

DOI: 10.11973/wsdc201807011

# 回弹法及三维激光扫描技术在地铁线路结构健康检测中的应用

陈 涛,翟 超,范鹏程,张 敏,王鑫森

(天津市勘察院,天津 300191)

**摘要:**采用回弹法对某地铁线路新建基坑进行检测,利用钢筋检测仪探测钢筋的位置及间距,使用质量分数为1%酚酞酒精溶液和混凝土碳化深度尺测量混凝土表面的碳化深度,再用回弹仪测取混凝土表面的回弹值,根据平均回弹值及平均碳化深度可得出混凝土强度换算值,继而计算出混凝土强度推定值。通过现场检测,总结了回弹法检测混凝土强度精确度的影响因素以及提高检测精确度的措施。采用三维激光扫描技术结合人工方法对地铁线路结构平面、断面进行测量,再对其使用现状进行调查。检测及现状调查结果表明,该地铁线路结构车站、区间隧道混凝土强度符合原设计要求,地铁结构存在剥落、裂纹、渗水等病害,研究成果可为地铁结构健康评估提供参考及依据。

**关键词:**地铁结构;回弹法;三维激光扫描技术;混凝土;健康检测

中图分类号: TU528; TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2018)07-0049-05

## Application of the Rebound Method and the 3D Laser Scanning Technology in the Health Detecting of Metro Line Structure

CHEN Tao, ZHAI Chao, FAN Pengcheng, ZHANG Min, WANG Xinsen

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Tianjin 300191, China)

**Abstract:**The rebound method is used to detect the metro line new foundation pit concrete structure, and the position and spacing of the rebar are detected by using the rebar detector. The carbonization depth of concrete surface was measured by 1% phenolphthalein alcohol solution and carbide depth gauge, and resilience instrument is used to measure the rebound value of concrete. The concrete strength conversion value is obtained based on the average rebound value and the average carbonation depth, then the concrete strength is calculated. Through on-site detect, the factors influencing the accuracy of concrete strength and the measures to improve the accuracy of the test are summarized. 3D laser scanning technology combined with the artificial method is used to measure the structure plane and section of the metro, and its use status is then investigated. The detect and current situation investigation results indicate that the concrete strength of metro structure station and interval tunnel conforms to the original design requirements, there are whereas peeling, cracking, seepage and other damages existing in the metro structure. The results can provide reference and basis for the health assessment of metro structure.

**Key words:** metro structure; rebound method; 3D laser scanning technology; concrete; health detecting

运营地铁线路结构受各地区地质、水文和气候等因素的影响,可能会出现原因复杂的多种病害<sup>[1-2]</sup>。随着基础建设的快速发展,时常会有新建工

程与城市已运营地铁线路相邻近的情况出现。对原有地铁线路的健康状况进行合理的检测和评估,可以为邻近新建设工程的施工以及原有地铁线路的安全运营提供参考<sup>[3-4]</sup>。

混凝土结构检测主要包括无损检测和局部破损检测等方法<sup>[5]</sup>。检测的内容主要包括结构损伤、裂缝等病害的检测,以及强度检测,其中强度检测非常

收稿日期:2018-02-05

作者简介:陈 涛(1985—),男,工程师,硕士,主要从事地铁结构健康检测方面的工作

通信作者:陈 涛,496979570@qq.com

重要。通过混凝土表面硬度与强度的密切关系,可以实现对其强度的检测,回弹法便是其中较常用的检测方法。回弹法具有方便快捷、精度较高以及费用较低等特点。魏连雨等<sup>[6]</sup>采用中型和高强型回弹仪对C50~C80混凝土试块进行回弹检测,并对结果进行拟合,分别建立了相应的测强曲线并验证其适用性。张小琼等<sup>[7]</sup>从混凝土结构强度和缺陷出发,综合介绍了无损检测混凝土的多种方法,其中包括回弹法。刘淑娟<sup>[8]</sup>采用回弹法对地铁结构混凝土设计强度试块进行了强度检测,建立了相应的测强曲线,并对其所适用的强度段进行了研究。

三维激光扫描技术利用激光测距的原理,记录被扫描物体表面的三维点云数据,从而可以快速建立被扫描物体的三维模型以及线、面、体等图像数据。李程等<sup>[9]</sup>通过对地铁隧道变形监测中三维激光扫描技术的应用,提出了基于激光点云的隧道断面

连续提取方法。梅文胜等<sup>[10]</sup>将三维激光扫描仪与轨检小车相结合,对运营期的地铁隧道断面进行测量,总结了测量信息的提取方法。

某运营地铁邻近有一个即将新建的基坑工程,为了探究此已运营地铁结构邻近基坑区段的现状,笔者采用回弹法和三维激光扫描技术对其进行检测及调查,从而为地铁的安全运营提供保障。

## 1 工程概况

该工程涉及既有地铁里程范围为AK14+950~AK15+325,涉及地铁隧道区间及车站,并将此里程范围分为区间、车站公共区、车站设备区、车站渡线段4个部分,其中区间和车站公共区为此新建工程的影响段,共210 m,车站设备区和车站渡线段为辅助段,共165 m,里程分段及其与新建基坑工程相对位置关系如图1所示。

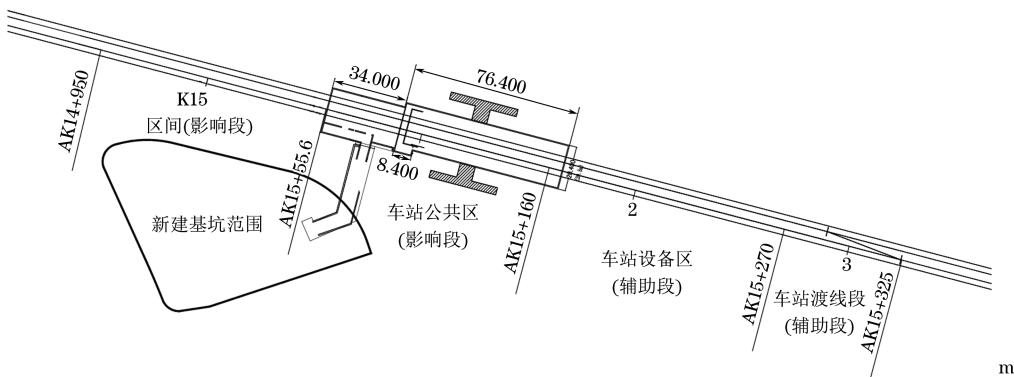


图1 某工程地铁里程分段及其与新建基坑工程相对位置关系示意

## 2 回弹法检测混凝土强度

### 2.1 回弹法技术原理

回弹法是利用回弹仪对混凝土表面进行弹击以获取回弹值,回弹值的大小主要取决于与混凝土弹塑性性能有密切关系的回弹能量。同时,用质量分数为1%的酚酞酒精溶液和碳化深度尺对混凝土碳化深度进行测量,以得出混凝土强度的

换算值,进而计算其强度推定值。作为无损检测方法的一种,其获取的数据样本量大,能够很好地反映出混凝土的均质性和变异性。

### 2.2 仪器设备

检测仪器有:回弹仪、钢筋探测仪、1%酚酞酒精溶液、碳化深度尺、电钻、吹球、钢砧。

采用的回弹仪是山东省乐陵市回弹仪厂生产的型号为ZC3-A的中型回弹仪,其主要技术参数见表1。

表1 回弹仪主要技术参数表

型号	标称动能/J	弹击锤冲击长度/mm	拉簧刚度/(N·m <sup>-1</sup> )	外形尺寸/mm	弹击杆端部球面半径/mm	钢砧率定值	指针摩擦力/N
ZC3-A	2.207	75	785	φ 55×285	25	80±2	0.65

### 2.3 检测范围及测区布设

根据里程范围及工程要求确定该工程的检测范围,按照相关规范JGJ/T 23—2011《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》的要求进行测区布设,具体见表2。

### 2.4 检测结果

为了更加清晰地了解隧道和车站结构各箱体(构件)不同部位的混凝土强度,分别对地铁结构里程范围内隧道和车站的侧壁、道床、隔离柱以及车站站台的混凝土强度进行检测。根据各测区测得的回

弹性及碳化深度,可以根据规范 JGJ/T 23—2011 查得混凝土抗压强度换算值,然后计算平均值和标准

差,进而计算混凝土抗压强度推定值。依据现场检测数据,检测结果见表 3( $f_{cu,e}$  为混凝土强度推定值)。

表 2 工程检测范围及测区布设

起点里程	终点里程	位置	测区布设	备注
AK14+950.0	AK15+55.6	区间	9个断面,每个断面10个测区	影响段
AK15+55.6	AK15+160.0	车站公共区	9个断面,每个断面10个测区	影响段
AK15+160.0	AK15+270.0	车站设备区	9个断面,每个断面10个测区	辅助段
AK15+270.0	AK15+325.0	车站渡线段	5个断面,每个断面10个测区	辅助段

表 3 各区段混凝土强度检测结果

检测区段	结构检测部位							
	侧壁		道床		隔离柱		站台	
	碳化深度/mm	$f_{cu,e}/\text{MPa}$	碳化深度/mm	$f_{cu,e}/\text{MPa}$	碳化深度/mm	$f_{cu,e}/\text{MPa}$	碳化深度/mm	$f_{cu,e}/\text{MPa}$
区间	2.0	28.6	2.5	26.5	2.5	25.5	—	—
车站公共区	2.5	27.5	2.0	26.2	2.5	24.6	2.0	22.2
车站设备区	2.0	29.2	2.5	27.3	2.0	25.1	—	—
车站渡线段	2.5	28.7	2.0	27.6	2.0	25.7	—	—

根据设计资料可知,此地铁结构车站及隧道的侧壁、道床及隔离柱的混凝土设计标号均为 250<sup>#</sup>,相当于原规范 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》中的 C23;站台的混凝土设计标号为 200<sup>#</sup>,相当于原规范 GB 50010—2002 中的 C18。由表 2 可以看出,各里程范围(区间、车站公共区、车站设备区、车站渡线段)侧壁的混凝土强度推定值分别为 28.6,27.5,29.2,28.7 MPa;道床的混凝土强度推定值分别为 26.5,26.2,27.3,27.6 MPa;隔离柱的混凝土强度推定值分别为 25.5,24.6,25.1,25.7 MPa;车站公共区站台的混凝土强度推定值为 22.2 MPa。混凝土强度符合原设计要求。由设计资料可知,此地铁最初是按照人防工程的标准修建的,因而其修建时的施工质量要求很高,在混凝土浇注、养护等环节的施工把控很严,因而其混凝土强度较高。

在检测过程中可以发现,地铁结构各里程范围同一结构(侧壁、道床、隔离柱以及站台)的混凝土表面回弹值有一定程度的变化,分析大致有以下几方面的原因:①混凝土表面碳化层的存在,且碳化深度不一,致使使用回弹仪在混凝土表面进行回弹检测时,回弹值大小不一;②混凝土表面存在骨料,当回弹仪撞针打到骨料处时,回弹值会有所提高;③现场人工操作存在一定的误差。

在采用回弹法检测混凝土强度时,应注意以下几点:①现场操作需规范,尽量做到回弹时用力

均匀,且回弹仪应垂直于结构表面;②检测前后需在钢砧上校准回弹仪;③检测前,认真处理结构表面,需做到测试面清洁、平整、干燥,没有蜂窝、麻面及凹陷、混有杂物等异常区域和部位;④测量碳化深度时,应在结构表面形成“品”字形坑洞,直径约为 15 mm,深度应大于碳化深度。

### 3 三维激光扫描技术对结构平面、断面的测量

#### 3.1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描工作是基于 GRP5000 & IMS5000 三维激光扫描系统完成的。其中,GRP5000 集成了 TGS FX 手推式轨检小车和高速激光扫描测量技术。当小车在轨道上行走时,高速旋转的激光扫描仪发射的激光以螺旋线的形式对隧道表面进行全断面扫描,获取点云数据,系统通过分析发射和接收到的激光信号(强度和相位差),可以获得隧道衬砌的内表面影像图以及隧道衬砌表面各点距轨道中心线的距离,可进行表面病害检测,限界检测,隧道变形测量及椭圆度、横径收敛值、错台量的分析。IMS5000 在 GRP5000 的基础上增加了惯导模块,该惯导模块可在激光仪扫描的同时记录线路线形轨迹,可快速高效地完成轨道及轨道周围建、构筑物(相邻轨道、隧道、接触网等)信息的三维数据采集。通过此扫描系统完成对隧道及车站结构平面、断面测量以及病害的调查工作。

### 3.2 仪器设备

涉及到的仪器设备主要为 TGS FX 手推式轨

检小车、Amberg Profiler 6012 高速相位式激光扫描仪,其主要技术参数如表 4,5 所示。

表 4 TGS FX 手推式轨检小车主要技术参数

里程测量方式	轨距测量精度/mm	轨道中心线绝对测量精度/mm	隧道中心线绝对测量精度/mm	限界测量精度/mm	病害最小裂缝检测宽度/mm
光电计数器测量	±0.5	±3	±5	±3	0.3

表 5 Amberg Profiler 6012 高速相位式激光扫描仪主要技术参数

旋转频率/Hz	扫描样本数/ $r^{-1}$	采样频率/ $s^{-1}$	隧道表面成像测量速度/(km·h <sup>-1</sup> )	图像分辨率/(mm×mm)	测距范围/m	断面-限界测量精度/mm
200	5 000	$1 \times 10^6$	1.8	3×3	0.3~9	±3

### 3.3 车站公共区平面、断面测量

使用 GRP5000 & IMS5000 三维激光扫描系统对车站公共区现状结构进行三维扫描,每个扫描坐标点都有实地三维坐标与其相对应,其点云俯视图及立体图如图 2 所示。

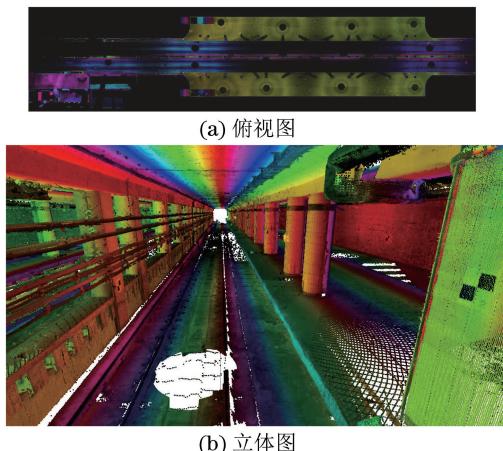


图 2 车站公共区(车站主体)三维扫描点云俯视图及立体图

从点云图中导出适合高程位置的水平面切片数据,并以点云格式导入 CAD 作为底图,以此生成平面图;根据剖面要求首先定出建筑的方向,并从点云图导出带尺寸的正射影像图,将正射影像图导入 CAD 作为底图,以此生成剖面图。生成的车站主体部分的平面图和剖面图(见图 3)。

### 3.4 区间、车站设备区、车站渡线段断面测量

使用相同方法选取典型断面对区间、车站设备区、车站渡线段的断面进行测量,测量结果见图 4~6。

## 4 结构使用现状调查

### 4.1 区间、车站设备区、车站渡线段结构使用现状调查

对车站公共区采用三维激光扫描系统生成正射影像与人工调查核实相结合的方式,进行全面的病

害调查和统计。由于区间、车站设备区、车站渡线段属于矩形箱体结构,故采用矩形截面展开的方式,生

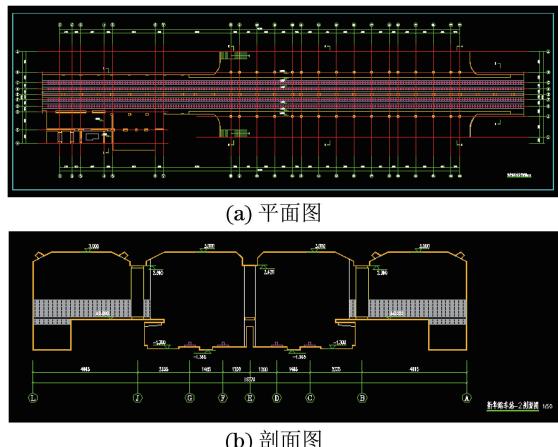


图 3 车站公共区(车站主体)结构实测平面图和剖面图

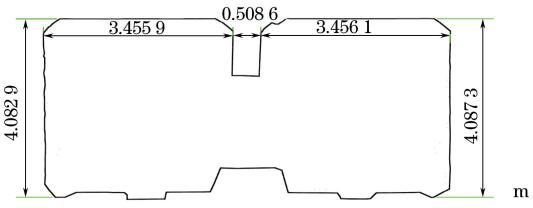


图 4 区间典型断面图

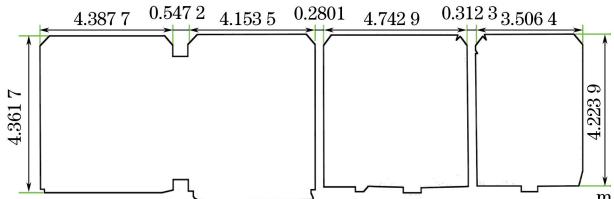


图 5 车站设备区典型断面图

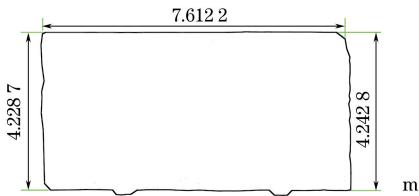


图 6 车站渡线段典型断面图

成区间隧道的内壁正射影像图,为了便于病害影像读图,截面展开示意如图7所示。

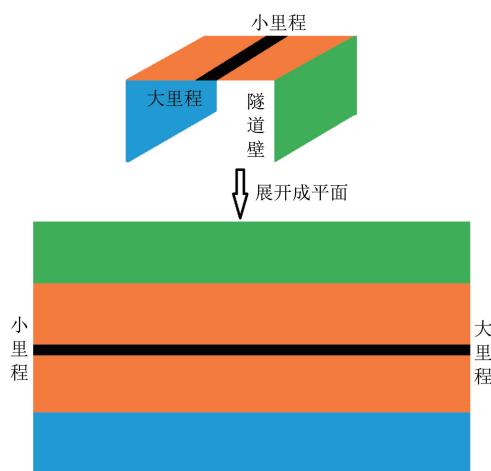


图7 区间隧道的内壁正射影像展开示意

区间、车站设备区、车站渡线段内的病害以剥落、裂纹为主,个别位置有渗水,其总体统计结果如表6,7所示。典型病害影像如图8所示。

表6 病害统计表

病害类型	面积/m <sup>2</sup>	检出数
裂纹	—	6
剥落	90.58	25
结构抹灰处开裂	—	6

表7 病害分区统计表

分区	病害类型	面积/m <sup>2</sup>	检出数
K14+974~	裂纹	—	2
K14+995	剥落	17.59	9
K14+995~	裂纹	—	3
K15+015	剥落	21.08	7
K15+015~	裂纹	—	—
K15+035	剥落	1.76	6
K15+035~	裂纹	—	—
K15+055	剥落	4.3	3
K15+166~	裂纹	—	1
K15+209	剥落	1.87	4
K15+209~	结构抹灰处开裂	—	1
K15+236	剥落	13.06	13
K15+236~	结构抹灰处开裂	—	2
K15+257	剥落	8.84	23
K15+257~	结构抹灰处开裂、渗水	—	1
K15+296	剥落	2.49	8
K15+296~	结构抹灰处开裂	—	2
K15+345	剥落	19.59	33

#### 4.2 车站公共区结构使用现状调查

由于车站公共区站体横截面为不规则变化的异形结构,正射影像投影规则不适用于此,因此,车站

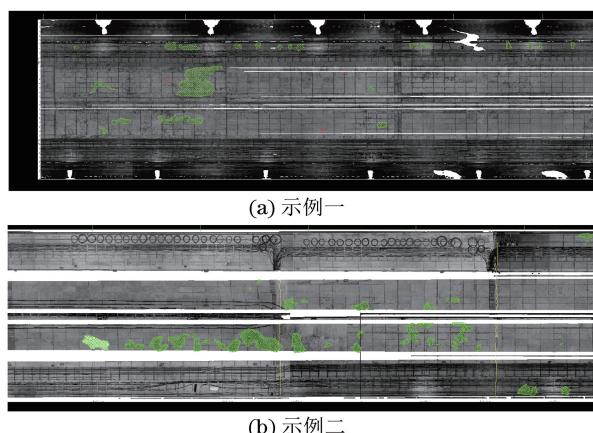


图8 典型病害影像示例

公共区采用人工拍照调查为主、激光扫描影像为辅的方法进行现状调查。由现场调查可知,该区段内的病害主要为结构缝处表面破损开裂,典型病害照片如图9所示。



(a)示例一



(b)示例二

图9 典型病害照片

#### 5 结论

(1) 利用回弹法对地铁结构混凝土强度进行检测,由回弹值、碳化深度调查表计算得到混凝土的换算强度及推定强度,地铁隧道里的同一结构(侧壁、道床、隔离柱)的混凝土强度相差不大,站台的混凝土强度低于前者。

(2) 进行回弹检测时,需严格按照规范进行操作,使用前校准、清理结构表面,用力均匀,回弹仪垂直于结构表面等因素均会直接影响检测结果。

(下转第64页)

## “超声导波检测技术应用与发展”专题征稿启事

超声导波技术是一项近年来广受关注的无损检测技术,相比传统超声检测,其优点在于传播距离远、检测效率高且范围广,因而有着良好的应用前景。《无损检测》期刊拟于2018年第9期组织“超声导波检测技术应用与发展”专题。专题在介绍超声导波理论及特点的基础上,综述超声导波检测技术的国内外发展、研究现状及其未来发展趋势;并以工程应用为例,重点报道超声导波技术在无损检测领域的应用进展及其面临的机遇与挑战。

现特向行业内相关专家、学者及工程检测人员征稿,征稿内容包括但不限于以下内容,欢迎大家踊跃投稿!

### 征稿内容

- (1) 超声导波理论、检测原理与特点;
- (2) 超声导波检测技术的发展现状及其未来发展趋势;
- (3) 超声导波检测技术的工程应用;
- (4) 超声导波检测仪器与设备的研制与应用;

(上接第53页)

(3) 测量碳化深度时,应注意结构表面坑洞的直径和深度,直径约为15 mm,坑洞的深度应大于混凝土的碳化深度,且应“品”字形布置,并根据规范进行测量取值。

(4) 对地铁结构进行平面和断面测量时,合适高程位置的水平面切片数据的导出与选择很重要,这是生成平面图的基础。

(5) 正射影像投影规则不适用于不规则变化的异形结构,此时若仍然只使用此方法进行病害调查,获得的数据是不准确的,此时需要结合人工拍照,用激光扫描影像辅助的方法进行现状调查。

### 参考文献:

- [1] 刘庭金,夏文字,周书扬,等.某浅埋箱型地铁隧道病害成因分析及治理[J].铁道工程学报,2016,33(3):93-98.
- [2] 董飞,房倩,张顶立,等.北京地铁运营隧道病害状态分析[J].土木工程学报,2017,50(6):104-113.

- (5) 相关标准、规范的制定及人员培训进展;
- (6) 其他相关内容。

### 征稿要求

论文要求:综述性文章要求能总结上述领域的研究现状、评价研究进展、提出前瞻性的发展方向;研究性文章要求能反映上述领域的最新研究成果;应用性文章要求能注重技术手段、方法新颖、内容清晰,具有实际推广价值。

**论文格式** 请参考我刊已刊出文章或“征稿简则”。

**提交方式** 请登录“材料与测试网”www.mat-test.com,选择“在线投审稿”《无损检测》“作者投稿”入口。另请在投稿时于文题处注明“专题”字样,以便快速处理该专题稿件。

**截稿日期** 2018年7月30日。

《无损检测》编辑部

2017年12月

- [3] 李大鹏,黄俊.地下工程结构健康监测系统应用研究[J].现代交通技术,2017,14(3):62-66.
- [4] 傅鹤林,黄震,黄宏伟,等.基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J].工程科学学报,2017,39(5):794-801.
- [5] 吴玉妹.回弹法检测混凝土抗压强度的可靠性探讨[J].江西建材,2015(2):275-275,276.
- [6] 魏连雨,马腾飞,魏凯,等.高强混凝土回弹仪检测混凝土抗压强度的试验研究[J].混凝土,2015(2):139-141,145.
- [7] 张小琼,王战军.混凝土无损检测方法发展及应用[J].无损检测,2017,39(4):1-5.
- [8] 刘淑娟.面向地铁隧道混凝土的回弹测强研究[J].能源与环保,2017,39(11):86-90.
- [9] 李理,卢小平,朱宁宁,等.基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法[J].测绘学报,2015(9):1056-1062.
- [10] 梅文胜,魏楚文,于安斌.激光扫描小车地铁隧道断面测量方法及应用[J].测绘地理信息,2017,42(2):118-121.