

基于三维激光扫描技术的病害隧道监测*

尹恒¹, 封全宏², 廖紫骅³, 姜丽丽⁴, 蔡继鸣⁵

(1. 四川省安全科学技术研究院, 成都 610045; 2. MultiInfo 3D Laser Scan Solution AB 公司;
3. 四川省科技交流中心, 成都 610041; 4. 西藏金海矿产资源有限公司, 成都 610081;
5. 四川省自然资源科学研究院, 成都 610015)

摘要: 现有病害隧道测量方法, 存在费时、费力、精度低和连续性差等问题, 利用三维激光扫描技术可有效解决这些弊端。于2009年和2010年利用三维激光扫描技术进行了2次现场扫描, 通过点云数据预处理和拼接等步骤获得了华蓥山隧道的点云模型。随后利用点云模型, 进行了路面破损测量和隧道变形监测。测量结果显示, 2010年较2009年, 路面裂缝地表最大宽度增大0.009 m, 到达0.045 m, 裂缝发育长度和密度有所降低; 隧道净高增加0.030 9 m~0.322 7 m, 平均为0.179 5 m, 隧道净宽增加0.021 8 m~0.058 6 m, 平均为0.039 5 m。

关键词: 三维激光扫描; 病害隧道; 隧道破损; 隧道变形; 华蓥山隧道

中图分类号: U456.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2014)04-0895-07

Disease Tunnel Monitoring Based on 3D Laser Scanning Technology

Yin Heng¹, Feng Quanhong², Liao Zihua³, Jiang Lili⁴, Cai Jiming⁵

(1. Sichuan Academy of Safety Science and Technology, Chengdu 610045, China; 2. MultiInfo 3D Laser Scan Solution AB company; 3. Sichuan Technical Exchange Center, Chengdu 610041, China; 4. Tibet Jinhai Mineral Resource Development Limited Company, Chengdu 610081, China; 5. Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, China)

Abstract: There are some disadvantages of the existing tunnel measurement methods for disease tunnel, such as laborious work, low accuracy, poor continuity, etc. Using 3D laser scan technology can effectively solve these problems. There were 2 site 3D laser scanmings carried out in 2009 and 2010, through point cloud data pre-processing, splicing and other steps, the point cloud model of Huayingshan tunnel was gained, and then, the point cloud model, was used to measure the pavement surface distress and to monitor the tunnel deformation. The results show that, the max width of surface pavement crack in 2010 increases by 0.009 m reaching 0.045 m compared with that in 2009, the crack's length and density decreased; the tunnel clear height was added by 0.030 9 m ~ 0.322 7 m, on average 0.179 5 m, the tunnel clear width increased by 0.021 8 m~0.058 6 m, or 0.039 5 m on average.

Keywords: 3D laser scan; disease tunnel; tunnel damage; tunnel deformation; Huayingshan Tunnel

1 引言

1.1 隧道病害及其监测

隧道处于天然介质的环境中, 在运营中会出现

渗漏水(水害)、衬砌裂损、隧道冻害、衬砌腐蚀、震害和洞内空气污染等病害, 还有火灾威胁。这些病害和危害对隧道的安全、舒适、正常运营有重要影响和威胁^[1]。其中隧道衬砌裂损是隧道病害的主

* 收稿日期: 2014-03-28(修改稿)

作者简介: 尹恒(1986-), 男, 四川德阳人, 硕士, 主要从事水文地质、三维扫描等领域的科研工作。

E-mail: 156852610@qq.com

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(10010204)、四川省科技支撑计划项目(2012FZ0079)

要形式。

隧道衬砌裂损的类型主要有衬砌变形、衬砌移动、衬砌开裂、衬砌腐蚀破坏、衬砌背后空洞和仰拱破碎、道床下沉、翻浆冒泥等6类^[1,2]。对衬砌裂损程度的描述内容主要包括:①裂隙宽度与分级;②裂隙错距;③裂隙间距;④裂隙密度;⑤衬砌变形;⑥衬砌背后空洞与密实性等6个方面^[1]。

传统的隧道变形测量是在洞壁埋点,利用全站仪、水平仪、收敛仪等进行监控,但这耗时耗力,且埋点容易在施工和运营期内被破坏掉,导致之前的监测数据不能连续,不能真正的控制隧道的变形^[3]。裂缝的错距、扩张程度观测多在裂缝处设置灰块、钎钉、金属板等埋件,然后根据埋件的相互移动位置计算错距和扩张程度,这类方法虽然简便易操作,但是测量精度较差,且预制埋件易被损毁,破坏监测的连续性。裂缝宽度测量一般采用裂缝插片尺和裂缝观测仪进行,该方法费时费力且测量精度较差。

1.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是上世纪九十年代中期开始出现的一项高新技术,有人称“三维激光扫描系统”是继GPS(Global Position System)技术以来测绘领域的又一次技术革命^[4,5]。目前,大多数激光扫描仪所采用的工作方式是脉冲激光测距(Time of Flight)的方法,采用无接触式高速激光测量,以点云形式获取扫描物体表面阵列式几何图形的三维数据。该类仪器主要包括激光测距系统、扫描系统和支架系统,同时集成数字摄影和仪器内部校正等系统^[6]。三维激光扫描技术具有扫描速度快、非接触式工作、数据信息丰富、主动性工作、高精度、高分辨率、高密度、可测量、数字化采集等诸多优点^[7]。三维激光扫描技术目前在建筑与文物保护,地面景观形体测定,城市三维可视化模型的建立,变形监测,岩土、地质工程、水文地质,林业,工程测量等领域都取得了应用成果,而且三维激光测量技术以其低成本和灵活性等优势将在更多的行业发挥更多更广泛的作用^[8~10]。

本文将采用Leica HDS 6000 三维激光扫描仪对G42 沪蓉高速的华蓥山隧道进行扫描,以研究三维激光扫描技术在病害隧道测量中的应用。

2 隧道和扫描仪情况

华蓥山隧道位于四川省华蓥山脉中段(图1),

是国道主干线成都到上海高速公路(G42 沪蓉高速)广安至邻水段的关键控制工程,隧道全长9 411.9 m,其中,左、右线等线为4 705.95 m,线间距40 m。该隧道地质构造复杂,穿越煤层、岩溶地质、断层、背斜高应力核部,并伴有瓦斯、天然气、石油气、硫化氢等多种有毒、有害气体,施工难度大。隧道于2000年12月26日建成通车。目前主要存在渗漏水、涌水突泥、有毒有害气体浓度增大、机电设备老化、结构性病害和路面破损等问题。

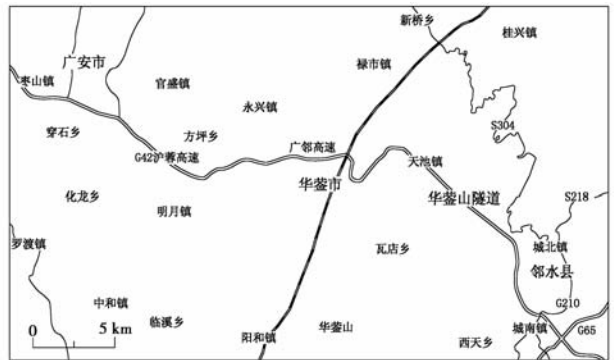


图1 华蓥山隧道位置图

Fig. 1 Location map of Huayingshan Tunnel

Leica HDS 6000 三维激光扫描仪是Leica公司高清晰测量系统(High Definition Surveying)的系列产品。工作时,扫描仪在水平面上沿顺时针方向匀速旋转,同时激光束沿垂直方向逐行扫描物体表面,仪器自动解析记录激光的回波信号。经过解算后得到的向量数据,经缓冲分块后通过TCP/IP协议传输到数据记录设备中,以数据库格式保存。仪器主要参数见表1。

3 现场工作方案

3.1 现场踏勘与定点

在扫描工作开始前首先到现场进行踏勘,踏勘工作主要包括3个方面,首先是根据隧道的空间分布、形态和病害发育特征等,确定扫描需要的精度、分辨率及扫描站点;其次是查看已有控制点的位置、保存情况和使用的可能性,根据现有大地测量条件和扫描站点位置考虑控制点联测的大概方案和扫描模型的拼接方式;最后是绘制现场草图和对主要扫描对象拍照,为后续扫描工作实施做准备。布置扫描站点为保证整体扫描质量的一致性,相邻2站点间的数据应有1/4~1/3的重合,同时在相邻站点间至少布置3个公共标靶用于后期点云数据的拼接工作。

表 1 HDS 6000 主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of HDS 6000

位置		6 mm/1 ~ 25 m 扫描范围	10 mm/50 m 扫描范围
单点 测量 精度		90% 反射率	18% 反射率
	距离	≤4 mm/扫描范围 25 m 以内	≤5 mm/扫描范围 25 m 以内
		≤5 mm/扫描范围 50 m 以内	≤6 mm/扫描范围 50 m 以内
角度(水平/垂直)		125 μrads/125 μrads	
激光 扫描 系统	激光		
	光斑大小	3 mm@ 出口 ;8 mm@ 25 m ;14 mm@ 50 m ;发散度 0.22 mrad	
	范围	79 m@ 90% 反射率 ;50 m@ 18% 反射率	
	扫描速度	最大瞬时速度 ,500 000 点/秒	
	扫描密度	点间距@ 10 m	点间距@ 50 m
	“预览”	50.6 mm × 50.6 mm	250 mm × 250 mm
	中速(4 倍)	12.6 mm × 12.6 mm	62 mm × 62 mm
	高速(8 倍)	6.3 mm × 6.3 mm	31.4 mm × 31.4 mm
	特高速(16 倍)	3.1 mm × 3.1 mm	15.8 mm × 15.8 mm
	超高速(32 倍)	1.6 mm × 1.6 mm	7.9 mm × 7.9 mm
其他	标靶获取精度	2 mm	

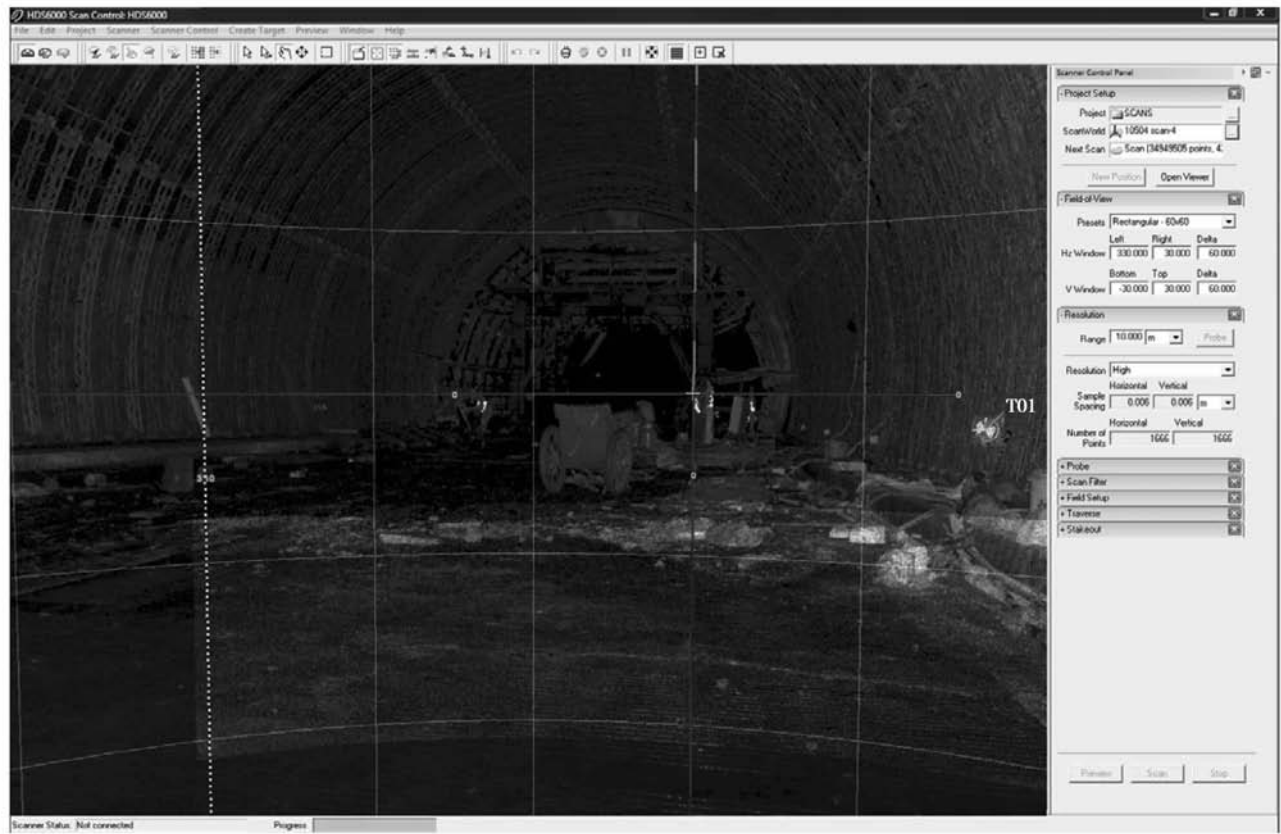


图 2 扫描参数设置界面

Fig. 2 Scan parameters setting interface

根据隧道管理方的要求,本次仅对华蓥山隧道中的一段进行了扫描测量,共布设 4 个扫描站点;通过 2009 年和 2010 年两次扫描数据,分别对隧道进行变形监测和破损测量。

3.2 实施扫描

根据计划扫描方案开始工作,首先需适当架高扫描仪,这样一来可避免扫描仪被隧道护栏、来往车辆等物体过多遮拦;二来也可避免扫描激光束与地面夹角过小而造成扫描精度下降。在扫描前,应从扫描仪视野范围中圈选出被扫描物体以大大减少扫描时间,提高效率,本次对隧道的扫描是采用全景扫描。点云的密度取决于激光点位间隔,本次扫描采用高速模式,即在 10 m 处激光点间距为 6.3 mm×6.3 mm(图 2)。扫描后应及时观察点云以确定是否需要补扫或重复扫描。扫描完成后,还要对扫描区域进行拍照,获取色彩和纹理信息。当扫描仪自带摄像头像素太低不能满足贴图要求时,还要用高像素数码相机手动补拍。

4 数据处理

4.1 点云数据的预处理

由于扫描过程中外界环境因素对扫描目标的阻挡和遮掩,如移动的车辆、行人的遮挡,及实体本身的反射特性不均匀,需要对点云进行过滤,剔除点云数据内含有的不稳定点和错误点。实际操作中,需要选择合适的过滤算法来配合这一过程自动完成。

4.2 点云数据的拼接

对不同扫描站点得到的点云数据,需要将其整合到统一的坐标系下。常用的点云拼接方法有 3 种,分别是:①使用磁性标靶或者是球形标靶、纸质黑白标靶;②点云数据上重合的部分特征点;③布设测量控制网(可以是国家坐标系、地方坐标系、自由坐标系等)。拼接完成后,各个点云间的拼接精度一般不宜超过 5 mm。

由于未要求使用全站仪进行导线测量,所以本次主要采用公共标靶对扫描的 4 站点云数据进行拼接,同时辅以特征点加强拼接精度,最终拼接精度如表 2 所示。由表可见,本次点云拼接的最大误差为 1 mm,符合工程项目精度的要求。随后生成拼接完成的点云模型以进行后续工作,华蓥山隧道最终点云模型如图 5 所示。

表 2 华蓥山隧道点云拼接精度表
Table 2 Point cloud splicing accuracy table of Huayingshan Tunnel

Constraints				
Name	ScanWorld		ScanWorld	Error
Target ID:T01	10504 scan-1	10504 scan-2		0.001 m
Target ID:T03	10504 scan-1	10504 scan-2		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-1	10504 scan-2		0.001 m
Target ID:T01	10504 scan-1	10504 scan-3		0.001 m
Target ID:T03	10504 scan-1	10504 scan-3		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-1	10504 scan-3		0.000 m
Target ID:T01	10504 scan-1	10504 scan-4		0.000 m
Target ID:T03	10504 scan-1	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-1	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T01	10504 scan-2	10504 scan-3		0.001 m
Target ID:T02	10504 scan-2	10504 scan-3		0.000 m
Target ID:T03	10504 scan-2	10504 scan-3		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-2	10504 scan-3		0.001 m
Target ID:T01	10504 scan-2	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T02	10504 scan-2	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T03	10504 scan-2	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-2	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T01	10504 scan-3	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T02	10504 scan-3	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T03	10504 scan-3	10504 scan-4		0.001 m
Target ID:T04	10504 scan-3	10504 scan-4		0.001 m
Cloud/Mesh 1	10504 scan-2	10504 scan-3		0.001 m
Cloud/Mesh 2	10504 scan-2	10504 scan-4		0.000 m
Cloud/Mesh 1	[10504 scan-2;10504 scan-3]			

5 成果及分析

5.1 路面破损测量

按上述技术路线,分别测量 2009 年和 2010 年路面破损情况,如图 6 和图 7 所示,并进行叠加对比分析(图 3)。从 3 幅点云数据图中可清楚的看见路面裂缝发育的大小、方向和密度。

测量结果显示,2009 年裂缝地表最宽处为 0.036 m,2010 年裂隙最宽处为 0.045 m,两年测得裂缝最宽处为相同位置。可见相比于 2009 年,2010 年路面裂缝增大 0.009 m。

将 2009 年和 2010 年的测量结果叠加(图 3),对比裂缝发育程度。由图可见,2010 年裂缝发育长度和密度较 2009 年有所降低。这与测得裂缝宽度增大有所矛盾,综合现场扫描和数据分析等情况,判断应是 2010 年扫描时,隧道处于维护期,现场情况比较混乱,地面杂物多且泥泞,地面上的裂缝部分被泥、水等杂物充填而无法扫描解译。

5.2 隧道变形监测

在 2009 年和 2010 年的扫描段中,共选取 5 个相同的横断面位置,如图 3 所示。绘制横断面图(图 4),统计净高和净宽,以计算隧道变形量(表 3)。

由于点云带有空间位置数据,在处理软件中可轻易、快速的测量需要位置的宽度和高度,亦可将横断面的点云数据转换为 DXF 数据进行保存、打印、查验和测量。图 4 展示的是 2009 年 1-1 横断面图,该图主要由坐标方向、隧道轮廓、净高和净宽组成。可以清楚的从图中看出隧道的轮廓以及相应尺寸的大小。

表 3 为所有 5 个断面 2 年内净高和净宽的统计表。由表中可知,2010 年净高较 2009 年增加 0.030 9 m~0.322 7 m,平均为 0.179 5 m;2010 年净宽较 2009 年增加 0.021 8 m~0.058 6 m,平均为 0.039 5 m。总体上,2010 年隧道横截面空间较 2009 年略有扩大;净高扩大程度较净宽大。2010 年扫描时正处于隧道整修期,为治理渗漏水等问题,对隧道内壁进行了部分清理,因此测量结果不能真实反映隧道变形规律。

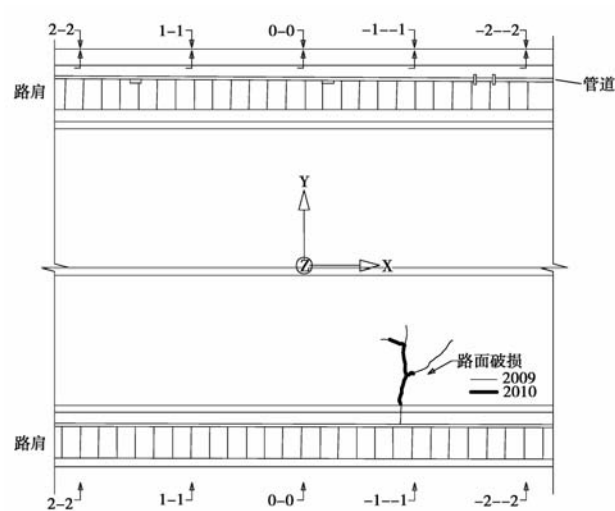


图 3 2009 年和 2010 年路面破损对比
Fig. 3 Comparison of pavement surface distress in 2009 and 2010

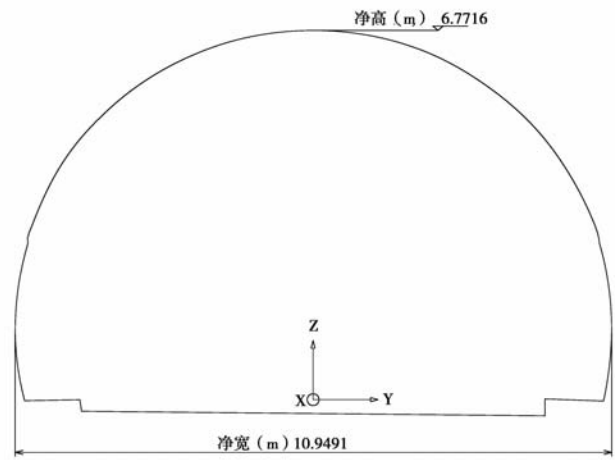


图 4 2009 年 1-1 横断面图
Fig. 4 Cross section 1-1 in 2009

表 3 隧道变形监测统计表
Table 3 Tunnel deformation monitoring table

横断面编号	净高 (m)			净宽 (m)		
	2009 年	2010 年	变化	2009 年	2010 年	变化
2-2	6.800 1	7.122 8	+0.322 7	10.935 1	10.976 9	+0.041 8
1-1	6.771 6	7.038 6	+0.267 0	10.949 1	11.007 7	+0.058 6
0-0	6.771 6	6.948 2	+0.176 6	10.961 7	11.010 1	+0.048 4
-1 - -1	6.750 6	6.850 8	+0.100 2	10.977 3	11.004 1	+0.026 8
-2 - -2	6.736 8	6.767 7	+0.030 9	10.967 5	10.989 3	+0.021 8
平均	6.766 1	6.945 6	+0.179 5	10.958 1	10.997 6	+0.039 5

6 结 论

采用三维激光扫描技术,对华蓥山隧道进行了路面破损测量和隧道变形监测。由于获得的点云模型是隧道真实场景的数字重现,因此可以在数据处理过程中灵活的绘制隧道横断面和测量裂缝宽度、长度、间距等。本次测量结果显示,2010 年路面裂缝地表最宽处增大 0.009 m,到达 0.045 m,2010 年裂缝发育长度和密度较 2009 年有所降低;通过 5 个隧道横断面的对比,2010 年隧道净高增

加 0.030 9 m~0.322 7 m,平均为 0.179 5 m;2010 年隧道净宽增加 0.021 8 m~0.058 6 m,平均为 0.039 5 m;净高扩大程度较净宽大。

在保证扫描距离和点云密度的条件下,三维激光扫描技术可应用于病害隧道的高精度测量。三维激光扫描系统的高效率、高精度等特点,可大大提高病害隧道的测量工作效率,减轻人员工作强度。对病害隧道测量的进一步研究方向主要有:1)连续监测数据的对比;2)扫描坐标与隧道坐标的整合;3)多站点云数据的自动拼接。

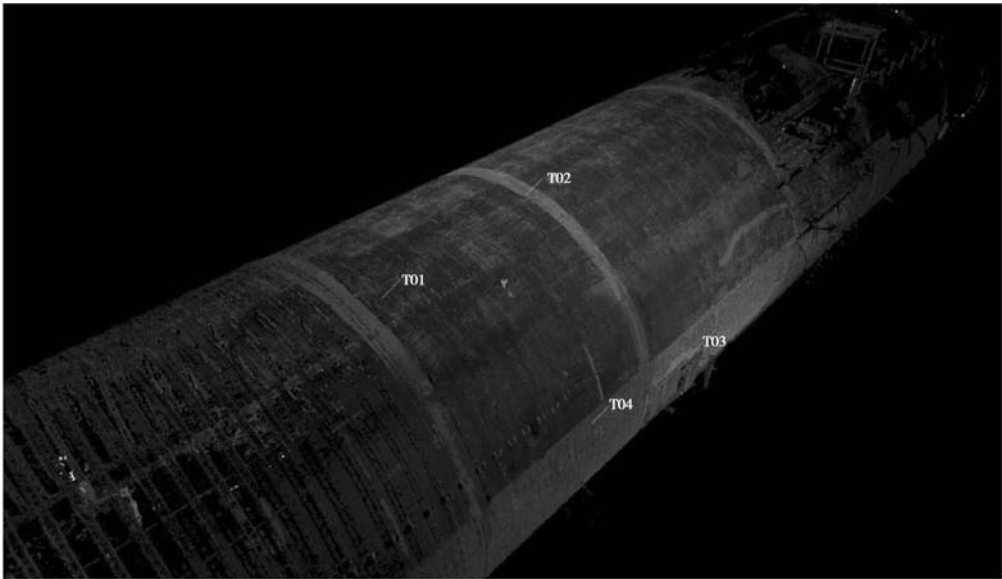


图 5 华蓥山隧道点云模型
Fig.5 Point cloud model of Huayingshan Tunnel



图 6 2009 年路面破损(0.036 m)
Fig.6 Pavement surface distress in 2009



图7 2010年路面破损(0.045 m)

Fig.7 Pavement surface distress in 2010

参考文献 (References)

- [1] 杨新安,黄宏伟.隧道病害与防治[M].上海:同济大学出版社,2003. (Yang Xinan, Huang Hongwei. Tunnel disaster prevention and treatment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 方利成,杜彬,张晓峰,等.隧道工程病害防治图集[M].中国电力出版社,2001. (Fang Licheng, Du bin, Zhang Xiaofeng, et al. Construction of tunnel disease control atlas[M]. Beijing, China Electric Power Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 侯海民.三维激光扫描仪在青岛胶州湾海底隧道的应用[J].隧道建设,2010, 30(6): 693-696. (Hou Haimin. Application of 3-D laser scanner in Jiaozhou Bay Undersea Tunnel in Qingdao[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 693-696. (in Chinese))
- [4] 马立广.地面三维激光扫描仪的分类与应用[J].地理空间信息,2005, 3(3): 60-62. (Ma Liguang, Classification and Application of Terrestrial Laser Scanners[J]. Geospatial Information, 2005, 3(3): 60-62. (in Chinese))
- [5] 李兆堃,严勇.三维激光扫描在工程测量中的应用研究[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2009, 22(1): 48-52. (Li Zhaokun, YAN Yong Application of Three-dimensional Laser Scanning in the Modern Engineering Survey[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2009, 22(1): 48-52. (in Chinese))
- [6] 董秀军.三维激光扫描技术及其工程应用研究[D].成都:成都理工大学,2007. (Dong Xiu jun. The Three-Dimensional Laser Scanning Technique and Research on Its Engineering Application [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese))
- [7] 戴升山,李田凤.地面三维激光扫描技术的发展与应用[J].现代测绘,2009, 32(4): 11-12. (Dai Shengshan, Li Tianfeng. The development and application prospects of ground three-dimensional laser scan technology [J]. Modern Surveying and Mapping, 2009, 32(4): 11-12. (in Chinese))
- [8] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描测量在汶川地震后都汶公路快速抢通中的应用[J].工程地质学报,2008, 16(6): 774-779. (Dong Xiu jun, Huang Runqiu. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 16(6): 774-779. (in Chinese))
- [9] 宋宏.地面三维激光扫描测量技术及其应用分析[J].测绘技术装备,2008, 10(2): 40-43. (Song Hong. Ground 3D laser scanning measurement technology and its application analysis [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2008, 10(2): 40-43. (in Chinese))
- [10] 姜丽丽,吴勇,尹恒,等.三维激光扫描技术在地表巨粒组粒度分析中的应用[J].地质灾害与环境保护,2012, 23(1): 103-106. (Jiang lili, Wu Yong, Yin Heng, et al. Applying 3D laser scanning in granularity analysis of the surface giant particle [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(1): 103-106. (in Chinese))