

高速滑动电接触构件表面损伤参数计算方法

张玉燕^{1,2}, 郭全丽^{1,2}, 杨德功^{1,2}, 王振春³

¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²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;

³燕山大学国防科学技术学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种基于3D点云深度信息的函数拟合与三角剖分相结合的方法, 构建了高速滑动电接触构件的表面损伤特征提取模型, 将损伤区域3D特征数据进行三角剖分, 计算了构件表面损伤体积和质量。实验结果表明, 该算法计算准确度可达97.3%。

关键词 测量; 3D点云深度; 损伤特征; 三角剖分; 损伤质量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0504007

Calculation Method of Damage Parameters on High Speed Sliding Electric Contact Component Surface

Zhang Yuyan^{1,2}, Guo Quanli^{1,2}, Yang Degong^{1,2}, Wang Zhenchun³

¹School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Hebei Province Key Laboratory of Measuring and Testing Technologies and Instruments, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

³Institute of Defense Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract One method which combines the triangulation and the function fitting based on 3D point cloud depth information is proposed. The extraction model of surface damage features in high speed sliding electric contact components is built. The 3D feature data in the damaged area are divided into triangulation and the surface damage volume and mass of the components are calculated. The experimental results show that the accuracy in computation of the proposed algorithm can reach 97.3%.

Key words measurement; 3D point cloud depth; damage characteristics; triangulation; damage mass

OCIS codes 120.4630; 280.3420; 330.1880; 350.1820

1 引言

高速滑动电接触构件是电磁发射装置、电动机车输电、弓网系统和遥控机械中的重要部件, 工作过程中发生剧烈摩擦, 产生大量的电弧热, 这种现象长时间连续的累积会使接触表面产生损伤, 严重影响设备的正常运作。因此, 对高速滑动电接触构件表面损伤检测及分析评估的研究具有非常重要的意义。

目前国内外关于高速滑动电接触构件表面损伤的形成机理已有较多研究。曹荣刚等^[1-2]通过采集脉冲大电流高速滑动电接触下轨道槽蚀的位置、深度、长度以及沉积物形状、厚度和组成成分等实验数据, 对槽蚀和沉淀的产生机理进行了分析。Watt等^[3]从宏观和微观角度分析了高速滑动实验中不同位置、不同形貌的刨蚀坑, 得出刨蚀坑与高速不稳定热塑性剪切的相关性较大。Watanabe等^[4]在高速滑动电接触构件表面加固体润滑剂来改变接触电阻和摩擦系数, 利用激光显微镜和原子力显微镜(AFM)来观察构件表面损伤形貌, 分析了构件材料的特点和产生损伤的机理。Meger等^[5]通过扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)观察了高

收稿日期: 2016-12-15; 收到修改稿日期: 2017-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61403333)

作者简介: 张玉燕(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事光电检测、光纤传感方面的研究。E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

速滑动电接触导轨的槽蚀、磨损、刨蚀等损伤的宏观、微观结构,分析了造成导轨损伤的原因及改进措施。Ge 等^[6]通过分析高速列车受电弓的温度随牵引电流和接触力变化的规律,以及温度对接触表面形状变化的影响,得出受电弓滑板损伤产生的机理。Zhou 等^[7]通过采集多次实验中影响滑动电接触构件表面镀层损伤的各种因素的数据,分析了构件表面各种镀材料的破坏机理。Zhang 等^[8]使用 SEM 和 EDS 观察高速滑动磨损实验机的表面磨损形貌,通过分析电弧、电流、负载率、摩擦系数以及材料磨损率等测试参数,得出各个参数对表面磨损的影响规律。从上述文献可见,观察高速滑动电接触构件表面损伤形貌特征可以为损伤机理的分析提供技术依据。量化分析构件表面微小损伤,建立损伤参数的指标,对损伤机理的分析、减小损伤、提高构件寿命以及设备运行效率的研究具有重要的意义。

本文针对高速滑动电接触滑轨表面损伤,以激光扫描 3D 点云深度信息为主,研究了表面损伤参数的计算方法。

2 表面损伤特征提取

2.1 激光扫描系统

激光扫描测量系统结构示意图如图 1 所示,主要由被测构件夹持装置、二维激光扫描仪、传动装置、数据采集模块及上位机构成。其中,高分辨率二维激光扫描仪基于激光三角法原理工作,发出的激光为线形,具有高响应、可同步等性能。扫描线上 Z 轴精度为 0.1%,分辨率为 35 μm, X 轴分辨率为 25 μm,每条扫描线上相邻两数据点间距离精度为 43 μm。工作初始,先根据被测构件的尺寸大小,通过调节螺筒设置合适的 Z 轴基准作为后续测量计算的参考平面。二维激光扫描仪在传动装置的带动下以 0.1 mm 的步进精度沿 Y 轴方向扫描,每条扫描线给出了 X 轴和 Z 轴的数据点。被测构件表面的 3D 点云数据经采集转换后送入上位机存储、处理。

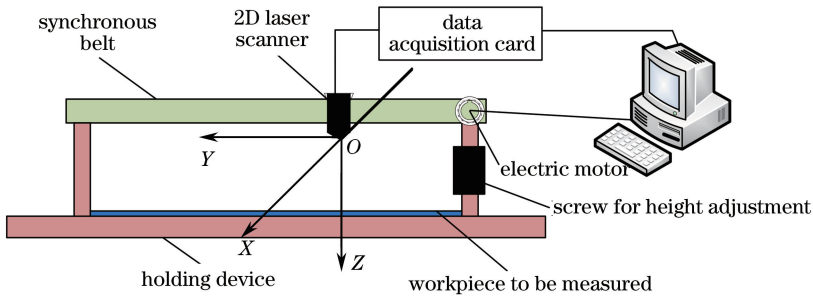


图 1 激光扫描测量系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser scanning measurement system

2.2 特征提取算法

基于以上激光扫描系统所获得的被测构件表面的 3D 点云数据反映了表面损伤形貌,其中点在 Z 轴的坐标值 z ,即点云数据深度,包含了丰富的损伤特征和损伤区域的细节信息。本文主要基于点云深度信息进行损伤特征的提取,采用基于拟合直线函数作差的方法,建立特征提取模型,寻找特征突变点。

分别沿 X 轴、Y 轴方向,令扫描线上每相邻两个深度数据点为一组(没有重叠点云数据),依次进行直线函数拟合,并对相应拟合函数值作差,将其差值超过阈值的点作为特征突变点。具体步骤如下:在 X 轴方向,依次取扫描线上每个点云数据的 X 轴坐标值 x_i 和 x_{i+1} ($i=0,1,2,\dots,n-1$; n 为扫描线上总的点云数)拟合直线方程 $f(x)$,相邻每两条直线函数取为 $f_i(x)$ 、 $f_{i+1}(x)$,如图 2 所示。再分别取两条直线函数在相邻两端点的中间位置 \bar{x} 点的函数值并作差,取出所有函数值差大于阈值 ξ 时所对应的 x_i 点作为特征突变点,如图 3 所示。直线函数所有的端点都有可能为特征突变点。同理可得出 Y 轴方向的特征突变点,如图 4 所示,其中横轴为点在 Y 轴的坐标值 y 。

提取的特征点能准确反映出扫描线的走向趋势,使构件表面损伤特征得到很好的描述:

$$c_{\text{ha}} = |f_i(\bar{x}) - f_{i+1}(\bar{x})|, \quad (1)$$

式中 $\bar{x} = (x_i + x_{i+1})/2$ 。

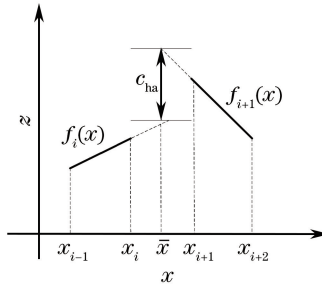


图 2 X 轴方向特征提取模型

Fig. 2 Feature extraction model along X axis direction

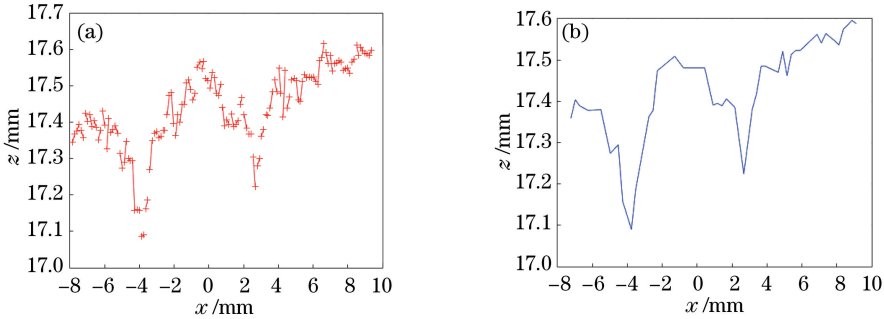


图 3 X 轴扫描线的特征提取。(a)拟合函数;(b)特征点提取结果

Fig. 3 Feature extraction of X-axis scanning line. (a) Fitting function; (b) feature point extraction result

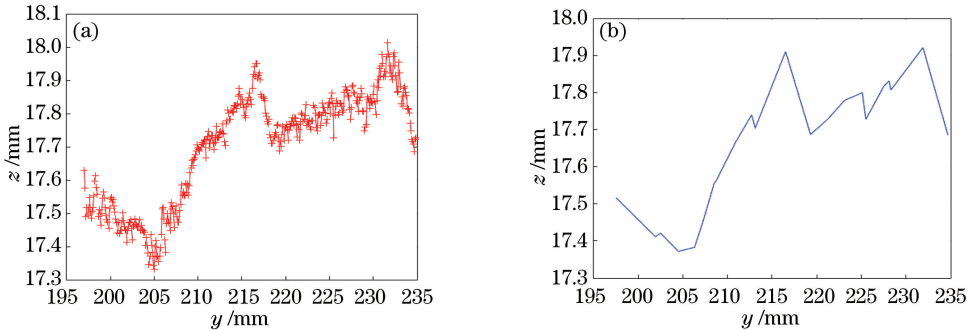


图 4 Y 轴扫描线的特征提取。(a)拟合函数;(b)特征点提取结果

Fig. 4 Feature extraction of Y-axis scanning line. (a)Fitting function; (b) feature point extraction result

将 X 轴方向上提取的所有特征点数据和 Y 轴方向上提取的所有特征点数据在点云应用库 (PCL) 中进行配准, 得到损伤区域特征形貌数据。依据设定的 Z 轴参考基准平面, 分析 Z 轴方向点云数据变化的规律, 将大于阈值的点提取出来作为损伤特征点。最后, 将 Z 轴方向的特征点云数据和前面已经配准好的 X、Y 轴方向的特征点云数据进行再次配准, 得到完整的损伤形貌的点云数据。

3 损伤参数计算

利用以上特征提取出损伤特征区域, 借鉴三角剖分算法^[9-11]的思想构建损伤区域形貌的表面模型, 再结合三角形投影法计算损伤参数。

3.1 三角剖分算法原理

三角剖分算法在数字图像处理、计算机三维曲面逼近、有限元网格生成、模式识别等领域有着重要应用。本文提出了一种基于三角剖分算法的构件表面损伤参数的定量计算方法。考虑本文采用的三维点云数据为非散乱点云, 具有一定的规律, 将空间点云数据经过三角剖分以后, 得到空间三角形, 通过空间拓扑关系^[12]将这些三角形都投向 Z 轴方向上设定的基准平面, 转化为二维的平面三角剖分关系, 进而根据平面三角形

面积和三角形顶点对应的 Z 值的平均值计算构件表面损伤的体积和质量。

3.2 损伤参数计算

考虑高速滑动电接触滑轨表面损伤^[13-15]的特点,采用损伤体积和损伤质量来表征表面损伤的程度,可为损伤分类及识别提供必要的依据。参数计算的主要步骤如下:

1) 将提取出的损伤区域中每一条扫描线上的点云依次相连接,形成点云数据链表,连接每相邻两条扫描线的第一个点构成基线,然后依次分别在每相邻两条扫描线上选取下一个点,再与基线一起构成四边形,比较构建的四边形的两条对角线的长度,对角线短的三角形即为三角剖分得到的三角形,该对角线即为下一个基线^[16],循环所有的特征区域的扫描点完成三角剖分。根据空间拓扑关系将空间三角剖分关系转化为二维 XOY 投影平面的三角剖分关系,剖分结果如图 5 所示。

2) 滑轨损伤区域往往不是连续的区域,导致相邻两个扫描线投影点之间剖分出的三角形出现异常,如图 6 所示。扫描线数据在 XOY 投影平面呈有规则排列,根据投影点之间的精度,得到每个小三角形微元的面积为 0.0049 mm^2 ,将所有面积大于 0.0049 mm^2 的三角形剔除,保留小于等于 0.0049 mm^2 的三角形。

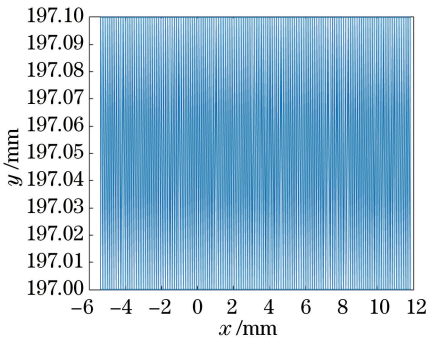


图 5 两条扫面线剖分图

Fig. 5 Subdivision graph of two scanning lines

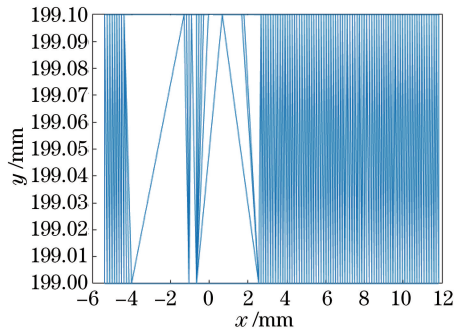


图 6 含有损伤边界点的三角剖分图

Fig. 6 Triangulation graph with damage boundary points

3) 根据步骤 2) 中计算的小三角形面积和步骤 1) 中剖分的三角形的三个顶点的 Z 轴坐标值的平均值,计算剖分出的小三棱柱微元的体积。

4) 假设整个检测矩阵的大小为 $m \times n$, 损伤特征区域某一行的边缘点的坐标为 (k, p) 和 (k, q) , 则该行 Z 轴的基准为

$$h = \left(\sum_{j=1}^p Z_{kj} + \sum_{j=q+1}^n Z_{kj} \right) / (n - q + p), \quad (2)$$

式中 Z_{kj} 为第 k 行第 j 列的数据。

总体积为

$$V = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n s \times \left[\frac{1}{3} (Z_1 + Z_2 + Z_3) - h \right], \quad (3)$$

式中 Z_1, Z_2, Z_3 为剖分三棱柱的三个高, h 为每一行的基准, s 为单个小三角形微元的面积。

损伤质量为

$$M = V\rho, \quad (4)$$

式中 ρ 为被测材料的密度。

5) 根据(2)~(4)式可计算出损伤的体积和质量。

4 实验结果与分析

利用自制实验平台进行高速滑动电接触实验,其中电接触中的滑轨为被测件,滑块在滑轨上的行程为 2 m 。相对滑动速率约为 1000 m/s ,相应加载电流在 $200 \sim 300 \text{ kA}$ 范围。电接触构件的良好接触状态对高速滑动电接触设备的运行效率至关重要。接触表面的微小损伤都将严重影响接触状态,大大降低工作性能和使用寿命。高速滑动电接触机理复杂,且高速滑动电接触处于多物理场耦合的条件下,滑轨表面往往出现

刨蚀坑、烧蚀坑、划痕等多种微小损伤类型并存的情况,对滑轨表面的损伤提出了更高精度的测量要求。为了精确表征导轨表面的微小损伤,以损伤质量为主要参数,测量精度应达到毫克量级及其以上。利用激光扫描得到滑轨表面损伤的 3D 点云数据,采用本文方法提取损伤特征,并进行损伤体积和损伤质量的计算。被测滑轨不同长度位置处的典型损伤形貌如图 7(a1)~(a4)所示,对应位置处的损伤特征提取的结果如图 7(b1)~(b4)所示。由图 7 可见,对于不同的损伤类型,本文算法均较好地提取了被测构件的损伤特征,反映了损伤形状、轮廓等信息。

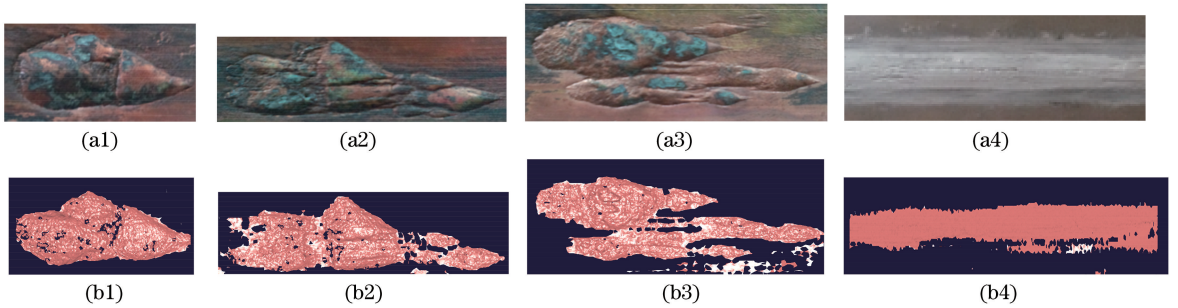


图 7 位置(a1)1,(a2)2,(a3)3,(a4)4 处的损伤原图和(b1)(b2)(b3)(b4)对应的特征提取图

Fig. 7 Original damage images at location (a1)1, (a2)2, (a3)3, (a4)4, and (b1)(b2)(b3)(b4) the corresponding feature extraction images

选择表面有已知体积的凹陷槽的一段导轨作为标准样件(将凹陷槽视为损伤),利用上述算法,提取出凹陷槽的区域并计算出这一段凹陷槽的体积和质量,用以验证所提方法的准确性。图 8(a)、(b)分别是标准样件的原图和提取结果图。

实验中,已知标准样件的损伤体积为 53.7601 mm^3 ,损伤质量为 0.42202 g ,材料密度为 7.85 g/cm^3 。被测构件的材料密度与标准样件密度相同。采用所提算法分别对标准样件和被测构件表面进行扫描测量计算,其表面损伤区域体积与损伤质量的计算结果如表 1 所示,其中正值表示刨蚀等原因造成的凹陷损伤,负值表示热融化等原因造成的凸起损伤。

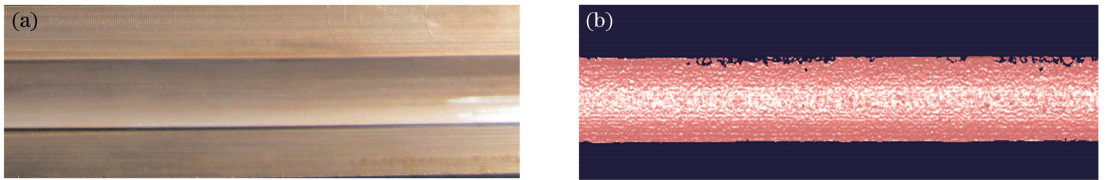


图 8 标准样件的(a)原图和(b)损伤提取图

Fig. 8 (a) Original image and (b) damage extraction image of standard sample

由表 1 数据可知,标准样件的检测结果为:损伤体积 55.2044 mm^3 ,损伤质量 0.43330 g 。损伤区域损伤参数的测量准确度可以达到 97.3% ,计算精度可以达到毫克级,各处位置的损伤质量均小于 0.55 g 。虽然滑轨表面的损伤非常微小,但本文方法实现了损伤的高精度量化,可以为滑轨的可靠性分析提供有效的依据。若滑轨表面损伤比较复杂,会出现损伤边界区域不连贯的现象,很可能导致不连贯的细微边界损伤漏检,从而影响整体精度。

表 1 不同位置处损伤测量结果

Table 1 Damage measurement results at different locations

Position number	Volume loss / mm^3	Mass loss / g
1	67.8052	0.5323
2	22.2279	0.1745
3	58.4361	0.4587
4	-58.9645	-0.4628
Sample	55.2044	0.4333

5 结 论

针对高速滑动电接触构件的表面损伤,利用激光扫描测量系统得到了表面形貌 3D 点云信息,建立模型提取了构件表面的损伤区域特征点,实现了表面损伤体积和损伤质量的计算,计算精度较高。由于高速滑动电接触导轨表面损伤不连续且损伤类型呈多样性,有关高速滑动电接触构件表面复杂的损伤检测尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Cao Ronggang, Su Ming, Zhang Shizhong, *et al.* Summarize and analysis of rail-gun's grooving phenomenon with large pulse current and high-velocity sliding electrical contact[J]. High Voltage Engineering, 2016(9): 2822-2829.
曹荣刚, 苏 明, 李士忠, 等. 脉冲大电流高速滑动电接触下轨道槽蚀现象的总结与分析[J]. 高电压技术, 2016(9): 2822-2829.
- [2] Chen Yun, Xu Weidong, Yuan Weiqun, *et al.* Sliding electrical contacts between aluminum armature and different material rail in railgun[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942.
陈 允, 徐伟东, 袁伟群, 等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 937-942.
- [3] Watt T J, Bourell D L. Sliding instabilities and hypervelocity gouging[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 162-167.
- [4] Watanabe Y, Saito R. Sliding scar analyses of high speed sliding contact characteristics of Cu-Sn based composite materials containing WS₂[C]. 2012 IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts, 2012: 1-5.
- [5] Meger R A, Cairns R L, Douglass S R, *et al.* EM gun bore life experiments at Naval Research Laboratory[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1533-1537
- [6] Ge X, Liu W, Yang Z, *et al.* The study on electrical temperature characteristics of high speed pantograph[C]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific, 2014: 14711406 .
- [7] Zhou Y, Yao B, Ge S, *et al.* Failure mechanism of sliding electrical contacts with various plated materials[C]. The 27th International Conference on Electrical Contacts, 2014: 1-6.
- [8] Zhang H, Sun L, Zhang Y, *et al.* The study of arc rate, friction, and wear performance of C/C composites in pantograph-catenary system[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(6): 1157-1163.
- [9] Li Fengxia, Liu Yongmei, Wang Xiaozhe, *et al.* New Delaunay triangulation algorithm of point cloud based on parametric method[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(3): 950-953.
李凤霞, 刘咏梅, 王晓哲, 等. 一种基于映射法的散乱点云 Delaunay 三角剖分算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3): 950-953.
- [10] Xiao Chao, Chen Feng, Zhong Min, *et al.* Generation method of inverse fringes based on Delaunay triangulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712001.
肖 朝, 陈 锋, 钟 敏, 等. 基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0712001.
- [11] Zhao Yang, Liu Shuai, Ma Jian, *et al.* Investigation and application of laser-EMAT testing fatigue damage of railhead [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108008.
赵 扬, 刘 帅, 马 健, 等. 混合式激光超声技术的钢轨轨头疲劳损伤无损检测研究与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108008.
- [12] Zhou Feng. Research on volume measurement of grain in storehouse based on 3D laser scanning[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 33-34.
周 峰. 基于三维激光扫描技术的仓储散粮堆体积测量系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 33-34.
- [13] 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): 90-94.
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): 90-94.
- [14] Mcdonald J, Hsieh J, Satapathy S. Numerical analysis of electrochemical erosion for functionally graded tungsten/copper materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 390-393.
- [15] Zhu Rengui, Li Zhiyuan, Zhang Qian, *et al.* Research on initial contact state of the pin rail interface of electromagnetic launch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 231-237.
朱仁贵, 李治源, 张 倩, 等. 电磁发射枢轨界面初始接触状态研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 231-237.
- [16] Wang Ying, Wu Feng, Fu Guoping, *et al.* Method for defects detection and 3D reconstruction based on dispersed points cloud[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 403-406.
王 颖, 吴 峰, 付国平. 基于散乱三维点云的缺陷检测和三维重构方法[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 403-406.