

BIM 技术在隧道衬砌病害信息可视化中的应用*

蒋雅君¹, 李明博¹, 陶双江^{1,2}, 李鹏², 刘会钢²

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;
2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041)

摘要:对 BIM 技术在运营公路隧道衬砌结构病害检测结果信息可视化展示中的应用展开了研究, 通过对 AutoCAD 和 Revit 的二次开发, 实现隧道衬砌病害的三维可视化。所实施的方法为: 将公路隧道的结构进行解构, 以便在 BIM 软件中建立隧道各个构件的空间模型; 结合隧道结构特征, 推导出将 CAD 平面图形元素映射到三维隧道空间结构的转换公式; 提取隧道病害展示图中特征点的关键参数, 把提取的隧道病害的参数进行坐标换算, 将隧道病害元素映射到隧道结构的三维模型上, 实现了衬砌病害从二维向三维的转化。通过 BIM 技术展示衬砌病害的三维可视化, 为公路隧道的维修养护工作提供便利。

关键词:运营公路隧道; 隧道病害检测; BIM; 三维可视化

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1114-08

Application of BIM Technology on the Visualization of Tunnel Lining Defects Information

Jiang Yajun¹, Li Mingbo¹, Tao Shuangjiang^{1,2}, Li Peng², Liu Huigang²

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 2. Sichuan Provincial Communications Department Highway Planning, Survey, Design & Research Institute, Chengdu 610041, P.R. China)

Abstract: The application of BIM technology of the three-dimensional (3D) visualization for the operating highway tunnel lining defects information was studied through the secondary development of AutoCAD and Revit to realize 3D visualization of tunnel lining defects. The practical solutions adopted were follows: Firstly, the structure of road tunnel was decomposed so that the spatial models of each component of the tunnel structure were established in BIM software; The coordinate conversion formula of the CAD plane graphic elements to 3D tunnel space structure were derived according to the analysis of the spatial characteristics of the tunnel structure; The key parameters of the feature points of tunnel defects were extracted from the tunnel defect display drawings; The plane parameters of tunnel defects were converted to 3D coordinate values so that the elements of tunnel defects were mapped to the spatial model of the tunnel structure and the 3D visualization of the tunnel lining defects was realized. The three-dimensional visualization of the lining defects is demonstrated by BIM technology, which provides some convenience for maintenance of highway tunnels.

Keywords: operating highway tunnel; tunnel defect inspection; building information modelling; three-dimensional visualizations

* 收稿日期: 2017-12-03 (修改稿)

作者简介: 蒋雅君 (1980-), 男, 广西桂林人, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程防水技术、病害检测等方面的研究。E-mail: yajunjiang@swjtu.edu.cn

基金项目: 四川省交通科技项目计划任务 (2013C10-5); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682014CX065)

0 引言

随着我国尤其是西部地区高速公路建设速度的加快,我国公路隧道的数量及长度近年来进入了一个快速增长的时期^[1]。随着越来越多的公路隧道逐步投入运营,隧道的病害检查、维修养护等工作也面临着巨大的压力。为提高隧道管养工作的效率,一些新的技术也在实践中得到尝试和应用。

公路隧道土建结构的定期检查通常为每年1次,通过定期检查的结果,系统掌握结构技术状况和功能状况,开展土建结构技术评定,为指定养护工作计划提供依据^[2]。目前国内隧道管养工作信息化尚未全面普及,在实际的检查工作中,公路隧道定期检查的结果通常以填写病害调查表、绘制展示图等方式在现场进行记录,检查结果文档提交隧道管养部门归档或录入相应的隧道管养系统^[3]。此种方式主要基于纸质化文档的模式进行,隧道病害检测结果展示方式的可视化、信息化程度低,导致数据查阅不便、利用效率也较低,对隧道管养工作的效率也有所影响。

为充分展示和利用运营公路隧道的病害信息,实现隧道病害的三维可视化及对隧道病害数据进行信息化加工等,在隧道管养工作中具有一定的现实意义^[4]。建筑信息模型(BIM)作为一种创新的工具与生产方式,以建筑模型为基础,通过数字信息模拟建筑物所具有的真实信息,服务于项目的全生命周期,具有三维可视化、协同性、节约成本和缩短工期的优势^[5]。目前隧道及地下工程中对BIM技术的利用还主要面向设计、施工阶段,维修养护管理阶段的应用较少,对隧道病害的三维可视化工作也还未系统性开展^[6-9]。

本文基于公路隧道的结构型式和特点分析,对BIM技术在运营公路隧道土建结构定期检查病害数据的三维可视化中的应用展开探讨,为BIM技术在隧道病害检查、维修养护等工作中的应用奠定一定的基础。

1 隧道衬砌病害三维可视化实现的技术思路

结合BIM技术的特点和要求,采用BIM技术对公路隧道衬砌病害数据进行三维可视化实现及进一步的加工,需要从如下步骤展开相应的工作:

(1)对公路隧道结构的空间和平面特征进行分析,从二维(平面)和三维(空间)的角度对隧道

结构的组成要素进行分析,分别建立基本的隧道结构空间模型。

(2)分析将CAD平面图形元素映射到三维隧道空间结构模型的原理及转换公式,为实现隧道病害展示图元素的三维可视化奠定理论基础。

(3)分析隧道病害展示图的组成要素,提取平面CAD图形特征点的关键参数,如病害的坐标位置、里程等,为隧道病害元素的三维可视化提供基础数据。

(4)对步骤(3)中所提取的隧道病害元素的基础数据,依据步骤(2)所确立的转换公式,将隧道病害元素映射到步骤(1)所生成的隧道结构空间模型上,以实现隧道病害从二维到三维的转化。

(5)对步骤(3)所提取的隧道衬砌病害元素,根据其属性对其赋予相应的量化参数信息,编制相应的程序以实现隧道病害数据的自动归类、分类(级)显示、计算及评定等信息加工处理,为隧道结构的技术状况评定及维修管理等工作提供基础数据。

本文对步骤(1)~(4)进行了相应的研究工作,以探讨实现公路隧道衬砌病害检查结果三维可视化的可行性,步骤(5)的内容将在后续的研究中探讨。

2 隧道结构组成与特征分析

公路隧道结构的组成要素主要包括标准区段、加宽段(紧急停车带)、人行横洞及车行横洞、洞门等部位,其平面特征包括断面型式、隧道线形(直线及曲线),隧道的空间特征则主要为其纵向坡度。利用BIM软件实现各隧道基本特征构件的空间建模,并将各构件进行组合以实现公路隧道结构的空間模型建立。

2.1 公路隧道标准断面轮廓

《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)给出的两车道公路隧道内轮廓标准如图1所示:拱部为单心半圆,侧墙为大半径圆弧,仰拱与侧墙间用小半径圆弧连接^[10]。图1中, R_1 为拱部圆弧半径, R_2 为侧墙圆弧半径, R_3 为侧墙与仰拱连接端圆弧半径, R_4 为仰拱圆弧半径, H_1 为路面至起拱线的高度, H_2 为侧墙结构高度, $\theta_1 \sim \theta_3$ 为相应圆弧的转角。从其结构型式可知,可以通过定位不同圆弧的圆心位置并利用其半径和角度,绘制出隧道断面的内轮廓线。

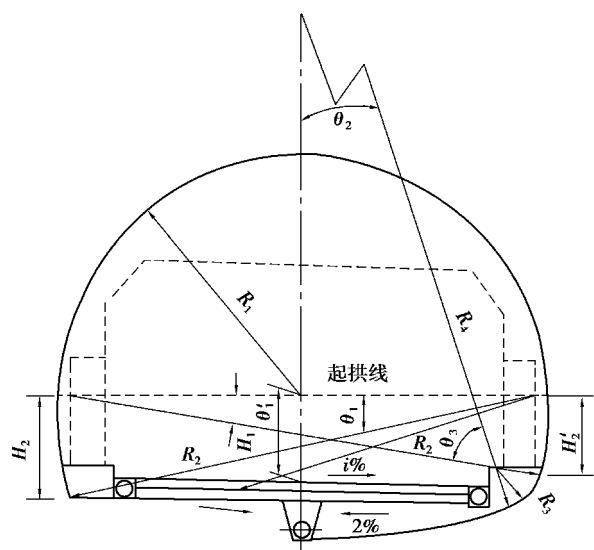


图 1 两车道隧道标准断面轮廓图

Fig. 1 Standard section profile of two-lane tunnel

2.2 公路隧道紧急停车带断面轮廓

根据《公路隧道设计规范》,长、特长隧道应在行车方向的右侧设置紧急停车带,有效长度不小于 30 m,如图 2 所示^[10]。在紧急停车带部位,隧道断面需要进行加宽处理,《公路隧道设计规范》中规定的紧急停车带的标准内轮廓断面结构型式与图 1 类似,但是从图 1 所示的四心圆变成了五心圆,以适应隧道建筑限界的变化^[11],同样也可以采用如 2.1 所述的方法绘制得到其内轮廓线。

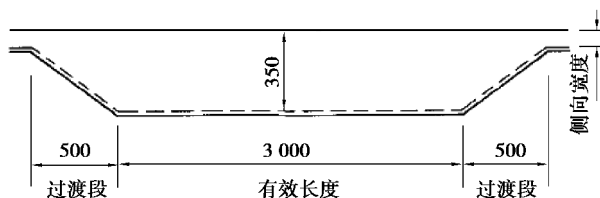


图 2 紧急停车带宽度和长度(单位:cm)

Fig. 2 Width and length of emergency parking strip (unit: cm)

2.3 公路隧道线形

在实际工程中,隧道因地形地质条件、洞口接线、车辆运行安全等条件的限制,可能需要把隧道部分区段的线形设计成曲线^[10]。根据调研资料可知:大部分已建成的曲线隧道,具有长度短、半径大的特点;部分曲线隧道为避免出入口正朝东西方向设置,将洞口段设计成曲线^[12]。曲线隧道轴线在线形上包括圆曲线、缓和曲线或者其他曲线(实例如图 3 所示),因此可以根据隧道轴线的曲线特征参数绘制出隧道的线形。



图 3 曲线隧道示例

Fig. 3 Example of curve tunnels

2.4 车行及人行横通道

公路隧道的车行及人行横通道的断面相对较小,通常所采取的断面型式如图 4、图 5 所示。其内轮廓断面型式与隧道标准断面相比较为简单,较易通过各段圆弧的圆心、半径、夹角等参数绘制得到其轮廓线。

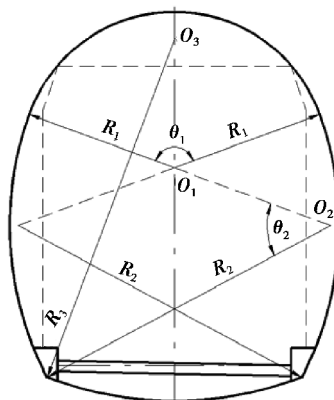


图 4 车行横通道内轮廓

Fig. 4 Section profile of reverse cross passage

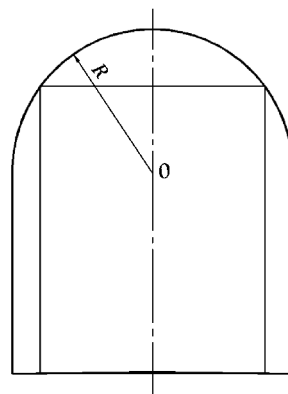


图 5 人行横通道内轮廓

Fig. 5 Section profile of pedestrian crosswalk

需要处理的部位为横通道与隧道主洞的连接部位(如图 6 所示),此处可在建模时通过隧道主洞模型与横通道模型的布尔运算实现。

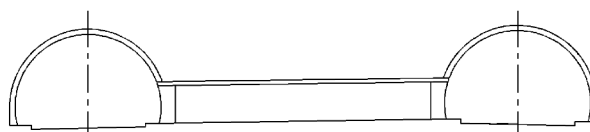


图 6 横通道与隧道主洞连接关系

Fig. 6 Relationship between the cross passage and main tunnel

2.5 其他隧道结构特征要素

由于隧道洞门的型式较多、隧道纵向坡度对病害三维可视化的影响不大,在本文的工作中暂未对以上2个要素进行考虑。另外由于我国公路隧道目前多为两车道,因此本文将选定两车道隧道为代表,对三车道、四车道、双连拱隧道等结构型式暂未涉及,但通过本文所建立的基本方法也可实现以上隧道结构型式的建模及病害的三维可视化转化。

3 平面坐标向空间坐标的转化方法

为将如图7所示的隧道病害展示图中的病害元素从平面形式还原为三维形式,需要建立将病害元素特征点从平面坐标向空间坐标的转换关系式。基本思路是以隧道的拱顶轴线为基准,确定病害特征点的里程,并量取病害特征点至拱顶轴线的距离 L ,通过弧长公式和坐标转换公式进行坐标换算,得到其空间坐标。

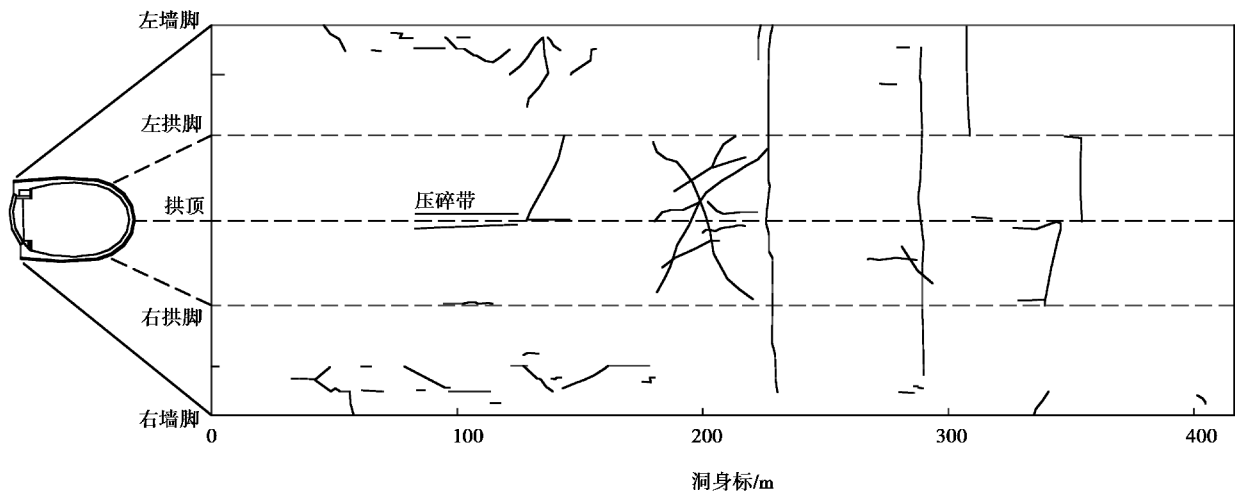


图7 隧道病害展示图示例

Fig. 7 Example of the tunnel defect display drawing

3.1 标准区段的坐标转化方法

两车道公路隧道的断面如图8所示,其中 r_1 为圆1的半径; r_2 为圆2的半径; h 为圆心 O_1 和圆心 O_2 的垂直距离; d 为圆心 O_1 和圆心 O_2 的水平距离;圆1和圆2的交界处定义为临界点,从顶点到临界点的弧长为临界弧长 L' ; α 为圆心 O_1 和两个圆心 O_2 圆心的夹角。

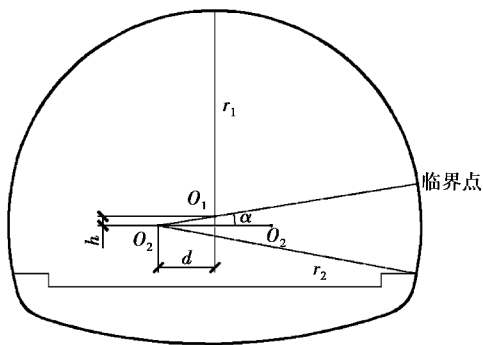


图8 隧道标准区段断面轮廓图

Fig. 8 Section profile of tunnel standard section

同时,在三维坐标中规定:原点坐标为 O_1 ,沿

着隧道走向的方向为 z 方向(里程),隧道断面水平方向为 x 方向、垂直方向为 y 方向。图7中,隧道衬砌表面的病害特征点到隧道拱顶轴线的垂直距离,即为从拱顶中心位置往相应一侧延伸的弧长 L ,根据 L 可换算出特征点在三维坐标中的 x 、 y 坐标。隧道衬砌病害特征点的 z 值可以直接从病害展示图相应的里程值获取,因此此处不作讨论。

当 $L < L'$ 时(即特征点位于拱顶圆弧内时),可通过式(1)换算得到特征点在拱顶圆弧上的转角 θ ,之后代入式(2)计算得到其坐标值 (x, y) :

$$L = \frac{\theta \cdot \pi \cdot r_1}{180} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = r_1 \cdot \sin \theta \\ y = r_1 \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

当 $L > L'$ 时(即特征点位于侧墙圆弧内时),为方便计算特征点的坐标,需要先将坐标系原点从 O_1 平移至 O_2 得到坐标系 (x', y') ,并沿着逆时针旋转角度 α 得到坐标系 (x'', y'') ,如图9所示。计算得到特征点的坐标值后再换算回坐标系 (x, y) ,相应的计算公式为式(3)、式(4)。

$$L - L' = \frac{\theta \cdot \pi \cdot r_2}{180} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = r_2 \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + r_2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha - d \\ y = -r_2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + r_2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha - h \end{cases} \quad (4)$$

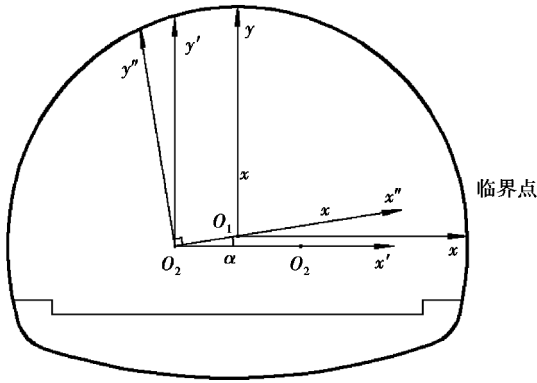


图9 坐标转换关系

Fig. 9 Coordinate transformation relation

3.2 紧急停车带区段的坐标转化方法

紧急停车带的轮廓断面如图10所示,其中 O 点表示标准断面的中心,也是隧道空间坐标系的原点。由于紧急停车带断面的拱部是三心圆,所以有两个临界弧长 L'_1 和 L'_2 ,其他地方与标准断面的组成相似,因此其坐标计算公式也和标准断面的计算方式类似。

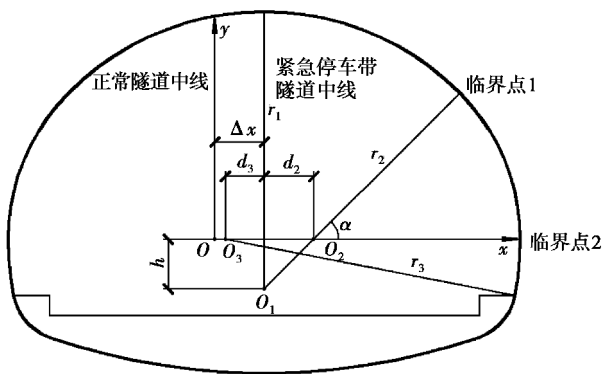


图10 紧急停车带断面轮廓图

Fig. 10 Sectional contour map of emergency parking strip

当 $L < L'_1$ 时,可通过式(1)、式(5)计算病害特征点的坐标 (x, y) 。

$$\begin{cases} x = r_1 \cdot \sin \theta + \Delta x \\ y = r_1 \cdot \cos \theta - h \end{cases} \quad (5)$$

当 $L'_1 < L < L'_2$ 时,采用与3.1中类似的方法,可以推导出其坐标计算公式如式(6)和式(7)所示。

$$L - L'_1 = \frac{\theta \cdot \pi \cdot r_2}{180} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x = r_2 \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha + r_2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha + d_2 + \Delta x \\ y = -r_2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + r_2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

当 $L > L'_2$ 时,可以推导出式(8)和式(9)。

$$L - L'_2 = \frac{\theta \cdot \pi \cdot r_3}{180} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = r_3 \cdot \cos \theta - d_3 + \Delta x \\ y = -r_3 \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

3.3 曲线区段的坐标转化方法

当隧道区段位于单一曲线上时,隧道的中心线在半径为 R 的圆弧上,沿隧道曲线区段的里程长度为隧道中轴线圆弧的弧长(如图11所示)。因此,其坐标值计算思路是先按直线段的计算方法求出隧道断面上病害特征点的 (x, y) ,再通过极坐标转化公式得出隧道中轴线的空间坐标值 $(x'_{\text{曲}}, y'_{\text{曲}})$,与病害特征点的 (x, y) 进行叠加得到曲线段病害特征点的空间坐标值 $(x_{\text{曲}}, y_{\text{曲}})$ 。

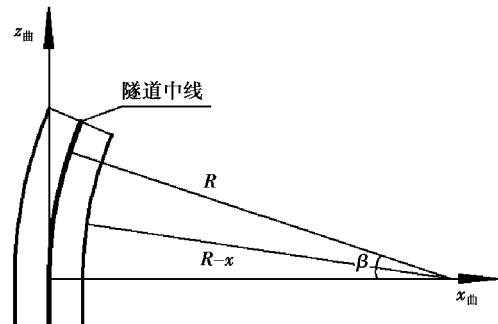


图11 隧道曲线段平面线形示意图

Fig. 11 Sketch of plane line of curve tunnel section

根据图11所示的关系,曲线段隧道中轴线的坐标值可以由式(9)、式(10)计算得到:

$$z = \frac{\beta \cdot \pi \cdot R}{180} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x'_{\text{曲}} = R - R \cdot \cos \beta \\ y'_{\text{曲}} = y \\ z'_{\text{曲}} = R \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (10)$$

由此可以叠加得到曲线段上隧道病害特征点的坐标 $(x_{\text{曲}}, y_{\text{曲}})$,计算公式如式(11)所示:

$$\begin{cases} x_{\text{曲}} = R - (R - x) \cdot \cos \beta \\ y_{\text{曲}} = y \\ z_{\text{曲}} = (R - x) \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (11)$$

3.4 车行及人行横通道区段的坐标转化方法

车行横洞及人行横洞区段的病害特征点空间坐标转换原理及方法与上述区段类似,其思路也是先通过局部坐标系计算出病害特征点在横洞断面上的坐标值,再通过局部坐标系与全局坐标系之间的换算关系得到横洞段病害特征点的全局空间坐标值。

4 隧道结构病害位置信息的提取及比例换算

在提出了特征点从平面向空间的坐标转换计算方法之后,就可以通过提取隧道病害展示图(CAD图)中特征点的相关位置信息,进行相应的转换计算,得到病害特征点的空间坐标值。要提取病害特征点的位置信息包括两点:里程位置 z 及距拱顶中轴线的长度 L 。

4.1 病害特征点平面坐标的提取方法

在隧道病害展示图中设坐标原点为隧道小里程端拱部中轴线的起始点,在AutoCAD软件里提取特征点的坐标,再减去原点的坐标,即为隧道病害的位置信息。但是这样操作过程较为繁琐,而且每次只能提取一张图纸的病害,即每次只能提取一张CAD图纸的病害信息。对于超过3 000 m的特长隧道,会很费时费力且极易出错。

本文采用AutoLISP开发了一个插件,可快速、准确地提取病害的位置信息。具体操作流程为:选择需要提取的图纸;将需要提取的衬砌病害放在指定的图层中;选择洞口的位置;指定图框的宽度;指定画图区前段到图框的间距;指定画图区后端到下一幅图框的间距;指定保存地址。通过这样的方式,可以快速获取隧道病害展示图中的病害(如裂缝)特征点的局部平面坐标值,大大提高了工作效率。

4.2 平面坐标的长度换算

对于4.1中提取的平面坐标,还需要根据隧道病害展示图与实际隧道尺寸之间的比例关系进行换算,才可得出隧道病害特征点的实际平面坐标值。

以图12所示的裂缝两端特征点的换算为例进行说明:洞门即为起点的位置,如图所示提取的坐标 (z, L) 为 $(27.95, 16.14)$ 、 $(63.00, 58.50)$ 。首先计算病害特征点的位置里程 z ,通过测量可以知道CAD图中的长度35表示实际长度为10 m,因此:

$$z_1 = \frac{27.95 \times 10}{35} = 7.99(\text{m})$$

$$z_2 = \frac{63.00 \times 10}{35} = 18.0(\text{m})$$

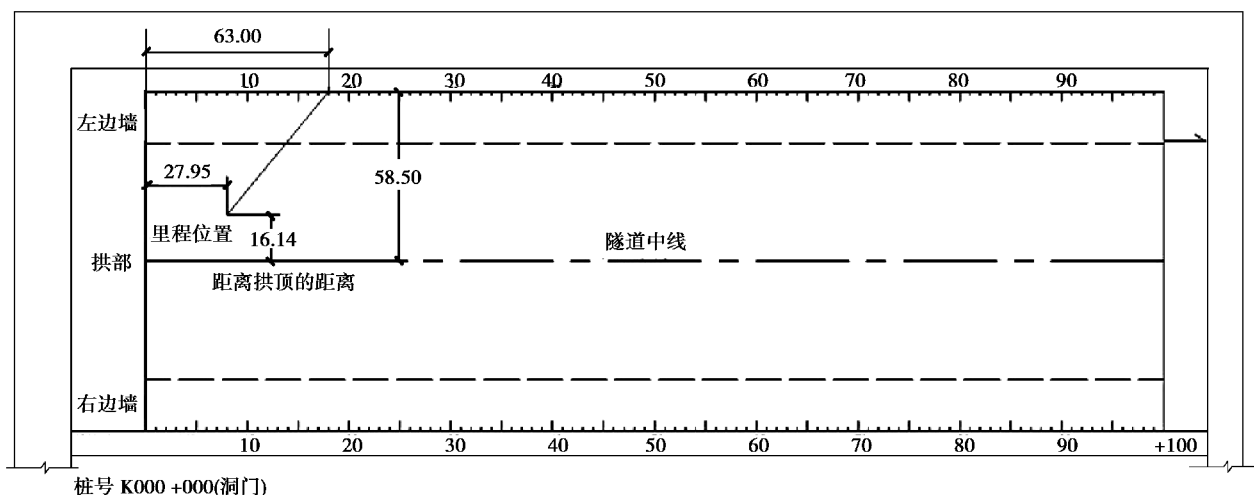


图12 隧道病害展示图位置信息(单位:m)

Fig. 12 Location information of tunnel defect display drawing (unit: m)

随后,需要计算病害特征点距离拱顶中轴线的距离 L :以某隧道的断面为例, r_1 为562 cm, r_2 为718.5 cm,根据弧长计算公式,隧道内轮廓半幅弧

长为10.4 m。通过测量可知CAD图中半幅长度为58.5,因此:

$$L_1 = \frac{16.14 \times 10.4}{58.5} = 2.87 \text{ (m)}$$

$$L_2 = \frac{58.5 \times 10.4}{58.5} = 10.4 \text{ (m)}$$

5 隧道衬砌病害的 BIM 三维可视化实现

选用 Revit 作为隧道衬砌结构病害的三维可视化应用软件,但由于其功能主要针对房屋建筑,对隧道的建筑模型没有专门的“工具”,因此要想实现衬砌病害在 BIM 中的三维可视化,并且能够精确而又快速地批量录入病害,需要进行 Revit 的二次开发。

5.1 Revit 的二次开发

Revit 软件不仅提供菜单栏和工具条命令来实现建模,而且还提供调用外部命令的 API 接口来建模。Revit API 是连接 Revit 和第三方插件的纽带,设计人员可以开发插件,通过 API 来访问 Revit 模型,控制模型里面的信息。Revit API 适用性广,凡是与 Microsoft.NET Framework 2.0 兼容的语言都可以通过 API 建模,包括 VB.NET、Microsoft Visual C#以及 C++语言^[13]。

本文采用 Microsoft Visual C#开发了一个插件,实现批量生成隧道衬砌病害空间曲线。选取隧道衬砌的 3 个内表面,将面转化为面几何,保证点能投影到面上;输入点的起点和终点,分别投影到面上,然后连线,将线段等距的划分成 10 段,再将新生成的点投影到面上,然后逐段连接这些点生成新的线;批量导入线的坐标,然后,循环最终达到批量生成线的目的。

5.2 三维可视化效果展示

上述方法可以有效地实现衬砌病害的三维可视化展示,图 13 即为两车道公路隧道衬砌病害的三维可视化演示效果。通过其实际效果可知,BIM 技术能够实现隧道土建结构各组成部位处的病害三维可视化演示,将这些结构组合即可实现公路隧道的病害三维可视化展示。隧道病害数据图像的三维可视化工作,使隧道结构病害更为形象和直观,也能提高隧道的技术状况评定、日常维护管理等工作的效率。

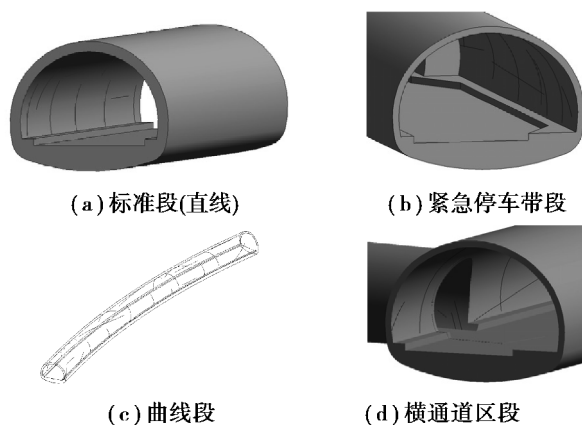


图 13 隧道结构病害三维可视化展示效果

Fig. 13 Three dimensional visualization of tunnel lining defects

6 结论

对 BIM 技术在运营公路隧道衬砌结构病害中的应用展开了研究,通过对 AutoCAD 和 Revit 的二次开发实现隧道衬砌病害三维可视化,得到以下结论:

(1)分析公路隧道结构的组成要素及空间特性,对其基本结构进行建模,通过这些要素的组合,可以实现常见公路隧道土建结构 BIM 模型的建立。

(2)通过平面到空间坐标关系计算式的推导,得出了从隧道病害展示图中提取病害特征点空间位置坐标的方法,且与隧道结构空间模型对应关系良好。

(3)BIM 技术可以实现公路隧道土建结构的建模及衬砌病害的三维可视化展示,为运营公路隧道的病害检查、维修养护等工作提供一定的便利。

限于目前的研究进度,本文所展示的研究成果还存在一些局限:仅初步实现了隧道衬砌病害的三维可视化展示,尚未对隧道衬砌病害数据做深度的信息化加工;由于 Revit 尚没有针对隧道工程专用的“工具”,还需要做进一步的开发,以更好地在隧道工程中进行应用;隧道结构 BIM 模型全生命周期中的利用及协同性等也还需要进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 王少飞,林志,蒙华.公路隧道养护分级研究[J].公路,2014(6):273-277.(Wang Shaofei, Lin Zhi, Meng Hua. The classification study of highway tunnel maintenance[J]. Highway, 2014(6): 273-277. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国交通部.公路隧道养护技术规范(JTG H12-2015)[S].北京:人民交通出版社,2015.(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specification of maintenance for highway tunnel (JTG H12-2015) [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.(in Chinese))
- [3] 朱玉琴,李秀芳,金敏华.公路隧道定期检查与安全评估方法技术探讨[J].公路交通科技,2013(4):261-264.(Zhu Yuqin, Li Xiufang, Jin Minhua. Discussion on the methods and techniques of regular inspection and safety assessment for highway tunnels [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2013(4): 261-264. (in Chinese))
- [4] 朱合华,吴江斌.管线三维可视化建模[J].地下空间与工程学报,2005(1):30-33.(Zhu Hehua, Wu Jiangbin. 3D Visualization Modeling of Pipeline [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(1):30-33.(in Chinese))
- [5] 何关培,王轶群,应宇垦.BIM总论[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.(He Guanpei, Wang Yiqun, Ying Yuken. BIM general [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [6] 冀程.BIM技术在轨道交通工程设计中的应用[J].地下空间与工程学报,2014,10(增1):1663-1668.(Ji Cheng. Applications of BIM technology in the rail transportation engineering design [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (Supp.1): 1663-1668. (in Chinese))
- [7] 钟宇,周少东,陈健,等.基于IFC标准的盾构隧道结构数据模型研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S2):613-622.(Zhong Yu, Zhou Shadong, Chen Jian, et al. Study on Shield Tunnel Structure Data Model Dased on IFC Standard [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (S2): 613-622.(in Chinese))
- [8] 李芊,许高强,韦海民.基于BIM的综合管廊运维管理系统研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):287-292.(Li Qian, Xu Gaoqiang, Wei Haimin. Research on the Operations Management System of Utility Tunnel Based on BIM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 287-292.(in Chinese))
- [9] 王孟进,张亚栋,殷友兰,等.基于BIM的地铁人防工程维护管理技术探讨[J].地下空间与工程学报,2016,12(增1):325-330.(Wang Mengjin, Zhang Yadong, Yin Youlan, et al. Study on the maintenance and management technology of metro civil air defense projects based on BIM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (Supp. 1): 325-330. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国交通部.公路隧道设计规范(JTG D70-2004)[S].北京:人民交通出版社,2004.(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70-2004.) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 廖朝华,郭小红.公路隧道设计手册[M].北京:人民交通出版社,2012.(Liao Chaochua, Guo Xiaohong. Highway tunnel design manual [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 王峰.曲线公路隧道营运通风关键参数研究[D].成都:西南交通大学,2007.(Wang Feng. Research on key parameters of operating ventilation in curved road tunnels [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [13] 张艺晶,杜守军,赵坤,等.Revit软件二次开发和项目上的应用研究[J].河北企业,2015(11):121-123.(Zhang Yijing, Du Shoufeng, Zhao Kun, et al. Research on the application of Revit software in the two development and project [J]. Hebei Enterprises, 2015 (11): 121-123. (in Chinese))