文章编号：1000-8608(2011)01-0007-07

钢框架结构两阶段损伤诊断方法

段红霞*[1,2]， 李守巨[1]， 刘迎曦[1]， 袁旭东[3]

（1.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2.大连民族学院 土木工程学院，辽宁 大连 116600；
3.大连海洋大学 土木工程学院，辽宁 大连 116023）

摘要： 为了对实际钢结构工程进行损伤识别，提出了两阶段损伤诊断方法：第一阶段在随机少量布置测点的情况下，识别出损伤发生最大概率区域；第二阶段在损伤可能区域重新布置测点，准确识别损伤部位及其损伤程度.通过对一个3层钢框架结构的数值模拟，研究了测点位置、模态数量、测试噪声对识别精度的影响.研究结果表明，即使在不完备测试信息的情况下，两阶段损伤诊断方法也能有效识别出钢结构损伤位置及程度.

关键词： 钢框架结构；损伤识别；两阶段损伤诊断；不完备测试信息
中图分类号： TU312.13 **文献标志码：** A

0 引 言

钢结构虽然韧性好，但由于施工技术和施工质量的影响，加上使用阶段的极端荷载（地震、飓风等），钢结构某些部位就会呈现脆性特点，如1994年的美国Northridge地震[1]和1995年的日本Kobe地震[2]中，许多钢结构工程出乎意料地发生了普遍性脆性断裂.经统计，在钢结构的事故中，脆性破坏占到70%以上.因此，应及早进行损伤诊断并采取必要措施避免钢结构的脆性破坏.目前，针对不同的工程结构，发展了很多基于振动测试的损伤诊断方法[3]，如灵敏度分析法[4,5]、摄动法[6,7]、模型修正法[8~12]、神经网络法[13~15]、损伤指标法[16,17]和损伤定位向量法[18,19]等，尽管这些方法都有成功的应用，但面对实际工程仍有很多困难.这是损伤局部性、测试数据噪声及有限测试自由度等因素造成的.因此，可行的损伤识别技术应满足：(1)损伤参数应能表征单个构件特定部位的损伤及其程度；(2)只用有限的测试数据就能识别多自由度的大型结构损伤；(3)具有较强的抗噪能力.

本文目的是针对实际的钢结构工程，在实际测试数据非常有限的情况下，即基于不完备测试信息的情况下，有效地识别钢构件的损伤位置及其损伤程度.为此提出基于不完备模态信息的两阶段损伤诊断法，首先随机少量布置测点，依据识别结果判断损伤出现概率最大区域，然后再根据前面的识别结果在可能的损伤区域重新布置测点，以做到对构件损伤位置及程度的准确识别.采用非完备模态数据并构造损伤结构的非线性控制方程，再基于最小二乘法及奇异值分解技术进行求解，对一个3层钢框架结构进行两阶段的损伤识别数值模拟研究，重点考察测点位置、模态数量、数据噪声对识别精度的影响.

1 基于不完备模态信息的结构损伤识别方法

1.1 损伤控制方程的建立

当结构发生损伤后，一般认为损伤仅导致刚度发生变化，而质量不发生变化，损伤结构的特征方程可表示为

$$(\boldsymbol{K}-\lambda_i^{\mathrm{d}}\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{d}}+\Delta\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{d}}=\boldsymbol{0} \tag{1}$$

收稿日期： 2010-04-28； **修回日期：** 2010-12-10.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(90815023)；“九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714006).
作者简介： 段红霞*(1968-)，女，副教授，E-mail：duanhongxia00@163.com.

式中：$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{M}$ 表示结构整体刚度和质量矩阵；λ_i^{d}、$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{d}}$ 为损伤结构的第 i 阶特征值和特征向量. 结构损伤引起刚度的局部变化，通常在结构单元水平上进行刚度折减，即

$$\Delta\boldsymbol{K}=\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{e}}}d_j\boldsymbol{K}_j \tag{2}$$

其中 N_{e} 为结构单元总数；$d_j\in(-1,0)$，为第 j 单元的损伤系数，是待识别参数的一部分. 由于 d_j 是定义在单元水平上的，它既能表示损伤位置，也能表示损伤程度. 为了保证实测不完备模态是可信的，首先利用模态置信准则(MAC)，将实测模态与初始模态进行对比，即

$$MAC(\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}},\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}})=\frac{|\ \boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}\ |^2}{|\ \boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}}\ |\ |\ \boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}\ |} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}$ 为结构损伤后第 i 阶实测自由度模态向量；$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}}$ 为损伤前结构第 i 阶对应实测自由度的模态向量. 假设结构自由度总数为 N，实测自由度数为 N_{m}，则 $\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}$、$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}}$ 都是 $N\times1$ 的列向量，但是只在 N_{m} 个实测自由度上有非 0 值，其他未测自由度上值为 0. 置信因子接近 1.0 时，认为实测模态是可信的，否则实测模态数据不予采用. 利用模态比例因子求出损伤结构实测模态的修正值

$$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}*}=\mu\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}} \tag{4}$$

式中：比例因子 $\mu=\dfrac{\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{a}\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}}{\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}}}$.

实测损伤结构模态特征向量是不完备的，因此，需要补充未测自由度模态向量：

$$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{uad}}=\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}+\Delta\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{uad}}$ 为损伤结构未测自由度模态；$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}$ 为原始结构对应未测自由度的模态. $\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{uad}}$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}$ 都是 $N\times1$ 的列向量，在未测自由度上有非 0 值，测试自由度上的值为 0. 其中 $\Delta\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}$ 可以通过下式构造：

$$\Delta\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}=\sum_{l=1}^{N_{\mathrm{u}i}}\beta_{il}\boldsymbol{\varphi}_l^{\mathrm{ua}} \tag{6}$$

式中：$N_{\mathrm{u}i}$ 为损伤结构第 i 阶模态未测自由度总数；β_{il} 为模态参与因子. 综合式(4)和(5)，损伤结构的第 i 阶完整模态向量可表示为

$$\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{d}}=\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}*}+\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{uad}} \tag{7}$$

将式(2)和(7)代入式(1)，得到损伤控制方程为

$$\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{e}}}\sum_{l=1}^{N_{\mathrm{u}i}}a_{jl}^{\boldsymbol{K}\mathrm{u}}\beta_{il}d_j+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{e}}}a_{ji}^{\boldsymbol{K}\mathrm{a}}d_j+\sum_{l=1}^{N_{\mathrm{u}i}}a_l^{\boldsymbol{M}\mathrm{u}}\beta_{il}+a_i^{\boldsymbol{M}\mathrm{a}}=\boldsymbol{0} \tag{8}$$

其中

$$a_{jl}^{\boldsymbol{K}\mathrm{u}}=\boldsymbol{K}_j\boldsymbol{\varphi}_l^{\mathrm{u}} \tag{9a}$$

$$a_{ji}^{\boldsymbol{K}\mathrm{a}}=\boldsymbol{K}_j(\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}*}+\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}) \tag{9b}$$

$$a_l^{\boldsymbol{M}\mathrm{u}}=(\boldsymbol{K}-\lambda_i^{\mathrm{d}}\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}_l^{\mathrm{ua}} \tag{9c}$$

$$a_i^{\boldsymbol{M}\mathrm{a}}=(\boldsymbol{K}-\lambda_i^{\mathrm{d}}\boldsymbol{M})(\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ad}*}+\boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{ua}}) \tag{9d}$$

损伤控制方程(8)是非线性方程，待识别的参数包括单元的损伤系数 d_j 和模态参与因子 β_{il}.

1.2 损伤控制方程的求解

实际测试中一般只能获得结构的前 m 阶模态，为了求解待识别参数 d_j 和 β_{il}，将非线性控制方程表示成一般形式：

$$f_i(\boldsymbol{x})=0 \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{x}=(d_j\quad\beta_{il})^{\mathrm{T}}$；$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,N_{\mathrm{e}}$，$l=1,2,\cdots,N_{\mathrm{u}i}$.

基于式(10)，构造非线性最小二乘问题如下：

$$\min F(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\cdot\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})=\|\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})\|^2 \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})=(f_1(\boldsymbol{x})\quad f_2(\boldsymbol{x})\quad\cdots\quad f_m(\boldsymbol{x}))^{\mathrm{T}}$. 对上式非线性方程，一般思路是用线性函数近似非线性函数，再利用线性最小二乘法求解. 为此，对控制方程(10)进行一阶 Taylor 级数展开，忽略掉高阶非线性项，设第 k 次的迭代点是 $\boldsymbol{x}^k$，可得

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k)\Delta\boldsymbol{x}^k=-\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^k) \tag{12}$$

其中 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k)$ 是 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ 的 Jacobian 矩阵.

对线性方程组(12)求解时会出现方程个数大于、等于或是小于未知个数的情况，分别呈现超定、静定和欠定状态. 为寻求问题的最优解或是获得在物理上可接受的解，以上 3 种情况均可采用奇异值分解方法求解.

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k)=\boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

其中 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 为正交矩阵，$\boldsymbol{S}$ 为对角矩阵. 则

$$(\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k))^{-1}=\boldsymbol{V}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

$(\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k))^{-1}$ 是 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k)$ 的广义逆. 则有

$$\Delta\boldsymbol{x}^k=-(\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}^k))^{-1}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^k) \tag{15}$$

令

$$\boldsymbol{x}^{k+1}=\boldsymbol{x}^k+\lambda_k\Delta\boldsymbol{x}^k \tag{16}$$

使目标函数的范数最小：

$$\min F(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}^{k+1})\cdot\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^{k+1})=\|\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^{k+1})\|^2 \tag{17}$$

利用改进的 Gauss-Newton 最小二乘法求解

加速因子 λ_k，如果 $|F(\boldsymbol{x})|<\varepsilon$ 或 $|\lambda_k\Delta\boldsymbol{x}^k|<\varepsilon$，那么认为 $\boldsymbol{x}^{k+1}$ 满足解的要求，否则重新迭代，直到满足收敛条件.

2　钢框架结构损伤识别数值模拟

2.1　计算模型及基本假定

钢结构损伤经常出现在一些特定的部位，如因节点松动引起的梁柱节点损伤、塑性铰引起的梁中部损伤等. 为此，把每一个梁柱构件划分为 3 个单元，引入 3 个损伤指标，分别代表梁柱端部(节点)和中部损伤程度. 本文采用一个三层三跨平面钢结构模型进行数值模拟，如图 1 所示，模型共有 58 个节点，63 个单元. 弹性模量 $E=2.1\times10^{11}$ Pa，密度 $\rho=7\ 800\ \mathrm{kg/m^3}$，截面尺寸见表 1. 对于实际工程的楼面荷载，通过折算成框架梁的质量密度来考虑.

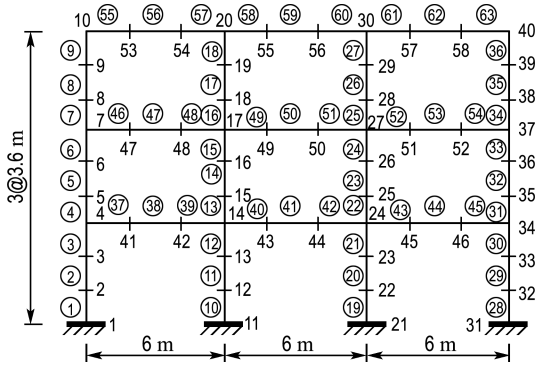


图 1　钢框架结构布置图

Fig. 1　Layout of steel frame structure

表 1　梁柱截面参数

Tab. 1　Cross section parameters of beam and column

层数	梁截面	柱截面	
		中柱	边柱
1	H300×150×7×10	H250×250×10×17	H200×200×9×15
2	H300×150×7×10	H200×200×9×15	H160×160×8×13
3	H240×120×6×9	H200×200×9×15	H160×160×8×13

本文工作分两步：①第一阶段，先进行初步诊断，在便于布置传感器的位置，如楼梯间处布置测点，进行测试. ②第二阶段，在前一步工作的基础上，进一步诊断，准确识别出损伤位置及其程度. 为使问题简化，假定框架结构完好状态下有限元模型是精确的，即结构有限元模型已经过试验模态参数的动力修正，可以模拟实际结构的动力特性. 模态观测数据通过结构的有限元模型计算获得，梁端、柱端和跨中损伤通过对弹性模量的折减来模拟. 考虑实际损伤一般出现在多个单元，且程度不一，损伤工况设计如表 2 所示. 表中 $d_3=0.20$，表示单元 3 损伤 20%，其他类似. 数据噪声是实际量测数据中不可避免的，为考察本文方法的抗噪能力，对模态添加 5% 各自分量的正态随机分布噪声，来模拟实测模态数据.

表 2　梁柱损伤工况

Tab. 2　Damage cases of beam and column

工况	损伤程度
工况 1：一层柱上端	$d_3=0.20, d_{12}=0.15$ $d_{21}=0.10, d_{30}=0.20$
工况 2：一层梁端	$d_{37}=0.30, d_{39}=0.20$ $d_{40}=0.15, d_{42}=0.05$ $d_{43}=0.10, d_{45}=0.20$
工况 3：一～三层梁柱	$d_3=0.20, d_6=0.10$ $d_9=0.30, d_{30}=0.15$ $d_{37}=0.20, d_{46}=0.30$ $d_{54}=0.15$

2.2　识别结果及讨论

(1)工况 1：一层柱上端损伤

识别过程：①随机布置 3 个传感器，采用前 4 阶模态. 传感器位置及识别结果如图 2 所示. 可以看出 1、3、12、13、21、22、29、30 等柱单元损伤值发生了明显的变化，大致判断，一层柱上端可能出现损伤. ②将传感器调整到一层柱上端的位置，进一步诊断，各单元的识别情况如图 3 所示. 从图 3 结果来看，在无噪声的情况下，只利用前 4 阶模态就能够准确地识别损伤单元及其程度，而且对小的损伤(单元损伤程度 10%)也具有很好的探测能力. 经过进一步识别还发现：测试模态数增加(6、8、10 阶等)，对识别精度没有明显优势，使得本方法更便于工程应用，因为实际测试中，一般只能得到结构的低阶模态. 另外，测点的位置对识别结果有很大影响，如果测点远离损伤区域，即使布置再多的点，也不能精确地识别出结构损伤情况. 因此，测点的合理布置是对结构进行准确识别的前提，本方法的初步诊断功能使测点合理布置成为可能. 图 4 为模态振型添加 5% 的噪声后，工况 1

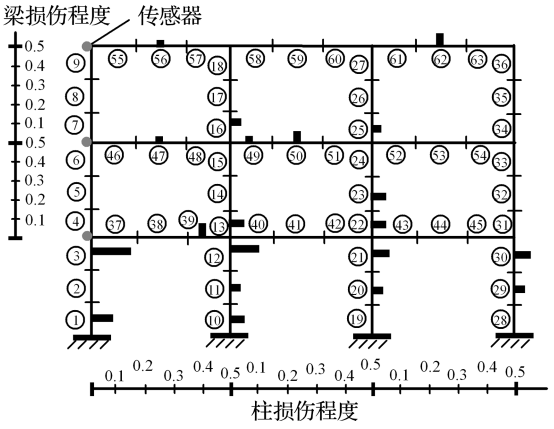


图 2 工况 1 第一阶段损伤识别结果(可能损伤区域)

Fig. 2 Damage identification of Case 1 in the first stage (potential damaged regions)

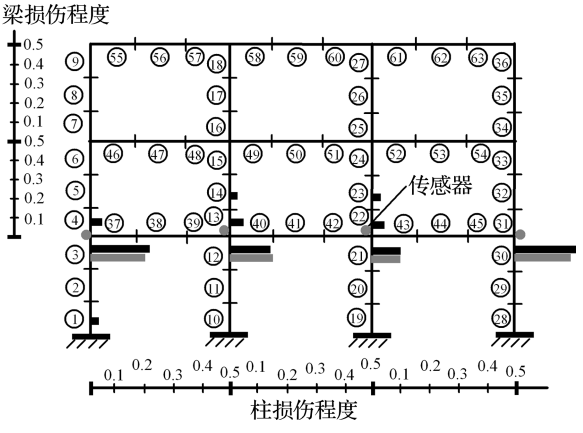


图 3 工况 1 第二阶段损伤识别结果

Fig. 3 Damage identification of Case 1 in the second stage

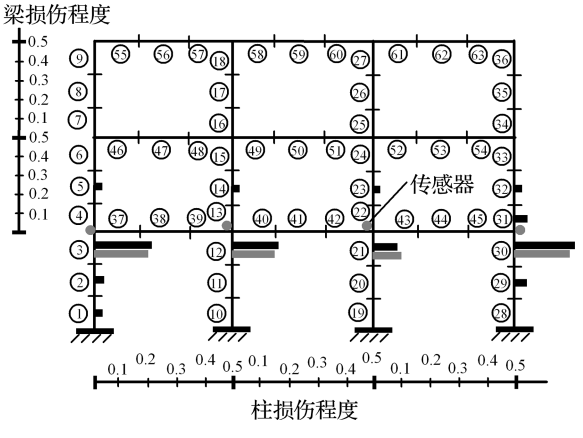


图 4 模态噪声为 5%时工况 1 的损伤识别结果

Fig. 4 Damage identification of Case 1 with 5% noise in mode shapes

的损伤识别结果.噪声的加入,虽然使识别误差略有增大,单元 12、21 达到 13%,但结果仍然较理想.

(2)工况 2:一层梁端损伤

识别过程:①初步诊断.传感器布置同工况 1,从图 5 看出梁 37、38、39、40、41、42、43、44、45 等损伤值非常明显,因此可断定一层梁的某些部位可能发生了损伤.②在可能的损伤区域布置测点,图 6 给出了前 4 阶模态下,各单元的损伤识别结果.从图 6 可以看出,损伤单元都能够准确地识别出,虽然个别单元损伤程度误差较大,但在工程上是可以接受的.从图中又观察到,与损伤单元相连的无损单元 38 出现了明显的峰值,产生了误判,这是因为单元 38 周边没有测点,当观测点不能完全覆盖到单元的周围时,观测数据不能包含足够的结构特征信息,就会带来识别误差.因此,又一次证明了测点的选择对结构损伤准确识别的重要性.初步诊断明确了损伤区域后,就可布置合适的测点,达到理想的识别结果,尽管某些单元可能出现误判,但不影响工程应用.进一步分析表明模态阶数增加,识别精度没有提高,误差反而有加大趋势.这是因为随着选取模态数量的增加,识别模型中的未知数个数以及方程个数均在增加,这样计算时间将会成倍加大,且识别误差也会随着未知数的增加而有所增大.加入噪声后,仍能准确地识别损伤位置和程度,表明该方法有很强的抗噪能力,识别结果如图 7 所示.

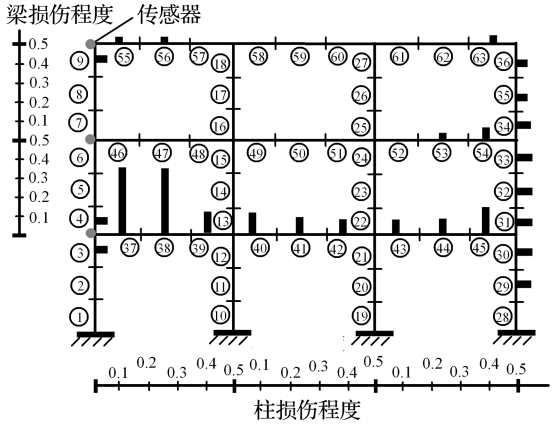


图 5 工况 2 第一阶段损伤识别结果(可能损伤区域)

Fig. 5 Damage identification of Case 2 in the first stage (potential damaged regions)

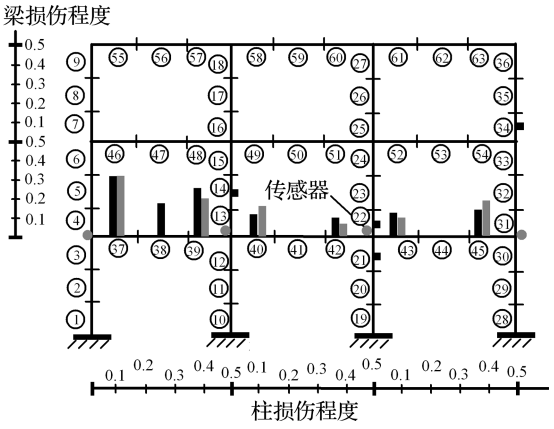


图 6　工况 2 第二阶段损伤识别结果

Fig. 6　Damage identification of Case 2 in the second stage

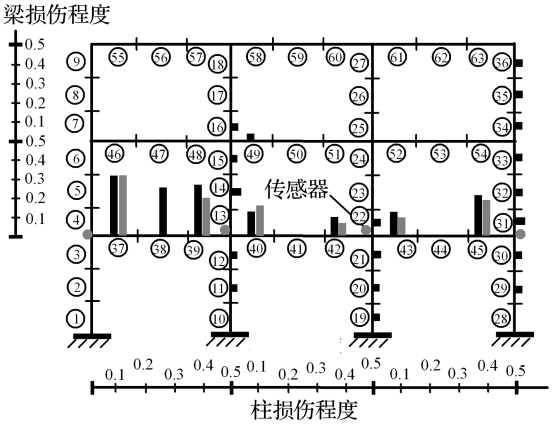


图 7　模态噪声为 5%时，工况 2 的损伤识别结果

Fig. 7　Damage identification of Case 2 with 5% noise in mode shapes

(3)工况 3：梁柱同时损伤

识别过程：①初步诊断. 传感器布置同工况 1，从图 8 诊断结果来看，左榀框架的各层柱(1 至 9 单元)和各层梁(37、46 等单元)的损伤值都发生了明显的变化，可初步判断，此处的梁柱可能有损伤. ②明确诊断. 在可能损伤部位增设传感器，进一步识别，结果如图 9 所示. 从图 9 可观察到，尽管损伤涉及梁柱，分布在各个楼层，但其位置和程度都能准确识别出来. 同工况 1 和工况 2 一样，识别精度不随模态阶数的增加而增加，选取适当的模态数量才是最重要的. 测点的布置对本工况的识别结果起了关键作用，只有把测点布置在损伤单元两端或是附近，才能达到理想识别. 加入噪声后，仍能识别出损伤位置，损伤程度识别误差也不是很大，只是相对于无噪声情况下，个别单元误差略为增大(见图 10).

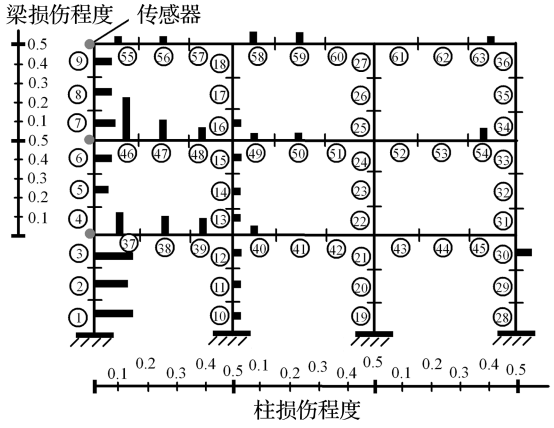


图 8　工况 3 第一阶段损伤识别结果(可能损伤区域)

Fig. 8　Damage identification of Case 3 in the first stage (potential damaged regions)

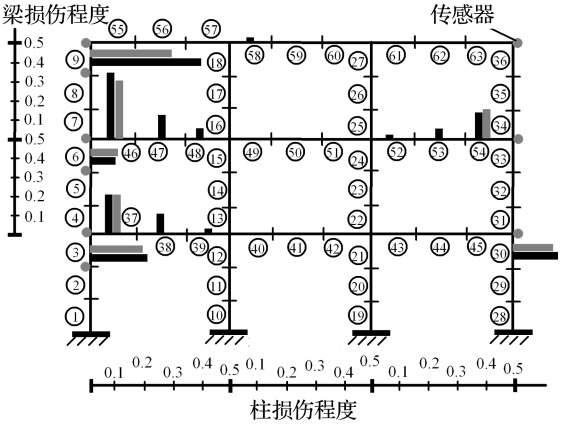


图 9　工况 3 第二阶段损伤识别结果

Fig. 9　Damage identification of Case 3 in the second stage

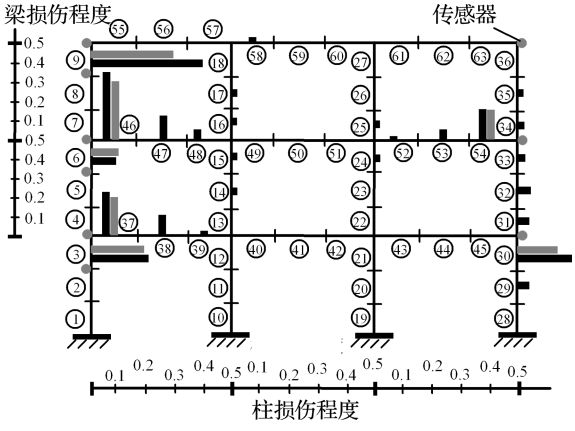


图 10　模态噪声为 5%时工况 3 的损伤识别结果

Fig. 10　Damage identification of Case 3 with 5% noise in mode shapes

3 结 论

(1)在随机布置少量测点的情况下,利用本文的两阶段诊断方法可以首先识别出损伤出现的最可能区域,然后在可能损伤区域布置测点,做进一步的识别,不论有无噪声,只利用低阶模态数据,就可以准确识别出钢结构的损伤位置和损伤程度.

(2)在损伤构件周围或附近布置测点,即使测点较少也能达到理想的识别效果.否则,远离损伤区域,测点布置再多,也不能提高识别精度,因此,第一阶段的损伤区域判断尤为重要.

(3)识别精度不随模态阶数的增加而提高.当对实际工程进行损伤诊断时,在合理布置测点的前提下,适当选取模态数量,既节省了时间又保证了识别结果的准确性.

(4)对于钢结构而言,材料均质弹性,现有的有限元模型完全能够模拟结构的各种性能,利用本文方法可以针对钢结构工程有效地开展损伤诊断.

参考文献:

[1] MAHIN S A. Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake [J]. **Engineering Structures**, 1998, **20** (4-6):261-270

[2] WATANABE E, SUGIURA K, NAGATA K, *et al*. Performances and damages to steel structures during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake [J]. **Engineering Structures**, 1998, **20** (4-6):282-290

[3] DERAEMAEKER A, REYNDERS E, DE ROECK G, *et al*. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2008, **22**(1):34-56

[4] REN W X, DE ROECK G. Structural damage identification using modal data I: simulation verification [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2002, **128**(1):87-95

[5] SHI N Y, LAW S S, ZHANG L M. Damage localization by directly using incomplete mode shapes [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2000, **126**(6):656-660

[6] CHEN H P. Damage localization and quantification utilizing perturbation method to ASCE benchmark structure [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2007, **43**(11):2412-2421

[7] CHEN H P. Application of regularization methods to damage detection in large scale plane frame structures using incomplete noisy modal data [J]. **Engineering Structures**, 2008, **30**(11):3219-3227

[8] WU J R, LI Q S. Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element modal updating method [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2006, **62**(3):231-239

[9] 袁旭东,高 潮,高少霞. 量测模态数量对结构损伤识别影响数值模拟研究[J]. 工程力学, 2007, **24**(1):75-78

[10] 袁 颖,林 皋,周爱红,等. 基于不完备模态测试信息的结构损伤识别方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, **47**(5):693-697
(YUAN Ying, LIN Gao, ZHOU Ai-hong, *et al*. Study of damage identification based on incomplete modal measurements [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2007, **47**(5):693-697)

[11] PERERA R, RUIZ A. A multistage FE updating procedure for damage identification in large-scale structures based on multi-objective evolutionary optimization [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2008, **22**(4):970-991

[12] REYNDERS E, TEUGHELS A, DE ROECK G. Finite element model updating and structural damage identification using OMAX data [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2010, **24**(5):1306-1323

[13] KO J M, SUN Z G, NI Y Q. Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge [J]. **Engineering**

Structures, 2002, **24**(7):857-868

[14] JONG J L, CHUNG B Y. Damage diagnosis of steel girder bridges using ambient vibration data [J]. **Engineering Structures**, 2006, **28**(6):912-925

[15] GONZÁLEZ M P, ZAPICO J L. Seismic damage identification in buildings using neural networks and modal data [J]. **Computers and Structures**, 2008, **86**(3-5):416-426

[16] KIM J T, STUBBS N. Damage localization in structures without baseline modal parameters [J]. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 1996, **34**(8):1644-1649

[17] BANERJEE S, RICCI F, MONACO E, *et al*. A wave propagation and vibration-based approach for damage identification in structural components [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2009, **322**(1-2):167-183

[18] BERNAL D, GUNES B. Load vectors for damage localization [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2002, **128**(1):7-14

[19] 纪晓东,钱稼茹,徐龙河. 两层钢支撑框架模型损伤定位试验[J]. 工程力学, 2007, **24**(1):62-66

Two-stage damage diagnosis approach for steel frame structures

DUAN Hong-xia[*1,2], LI Shou-ju[1], LIU Ying-xi[1], YUAN Xu-dong[3]

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;
3. College of Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: For the purpose of identifying the damage of steel frame structure, a two-stage damage diagnosis method is presented. At the first stage, the most probable damage area is identified by randomly placing a few sensors. At the second stage, the sensors are placed in probable damage places, and the damage sites and damage extent can be accurately indentified. Using mathematical simulation of a three-layer steel frame structure, the effects of the measurement sites, number of modes, and noise on the precision of identification are assessed. The results demonstrate that even with incomplete measurement information, the two-stage damage diagnosis method can effectively identify the damage sites and extent in the steel frame structure.

Key words: steel frame structure; damage identification; two-stage damage diagnosis; incomplete measurement information