

马中军,王晓威,王智楠.综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法[J].地震工程学报,2019,41(4):1079-1085.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1079

MA Zhongjun, WANG Xiaowei, WANG Zhinan. Nondestructive Testing Method for Steel Structures Based on Building Information Modeling and Surface Image Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1079-1085. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1079

综合 BIM 结合表面图像分析的 钢结构无损检测方法

马中军¹, 王晓威², 王智楠¹

(1. 南阳理工学院土木工程学院, 河南 南阳 473004;

(2. 河南坤华同盛建设工程有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 采用质量脆弱性评价方法检测地震区绿色施工建筑钢结构时,易受噪声的干扰,且检测深度较浅,未能全面检测钢结构的损坏情况。提出综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法,使用小波分解方法对建筑钢结构的检测图像进行去噪处理,通过膨胀与腐蚀处理增强检测图像的清晰度,采用红外图像技术,依据缺陷边缘处检测图像恢复的变化率,通过旋转跟踪法依次提取缺陷边缘,构建基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型,全面掌控地震区绿色建筑钢结构的材料、无损检测以及管理等过程,管控建筑钢结构全寿命周期,完成建筑钢结构的无损检测。实验结果表明,所提方法有效检测率为 100%,检测深度高达 1 499 mm,且检测结果的相对误差仅有 0.000 7%。

关键词: BIM; 地震; 绿色施工; 建筑; 钢结构; 无损检测

中图分类号: TP311.52; TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-1079-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1079

Nondestructive Testing Method for Steel Structures Based on Building Information Modeling and Surface Image Analysis

MA Zhongjun¹, WANG Xiaowei², WANG Zhinan¹

(1. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan, China;

2. The Construction Engineering Company of Henan Kunhua Tongsheng, Nanyang 473000, Henan, China)

Abstract: Using the method of quality vulnerability assessment to detect the steel structure of green construction buildings in the earthquake area easily leads to noise disturbance. Moreover, the detection depth is shallow; therefore, the damage of the steel structure cannot be detected comprehensively. Herein, a nondestructive detection method for steel structure based on building information modeling (BIM) and surface image analysis is proposed. The wavelet decomposition method is used to denoise the detection

收稿日期: 2018-10-27

基金项目: 河南省 2018 年科技攻关自然科学基金项目(182102310017); 河南省自然科学基金(CXTD2011045)

第一作者简介: 马中军(1972-),女,河南南阳人,硕士,教授,研究方向:结构无损检测、绿色施工研究。

E-mail: mzj0722@126.com。

image of the steel structure. Further, the expansion and corrosion processings are used to enhance the clarity of the detection image. According to the change rate of image restoration at defect edges, the infrared image technology, and rotation tracking method are adopted to extract the defect edge. The detection model of green construction steel structure based on BIM in seismic area was constructed to comprehensively control the material, nondestructive testing, and management of green construction steel structure in the seismic area. Additionally, the whole life cycle of steel structure is controlled, and the nondestructive testing of steel structure is completed. The experimental results show that the effective detection rate of the proposed method, detection depth, and relative error of the detection results are 100%, 1 499 mm, and 0.000 7%, respectively.

Keywords: BIM; earthquake; green construction; building; steel structure; non-destructive testing

0 引言

绿色施工建筑是建筑产品绿色可持续化的呈现载体,能够推动建筑业可持续发展的趋势。地震的发生会导致建筑出现倾斜、裂缝、坍塌等问题,采用有效方法检测地震区绿色施工建筑的倾斜度,对于确保建筑安全具有重要作用。施工阶段是构建绿色建筑产品的核心工序,怎样实现地震区绿色可持续化管理是建筑工程界相关人员关注的重点问题。文献[1]提出质量脆弱性评价方法,排序建筑钢结构安全性检测过程质量脆弱性的干扰因子,判定建筑钢结构脆弱等级,但该方法的评价结果易受噪声干扰,且检测深度较浅,不能全面检测钢结构的损坏情况。文献[2]提出的建筑物自动检测方法,检测钢结构缺陷的过程较为复杂,且有效检测率过低,导致方法整体实用性较差。文献[3]提出影像建筑物检测方法,主要采用卷积神经网络方法检测建筑钢结构缺陷,需要不断调整参数,运算量较大,导致算法的检测效率大大减低。

为了提高地震区绿色建筑工程施工环境可持续性与信息化,施工管理需要与时俱进,与现代信息技术相结合^[4]。近几年,建筑信息模型(简称 BIM)等现代信息技术出现在各大建筑工程领域,不仅能够优化协同与集成管理形式,且在绿色建筑施工信息化领域中成效斐然。BIM 是根据三维技术融合建筑工程项目数据和模型核心信息的系统类方法,在施工工艺庞杂、施工环境管理标准较高的建筑项目中使用,可防止施工管理破坏环境和浪费资源的现象出现,提高施工管理绿色可持续性的程度,完成绿色施工管理^[5]。本文提出综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法,以期实现地震区绿色施工建筑钢结构的无损检测。

1 综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法

1.1 建筑钢结构无损检测方法

实现建筑钢结构无损检测过程是:先对预处理的建筑钢结构检测图像实行小波分解并设定阈值,只保存模值不小于阈值的变换系数;再对钢结构的检测图像进行去噪处理;最后采用红外图像技术进行形态学处理以增强检测图像的清晰度,检测钢结构的缺陷边缘,完成建筑钢结构无损检测。

(1) 小波基的选取

因为不同图像的差异,小波时频局部化特征也有所不同,分析建筑钢结构检测图像的缺陷时,应采用合理的小波基分析检测图像。双正交小波基不仅具有正则性、紧支性、高阶消失矩等属性,而且其对称性也优于正交小波基,具备较优越的线性相位属性。因此,本文建筑钢结构检测模型分析建筑钢结构检测图像与噪声信号时选用双正交小波基 bior3.1。

(2) 分解层数的选取

小波分解层数的选取是本文模型进行建筑钢结构无损检测时需要考虑的核心问题。信号分解层数需要按照近似信号噪声最小的标准选取。如果信号的信噪比 $SNR \geq 20$,则分解层数 $C=4$;反之 $C=5$ 。为了提升无损检测的实时性,设置分解层数为 $C=4$ 。

(3) 阈值的判定

通过上述小波变换后,建筑钢结构检测图像中的噪声信号数值具有分散性,信号幅值较小;但是检测图像中的信号还存在大幅值问题,且聚集在少量的小波系数中,所以使用阈值判定方法能够将信号系数保存下来,使得大量噪声系数变成 0。

阈值的判定是信号去噪操作的关键步骤,建筑钢结构检测模型使用的阈值判定方法为:

$$y = \epsilon \alpha \sqrt{2 \lg M} \quad (1)$$

式中: y 表示的是尺度向量; α 描述的是噪声大小; M 描述的是尺度中小波系数数量; e 表示常数,值为 1。

建筑钢结构检测图像信号的小波系数空间中噪声和信号的小波变换系数具有传播性,可依据最小尺度空间的小波系数获取噪声的大小 α :

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (j_i - \bar{j})^2} \quad (2)$$

式中:最小尺度空间的小波系数,也称首次小波变换获取的小波系数用 j_i 描述;小波系数均值用 $\bar{j}$ 描述;

(4) 小波消噪

建筑钢结构无损检测时,如果含噪声信号和有效信号不在相同频段里,那么需要把含噪声信号和相对应的小波系数归零,建立零通小波,之后根据重构公式恢复信号完成消噪。

因为小波变换对信号的奇异点高度敏感,所以适用于分析突变信号,信号的局部奇异点特征通过奇异性指数衡量^[6]。假定 $g(y) \in Y^2(q)$, 其中 $g(y)$ 表示尺度范围里的信号密度均值; $Y^2(q)$ 表示尺度范围。如果 $g(y)$ 对 $\forall y \in e_{y_0}$, 具备紧支撑的允许小波 $\vartheta(x)$ 具有可微同时导函数连续,且含有 n 阶消失矩,则尺度 y 检测图像中信号的小波变换函数为:

$$|Vf(y, c)| \leq y b^\epsilon \quad (3)$$

式中: ϵ 表示奇异指数。

采用上述计算后,如果 $|Vf(y, c)| \leq |Vf(y, c_0)|$, 则称 c_0 是小波变换 Vf 在尺度 y 里的局部极值点。小波函数的光滑度与奇异性指数呈现正相关关系^[7-8], 说明噪声具备负值的奇异性指数,但是钢结构缺陷的突变信号含有的奇异性指数不是负值,因此差异导致噪声的极大值属性和钢结构缺陷跳波信号的极大值具有较大的差异性^[9]。所以,尺度越大,突变信号幅值越大,但是噪声出现的极大值会逐渐减少,直到为 0,最终能够进行消噪处理。

(5) 形态学处理

形态学中的膨胀处理可增加钢结构检测图像中的检测目标边界像素。腐蚀处理和膨胀处理相反,可删掉检测目标边界的某类像素。采用膨胀与腐蚀处理后,可确保钢结构检测图像清晰度大大提升(图 1)。

(6) 钢结构检测图像缺陷边缘检测

钢材结构检测图像缺陷边缘的提取质量和缺陷面积的多少具有密不可分的关系。采用红外图像技术通过旋转跟踪法检测钢结构的缺陷边缘,依据缺陷边缘处图像恢复的变化率,旋转跟踪依次提取缺陷边缘。缺陷边缘检测原理用图 2 描述:从缺陷中

心点开始,水平往右检测至梯度最大值处,且把中心点至最大梯度点像素设定为 1;将缺陷中心设成圆心旋转图像,旋转角度设成 1,并且搜索检测水平方向梯度的最大值。

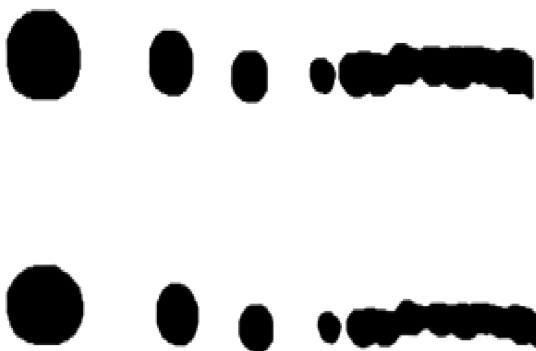


图 1 检测目标经过形态学处理后

Fig.1 Detection targets after morphologically processing

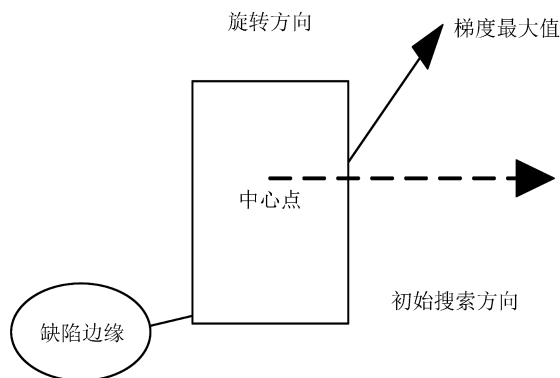


图 2 缺陷边缘检测原理

Fig.2 Principle of defect edge detection

1.2 基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型

模型整体结构用图 3 描述。根据上述的无损检测方法,小波基与分解层数的选取结果构成了 BIM 检测模型的基础数据层。通过阈值的判定、小波消噪与形态学的处理,可以完成 BIM 检测模型技术层的构建。最后图像边缘缺陷检测实现了对模型的数据管理。基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型由应用管理层、数据交换层、技术层与基础数据层构成。采用该模型可全面掌控绿色建筑钢结构的材料、无损检测以及维修等过程,提高建筑钢结构的质量^[10]。

其中应用管理层主要用于管理地震区绿色施工建筑项目、设计、施工以及绿色建筑钢结构等建筑工程立项规划阶段的相关情况^[11];数据管理层主要传输终端设备与网络技术层的数据,构建云服务平台

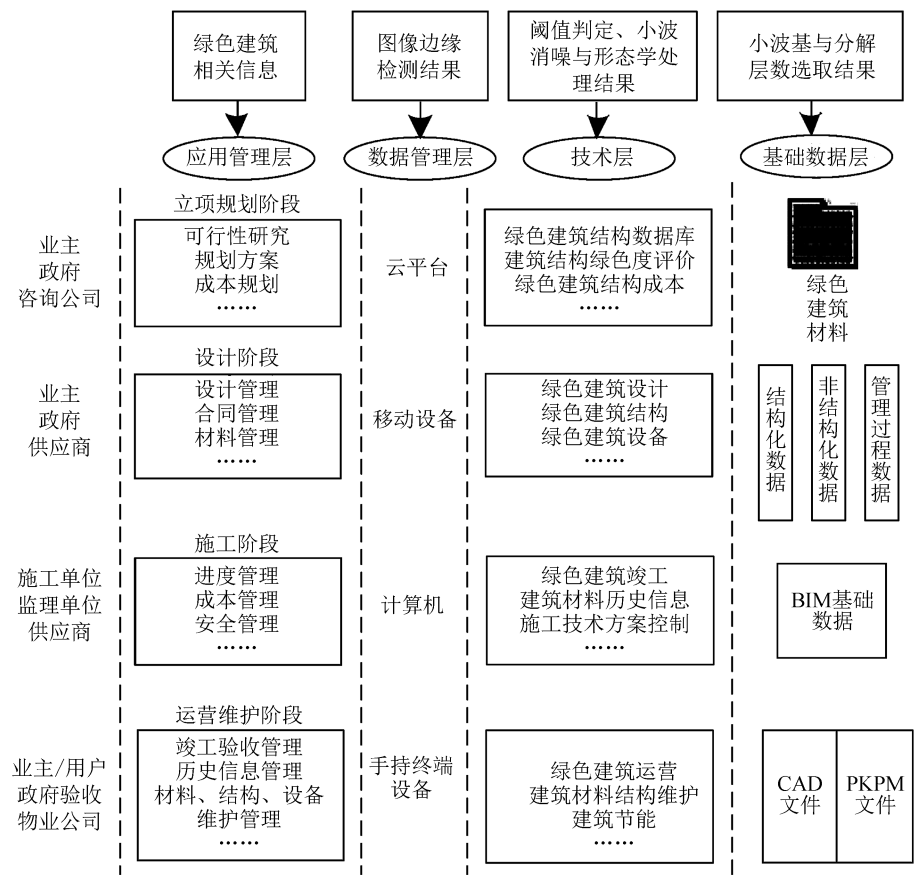


图 3 基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型结构图

Fig.3 Structural chart of steel structure detection model for green construction building in seismic area based on BIM

完成信息同享与处理,其中移动设备与手持终端设备作为硬件以用于传输 BIM 数据;技术层是绿色建筑施工时,使用精细的施工技术策略^[12],对地震区绿色施工建筑钢结构的准备、设计、竣工以及运营过程进行全面、有效的分析、管理和评估,最大程度提高绿色施工建筑钢结构质量,技术层主要用于管理建筑项目全寿命周期中绿色建筑钢结构无损检测 and 材料管理等过程^[13];基础数据层主要用于变换和管理结构化数据、非结构化数据管理过程数据和 CAD 文件数据等^[14-15]。本文所构建的基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型主要用于完成地震区绿色建筑钢结构的全寿命周期管控。

2 实验分析

2.1 抗干扰性能

为了验证本文方法的有效性,采用其对某地震区绿色施工钢结构进行无损检测。实验所需仪器为:MMA1220D 加速传感器,RS232 数据接口,PC 主机 1 台。通过无线连接检测设备,利用 RS232 数据接口将检测到的波形信息输出至 PC 主机进行显

示。实际的钢结构无损检测结果如图 4 所示。

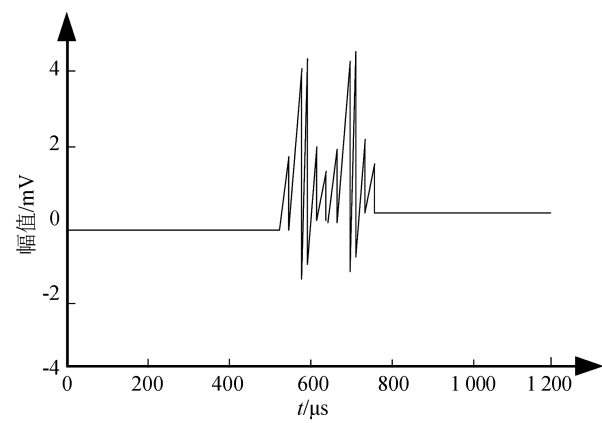


图 4 实际钢结构无损检测结果

Fig.4 Nondestructive testing image signal of an actual steel structure

以图 4 获取的实际钢结构无损检测结果为基础,引入随机噪声,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,引入随机噪声后实际的波形值已经被完全改变。接下来采用本文方法对含有随机噪声的钢结构进行检测,获得检测结果如图 6 所示。

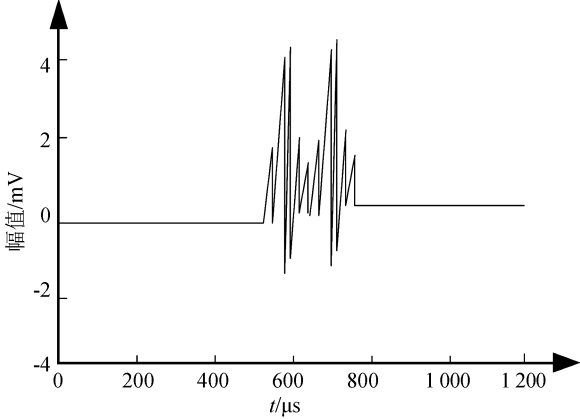
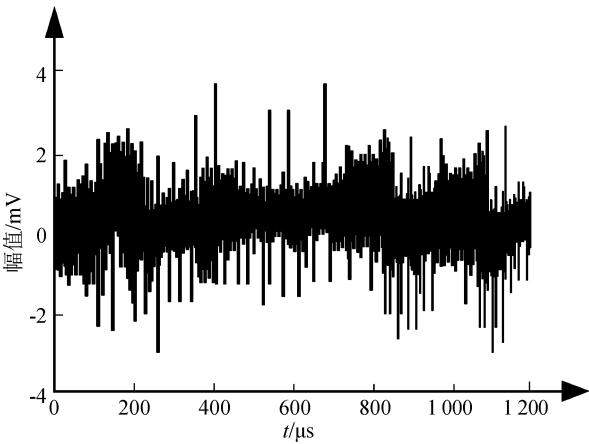


图 5 引入随机噪声后的图像信号

Fig.5 Image signal after introducing random noise

图 6 本文方法检测结果

Fig.6 Test results of proposed method

分析图 6 可知,本文方法对引入噪音的地震区绿色施工建筑钢结构图像信号无损检测结果和实际检测结果完全吻合,说明本文方法可有效实现钢结构的无损检测。

2.2 检测准确率对比

采用本文方法、质量脆弱性评价方法和建筑物自动检测方法进行对比实验,对实验地震区绿色施工建筑钢结构中的 16 个裂纹结构、8 个合格结构进行无损检测。三种方法的检测结果列于表 1。

表 1 三种方法的检测结果对比情况

Table 1 Comparison of results of three methods

工件实情	噪音参量/dB	本文方法	质量脆弱性评价方法	建筑物自动检测方法
裂纹结构 1	0.455 66	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
裂纹结构 2	0.357 4	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 3	0.432 1	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 4	0.432 6	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
裂纹结构 5	0.653 4	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 6	0.653 6	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 7	0.421 2	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
裂纹结构 8	0.564 2	裂纹结构,需要处理	无法识别	裂纹结构,需要处理
裂纹结构 9	0.564 2	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理
裂纹结构 10	0.543 2	裂纹结构,需要处理	无法识别	裂纹结构,需要处理
裂纹结构 11	0.456 7	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理
裂纹结构 12	0.543 2	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 13	0.678 5	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
裂纹结构 14	0.653 5	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
裂纹结构 15	0.234 7	裂纹结构,需要处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
裂纹结构 16	0.642 3	裂纹结构,需要处理	无法识别	无法识别
合格结构 1	0.542 1	合格结构,无须处理	裂纹结构,需要处理	无法识别
合格结构 2	0.456 7	合格结构,无须处理	无法识别	无法识别
合格结构 3	0.432 1	合格结构,无须处理	裂纹结构,需要处理	合格结构,无须处理
合格结构 4	0.453 2	合格结构,无须处理	无法识别	无法识别
合格结构 5	0.542 3	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理
合格结构 6	0.457 3	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理	无法识别
合格结构 7	0.532 5	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理
合格结构 8	0.563 6	合格结构,无须处理	合格结构,无须处理	无法识别

分析表 1 可知,在检测相同钢结构时,本文方法的检测结果与实际结构情况完全吻合,其有效检测率为 100%;质量脆弱性评价方法在 16 个裂纹结构检测中有 9 个无法识别,在 8 个合格结构检测中有

2 个无法识别,有 2 个检测结果错误,则钢结构有效检测数量为 7+4=11 个,其有效检测率为 45.8%;建筑物自动检测方法在 16 个裂纹结构检测中有 12 个无法识别,在 8 个合格结构检测中有 5 个无法识

别,同理,该方法的结构有效检测数量 7 个,有效检测率为 29.2%。通过数据对比能够验证,本文方法的有效识别率符合实际钢结构无损检测要求,有效检测率较高。

2.3 检测深度与相对误差对比

统计上述实验中三种方法的检测深度和相对误差,对比结果列于表 2。

分析表2可知,实验设定的检测目标的检测深

表 2 三种方法的检测深度和相对误差的对比结果

Table 2 Comparison of detection depths and relative errors of three methods

工件实情	深度实际值 /mm	本文方法		质量脆弱性评价方法		建筑物自动检测方法	
		检测深度/mm	相对误差/%	检测深度/mm	相对误差/%	检测深度/mm	相对误差/%
裂纹结构 1	5	5	0	4	0.20	2	0.60
裂纹结构 2	10	10	0	9	0.10	8	0.20
裂纹结构 3	15	15	0	14	0.67	12	0.20
裂纹结构 4	20	20	0	19	0.05	16	0.20
裂纹结构 5	25	25	0	24	0.04	21	0.16
裂纹结构 6	30	30	0	29	0.33	26	0.13
裂纹结构 7	35	35	0	34	0.29	32	0.09
裂纹结构 8	40	40	0	39	2.50	37	0.08
裂纹结构 9	45	45	0	44	0.02	43	0.04
裂纹结构 10	50	50	0	49	0.02	49	0.02
裂纹结构 11	55	55	0	54	0.18	54	0.02
裂纹结构 12	60	60	0	59	0.17	56	0.07
裂纹结构 13	65	65	0	64	0.16	62	0.05
裂纹结构 14	70	70	0	69	0.14	67	0.04
裂纹结构 15	75	75	0	74	0.13	71	0.07
裂纹结构 16	80	80	0	79	0.13	71	0.11
合格结构 1	85	85	0	84	0.12	81	0.01
合格结构 2	90	90	0	89	0.90	81	0.10
合格结构 3	95	95	0	94	0.11	94	0.11
合格结构 4	100	100	0	99	0.01	95	0.05
合格结构 5	105	105	0	104	0.01	100	0.05
合格结构 6	110	110	0	109	0.01	103	0.07
合格结构 7	115	115	0	114	0.009	111	0.03
合格结构 8	120	119	-0.009	119	0.009	118	0.02
共计	1 500	1 499	-0.000 7	1 476	0.016	1 408	0.06

度实际值为 1 500 mm,本文方法的检测深度高达 1 499 mm,与其他两种方法相比分别高出23 mm、91 mm。本文方法的相对误差仅有一0.000 7%,远低于其他两种方法的相对误差值,说明本文方法对地震区绿色施工建筑钢结构的无损检测深度大,相对误差小。

3 结论

建筑信息化与绿色建筑的结合是未来建筑领域发展的整体方向,建筑信息化技术能够推进绿色建筑高效率发展。因此本文提出综合 BIM 结合表面图像分析的钢结构无损检测方法,使用小波分解方法去除建筑钢结构检测图像中的噪声,大大提升钢结构无损检测精度;然后采用红外图像技术,通过旋转跟踪法检测钢结构的缺陷边缘;最后采用基于 BIM 的地震区绿色施工建筑钢结构检测模型全面掌控绿色建筑钢结构的材料、无损检测和维修等过程,

确保地震区绿色建筑钢结构全寿命周期的相互协调和统一,完成地震区绿色施工建筑钢结构的无损检测。经验证,本文方法对引入噪音的地震区绿色施工建筑钢结构图像信号无损检测结果和实际检测结果完全吻合,有效检测率为 100%;与质量脆弱性评价方法和建筑物自动检测方法相比,本文方法的检测深度高达 1 499 mm,相对误差仅有一0.000 7%,符合实际应用要求,具有较高的使用价值。

参考文献(References)

[1] 裴兴旺,李慧民,孟海,等.既有建筑结构安全性检测过程质量脆弱性评价[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):181-186.
PEI Xingwang,LI Huimin,MENG Hai,et al.Quality Vulnerability Assessment on Safety Testing Process of Existing Building Structure[J].Journal of Safety Science and Technology, 2017,13(1):181-186.

[2] 王宏涛,王变利.融合 LiDAR 和多光谱影像的建筑物自动检测[J].测绘科学,2015,40(8):64-67,17.

- WANG Hongtao, WANG Bianli. Automatic Building Detection Fusing LiDAR and Multispectral Imagery[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(8): 64-67, 17.
- [3] 李政, 李永树, 吴玺, 等. 基于卷积神经网络的空心村高分影像建筑物检测方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 160-165.
- LI Zheng, LI Yongshu, WU Xi, et al. Hollow Village Building Detection Method Using High Resolution Remote Sensing Image Based on CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 160-165.
- [4] 李英攀, 马晓飞, 梁欣, 等. 基于 Cloud-BIM 的绿色施工信息化管理研究[J]. 施工技术, 2016, 45(18): 48-53.
- LI Yingpan, MA Xiaofei, LIANG Xin, et al. Research on Information Management of Green Construction Based on Cloud-BIM[J]. Construction Technology, 2016, 45(18): 48-53.
- [5] 赵钦, 田庆, 刘云贺, 等. 绿色建筑评价新标准下 BIM 技术在施工管理中的应用研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 211-219.
- ZHAO Qin, TIAN Qing, LIU Yunhe, et al. BIM Technology Application of Construction Management under a New Assessment Standard for Green Building[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 211-219.
- [6] 孙恒. 校园建筑设计能耗优化监测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 383-386.
- SUN Heng. Simulation Study on Optimization of Energy Consumption Monitoring for Campus Building Design[J]. Computer Simulation, 2017, 34(10): 383-386.
- [7] 吴守荣, 李琪, 孙槐园, 等. BIM 技术在城市轨道交通工程施工管理中的应用与研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(11): 115-119.
- WU Shourong, LI Qi, SUN Huaiyuan, et al. Study and Application of BIM Technology in Urban Rail Transit Construction Management[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(11): 115-119.
- [8] 刘晓燕. 基于全寿命周期管理的电力设备状态检修成本研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 74-76.
- LIU Xiaoyan. Study on Electrical Equipment Condition-based Maintenance Cost with Life Cycle Cost Theory[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 74-76.
- [9] 王婷, 池文婷. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的应用探讨[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 306-311.
- WANG Ting, CHI Wenting. Discussion on the Application of BIM Technology in the Field of 4D Construction Schedule[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(2): 306-311.
- [10] LU Z X, XU C G, XIAO D G, et al. Nondestructive Testing Method for Curved Surfaces Based on the Multi-gaussian Beam Model[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(4): 39.
- [11] 朱记伟, 郑思龙, 刘建林, 等. 基于 BIM 技术的城市综合管廊工程协同设计应用[J]. 给水排水, 2016, 42(11): 131-135.
- ZHU Jiwei, ZHENG Silong, LIU Jianlin, et al. Application of Collaborative Design in Urban Utility Tunnel Based on BIM[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(11): 131-135.
- [12] CHEN J L, LI Z, GONG K Z. Nondestructive Testing Method Based on Lamb Waves for Localization and Extent of Damage[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 30(1): 65-74.
- [13] 刘智敏, 王英, 孙静, 等. BIM 技术在桥梁工程设计阶段的应用研究[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(6): 80-84.
- LIU Zhimin, WANG Ying, SUN Jing, et al. Application Study on BIM Technology in Bridge Design Stage[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(6): 80-84.
- [14] 朱红光, 赖苏玲, 易成, 等. 基于无损测试的新老混凝土抗冻融性能表征方法[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 141-146.
- ZHU Hongguang, LAI Suling, YI Cheng, et al. Characterization Method of Freeze-Thaw Durability for New-to-Old Concrete Based on Nondestructive Test[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 141-146.
- [15] 穆文奇, 徐炜, 南芳兰, 等. BIM 技术在模板脚手架工程施工精细化管理中的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(6): 12-14.
- MU Wenqi, XU Wei, NAN Fanglan, et al. Research on Application of BIM Technology in the Fine Management of Formwork Scaffold Construction[J]. Construction Technology, 2017, 46(6): 12-14.