

尖点突变理论在红外热波检测图像分割中的应用

王冬冬, 张 炜, 金国锋, 杨正伟, 田 干

(第二炮兵工程大学 602 教研室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 图像分割是实现热波检测缺陷定量识别的关键。根据有缺陷区域与无缺陷区域图像灰度值不连续变化的特点, 提出一种基于尖点突变理论的分割方法, 在计算图像幅值和相位的基础上, 通过建立尖点突变模型及相应的坐标变换, 将系统变量进行归一化处理, 根据处理后的尖点突变模型的判决式标记热波图像中像素值突变的点, 提取突变点的骨架, 对其膨胀和填充运算实现缺陷的分割。最后通过试验验证了该方法的可行性。

关键词: 突变理论; 尖点突变模型; 热波检测; 图像分割

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-1009-07

Application of cusp catastrophic theory in image segmentation of infrared thermal waving inspection

Wang Dongdong, Zhang Wei, Jin Guofeng, Yang Zhangwei, Tian Gan

(602 Office, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Image segmentation is the key technique to achieve the quantitative identification in the thermal waving inspection. An image segmentation method was advanced based on the cusp catastrophic theory according to the characteristics of discontinuous change between the region with defect and without defect in thermal images. The amplitude and phase of the image were computed at first, then the model of the cusp catastrophic was established and the corresponding transform of coordinate was studied, the variable of the system was dealt with unitarity. The salutatory dots were signed based on the judicative formula of the cusp catastrophic model after the unitariness, the framework of the salutatory dots was picked up to realize the segmentation of the thermal waving images through the operation of the expansion and fill. At last the experiments were carried out to prove the feasibility of this method.

Key words: catastrophic theory; cusp catastrophic model; thermal waving inspection; image segmentation

收稿日期: 2013-07-08; 修订日期: 2013-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51275518, 51305477); 陕西省自然科学基金(2013JM7021)

作者简介: 王冬冬(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外热波无损检测方面的研究。Email: wd286478419@126.com

导师简介: 张炜(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事设备监检测与故障诊断方面的研究。Email: zhangweihuaiyu@163.com

0 引言

红外热波检测是一种基于热波理论的新型无损检测技术。该技术通过对被测对象施加周期、脉冲等函数形式的热激励,使被测物体内部异性结构(缺陷或损伤,如异物、异常结构等)以表面温度场变化的差异形式表现出来,采用红外成像技术连续观测和记录被测物体表面的温度场变化,从而获取物体的非均匀信息或表面下的结构异常^[1]。该技术具有检测面积大、检测效率高、单向、非接触以及能够直接测量到深度、厚度等优点^[2],在航空航天、汽车、建筑、石油化工、医学等领域得到了广泛的应用^[3-5]。但由于红外热像仪本身及外界环境的影响,试验得到的红外热波序列图像普遍存在“低对比度、高背景及高噪声”等问题,为了提高热波技术的检测能力,增强缺陷或损伤的显示度,研究人员在改善图像质量、提高图像信噪比等方面做了大量的工作^[6-8]。

热波检测图像分割是热波图像处理的重要研究内容,是实现缺陷定量识别的关键技术。针对热波检测图像中有缺陷区域与无缺陷区域灰度值不连续的特点,将突变理论引入到热波检测图像的分割中,定义图像中灰度值突变的点,根据该突变点实现对图

像中缺陷的分割提取。

1 突变理论基本原理

突变理论^[9]提供了一种研究跃迁、不连续性和突然质变的普通适应的方法,是由法国数学家 Thom 于 1972 年创立的。突变理论在处理非连续性变化时,不需要考虑任何特殊的内在机制。根据一个系统的势函数把它的临界点分类,研究各个临界点附近非连续变化的特征,从而归纳出若干个初等突变模型^[10],以此为基础探索自然和社会中的突变现象。

突变理论利用势函数描述系统的变量有两类:(1) 状态变量,描述系统中可能出现突变的量,表示系统的行为状态;(2) 控制变量,指系统中作为突变原因的连续变化的因素,表示影响状态变量的各种因素。通过对突变模型的势函数 $f(x)$ 求一阶导数,再由 $f'(x)=0$,得到它的平衡曲面;而平衡曲面的奇数点集可通过二阶导数 $f''(x)=0$ 求得,联立两式消去状态变量,便能得到只含控制变量的分歧方程。当控制变量满足分歧方程,系统就会发生突变,从而得知各个控制变量对突变产生所起到的作用^[11]。Thom 已经证明,当控制变量不超过 4 个时,只有 7 种基本突变形式,其势函数及归一化公式见表 1。

表 1 初等突变形态势函数及归一化公式

Tab.1 Potential function of the elementary catastrophic form and the unitary formula

Type of model	Postural variable	Manipulative variable	Potential function	Unitary formula
Fold catastrophe	1	1	$f(x)=x^3+ux$	$x_u=u^{1/2}$
Cusp catastrophe	1	2	$f(x)=x^4+ux^2+vx$	$x_u=u^{1/2}, x_v=v^{1/3}$
Swallowtail catastrophe	1	3	$f(x)=x^5+ux^3+vx^2+wx$	$x_u=u^{1/2}, x_v=v^{1/3}, x_w=w^{1/4}$
Butterfly catastrophe	1	4	$f(x)=x^6+tx^4+ux^3+vx^2+wx$	$x_t=t^{1/4}, x_u=u^{1/3}, x_v=v^{1/4}, x_w=w^{1/5}$
Hyperbolic umbilic catastrophe	2	3	$f(x,y)=x^3+y^3+wxy-ux-vy$	
Elliptic umbilic catastrophe	2	3	$f(x,y)=x^3-xy^3+w(x^2+y^2)-ux+vy$	
Parabolic umbilic catastrophe	2	4	$f(x,y)=y^4+x^2y+wx^2+ty^2-ux-vy$	

通过对突变模型的研究,可以得出其有以下基本特征^[12]。

(1) 突跳性 控制参量有一微小的变化就会引起状态变量巨大变化,从而导致系统从一个局部极小

点突跳到另外一个局部极小点。

(2) 滞后性 当任何一个物理系统不能严格地逆向重估某种变化过程时,就会出现滞后现象。

(3) 发散性 对于连续平滑的变化,控制参数微

小的扰动仅引起状态变量的微小增量,但在退化点邻域内,参量的微小变化将导致状态变量很大的变化,这种不稳定性称为发散性。

(4) 多模态 系统中有可能出现 2 个或 2 个以上不同的状态,即系统的位势对于控制参数的某些范围可能有多个极小值。

(5) 多径性 平衡曲面中的某一状态,可以通过控制变量变化的不同路径来实现。

(6) 不可达性 系统在某些状态变量上不能实现真正意义上的稳定平衡。

2 基于尖点突变理论的热波检测图像分割

在红外热波无损检测中,对得到的红外热波序列图像,更为关注的是图像中缺陷区域的信息。为了对图像中的缺陷进行识别和分析,需要将缺陷区域从图像中分割提取出来,在此基础上计算缺陷大小。图像分割的依据是各区域具有不同的特性,这些特性可以是灰度、颜色、纹理等。而灰度图像分割的依据是基于相邻像素灰度值的不连续性和相似性。也就是,子区域内部像素一般具有灰度的相似性,而在区域之间的边界上一般具有灰度不连续性^[13]。在一幅图像中,区域之间的状态转换不是渐进过程,而是一种突变,因此把图像中的信息看成是突变与非突变两种状态,这与尖点突变模型的双模态特征相一致。因此,将突变理论中的尖点突变理论引入到热波图像的分割中,在得到图像幅值和相位信息的基础上,将尖点突变模型引入实现图像的分割。

通常情况下,在一幅图像中正常数据和突变数据是混杂在一起难以区分的,寻找突变数据的过程就是寻找图像中异常区域边界的过程。基于尖点突变理论的热波检测图像分割就是利用尖点突变模型的建立将突变数据从全体数据中提取出来。

根据上述基本理论的分析,可知尖点突变模型的势函数为:

$$f(x) = x^4 + ux^2 + vx \quad (1)$$

$$\text{突变流形为: } 4x^3 + 2ux + v = 0 \quad (2)$$

$$\text{分叉集为: } 8u^3 + 27v^2 = 0 \quad (3)$$

式中: x 为图像的状态信息,是状态变量; u 为图像的相位信息; v 为图像的幅度信息,两者是控制变量。

由上述可知尖点突变模型如图 1 表示。

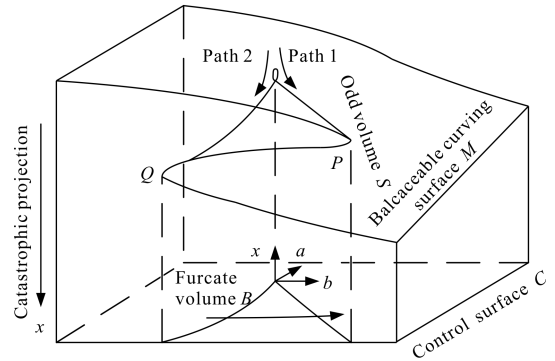


图 1 尖点突变模型示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of cusp catastrophic model

将突变理论用于热波图像分割的过程中,为了区分原始图像中的突变数据与正常数据,使其满足分叉集方程,需对图像进行坐标变换和坐标旋转,其具体实现过程为:

(1) 坐标变换

$$\begin{cases} x_1 = x - v_m \\ u_1 = u - q_m \\ v_1 = v - o_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_m 代表图像最大相位对应的最小边缘; q_m 代表最大相位; o_m 代表最大相位对应的最大幅度。

(2) 坐标旋转

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \\ u_2 = u_1 \cos\theta - mv_1 \sin\theta \\ v_2 = u_1 \sin\theta - mv_1 \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为旋转的角度(依据待处理的图像特点具体选择), $m = q_m / o_m$ 。

经过相应的坐标变换之后,图像尖点突变模型的突变流形和分叉集方程变为:

$$x_2^3 + u_2 x_2 + v_2 = 0 \quad (6)$$

$$4u_2^3 + 27v_2^2 = 0 \quad (7)$$

具体的实施步骤如下。

(1) 利用高斯平滑滤波器对原始图像进行预处理,取出图像中的噪声,提高图像对比度;

(2) 利用有限差分法计算图像幅值和相位,计算公式为:

$$m[i,j] = \sqrt{p[i,j]^2 + q[i,j]^2} \quad (8)$$

$$\theta[i,j] = \arctan(q[i,j]/p[i,j]) \quad (9)$$

式中: $p[i,j]$ 表示图像在 x 方向上的偏导数; $q[i,j]$ 表示图像在 y 方向上的偏导数; $m[i,j]$ 代表图像的幅度信息; $\theta[i,j]$ 代表图像的相位信息。

(3) 利用公式(2)中计算出的图像的幅度、相位信息及图像本身信息建立尖点突变模型;

(4) 利用上述坐标变换公式,对尖点突变模型进行坐标变换;

(5) 利用归一化公式将模型中控制变量由不同的性质转化为同一种性质的变量,然后利用尖点突变模型的判决式将变量进行归一化,由公式 $u_2^3 - v_2^2 < 0$ 来判断图像中灰度值发生突变的点;

(6) 将得到的突变点进行膨胀运算,得到图像中缺陷的基本轮廓;

(7) 提取膨胀后的缺陷边缘的骨架,然后提取图像中的缺陷区域。

图像分割的流程图如图 2 所示。

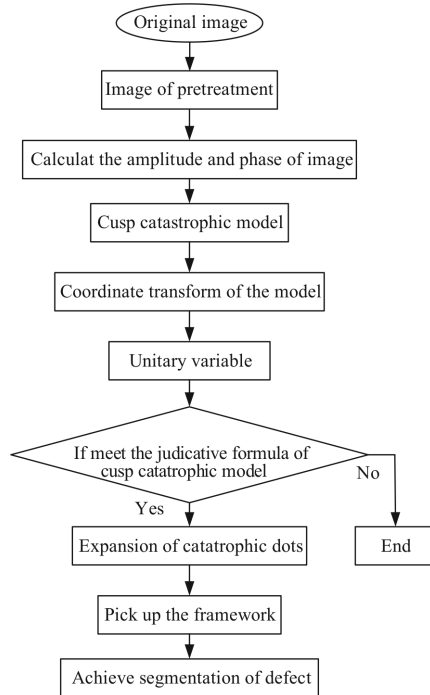


图 2 热波检测图像分割的流程图

Fig.2 Flow diagram of the thermal waving image segmentation

3 试验及结果分析

3.1 试验描述

试验借助于课题组自主开发的红外热波检测系统(如图 3 所示)进行。该系统采用高能脉冲闪光灯作为热激励源,闪光灯两只,脉冲宽度为 2 ms,每个

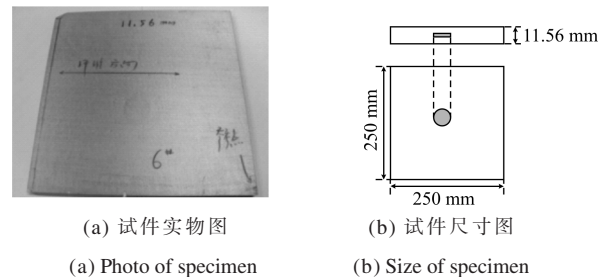
闪光灯最大能量为 2 400 J。红外热像仪选用德国 InfraTec 公司生产的 Vhr 680 科研专家型非制冷型红外热像仪,其工作波段为 7.5~14 μm ,温度灵敏度在室温下为 0.04 K,可提供 640×480 像素的图像。红外图像的采集时间为 30 s,采集频率为 60 Hz。



图 3 红外热波检测系统

Fig.3 System of the infrared thermal wave inspection

试件一:含夹杂缺陷的复合材料壳体试件。该试件是由两层复合材料压制而成的,试件的长宽都为 250 mm,厚度为 11.56 mm,利用聚四氟乙烯层压片模拟夹杂在复合材料中的圆形缺陷,缺陷直径为 20 mm,图 4 为该试件的实物照片及尺寸图。



(a) 试件实物图

(b) 试件尺寸图

(a) Photo of specimen

(b) Size of specimen

图 4 含夹杂缺陷的复合材料试件

Fig.4 Composite specimen embed with defects

试件二:含脱粘缺陷的玻璃纤维壳体试件。试件长宽为 281 mm,厚 8 mm,背面加工有 3 个深度相同直径不同的平底洞,即脱粘缺陷。缺陷直径按大小依次为 10 mm、20 mm 和 30 mm。图 5(a)、(b)为该试件的实物照片及尺寸图。

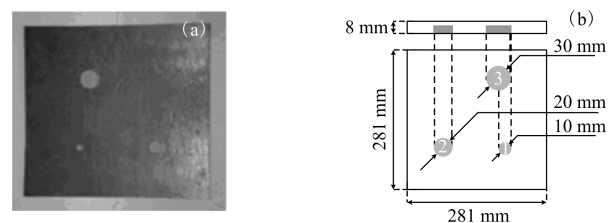


图 5 含脱粘缺陷的玻璃纤维壳体试件

Fig.5 Glass fiber composite specimen with debond defects

试验前先进行热像仪的温度标定和焦距设置,使热像仪的视场均匀。设置热像仪的采集时间和采集频率,设置好后便可启动试验装置。试验中采集到的红外热波原始图像如图6所示。

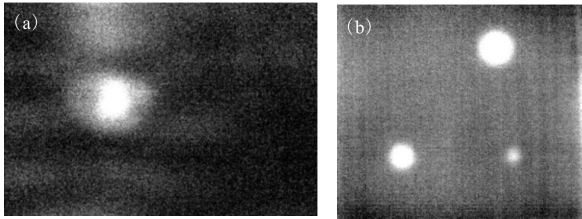
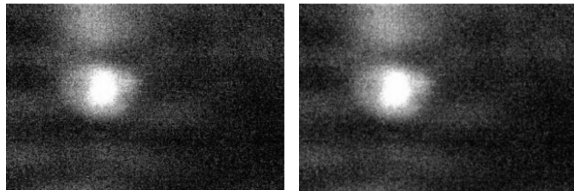


图6 红外热波检测原始图像

Fig.6 Original image of the thermal waving test

3.2 试验结果处理

由检测结果可以看到,原始图像存在“高噪声、高背景、低对比度”等问题,为了提高缺陷分割的准确率,在分割之前需对图像进行预处理。经过分析,提出利用高斯滤波器对原始图像进行平滑滤波处理,降低图像噪声,提高缺陷的对比度。从图7中可

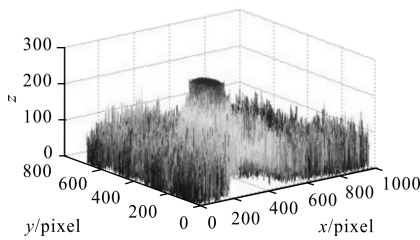


(a) 原始图像

(b) 高斯滤波后的图像

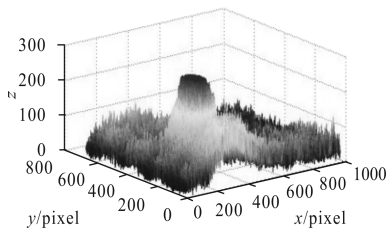
(a) Original image

(b) Worked image of filter



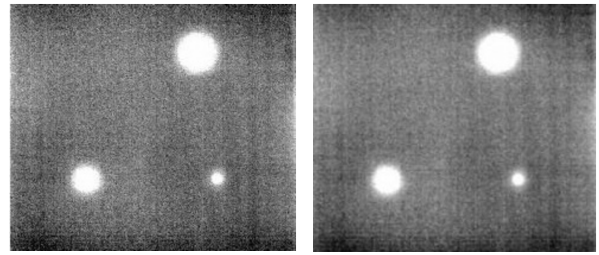
(c) 原图像的三维显示

(c) Three-dimensional graph of the original image



(d) 滤波后图像的三维显示

(d) Three-dimensional graph of the worked image

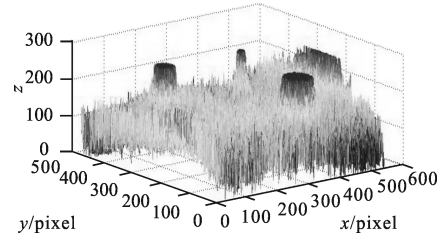


(e) 原始图像

(f) 高斯滤波后的图像

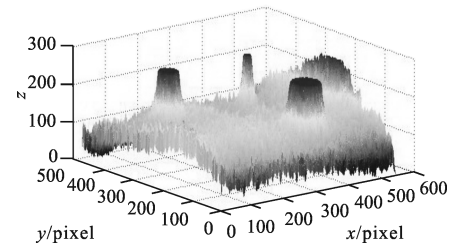
(e) Original image

(f) Worked image of filter



(g) 原图像的三维显示

(g) Three-dimensional graph of the original image



(h) 滤波后图像的三维显示

(h) Three-dimensional graph of the worked image

图7 热波检测图像的预处理

Fig.7 Pretreatment of the thermal waving inspection images

以看出,经高斯滤波器滤波处理后,图像中的噪声得到明显的抑制,从图7中(c)与(d),(g)与(h)的三维显示图中可以明显看出缺陷的对比度得到了提高。

对经过预处理之后的热波检测图像,利用公式(8)和公式(9)分别计算图像的幅值和相位,在得到其幅值和相位的基础上,建立尖点突变模型,然后对模型根据公式(4)和公式(5)进行坐标变换(其中 $\theta=\pi/3$),提取图像中灰度值突变的点,提取结果见图8。

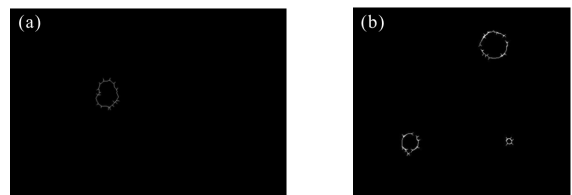


图8 图像中像素突变点的提取结果

Fig.8 Results of the catastrophic dots of pixel in image

针对图 8 中提取的图像中像素值突变的点的骨架不连续的问题,对其进行膨胀运算,膨胀后的结果如图 9 所示。

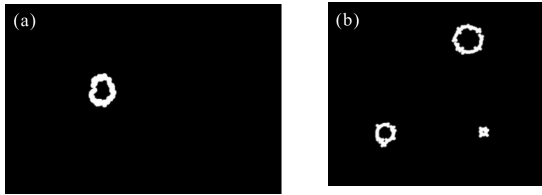


图 9 像素值突变点膨胀结果

Fig.9 Infrared result of the catastrophic dots

在图像中像素值突变点膨胀的结果图上,对突变点内的区域进行填充,填充结果(即热波检测图像中的缺陷区域)如图 10 所示,图 10 即经过尖点突变理论分割提取后的缺陷区域。

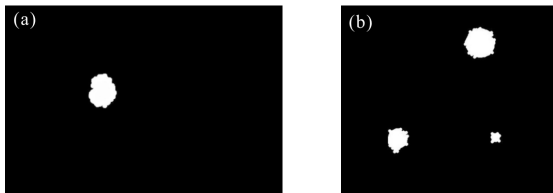


图 10 缺陷区域填充结果

Fig.10 Filled result of the defect area

为了验证尖点突变理论在热波检测图像分割中应用的有效性,对分割提取后的缺陷进行定量识别,识别结果如表 2 所示。

表 2 缺陷定量识别结果(单位:mm)

Tab.2 Quantitative identification results of defects (unit: mm)

Defects	Parameters	Diameter	Perimeter	Area
Fig. 10(a)	Real value	20	62.8	314
	Metrical value	18.52	57.17	278.74
	Error	7.4%	8.9%	11.23%
Big	Real value	30	94.2	706.5
	Metrical value	32.39	101.96	781.12
	Error	7.98%	8.24%	10.56%
Fig. 10(b)	Real value	20	62.8	314
	Mid Metrical value	21.71	68.28	347.68
	Error	8.56%	8.73%	10.73%
Small	Real value	10	31.4	78.5
	Metrical value	10.94	34.51	87.81
	Error	9.38%	9.90%	11.86%

从表 2 中可以看出,分割误差不超过 10%,分割效果较好,但左侧图像中缺陷的定量识别结果略小于缺陷的实际尺寸,右侧图像中的缺陷的识别结果略大于缺陷的实际尺寸,这是因为在分割的过程中图像中缺陷处伪边缘的影响。在左侧图像的缺陷分割提取中,将伪边缘中缺陷区域的像素点作为正常区域而舍去,使得识别结果略小于实际尺寸;在右侧图像的分割提取中,将伪边缘中正常区域的像素点作为缺陷区域而分割提取出来,因此缺陷的识别结果略大于缺陷的实际尺寸,但从总体上说尖点突变理论用于热波检测图像中缺陷的分割提取可以取得较好的效果。

4 结论

图像分割是热波无损检测的重要研究内容,是实现缺陷定量识别的关键。文中通过分析热波检测图像中各像素点灰度值的变化情况,计算热波图像的幅值和相位,将尖点突变理论应用到热波检测图像的分割中。根据标记图像中像素值突变的点,提取突变点的骨架及其膨胀和填充处理,实现了缺陷的分割提取,通过对缺陷的定量识别验证了该理论在热波检测图像分割中的有效性。由于突变理论是由突变势函数来决定其变化过程的,因此可以对某些特定的情况做出快速有效的反应,以适应新的情况,因此突变理论具有较好的实时性和准确性,是一种实用的热波检测图像分割方法。

参考文献:

- [1] Li Xiaoxia, Wu Naiming, Duan Yuxia, et al. Infrared thermal wave imaging for carbon fiber laminated boards after low velocity impact [J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2010, 27(6):88-93. (in Chinese)
李晓霞, 伍耐明, 段玉霞, 等. 碳纤维层合板低速冲击后的红外热波检测分析[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(6):88-93.
- [2] Yang Jing, Guo Xingwang, Dong Shuqin. Image processing for detection of aluminum alloy with infrared thermographic NDT [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(1-1):55-57. (in Chinese)
杨京, 郭兴旺, 董淑琴. 铝合金模拟腐蚀缺陷的红外热波无损检测[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(1-1):55-57.
- [3] Ghosh, Kumar K Karbhari, Vistasp M. Use of infrared thermography for quantitative non-destructive evaluation in

- FRP strengthened bridge systems [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(1): 169-185.
- [4] Yang Zhengwei, Zhang Wei, Tian Gan, et al. Debond detection of shell/insulation in SRM by thermal wave NDT [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, .
- [5] Zhao Shibin, Zhang Cunlin, Wu Naiming, et al. Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 456-460. (in Chinese)
赵石彬,张存林,伍耐明. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 456-460.
- [6] Liu Tao, Zhang Wei, He Fujun, et al. Research on image enhancement in infrared thermal waves NDT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1922-1927. (in Chinese)
刘涛,张炜,何付军,等. 红外热波检测方法图像增强环节研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1922-1927.
- [7] Yu Tianhe, Hao Fuchun, Kang Weimin, et al. Summarization on the infrared image enhancement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(9): 335-338. (in Chinese)
于天河,郝富春,康为民,等. 红外图像增强技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(9): 335-338.
- [8] Yang Zhengwei, Zhang Wei, Wang Yan, et al. Application of homomorphic technology in image correction processing for infrared thermal wave inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 40(1): 22-27. (in Chinese)
杨正伟,张炜,王焰,等. 同态增晰技术在红外热波探伤图像校正中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 40(1): 22-27.
- [9] Zou Jiancheng, Zhao Zhanjun. Image matching based on catastrophe theory [J]. *J North China Univ of Tech*, 2010, 22(1): 1-7. (in Chinese)
邹建成,赵占军. 基于突变理论的图像匹配[J]. *北方工业大学学报*, 2010, 22(1): 1-7.
- [10] Zhao Zhifeng, Xu Weiya. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 2707-2712. (in Chinese)
赵志峰,徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 2707-2712.
- [11] Yan Kezhen, Yin Honghui. Assessment of asphalt pavement performance evaluation based on catastrophe theory [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(9): 105-108. (in Chinese)
颜可珍,殷宏辉. 基于突变理论的沥青路面使用性能的评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(9): 105-108.
- [12] Gao Feng, Yan Maolin. Catastrophe theory and its application in mining engineering [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science)*, 2008, 22(2): 64-67. (in Chinese)
高峰,闫茂林. 突变理论及其在采矿工程中的应用[J]. *重庆工学院学报(自然科学)*, 2008, 22(2): 64-67.
- [13] Li Junshan, Li Xuhui. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
李俊山,李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.