

# 基于点云深度映射颜色的导轨表面损伤识别

王振春<sup>1</sup> 渠文涵<sup>1,2</sup> 张玉燕<sup>1,2\*</sup> 任锐<sup>3</sup>

<sup>1</sup>燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup>燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

<sup>3</sup>装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

**摘要** 针对高速滑动电接触导轨,研究了表面微小损伤快速检测及分类识别方法。基于激光扫描原理,构建了三维测量系统,用于获取导轨表面形貌的三维点云信息,并给出了一种基于点云深度映射颜色的方法,用于导轨表面微小损伤的检测。将三维点云数据经过去噪、滤波平滑、数据精简等预处理之后,根据所设定的深度基准平面,构建点云深度映射颜色模型,将点云深度信息映射为红绿蓝(RGB)信息,采用一维最大熵法设定最优颜色阈值,实现损伤区域的准确提取;采用二叉树模式识别方法,建立损伤分类模型,实现导轨表面微小损伤的识别与分类。结果表明,损失质量小于1g的微小损伤检出率达98%以上、微小质量损失检测精度可达毫克级,凹坑与划痕两大类损伤识别率达80%以上。

**关键词** 测量; 损伤识别; 点云深度映射颜色; 损伤特征参量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1008005

## Damage Identification of Guide Surface Based on Point Cloud Data Depth Mapping Color

Wang Zhenchun<sup>1</sup> Qu Wenhan<sup>1,2</sup> Zhang Yuyan<sup>1,2</sup> Ren Rui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

<sup>2</sup>*Key Lab of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

<sup>3</sup>*Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China*

**Abstract** Aiming at the high speed sliding electrical contact rail, the surface micro damage detection and identification method are studied. Based on the principle of laser scanning, a three-dimensional measurement system is constructed for acquisition of point cloud information for rail surface, meanwhile a method of depth mapping color based on point cloud is proposed for the detection of rail surface micro damage. After the three-dimensional point cloud data being denoised, smoothed and reduced, according to the datum plane set, point cloud depth mapping color model is constructed, the point cloud depth information can be mapped into red, green, blue (RGB) information, and the optimum color threshold is set by using the one-dimensional maximum entropy method to realize the accurate extraction of the damage area. Binary tree pattern recognition method is used to establish damage classification model and realize the identification and classification of rail surface micro damage. The results show that detection rate of the micro damage of which mass loss is less than 1 gram is more than ninety-eight percent, detection accuracy of minor mass loss is milligram and the damage identification rate of pits and scratches

收稿日期: 2015-04-24; 收到修改稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61403333)、高等学校博士学科点专项科研基金(20111333120009)、河北省自然科学基金(F2012203184)

作者简介: 王振春(1979—),男,博士,副研究员,主要从事脉冲功率测控技术、导轨损伤检测与分析等方面的研究。

E-mail: zcwang@ysu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

can reach above eighty percent.

**Key words** measurement; damage identification; point cloud depth mapping color; damage characteristic parameters

**OCIS codes** 120.4630; 280.3420; 330.1710; 350.1820

## 1 引言

高速滑动电接触是一种具有载流作用的特殊摩擦副,在高速电气化铁路系统、工业使用的发电机和航空航天等领域起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。在高速滑动电接触过程中接触表面存在相互运动、张力变形等力学现象,以及产生焦耳热、电弧等一系列电气现象,都会导致接触导轨表面产生微小损伤,严重影响滑动接触状态、降低电接触性能及系统工作效率,减少轨道寿命。因此识别导轨表面微小损伤、计算损伤体积及损失质量,快速评估导轨表面健康状态,对于选择合适的接触材料及减小损伤、增加轨道工作寿命、提高系统工作效率等具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。目前关于滑动电接触导轨的表面形貌和特征分析,国内外学者进行了相关研究。文献[3]通过采集图片观察增加了润滑条件下的高速电接触导轨表面损伤磨损情况,采用光学显微镜观察磨损损伤微观形貌,分析其产生机理。文献[4]通过图片分析损伤宏观形貌,采用扫描电镜(SEM)显示每个刨槽的微观结构,分析得到刨削坑的形成机理是一致的。文献[5]通过22次高速滑动实验探测产生的不同形貌的刨槽,对不同位置处损伤进行宏观、微观上的比对与分析,指出刨槽可能不是由微小冲击引起的,与高速的不稳定性热塑性剪切有关。目前,多数研究主要是通过采集电接触导轨表面二维图像,从宏观与微观的角度对表面损伤形貌和特征进行分析,侧重研究接触材料性能及损伤产生机理,而关于电接触导轨表面损伤自动识别、分类以及损失质量检测内容的研究却很少见报道。目前对于导轨类工件表面损伤/缺陷的检测,多数是采用基于机器视觉的方法。文献[6]采用激光光源及面阵CCD摄像机获取导轨4个面的表面深度信息,通过表面深度变化分布图(二维灰度图像)检测缺陷所在的区域,深度检测分辨率达0.2 mm。文献[7]提出了一种以线激光检测为主,二维图像识别为辅的钢轨表面质量检测方法,分别对采集到的激光图像与LED图像进行处理提取出深度信息以及缺陷面积信息,以深度信息为主、缺陷面积信息为辅识别钢轨缺陷。文献[6-7]通过图像处理间接地获取损伤深度信息,以深度信息特征为主要研究依据对导轨表面质量进行检测与分析,比较显著地提高了检测系统的效率和准确性。而对工件进行三维扫描可以直接获得损伤深度信息,若选取更高分辨率的激光扫描传感器或提高后续处理算法精度则能进一步提高测量精度。

本文针对高速滑动电接触导轨,采用高分辨率二维激光扫描仪获取被测工件的三维原始点云数据,将点云深度信息映射成为颜色信息,进行微小损伤检测及损伤分类,计算损伤体积、损失质量并将其作为评估导轨表面状态及寿命的重要指标之一。

## 2 损伤识别原理

### 2.1 二维激光扫描仪测量系统

设计的导轨表面损伤三维测量系统结构组成框图如图1所示,主要由二维激光扫描仪、传动装置、工件夹持装置、数据采集模块及上位机构成。

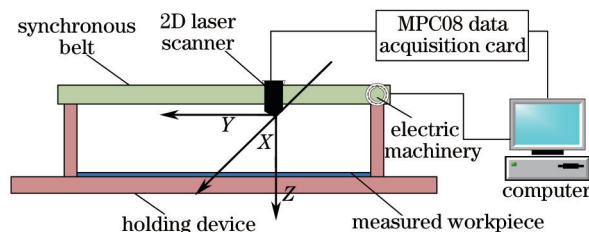


图1 导轨表面损伤三维测量系统

Fig.1 Three dimensional measurement system of rail surface damage

其中,二维激光扫描仪型号为ZLDS200,其工作原理如图2所示。传感器基于光学三角测量原理工作<sup>[8-9]</sup>,半导体激光器发出线型激光,经透镜形成X平面光幕,照射到被测物体表面上,其反射光由接收镜片收集,投影到二维CMOS阵列,形成被测工件剖面图形,通过信号处理器之后,可分别计算出轮廓线的长度与高度,长度用X轴计量,高度用Z轴计量,即为被测工件表面信息坐标点的x、z值。测量时对待测表面要求较低,不受色彩、表面材质或离散光线所影响,不仅适合小件物体的轮廓测量也非常适合大型物体的形貌测量。

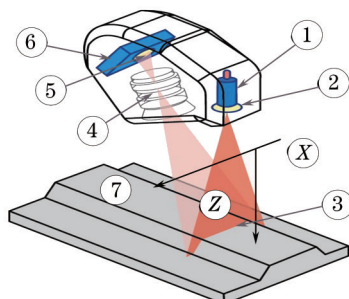


图2 激光扫描仪结构原理图

Fig.2 Structure diagram of laser scanner

图2中①为半导体激光器,②为透镜,③为激光轮廓线,④为激光接收镜片,⑤为二维CMOS阵列,⑥为信号处理器,⑦为待测工件,Z为竖直方向,X方向垂直于Z方向和工件方向所构成的平面。

被测工件由夹持装置固定,激光扫描仪安装在单轴移动定位装置上,可沿Y轴方向移动,对应数据点坐标值y,每定位一次,二维扫描仪扫描工作一次,得到相应位置的轮廓线信息。通过数据采集卡后,可得到包含工件表面损伤细节信息的三维点云数据<sup>[10-11]</sup>。测量的数据基准点在激光发射处,距离发射处越远获取到的数据值越大。激光扫描传感器扫描线测量长度为17~25 mm,X轴分辨率为25 μm,Z轴分辨率为35 μm,即同一扫描线上相邻两点间距离精度 $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} = 43 \mu\text{m}$ 。Y方向移动步进精度为0.1 mm,得到点云数据的密度约50000 cm<sup>-2</sup>。

## 2.2 损伤检测方法

基于点云深度映射颜色的表面损伤检测方法基本思想是将点云深度信息作为工件表面损伤的主要判断依据<sup>[12]</sup>,将其按一定的规则映射为红绿蓝(RGB)彩色信息。然后通过颜色的变化判断出工件表面是否有损伤,若有损伤,则根据设定颜色阈值提取出损伤特征区域。

首先,设定基准面。为减小因实验台或工件本身放置倾斜引起的深度信息偏差,对三维点云数据采用最小二乘法拟合,得到与工件表面相对应的平面 $ax + by + cz + d = 0$ ,并将此作为测量基准平面求取各个点云深度 $h_i$ ,为了便于处理将深度信息进行归一化,最终转换成颜色值。

$$h_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \quad (1)$$

式中a、b、c、d为基准平面系数, $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 为任一点云数据在X、Y、Z轴上的坐标值。

$$N_{\text{RGB}} = \text{Round} \left\{ N_{\text{segment}} \left[ \frac{h_i}{\max(h_i)} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中Round(c)为四舍五入取整, $N_{\text{segment}}$ 为深度映射颜色的灵敏度<sup>[12]</sup>, $N_{\text{RGB}}$ 为颜色索引值。

分别对RGB三个通道进行了等间隔取样,再适当地按RGB三个分量进行不同组合<sup>[13]</sup>,组成64种颜色,即 $N_{\text{segment}}$ 取值为64,点云的深度映射颜色模型如下式所示:

$$\begin{cases}
 R = \begin{cases} 0, & N_{RGB} \leq 24 \\ 16(N_{RGB} - 24), & 24 < N_{RGB} < 40 \\ 255, & 40 \leq N_{RGB} \leq 56 \\ -16(N_{RGB} - 72), & 56 < N_{RGB} \leq 64 \end{cases} \\
 G = \begin{cases} 0, & N_{RGB} \leq 8, 56 < N_{RGB} \leq 64 \\ 16(N_{RGB} - 8), & 8 < N_{RGB} < 24 \\ 255, & 24 \leq N_{RGB} \leq 40 \\ -16(N_{RGB} - 56), & 40 < N_{RGB} \leq 56 \end{cases} \\
 B = \begin{cases} 16(N_{RGB} + 8), & N_{RGB} < 8 \\ 255, & 8 \leq N_{RGB} \leq 24 \\ -16(N_{RGB} - 40), & 24 < N_{RGB} < 40 \\ 0, & 40 \leq N_{RGB} \leq 64 \end{cases}
 \end{cases} \quad , \quad (3)$$

$$(x, y, z) \leftrightarrow (x, y, N_{RGB}) \quad (4)$$

根据(3)式将点云深度信息映射成颜色分量,如图3所示。据此可将三维点云数据  $(x, y, z)$  转换成与之相对应的包含颜色信息的  $XY$  平面上的二维点集。根据表面损伤习惯性出现位置以及颜色种类、不同区域间颜色变化,判断表面是否存在损伤<sup>[14]</sup>。若存在损伤则设定颜色阈值,进行损伤提取。

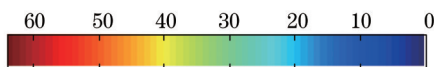


图3 颜色分量图

Fig.3 Color component diagram

为了能够准确提取损伤区域,通过一维最大熵法从所有点云对应的颜色索引值中选取最优颜色阈值,主要步骤如下:

1) 设  $\varepsilon$  为颜色阈值,将二维彩色点集分为 A 与 B 区域。设颜色索引值为  $1 \sim \varepsilon$  的点和颜色索引值为  $(\varepsilon + 1) \sim L$  的点分别属于 A 和 B 区域,则区域 A 和 B 的概率分布为  $P_A = P(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{\varepsilon} p_i$  和  $P_B = 1 - P(\varepsilon)$ ,  $L$  为最大颜色索引值。

2) 定义与区域 A 和 B 概率分布相关的熵分别为

$$H_A = \ln P(\varepsilon) + \frac{H(\varepsilon)}{P(\varepsilon)}, \quad (5)$$

$$H_B = \ln[1 - P(\varepsilon)] + \frac{H(L) - H(\varepsilon)}{1 - P(\varepsilon)}, \quad (6)$$

式中  $H(\varepsilon) = -\sum_{i=1}^{\varepsilon} p_i \ln p_i$ ,  $H(L) = -\sum_{i=1}^L p_i \ln p_i$ ,  $L = 64$ 。

3) 定义准则函数为  $\phi(\varepsilon) = H(A) + H(B)$ ,使  $\phi(\varepsilon)$  最大,对应的  $\varepsilon$  即是所求最优阈值。

针对不同的损伤类型,A 和 B 区域设定不同,若 A 和 B 区域分别为正常和损伤区域,则提取  $N_{RGB} > \varepsilon$  的点云数据,若 A 和 B 区域分别为损伤和正常区域,则提取  $N_{RGB} < \varepsilon$  的点云数据。

### 2.3 损伤识别与分类

高速滑动电接触过程引起引起导轨表面产生微损伤<sup>[15]</sup>,其中损伤的种类主要有两类:因滑动过程中的撞击或烧损、熔化等原因形成的凹坑以及由磨损形成的划痕。因形成的机理不同,凹坑可分为:刨蚀坑和烧蚀

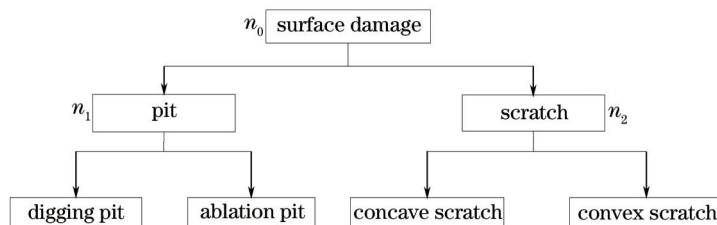


图4 二叉树损伤分类模型

Fig.4 Binary tree damage classification model

坑;关于划痕,因宏观形貌不同分为:凹划痕和凸划痕,相对应的损伤体积和损失质量有正负之分。针对电接触导轨损伤类型的识别,建立了二叉树分类模型<sup>[16-17]</sup>,如图4所示。

二叉树分类器采取多级模式,通过合理安排树分支和节点,确定在每个非叶子节点上的特征参数以及恰当的分类规则<sup>[18-19]</sup>,可有效解决分类问题。

根据多次实验的损伤提取结果,采用统计学的方法进行了损伤特征分析<sup>[20]</sup>,确定了损伤分类的特征参数,主要有损伤宽度、深差矩形比、损失质量。

### 1) 损伤宽度

根据提取结果,计算每条扫描线的宽度,然后选定最大值。比较宽度最大值,用于区分凹坑与划痕。表示为

$$K = \max \left[ \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \right], \quad (7)$$

式中  $x_1$ 、 $x_2$  为一条扫描线上损伤边界处的两端点云  $X$  轴坐标值,  $z_1$ 、 $z_2$  为一条扫描线上损伤边界处的两端点云  $Z$  轴坐标值。

### 2) 深差矩形比 $G$

深度差平均值  $\bar{H}$  为损伤区域  $Z$  轴方向数据与深度基准平面  $ax + by + cz + d = 0$  之差的平均值,外接矩形面积  $S$  为损伤区域最小外接矩形的面积,两个参数之比用于区分凹坑种类。

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i)}{n}, \quad (8)$$

$$S = \left[ \max \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \right] \cdot (y_{\max} - y_{\min}), \quad (9)$$

$$G = \frac{\bar{H}}{S}, \quad (10)$$

式中  $h_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$ ,  $y_{\min}$ 、 $y_{\max}$  为所有损伤区域点云数据在  $Y$  轴的最小、最大值,  $n$  为损伤区域点云数。

### 3) 损失质量

求取每条扫描线的损伤区域截面面积,得到损伤区域近似体积。首先,将损伤区域的扫描线数据进行最小二乘法曲线拟合得到  $f(x)$  与  $g(x)$ ;然后,采用定积分求取曲线  $f(x)$  与工件表面基线  $g(x)$  区域面积得到损伤截面面积,如图5所示。

$$S_i = \int_{x_1}^{x_2} [f(x) - g(x)] dx, \quad (11)$$

$$V = \sum_{i=1}^n 0.1 S_i, \quad (12)$$

$$\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = (25 \times 10^{-3} \text{ mm}) \times 0.1 \text{ mm} \times (35 \times 10^{-3} \text{ mm}) = 8.75 \times 10^{-5} \text{ mm}^3, \quad (13)$$

$$M = \rho \cdot V, \quad (14)$$

式中  $S_i$  为单条扫描线的损伤截面面积,  $V$  为损伤区域总体积,  $\rho$  为被测材料的密度。

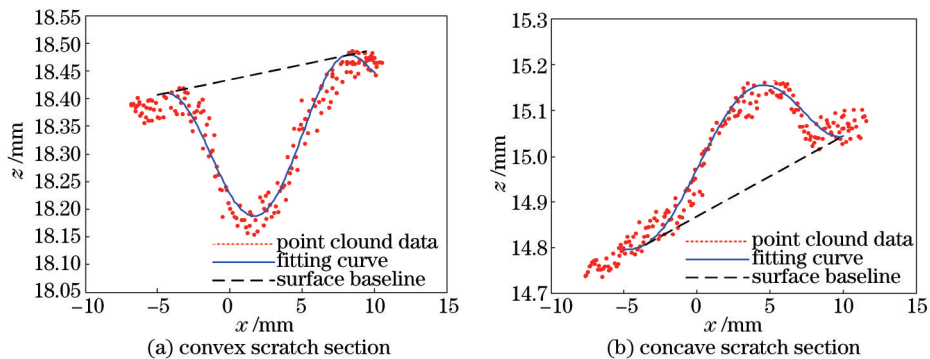


图5 损伤截面

Fig.5 Damage cross section



导轨表面的损伤对高速滑动电接触过程产生影响的大小,仅依据表面损伤位置、形状、大小等信息不能实现准确的判定,还需结合损伤体积、损失质量的大小来综合评定。通过多次损伤工件与标准工件的分段称重比对测量,得出损伤损失质量在1 g之内。基于原始点云数据由(13)式可计算出体积精度,已知材料密度,如钢导轨材料密度  $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ ,则损失质量精度可达毫克级以上。

通过对导轨表面常见的典型损伤类型进行实验测量与统计分析,提取出上述损伤特征参数,并建立了相应的分类规则,如表1所示。

表1 二叉树节点参数与分类规则

Table 1 Binary tree node parameters and classification rules

Node	Characteristic parameters	Classification rules	Classification results
$n_0$	Damage width	$K > 8.000 \text{ mm}$	A pit not scratch
$n_1$	Deep difference rectangle ratio	$G > 0.000400 \text{ mm}^{-1}$	Digging pit not ablation pit
$n_2$	Quality loss	$M > 0$	Concave scratch not convex scratch

### 3 实验结果及分析

利用图1所示系统进行实验研究,被测工件为某种材料高速滑动电接触导轨,表面具有微损伤。对被测工件表面进行扫描,两条扫描线之间部分三维点云数据,如图6所示。图中每个点的坐标值依次为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ , 单位 mm,计算多条扫描线上相邻两点间的距离大部分集中在  $26 \mu\text{m}$  左右,可知获取的点云数据精度符合仪器精度指标。获取点云数据后,首先需要预处理,如去噪、中值滤波、数据精简、拟合基准平面等,得到点云深度信息,经(3)式映射成颜色信息,三维点云数据降维成二维彩色点集,如图7所示,然后根据其中存在的明显颜色信息变化,可判断出工件表面存在损伤,通过一维最大熵法确定最优颜色阈值,提取出损伤区域;最终,采用二叉树模式识别方法进行损伤分类。深度映射颜色损伤提取结果与损伤原图的对比,如图8所示。

```

14.481,14.900,17.622
14.427,14.900,17.630
14.445,14.900,17.605
14.468,14.900,17.592
14.490,14.900,17.579
14.503,14.900,17.596
14.529,14.900,17.600
0.000,14.900,0.000
0.000,14.900,0.000
0.000,14.900,0.000
0.000,14.900,0.000
0.000,14.900,0.000
0.000,14.900,0.000
0.000,15.000,0.000
0.000,15.000,0.000
0.000,15.000,0.000
-10.651,15.000,17.340
-10.603,15.000,17.353
-10.558,15.000,17.363
-10.510,15.000,17.361
-10.481,15.000,17.344
-10.452,15.000,17.327
-10.426,15.000,17.327
-10.399,15.000,17.329
    
```

图6 部分点云数据

Fig.6 Partial point cloud data

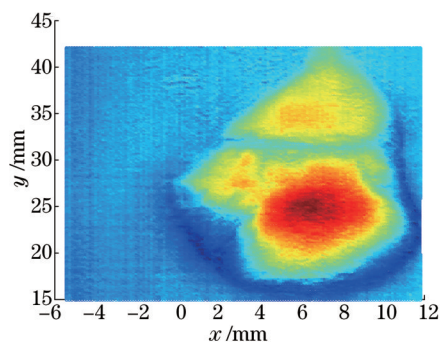


图7 映射后的工件表面颜色信息

Fig.7 Color information of the workpiece surface after mapping

图8(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k)、(m)分别是不同位置处的损伤原图,图8(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l)、(n)分别是对应位置的点云深度映射颜色损伤提取结果,最优阈值  $\varepsilon$  分别为21、20、26、39、40、36、10,损伤提取结果图再次按照(3)式进行映射的结果。由图8可知,本文所提方法获得的损伤区域轮廓、位置、形状大小等信息准确与清晰,能够有效识别典型损伤类型,如蚀坑形状有规则类似于雨滴状,如图8(b)、(d)、(f)所示;烧蚀坑形状不规则、损伤面积较大如图8(h)、(j)所示,划痕类似于长条状,如图8(l)、(n)所示。与损伤原图比较可见,所提取的损伤轮廓特征与工件损伤吻合性很好,验证了本文方法的有效性。

图9为文献[21]提出的基于小波变换的表面损伤测量方法某种材料导轨相同位置1、2、3处的提取结果,可看出采用小波变换法实现了位置1、2、3处损伤的准确检测与提取。比较图8和9中相同位置处的提取结果,本文提取出的损伤轮廓信息更加精确一些,并且可以根据颜色分布看出Z轴方向上高度信息的分布,包含了损伤的三维细节信息。在文献[21]的基础上,进一步研究微小损伤烧蚀坑、划痕的检测与提取以及导轨损伤类型的分类的方法,采用基于点云深度颜色的方法结合基于二叉树模式识别方法实现了导轨表面典型损伤的识别与分类。

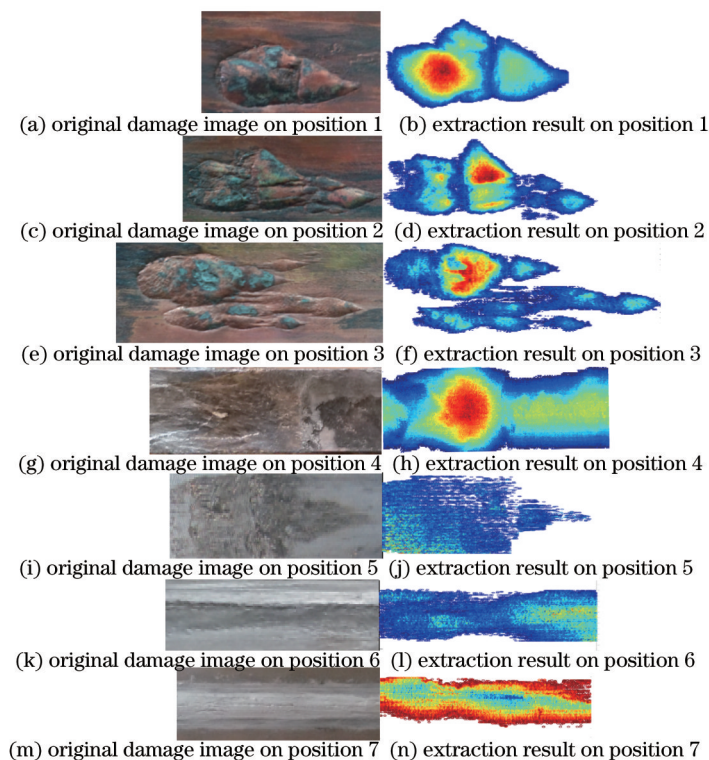


图8 不同位置处损伤原图与检测结果

Fig.8 Original damage image and damage extraction result of different positions



图9 位置1、2、3处小波变换损伤提取结果

Fig.9 Position 1、2、3 wavelet transform damage extraction results

根据损伤提取结果,计算出各处损伤的特征参数,进行了损伤分类,分类结果如表2所示。根据表2采用下面2个指标来评价算法识别效果:检出率=检测出损伤的位置数目/被检测损伤位置总数,识别率=损伤正确分类位置数目/被检测损伤位置总数。

表2 损伤识别分类结果

Table 2 Results of damage identification and classification

Position number	Width $K/mm$	Deep difference rectangle ratio $G/mm^{-1}$	Loss volume $V/mm^3$	Loss quality $M/g$	Damage type
1	10.203	0.001400	90.5847	0.7745	Digging pit
2	10.501	0.000520	86.9647	0.7392	Digging pit
3	12.049	0.000370	90.5614	0.7743	Ablation pit
4	9.018	0.000228	51.1847	0.4018	Ablation pit
5	10.009	0.000057	23.5541	0.1849	Ablation pit
6	6.805	0.000322	55.9745	0.4394	Concave scratch
7	4.778	0.000390	-58.0382	-0.4556	Convex scratch

已知位置1、2、3处损伤为凹坑-刨蚀坑,位置4、5处损伤为凹坑-烧蚀坑,位置6、7分别为划痕-凹划痕、划痕-凸划痕。如表2所示,位置3处根据节点  $n_0$  处参数初步判定为凹坑,根据节点  $n_1$  处参数最终判定为烧蚀坑,与已知结果不一致,其他位置处均与已知结果一致。由识别结果可计算出基于点云深度映射颜色的方法的损伤检出率达98%以上;采用二叉树模式识别的方法根据上述的特征参数基本上能够识别出损伤的

种类,识别率达80%以上;导轨表面7个位置处的损伤质量均在1 g之内,说明该方法满足损伤检测的要求;位置1、2、3处损伤体积及损失质量相对大一些,说明滑动过程中撞击产生的刨蚀坑损伤的程度相对大一些。刨蚀坑损伤的程度大,则对系统的运转效率以及导轨的寿命会产生较大的影响。

## 4 结 论

针对滑动电接触导轨表面的损伤,采用激光扫描测量系统获取了表面形貌三维点云数据,通过点云深度映射颜色的方法,实现了损伤的准确检测与提取;在此基础上确定了损伤特征参数,采用二叉树模式识别的方法基本实现了损伤的分类。相对其他方法,将原始点云数据中包含的表面深度信息映射成为颜色信息,根据颜色信息的变化能够更加迅速地判断出损伤信息,同时对原始点云数进行处理,具有较高的可靠性,若提高激光扫描精度,则能进一步提高测量精度;采用二叉树模式识别方法设计的分类模型简单、实用,并且取得了良好的分类效果,能够达到电接触导轨表面检测的要求。研究结果对于选择合适的接触材料以及减小损伤、增加轨道工作寿命、提高系统工作效率等提供了技术支撑和依据。

## 参 考 文 献

- 1 Guo Fengyi, Ren Zhiling, Ma Tongli, *et al.*. Experimental research on wear process variability of the sliding electric contact[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 25-29.  
郭凤仪,任志玲,马 Tongli, 等. 滑动电接触磨损过程变化的实验研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 25-29.
- 2 Liu Yibin. Mechanism and Experimental Study of Friction and Wear of Sliding Electrical Contacts[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005: 1-20.  
刘毅斌. 滑动电接触的摩擦磨损机理与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005: 1-20.
- 3 Irwin L Singer, Michael J Veracka, Craig N Boyer, *et al.*. Wear behavior of lubricant-conditioned copper rails and armatures in a railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 138-143.
- 4 Liu Guiming, Li Jun, Zhang Qingxia, *et al.*. Failure mechanism of railways for H62 brass electromagnetic gun[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2013, 27(5): 1672-1497.  
刘贵民,李 军,张庆霞,等. H62黄铜电磁炮导轨失效机理[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(5): 1672-1497.
- 5 Watt T J. The Onset of Gouging in High-Speed Sliding Contacts[D]. Austin: University of Texas, 2011.
- 6 Xu Ke, Yang Chaolin, Zhou Peng, *et al.*. 3D detection technique of surface defects for steel rails based on linear lasers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 1-5.  
徐 科,杨朝霖,周 鹏,等. 基于激光线光源的钢轨表面缺陷三维检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 1-5.
- 7 Zhang Chaoyong, Su Zhenwei, Qiao Li, *et al.*. Insepectionssystem for decetion of defects on rail surface based on LED and liner laser [J]. Science technology and Engineering, 2012, 12(36): 9878-9884.  
张朝勇,苏真伟,乔 丽,等. 一种基于LED和线激光的钢轨表面缺陷检测系统[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(36): 9878-9884.
- 8 Fang Yan, Yang Xichen. Research on key techniques of defect detection for laser remanufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0403001.  
方 艳,杨洗陈. 激光再制造中缺陷识别关键技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403001.
- 9 Chen Feng, Chen Wuyi, Chen Zhitong. Laser triangulation based measurement about the surface 3D topography of a cup CBN grinding wheel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1322-1325.  
陈 锋,陈五一,陈志同. 基于激光三角法的CBN杯形砂轮表面形貌检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10): 1322-1325.
- 10 Chen Kai, Zhang Da, Zhang Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812003.  
陈 凯,张 达,张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812003.
- 11 Tian Ailing, Wang Hui, Wang Chunhui. Simulation research on the light-scattering properties of the subsurface damage of optical components[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908006.  
田爱玲,王 辉,王春慧. 光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908006.
- 12 Wu Qinghua. Study on Theory and Application of 3D Surface Defect On-Line Detecting Based on Line-Structured Laser Scanning



- [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013: 10-30.  
 吴庆华. 基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 10-30.
- 13 Yixin Chen, Yi Xie, Yulin Wang. Detection and recognition of traffic signs based on HSV vision model and shape features[J]. Journal of Computers, 2013, 8(5): 1366-1370.
- 14 Wang Yansong, Jin Weiqi. Surface inspection based on color clustering of mapping chromatism[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(1): 75-78.  
 王岩松, 金伟其. 基于映射色差的颜色分类表面检测方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(1): 75-78.
- 15 Trevor Watt, Doyle T Motes. The effects of surface coatings on the onset of rail gouging[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 168-173.
- 16 Soumya De, R Joe Stanley, Beibei Cheng, *et al.*. Automated text detection and recognition in annotated biomedical publication images[J]. International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics, 2014, 9(2): 34-63.
- 17 Wu Huilan, Liu Guodong, Pu Zhaobang. Study on inertial confinement fusion experiment target recognition technology based on relevance vector machine[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1888-1891.  
 吴慧兰, 刘国栋, 浦昭邦. 基于相关向量机的惯性约束聚变实验靶识别技术研究[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1888-1891.
- 18 Raffei A F M, Asmuni H, Hassan R, *et al.*. A low lighting or contrast ratio visible iris recognition using iso-contrast limited adaptive histogram equalization[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 74: 40-48.
- 19 Li Wubin, Lu Changhou, Zhang Jianchuan. A local annular contrast based real-time inspection algorithm for steel bar surface defects[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(16): 6080-6086.
- 20 Su Junhong, Liu Shengli. Measure system of surface flaw and morphology analysis of cylindrical high precision parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041202.  
 苏俊宏, 刘胜利. 圆柱型高精零件表面缺陷检测及形貌分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041202.
- 21 Zhang Yuyan, Lü Kunkun, Wen Yintang, *et al.*. High-precision measurement of surface damage based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208007.  
 张玉燕, 吕坤坤, 温银堂, 等. 基于小波变换的高精度表面损伤测量[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208007.

栏目编辑: 何卓铭