of the traditional method and the correctoin accuracy of image has reached 4  $\mu\text{m}$  or higher, while the distance of intersection point of the calibrated grid board is 1 mm and its accuracy is 0.2  $\mu\text{m}$ . The method is more applicable and has high accuracy, for it omits the modeling and its accuracy only

收稿日期:2009-11-26;修订日期:2010-03-29.

基金项目:吉林省科技发展计划基金资助项目(No. 20070304)

depends on the calibrated grid board.

**Key words:** planar visual metrology; image distortion; correcting calibration; correction by modeling

## 1 引言

平面图像测量是一种非接触的测量方法,能直接获得被测物体的几何线度信息,具有简单、直观的优点,但成像系统在制造或安装时存在的误差,实际工艺水平限制导致的探测器本身排列不规则等都会造成图像畸变。图像畸变直接影响成像的几何位置精度,而且它随着被测物体的对应像点到光轴距离的不同而变化,导致被测物体的不同部位对应的像点畸变不同,使被测物体的几何线度测量出现较大的计算基准误差,极大影响了被测物体的几何线度测量精度。

为了提高平面图像测量的精度,必须对图像畸变进行校正。但利用光学方法校正畸变需要复杂的光学系统,不但使设计难度加大,而且给制造工艺也带来一定的难度,增加了光学系统的制造成本。因此,国内外不少学者提出了利用数字图像技术校正平面图像畸变的方法。Smith<sup>[1]</sup>为了准确测量医用内窥镜图像上溃疡的面积,提出了利用一个点阵图案的校正样板,根据样板上黑点的中心在畸变图像上的位置,拟合出畸变图像与理想图像间的函数关系,完成图像像素的几何位置校正。Hideaki<sup>[2]</sup>采用栅格状的校正样板,通过考察栅格节点位置的变化,确定畸变图像与理想图像间的关系,并据此实现图像的畸变校正。刘航<sup>[3]</sup>提出了点阵样板校正方法,该方法假设光学系统畸变是以光轴为对称的,将二维的变换问题简化为一维问题来处理,采用多项式参数求解的方式确定畸变图像与理想图像间的函数关系,完成图像像素的几何位置校正。行麦玲<sup>[4]</sup>针对大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正问题,采用线性畸变模型,由最小二乘法解线性方程组得到摄像系统畸变模型的畸变系数完成对畸变图像的校正。史泽林<sup>[5]</sup>提出了基于 BP 神经网络的畸变校正方法。牛建军<sup>[6]</sup>和凌伟<sup>[7]</sup>提出了根据像差理论建立模型进行畸变校正的方法。吴国栋<sup>[8]</sup>针对三反系统镜头,提出用最小二乘一元回归的方法对像面畸变进行了校正。梁冬泰<sup>[9]</sup>提出了一种基于分块的摄像机内外参数标定方法。Jiuxiang

Hu<sup>[10]</sup>提出了利用迭代算法校正图像,提高积云几何量测量精度的方法;兰海滨<sup>[11]</sup>提出采用双线性插值技术来校正大尺寸图像无缝拼接中出现的畸变。

从建模的角度可将上述方法可分为两种:一种先假设理想图像与畸变图像的关系模型,再通过插值、拟合、迭代等数学方法求解模型参数;另一种根据像差理论建立畸变参数模型,再利用理想图像数据求解模型参数。这两种方法都是通过建模将外部标准转换为摄像机内部基准,以内部基准完成图像的测量,其校正精度直接依赖于数学模型的精确程度,而不是直接取决于外部标准的精度。因为模型只是图像畸变情况的一种近似,增加了建模这一环节势必降低标准传递精度;另一方面,不同的摄像机图像畸变不同,数学模型也不同,对每种图像独立建模,又增加了项目的开销。因此,间接利用标定数据,通过建模进行畸变校正的方法在提高图像测量精度和适应性方面具有局限性。

基于上述原因,本文针对平面图像几何线度测量的特点,直接以外标准为基准进行图像测量,即利用网格板作为校正基准来实现图像畸变校正。该方法省去了建模过程,精度仅取决于网格板,具有更高的校正精度;同时该方法与图像畸变无关,可适应不同畸变图像,缩短了开发周期,克服了现有方法的不足。

## 2 畸变校正原理

畸变校正系统如图 1 所示,把经国家计量部门标定的网格板置于物面位置,照明条件与实测相同。

由图像采集系统获取网格板图像,光学系统无畸变时网格板图像如图 2 所示,设网格板任意两相邻十字中心之间的距离为  $d$ 。

由于摄像机光学系统存在畸变,如图 3 所示,导致网格板上任两点  $P_1, P_2$  的图像距离与图 2 中不同。不过由于待测物体与网格板处于相同物面,其图像畸变与网格板图像畸变相同。因此,待测点在网格板图像中相对网格的几何位置不变。

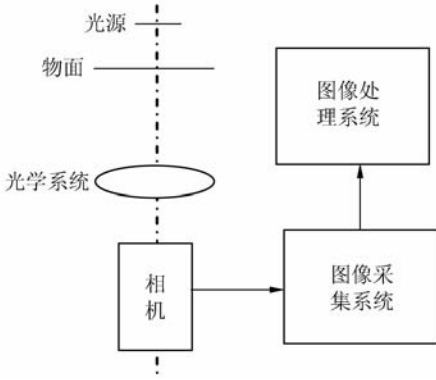


图 1 基于网格板的畸变校正系统示意图

Fig. 1 Schematics of distortion correction with grid board

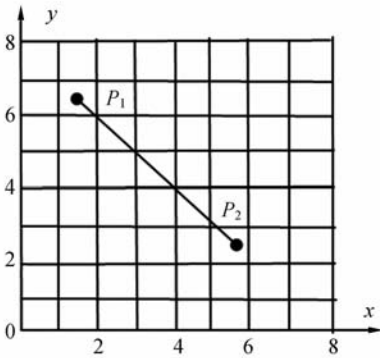


图 2 无畸变网格板图像

Fig. 2 Image of grid board without distortion

根据这一性质,直接使用发生畸变的网格板图像作为外定标,测量待测物体上任两点  $P_1, P_2$  的实际距离,具体过程分初测和精测两个步骤。

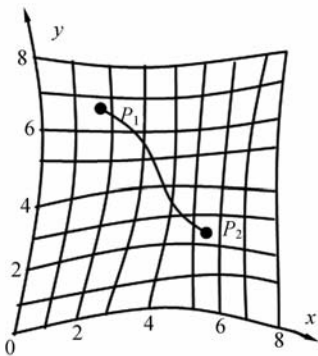


图 3 发生畸变的网格板图像

Fig. 3 Image of grid board with distortion

### 2.1 初测

假设标准网格板经光学系统成像后其畸变图

像如图 4 所示,存储该图像作为外定标。再假设实测时待测物体放到与网格板相同物面,经光学系统成像后其像与网格板像面相同,如图 4 所示,待测物体任两点对应的像点为  $A_1, A_2$  落在网格

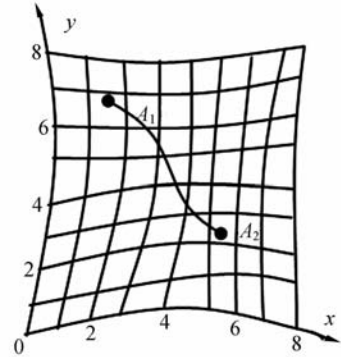


图 4 确定待测点在网格板中的初位置

Fig. 4 Determining primary positions of measured under-test points in grid board

板像面上。下面确定任意待测点  $A$  在网格板畸变图像的哪个小网格中。设网格板图像上的某个小网格为四边形  $BCDE$ 。点  $A$  与四边形  $BCDE$  的 4 个顶点  $B, C, D, E$  的连线形成 4 个三角形  $\triangle BCA, \triangle CDA, \triangle DEA, \triangle EBA$ 。经过逐格搜索,当三角形  $\triangle BCA, \triangle CDA, \triangle DEA, \triangle EBA$  面积之和大于四边形  $BCDE$  面积时,见图 5 所示,判定点  $A$  落在该网格外;当三角形  $\triangle BCA, \triangle CDA, \triangle DEA, \triangle EBA$  面积之和小于四边形  $BCDE$  面积时,如图 6 所示,判定点  $A$  落在该网格内。具体实例如图 4 所示,判定  $A_1$  在  $(2, 7)$  小

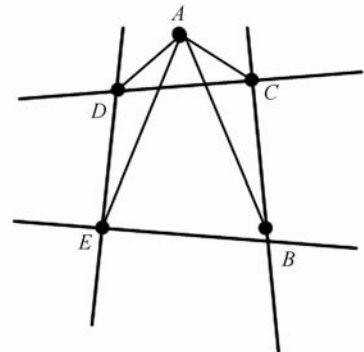


图 5 待测点位于网格外示意图

Fig. 5 Schematics of under-test measured points outside of grid

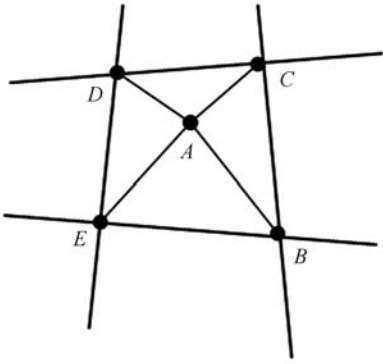


图 6 待测点位于网格内示意图

Fig. 6 Schematics of under-test measured points inside of grid

网格中,  $A_2$  在(6,3)小网格中,根据两点间距离公式,得到初距离为:

$$L' = \sqrt{(2d-6d)^2 + (7d-3d)^2} = 5.657d. \quad (1)$$

## 2.2 精测

确定待测点  $A$  在网格板畸变图像中的小网格内的精确位置。如图 7 所示,设经初测确定待测点  $A$  落在网格板畸变图像中某个网格即四边形  $BCDE$  中,其中  $O-xy$  坐标系为相机图像坐标系, $x$  轴为水平方向、 $y$  轴为垂直方向。以  $D$  点为原点建立小网格坐标系  $D-x'y'$ 。过待测点  $A$  做直线  $MN$ ,与直线  $DE$  交于  $M$ ,与直线  $BC$  交于  $N$ 。过待测点  $A$  做直线  $FG$ ,与直线  $BE$  交于  $F$ ,与直线  $DC$  交于  $G$ 。 $DG, DM$  即为点  $A$  在  $D-x'y'$  的坐标投影。设  $EM=m, DM=n$ ,则:

$$p = \frac{DM}{DE} = \frac{n}{n+m}, \quad (2)$$

其中: $p$  为线段分比系数。

过  $D$  平行于  $y$  轴的辅助直线与过  $E$  平行于  $x$  轴的辅助直线相交于  $J$  点,过  $M$  点分别做平行于  $x$  轴和  $y$  轴的辅助直线,分别与  $DJ$  和  $EJ$  交于  $H, I$  两点。在  $\triangle DEJ$  中,根据平行线分线段成比例定理, $M$  点在  $O-xy$  中的坐标为:

$$\begin{cases} x_M = (x_E - x_D)p + x_D \\ y_M = (y_E - y_D)p + y_D \end{cases}. \quad (3)$$

由于四边形  $BCDE$  一般都比较小,可近似认为四边形  $BCDE$  内的畸变误差为均匀分布,故在线段  $BC$  上取与  $M$  相同比例的比分点,则  $N$  点坐标为:

$$\begin{cases} x_N = (x_B - x_C)p + x_C \\ y_N = (y_B - y_C)p + y_C \end{cases}, \quad (4)$$

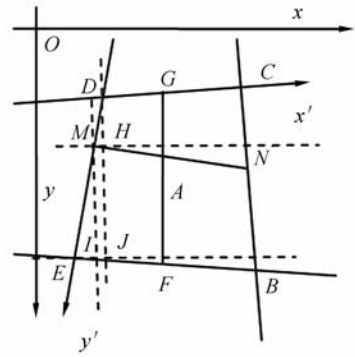


图 7 确定待测点在网格内精确位置

Fig. 7 Determining precise position of under-test measured point inside of grid

由于待测某点  $A$  位于直线  $MN$  上,则有:

$$\frac{x_A - x_M}{y_A - y_M} = \frac{x_A - x_N}{y_A - y_N}, \quad (5)$$

把公式(3)、(4)代入(5),得到:

$$p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} a &= (x_E - x_D)(y_B - y_C) - (x_B - x_C)(y_E - y_D) \\ b &= (x_E - x_D)(y_C - y_A) + (x_D - x_A)(y_B - y_C) + \\ &\quad (x_A - x_C)(y_E - y_D) + (x_B - x_C)(y_A - y_D) \\ c &= x_A y_D + x_C y_A + x_D y_C - x_A y_C - x_C y_D - x_D y_A \end{aligned}$$

联合公式(2)、(6)得到:

$$DM = dp$$

同理,设

$$q = \frac{DG}{DC}, \quad (7)$$

则可得:

$$DG = dq, \quad (8)$$

于是待测点  $A$  在网格板畸变图像中的小网格内的精确位置为

$$\begin{cases} x_A' = dq \\ y_A' = dp \end{cases}, \quad (9)$$

其中: $d$  是标准网格板任意两相邻十字中心之间的距离。

根据上述方法能够得到图 4 中待测物体任意两点  $A_1, A_2$  在网格板畸变图像中的小网格内的坐标值分别为:

$$\begin{cases} x_{A_1}' = dq_1 \\ y_{A_1}' = dp_1 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_{A_2}' = dq_2 \\ y_{A_2}' = dp_2 \end{cases}, \quad (11)$$

根据两点间距离公式,得到  $A_1, A_2$  两点与各自坐标原点距离的和为:

$$L'' = \sqrt{(dp_1)^2 + (dq_1)^2} + \sqrt{(dp_2)^2 + (dq_2)^2} = d(\sqrt{p_1^2 + q_1^2} + \sqrt{p_2^2 + q_2^2}). \quad (12)$$

联合公式(1)和(12)得到  $A_1, A_2$  两点的几何距离为:

$$L = L' + L'' = 5.657d + d(\sqrt{p_1^2 + q_1^2} + \sqrt{p_2^2 + q_2^2}). \quad (13)$$

从式(13)可知:只要标准网格板任意两相邻十字中心之间的距离  $d$  是已知的,再通过图像处理确定线段分比系数,就可以求得平面上任意两点间的距离。该两点间距离的畸变校正精度除了与标准网格板任意两相邻十字中心之间的距离  $d$  有关以外,还取决于图像中网格板十字交点坐标值判读精度。

### 3 实验结果

根据上述方法,首先采用已知标准网格板(相邻十字中心  $d=1\text{ mm}$ ,精度为  $0.2\ \mu\text{m}$ )获得图象畸变数据,并把该数据直接存入计算机用于对实测图像进行畸变校正。然后再采用另一块(任意相邻十字中心靶面尺寸  $d=1\text{ mm}$ ,精度为  $0.05\ \mu\text{m}$ )网格板用于本方法的实际校正精度检测,该检测网格板的实测图像如图 8 所示。

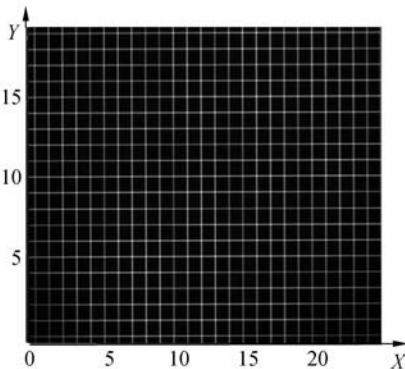


图 8 实测网格板图像

Fig. 8 Practical measurement image of grid board

以该网格板十字交点为实测点,通过图像识别得到该网格板畸变图像上任意十字交点的图像坐标值,根据上述初测方法确定每个十字交点位

于哪个标定网格中,利用公式(1)得到任意相邻被测十字交点的初距离,再根据公式(12)得到任意相邻被测十字交点的精距离,最后按照公式(13)计算相邻两点间距离  $a_i (i=1\cdots 912)$ 。表 1,表 2 为实测的部分数据,其中表 1 为被测图像沿  $x$  轴方向第 7 行 2~6 列和第 16 行 16~20 列的测量数据,经计算得到相邻十字交点距离  $a_i$ 。表 2 被测图像沿  $y$  轴方向第 8 列 2~6 行和第 18 列 5~9 行的测量数据,经计算得到相邻十字交点距离  $a_i$ 。

表 1 畸变图像  $x$  方向检测结果

Tab. 1 Results of distortion image along  $x$ -axis

校正前 相邻十字交点 距离 $a_i/\text{mm}$	标准 误差 $\sigma$	校正后 相邻十字交点 距离 $a_i/\text{mm}$	标准 误差 $\sigma$
1.002 4		1.002 4	
0.996 2		0.996 0	
1.001 0		1.003 0	
0.992 5		1.004 2	
1.004 5	0.015 9	0.996 0	0.003 4
0.989 6		1.002 4	
0.964 4		1.003 6	
1.027 0		0.994 7	
1.009 0		1.002 8	
1.000 1		1.000 1	

表 2 畸变图像  $y$  方向检测结果

Tab. 2 Results of distortion image along  $y$ -axis

校正前 相邻十字交点 距离 $a_i/\text{mm}$	标准 误差 $\sigma$	校正后 相邻十字交点 距离 $a_i/\text{mm}$	标准 误差 $\sigma$
0.993 1		0.993 1	
1.030 8		1.000 4	
0.99		1.001 9	
0.997 2		0.998 1	
1.010 6	0.012 6	1.002 9	0.003 0
0.992 7		0.992 7	
1.002 3		1.002 4	
0.995 3		0.999 2	
1.009 7		0.997 2	
0.990 6		1.001 2	

利用公式(14)分别计算校正前和校正后的距离标准误差。通过比较校正前和校正后的数据的标准偏差,可知:校正后的畸变误差是校正前的 20%,校正精度可达  $4\ \mu\text{m}$ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - d)^2}{n}} / \sqrt{n}. \quad (14)$$

## 4 结 论

本文提出了一种直接利用标准网格板作为测量基准的图像畸变校准方法。使用提出的方法对

平面图像几何线度进行了测试,结果表明,与现有畸变校正方法相比,本方法省去了建模过程,精度仅取决于基准网格板,具有更高的校正精度和适应性。当标定网格板间距为 1 mm,精度为 0.2  $\mu\text{m}$  时,校正精度可达 4  $\mu\text{m}$ 。如采用网格板在物面内多次移动成像,形成多基准融合的方法,可进一步提高畸变校正精度。

## 参考文献:

- [1] SMITH W, VAKIL N, MAISLIN S. Correction of distortion in endoscope images [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 1992, 11(1): 117-122.
- [2] HANEISHI H, YAGIHASHI Y, MIYAKE Y. A new method for distortion correction of electronic endoscope images[J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 1995, 14(3): 548-555.
- [3] 刘航, 郝道银, 杜吉, 等. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J]. *光学学报*, 1998, 18(8): 1108-1112.  
LIU H, YU D Y, DU J, *et al.*. Distortion correction of the wide-angle optical system with digital technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8): 1108-1112. (in Chinese)
- [4] 行麦玲, 刘贱平, 林家明, 等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J]. *光学技术*, 2003, 29(3): 377-379.  
XING M L, LIU J P, LIN J M, *et al.*. Distortion measurement of CCD camera with a large-field short focal length len[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 377-379. (in Chinese)
- [5] 史泽林, 康娇, 孙锐. 基于 BP 神经网络的大视场成像畸变校正方法[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(3): 348-353.  
SHI Z L, KANG J, SUN R. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imagin [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 348-353. (in Chinese)
- [6] 牛建军, 刘上乾, 姚荣辉. 高准确度光电成像测量系统图像畸变校正算法[J]. *光子学报*, 2006, 35(9): 1317-1320.  
NIU J J, LIU SH Q, YAO R H. Algorithm for image correction in high precision imaging measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1317-1320. (in Chinese)
- [7] 凌伟, 王志乾, 高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(2): 277-282.  
LING W, WANG Z Q, GAO F D. Real time digital correction for distortion in photoelectronical measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 277-282. (in Chinese)
- [8] 吴国栋. 离轴三反光学镜头像面畸变的标定方法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(11): 2127-2131.  
WU G D. Calibration of distortion for three-mirror off-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2127-2131. (in Chinese)
- [9] 梁冬泰, 王宣银. 基于分块的摄像机内外参数标定方法[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(3): 422-426.  
LIANG D T, WANG X Y. Partition-based camera intrinsic and extrinsic parameters calibration for planar visual metrology[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(3): 422-426. (in Chinese)
- [10] JIU X H, ANSHUMAN R. Geometric calibration of digital cameras for 3D cumulus cloud measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26: 200-214.
- [11] 兰海滨, 王平, 龙腾. 图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(5): 1197-1202.  
LAN H B, WANG P, LONG T. Nonlinear aberration correction of lens in image mosai[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1197-1202. (in Chinese)

## 作者简介:



苏成志(1977—),男,吉林桦甸人,博士研究生,教师,2004年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光机电一体化检测方面的研究。E-mail: chengzhi\_su@126.com

王恩国(1977—),男,吉林长春人,硕士研究生,教师,2009年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail:64951930@qq.com

郝江涛(1983—),男,河南郑州人,在读硕士研究生,主要从事光电在线检测方面的研究。E-mail:295410525@qq.com

曹国华(1965—),男,黑龙江佳木斯人,教授,博士生导师,主要从事光电在线检测、机电系统集成技术方面的研究。E-mail:caogh@cust.edu.cn

## 导师简介:



徐洪吉(1948—),男,吉林德惠人,教授,博士生导师,主要从事光电在线检测、光机电一体化检测方面的研究。E-mail: Xuhj@cust.edu.cn

## ● 下期预告

## 激光熔覆工艺参数对横向搭接熔覆层结合界面组织的影响

黄凤晓<sup>1,2</sup>,江中浩<sup>1</sup>,刘喜明<sup>3</sup>

- (1. 吉林大学汽车材料教育部重点实验室 材料科学与工程学院,吉林 长春 130025;  
2. 空军航空大学力学教研室,吉林 长春 130022;3. 长春工业大学材料学院,吉林 长春 130012)

为了提高搭接熔覆层的质量和对接结合界面的控制,研究了工艺参数对横向搭接结合区域组织形态的影响。结果表明,当扫描速度、送粉速率、激光功率分别在 100~250 mm/min、6~7.5 g/min、1 500~2 500 W 区间变化时,搭接结合区域没有出现白亮层,呈现出不同形态界面组织。一类表现为具有组织与方向“遗传性”的连续外延式生长,另一类表现为非连续外延生长。工艺参数对结合界面组织的影响与其对前一道熔覆层表面转向枝晶区域的重熔深度以及前一道表面晶粒取向、各晶粒的熔化程度和激光熔池内存在的对流作用影响有关。