

中文引用格式:徐菁,闫尊昊,杨松森,等.基于EMI-CNN的建筑施工模板支撑体系节点健康监测[J].中国安全科学学报,2024,34(7):83-90.

英文引用格式:XU Jing, YAN Zunhao, YANG Songsen, et al. Health monitoring of joints in construction formwork support systems based on EMI-CNN [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 83-90.

# 基于 EMI-CNN 的建筑施工模板支撑体系 节点健康监测\*

徐菁 副教授, 闫尊昊, 杨松森 副教授, 刘客  
(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520)

中图分类号: X948

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.07.0163

基金项目: 山东省自然科学基金资助 (ZR2021ME033, ZR2021ME239); 山东省研究生优质教育教学资源项目 (sdkyc2023088); 青岛理工大学优质教育教学资源项目 (y012023-002)。

**【摘要】** 为预防模板坍塌引发建筑施工安全事故风险,提出一种基于压电阻抗法(EMI)和卷积神经网络(CNN)的模板支撑体系节点智能监测方法。首先,利用压电陶瓷传感器(PZT)的机电耦合特性及其集驱动-传感于一体的特点,建立PZT-节点耦合系统的机电阻抗传感机制模型;其次,基于EMI法,以与待测结构耦合的PZT片电导信号为监测指标,确定模板支撑体系节点松动的发生;然后,以敏感频段内PZT片的801个原始电导信号为模型输入,9个节点松动程度为模型输出,构建162组学习样本和27组测试样本,建立EMI-CNN模型,确定节点松动程度;最后,以一个实际工程中的建筑施工模板体系节点为例,验证EMI-CNN模型的有效性,并对比分析EMI-BP模型。研究表明:EMI-CNN模型经过85次迭代达到收敛,预测准确率达到100%,相较于EMI-BP模型提高29.63%。该监测方法可实现对建筑施工模板支撑体系节点健康状态实时、准确、无损监测。

**【关键词】** 压电阻抗法(EMI); 卷积神经网络(CNN); 建筑施工; 模板支撑体系; 健康监测; 压电陶瓷传感器(PZT)

## Health monitoring of joints in construction formwork support systems based on EMI-CNN

XU Jing, YAN Zunhao, YANG Songsen, LIU Ke

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520, China)

**Abstract:** In order to monitor the health state of construction formwork support systems and prevent the risk of safety accidents caused by formwork collapses, a new intelligent monitoring method combining EMI and CNN for joints of formwork support systems was proposed. Firstly, based on the electromechanical coupling and sensing-driving characteristics of PZT, PZT-joint coupling model was built based on the electromechanical impedance sensing mechanism. Secondly, the original conductivity of PZT patch, coupled with the monitored structure, was used as a monitoring signature for identifying joint looseness based on the EMI technique. Thirdly, EMI-CNN model was built with the 801 original conductance signals of PZT over the sensitive frequency range as the inputs, and the nine degrees of joint looseness as the

outputs. In total, the dataset consisted of 189 samples, 162 for training and 27 for testing. At last, taking an actual formwork support system joint from building site as an example, EMI-CNN model was verified and compared with EMI-BP model by the experiment. The research results show that EMI-CNN model reached convergence after 85 iterations. The prediction accuracy of the EMI-CNN model reached 100%, which is 29.63% better than EMI-BP model. This proposed method is distinguished by its real-time, accurate and non-destructive monitoring capabilities, providing an effective solution for health monitoring of joints in construction formwork support systems.

**Keywords:** electro-mechanical impedance (EMI); convolutional neural networks (CNN); building construction; formwork support system; health monitoring; piezoelectric ceramic transducer (PZT)

## 0 引言

模板的可拆卸重复使用性、节点的受力集中性以及施工现场的复杂性,导致模板支撑体系节点松动时有发生且不易被发现,从而引发模板坍塌,造成建筑施工高处坠落事故<sup>[1]</sup>。建筑施工模板支撑体系由各类脚手架杆件和节点组成,是住建部认定的重要的“危大工程”之一<sup>[2]</sup>。2020年,全国(不包括港澳台地区)共发生房屋市政工程生产安全事故689起,死亡794人,模板支撑体系(脚手架)坍塌类事故发生率占总数的17.39%,位列各类事故发生频率第二位<sup>[3]</sup>。2019年,全国(不包括港澳台地区)共发生房屋市政工程生产安全事故773起,死亡904人,模板支撑体系(脚手架)坍塌类事故发生率占总数的4.35%<sup>[4]</sup>,位列各类事故发生频率第4位。实时、准确监测脚手架节点连接松紧状态,提前预示、反映、预警模板的坍塌,强化安全关口前移,对保障建筑安全施工具有重要意义。

针对建筑施工模板支撑体系的健康状态,实际工程中普遍采用的是人工巡检,结合一些传统的无损检测手段<sup>[5]</sup>。人工巡检的不足是检测者依赖个人经验对检测对象进行健康和等级评定划分,缺乏定量的数据支持,波动性较大;而传统的无损检测手段无法实现损伤的提前预警,更无法监测损伤的发展过程,是一种被动的滞后检测技术。目前,国内外学者针对模板支撑体系进行了较深入的研究,并取得了较好的成果。WANG Cao等<sup>[6]</sup>采用随机有限元法,考虑结构几何、材料和刚度等特性的不确定性,提出一种基于可靠度的模板体系极限状态设计方法;张辰泽等<sup>[7]</sup>以盘扣式模板支撑体系为研究对象,通过整架加载试验,确定立杆稳定临界承载力,并进一步建立可用于试验整架稳定性监控的监测方法;ZHANG Hao等<sup>[8]</sup>采用非线性有限元法确定节点

刚度、初始缺陷、屈服应力等不确定性因素对钢脚手架体系极限强度的影响,并采用一阶可靠度分析法评估结构稳定性。针对模板支撑体系的研究,目前主要集中在设计、健康监测和可靠性评估等方面,然而对实际投入使用的模板支撑体系节点连接区服役工作状态监测的研究却较少,而节点连接区承担着连接杆件的重要作用,是整个结构受力集中且复杂的关键区域,对整个模板系统的安全运营起着至关重要的作用。

鉴于此,笔者拟提出一种基于压电阻抗法(Electro-mechanical Impedance, EMI)和卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)的模板支撑体系节点连接状态分步式监测方法,即利用压电陶瓷传感器(Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT)的机电耦合特性及其集驱动-传感于一体的特点,基于EMI法较高的灵敏性,对节点小松动展开实时监测,利用CNN强大的非线性映射能力和抗噪性,处理监测信号,实现对模板工程脚手架节点连接状态的高效、准确、实时的智能化无损监测,以期降低模板工程倒塌事故发生、确保人民生命财产安全提供一定的保证。

## 1 基于 EMI-CNN 的脚手架节点监测

以目前建筑施工中普遍使用的扣件式模板支撑脚手架节点为例,扣件式脚手架节点包括盖板、底座、T型螺栓、螺母,如图1所示。通过拧紧扣件节点螺母使T型螺栓达到预紧力值实现节点连接。当T型螺栓发生松动时,节点连接区刚度将随之下降,导致节点连接发生松动,如果未被及时发现,将引发杆件连接失效,最终导致模板坍塌。

### 1.1 EMI

EMI是一种基于被测结构和PZT片之间机械能和电能相互转换的机电耦合效应,利用PZT的传

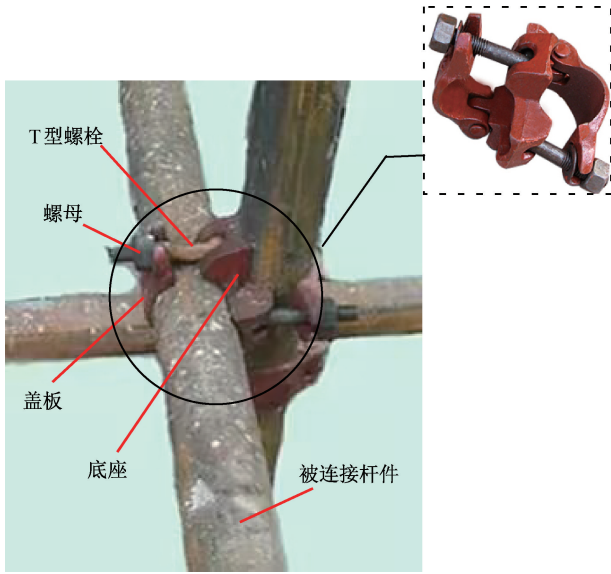


图 1 实际工程中的扣件式脚手架节点

Fig. 1 Cup-lock scaffolding joint at construction site

感-驱动特性,通过对比结构损伤前后机械阻抗值的变化,从而实现对结构健康状况监测的方法<sup>[9]</sup>。该方法具有较高的监测精度,尤其对结构局部小损伤较敏感<sup>[10]</sup>,受到广泛的应用。

利用 PZT 片,采用 EMI 法进行健康监测,基本原理如图 2 所示。考虑到直接测量结构机械阻抗较困难,通过测量与待测结构耦合的 PZT 片的阻抗信号变化,实现对结构机械阻抗变化的监测。PZT 片的电导纳  $Y(\omega)$  (阻抗倒数)如下所示:

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{h} \left\{ \bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \bar{Y}^E + \left( \frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) d_{31}^2 \bar{Y}^E \left( \frac{\tan nl}{nl} \right) \right\} \quad (1)$$

式中:  $Z_a(\omega)$  为 PZT 片的机械阻抗;  $Z_s(\omega)$  为被测结构的机械阻抗;  $\omega$  为激励信号的圆频率;  $w$ 、 $l$ 、 $h$  分别为 PZT 片的宽度、长度和厚度;  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  为外力为 0 时 PZT 片的介电常数;  $\bar{Y}^E$  为电场为 0 时 PZT 片的弹性模量;  $d_{31}$  为 PZT 片的压电常数。设  $\rho$  为 PZT 片的质量密度,则  $n = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\bar{Y}^E}}$  表示波数。

由式(1)可知:当 PZT 片本身性能保持不变时,PZT 片的电导纳变化可直接反映结构机械阻抗的变化。因此,利用 EMI 法,通过比较结构损伤前后的 PZT 片的电导纳信号变化,可实现对结构机械阻抗变化的监测。

根据已有研究,结构的机械阻抗可用力与速度之比来表示<sup>[11]</sup>。结构的机械阻抗  $Z_s(\omega)$  可表示为:

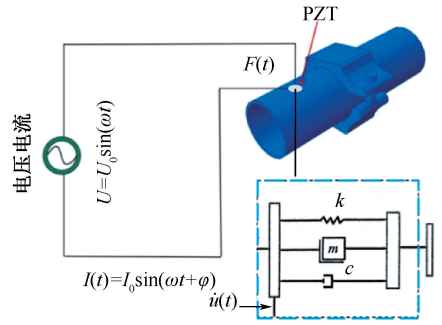


图 2 EMI 监测原理

Fig. 2 Monitoring principle of EMI

$$Z_s(\omega) = -\frac{F}{\dot{x}} = c + \frac{m\omega^2 - k}{i} \quad (2)$$

式中:  $F$  为所受外力;  $\dot{x}$  为最终速度;  $c$  为阻尼系数;  $m$  为质量;  $k$  为刚度;  $i$  为虚数。

脚手架节点连接发生松动时,节点刚度  $k$  将发生下降,由式(2)可知:结构机械阻抗  $Z_s(\omega)$  将随脚手架节点刚度  $k$  变化而变化,因此,根据结构机械阻抗  $Z_s(\omega)$  的变化,实现对脚手架节点松动的监测。

由于直接测量结构机械阻抗较困难,而由式(1)可知:被测节点附近粘贴的 PZT 片的电导纳信号变化反映结构的机械阻抗变化,因此,通过在被测节点附近粘贴 PZT 片,根据节点连接松动前后采集到 PZT 片的电导纳信号变化,利用 EMI 法,最终实现对脚手架节点连接松紧状态的监测。

### 1.2 基于 EMI-CNN 的脚手架节点分步式监测方法

CNN 是一种基于卷积计算的深度学习算法。相较传统反向传播(Back Propagation, BP)神经网络训练速度慢且易出现过拟合而导致识别精度不足,CNN 因其能够进行卷积计算而具有强大的数据处理能力,其结构如图 3 所示。利用 EMI 法进行健康监测时,监测信号具有较高的精度,但是数据量较大,且易受到环境、人员、设备等外界因素影响,导致结果抗噪性下降,考虑到施工现场监测环境较复杂,引入 CNN 处理采集到的原始监测数据。

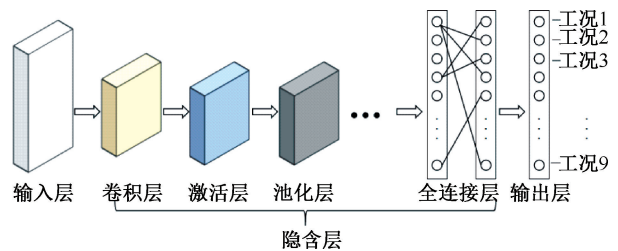


图 3 CNN 数据处理流程

Fig. 3 The architecture of CNN

基于 EMI-CNN 的脚手架节点连接状态分步式监测方法流程如图 4 所示。由图 4 可知：①感知节点连接松动的发生，即利用阻抗仪宽频扫描，采集 PZT 片的电导和电纳数据，根据电导和电纳曲线特征，考虑信号的敏感性，确定监测指标为 PZT 片的电导信号，基于电导信号变化感知节点连接松动的

发生；②确定节点连接松动的程度，即根据电导曲线峰值所在频段确定监测的敏感频段，将敏感频段内采集到的 PZT 片原始电导信号作为输入，节点连接松动程度作为输出，通过网络训练，构建 EMI-CNN 模型，通过网络测试，确定脚手架节点连接松动程度。

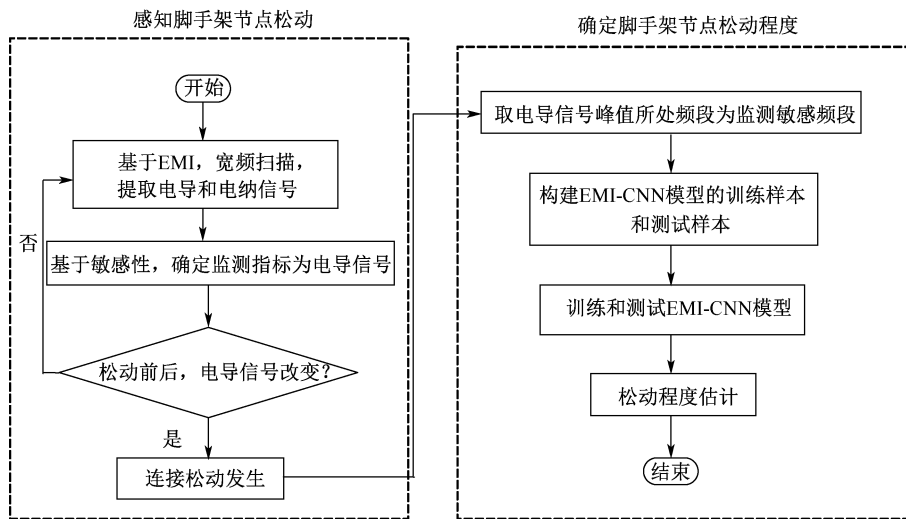


图 4 基于 EMI-CNN 的模板支撑架节点连接状态分步监测流程  
Fig. 4 Flowchart of scaffolding joint monitoring based on EMI-CNN

## 2 脚手架节点监测模型试验

### 2.1 脚手架节点监测试验设置

以一个实际工程中的原型扣件式脚手架节点作为试验模型，钢管采用 Q235 钢，规格为  $\phi 48.3 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$ ，长度 1.5 m，扣件材质为铸铁。采用尺寸为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的 PZT-5 型压电陶瓷片，基于 EMI 法较高的灵敏性，结合脚手架节点各组成部件表面特征，综合考虑 PZT 片粘贴的可靠性和监测结果的准确性要求<sup>[12]</sup>，利用环氧树脂将 PZT 粘贴在距离扣件 50 mm 的上钢管处，试验模型和 PZT 片粘贴位置如图 5 所示。为提高采集数据精度，粘贴前用砂纸打磨模型表面粘贴位置，以便于 PZT 片与模型的耦合。试验装置如图 6 所示，包括阻抗分析仪、笔记本电脑、扣件式脚手架节点模型以及力矩扳手。利用夹具将试验模型与试验操作台固定，模拟固结支座，并在模型与试验台、模型与夹具之间铺垫海绵以减少应力波的损失。

利用阻抗分析仪施加交流电场（逆压电效应），PZT 片产生机械振动，使结构也随之产生振动。而结构振动又使 PZT 片产生电响应（正压电效应），表现为 PZT 片的电阻抗变化，也就是说，脚手架节点

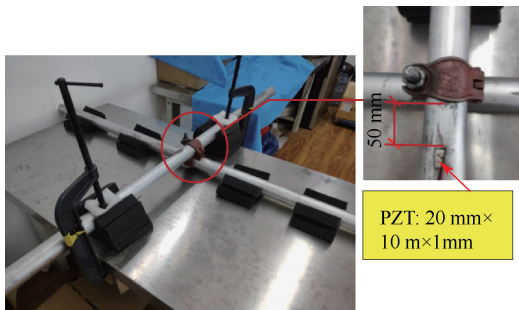


图 5 扣件式脚手架节点模型和 PZT 片粘贴位置  
Fig. 5 Cup-lock scaffold specimen and the location of pasted PZT patch

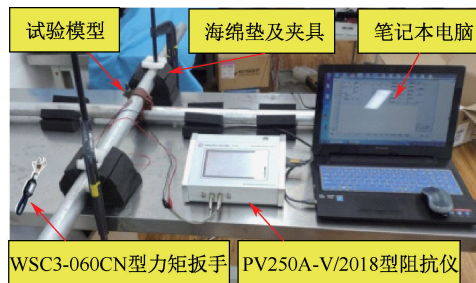


图 6 试验整体装置  
Fig. 6 Experimental setup

连接松紧状态的信息包含在 PZT 片的电阻抗信号中。因此，利用 EMI 法，通过对比节点连接松动前

后 PZT 片的电阻抗变化,实现对脚手架节点连接松紧状态的监测。

## 2.2 脚手架节点试验监测

通过对节点处连接螺栓施加不同扭矩,构建节点所处的不同松紧连接状态。手动旋拧螺母至拧紧状态作为初拧状态,利用扭矩扳手在初拧状态基础上施加不同额定值的扭矩,以模拟扣件节点不同试验工况。以  $3 \text{ N} \cdot \text{m}$  为增量,直至  $27 \text{ N} \cdot \text{m}$  到达终拧状态,共 9 个工况,其中工况 9,即扭矩为  $27 \text{ N} \cdot \text{m}$  被视为健康状态,见表 1。试验将监测表 1 各扭矩工况,以实现对接点不同连接状态的监测。

表 1 试验工况

Table 1 Experiment condition

损伤工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
扭矩值/ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	3	6	9	12	15	18	21	24	27

基于 EMI 法的结构健康监测结果精度,与监测指标和敏感频段的选取密切相关。针对脚手架节点的健康状态,利用阻抗仪对 PZT 片在宽频  $100 \sim 300 \text{ kHz}$  范围内进行扫描,设置采样点为 801 个,采集到的 PZT 片电导和电纳信号(即导纳的实部和虚部,导纳是阻抗的倒数)如图 7 所示。由图 7 可知:在  $100 \sim 300 \text{ kHz}$  频率范围内,电导信号的峰值更突出,即与电纳信号相比,电导信号对结构机械阻抗的变化更加敏感,这是因为电纳是由传感器的电容响应决定的,对结构机械性能变化不够敏感<sup>[13]</sup>,因此,选择电导信号作为监测指标。考虑到选取的激励信号频率范围过大,会导致数据冗余,淹没数据信息特征,降低监测精度,故选取包含电导曲线峰值部分的频段作为敏感频段,根据图 7a 最终确定敏感频段为  $180 \sim 200 \text{ kHz}$ ,后续将基于该敏感频段开展研究。

## 3 脚手架节点监测试验结果

### 3.1 基于电导信号感知节点松动发生

利用阻抗分析仪,采集表 1 各种扭矩工况下 PZT 片在敏感频段  $180 \sim 200 \text{ kHz}$  内的电导信号,如图 8 所示。由图 8 可知:与健康工况,即扭矩为  $27 \text{ N} \cdot \text{m}$  的工况相比,其他各扭矩工况下的电导曲线均发生不同程度的偏离,基于 EMI 法,判断节点连接发生松动。为验证试验的可重复性,针对表 1 每种扭矩工况,均采用第 2 节所示的试验方法重复试验 21 次,每次试验开始之前,连接均恢复健康状态。鉴于篇幅有限,以扭矩为  $27 \text{ N} \cdot \text{m}$  的健康工况

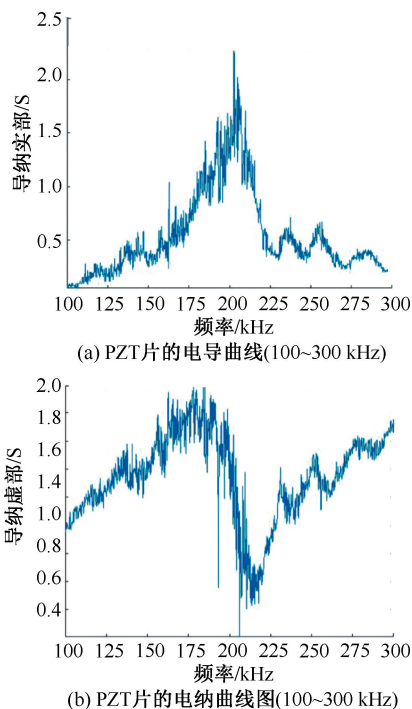


图 7 PZT 片的导纳曲线

Fig. 7 Conductance and susceptance curves of PZT

为例,该工况下 21 次重复试验采集到的 PZT 片在敏感频段内的电导曲线如图 9 所示。由图 9 可知:针对同一种扭矩工况,21 次试验获得的电导曲线具有较好的重合性,由此验证了试验的可重复性。

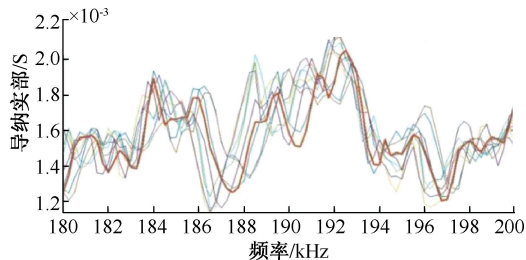


Fig. 8 Comparison of the conductance curve discreteness

### 3.2 基于 EMI-CNN 确定节点松动程度

不同扭矩工况下,敏感频段内的电导曲线具有一定的离散性;并且相同扭矩工况下,敏感频段内 21 次重复性试验获得的电导曲线具有较好的重合性,因此,利用 CNN 强大的分类识别能力和非线性映射能力,处理 EMI 监测信号,确定脚手架节点连接松动程度。

利用阻抗分析仪,分别采集表 1 中 9 种不同扭矩工况下 PZT 片在敏感频段内的电导数据,每种工况均重复试验 21 次,共计获得  $9 \times 21 = 189$  组电导数

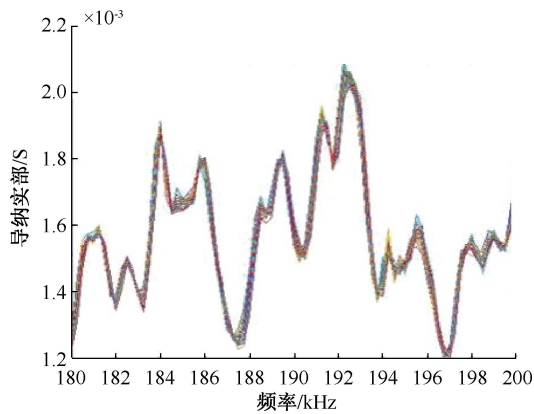


图9 健康工况下,电导曲线的重合性对比

Fig.9 Comparison of the conductance curve similarity at the healthy state

据。设置每次试验采集到的电导数据个数均为 801 个。为构建 EMI-CNN 模型的数据集,从每种扭矩工况的 21 组重复试验数据中随机选取 18 组作为训练集,其余 3 组作为测试集,因此,EMI-CNN 模型包含  $9 \times 18 = 162$  组训练集数据,  $9 \times 3 = 27$  组测试集数据。为全面、准确地反应节点的连接状态,基于 CNN 强大的数据处理能力,以每次试验采集到的 801 个 PZT 片的原始导纳数据作为网络输入,以 9 种节点连接松紧程度作为网络输出,构建 EMI-CNN 脚手架节点健康监测模型。

针对 9 种不同扭矩工况,利用试验所采集的 162 组训练数据,通过网络学习,获得 EMI-CNN 模型训练收敛曲线,如图 10 所示;基于剩余的 27 组测试数据进行网络测试,获得 EMI-CNN 模型的混淆矩阵和预测结果如图 11 和图 12 所示,图 12 中纵坐标所示预测结果和表 1 所示不同的扭矩工况号相对应。由图 10 可知:EMI-CNN 模型的学习训练经过 85 次迭代达到收敛,学习精度为 100%。由图 11 和图 12 可知:对于脚手架节点 9 种不同扭矩工况下的 27 组测试样本,EMI-CNN 模型的预测准确率达到 100%。因此,基于 EMI-CNN 的脚手架节点健康监测模型具有较快的收敛速度和较高的精度。

### 3.3 与 EMI-BP 模型比较

为与传统 EMI-BP 模型的性能对比,采用和 EMI-CNN 模型相同的输入参数、输出参数、训练数据集和测试数据集,构建 EMI-BP 模型。获得 EMI-BP 模型训练收敛曲线如图 13 所示;获得的 EMI-BP 模型混淆矩阵和预测结果如图 14 和图 15 所示,图 15 中纵坐标所示预测结果和表 1 所示不同的扭矩工况号相对应。由图 13 可知:EMI-BP 模型的学

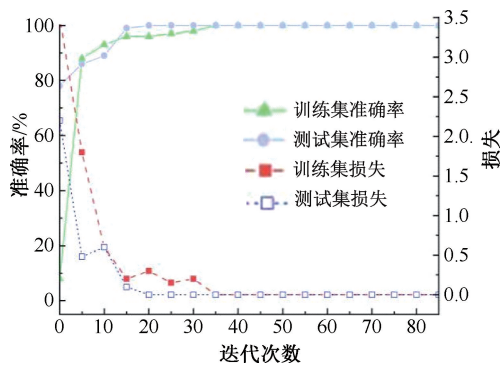


图 10 EMI-CNN 的训练收敛曲线

Fig.10 Training convergence curves of EMI-CNN

基于 CNN, 每组扭矩工况的 3 组测试数据预测准确率分别为:

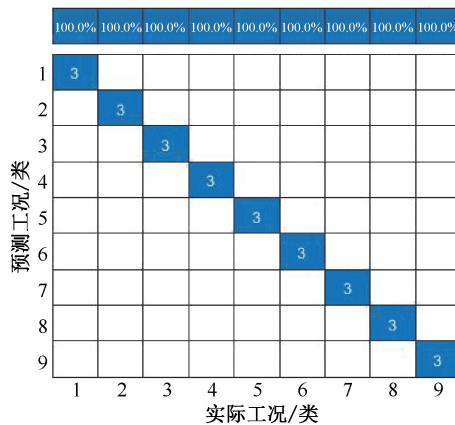


图 11 EMI-CNN 的混淆矩阵

Fig.11 Confusion matrix of EMI-CNN

基于 CNN, 所有 27 组测试数据总的预测准确率为 100%

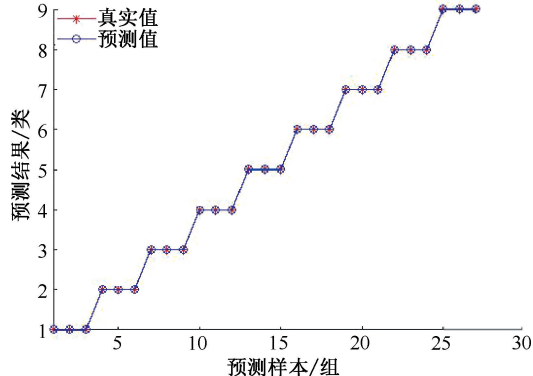


图 12 EMI-CNN 的测试准确率

Fig.12 Testing accuracy of EMI-CNN

习训练经过 15 次迭代达到收敛,均方误差为 0.03。由图 14 和图 15 可知:针对 9 种不同扭矩工况下的 27 组测试样本,基于 EMI-BP 模型,其中的 8 组测试数据出现了预测识别错误,预测准确率为 70.37%,相比 EMI-CNN 的预测准确率降低了 29.63%。这是

因为 EMI-CNN 模型具有强大的卷积计算能力,无需人工提取数据特征,可直接以具有较大数据量的原始监测数据作为网络输入,最大程度保留了数据的原始特征,有效提高了监测精度,更加适合于基于 EMI 的健康监测方法。

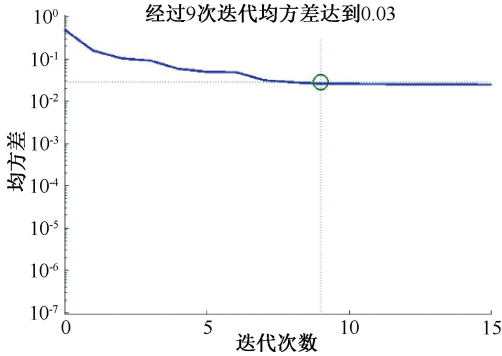


图 13 EMI-BP 训练收敛曲线

Fig. 13 Training convergence curve of EMI-BP

基于 BP 神经网络, 每组扭矩工况的 3 组测试数据预测准确率分别为:

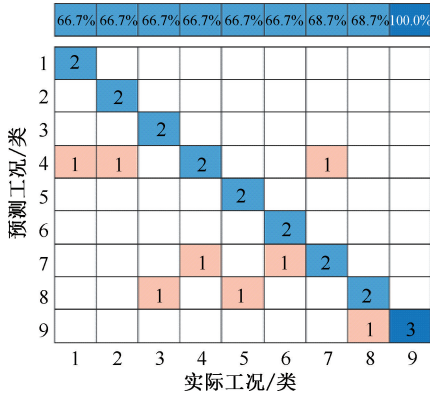


图 14 EMI-BP 的混淆矩阵

Fig. 14 Confusion matrix of EMI-BP

## 4 结论

1) 利用 EMI 法, 建立 PZT-节点耦合系统的机

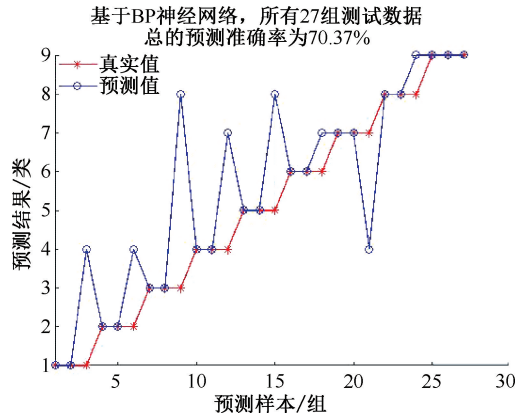


图 15 EMI-BP 的测试集准确率

Fig. 15 Testing accuracy of EMI-BP

电阻抗传感机制模型, 以与待测结构耦合的 PZT 片的电导信号为监测指标, 感知节点连接区结构的机械阻抗变化, 实现对脚手架节点连接状态的健康监测, 具有实时、对连接小松动敏感的特点, 能够对建筑施工现场模板体系安全运营起到有效的预警作用。

2) 基于 EMI-CNN 的节点健康监测方法具有更高的监测精度和良好的可重复性。由于 CNN 具有强大的抗噪性, 使所提监测方法更加适合于人员、机械、荷载等因素均较复杂的建筑施工现场监测, 可进一步提高监测结果的精度, 为降低建筑施工阶段模板倒塌事故的发生, 保护人民生命财产提供有力保障。

3) 由于节点松动一旦发生, 将导致节点刚度下降, 进而使被测结构机械阻抗发生变化, 而 EMI 法通过采集到的 PZT 片电导纳信号, 有效感知被测结构机械阻抗变化, 进而实现对节点松动的监测, 并具有较高敏感性, 因此, 所提 EMI-CNN 监测模型不仅适用于扣件式模板支撑体系脚手架节点, 对其他类型的模板支撑体系节点连接状态监测同样适用, 在以后的研究中将进一步推广验证。

## 参考文献

[1] 许浒, 陈宇航, 何佳斌, 等. 基于频数统计和  $\chi^2$ -PCC 的建筑施工高处坠落事故特征分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 91-99.  
 XU Hu, CHEN Yuhang, HE Jiabin, et al. Analysis of fall accidents characteristics in building construction based on frequency statistics and  $\chi^2$ -PCC [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 91-99.

[2] 李华, 吴立舟, 薛曦澄, 等. 基于计算机视觉的高处临边作业安全巡检[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 69-75.  
 LI Hua, WU Lizhou, XUE Xicheng, et al. Computer vision based safety inspection of high abutting edges [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(9): 69-75.

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于2020年房屋市政工程生产安全事故情况的通报[EB/OL]. (2022-10-26). [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202210/20221026\\_768565.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202210/20221026_768565.html).
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于2019年房屋市政工程生产安全事故情况的通报[EB/OL]. (2020-06-24). [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202006/20200624\\_246031.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202006/20200624_246031.html).
- [5] 郁润,张知田,郭红领. 数据驱动的施工现场工人不安全行为管理方法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 130-135.  
YU Run, ZHANG Zhitian, GUO Hongling. A data-driven management approach of construction workers' unsafe behaviors [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(8): 130-135.
- [6] WANG Cao, ZHANG Hao, RASMUSSEN K, et al. System reliability-based limit state design of support scaffolding systems [J]. Engineering Structures, 2020, 216: 1-12.
- [7] 张辰泽,王荣,王永泉. 基于整架试验的承插式盘扣架整体稳定性监测方法研究[J]. 施工技术, 2020, 49(2): 87-89.  
ZHANG Chenze, WANG Rong, WANG Yongquan. Research on overall stability monitoring method of disk lock steel tubular scaffold based on full-frame test [J]. Construction Technology, 2020, 49(2): 87-89.
- [8] ZHANG Hao, CHANDRANGSU T, RASMUSSEN K J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. Structural Safety, 2010, 32(6): 393-401.
- [9] SONG Gangbing, GU Haichang, MO Yilong, et al. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16: 959-968.
- [10] YAN Shi, SUN Wei, SONG Gangbing, et al. Health monitoring of reinforced concrete shear walls using smart aggregates [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18: 1-6.
- [11] FAN Shuli, ZHAO Shaoyu, QI Baoxin, et al. Damage evaluation of concrete column under impact load using a piezoelectric-based EMI technique [J]. Sensors, 2018, 18(5): DOI:10.3390/s18051591.
- [12] 张东山,张志忠,刘瑜,等. 基于压电阻抗方法的油气管道裂纹损伤定量研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 232-237.  
ZHANG Dongshan, ZHANG Zhizhong, LIU Yu, et al. Piezoelectric impedance-based quantitative study on oil and gas pipeline crack damage [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 232-237.
- [13] SUN Fanping, CHAUDHRY Z, LIANG Chen, et al. Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator [J]. Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(1): 134-139.

作者简介: 徐菁 (1976—),女,天津人,博士,副教授,主要从事钢结构设计理论及抗震、结构健康监测及损伤识别等方面的研究。E-mail: jingxu180@163.com。