

框架结构有限元模型修正与损伤识别

谢敬航¹, 刘 备², 李 晗³

(1. 三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100071;

3. 华润置地(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要: 框架结构因造价经济、施工便捷而广泛应用于建筑工程,但在长期服役及偶然荷载作用下易产生损伤,且早期损伤难以察觉,易引发结构安全隐患。为实现框架结构损伤的精准识别,本文以钢框架结构为研究对象,采用 ANSYS15.0 平台建立有限元模型并开展模态分析,结合 B&K(Brüel & Kjær)脉冲激励系统进行试验模态测试,并利用试验动力响应结果完成有限元模型修正。在此基础上,通过附加质量块模拟质量主导型损伤,选取结构密度为设计变量,基于损伤状态下的前四阶固有频率对修正后的模型进行二次优化,以设计变量的变化率作为损伤识别依据。研究结果表明:ANSYS 平台固有优化模块适用于框架结构损伤识别,修正后的有限元模型的模态参数与实体结构动力响应误差小于 1%。本文研究成果可为同类框架结构的损伤监测与识别提供理论依据与技术参考。

关键词: 框架结构; 损伤识别; 固有频率; 有限元模型修正; ANSYS 优化模块

中图分类号: TU317; TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)06-0036-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.06.064

Finite element model correction and damage identification of frame structures

XIE Jinghang¹, LIU Bei², LI Han³

(1. Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, Henan, China; 2. Power China Road Bridge Group Co., Ltd.,

Beijing 100071, China; 3. China Resources Land (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Frame structures are widely used in construction projects due to their cost-effectiveness and ease of construction, but they are prone to damage during long-term service and occasional loads, with early damage that is difficult to detect and can easily lead to structural safety hazards. To achieve precise identification of frame structure damage, steel frame structures are taken as the research object, the ANSYS15.0 platform is used to establish finite element models and conduct modal analysis, the B&K (Brüel & Kjær) pulse excitation system for modal testing is combined, and the test dynamic response results are used to complete finite element model correction. On this basis, mass-dominated damage is simulated by adding additional mass blocks. The structural density is selected as the design variable. Based on the first four natural frequencies under damage conditions, the corrected model is further optimized, using the rate of change of design variables as the basis for damage identification. Research results show that the ANSYS platform's inherent optimization module is suitable for frame structure damage identification, and the modal parameters of the corrected finite element model have a dynamic response error of less than 1% with the solid structure. The research results can provide theoretical basis and technical reference for damage monitoring and identification of similar frame structures.

Key words: frame structure; damage identification; natural frequency; finite element model correction; ANSYS optimization module

收稿日期: 2025-11-15

作者简介: 谢敬航(1993—),男,助教,从事结构健康监测、损伤识别及工程施工数值模拟方面的研究。

在复杂荷载作用下, 框架结构的楼板、立柱等构件易产生损伤。由于早期损伤尺度微小且常被装饰层或附属设施遮挡, 难以被直接察觉。随着损伤的累积与扩展, 结构可能面临正常使用功能丧失的风险, 严重时甚至引发倒塌事故, 造成人员伤亡与经济损失。因此, 开展框架结构损伤识别技术研究具有重要的工程意义。

目前, 国内外学者已在该领域开展了大量研究。在模型修正与试验验证方面, 刘辰宇^[1]基于东营黄河大桥缩尺模型的模态响应对有限元模型进行修正, 提出了一种结构损伤快速识别方法; 白鲁帅等^[2]基于隔离非线性理论, 提出了一种桁架结构性态识别方法, 显著提高了损伤识别效率。在智能算法与指标构建方面, 赵仕通等^[3]利用主成分分析实现了框架结构非线性损伤的识别; 黄民水等^[4]通过改进布谷鸟搜索算法, 提升了 Benchmark 框架的损伤定位与定量精度; 刘军香等^[5]结合 CoC 矩阵(covariance of covariance matrix, CoC Matrix)与 BP 神经网络, 验证了新方法在 ASCE 基准模型上的有效性。

现有研究多采用算法改进或多模型融合思路, 基于通用有限元软件内置优化模块的损伤识别研究相对匮乏。鉴于此, 本文以钢框架结构为研究对象, 依托实体模型动力响应结果对初始有限元模型进行修正, 并结合损伤试验结果对优化后的模型进行二次修正, 通过参数偏差分析实现损伤定位, 以期为同类框架结构的损伤监测与识别提供理论依据和技术参考。

1 模型修正与损伤识别方法

1.1 模型修正方法

模型修正方法一般分为矩阵型修正法和参数型修正法。鉴于物理意义明确, 本文采用参数型修正法。该方法基于 ANSYS 平台建立实体结构的初始理论模型, 通过对比同一激励下实体模型与理论模型的动力特性差异构建目标函数; 选取关键结构参数作为待修正变量, 通过最小化目标函数值实现模型修正。该方法可针对质量矩阵、刚度矩阵或者阻尼矩阵中的任意一项进行参数修正, 这使得目标函数呈现非线性的特征, 因此迭代算

法更适用于目标函数的修正。

损伤识别流程: 首先进行有限元模型修正, 主要是修正模型的参数误差, 从而建立起能够正确反映实体结构的模型; 再次利用损伤状态的模态响应, 对优化后的模型进行修正, 并通过对比修正后模型的各项参数与第一步优化后模型的参数来识别损伤。

1.2 ANSYS 平台进行模型修正的方法

利用 ANSYS 平台进行模型修正, 主要是利用软件自带的 OPT 模块, 该优化模块包含状态变量、设计变量和目标函数 3 个优化变量。

设计变量是影响目标函数结果的关键参数, 其向量可表示为

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1)$$

式中: X 为设计变量向量; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各设计变量; n 为设计变量个数。

设计变量服从 n 个具有上下限的约束, 即:

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: x_i 为第 i 个设计变量; x_i^L 、 x_i^U 分别为 x_i 下限和上限。

状态变量是优化过程中必须满足的约束, 也是设计变量的函数。目标函数是优化的核心目标, 本文以最小值为目标。ANSYS 软件在进行优化时, 设计变量不断改变, 目标函数也会随之改变。通常, 在一个优化过程中只定义一个目标函数, 并求其最小值。

设计变量组成的空间称为设计空间 (design space), 优化的本质是在设计空间内寻找满足状态变量约束并使目标函数最优化的参数组合。

1.3 零阶算法和一阶算法

ANSYS 平台提供了零阶算法和一阶算法两种优化方案。零阶算法仅采用目标函数和状态变量的值而未采用其微分值, 是一种通用的函数逼近优化算法。零阶算法普遍适用且不易陷入局部解, 缺点在于优化精度较低。而一阶算法改进了零阶算法, 使用了目标函数和状态变量对设计变量的微分值。每次迭代中, 采用梯度寻优(最速下降法或共轭梯度法)确定搜索方向, 采用线搜索法对无约束问题执行最小化, 较零阶算法的精度较高, 但是计算耗时较长且可能得到局部区域解。本文综合

考虑精度与可行性，采取一阶算法完成优化过程。

2 框架结构有限元模型建立及修正

2.1 框架结构有限元模型的建立

采用 ANSYS15.0 软件建立框架结构的实体有限元模型。模型选用 soild45 单元，框架的具体几何尺寸如图 1 所示，材料属性参数如表 1 所示。基于上述参数构建的有限元模型如图 2 所示。通过软件直接求解得到前四阶固有频率，结果如表 2 所示。

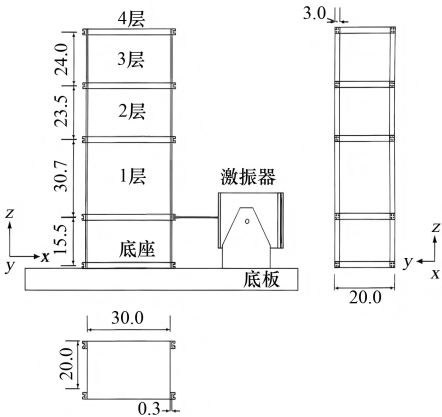


图 1 框架结构尺寸

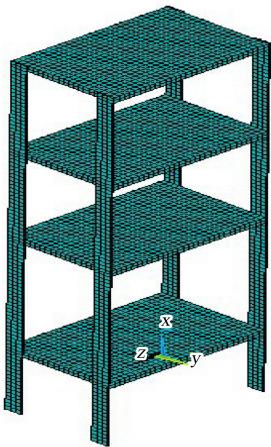


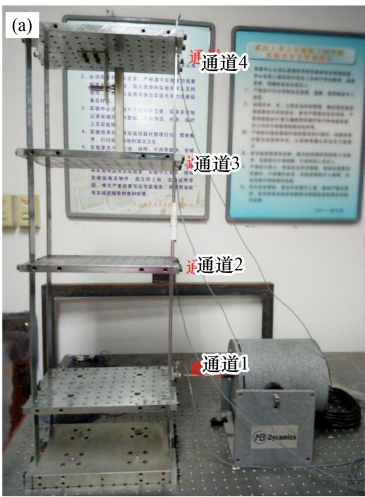
图 2 框架结构有限元模型

2.2 实体框架结构模态试验

试验装置如图 3 所示。采用带宽为 160 Hz 的随机激励作为激励信号，经任意波形发生器发生、信号放大器放大后，通过激振器(MB modal50)作用于实体框架。在各层楼板中间布置传感器：通道 1 安装力传感器，通道 2~4 布置加速度传感器(B&K 4507B)，用于测量激励响应。信号由 B&K 采集系统获得。

表 1 实体框架结构的各项材料属性

构件名称	技术参数	材质	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	质量/kg	数量/个
立柱	动力模型立柱,条带形钢板,93.7 cm × 3 cm × 0.3 cm(长 × 宽 × 高)	弹簧钢	210	0.3	7 850	0.71	4
框架模型 试验板	楼板模型,15 mm 厚钢板,30 cm × 20 cm × 1.5 cm(长 × 宽 × 高)	中碳钢	210	0.3	7 850	7.06	4



(b)



(a) 实体框架；(b) 信号发生以及采集仪器

图 3 试验装置

表 2 有限元分析前四阶固有频率 Hz

阶数	固有频率
第一阶	4. 609 7
第二阶	15. 622 0
第三阶	25. 025 0
第四阶	27. 463 0

对采集的时域信号进行 FFT 变换得到频域数据，利用 MATLAB 处理并识别得到实体框架的前四阶固有频率，结果如表 3 所示，实测频率曲线如图 4 所示。

表 3 试验识别的前四阶固有频率 Hz

阶数	固有频率
第一阶	4. 4
第二阶	15. 8
第三阶	25. 2
第四阶	30. 8

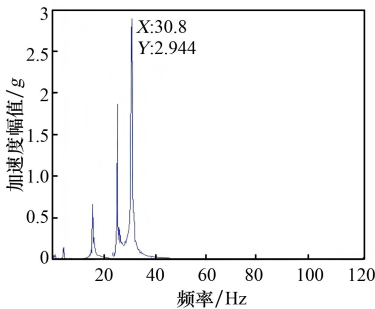


图 4 试验数据测得固有频率

2.3 基于试验数据的有限元模型修正

使用 ANSYS 平台的优化模块 (opt) 修正有限元模型，选取楼板的长度 L 、宽度 W 、厚度 T 、柱截面宽度 a 、长度 b 及各段高度 ($h_1 \sim h_4$) 作为设计变量，以模型前四阶固有频率为状态变量，构建目标函数如下：

$$F = \sum_{i=1}^4 \frac{(f - f')^2}{f'^2} \tag{3}$$

式中： F 为目标函数值； f 为有限元模型分析得到的第 i 阶固有频率； f' 为试验测得的第 i 阶固有频率。

优化目标为最小化目标函数值。采用一阶优化算法迭代 50 次，优化历程如图 5 所示。优化前后各阶固有频率与设计变量的对比分别如表 4、5 所示。优化后目标函数值降至 0.000 358 54，有限元模型与实体结构动力响应误差小于 1%。

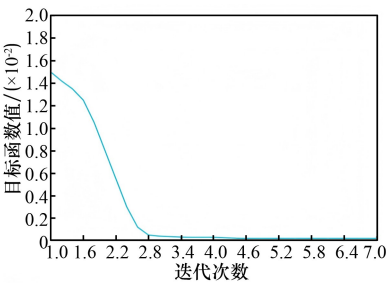


图 5 目标函数优化

表 4 各阶固有频率对比 Hz

阶数	有限元初始值	试验值	优化后值
第一阶	4. 609 7	4. 4	4. 412 0
第二阶	15. 622 0	15. 8	15. 625 0
第三阶	25. 025 0	25. 2	25. 369 0
第四阶	27. 463 0	30. 8	30. 856 0

表 5 各设计变量优化前后对比 m

参数	优化前	优化后
L	0. 300	0. 284 75
W	0. 200	0. 173 61
T	0. 015	0. 014 61
a	0. 003	0. 002 85
b	0. 030	0. 029 84
h_1	0. 155	0. 139 31
h_2	0. 307	0. 328 44
h_3	0. 235	0. 241 00
h_4	0. 240	0. 241 00

3 基于模型修正的损伤识别方法

3.1 损伤模拟的核心逻辑

结构损伤对动力特性的影响主要体现为质量或刚度的变化。本文聚焦于质量主导型损伤，采用“附加质量块”作为模拟手段。该方法通过直接改变结构局部区域的质量，复现此类损伤引发的固有频率偏移，主要适用于工程中因局部质量重新分布而刚度未显著衰减的场景。例如：工业厂房钢框架某层因长期堆放设备导致的质量堆积、新增固定设备等永久性附加质量，以及钢楼板或立柱因碰撞、疲劳产生的局部凹陷所引发的有效质量集中。

为简化模型并聚焦于方法本质，选取“密度”作为唯一设计变量。尽管实际损伤可能伴随几何尺寸的改变进而影响刚度与频率，但考虑到试验模型

为理想钢框架,上述简化具有合理性。以修正后的有限元模型为基准,定义各层楼板密度($c_1 \sim c_4$)与立柱密度(c_5)为设计变量,状态变量仍取前四阶固有频率,目标函数同式(3)。

热损伤模拟通过在指定楼层附加质量块实现。基于损伤状态下的模态测试,获取实测固有频率并对基准模型进行二次优化,最终依据设计变量的变化程度实现损伤识别。本文共设置 3 组试验工况:工况 1 为基准状态;工况 2、3 分别在框架第二层、第三层附加质量块以模拟损伤,对应的实测前四阶固有频率如表 6 所示。

表 6 各组损伤试验得出的前四阶固有频率对比 Hz

工况 编号	一阶	二阶	三阶	四阶	备注
1	4.4	15.8	25.2	30.2	基准状态
2	4.0	15.4	19.0	27.8	第二层加有质量块
3	4.0	11.0	15.4	27.0	第三层加有质量块

3.2 工况 2 损伤识别结果

工况 2 中状态变量的取值范围如表 7 所示,优化过程中目标函数的收敛情况如图 6 所示。设计变量与状态变量的优化前后数值对比分别如表 8、9 所示。由表 8、9 可知: c_1 、 $c_3 \sim c_5$ 的变化量均控制在 0.6% 以内,而 c_2 (第二层密度)增加了 14.4%, c_2 的变化幅度显著高于其余变量,且与附加质量块的实际损伤位置完全吻合,从而成功实现了损伤定位。

表 7 工况 2 状态变量各项数据取值范围 Hz

阶数	最小值	最大值
一阶	3.5	4.9
二阶	12.0	18.0
三阶	16.0	22.0
四阶	25.0	30.0

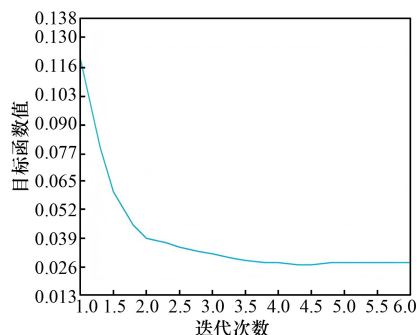


图 6 工况 2 目标函数优化图

表 8 工况 2 设计变量优化前后数值对比 kg/m^3

变量数值	原始值	优化值
c_1	7 850	7 862
c_2	7 850	8 983
c_3	7 850	7 893
c_4	7 850	7 852
c_5	7 850	7 850

表 9 工况 2 状态变量优化前后数值对比 Hz

阶数	试验值	优化值
第一阶	4.0	4.175 3
第二阶	15.4	15.145 0
第三阶	19.0	19.371 0
第四阶	27.8	27.859 0

工况 3 的优化逻辑与工况 2 一致,其目标函数的收敛过程如图 7 所示,设计变量的优化前后对比如表 10 所示。由表 10 可知: c_1 、 c_2 、 c_4 、 c_5 的变化量均控制在 0.6% 以内,而 c_3 (第三层密度)增加了 14.0%。 c_3 的显著变化与附加质量块的实际损伤位置完全吻合,从而成功实现了损伤定位。

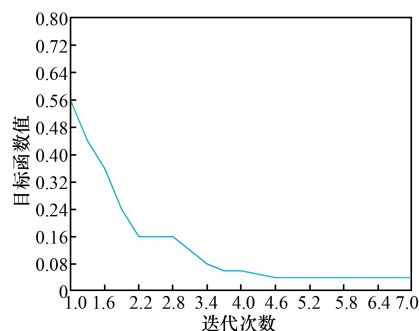


图 7 工况 3 目标函数优化图

表 10 工况 3 设计变量优化前后对比

变量数值	原始值	优化值
c_1	7 850	7 861
c_2	7 850	7 892
c_3	7 850	8 946
c_4	7 850	7 851
c_5	7 850	7 850

4 结 论

(1) 基于 ANSYS15.0 与 B&K 测试系统构建的“有限元建模-试验验证-模型修正”技术路线可行。修正后有限元模型与实体钢框架的动力

特性响应误差小于 1%, 可作为损伤识别的基准模型。

(2) 采用附加质量块可有效模拟钢框架的质量主导型损伤, 该方法同样适用于混凝土框架的质量增加型损伤, 但不适用于刚度衰减型损伤。此外, 将设计变量仅取为密度的简化假设, 在聚焦质量主导型损伤识别的研究中具有充分的合理性。

(3) ANSYS 平台内置的优化模块能够顺利应用于框架结构的质量主导型损伤识别, 为工程中类似损伤的快速识别提供了一种高效的技术方案。

参考文献:

[1] 刘辰宇. 大跨度斜拉桥的有限元模型修正方法研究

[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[2] 白鲁帅,李钢,靳永强,等. 一种隔离损伤的桁架结构性态识别方法[J]. 工程力学,2019,36(1):53-60.

[3] 赵仕通,肖黎,屈文忠. 框架结构非线性损伤的主成分分析识别方法研究[J]. 机械科学与技术,2018,37(1):8-12.

[4] 黄民水,乾超越,程绍熙,等. 基于改进布谷鸟搜索的 Benchmark 框架损伤识别[J]. 振动与冲击,2018,37(22):158-163.

[5] 刘军香. 基于加速度二次协方差矩阵和 BP 神经网络的结构损伤识别方法研究[D]. 廊坊:防灾科技学院,2019.