

某涂布设备微振动控制基础结构的优化设计*

左汉文^{1,2}, 陈 骝¹, 杜 浦¹

(1. 中国电子工程设计院股份有限公司 北京, 100840)

(2. 广州大学土木工程学院 广州, 510006)

摘要 针对电子厂房内涂布设备结构楼板的微振动控制问题,提出了设备安置处楼板动刚度精细化控制方法。首先,对已建厂房内涂布设备所在基础楼板的振动速度响应及动刚度进行实测分析,确定设备满足其容许振动标准条件下的楼板需求动刚度;其次,建立楼板结构动力有限元模型,研究模型结构尺寸与动刚度计算值的差异;最后,通过计算获得满足涂布设备容许振动标准的楼板结构设计尺寸,并进行了工程验证。研究表明,涂布设备运行状态下1/3倍频程最大振动速度幅值对应的中心频率点为40 Hz或50 Hz,且在35.5~44.7 Hz频率范围对楼板需求动刚度要求最高。

关键词 电子厂房;涂布设备;楼板结构;振动速度;动刚度

中图分类号 O327;TB53;TB123

引言

如何控制电子厂房内的微污染和微振动,已成为现代科技发展的一项前沿科学。目前,已有学者对电子厂房不同防微振控制技术的控制性能等进行了研究。Gordon等^[1]提出基于振动速度谱的1/3倍频程的精密设备容许振动标准曲线,在微振动工程方面应用最广。高广运等^[2]对不同工况下某一生产厂房的微振动进行模拟分析和优化设计。赵宁^[3]对高科技厂房微振动混合控制算法进行了研究。俞渭雄等^[4]对工业厂房的防微振设计给出了关键问题的解决方案,并用于实际工程。黄建等^[5]对高科技电子厂房中人行振动控制进行了研究。

结构动力学模型的误差源^[6]主要包括模型结构简化误差、模型参数取值误差和模型阶次误差。模型修正方法^[7]主要有2类:矩阵型模型修正方法和参数型模型修正方法。矩阵型模型修正方法^[8]以结构的特征矩阵为修正对象,修改特征矩阵中的某些元素,使动力学模型的响应输出与实际测量结果一致。由于该方法对于大型结构可行性较差,且修改特征矩阵中的元素没有明确的物理意义,故应用和推广受到较大限制。参数型模型修正方法^[9]是对结构的设计参数进行修正,使修正后的模型与实际模型有较好的一致性。该方法有明确的物理意义,应用

较广。

笔者通过对某电子厂房内涂布设备楼板结构的动刚度特性进行现场实测及分析,建立了楼板结构的高精度动力有限元模型,并进行厂房楼板结构微振动性能的优化设计。

1 楼板振动与实测分析

某液晶显示电子厂房为桩基筏板基础,上部为4层混凝土框架结构。第2层和第4层为设备工艺层,第1层和第3层为配套动力设备层。图1为电子厂房剖面图。该厂房第1层的层高为7 m,主要工艺生产线的精密设备放置在第2层,2层楼板为混凝土框架梁结构,主梁间距为5 250 mm,楼板厚度为700 mm。

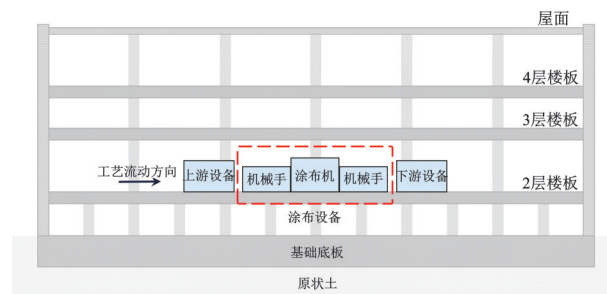


图1 电子厂房剖面图

Fig.1 Section of electronic plant

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0705701)

收稿日期:2022-03-04;修回日期:2022-10-11

笔者研究的涂布设备放在第 2 层混凝土框架梁位置,是自带振源的精密设备,由 2 组机械手与 1 组涂布机组成。该设备的工作流程为:由设备内部机械手提取上游液晶面板,将面板放在自身涂布机组制定位置进行液晶层涂刷,然后将涂刷完毕后的液晶面板转送至下游。内部振源设备为 2 组机械手,内部精密设备为涂布机。涂布机在运行过程中机械手仍会进行上述工艺运动,从而引发楼板振动对涂布机产生影响。该设备厂家提供的振动标准为 VC-C 容许振动标准,其标准定义为 1~80 Hz 范围内振动速度小于 12.5 μm/s。

本次针对涂布设备投影面积下 3 个代表测点进行测试分析。1#~3#测点分别布置于楼板柱顶、梁中及板中位置。每个测试分别采集铅三方向振动速度及铅垂向动刚度数据。通过力锤沿铅垂向对楼板进行激励,并通过振动传感器采集激励点处振动位移响应,并将传感器实测数据与楼板表面振动传感器实测数据进行传递函数分析,获得楼板铅垂向动刚度数据。

图 2 为各测点振动速度 1/3 倍频程频域曲线。表 1 为实测振动速度数据。综合图 2 与表 1 可知:涂布设备在运行状态下结构铅垂向振动速度响应明显大于水平向振动速度响应;2#测点在 40 Hz 频率下的振动速度为 1.74×10^{-2} mm/s,超过 VC-C 容许振动标准 39.2%;3#测点在 50 Hz 频率下的振动速度为 2.33×10^{-2} mm/s,超过 VC-C 容许振动标准 86.4%。

图 3 为各测点铅垂向动刚度响应曲线。表 2 为实测动刚度数据。综合图 3 与表 2 可知:1#测点楼板铅垂向动刚度最小值为 7.60×10^8 N/m,2#测点楼板铅垂向动刚度最小值为 3.16×10^8 N/m,3#测点楼板铅垂向动刚度最小值为 2.18×10^8 N/m。由于板中测点铅垂向动刚度最低,故仅对涂布设备覆盖位置板中处动刚度进行研究。

2 涂布设备楼板需求动刚度研究

2.1 需求动刚度公式推导

根据动力学公式

$$v_0 = \dot{X}_0 = 2\pi f_0 X_0 \tag{1}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \tag{2}$$

$$K_0 = F_0 / X_0 \tag{3}$$

其中: v_0 为实测响应点随频率变化的速度; X_0 为实测

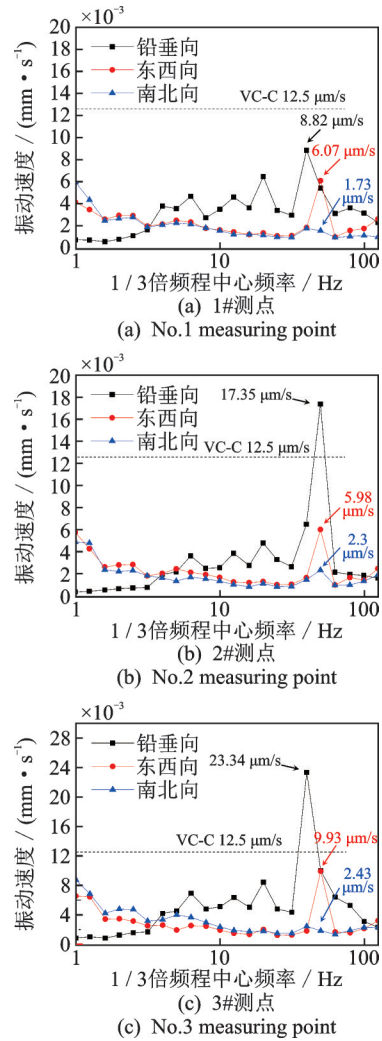


图 2 各测点振动速度 1/3 倍频程频域曲线

Fig.2 1/3 octave analysis diagram of each measuring point

表 1 实测振动速度数据

Tab.1 Statistics of measured vibration velocity data

测点	测试方向	最大振动速度/(mm·s ⁻¹)	f/Hz
1#	铅垂向	8.82×10^{-3}	40
1#	东西向	6.07×10^{-3}	50
1#	南北向	1.73×10^{-3}	40
2#	铅垂向	1.74×10^{-2}	50
2#	东西向	5.98×10^{-3}	50
2#	南北向	2.30×10^{-3}	50
3#	铅垂向	2.33×10^{-2}	40
3#	东西向	9.93×10^{-3}	50
3#	南北向	2.43×10^{-3}	40

响应点随频率变化的位移; F_0 为实测激力点随频率变化的载荷; ω_0 为圆频率; f_0 为固有频率; K_0 为实测响应点随频率变化的刚度。

求得源点速度导纳函数表达式为

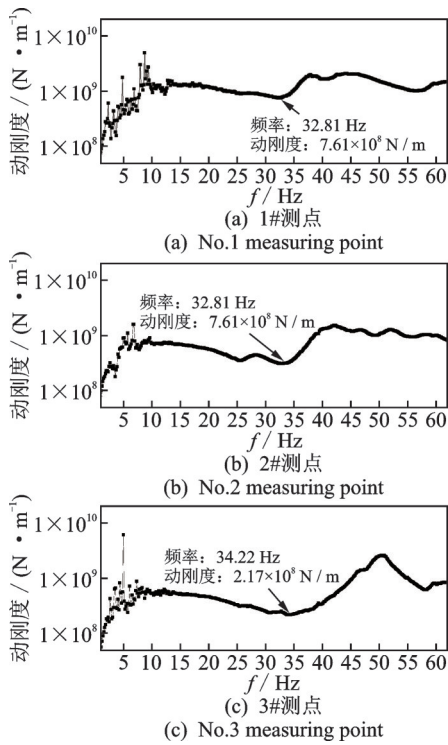


图3 各测点铅垂向动刚度响应曲线
Fig.3 Dynamic response curve of each measuring point

表2 实测动刚度数据

测点	f/Hz	最小动刚度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	相干性
1#	32.81	7.61×10^8	0.999 54
2#	32.81	3.13×10^8	0.999 71
3#	34.22	2.17×10^8	0.999 84

$$IPI_0 = \frac{v_0}{F} = \frac{\omega_0 x_0}{F} = \frac{2\pi f_0}{K_0} \quad (4)$$

其中: IPI_0 为实测响应源点速度导纳。

根据式(1)~(3)可求得实测响应点的动刚度 K_0 与激励 F_0 、速度响应 v_0 的关系。图4为需求动刚度系统模型。

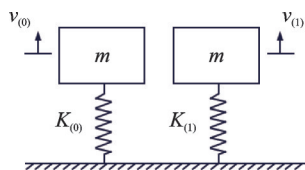


图4 需求动刚度系统模型

Fig.4 Schematic diagram of calculation principle of required dynamic stiffness

当同类振源设备放置在其他位置时,该点动刚度记为 K_i 、激励 F_i 、速度响应 v_i ,则

$$F_i = F_0 \quad (5)$$

$$\frac{K_i}{K_0} = \frac{F_0/x_0}{F_i/x_i} = \frac{v_0}{v_i} \quad (6)$$

$$K_i = (v_0 K_0) / v_i \quad (7)$$

根据式(7)可知,需求动刚度 K_i 与实测响应点动刚度 K_0 、实测响应点速度响应 v_0 及模拟点速度响应 v_i 有关。

2.2 实测振动速度与容许振动标准频域关系研究

实测振动速度与 VC-C 标准频域关系如图5所示。

根据式(7)计算涂布设备满足 VC-C 容许振动标准下的需求动刚度。 v_i 取 $12.5 \mu\text{m/s}$, v_0 为已建厂房涂布设备板中位置实测振动速度响应。 v_0/v_i 1/3倍频程振动速度比值及对应频率如表3所示。

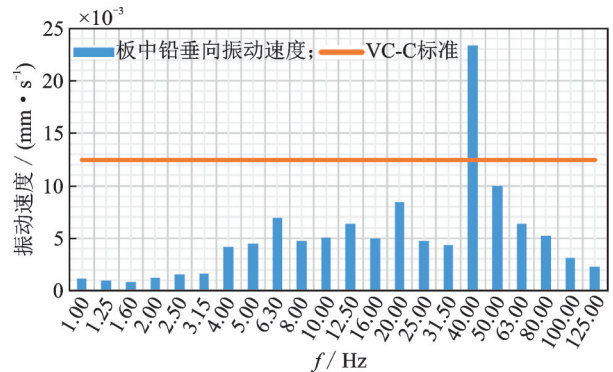


图5 实测振动速度与 VC-C 标准频域关系
Fig.5 Comparison between measured vibration velocity and VC-C standard frequency domain

表3 v_0/v_i 1/3倍频程振动速度比值及对应频率

f/Hz	速度比值	f/Hz	速度比值
1	0.092	12.5	0.51
1.25	0.079	16	0.40
1.6	0.067	20	0.67
2	0.099	25	0.38
2.5	0.12	31.5	0.35
3.15	0.13	40	1.87
4	0.33	50	0.80
5	0.36	63	0.51
6.3	0.55	80	0.42
8	0.38	100	0.25
10	0.41	125	0.18

通过表3可知,实测涂布设备楼板位置振动速度响应与 VC-C 容许振动响应比值在 40 Hz 处为

1.867 2,即该频率实测振动速度响应大于 $12.5 \mu\text{m/s}$,因此涂布设备在运行状态下振动速度响应超标,设备在该位置处无法正常使用。

2.3 涂布设备需求动刚度计算

由于实测响应点动刚度 K_0 在 40 Hz 位置处低于需求动刚度 K_1 ,故导致实测响应点振动速度在该频率点超过 VC-C 容许振动标准。

由于设备采用国际通用 VC 曲线作为容许振动标准,根据 1/3 倍频程分析曲线采用中心频率点代表带宽频率范围内振动速度响应。表 4 为 1/3 倍频程中心频率及上下线频率。

表 4 1/3 倍频程中心频率及上下线频率

Tab.4 Corresponding table of 1/3 octave center frequency and upper and lower line frequency

中心频率/Hz	上限频率/Hz	下限频率/Hz	中心频率/Hz	上限频率/Hz	下限频率/Hz
1.25	1.12	1.41	16	14.1	17.8
1.6	1.41	1.78	20	17.8	22.4
2	1.78	2.24	25	22.4	28.2
2.5	2.24	2.82	31.5	28.2	35.5
3.15	2.82	3.55	40	35.5	44.7
4	3.55	4.47	50	44.7	56.2
5	4.47	5.62	63	56.2	70.8
6.3	5.62	7.08	80	70.8	89.1
8	7.08	8.91	100	89.1	112
10	8.91	11.2	125	112	141
12.5	11.2	14.1	—	—	—

由于动刚度测试采样频率为 160 Hz,快速傅里叶变换分析点数为 1 024,动刚度测点频率间隔为 0.156 2 Hz,与振动速度 1/3 倍频程频率中心频率点存在一定的频率间隔,为方便对比,式(7)采用动刚度频率间隔进行计算。频域下实测动刚度与需求动刚度对比如图 6 所示。

可见,实测动刚度在 35.5~44.7 Hz 范围内平均值为 $1.31 \times 10^9 \text{ N/m}$,该频率范围内需求动刚度平均值为 $2.44 \times 10^9 \text{ N/m}$,实测位置楼板动刚度约为需求

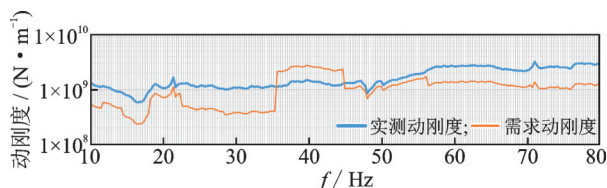


图 6 频域下实测动刚度与需求动刚度对比

Fig.6 Comparison of measured and required dynamic stiffness in frequency domain

动刚度的 0.54 倍。这说明实测楼板在该频率范围内由于动刚度不足,导致涂布设备运行状态下该楼板振动速度响应超过 VC-C 容许振动标准。

3 楼板结构对动刚度变化规律

3.1 数值仿真模型

选用 Ansys16.0 软件进行建模计算分析。根据建筑结构图搭建数值仿真分析模型,仿真模型中梁、柱采用 BEAM188 梁单元进行模拟,该单元适用于细长到中等短柱/厚梁结构。基于 Timoshenko 梁理论,该单元考虑了剪切变形效应,为双节点单元,适用于线性、大转角或大应变非线性等问题。

数值仿真模型采用的材料为钢筋混凝土,抗压强度等级为 C40。根据《混凝土结构设计规范》进行参数取值,弹性模量为 $3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,密度为 $2 500 \text{ kg/m}^3$ 。

计算分析时对各建筑柱子底部采用固定边界进行处理,对柱子底端节点进行全约束,重点分析模拟钢筋混凝土结构自身结构特性。笔者以单跨结构为研究对象,边界条件采用沿每个方向均外延出一跨的结构来模拟实际建筑与周边结构的连接问题,重点观察最中间一跨的结构响应情况。图 7 为数值仿真分析模型。搭建的有限元模型体量为 2.4 万个单元,2.5 万个节点。

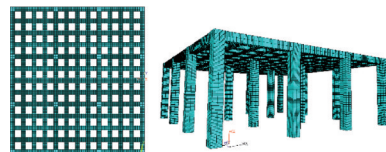


图 7 数值仿真分析模型

Fig.7 Numerical simulation analysis model

3.2 数值仿真精度校核

通过数值仿真方法对建筑结构进行模型搭建,采用动刚度实测冲击荷载进行荷载输入,图 8 为加载位置及监测点位置示意图。其中: V_1 为柱顶位置, V_2 为梁跨中位置, V_3 为板跨中位置。依次针对这 3 个位置进行力锤实测荷载输入,同时监测相应位置的振动速度响应。

将 V_1, V_2, V_3 监测点的传递函数与实测对比, V_1, V_2, V_3 测点传递特性验证情况如图 9~11 所示。可以看出,计算值与实测值吻合性较好,能够很好地表征出结构实际振动情况,数值仿真模型具有较强可信度。

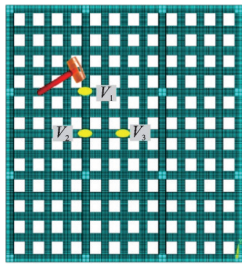


图 8 加载位置及监测点位置示意图

Fig.8 Location distribution diagram of tapping point / monitoring point

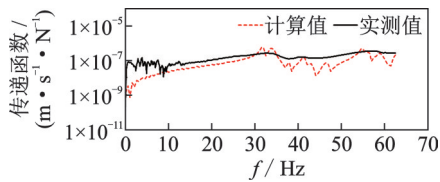


图 9 V₁测点传递特性验证情况

Fig.9 Verification of V₁ measurement point transmission characteristics

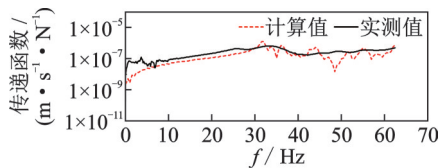


图 10 V₂测点传递特性验证情况

Fig.10 Verification of V₂ measurement point transmission characteristics

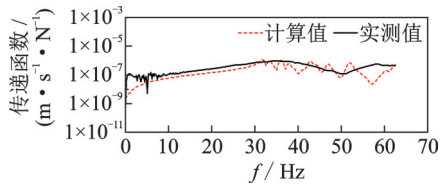


图 11 V₃测点传递特性验证情况

Fig.11 Verification of V₃ measurement point transmission characteristics

3.3 楼板厚度与动刚度的相关性

基于建筑结构基本情况,针对既有建筑结构楼板厚进行调整,进一步分析建筑楼板动刚度特性。板厚增加 25%,50% 和板厚降低 25%,50% 的动刚度响应分别如图 12~15 所示。

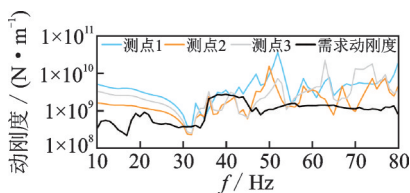


图 12 板厚增加 25% 动刚度响应

Fig.12 Dynamic stiffness response of 25% increase in plate thickness

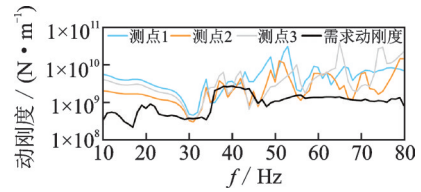


图 13 板厚增加 50% 动刚度响应

Fig.13 Dynamic stiffness response of 50% increase in plate thickness

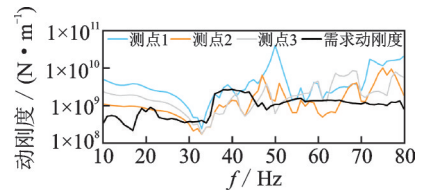


图 14 板厚降低 25% 动刚度响应

Fig.14 Dynamic stiffness response of 25% reduction in plate thickness

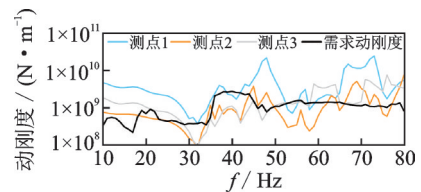


图 15 板厚降低 50% 动刚度响应

Fig.15 Dynamic stiffness response of 50% reduction in plate thickness

4 楼板结构参数优化设计

4.1 楼板结构设计方案

楼板结构设计方案为楼板厚度提升 50%,即板厚在原有 700 mm 厚度的基础上提升至 1 050 mm。图 16 为优化后设计方案示意图。

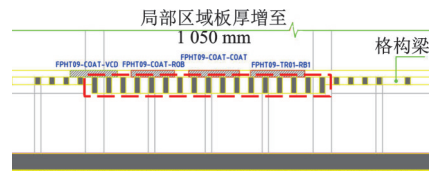


图 16 优化后设计方案示意图

Fig.16 Schematic diagram of optimized design scheme

4.2 微振动响应实例验证

根据涂布设备微振动控制基础楼板结构优化参数,将其应用于一新建电子厂房的设计中。该厂房为 2019 年投产运行的第 10.5 代线液晶显示器件电子厂房,结构形式和工艺布局与实测案例完全一致,涂布设备所在的二层楼板板厚为 1 050 mm。

在涂布设备投产运行后,对该设备楼板进行振动响应测试,在设备运行状态下实测了板中(对应 3#测点)3个方向的振动速度响应。图 17 为频域分析图。表 5 为楼板 1/3 倍频程振动速度幅值及对应中心频率。

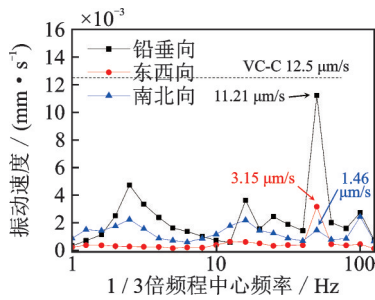


图 17 频域分析图

Fig.17 Frequency domain analysis

表 5 楼板 1/3 倍频程振动速度幅值及对应中心频率

Tab.5 1/3 octave vibration velocity amplitude and corresponding center frequency of floor slab

测点位置	测试方向	最大振动速度/(mm·s ⁻¹)	f/Hz
板中	铅垂向	1.12×10 ⁻²	50
梁中	东西向	3.15×10 ⁻³	50
柱顶	南北向	1.46×10 ⁻³	50

通过工程验证手段证明了该设计达到了设计目标,即涂布设备运行状态下各位置处振动速度响应均满足 VC-C 容许振动标准,优化后的结构设计参数是可行的。

5 结 论

1) 通过原结构设计楼板不同位置处振动速度响应实测分析得到,涂布设备运行状态下板中测点 1/3 倍频程分析 50 Hz 频率下振动速度为 2.33×10⁻² mm/s,超过 VC-C 容许振动标准 86.4%。

2) 板厚从减小 50% 到增加 50% 时楼板的自振频率随着板厚的增加逐渐增大,板中位置自振频率从 45.8 Hz 增至 50.8 Hz。

3) 基于对楼板结构进行数值仿真分析计算,给出了板厚增加至 1 050 mm 的结构设计方案。

4) 在新建的电子厂房中采用优化后的参数指导设计施工,并对建成后涂布设备进行振动响应复测,实测振动速度满足 VC-C 容许振动标准。

参 考 文 献

[1] GORDON C G. Generic criteria for vibration-sensitive

equipment[C]//Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology. San Jose: SPIE, 1992: 71-85.

[2] 高广运,张博,李宁,等.高科技电子工业厂房微振动测试分析[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集.武汉:中国岩石力学与工程学会,2010: 303-306.

[3] 赵宁.高科技厂房微振动混合控制的算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[4] 俞渭雄,陈骝,娄宇.IC工厂的防微振设计[J].洁净与空调技术,2006(4): 46-50.

YU Weixiong, CHEN Liu, LOU Yu. Micro-vibration-proof design for IC fab[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2006(4): 46-50. (in Chinese)

[5] 黄健,娄宇,王庆扬.高科技厂房楼盖体系的人行振动控制[J].建筑结构,2008,38(8): 98-101.

HUANG Jian, LOU Yu, WANG Qingyang. Control vibration due to human activity for floor systems of high-tech buildings[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 98-101. (in Chinese)

[6] 胡强,任立群,程耀东.高精度隔振设计中地基振动的测试和分析[J].噪声与振动控制,1996,16(3): 31-32.

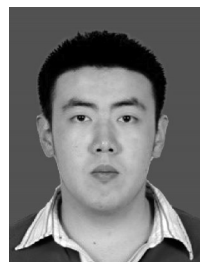
HU Qiang, REN Liqun, CHENG Yaodong. Measurement and analysis of foundation vibration in high-precision vibration isolation design[J]. Noise and Vibration Control, 1996, 16(3): 31-32. (in Chinese)

[7] MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Model updating in structural dynamics: a survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 167(2): 347-375.

[8] 汪晓虹,周传荣,徐庆华.结构分析模型的修正与振型扩充技术[J].东南大学学报(自然科学版),2000,30(2): 143-147.

WANG Xiaohong, ZHOU Chuanrong, XU Qinghua. Structural analytical model updating and mode shape expansion techniques[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2000, 30(2): 143-147. (in Chinese)

[9] LUCZAK M, MANZATO S, PEETERS B, et al. Updating finite element model of a wind turbine blade section using experimental modal analysis results [J]. Shock and Vibration, 2014, 2014: 684786.



第一作者简介:左汉文,男,1988年7月生,博士生、高级工程师。主要研究方向为电子厂房全过程微振动测试评估、防微振设计咨询。曾发表《曲线段地铁运行对某体育馆振动影响预测分析》(《地震工程与工程振动》2023年第43卷第6期)等论文。

E-mail: zuohanwen@ceedi.cn