

基于模态识别的波形钢腹板箱梁损伤位置研究

李少辉

(中交三公局第一工程有限公司,北京市 101318)

摘 要:为解决波形钢腹板箱梁损伤识别和损伤定位问题,以上海塘大桥工程中波形钢腹板箱梁为研究对象,采用 Ansys Workbench 有限元软件建立波形钢腹板箱梁损伤结构计算模型,结合 BP 神经网络学习和重复训练功能,对波形钢腹板箱梁损伤前后的模态进行重复训练和计算,探索波形钢腹板箱梁损伤程度和位置与模态参数之间的变化规律。研究表明:波形钢腹板箱梁损伤后模态参数呈现下降趋势,不同程度和位置损伤后对模态参数影响存在一定的差异性,结构损伤程度与模态参数下降呈线性关系,训练后的 BP 神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别误差在 3% 范围内,验证了训练后的 BP 神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别的可靠性和准确性。

关键词:波形钢腹板箱梁;BP 神经网络;模态分析;损伤识别;有限元法

中图分类号: U448.21+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0070-05

0 引 言

近年来世界桥梁建筑业范围内桥梁的健康监测和损伤识别成为人们密切关注的问题之一^[1-2],波形钢腹板箱梁在服役过程中因混凝土老化、材料退化、销钉脱落和环境因素影响,导致波形钢腹板箱梁结构刚度衰减、局部位置发生损伤缺陷,严重威胁桥梁结构的安全运行和正常使用^[3]。因此,桥梁结构的损伤识别和定位分析成为研究学者和工程技术人员急需解决的问题。

目前,研究学者围绕箱梁损伤识别和健康监测这一问题开展大量的理论研究和试验研究。何浩祥等^[4]采用卷积神经和递归图法对桥梁的损伤进行研究,利用卷积神经网络法对桥梁损伤的特征进行识别。研究表明,该方法对桥梁损伤识别可以精确定位。杨则英等^[5]通过 BP 神经网络对中跨桥梁进行损伤识别研究,通过 BP 神经网络的学习和训练输出损伤位置和损伤程度。研究表明,BP 神经网络可以快速地识别中跨桥梁的损伤位置。包龙生等^[6]结合 BP 神经网络和曲率模态原理对桥梁进行损伤分析,以桥梁的模态参数为输入变量,经过反复训练和计算,最后与损伤结果进行对比验证。研究表明,该方法对连续桥梁的结构损伤识别具有较好的应用效果。唐良等^[7]采用深度学习法和监测试验法对桥梁

的损伤识别方法进行研究,结合卷积神经网络和栈式自编码网络对桥梁损伤参数进行识别处理,并对损伤识别的结果进行验证,证实深度学习和卷积神经网络有较好的损伤识别能力。缪炳荣等^[8]对桥梁结构的损伤识别方法进行了优化,根据结构振动响应的模态应变变化率的差异,将试验结果与损伤识别结果进行了对比分析,发现该方法识别桥梁结构的损伤程度和损伤定位有较好的精确度。

综合分析,以上研究学者对 BP 神经网络和智能算法在桥梁损伤识别中的应用开展了初步研究,但对波形钢腹板箱梁的损伤程度识别和定位分析研究较少。波形钢腹板箱梁损伤后,模态参数变化规律和损伤识别智能算法仍需开展进一步研究。考虑波形钢腹板箱梁的结构特点和材料差异性,本文以上海塘大桥工程中波形钢腹板箱梁为研究对象,研究波形钢腹板箱梁损伤前后模态参数的变化特点,选用 BP 神经网络算法对波形钢腹板箱梁进行损伤识别和定位分析,为波形钢腹板箱梁损伤识别和运维检测提供技术参考。

1 波形钢腹板箱梁结构损伤识别原理

1.1 模态识别理论

为实现对波形钢腹板箱梁损伤程度和位置的识别分析,基于 BP 神经网络算法损伤识别理论和波形钢腹板箱梁损伤模态变化差异性。通过查阅文献资料^[9-11]可知,桥梁损伤破坏时结构的质量、阻尼和刚度等物理参数都会发生变化,桥梁结构的刚度、阻尼和

收稿日期: 2023-04-24

作者简介: 李少辉(1986—),男,本科,工程师,从事桥梁工程施工管理工作。

质量参数的变化又会导致模态参数发生改变,因此可以通过对模态参数进行量化和分析,并结合 BP 神经网络智能算法对桥梁结构的损伤位置和损伤程度进行分析,波形钢腹板箱梁结构则采用频率常差方法进行损伤识别。当波形钢腹板箱梁发生损伤时,结构的振型变化会非常敏感,BP 神经网络对箱梁结构振型参数变化的损伤识别十分精确,对波形钢腹板箱梁损伤前和损伤后的振型进行数据分析,振型参数可通过模态置信度进行计算。

1.2 BP 神经网络损伤识别原理

目前,BP 神经网络功能在桥梁损伤识别方面有良好的应用前景。结合 BP 神经网络独特学习和训练能力,将波形钢腹板箱梁的损伤程度和损伤位置设置为 BP 神经网络的输入参数,对波形钢腹板箱梁的损伤程度和损伤位置进行反复训练,得出识别波形钢腹板箱梁的损伤程度和位置的 BP 神经网络智能算法。BP 神经网络对波形钢腹板箱梁的损伤识别分析原理如图 1 所示。

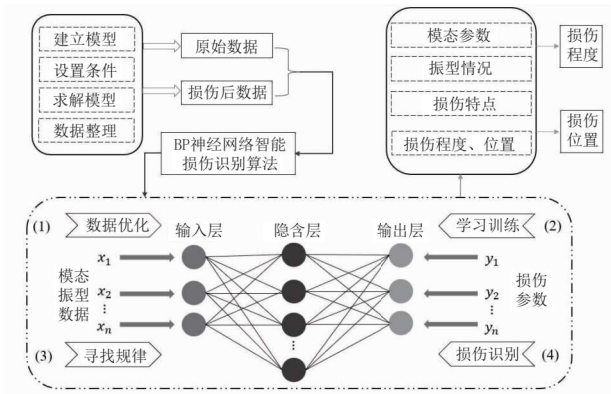


图 1 BP 神经网络损伤识别原理

2 波形钢腹板箱梁有限元仿真模拟

2.1 波形钢腹板箱梁模型

波形钢腹板箱梁结构上、下两部分均为钢筋混凝土材料,中间部分为节段式的波形钢腹板材料。该箱梁全长 280 m,混凝土顶板和底板宽度分别为 13.75 m 和 6.45 m,波形钢腹板的高度和厚度采用 1.8 次方抛物线,采用 C60 强度等级的混凝土进行箱梁顶底板浇筑。波形钢腹板采用 Q355D 钢材加工制作,按照波形钢腹板箱梁结构的设计图纸,采用 Ansys 有限元仿真计算分析软件建模。波形钢腹板箱梁内部有 16 块横隔板,横隔板为钢筋混凝土结构,可以使用 Solid45 实体单元建立钢筋混凝土结构,使用 Shell63 壳体单元建立波形钢腹板结构,将波形钢腹板结构埋入上、下两部分混凝土的预留缝中接面

处设置为固定约束,埋入深度为 2 cm,在混凝土与波形钢腹板连接两侧设置摩擦约束,两个波形钢腹板接头处采用销钉进行连接。销钉连接设置为固定约束,波形钢腹板箱梁网格划分和边界定义,对裂缝区域进行精细化网格剖分,确保波形钢腹板箱梁有限元计算结果的准确性。波形钢腹板箱梁有限元计算模型划分成 692 120 个节点、255 466 个单元。波形钢腹板箱梁有限元计算结构模型和节段块编号如图 2 所示。

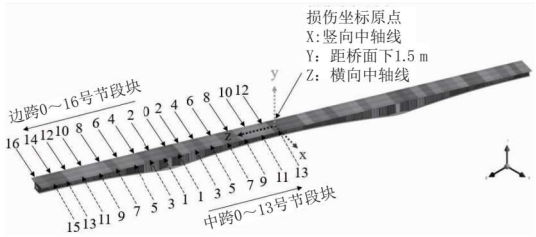


图 2 波形钢腹板箱梁模型

2.2 损伤模型及损伤识别分析工况

在波形钢腹板箱梁的有限元仿真计算模型上设置相应的裂缝,通过控制裂缝的大小、深度和局部刚度衰减的方法来模拟箱梁结构损伤。利用 Ansys 中的任意形状的裂缝功能,分别在波形钢腹板箱梁的上、中、下三个部位设置不同程度的损伤裂缝。在波形钢腹板箱梁的顶板上设置长 8.5 m、宽约 0.02 m、深度范围在 0.05 ~ 0.10 m,在波形钢腹板箱梁的底板上设置长约 4.5 m、宽 0.01 m、深度范围在 0.04 ~ 0.08 m,在波形钢腹板箱梁的钢腹板上设置高 5.0 m、宽 0.02 m、深度范围在 0.01 ~ 0.5 m,设置不同长度、宽度和深度模拟箱梁不同损伤程度。因波形钢腹板箱梁属于对称结构,故选择左半侧结构进行损伤识别分析和研究。波形钢腹板箱梁结构损伤的有限元计算分析模型及网格划分如图 3 所示。

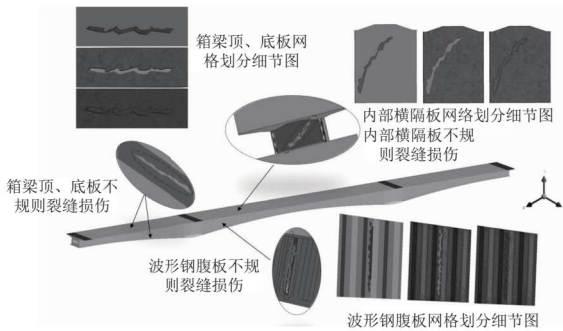


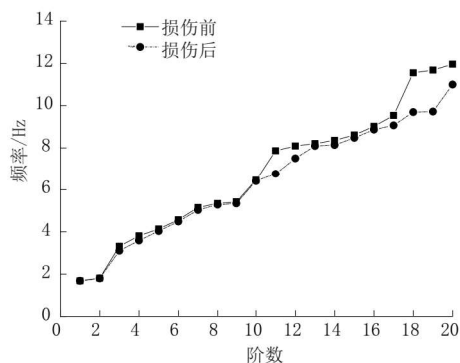
图 3 波形钢腹板箱梁裂缝损伤模型及网格划分细节图

根据波形钢腹板箱梁不同的施工节段块序号,在不同的节段块上设置损伤裂缝,分析波形钢腹板箱梁损伤前和损伤后前 20 阶模态差异性,再利用 BP 神经网络对波形钢腹板箱梁的损伤程度和位置

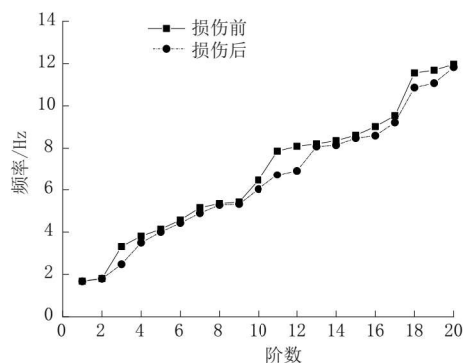
进行分析。通过波形钢腹板箱梁损伤位置和程度对BP神经网络智能识别算法进行验证,检验BP神经网络智能识别算法的有效性和可行性。波形钢腹板箱梁左侧结构不同节段块的损伤工况见表1。表1中损伤程度是指有限元计算模型结构指定位置刚度下降的百分比。

表1 波形钢腹板箱梁损伤工况

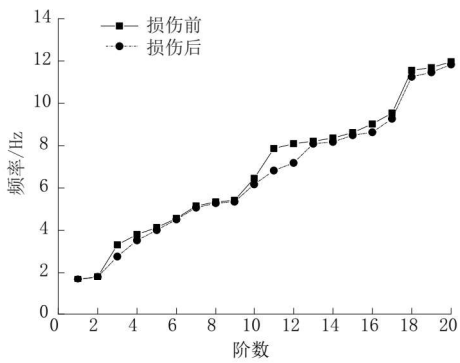
边跨损伤工况				中跨损伤工况			
工况	损伤区域	编号	损伤程度	工况	损伤区域	编号	损伤程度
1	上部顶板	2	30%	1	上部顶板	2	30%
2	钢腹板	5	20%	2	钢腹板	5	20%
3	横隔板	7	20%	3	横隔板	7	20%
4	下部底板	11	10%	4	下部底板	11	10%



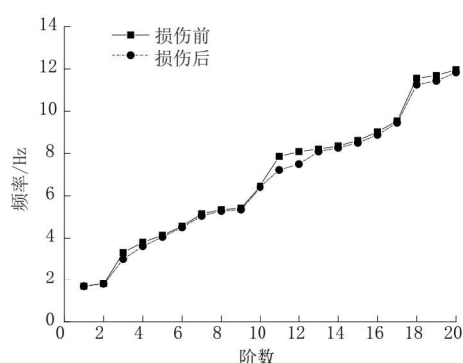
(a) 2号节段块



(b) 5号节段块



(c) 7号节段块



(d) 11号节段块

图4 波形钢腹板箱梁边跨损伤模态参数

损伤后波形钢腹板箱梁结构第11、12、18、19和20阶模态参数下降趋势较为明显。其中,裂缝损伤对第18阶模态参数影响最大,下降了15.2%。图4(b)中波形钢腹板箱梁第3阶模态下降了35.7%,第4阶模态下降了2.5%,第11阶波形钢腹板箱梁模态下降最大,下降了12.2%。波形钢腹板箱梁损伤后,图4(a)比图4(b)的模态下降更为明显。图4(c)中波形钢腹板箱梁结构的第3、11和12阶模态参数变化较大,其中第11阶模态参数下降最大,降低了4.8%。

3 波形钢腹板箱梁损伤识别计算和分析

3.1 波形钢腹板箱梁损伤模态计算结果

通过Ansys有限元通用程序对波形钢腹板箱梁边跨损伤前和损伤后的模态参数进行计算,提取了波形钢腹板箱梁的前20阶模态参数进行对比分析。通过对波形钢腹板箱梁边跨损伤前和损伤后的模态参数变化曲线分析,揭示波形钢腹板箱梁边跨损伤前和损伤后的模态参数变化特点。波形钢腹板箱梁边跨损伤前和损伤后的模态参数结果如图4所示。

从图4中可以看出,波形钢腹板箱梁出现损伤时前20阶模态参数整体呈下降趋势。图4(a)中裂缝损伤前后波形钢腹板箱梁前10阶模态频率曲线变化趋势基本相同,未发生明显的变化,在后10阶中

图4(d)中波形钢腹板箱梁的第4阶、11阶和18阶模态出现了降低趋势,11号节段块损伤前和损伤后波形钢腹板箱梁前20阶模态参数略微减小,各阶模态参数降低幅度基本相同。综合分析,波形钢腹板箱梁边跨发生损伤破坏时,结构的模态参数会出现降低趋势,越远离边跨位置,波形钢腹板箱梁损伤后降低趋势越小,可以通过波形钢腹板箱梁模态参数变化趋势和降低百分比,初步判断出波形钢腹板箱梁损伤程度和损伤位置。

对波形钢腹板箱梁中跨损伤前和损伤后的模态参数进行计算,分析了波形钢腹板箱梁的前 20 阶模态参数进行对比分析。通过对波形钢腹板箱梁中跨损伤前和损伤后的模态参数变化曲线分析,揭示波形钢腹板箱梁中跨损伤前和损伤后的模态参数变化特点。波形钢腹板箱梁中跨损伤前和损伤后的模态参数结果如图 5 所示。

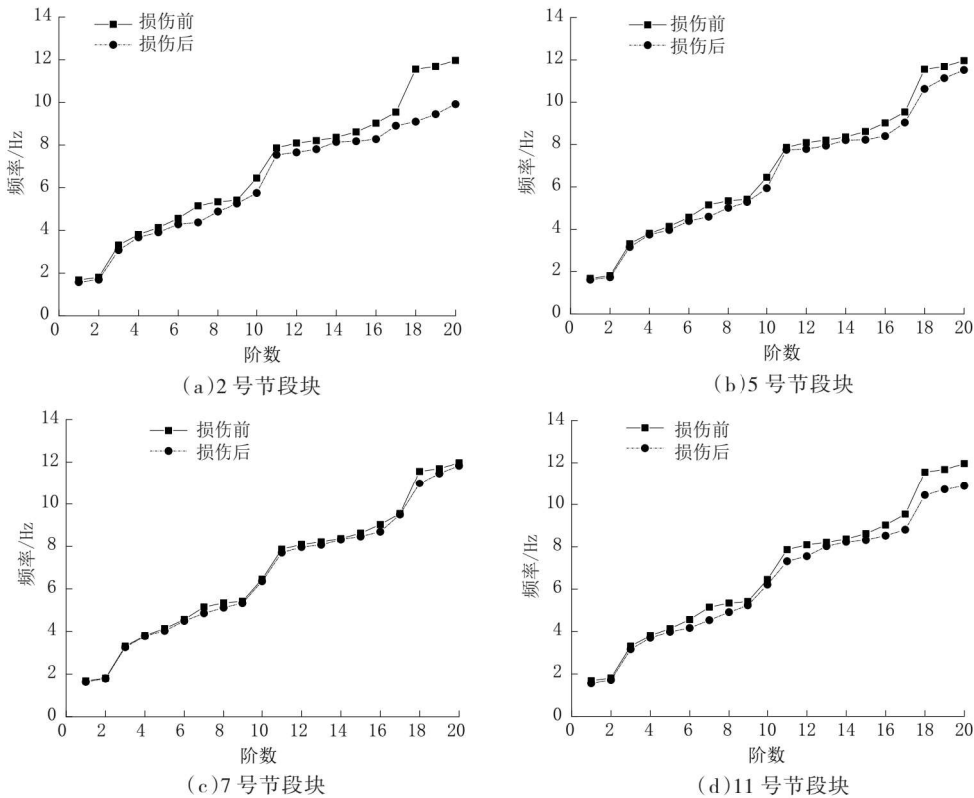


图 5 波形钢腹板箱梁中跨损伤模态参数

第 6 阶以后波形钢腹板箱梁模态参数开始降低,波形钢腹板箱梁结构的第 7 和 18 阶模态参数降低最为明显,分别降低了 4.6%和 6.1%。图 5(d)中波形钢腹板箱梁结构的第 7、11 和第 15 阶之后模态参数波动幅度较为明显,第 18、19 和 20 阶模态参数下降趋势最大,分别下降了 11.1%、11.2%和 11.1%。综合分析可以得出,波形钢腹板箱梁中跨的节段块发生损伤时,箱梁结构的模态从第 6 阶之后会产生影响。

通过对比分析图 4 和图 5 可以看出,波形钢腹板箱梁的中跨损伤对模态参数的影响更大。边跨损伤后,引起波形钢腹板箱梁的模态参数和下降幅度均较小。中跨损伤后,引起波形钢腹板箱梁的模态参数和下降幅度均比边跨大,BP 神经网络对波形钢腹板箱梁边跨和中跨模态参数损伤识别具有一定的差异性,对箱梁结构中跨损伤识别更加精确。

3.2 BP 神经网络损伤模态参数识别结果

利用有限元仿真程序分别计算波形钢腹板箱梁

从图 5 中可以看出,波形钢腹板箱梁中跨 2、5、11 和 7 号节段块损伤后模态参数的变化情况。图 5(a)中波形钢腹板箱梁结构从第 6 阶之后模态参数均有明显下降趋势,第 18 阶模态参数下降趋势最大,下降 18.3%。图 5(b)中波形钢腹板箱梁结构的第 7、16、18 和 19 阶模态参数减低较为明显,其中第 18 阶模态参数下降趋势最大,下降了 7.2%。图 5(c)中

损伤前和损伤后的模态参数,再通过 BP 神经网络智能识别算法对两组模态数据进行训练和分析。BP 神经网络对波形钢腹板箱梁边跨模态参数识别的结果见表 2。表 2 中损伤程度是指有限元计算模型结构的刚度下降百分比,损伤位置的误差是指 BP 神经网络结构输出的位置坐标点的距离与实际损伤位置坐标点距离差的百分比。

表 2 波形钢腹板箱梁边跨损伤模态识别结果

工况	损伤位置	损伤程度 /%	损伤程度识别 /%	程度误差 /%	损伤位置识别 (X,Y,Z)/m	位置误差 /%
1	顶板	30	29.86	0.139	(7.53,1.34,8.17)	1.32
2	钢腹板	20	18.73	1.264	(8.56,-1.12,20.68)	0.94
3	底板	10	8.93	2.329	(7.91,-2.38,50.14)	1.17
4	横隔板	20	18.55	1.446	(6.78,-1.86,32.15)	1.54

从表2中可以看出,BP神经网络对波形钢腹板箱梁边跨损伤的识别情况,将不同部位设置的损伤程度与BP神经网络识别出的结果进行对比分析,发现BP神经网络对波形钢腹板箱梁边跨损伤程度识别的最小误差为0.139%,最大误差为2.329%,对混凝土顶部识别效果最好。BP神经网络对波形钢腹板箱梁边跨损伤位置识别的最小误差为0.94%,最大误差为1.54%,验证了BP神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别的准确性。

BP神经网络对波形钢腹板箱梁中跨模态参数识别结果见表3。表3中损伤程度是指有限元计算模型结构的刚度下降百分比,损伤位置的误差是指BP神经网络结构输出的位置坐标点的距离与实际损伤位置坐标点距离差的百分比。

表3 波形钢腹板箱梁中跨损伤模态识别结果

损伤 工况	损伤 位置	损伤程 度 /%	损伤程度 识别 /%	程度误 差 /%	损伤位置识别 (X,Y,Z)/m	位置误 差 /%
1	顶板	30	27.485	2.515	(6.79, 1.28, 55.13)	1.04
2	钢腹板	20	21.137	1.137	(6.23, -1.63, 41.05)	1.25
3	底板	10	12.022	2.022	(7.04, -2.29, 12.87)	1.87
4	横隔板	20	18.145	1.855	(7.12, -1.72, 31.76)	1.34

从表3中可以看出,BP神经网络对波形钢腹板箱梁中跨损伤程度识别的最小误差为1.137%,最大误差为2.515%,对波形钢腹板箱梁的波形钢腹板部位识别损伤程度的效果最好。BP神经网络对波形钢腹板箱梁中跨损伤位置识别的最小误差为1.04%,最大误差为1.87%。可见,BP神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别效果较好,损伤识别的精度能够满足大多数结构工程健康检测的需求。

4 结 论

本文通过Ansys Workbench软件建立了两种波形钢腹板箱梁有限元计算分析结构模型,并进行了模态仿真试验,分析了波形钢腹板箱梁损伤前和损伤后模态参数变化情况,对模态参数进行BP神经网络训练,利用训练后的BP神经网络对波形钢腹板箱梁的损伤程度和位置进行了识别分析,得出以下结论:

(1)波形钢腹板箱梁损伤后,前20阶模态参数呈现下降趋势,后10阶波形钢腹板箱梁模态参数下降更加显著。波形钢腹板箱梁中跨损伤比边跨损伤

对模态参数的影响更大,波形钢腹板箱梁损伤程度越严重模态参数降低越明显,箱梁结构的边跨损伤和中跨损伤模态参数变化特点存在一定的差异性,为训练BP神经网络智能算法提供了良好的理论基础。

(2)结合波形钢腹板箱梁损伤前、后模态参数的变化特点,对BP神经网络计算方法进行重复训练,得到识别波形钢腹板箱梁损伤的BP神经网络算法。经分析发现,BP神经网络对波形钢腹板箱梁不同部分的识别误差在3%以下。该方法对波形钢腹板箱梁的混凝土顶板和波形钢腹板部位损伤识别精度较高,对波形钢腹板箱梁混凝土底板和横隔板的位置识别较好,验证了BP神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别的正确性。

(3)通过BP神经网络对波形钢腹板箱梁边跨和中跨损伤后的模态参数进行识别分析,发现BP神经网络对波形钢腹板箱梁结构的后10阶模态参数变化识别较为灵敏。将波形钢腹板箱梁结构损伤识别结果与预先设置的裂缝损伤程度和位置进行对比分析,发现该BP神经网络算法对波形钢腹板箱梁结构损伤程度和损伤位置识别误差较小,验证了BP神经网络对波形钢腹板箱梁损伤识别的可行性和有效性。该方法可为今后桥梁结构的健康检测和损伤识别提供参考。

参考文献:

- [1] 关孝文,张莉,胡世浩,等.基于行车激励的桥梁动力性能测试与状态评估[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):226-230.
- [2] 孙虎,狄生奎,杜祝遥,等.基于附加质量的单点模态振型参数损伤识别研究[J].中外公路,2022,42(4):76-81.
- [3] 申林,李万恒,赵尚传.基于模态柔度参数的连续梁桥损伤识别方法[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(1):66-72.
- [4] 何浩祥,王玮,黄磊.基于卷积神经网络和递归图的桥梁损伤智能识别[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):966-980.
- [5] 杨则英,张亚磊,曲建波,等.基于BP神经网络的中等跨径桥梁损伤识别探讨[J].公路与汽运,2020,36(3):136-140,155.
- [6] 包龙生,曹悦,赵宁,等.BP神经网络和曲率模态理论在桥梁损伤识别中的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):296-302.
- [7] 唐良,边祖光,赵银飞,等.基于深度学习和监测数据的桥梁损伤识别方法研究[J].城市道桥与防洪,2022,39(1):174-180.
- [8] 缪炳荣,张盈,黄仲,等.利用模态应变能变化率的结构损伤识别优化方法[J].振动工程学报,2022,1(21):1-10.
- [9] 吴桐,唐亮,周志祥.基于曲率模态面积差方比的桥梁结构损伤识别[J].公路交通科技,2021,38(11):59-67.
- [10] 陈永高,钟振宇.桥梁结构模态参数识别中系统阶次的自动辨识算法[J].振动工程学报,2021,34(4):680-689.
- [11] 杨勇,宁平华,王晨,等.基于解析模式分解和随机减量技术的桥梁模态参数识别[J].铁道科学与工程学报,2022,19(5):1355-1363.