

# 基于动力测试的简支梁模型修正与参数分析\*

刘才玮<sup>1</sup>, 赵元元<sup>1</sup>, 黄绪宏<sup>1</sup>, 苗吉军<sup>1</sup>, 杨大彬<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266033)

(2. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室 济南, 250101)

**摘要** 为获取用于混凝土梁结构火灾健康监测的准确有限元模型, 首先, 考虑边界条件及多物理参数对结构响应的影 响, 提出基于支持向量机算法的分步修正方法; 其次, 以 4 根混凝土矩形试验梁、3 根混凝土 T 形试验梁为研究对象, 利用火灾前实测前 2 阶频率与振型对初始有限元模型进行修正; 最后, 基于模型修正对火灾下结构进行基频衰减规律研究。结果表明, 修正后的模型及火灾下的基频衰减曲线能较好反映混凝土梁的真实动力特性, 采用分步修正算法可精简计算量, 能够有效用于混凝土梁结构的有限元模型修正。为更直观地研究截面宽度、高跨比、弹性模量等参数与受火时间对基频的影响, 对其进行参数分析, 并拟合出基频随受火时间的衰减公式, 数值模拟及试验结果验证了公式的合理性, 可为后续火灾损伤识别与评估提供参考。

**关键词** 混凝土简支梁; 模型修正; 支持向量机; 火灾; 参数分析

**中图分类号** TU375.1

## 引 言

火灾已成为影响建筑结构安全的重要因素之一<sup>[1]</sup>。受火灾过程复杂、高温对设备的损坏、振动特性监测方法困难等诸多条件的限制, 数值仿真试验是研究火灾下损伤识别及评估行之有效的手段, 而初始有限元模型修正对于仿真结果的合理性和可信度具有重要研究价值。

在以往模型修正案例中, 彭涛等<sup>[2]</sup>采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法对混凝土斜拉桥进行了模型修正。陈辉等<sup>[3]</sup>提出了一种基于随机有限元方法的随机模型修正方法, 完成了对某固支梁的有限元模型修正。秦仙蓉等<sup>[4]</sup>重点考虑了边界条件对结构的影响, 采用二次响应面法对塔机有限元模型进行修正。结果均表明, 边界条件的修正对模型准确性具有重要影响。当一次修正样本点较多时, 极易产生“数据爆炸”及映射能力降低等现象, 其中分步修正策略可作为模型修正算法改进修正精度的依据。翁顺等<sup>[5]</sup>提出了基于子结构的模型修正方法并完成了对桥梁的有限元模型修正。刘才玮等<sup>[6]</sup>针对空间网格结构杆件众多的特点, 提出了分步修正

的方法, 结果表明该算法可以提高模型修正的计算精度及收敛效率。

在火灾作用下结构振动方面, 文献[7]对框架结构中梁、板等构件在火灾下振动特性发展规律进行了深入研究, 发现整体结构中构件频率呈现波动式衰减趋势, 通过频率分析可以有效地监测板的受火行为。刘才玮等<sup>[8]</sup>对 4 根混凝土梁分别进行了火灾前、中、后的动力测试, 并利用动力测试结果对其灾后损伤识别及评估进行了研究。以上研究均证明频率可反映火灾中以及火灾后力学性能的退化, 但现有研究主要侧重于试验方面, 火灾作用下结构动力特性发展规律数值模拟方面的研究较少。

笔者以 4 根矩形试验梁、3 根 T 形试验梁为研究对象, 首先, 重点考虑边界条件及多物理参数对模型的影响, 利用所提出支持向量机 (support vector mechanic, 简称 SVM) 分步修正方法对初始模型进行修正, 并采用试验数据验证方法的可行性; 其次, 为进一步验证其合理性并探究火灾下基频衰减规律, 进行了试验研究; 最后, 进行了参数影响分析, 拟合得到基频随受火时间的衰减公式, 为后续混凝土梁的火灾损伤识别与评估提供参考依据。

\* 国家自然科学基金资助项目(52178487); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME228); 教育部重点实验室开放性课题资助项目(MEKL202001); 中国博士后基金资助项目(2018M632640); 山东省博士后创新资助项目(2019057)  
收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-08-05

# 1 基于SVM的混凝土梁分步修正方法

## 1.1 损伤特征参数

对于多物理参数的模型修正,样本构造主要包括样本采集及损伤特征参数确定。笔者以各物理参数取值范围作为参考,采用均匀设计方法进行取样,利用对应各物理参数取值组合下的混凝土梁模态响应,组合作为损伤特征参数。所构造混凝土梁损伤特征参数(vibration comprehensive index parameter,简称VCIP)详见文献[9]。

## 1.2 SVM分步有限元模型修正方法

以混凝土密度 $\rho$ 为例,利用SVM算法进行修正,训练样本步长为100,即2 400,2 500,2 600,2 700,2 800共5个样本。设 $p$ 为修正参数个数,将其带入到有限元模型中进行计算,得到样本个数为 $p$ 个 $C_5^1$ 相乘,即 $(C_5^1)^p$ ,当 $p=7$ 时,所得数据个数近80 000个,映射能力低下。若采用分步修正,首次训练样本步长为200,即2 400,2 600,2 800代入模型进行计算,得到样本个数为 $p$ 个 $C_3^1$ 相乘,即 $(C_3^1)^p$ ;二次修正以首次修正结果 $\rho'$ 为基准,将训练步长设为100,即2 500,2 600,2 700,得到样本个数为 $p$ 个 $C_3^1$ 相乘,即 $(C_3^1)^p$ ,数据个数为2 187个。分步修正与一次修正的样本数之比为 $(C_3^1)^p/(C_5^1)^p=0.028$ ,总样本数之比为 $2(C_3^1)^p/(C_5^1)^p=0.056$ 。分步修正算法可大大减少样本量,有效防止“数据爆炸”。

综上所述,修正过程如下:设 $a_{ij}$ 为第 $i$ 个物理参数 $j$ 次的修正基准值, $[a_{ij}-R_{ij}, a_{ij}+R_{ij}]$ (其中 $R_{ij}$ 为修正区间半径)为 $j$ 次修正的第 $i$ 个物理参数修正区间,初次修正区间为 $[X_i, Y_i]$ 。构造样本过程中,设 $b_{ij}$ 为第 $i$ 个物理参数 $j$ 次的训练步长, $C_{ij}$ 为步长个数, $b_{ij}$ 与 $C_{ij}$ 取决于修正区间大小及所选用均匀设计表格的计算值。

1) 首次修正:首次修正区间 $[X_i, Y_i]$ 根据工程经验及参考文献确定,修正区间中值不一定为基准值。首先,步长 $b_{ij}$ 及个数 $C_{ij}$ 由均匀设计表计算确定,将 $X_i, X_i+b_{ij}, \dots, X_i+C_{ij}b_{ij}$ 即对应的样本点输入到有限元模型进行模态计算,提取频率、振型构造 $VCIP_1^*$ ,建立损伤特征参数与对应物理参数的样本库 $A_1$ ;其次,以 $VCIP_1^*$ 作为输入,对应物理参数作为输出,可训练得到SVM回归机 $SVR_1$ ;最后,采用结构实测频率、振型构造参数 $VCIP_1$ ,输入到 $SVR_1$ 中,

输出即为模态实测值所对应的首次物理参数修正结果 $a_{i1}^*$ 。

2) 二次修正: $[a_{i1}^*-R_{i2}, a_{i1}^*+R_{i2}]$ 为二次修正区间( $R_{i2}$ 的取值由工程经验确定,笔者对修正区间减半进行构造样本,即 $2R_{i2}=(Y_i-X_i)/2$ )<sup>[10]</sup>, $b_{2j}$ 与 $C_{2j}$ 的取值原则与 $b_{1j}$ 与 $C_{1j}$ 一致。首先,将 $a_{i1}^*-R_{i2}, a_{i1}^*-R_{i2}+b_{2j}, \dots, a_{i1}^*-R_{i2}+C_{2j}b_{2j}$ 即对应样本点输入到有限元模型进行模态计算,提取频率、振型并构造 $VCIP_2^*$ ,建立损伤特征参数与对应物理参数的样本库 $A_2$ ;其次,以 $VCIP_2^*$ 作为输入,对应物理参数作为输出,训练回归机 $SVR_2$ ;最后,采用结构实测频率、振型构造参数 $VCIP_2$ ,输入到 $SVR_2$ 中,输出即为物理参数二次修正值 $a_{i2}^*$ 。

3)  $n$ 次修正:根据 $n-1$ 次修正结果,按照上述相同流程进行计算,从而获得物理参数的 $n$ 次修正结果 $a_{in}^*$ 。按照上述提出的多参数修正终止指标,对模型修正结果进行评估,若满足指标要求则结束修正;反之,对于不满足要求的模型,已收敛的物理参数将作为最终的修正结果,尚未收敛的参数通过合适的均匀设计表构造样本库继续进行修正。

笔者在建立SVM回归机 $SVR$ 的过程中,在原有LIBSVM工具箱<sup>[11]</sup>基础上对修正界面进行了改进,改进功能如下:①针对回归问题,增加了平方相关系数( $r^2$ )随输入参数取值的变化,以便锁定最优解;②增加了核函数及输入参数类型,便于调整核函数。在训练回归机的过程中,选用高斯径向基核函数(radial basis function,简称RBF)进行回归,设置惩罚参数 $c$ 及函数参数 $g$ 取值范围均为 $(-8, 8)$ ,运用交叉验证方法,在上述范围内综合考虑平均平方误差及平方相关系数,从而合理选择输入参数。

## 1.3 修正终止指标

对于修正终止指标的选择,当修正参数较少时,物理参数收敛与结构响应具有一致性;当其较多时,结构响应绝对收敛所对应的物理参数真值可能并不唯一,此时应采用相对收敛。因此,笔者综合考虑修正效率及结果准确性,收敛指标选取为

$$\begin{cases} \left| \frac{\omega_n^i - \omega_{(n-1)}^i}{\omega_n^i} \right| \leq \delta \\ \left| \frac{a_{ij}^i - a_{i(j-1)}^i}{Y_i - X_i} \right| \leq \epsilon \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\omega_n^i$ 为第 $i$ 阶 $n$ 次修正后结构频率; $a_{ij}^i$ 为第 $i$ 个参数 $j$ 次修正后结果; $X_i, Y_i$ 为第 $i$ 个修正参数初始修正

区间的上下限; $\delta, \epsilon$ 为理想收敛界限值; $i$ 为感兴趣的频率阶次。

依据工程经验,本模型修正过程中取 $\delta=1\%$ , $\epsilon=5\%$ 。

## 2 SVM分步修正算法试验验证

### 2.1 简支梁试件设计

共设计制作 4 根 3 m 的矩形简支梁(编号为  $L_1 \sim L_4$ )和 3 根 3 m 的 T 形简支梁(编号分别为

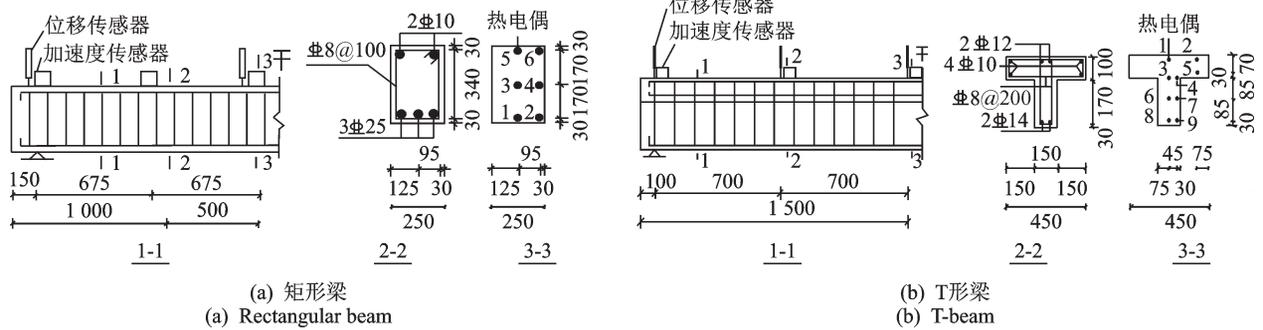


图 1 配筋及热电偶布置图(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement and thermocouple layout (unit:mm)

### 2.2 初始有限元模型及修正物理参数确定

混凝土使用 ANSYS 中的 SOLID65 实体单元,钢筋使用 LINK8 单元,采用正六面体进行网格划分,忽略钢筋与混凝土之间的滑移影响,重点考虑支座刚度对模型的影响,选用 COMBIN14 单元模拟支座刚度,其模型如图 2 所示。考虑模型修正的实际意义,矩形简支梁选取混凝土弹性模量( $E$ )、混凝土密度( $DS$ )、支座偏移( $D_1, D_2$ )、支座刚度( $K_1, K_2$ )作为有限元模型修正的待修正参数,T形简支梁还额外选取翼缘宽度( $Bf$ )作为待修正参数。基于工程经验及设计参数,矩形梁及 T 形梁物理参数修正区间如表 2 所示。基于 ANSYS 的概率分析模块分别进行灵敏度分析,限于篇幅,以矩形梁为例进行说明,如图 3 所示,其中: $F_i$ 为第  $i$  阶平面内自振频率; $Z_{ij}$ 为第  $i$  阶  $j$  位置振型位移。

由矩形梁灵敏度分析可知:频率对  $K_1, K_2, DS, E$  变化较敏感;振型对  $K_1, K_2, D_1$  变化较敏感。由于结构的对称性,依然考虑  $D_2$  对结构的影响。因此,矩形梁选取  $E, DS, K_1, K_2, D_1, D_2$  作为最终待修正参数。

由 T 形梁灵敏度分析可知:频率对  $K_1, K_2, D_1, D_2$  变化较敏感;振型对所有待修正参数变化均较敏

感。因此,T形梁选取  $E, DS, K_1, K_2, D_1, D_2, Bf$  作为最终待修正参数。

表 1 材料强度

Tab.1 Material propertise

梁	立方体抗压强度 平均值/MPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
矩形梁	40.9	468	560
T形梁	35.8	452	561

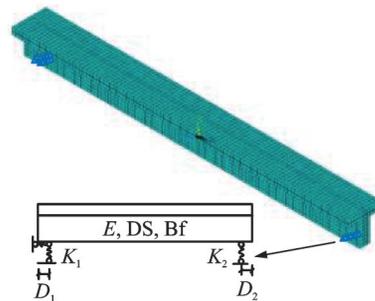


图 2 初始有限元模型

Fig.2 The initial FEM

表 2 预估修正参数取值范围

Tab.2 Estimate range of modified parameter value

梁	待修正 参数	DS/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E$ / $10^4(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$D_1/ D_2$ / mm mm	$K_1/ K_2$ / $10^6(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ $10^6(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	Bf/ mm
矩 形 梁	下限值	2 400	2.80	90 90	1 1	—
	标准值	2 500	3.15	130 130	55 55	—
	上限值	2 800	3.35	170 170	100 100	—
T 形 梁	下限值	2 400	2.80	90 90	1 1	400
	标准值	2 500	3.15	130 130	55 55	450
	上限值	2 800	3.35	170 170	100 100	500

感。因此,T形梁选取  $E, DS, K_1, K_2, D_1, D_2, Bf$  作为最终待修正参数。

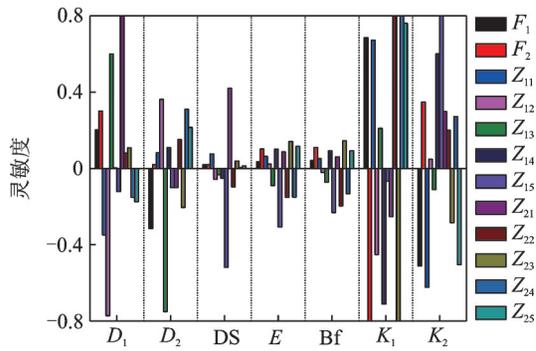


图3 物理参数灵敏度分析

Fig.3 Sensitivity analysis of physical parameters

### 2.3 火灾前简支梁振动测试

采用锤击法激励结构,拾取结构振动时域信息,并采用快速傅里叶变换以及增强型频域分解方法对比识别结构模态信息。火灾前加速度传感器布置如图1所示。火灾前实测模态信息与数值模拟信息误差如表3所示。

由表3结果可知,ER值最大为24.01%,MAC最小值为0.891,频率及振型误差均较大。为获得更加精确的结构响应,建立精确的有限元模型具有很大的现实意义,因此有必要对初始有限元模型进行修正。

### 2.4 基于实测模态信息的有限元模型修正

以实测火灾前前2阶模态数据为依据,按照笔者提出的SVM分步模型修正方法,依次进行矩形梁及T形梁有限元模型修正,并与ANSYS自带的修正方法<sup>[11]</sup>进行对比。限于篇幅,笔者仅列出频率修正结果。矩形梁及T形梁物理参数修正结果如表4所示,修正前后结构响应评价如图4所示。

对图4分析可知:基于SVM的分步模型修正方法修正后,除T<sub>1</sub>梁ER<sub>1</sub>值超过5%外,其他均在5%以内,且MAC值均趋近与1,修正效果较好;与AN-

表3 简支梁相关性分析结果

Tab.3 Correlation analysis results of simply support beams

梁	工况	阶次	实测 频率/Hz	计算 频率/Hz	ER/%	MAC
矩形梁	L <sub>1</sub>	1	146.48	169.55	15.75	0.940
		2	463.87	532.62	14.82	0.954
	L <sub>2</sub>	1	136.91	169.55	23.84	0.909
		2	455.92	532.62	16.82	0.934
	L <sub>3</sub>	1	136.83	169.55	23.91	0.901
		2	458.98	532.62	16.04	0.938
	L <sub>4</sub>	1	136.72	169.55	24.01	0.891
		2	458.98	532.62	16.04	0.938
T形梁	T <sub>1</sub>	1	93.9	114.40	21.83	0.941
		2	334.2	394.73	18.11	0.953
	T <sub>2</sub>	1	96.5	114.40	18.55	0.956
		2	319.7	394.73	23.47	0.937
	T <sub>3</sub>	1	97.3	114.40	17.57	0.989
		2	332.6	394.73	18.68	0.950

表中ER及MAC分别为简支梁频率相对变化率及模态置信准则<sup>[19]</sup>

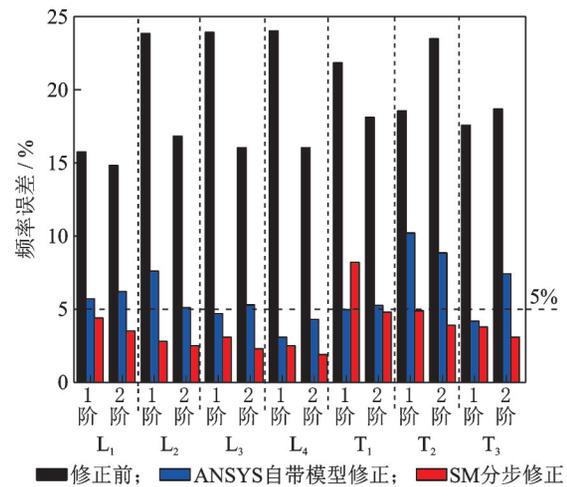


图4 修正前后结构响应对比

Fig.4 Comparison of structural response before and after correction

表4 各物理参数修正结果

Tab.4 Correction results of physical parameters

工况	E	DS	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	Bf
L <sub>1</sub>	3.35(4.78%)	2 448*(1.06%)	11.58*(1.33%)	9.65*(0.22%)	14.0(2.95%)	17.7(0.06%)	—
L <sub>2</sub>	3.19(1.61%)	2 606(2.80%)	17.13(2.18%)	15.06(0.49%)	14.9(2.98%)	16.1(0.48%)	—
L <sub>3</sub>	3.20(1.33%)	2 546(3.74%)	16.12*(0.06%)	13.45*(0.13%)	16.9(0.92%)	9.9*(1.54%)	—
L <sub>4</sub>	3.06*(0.17%)	2 487(1.98%)	16.69*(0.31%)	14.13*(0.18%)	12.0(2.54%)	11.1*(4.97%)	—
T <sub>1</sub>	3.25*(3.17%)	2 526*(1.04%)	12.61*(2.31%)	11.96*(2.94%)	97(1.02%)	102(2.78%)	453(2.78%)
T <sub>2</sub>	3.22(1.09%)	2 497*(1.87%)	15.79*(1.26%)	14.35*(2.58%)	101(1.90%)	104(2.38%)	462(2.21%)
T <sub>3</sub>	3.11*(2.39%)	2 492*(0.98%)	18.06*(1.21%)	15.95*(1.52%)	105(1.14%)	107*(2.50%)	455*(3.02%)

上标加“\*”表示4次修正满足收敛的物理参数;其他为3次修正即满足收敛的物理参数;括号内百分数为物理参数区间误差

SYS优化算法相比,基于SVM的分步修正方法效果更加明显。结果表明,修正后的模型能够反映实际结构的动力特性,证明了笔者所提出修正方法的合理有效性。

## 2.5 基于有限元模型修正的火灾下基频衰减规律

矩形梁在青岛理工大学结构实验室完成,试验过程中依次进行60,90,120及150 min下的受火试验,T形梁在山东建筑大学火灾实验室完成,依次进行60,90及120 min下的受火试验。通过安捷伦34980A数据采集仪及炉内热电偶采集截面温度变化。对试件施加环境激励,通过布置加速度传感器及测试系统实时捕捉结构振动信号,为数值模拟提供数据支持。火灾试验现象如图5所示。

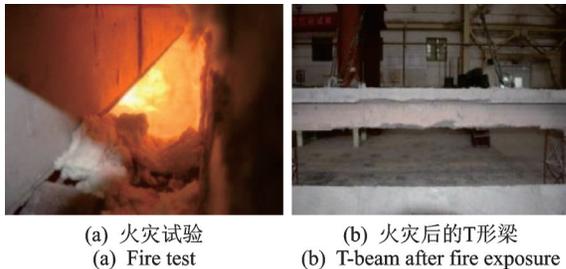


图5  $T_2$ 火灾试验  
Fig.5 Fire test of  $T_2$

结构在火灾过程中高频振动难以被激发,结构振动主要由低频控制,笔者拾取结构基频进行研究,基频在火灾过程中具有较好的稳定性,且能很好地反映结构自身刚度的变化<sup>[1]</sup>。分析过程中,截取每2 min时域信息,模态识别后获取结构实测基频信息,并与理论值进行对比。以 $L_4$ 为例,实测及模拟对比结果如图6所示。

T形梁与矩形梁实测频率衰减规律较为统一,综合T形梁与矩形梁火灾过程中实测与数值模拟可得以下几点结论。

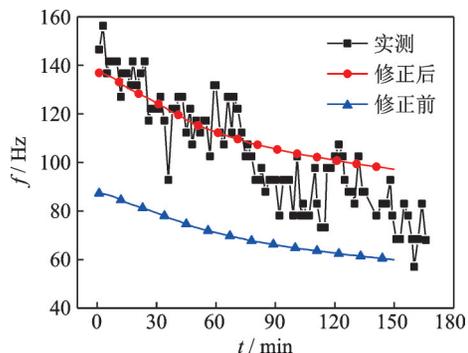


图6  $L_4$ 火灾过程中基频模拟

Fig.6 Fundamental frequency simulation of  $L_4$  during fire test

1) 由实测频率分析可知,火灾过程中频率衰减规律基本相同,总体呈下降趋势,且为波动式衰减;受火前期频率降低较快,后期趋势变缓,停火后频率有继续降低的趋势。分析原因主要是由于梁在受火过程中,随着截面温度的升高,钢筋、混凝土的力学性能逐渐下降,停火后截面温度仍有“延迟”增加;此外火灾试验中伴随的开裂、爆裂及其他劣化因素也会导致截面刚度减小,从而引起频率降低。

2) 实测值与模拟值对比显示,修正后的简支梁频率衰减曲线与实测值较为接近。由此可说明,在对火灾下混凝土梁频率计算时对初始模型进行修正是必要的,笔者提出的分步修正方法具有实际应用价值。

3) 实测值与模拟值对比发现,受火初期模拟结果与实测值较为接近,随着受火时间的增加,修正后频率计算值明显高于实测值,这主要是因为虽然修正后模型考虑了高温对材料力学性能的影响,但对受火过程中混凝土裂缝发展、混凝土与钢筋之间的黏结力下降等因素尚未考虑。

## 3 矩形梁基频参数分析及公式

### 3.1 参数分析

除受火时间 $t$ 外,影响基频的主要参数有截面宽度( $B$ )、高跨比( $H/L$ )、混凝土弹性模量( $E$ )、纵向受拉钢筋配筋率( $\rho$ )及保护层厚度( $c$ )。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),矩形梁高宽比 $H/B$ 取值范围一般为2.0~3.0左右、梁的高跨比 $H/L$ 一般在1/10~1/16左右,根据工程经验,钢筋混凝土梁的经济配筋率为0.6%~1.5%。本研究简支梁高宽比选定在2左右,配筋率选定在1%左右,建模时设定模型长度为4 000 mm,取弹性模量 $E$ 为3~3.35,截面宽度 $B$ 为0.12~0.2 m,每种工况下进行受火150 min的火灾模拟,同时计算30,60,90,120及150 min下的频率,分析各因素与受火时间 $t$ 对矩形梁基频 $f_1$ 的影响,如图7所示。

分析图7可以得到以下结论。

1) 当 $B$ 较小时,随着 $t$ 的增加,梁的基频衰减幅度较大,当 $B$ 逐渐增加时,基频衰减幅度变小。混凝土梁常温时随着截面宽度的增加,梁基频变化可忽略不计,当 $t$ 保持不变时,截面宽度增长初期梁基频增长幅度较大,后期增长幅度较小。

2)  $H/L$ 一定时 $t$ 越大基频越小,同一时刻 $H/L$ 越大基频值越大。 $t$ 越小 $H/L$ 越大简支梁的基频值

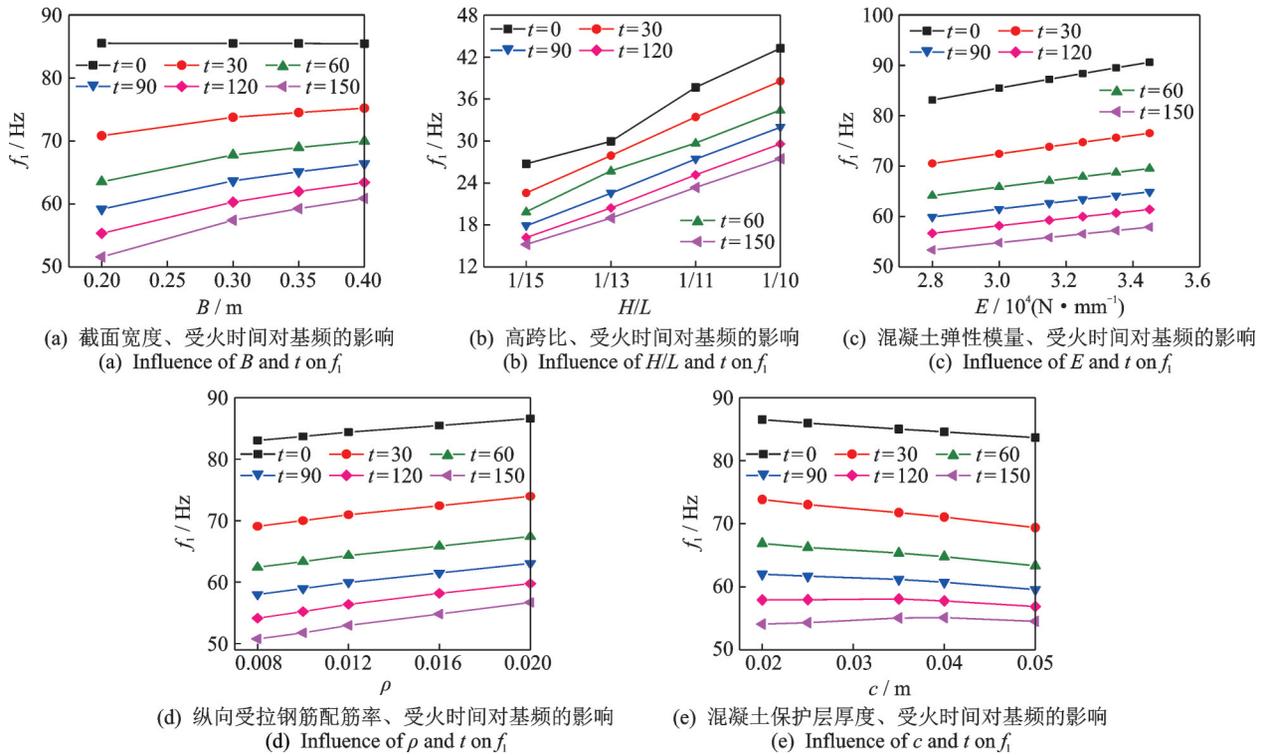


图 7 各物理参数对基频的影响

Fig.7 Influence of physical parameters on fundamental frequency

越大,  $t$ 一定基频与  $H/L$  的关系曲线可视为线性发展。

3) 当  $t$  相同时, 基频受  $E$  影响大致呈线性发展, 不同受火时间的简支梁基频值随  $E$  变化规律类似。在受火初期基频衰减幅度较大, 之后基频值持续减小, 但衰减幅度明显降低。

4)  $t$ 一定时,  $\rho$  的增加导致基频值增大, 发展趋势基本呈线性, 不同受火时间对应的基频值变化趋势相近。基频随  $t$  逐渐降低, 在受火初期基频值降幅较为明显, 后期基频值降幅逐渐减小。

5) 在简支梁受火初期, 基频衰减幅度较大。随着  $t$  的增加, 基频持续衰减, 但幅度明显降低。当  $t$  较小时, 随着  $c$  的增加, 基频逐渐衰减, 这是由于相比较于  $t$  对基频的影响,  $c$  的影响更加明显; 但是随着  $t$  的增加, 截面刚度明显减小,  $t$  对基频的影响逐渐成为主要影响因素,  $c$  对频率影响逐渐减小。

### 3.2 基频衰减公式拟合

通过各参数对基频的影响可以看出, 当  $t$  一定时, 基频随各参数的增加大致呈线性变化, 笔者仅选出对基频影响较大的参数, 即  $H/L, E, \rho$  及  $t$ , 对简支梁的基频公式进行拟合。频率比数值计算 ( $f_i/f_0$ , 受火与未受火时的频率比值) 结果如表 5 所示。

表 5 频率比数值计算结果

Tab.5 Numerical results of frequencies ratio

$E/10^4$ MPa	$H/L$	$t/\text{min}$				
		30	60	90	120	150
3.00	1/15	0.844	0.744	0.668	0.606	0.569
	1/13	0.932	0.859	0.753	0.682	0.634
	1/11	0.887	0.789	0.728	0.668	0.620
	1/10	0.891	0.796	0.739	0.684	0.635
3.15	1/15	0.841	0.741	0.666	0.605	0.569
	1/13	0.938	0.831	0.758	0.687	0.640
	1/11	0.886	0.787	0.726	0.667	0.620
	1/10	0.902	0.806	0.748	0.693	0.644
3.25	1/15	0.843	0.743	0.668	0.607	0.571
	1/13	0.934	0.827	0.755	0.685	0.638
	1/11	0.887	0.788	0.727	0.669	0.621
	1/10	0.906	0.809	0.751	0.696	0.647
3.35	1/15	0.843	0.742	0.668	0.608	0.572
	1/13	0.934	0.825	0.754	0.685	0.638
	1/11	0.896	0.796	0.735	0.676	0.628
	1/10	0.903	0.806	0.748	0.693	0.645

采用统计分析软件 SPSS 对表 5 中数据进行拟合, 可得到  $f_i/f_0$  与  $t, E$  以及  $H/L$  之间的近似关系为

$$f_i/f_0 = 0.846 - 0.003t + 1.326H/L + 0.006E \quad (2)$$

其中:  $f_i/f_0$  为矩形梁刚性支座基频折减系数;  $f_i$  为刚性

支座混凝土梁受火时间  $t$  时的基频;  $f_0$  为混凝土梁未受火时的基频; 参数取值范围为  $1/16 \leq H/L \leq 1/10$ ,  $30 \text{ min} \leq t \leq 150 \text{ min}$ ,  $3 \leq E \leq 3.35$  (单位:  $10^4 \text{ MPa}$ )。

式(2)相关系数为 0.97, 标准偏斜度错误为 0.033, 满足精度要求。

为验证公式的合理性, 其有限元与拟合公式计算结果比较见图 8。图中纵坐标表示某工况的拟合公式计算结果, 横坐标表示对应相同工况的有限元计算结果。若同一工况两种结果相同, 则该点位于图中  $45^\circ$  中线处, 否则将偏离该中线。

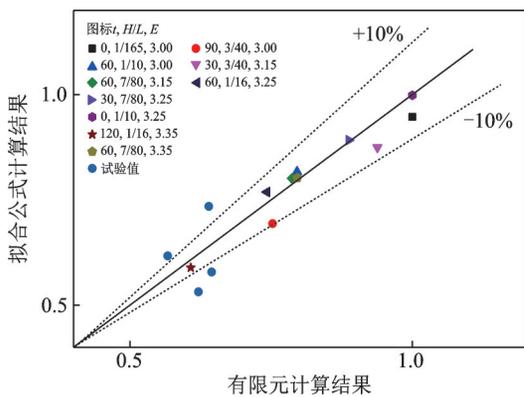


图 8 基频公式值与有限元值比较(刚性支座)  
Fig.8 Comparison between formula value and simulation value of fundamental frequency (rigid support)

从图 8 可以看出, 数值模拟与回归计算结果总体吻合较好, 均在  $\pm 10\%$  以内。但若将简支试验梁频率实测值放入进行比较, 则误差明显偏大, 出现这种结果的原因主要是本次数值模拟的支座为刚性, 与实际支座刚度存在一定差异。

为解决此问题, 在刚性模型的基础上将支座形式修改为弹性支座, 且假定梁两端支座刚度变化相同, 与刚性模型计算类似, 可得出弹性支座条件下的矩形梁的频率定量关系, 最终得到  $f_i'/f_0'$  与  $t, E$  以及  $H/L$  之间近似关系为

$$f_i'/f_0' = 1.447 - 0.001t + 0.673H/L - 0.174E + 0.028k \quad (3)$$

其中:  $f_i'/f_0'$  为矩形梁弹性支座基频折减系数;  $f_i'$  为矩形梁弹性支座下受火时间  $t$  时的基频;  $k$  为支座刚度折减值(0.1~1.0); 其余字母含义与式(2)相同。

式(3)相关系数为 0.91, 标准偏斜度错误为 0.032, 满足精度要求。

同刚性模型, 为验证弹性支座模型的合理性, 将数值模拟值与试验频率实测值进行对比, 如图 9 所示, 可发现试验值及模拟值吻合度较好, 误差

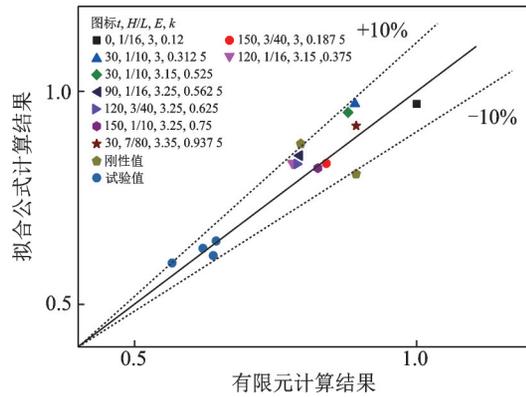


图 9 基频公式值与有限元值比较(弹性支座)  
Fig.9 Comparison between formula value and simulation value of fundamental frequency (elastic support)

在  $\pm 10\%$  以内; 刚性支座下两工况的“刚性值”误差较大, 在  $\pm 10\%$  左右, 进一步说明了式(3)的合理性。

## 4 结 论

1) 为获取用于混凝土梁结构火灾健康监测的准确有限元模型, 提出了重点考虑边界条件基于 SVM 的分步有限元模型修正方法, 并利用 4 根矩形试验梁、3 根 T 形试验梁的试验数据对所提出的算法进行了验证。结果表明, 修正后有限元模型能较好反映混凝土梁的真实动力特性, 采用分步修正算法可精简计算量, 能够有效用于混凝土梁结构的有限元模型修正。

2) 为进一步验证所提修正方法的适用性, 以火灾下简支梁振动特性作为背景, 利用修正后有限元模型耦合火灾升温曲线, 模拟火灾过程中频率衰减规律, 通过与实测值对比显示, 修正后的计算结果较为合理。

3) 以矩形简支梁为例, 分别分析了  $H/L, E, \rho$  及  $t$  对基频的影响, 并拟合出了基频折减公式, 数值模拟及试验结果验证了公式的合理性, 可为后续损伤识别与评估提供参考依据。

## 参 考 文 献

[1] LIU C F, LIU C W, LIU C X, et al. Fire damage identification in RC beams based on support vector machines considering vibration test [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(10): 4407-4416.  
[2] 彭涛, 田仲初, 张建仁, 等. 基于多目标优化的混凝土斜拉桥静动力有限元模型修正[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 108-116.

- PENG Tao, TIAN Zhongchu, ZHANG Jianren, et al. Static and dynamic finite element model updating for a concrete cable-stayed bridge based on multi-objective optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21):108-116.(in Chinese)
- [3] 陈辉,张衡,李焯君,等. 测量模态不确定的梁式结构随机有限元模型修正[J]. 振动工程学报, 2019, 32(4):653-659.
- CHEN Hui, ZHANG Heng, LI Yejun, et al. Stochastic finite element model updating of beam structure based on uncertain measurement modes [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(4):653-659.(in Chinese)
- [4] 秦仙蓉,郝婧兰,徐俭,等. 考虑边界条件不确定性的塔机有限元模型修正[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1):92-96.
- QIN Xianrong, HAO Ruolan, XU Jian, et al. Finite element model updating of tower crane considering the uncertainty of boundary conditions [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1):92-96.(in Chinese)
- [5] 翁顺,左越,朱宏平,等. 基于子结构的有限元模型修正方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4):99-104.
- WENG Shun, ZUO Yue, ZHU Hongping, et al. Model updating based on a substructuring method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4):99-104.(in Chinese)
- [6] 刘才玮,张毅刚,吴金志. 考虑螺栓球节点半刚性的网壳结构有限元模型修正研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6):35-39,43.
- LIU Caiwei, ZHANG Yigang, WU Jinzhi. Finite element model updating of single-layer latticed cylindrical shell in consideration of the semi-rigid characters of bolt-ball joint [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6):35-39,43.(in Chinese)
- [7] LI B, DONG Y L. Studies on fire-induced vibration of full-scale continuous panels using Hilbert Transform [J]. Engineering Review, 2015, 35(1):1-8.
- [8] 刘才玮,苗吉军,高天予,等. 基于动力测试的简支梁火灾下振动分析与试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6):31-38.
- LIU Caiwei, MIAO Jijun, GAO Tianyu, et al. Vibration analysis and experimental study of simply-supported concrete beam under fire based on dynamic test [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6):31-38.(in Chinese)
- [9] 黄绪宏. 基于有限元模型修正的混凝土梁火灾下振动分析与试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
- [10] 相超. 基于静动力有限元模型修正的混凝土梁热力耦合下振动分析与试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
- [11] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB神经网络43个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013:8-66.



**第一作者简介:**刘才玮,男,1983年1月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为混凝土抗火与结构健康监测。曾发表《基于动力测试的钢筋混凝土梁火灾损伤识别方法》(《振动与冲击》2019年第38卷第11期)等论文。

E-mail:03150053@163.com

**通信作者简介:**杨大彬,男,1981年8月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为大跨空间结构及新型钢结构体系。

E-mail:yangdabin@126.com

## 欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn