

融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测方法 及其应用研究

胡兴意¹, 陈波², 刘国强², 韩达光^{1*}, 吴逸飞², 周银¹, 颜鲁鹏¹, 杨宇鹏³, 郭彤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.中铁十六局 第五工程公司吴银项目经理部; 4.东南大学 土木工程学院)

摘要: 针对目前常用高速公路桥梁检测方法信息零散化、覆盖不全、可追溯性差、准确性不高的问题,提出了一种融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测新方法。在研究高速公路桥梁运维管养 BIM 模型特点、分类和编码规则基础之上,尝试建立了桥梁运维管养 BIM 模型数据库;为丰富 BIM 模型中的病害信息,采用影像建模技术,实现了既有桥梁的运维信息模型的快速重构和基于该模型的桥梁病害快速识别、测量与外观病害信息入库,为将 BIM 与影像建模技术有机融合作为一种新的技术手段高效应用于高速公路桥梁维护和检测中提供了参考与建议。

关键词: 运维管养; 桥梁检测; BIM; 影像建模

1 前言

截至 2017 年底,中国已建成超 80 万座公路桥梁。

随着时间推移,中国交通基础设施建设速度将放缓,大量公路、铁路桥梁将进入维护管养期。在材料性能不足、设计缺陷、施工不当、维护管养不足等因素的影响下,混凝土桥梁结构将不可避免地产生开裂、蜂窝、麻

参考文献:

- [1] JianDan, CongYu, Chang Wu Xu. Experimental Analysis of the Sectional Temperature Distribution of CFST under Variable Temperature Effect[J]. Advanced Materials Research, 2014, 971-973: 249-254.
- [2] Yuan FengWang, Yi ShuoMa, Bing Han, et al. Temperature Effect on Creep Behavior of CFST Arch Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(12).
- [3] 林春姣. 钢管混凝土拱计算合龙温度研究[D]. 广西大学博士学位论文, 2008.
- [4] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 哑铃形钢管混凝土截面水化热温度分布有限元分析[J]. 中外公路, 2007(4).
- [5] 陈宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土桁拱温度场实测研究[J]. 中国公路学报, 2011(3).
- [6] 陈可, 李亚东. 钢管混凝土拱肋截面日照温度场实测及有限元计算[J]. 公路交通科技, 2012(9).
- [7] 何燕, 丁曼, 张千, 等. 日照作用下钢管混凝土构件截面温度场的实验研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2012(3).
- [8] 朱晓文, 宋晓好, 郭春华, 等. 四肢桁式钢管混凝土拱肋日照温度场及温度效应分析[J]. 交通标准化, 2012(13).
- [9] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 钢管混凝土拱桥温度效应研究[J]. 广西科学院学报, 2007(3).
- [10] 张鑫. 矩形钢管混凝土截面的温度场与温度效应研究[D]. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2017.
- [11] 季伟强. 混凝土箱梁桥日照温度有限元分析与辐射换热系数研究[J]. 结构工程师, 2015(2).
- [12] 周允华. 青藏高原夏季晴天的大气热辐射[J]. 高原气象, 1984(3).
- [13] 周允华. 青藏高原的大气热辐射和天空有效温度[J]. 太阳能学报, 1984(3).
- [14] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2007.

收稿日期: 2019-05-12

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(编号: 建技创第 GS-2017-04)

作者简介: 胡兴意, 男, 硕士. E-mail: 1012208130@qq.com

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

面、水蚀、保护层脱落等病害。现行 JTG H11—2004《公路桥涵养护规范》中,对桥梁的检查分为经常检查(巡检)、定期检查和特殊检查,其主要目的均为:检查各部件的构造完整性、合理性、耐用性及功能有效性,发现桥梁缺损状况,制定小修保养和大、中修计划,为桥梁养护管理积累动态跟踪数据,对保持桥涵正常使用状态、保证行车畅通安全具有重要意义。这两项工作也是桥梁运维管养期内的主要工作内容。

桥梁巡检与定检目前大多采用传统的人工巡查或人工与桥检车配合的方式,利用人工肉眼贴近桥梁结

构表面,配合小型裂缝测量仪器、钢卷尺、数码相机等进行桥梁外观缺陷人工观测。这种方法效率低、速度慢,覆盖面不全、可追溯性差、信息零散非结构化、数据处理建档繁琐,且检测精度受环境与人为因素影响大,无法对病害进行精确定位等缺点,一定程度上限制了桥梁检测的准确性与全面性,对桥梁养护管理工作产生了不利影响。

近年来,国内外许多专家学者开始致力于将图像处理与影像建模技术应用到桥梁结构的病害识别与检测上,取得了一定研究成果,如表 1 所示。

表 1 图像处理与建模技术在桥梁检测领域研究现状

研究人员	技术及原理	试验验证或工程应用
重庆大学 贺付亮	提出了以图像识别为基础的非接触式桥梁拉索表面缺陷检测方案	能良好检测出拉索表面 PVC 保护层的面积大于 1 cm ² 表面缺陷
湖南大学 方志等	提出采用在混凝土表面粘贴纯色标定块来标定、修正原始图像等一系列处理后直接在图像上确定裂缝宽度的无接触式测量方法	对一开裂混凝土梁表面的 11 条裂缝进行了检测及验证,结果表明该方法对混凝土桥梁结构表面裂缝宽度能够进行较好识别
华南理工大学 许薛军等	提出了图像灰度化、棋盘格角点求解像素率、滤波除噪、边缘检测等一系列图像处理算法	实现了基于图像的桥梁裂缝宽度计算和软件系统,并用 15 幅桥梁裂缝图像验证了其裂缝检测精度
东北林业大学 马卫建等	基于数字图像处理,运用程序语言设计出一套桥梁病害检测程序	对已知桥梁病害信息进行了数据采集,并标识病害部位,快速得到病害信息数据,为桥梁病害检测工作提供便捷、精确、快速的处理手段

但是,到目前为止图像处理与影像建模技术在桥梁的运维与检测上的大多数研究性成果或聚焦于结构物的模型重构,或专注于结构裂缝等特征明显的表面缺陷的识别与尺寸计算,无法对病害进行三维空间的精确定位,更是缺少对模型重构和特征记录识别与空间定位这两者的有效整合与信息结构化、数据库化,进而无法实现计算机对数据的直接分析与管理。

该文尝试通过融合 BIM 技术与图像处理和建模技术,结合规范与实际项目建立桥梁运维管养建筑信息模型(BIM 模型)分类及编码标准和结构化数据库,并针对桥梁外观病害提出集图像数据采集、图像处理与建模、病害识别与测量、数据编码与建库的一整套桥梁检测与维护系统,解决传统检测方法在桥梁检测维护方面信息零散、覆盖不全等一系列问题。并以四川省遂宁市某高速公路桥梁为试验对象,进行该系统的实例验证。

2 桥梁运维 BIM 模型

2.1 运维 BIM 模型的概念与特点

BIM(建筑信息模型,全称 Building Information

Modeling)是一种将工程项目全生命周期中各个不同阶段的工程信息、过程和资源整合的三维数字化信息模型。对于高速公路桥梁的运营维护来讲,运维阶段的 BIM 模型应该是桥梁结构的虚拟三维数字化,是将真实的几何体逆向重构于虚拟的数字开发环境中。空间维度,它表达了桥梁结构的实时状态,涵盖了其几何、空间、图像、材质等全方位静态物理信息;时间维度,它记录了桥梁全生命期的所有养护管理的动态历史信息。

高速公路运维管养阶段桥梁的 BIM 模型构成的方式之一是通过现实捕捉技术将真实世界桥梁结构在计算机虚拟环境中重构,是异于传统 BIM 应用中由竣工图纸翻模而得到的信息模型,二者在数据来源和准确性上有本质的区别。通过现实捕捉技术逆向得到的 BIM 模型应包含桥梁所有状态信息并建立科学评价的数据库,在结构化的大数据情形下实现桥梁评价的科学性、标准一致性。由此建立的运维管养桥梁 BIM 模型具有数据结构化、信息完整性的特点,能够建立全服役期桥梁三维信息模型数据库,极大地提升管养维护效率和准确性。

2.2 桥梁运维 BIM 模型分类与编码

为建立桥梁运维 BIM 模型及其结构化数据库,该文借鉴建筑行业的分类、编码标准,参考铁路行业的相关方法,研究建立了一套运维管养阶段桥梁 BIM 模型分类与编码规则。

中国铁路行业《铁路工程信息模型分类和编码标准》基于 IFD 标准,遵从 ISO 12006—2 框架体系。为建立与铁路桥梁统一、共享的标准体系,在对公路桥梁进行分类与描述时,使用按平面形态分桥梁、按受力形态分桥梁、按材料分桥梁相结合的方法进行分类;由于公路桥梁的运营管养均针对构件进行检测与评定,因此提出了桥梁运维 BIM 模型按照桥梁工程实体组成构件进行分类与编码的标准。

桥梁运维信息模型编码方案由实体构件编码+病害信息编码构成。实体构件编码采用逐级分类法,以

拼音首字母(不超过 3 位)+3 位数字结合的方式,首字母表示构件名称,数字表示构件位置,编码长度不超过 20 位;桥梁结构病害信息以 2 位字母+3 位数字分类别进行编码,字母表示病害名称,数字表示病害位置及编号。以主梁病害为例,其编码方式见表 2。

表 2 桥梁病害分类与编码(以主梁为例)

病害类型	编码	病害类型	编码
混凝土开裂	KL	露筋	LJ
蜂窝	FW	渗水	SS
麻面	MM	泛碱	FJ
剥落	BL	碳化	TH
掉角	DJ	异常变形	BX
空洞	KD		

依据以上编码规则,以一座简支梁桥 1 跨 1 号小箱梁底裂缝为例,其编码如表 3 所示。

表 3 实体构件编码(以简支梁桥小箱梁底裂缝为例)

第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	构件及相应病害编码
构造物分类	构造物二级分类	构件分类	构件二级分类及位置	构件病害分类及位置	
桥梁 A	梁式桥 LQ	上部结构 SB	边跨内边小箱梁 XL001	裂缝 LF001	A.LQ.SB.XL001.LF001

依据以上规则,对细分到桥梁构件的病害及养护信息结构化,即建立桥梁运维的三维信息数据库。由此在桥梁运维 BIM 模型上,每一个细微的病害信息都能被唯一地表示与记录。而结合三维激光扫描的影像建模技术则为该 BIM 模型和数据库构建提供了技术实现路线。

3 基于影像建模技术的桥梁运维 BIM 模型及病害数据库建立

为获得桥梁运维 BIM 模型和桥梁病害信息,该文设计了一套高效率、高精度、可视化的桥梁模型重构和病害检测与建库系统,主要包含 3 大部分:数据采集系统、影像后处理建模系统、病害分析与建库系统。总体技术流程如图 1 所示。

3.1 数据采集

利用高分辨率单镜头反光式取景照相机进行桥梁实景图像数据的采集,用于后期图像建模与病害分析;利用三维激光扫描仪进行桥梁结构几何数据采集,为后期影像建模提供空间位置与尺寸参照。

3.2 影像数据处理与 BIM 模型建立

使用针对桥梁检测开发的倾斜摄影建模软件进行

高分辨率桥梁三维模型的重构。将采集到的手持数码相机影像数据导入软件,经空中三角测量、高密度点云数据生成、TIN 网模型构建和全自动纹理映射,生成基于真实影像纹理的高分辨率实景三维模型;同时依据拼接后的点云几何模型对实景三维模型进行空间位置与尺寸校对,使二者精确配准,以便后期病害识别与数据库建立。

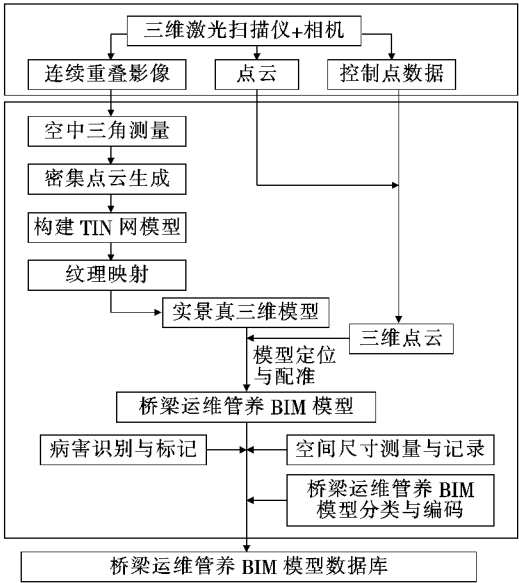


图 1 总体技术流程图

3.3 桥梁病害识别与建库

在获得桥梁高分辨率实景三维模型后,其空间位置、结构尺寸、结构材质随即获得。同时专业人员在软件平台中实现桥梁外观病害的识别与标记,进行长度、宽度、面积的测量与三维空间定位,并依据桥梁运维 BIM 模型分类与编码规则,对各桥梁及其构件病害进行编码,最终形成桥梁运维 BIM 模型及数据库,交付给高速公路管理单位作为基础数据支撑,为后续养护方案确定提供重要依据。

4 工程试验

为验证以上提出的基于影像建模技术的桥梁运维 BIM 模型与病害数据库建立方法的可操作性与准确性,现选取四川省遂宁市某高速公路主线桥为试验对象,进行全流程试验。该大桥 2010 年 8 月正式开工建设,至今已通车运营 5 年,为多跨预应力混凝土简支小箱梁桥,桥梁全长 266.1 m,全宽 24.5 m。截至试验前,该桥右幅第 7 跨梁底已出现部分外观病害,已进行两次定期检查,病害数据较全面,可作为试验数据准确性的参照。

4.1 数据采集与处理

依据现场状况,为便于数据采集,试验选取左幅第 7 跨梁底,采用 NIKON D7200 单镜头高分辨率数码相机和 FARO Focus3D 激光扫描仪,在利用盖梁底黑白棋盘和靶标球进行相机标定和扫描仪定位后,沿梁走向以固定频率依次对梁侧、梁底进行影像采集,保证 30%~40% 的旁向重叠率。

4.2 图像处理与建模

将桥梁多视影像数据导入软件,对图像中的特征点进行提取后,经相对定向、连接点匹配等步骤,运算处理得到桥梁实景三维模型。

由于软件自动建立的模型空间比例尺与相对位置有较大误差,精度上无法满足检测时的测量要求,需进行校正。

首先,将扫描的点云以靶标球为特征点拼站处理得到桥梁点云模型。不失一般性,为便于计算与测量,现选取右边梁顶板上 3 点与腹板上 1 点: $P_i = Y(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1,2,3,4$) 作为特征点(图 2),分别计算出相对点 2 的距离: $P_{2i} = \sqrt{(x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 + (z_2 - z_i)^2}$, ($i=1,3,4$)

接着,在实景三维模型中(图 3),选取相同 4 点,以点 2 为原点、 P_{23} 为 X 轴建立左手直角坐标系

$$XOYZ, \text{分别令: } \begin{cases} Q_1 = (0, P_{21}, 0) \\ Q_2 = (0, 0, 0) \\ Q_3 = (P_{23}, 0, 0) \\ Q_4 = (0, P_{24} \sin \alpha, P_{24} \cos \alpha) \end{cases}$$

以此对计算模型进行空间比例尺校正,最终得到高精度、实景化的桥梁实景 BIM 模型,为病害检测提供了完整数据基础,如图 4 所示。

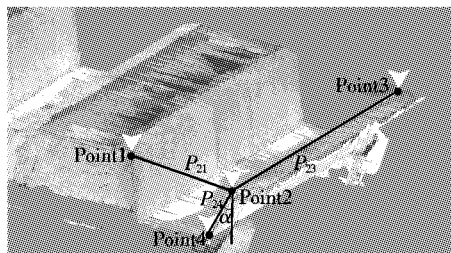


图 2 桥梁点云模型测距

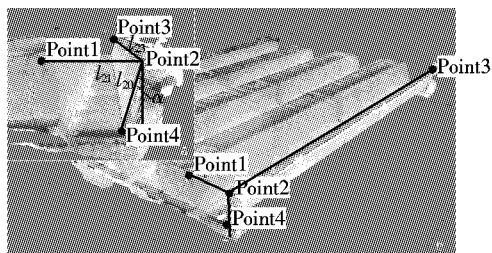


图 3 桥梁实景三维模型校正

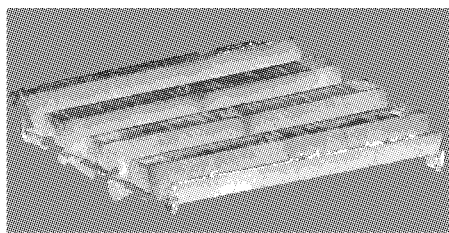


图 4 桥梁实景 BIM 模型

4.3 病害分析与建档

此次试验数据采集工作实际工时 2.5 h,内业建模与病害检测实际工时 2 h,共采集高清照片 879 张,点云数据 6.7 G,利用实景影像与点云数据建立了桥梁运维 BIM 模型,为桥梁检测工程师提供了三维可视化的可靠数据基础。

限于篇幅,该文选取识别出的几种典型病害进行分析。图 5 为基于该模型对一混凝土梁腹板纵向裂缝的标记与测量结果,在对裂缝进行标记的同时,系统自动计算其长度、宽度,并生成相应编码进入桥梁运维数据库;图 6 进一步展示了对该裂缝进行空间定位的结果,系统自动测量裂缝标记处 4 个拐点的坐标值,精确

定位出该裂缝的起终点及走向,这对未来基于检测数据的病害持续追踪与发展趋势预测具有重要意义。

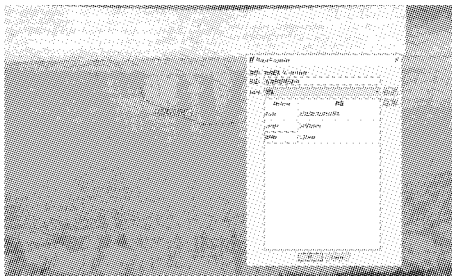


图 5 混凝土小箱梁底纵向裂缝测量

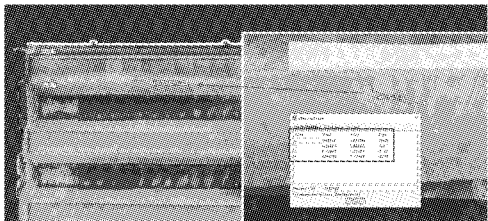


图 6 梁底纵向裂缝定位

图 7 为基于该模型识别出的混凝土剥落病害;图 8 为桥梁病害的数据库建立与病害信息统计表导出过



图 7 横隔板混凝土剥落标记

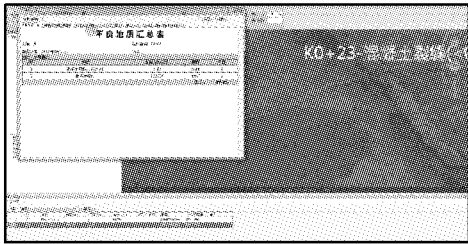


图 8 桥梁病害数据库建立与导出

程,为养护管理单位的修复方案制定提供了完整全面的数据。

表 4 分别统计了传统桥检方法和基于桥梁运维 BIM 模型的病害检测结果,并进行了对比。

表 4 桥梁病害识别结果对比(7 跨)

部位 (权重)	编号	缺损位置描述		缺损类型	病害描述			数据库编码
		基于模型的 检测方法	传统检测 方法		基于模型 的识别值	传统方法 实测值	相对误差/ %	
上部承重 结构 (0.70)	1	7-3# 梁 6.41 m 处	7-3# 梁 6 m 处	腹板纵向 裂缝	$L=3.431\ 1\ \text{m}$, $W=0.212\ 3\ \text{mm}$	$L=3.5\ \text{m}$ $W=0.2\ \text{mm}$	$\delta_L=1.97$, $\delta_w=6.15$	A.LQ.SB, XL027.LF001
	2	7-1# 梁跨中 10.04 m 处	7-1# 梁 跨中	梁底纵向 裂缝	$L=0.184\ 3\ \text{m}$, $W=0.130\ 5\ \text{mm}$	$L=0.2\ \text{m}$, $W=0.12\ \text{mm}$	$\delta_L=7.85$, $\delta_w=8.75$	A.LQ.SB, XL025.LF002
	3	7-3# 梁翼缘板 11.22 m 处	未发现	右侧翼缘板 混凝土剥落	$S=0.045\ \text{m}^2$	未发现		A.LQ.SB, XL027.BL001
	4	7-3# 梁翼缘板 19.64 m 处	未发现	右侧翼缘板 混凝土剥落	$S=0.032\ \text{m}^2$	未发现		A.LQ.SB, XL027.BL002
上部一般 结构(0.18)	5	7-1-1# 跨中 10 m 处	7-1-1# 跨中	7-1-1# 横隔板 底部混凝土剥落	$S=0.011\ 2\ \text{m}^2$	$S=0.1\times 0.1\ \text{m}^2$	$\delta=12$	A.LQ.SB, HGB001.BL001
支座 (0.12)	6	7-6-4# 支座	7-6-4# 支座	外鼓				A.LQ.SB, ZZ028.WG001
	7	7-7-1# 支座	7-7-1# 支座	外鼓				A.LQ.SB, ZZ029.WG001
	8	7-7-2# 支座	未发现	外鼓		无		A.LQ.SB, ZZ030.WG001
	9	7-7-4# 支座	未发现	剪切变形				A.LQ.SB, ZZ032.BX001

注:L 为裂缝长度;W 为裂缝宽度;S 为剥落混凝土面积。

结果表明:基于模型的检测方法发现了传统方法漏检的横隔板和翼缘板混凝土剥落、支座外鼓等病害 4 处,病害检出率高,规避了传统方法当漏检病害数量达到一定阈值时,可能会对不同权重占比的桥梁构件技术状况评分产生较大影响的情况;尺寸测量更精确,平均相对误差 7.34%,标准差 3.30%,识别精度提高到 92.64%。

综合以上检测结果,基于 BIM 的影像建模技术应用于桥梁检测中,具有如下优势:

(1) 实现了桥梁信息全覆盖。传统桥检方法主要依赖于人眼识别,受天气、温度、人为主观因素等影响,部分桥梁病害可能会被桥检工程师遗漏;图像是具有高可靠度的数据源,基于图像逆向建立的桥梁运维 BIM 模型,100%还原了桥梁空间位置与构件尺寸信息、图像与材质信息、病害与养护信息,提高了检测信息的准确性,相较于传统人工桥梁检测方法具有明显优势。

(2) 建立了结构化桥梁运维信息数据库。该方法在标记、测量病害的同时,即完成了对该病害的编码与档案建立,其类型、位置、空间尺寸随即进入桥梁运维 BIM 模型数据库,建立了海量运维数据的组织性、联系性,并可实现三维可视化展示。这对养护工程师实现病害的定时跟踪、多期数据的对比与追溯、未来大数据环境下的桥梁信息化健康状况监测具有深远意义。

(3) 提高了数据准确性、获取便利性,适用面广、灵活性好、安全性高。现场仅运用图像采集设备即可快速获取桥梁信息,无需携带其他专业设备与技术人员,大量检测工作均可室内操作,且识别精度达到 92.64%,提高了桥梁检测适应性与灵活性,极大保障了检测工程师的安全。

5 结 论

创新性地提出了一种运维阶段的 BIM 模型的概念,建立了一套模型编码标准与数据库建立方法;提出并采用了一种融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测方法,有效解决了现行桥梁检测信息零散化、可追溯性差的问题。该方法在保证检测精度的条件下,可提高

检测效率与可视化程度,初步实现检测维护信息的全覆盖、数据结构化和病害的精确定位。工程试验结果表明:该方法与传统检测方法相比,具有准确、高效、全面、安全的特点。未来的高速公路桥梁日常检查和定期检查中,在环境条件和技术水平具备的条件下,尝试应用该技术,逐步积累应用经验,将对高速公路桥梁检测与维护具有重要意义。

参考文献:

- [1] 贺拴海,赵祥模,马建,等.公路桥梁检测及评价技术综述[J].中国公路学报,2017(11).
- [2] JTG H11—2004 公路桥涵养护规范[S].
- [3] 贺付亮.基于图像识别的桥梁拉索表面缺陷检测系统设计[D].重庆大学硕士学位论文,2006.
- [4] 方志,彭海涛.基于图像分析技术的混凝土桥梁结构表面裂缝宽度检测[J].湖南大学学报(自然科学版),2012(1).
- [5] 王林林.基于数字图像处理技术的混凝土裂缝特征检测与计算分析[D].山东科技大学硕士学位论文,2017.
- [6] 马卫建,孙凯林.基于图像识别技术的桥梁病害检测技术研究[J].黑龙江交通科技,2015(11).
- [7] Chan B, Guan H, Hou L, et al. Defining a Conceptual Framework for the Integration of Modelling and Advanced Imaging for Improving the Reliability and Efficiency of Bridge Assessments[J].Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016,6(4):703—714.
- [8] Zhenzhong H U, Xinying L U, Zhang J. Building Information Model—Based Application Framework for Life Cycle Management of Bridges[J].Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2010(S1).
- [9] 杨龙.面向 BIM 的铁路工程分类与信息编码方法研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2016.
- [10] 中国铁路 BIM 联盟.铁路工程信息模型分类和编码标准[J].铁路技术创新,2015(1).
- [11] 邓琴.基于 DPMoDeler 的倾斜影像三维建模[D].东华理工大学硕士学位论文,2015.
- [12] 束搏,邱显杰,王兆其.基于图像的几何建模技术综述[J].计算机研究与发展,2010(3).
- [13] JTG/T H21—2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [14] 曹素功,黄立浦,张勇,等.桥梁健康监测数据的结构化存储与分析[J].中外公路,2019(2).