

融合 BIM 与现实捕捉技术的高速公路病害 检测信息化技术研究

颜鲁鹏¹, 吴逸飞², 陈波², 韩达光^{1*}, 刘国强², 周银¹, 郭彤³, 胡兴意¹, 杨宇鹏⁴

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 重庆建工集团 四川遂资高速公路有限公司;

3. 东南大学 土木工程学院; 4. 中铁十六局 第五工程公司吴银项目经理部)

摘要: 该文从中国高速公路养护现状出发, 针对高速公路病害的数据采集效率低、处理速度慢、储存形式局限等缺点, 提出了一种结合 BIM 技术与现实捕捉技术的高速公路病害采集信息化流程。并以 12 km 的高速公路作为研究对象, 利用三维激光扫描和摄影测量技术分别针对不同病害进行了数据采集与处理, 建立了一套养护阶段高速公路 BIM 模型的分类与编码标准并搭建了基于 BIM 正向模型的病害数据库, 完成了一整套成体系的病害检测信息化技术流程及全流程试验。通过工程实践体现了该信息化流程相比传统养护流程的高效率、高准确度、低工作量的特点。

关键词: BIM; 三维激光扫描技术; 摄影测量技术; 病害检测信息化流程

近 10 年来, 随着国家实力的提升, 中国高速公路网总里程已达到世界第一, 并持续保持快速的生长速度。随着汽车的载重量不断增大和交通车流量的增加, 高速公路承受的交通荷载与日俱增, 部分老路的设计强度早已不能满足使用需求。因此, 在新老路交替的高速公路网中, 相关养护部门对高速公路的养护管理提出了更高的技术要求。现今, 中国的高速公路养护工作普遍存在着养护资金与人员投入不足、设备设施陈旧、养护科技含量低、数据记录信息化智能化程度低的劣势, 使得大部分高速公路的养护成本过高而效率却达不到期望值。BIM 技术是以三维数字技术为基础, 根据需求可集成各阶段建筑信息的工程数据模型。BIM 在建筑领域已有多年的应用, 其具备建筑物及其信息的可视性、模拟性、协调性等特点。这些特点能够为高速公路病害的收集储存提供全信息三维模型环境, 也为结构化数据的新依存方式提供可能。

随着测绘技术的发展, 同样具有三维技术特性的三维激光扫描技术和摄影测量两大现实捕捉技术逐渐开始运用于工程实践中。三维激光扫描技术是一种空间数据采集手段, 它通过对目标物体进行高速激光的扫描处理, 得到被测对象表面大量点的坐标、反射强度

和纹理信息。此项技术运用于高速公路的养护检查工作可以准确地识别出公路路面表观发生的形变, 并计算出具体的变形量。摄影测量技术近年来发展迅速, 它通过光学摄影的方式, 实现对像片的获取, 再应用一定的处理技术, 完成对被摄物体信息的获取, 包括大小、形状、特性、位置等方面的信息。摄影测量技术可以准确地对沥青路面裂缝进行长度和宽度上的尺寸计算, 相比传统方式中养护人员采取人工检查测量的方式, 其具有针对沥青路面裂缝的检测精度高、效率高、检测结果表达方式更直观的特点。

该文融合 BIM 技术的建筑体信息结构化、可视化的特点, 以及三维激光扫描和摄影测量技术的采集信息速度快、处理结果精确、数据可视性强、便于数字化建档的优势, 结合相应养护规范和工程实践提出一套高速公路病害检测信息化技术流程。并以四川遂(宁)资(阳)眉(山)高速公路某一段路作为试验路段, 进行该技术流程的试验验证。

1 工程试验背景与全流程简述

试验工程选取遂资眉高速公路遂宁至资阳段起点

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 重庆建工集团遂宁高速公路公司 BIM+GIS 关键技术研发项目

作者简介: 颜鲁鹏, 男, 硕士研究生, E-mail: 954518155@qq.com

* 通信作者: 韩达光, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: daguang.han@cqjtu.edu.cn

12 km 路段。遂资眉高速公路遂资段于 2013 年正式通车,至今运营服务 6 年,部分桥梁已进入小修保养期,道路已出现部分沉降与开裂。该段设计速度 80 km/h,路基宽度 24.5 m,双向四车道。通过相关路检报告可获得较全面的病害数据,为该项目道路病害检测信息化技术提供了较好的数据基础和参照。

依托该项目,此次先进行试验路段的数据采集与预处理工作,然后根据采集的点云数据逆向建立 BIM 模型单独作为数据保存。同时结合部分数据与养护单位提供的设计图纸完成 BIM 模型的正向建立,并对模型进行构件分类,制定相应的编码规则。再利用两种现实捕捉技术数据处理手段分析两类路面病害,最后将分析结果依托公路 BIM 模型进行记录,并将该病害记录与 BIM 逆向模型合并搭建高速公路病害数据库,完成整个流程,具体流程如图 1 所示。

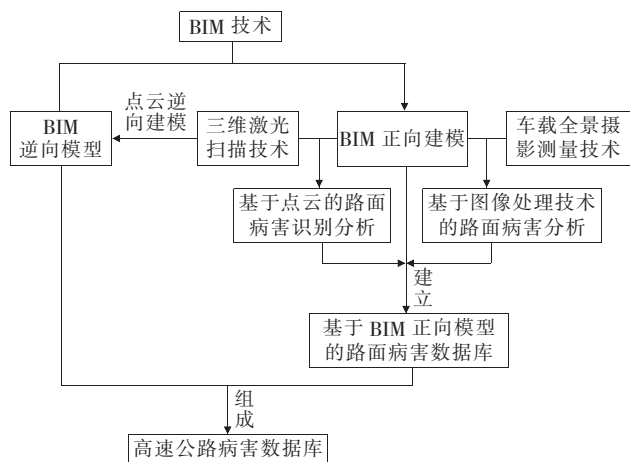


图1 结合BIM技术与现实捕捉技术的高速公路病害采集信息化流程

高速公路病害采集信息化流程

2 现实捕捉技术

2.1 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是一项源于国外的高新技术,该技术依赖于三维激光扫描仪,目前,美国、德国、加拿大和日本等国几十家高精技术公司对三维激光扫描技术的开发研究,已形成了规模较大的产业,其产品在中速度、精度、易操作性等方面已经达到了较高的水平。

该技术能够完整并高分辨率、高精度地快速扫描获取目标的真实三维数据,以点云的形式展现出来,采集到的点云数据除了具备空间几何位置外,根据扫描设备和需求的不同还含有颜色信息和反射强度信息,

使得获取的点云数据经过一系列后处理工作可以真实地呈现被扫描物体真实状态。

三维激光扫描技术在该文提出的高速公路病害检测信息化流程中的应用点主要在变形监测与逆向三维建模方面。在测量精度满足要求的前提下,这两者在土木工程实践中的应用点早已非常成熟。

(1) 测量精度

徐寿志提出了一种车载移动测量系统的综合精度评定方法。通过精度评定得到的绝对平面精度可达到 0.187 m,绝对高程精度可达到 0.251 m,具体的相对精度可达到 0.02 m。

(2) 变形监测

李强和邓辉等以某采煤沉陷区内地表变形明显、沉陷趋势显著的地表为研究对象,采用三维激光扫描技术对其进行地表沉降变形监测研究,通过对研究区两期三维激光扫描数据的收集、处理和对比分析,得到了监测区点变形量值、剖面线变形趋势、地表整体变形等监测成果。

(3) 三维建模和可视化

张毅和闫利等根据地面激光扫描的特点和公路建模要求,在点云配准和滤波等预处理后,利用点云几何信息进行了数字表面模型、等高线、纵横断面等模型生成。

2.2 车载全景摄影测量技术

车载全景摄影测量技术是利用正常速度行驶的机动车辆作为移动平台,由 GNSS/INS 组合导航模块为相机等获取传感器设备提供连续的位置和姿态信息。通过车顶的全景相机获取每一帧全景影像的位置和姿态信息,由多个镜头通过拼接扩展视场角从而实现 360°的全视域覆盖,多个镜头的同步曝光影像经过拼接处理生成全景影像。

最后通过图像处理技术可对采集到的全景影像进行数据分析,分辨出全景照片中路面的裂缝,对其进行空间尺寸的测量。宋宏勋和马建等运用两台面阵相机,对路面同一物点建立两台相机之间的映射关系,计算出倾斜拍摄图像变换后的图像,将变换后的图像与垂直拍摄的图像进行运算,实现了路面裂缝的快速分割识别。

2.3 数据的采集与预处理

(1) 车载三维激光扫描数据采集与预处理

该项目试验采用车载移动测量系统搭载的三维激光扫描仪对试验路段的全路面按上下行方向分别进行数据采集工作,扫描期间车速控制较慢,得到的数据精度较好。外业数据采集后,通过对点云数据的拼站、降

噪处理,调节整体空间位置坐标,得到扫描路段的整体点云模型。

(2) 车载全景摄影测量数据采集与预处理

试验中,车载移动测量系统在三维激光扫描信息采集的同时,其车顶搭载的多对高分辨率数码相机也通过移动摄影采集等距离间隔的路面全景数字影像。通过对试验路段路面进行连续拍照采集影像信息,而后对照片进行拼接处理得到等距离间隔的高速公路全景照片。

3 高速公路运维管养 BIM 模型构建

3.1 BIM 正向模型构建

BIM 正向模型是一种集成工程项目竣工阶段建筑信息和几何信息建立的三维数字化信息模型。在该项目中,利用施工图纸搭建的 BIM 模型更趋于是一种代表高速公路竣工阶段原始状态的信息模型。对高速公路的病害管理而言,这种正向建立的原始 BIM 模型是一种高速公路空间结构的表現载体,结合养护需求和病害分布的程度确定模型的精细程度。根据原始 BIM 模型建立高速公路病害记录的空间依存模式,模型根据部件的分类不同将试验路段的各类病害按模型结构重新分类。

通过搭载病害及详细检查养护信息的原始模型,养护人员能够直观地观测到高速公路病害的分布情况及局部路段的整体状况。同时也方便一次性查看同一处某类病害的多期检查养护记录。

3.2 点云逆向生成模型

对于高速公路的运营维护来讲,养护阶段的路面 BIM 模型应该是高速公路路面整体的虚拟三维数字化,是将真实的公路路面几何体逆向重现于虚拟的数字开发环境中。它表达了数据采集时刻公路路面的几何形态和状态信息,与 BIM 正向建模中由竣工阶段图纸翻模得到的原始模型相比,逆向生成的模型在数据信息来源上有本质的不同,其运用于运维阶段的侧重点也不同。

在试验段高速公路现场利用车载三维激光扫描仪对整段路进行扫描处理,所得到的点云数据经过处理后,导入 BIM 基础软件中逆向生成反映养护现场的路面实际模型,如图 2 所示。由于三维激光扫描的技术特点是快速高精度的采集扫描体的表面信息,因此由点云逆向生成的模型更倾向于展现信息采集时刻高速公路的路面实时状态。

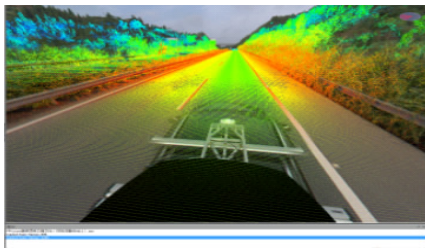


图 2 点云表示的路面信息

点云逆向生成的路面实际模型与正向建立的 BIM 模型对比分析,能够发现并计算路面各类表现形变问题。与此同时,每期扫描得到的点云逆向生成的模型可作为巡查记录分别进行保存以便随时调用分析不同时刻高速公路的路面状态。此外,通过对多期数据进行对比也可进行公路路面各种形变裂缝发展趋势的分析。相比以往常规的信息采集与处理手段,点云数据的处理使用能够更高效、完整地获取得到路面的整体和局部的变形情况。

3.3 模型分类与编码规则

公路工程是典型的线路工程,最大的特点是区域跨度大,呈带状分布。因此,为搭建高速公路运维管养 BIM 模型并基于模型建立系统科学的公路病害记录档案,该文借鉴了国内外建筑行业 BIM 模型的分类、编码标准,参考相关养护规范及铁路行业的相关方法,研究建立了一套运维管养阶段高速公路 BIM 模型及病害的分类和编码规则。

《铁路工程信息模型分类和编码标准》依照 ISO 12006—2 体系框架编制。为建立完整、分类清楚的构件分类及病害记录体系,该文所建立的高速公路运维管养 BIM 模型中,点云逆向生成的模型数据作为单期数据保存计算。将正向建立的基础 BIM 模型参照规范与设计图纸按公路实体组成构件进行分类,并根据功能将高速公路模型分为路面、路基、桥隧构造物和交通工程及沿线设施 4 大部分。并按不同部分所涵盖的部件进行逐级分类,精确至病害记录的模型构件深度。

由于公路的运维管养主要针对公路路面结构进行监测与评定,因此该文提出的高速公路运维管养信息模型编码方案由实体构件编码+病害编码组成。实体构件以桩号为基本单元定位,上下行编号给出总体方向,拼音首字母代表具体构件名称的方式进行编号。同时根据养护记录需求将构件名称直接同级编为具体地病害分布位置,公路病害信息通过 2 位字母+数字分别进行编码,字母表示病害名称,数字表示记录时间。现以路面损坏为例,其编码如图 3 所示。

编码分级	第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	第六级
分级名称	桩号	上下行	公路结构	损坏位置	病害类型	记录时间(年月日)
编码	桩号					
K000,000	桩号					
S		上行方向				
X		下行方向				
LM			路面			
SH				路面损坏		
JL					龟裂	例:*****160516
KL					块状裂缝	
ZL					纵向裂缝	
HL					横向裂缝	
KC					坑槽	
SS					松散	
CX					沉陷	
CZ					车辙	
YB					波浪拥包	
FY					泛油	
XB					修补	
...				

图 3 高速公路路面损坏编码规则

4 融合 BIM 与现实捕捉技术的高速公路病害检测信息化技术

4.1 基于点云的路面沉降分析

该项目对高速公路路面进行了三维激光扫描,获取的路面点云数据具备较好的精度和整体性。可对坑槽、沉降、波浪、拥包等有表观形变的病害进行处理分析。下面以沉降分析为例,由于高速公路路面有路面

线形、路拱横坡、道路纵坡等因素影响,其空间整体形态类似于螺旋形。因此在分析时将 BIM 正向模型路面部分导入分析软件作为参照面。对采集到的点云数据进行降噪、拼站等内业处理后,只留下路面部分点云,并调整其空间坐标与 BIM 正向模型对应重合。将点云面和参照面进行高程对比分析,在 K9 处发现明显的路基沉降段,轮廓清晰可见,得到两个平面间距的色差对比图如图 4 所示,精确度可达到毫米级别。

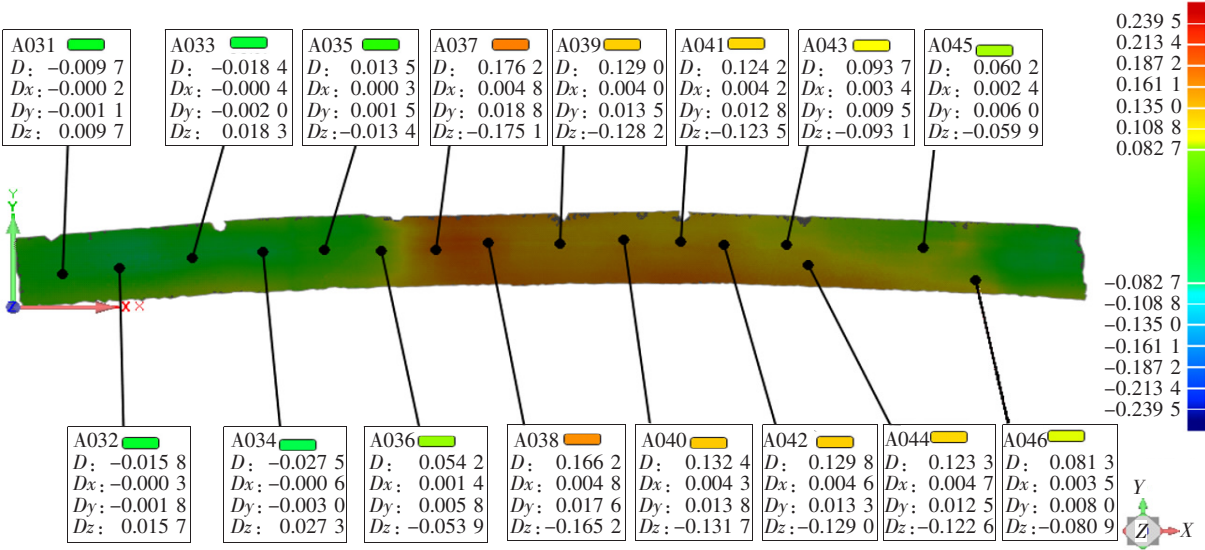


图 4 点云分析沉降的色差对比图(单位:m)

进一步可对该沉降段进行沉降量分析,为修补工作的挖补范围以及工程量计算提供可靠决策依据。而其他具有明显几何变化特征的路面病害在误差允许范围内均可用此方法识别测量并分析,不同的病害分析

结果以色差对比图等直观的形式贴图在高速公路 BIM 模型表面,并将相应的病害描述及处治历史的文本记录链接在相应位置,方便用户查看。通过以上实例,点云的数据采集—数据分析—数据记录信息化路

线能够快速、精准地发现分析并记录此类路面病害,在高速公路的运维管养过程中有着较大的应用价值。

4.2 图像处理技术观测路面裂缝

在高速公路运维中,也需要对路面的各类裂缝、泛油、松散等病害进行统计,而三维激光扫描得到的点云数据并不能很好地分析这几类不具备明显形变的病害。此外对各类护栏、路灯、交通标志标线等路面设施的外观检查,传统的方法只是利用人工现场识别来完成,误差较大。针对以上问题,传统手段不仅效率低、测量误差大,检查过程也存在一定的安全隐患。而且收集的文本和有限的图片数据在记录时并不能很好地标注病害的位置和分布情况,用户在查看数据时相对不便,甚至容易理解错误,影响养护决策。

在该项目中,通过对试验段的车载全景摄影数据采集,在内业数据处理后得到了等间隔的路面全景照片。通过高像素摄像头拍摄的路面照片能够清楚地分辨出路面裂缝等病害。利用相应图像处理软件,可以在高像素照片中测量路面各类裂缝、泛油、松散等病害的长度、宽度、面积等空间尺寸。养护人员不再需要去现场人眼分辨记录病害,而是通过对采集照片的后期处理识别各类病害,大大提升了工作效率。以裂缝为例,通过对全景照片的处理分析,得到了 K0~K4 的 22 条裂缝的长度、宽度和分布位置(表 1)。传统巡检路面病害时需要养护人员搭乘车辆在低速行驶时肉眼分辨裂缝,发现裂缝后下车测量具体裂缝尺寸并记录。以 4 km 长度路段为例,需耗时 1 h 以上。且既不安全,也不准确,巡检后对未探查到的裂缝更难以复核查对。而利用该技术则可完整地拍摄记录路面病害情况,养护人员可在短时间内通过高像素照片对路面裂缝进行分辨、测量与记录,且可以随时调看复核。经对比,在成熟的图像处理技术下单人对 4 km 路面裂缝的统计共用时 18 min,包括裂缝的长度、宽度与桩号位置。事后通过现场人工核查 27 条裂缝信息均与实际路面情况相符。

4.3 病害的建库与记录

在正向建立高速公路的 BIM 模型时,部件分类、结构尺寸、材料材质随即被定义在模型中。通过将病害图片信息贴附于模型表面,养护人员可以在软件平台中实现对路面病害的识别与标记,并进行长度、宽度、面积的测量和空间定位。根据高速公路运维管养 BIM 模型分类与编码规则,对不同的公路病害进行编码,并将其挂接在模型中相应的构件部位上。另外,每次三维激光扫描得到的点云数据及通过点云逆向生成

的模型数据作为单期的整体公路表观形态数据进行保存,方便养护人员随时提取部分点云信息进行变形分析。

表 1 K1~K4 路段裂缝识别结果

序号	上下行	裂缝类型	桩号	长度/m	宽度/m
1	上行	横向裂缝	K0+975.4	6.82	0.010
2	上行	横向裂缝	K1+000.2	1.19	<0.010
3	上行	横向裂缝	K1+360.0	4.46	<0.010
4	上行	横向裂缝	K1+520.6	4.19	<0.010
5	上行	横向裂缝	K1+590.6	2.22	<0.010
6	上行	横向裂缝	K1+720.1	7.01	0.012
7	上行	横向裂缝	K1+858.9	0.88	<0.010
8	上行	横向裂缝	K2+020.2	5.54	0.012
9	上行	横向裂缝	K2+217.3	4.82	<0.010
10	上行	横向裂缝	K2+235.2	4.48	0.012
11	上行	横向裂缝	K2+640.2	4.46	<0.010
12	上行	横向裂缝	K3+200.2	4.93	<0.010
13	上行	横向裂缝	K3+200.5	5.53	<0.010
14	上行	横向裂缝	K3+260.1	5.53	<0.010
15	上行	横向裂缝	K3+480.1	5.62	0.014
16	上行	横向裂缝	K3+653.5	3.84	<0.010
17	上行	横向裂缝	K3+653.1	2.58	<0.010
18	上行	横向裂缝	K3+670.4	3.61	<0.010
19	上行	横向裂缝	K3+705.1	6.19	0.012
20	上行	横向裂缝	K3+820.2	3.70	0.011
21	上行	横向裂缝	K3+919.9	2.37	<0.010
22	下行	横向裂缝	K3+260.1	3.46	<0.010
23	下行	横向裂缝	K3+260.3	4.85	<0.010
24	下行	横向裂缝	K3+180.2	6.49	<0.010
25	下行	横向裂缝	K3+020.2	3.27	<0.010
26	下行	纵向裂缝	K2+620.2	3.74	<0.010
27	下行	横向裂缝	K0+860.2	8.18	<0.010

根据养护方需求,在参考了 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》和 JTG H10—2009《公路养护技术规范》等相关养护规范后,结合 BIM 技术按部件分类、空间结构形式强的特点,将高速公路病害数据库所包括的主要数据分为 4 个系统,分别为:路面数据库、路基数据库、桥隧构造物数据库和交通工程及沿线设施数据库。由于病害数据存在着覆盖面广、类型复杂的特点,病害数据库采取树状分布,每个系统下再细分不同的子系统,各数据分类如图 5 所示。

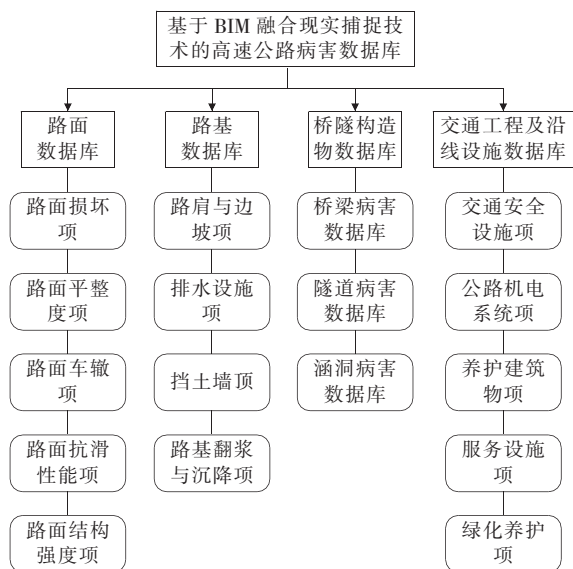


图5 病害数据库的逻辑树

因此该文提出的病害信息化记录既包含了BIM范畴内所应具备的道路所有属性与结构物信息,也涵盖着基于现实捕捉技术所建立的具有养护状态信息的信息模型。在BIM技术与现实捕捉技术的基础上进一步将各类新型检测手段和传统手段采集到的病害信息与养护状态进行重新分类,并以模型为病害记录载体,形成了融合BIM与现实捕捉技术的高速公路病害信息化数据库。实现了路面病害数据保存的结构化、空间化、直观化的特点。也能够更好地处理高速公路道路病害类型多、成因复杂、分布呈空间态势的问题。

5 融合BIM与现实捕捉技术的病害采集信息化流程的技术特点

通过以上两种现实捕捉技术与BIM的结合应用,搭建起了一整套基于融合BIM与现实捕捉技术的高速公路病害采集信息化流程。这套流程包括完整的公路病害的数据采集、数据分析和数据记录3个部分。集成了两种先进测量手段的高效采集信息、数据分析精准、结果显示直观的特点。

具体而言,该病害采集信息化流程在高速公路养护工作中的优势主要有以下几个方面:

(1) 发挥了两种新兴测量技术的优势。在该流程中,数据采集时高效新型的检测手段与传统方式并存,人员在采集数据时更加安全,数据类型空间化、完整化、信息涵盖量更大、储存更方便。大大改善了传统病害信息采集的误差大、安全性低、耗时长等缺点。

(2) 数据处理的针对性强,效率高。该套流程利用两种现实捕捉技术针对不同类型的病害进行数据的采集与处理分析工作。结合相应算法能够对病害进行更高效、更具针对性的分析处理。相比传统手段的养护人员现场判断记录,该流程更具安全性、科学性和准确性。

(3) 数据记录的形式由传统的二维形式变为三维空间形式,数据记录的逻辑关系更强。各类病害按公路的BIM模型构件分类划分,将病害图片以模型贴图的方式进行记录,能够更精确地表达出空间位置信息,使得病害数据记录的逻辑关系更清楚,影像数据的查看更全面化、精准化,也避免了添加数据时的重复和遗漏。此外,该套流程数据的记录增加了点云数据和逆向模型这种更包容的数据记录形式,方便用户进行多期数据的对比得到特定病害的发展趋势。

(4) 成套成体系的数据采集、处理、记录提升了高速公路养护工作的效率,方便养护人员能够随时提取数据进行分析。该流程具备快速完整的数据采集、高效准确的数据分析及随时可提取分析数据记录的特点。

6 结语

以中国高速公路发展与养护现状为背景,以满足更高效、更具科技含量、更节省资金与人员投入的养护需求为目标,提出了一种基于融合BIM技术与现实捕捉技术的高速公路病害采集信息化流程。全流程包括三维激光扫描技术与摄影测量技术的信息采集与处理、依托高速公路正向BIM模型的病害数据库搭建、数据的储存等步骤,建立了一整套运用于养护阶段的BIM模型分类与编码规则。依托工程项目实例,分别针对路基沉降与路面裂缝两类病害进行了全流程试验,体现了该流程在养护阶段应用的高效性、高准确性、利用性强等优势。与传统仅仅基于BIM的运维养护系统相比,该文提出的融合技术更具全面的专业优势与更开阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王佩. 三维激光扫描结合BIM技术在建筑建模中的应用[J]. 电子测试, 2018(8).
- [2] 杨敏, 甘淑, 袁希平, 等. 复杂带状地形条件下的地面三维激光扫描点云数据采集与配准处理试验[J]. 测绘通报, 2018(5).

基于 JSL 一路线专家系统喇叭形互通 喇叭头设计新方法

刘利民, 杨运平

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:喇叭形互通式立体交叉作为高速公路应用最多的一种互通式立体交叉形式,其设计方法较为成熟,但并未全部实现自动化设计。在喇叭形互通的喇叭头位置,两条匝道的路基宽度冲突,连接部设计图等图表基本上采用手工或半自动设计方式,而 JSL 一路线专家系统已经实现了连接部的参数化自动设计。喇叭形互通喇叭头的两条匝道不存在合流与分流,并不是真正意义上的连接部,但二者之间的路基宽度衔接与连接部有高度的相似性。通过深入研究与尝试,充分利用 JSL 一路线专家系统的灵活性,采用两种连接部设计方法实现了喇叭形互通喇叭头的参数化自动设计。该方法已应用到了多个工程项目设计中,取得了良好的效果。

关键词:喇叭形; 互通式立体交叉; 自动设计

喇叭形互通式立体交叉(以下简称“喇叭形互通”)是互通式立体交叉的典型代表,具有收费管理方便及工程规模较小等特点,是目前高速公路中应用最多的一种互通式立体交叉形式。因半直连式匝道和环形匝道组合外观类似喇叭而得名。

在常见的路线与互通立交 CAD 软件中,喇叭形互通的平纵横设计均可以完成。喇叭头位置的两条匝道虽然路基宽度冲突,但在绝大多数 CAD 软件中,作为两条完全独立的匝道进行设计,与连接线各自直接相接,连接部设计图等部分图表需要手工或半自动方式完成。JSL 一路线专家系统作为新一代路线与互通

立交 CAD 系统,应用了数十项创新和专利技术,互通式立体交叉连接部的参数化自动设计是其独特创新之一。喇叭形互通喇叭头的两条匝道不存在合流与分流,并不是真正意义上的连接部,但二者之间的路基宽度衔接与连接部有高度的相似性。通过深入研究与尝试,充分利用 JSL 一路线专家系统的灵活性,可将喇叭形互通的喇叭头作为连接部,实现参数化自动设计。

1 喇叭形互通喇叭头的常规设计方法

一般情况下,组成喇叭头的半直连式匝道和环形

- *****
- | | |
|--|--|
| [3] 李焯. 基于倾斜摄影测量技术的三维数字城市建模[J]. 中国高新区,2018(1). | [8] 张毅,闫利,崔晨风. 地面三维激光扫描技术在公路建模中的应用[J]. 测绘科学,2008(5). |
| [4] 唐琴. 三维激光扫描技术国外应用研究现状及启示[J]. 世界有色金属,2016(12). | [9] 邹晓亮. 车载测量系统数据处理若干关键技术研究[D]. 解放军信息工程大学博士学位论文,2011. |
| [5] 魏笑辰,罗志清. 车载三维激光扫描系统的点云精度分析[J]. 价值工程,2016(1). | [10] 宋杨,曾凡洋,高志国. 车载全景摄影测量在城市部件普查中的应用[J]. 测绘科学,2016(11). |
| [6] 徐寿志. 车载移动测量系统检校技术及其精度评定方法[D]. 武汉大学博士学位论文,2016. | [11] 宋宏勋,马建,王建锋,等. 基于双相机立体摄影测量的路面裂缝识别方法[J]. 中国公路学报,2015(10). |
| [7] 李强,邓辉,周毅. 三维激光扫描在矿区地面沉陷变形监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014(1). | [12] 李华良,杨绪坤,沈东升,等. 铁路工程信息模型分类和编码标准研究[J]. 铁路技术创新,2015(3). |