

DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.02.0015

# 某城楼大跨度钢-混凝土叠合板组合楼盖振动舒适度研究\*

汪志昊<sup>1</sup>, 王进沛<sup>1</sup>, 徐珂<sup>2</sup>, 胡明祎<sup>3,4</sup>

(1 华北水利水电大学土木与交通学院, 郑州 450045;

2 北京清城华筑建筑设计研究院, 北京 100083; 3 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089;

4 国机集团科学技术研究院有限公司, 北京 100080)

**[摘要]** 以某城楼大跨度楼盖为工程背景,开展了钢-混凝土叠合板组合楼盖振动舒适度评估研究。首先通过现场动力特性测试获得的楼盖结构一阶竖向动力特性,校核了建立的整体结构精细化有限元模型,然后仿真分析得到了楼盖受单人行走、多人行走以及单人跳跃等多种激励的动力响应,最后开展了楼盖振动舒适度评价。结果表明:该新型楼盖结构竖向刚度整体较大,具有较好的振动舒适度;有限元建模可将混凝土叠合板等效为整体壳单元,根据刚度、质量等效原则增加板厚来模拟装饰面层,钢梁和混凝土板的连接可按刚接处理。研究结果可为类似楼盖振动舒适度评估与有限元精细化建模提供参考。

**[关键词]** 钢-混凝土叠合板组合楼盖; 振动舒适度; 精细化有限元模型; 现场实测; 动力特性

中图分类号: TU311.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2021)02-0092-05

**[引用本文]** 汪志昊,王进沛,徐珂,等. 某城楼大跨度钢-混凝土叠合板组合楼盖振动舒适度研究[J]. 建筑结构, 2021,51(2): 92-96. WANG Zhihao, WANG Jinpei, XU Ke, et al. Study on vibration serviceability of a large-span steel-concrete composite floor in a city gate [J]. Building Structure, 2021, 51(2): 92-96.

## Study on vibration serviceability of a large-span steel-concrete composite floor in a city gate

WANG Zhihao<sup>1</sup>, WANG Jinpei<sup>1</sup>, XU Ke<sup>2</sup>, HU Mingyi<sup>3,4</sup>

(1 School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power,

Zhengzhou 450045, China; 2 THCA Architectural Design & Consulting Institute, Beijing 100083, China;

3 China IPPR International Engineering Co. Ltd., Beijing 100089, China;

4 SINOMACH Academy of Science and Technology Co. Ltd., Beijing 100080, China)

**Abstract:** The vibration serviceability evaluation of a steel-concrete composite floor was carried out based on a large-span floor in a city gate. Firstly, the sophisticated finite element model of the whole structure was verified according to the first vertical dynamic mode of the floor structure, which was derived from a field measurement. Then, the dynamic response of the floor, which was motivated by single walking, multi-person walking and single jumping, was obtained by numerical analysis. Finally, vibration serviceability evaluation of the floor was carried out. The research conclusions are as follows. The new type floor structure has larger vertical whole stiffness and better vibration serviceability. The concrete composite slab can be equivalent to a whole slab element and the decorative surface can be simulated by increasing the thickness of the slab based on the equivalent principle of stiffness and mass for in the finite element simulation. Furthermore, the connection between the steel beam and the concrete slab can be seen as rigid joint in the finite element model. The results can be used as reference for vibration serviceability evaluation and sophisticated finite element modeling of the similar floor.

**Keywords:** steel-concrete composite beam and slab floor; vibration serviceability; sophisticated finite element model; field measurement; dynamic characteristics

## 0 引言

大跨度楼盖结构多采用轻质高强的建筑材料,结构质量、阻尼与竖向基频均相对较低,易诱发人致振动舒适度问题<sup>[1]</sup>。各国学者采用理论分析、数值仿真、模型试验及现场实测等手段系统研究了人行天桥<sup>[2-3]</sup>与商场<sup>[4-6]</sup>、大型体育馆<sup>[7]</sup>、车站候车

厅<sup>[8-9]</sup>等大跨度结构楼盖的振动舒适度。

\* 国家自然科学基金面上项目(51878274),国机集团重大科技专项(SINOMAST-ZDZX-2017-05)。

作者简介:汪志昊,博士,教授,博士生导师,Email:wangzhihao@ncwu.edu.cn;通信作者:胡明祎,博士,高级工程师,硕士生导师,Email:hmyi2000@126.com。

大跨度楼盖结构体系常采用的形式有: 钢-混凝土组合楼板、叠合板组合梁板、预应力钢-混凝土组合梁和钢板夹心组合梁板等<sup>[1]</sup>。管宇等<sup>[10]</sup>采用参数分析研究了冷弯薄壁型钢-石膏基自流平砂浆组合楼盖基频的影响因素; 张志强等<sup>[11]</sup>综合现场振动测试和有限元分析研究了大跨度钢桁架-压型钢板混凝土组合楼盖的结构、非结构参数对振动舒适度的影响; 屈文俊等<sup>[12]</sup>通过数值分析研究了楼板厚度对压型钢板-混凝土组合楼盖振动舒适度的影响; 汪志昊等<sup>[13]</sup>等结合动力特性实测结果, 提出了面向振动舒适度评估的大跨度钢网架-玻璃组合楼板精有限元模型建立方法。

应用于某遗址保护城楼工程的大跨度钢-混凝土叠合板组合楼盖, 采用混凝土叠合板( 预制与现浇相结合) 和钢梁相拼接, 是一种较新的楼盖结构体系。本文以该楼盖为研究对象, 以现场动力特性测试结果校核了所提出的结构有限元建模方法, 并开展了振动舒适度评估。

### 1 结构概况

某遗址保护建筑城楼横跨 20m、纵长 31.3m, 主要由钢-混凝土组合楼盖和钢柱组成, 见图 1。每组钢柱由立柱和斜柱组合而成, 且相邻柱间有 3 榀桁架支撑结构, 立柱底部固定于基础, 顶部则与楼盖铰接。

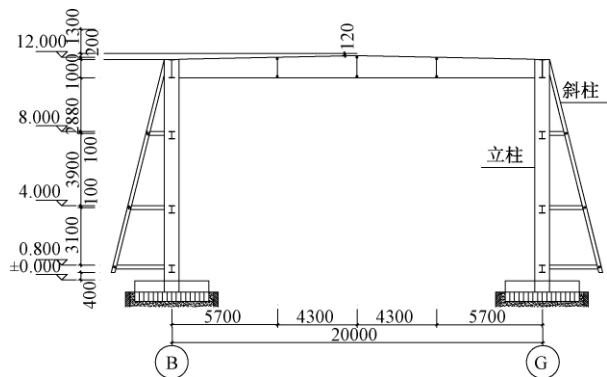


图 1 结构剖面图

钢-混凝土叠合板组合楼盖平面结构见图 2, 楼盖由混凝土叠合板和支撑结构组合而成。混凝土叠合板细部构造见图 3, 其由 60mm 厚预制混凝土板及 60mm 厚现浇混凝土板叠合组成, 两种混凝土板通过钢筋可靠连接。楼板上方铺设多种装饰面层, 自下而上分别为 70mm 厚的 LC7.5 轻骨料混凝土垫层、10mm 厚的低标号水泥砂浆隔离层、20mm 厚的干硬性水泥砂浆结合层以及 25mm 厚火烧面青石板砖。楼盖支撑结构细部构造见图 4, 其主要由工字钢横梁与纵梁组成。横梁的翼缘板厚度有两

种, 分别为 18mm 和 22mm; 翼缘板长 280mm, 腹板厚 12mm; 横梁截面为变截面, 跨中与端部梁高分别为 1 200mm 和 1 000mm。纵梁有两种结构形式, 楼盖两端为工字梁, 其余为钢架梁, 其中工字梁截面尺寸为 1 000×20×12×12, 钢架梁型号为 F40×4。

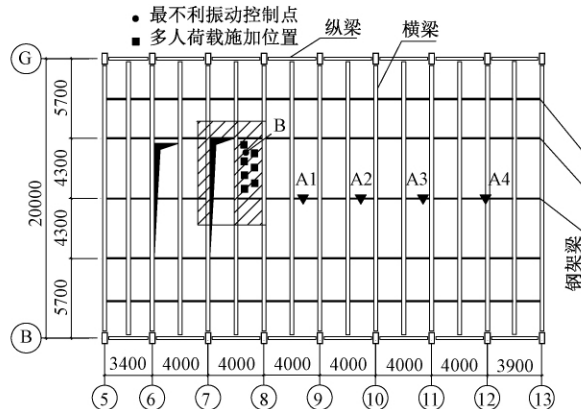


图 2 楼盖平面布置图

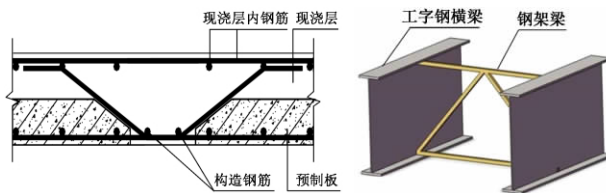


图 3 楼盖叠合板剖面图 图 4 楼盖支撑结构示意图

### 2 楼盖动力特性测试

楼盖现场振动测点布置方式为: 4 个测点( 图 2 中 A1, A2, A3 与 A4) 沿着楼盖的中轴线, 分别布置在从楼梯口到城楼边缘的 5 分点处。振动数据采集和分析处理采用 COINV 型数据采集系统, 测振传感器采用 DH610V 型电磁式速度传感器。图 5 ( a ), ( b) 分别给出了环境振动激励下测点 A2 的竖向振动位移时程曲线与相应的幅值谱。采用半功率带宽法估算, 楼盖一阶竖向模态阻尼比为 2.16%。

### 3 楼盖竖向基频简化计算

参见文献 [10], 可将钢-混凝土叠合板组合楼盖简化为具有均匀质量和刚度的简支 T 形截面组合梁模型, 以进行楼盖竖向自振频率估算。根据钢材与混凝土弹性模量的比例关系将横梁之间楼板的长度进行折减作为计算模型中楼盖的有效宽度, 楼板厚度则直接取为叠合板的厚度。简化计算时通常忽略装饰面层的刚度, 仅考虑质量, 计入楼盖上部的有效均布荷载。

简支 T 形截面组合梁一阶竖向自振频率  $f$  计算公式<sup>[10]</sup> 如下:

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{gE_s I_0}{q l^4}} \quad (1)$$

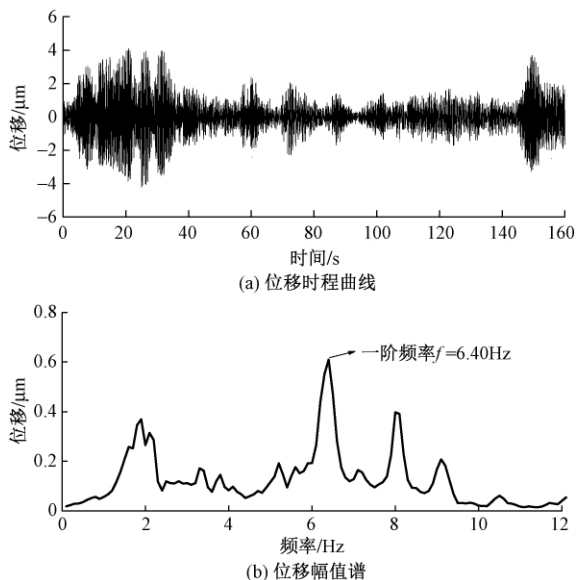


图5 测点 A2 竖向振动位移时程曲线和幅值谱

式中:  $l$  为等效简支梁跨度;  $E_s$  为钢材的弹性模量;  $I_0$  为 T 形截面组合梁的换算截面惯性矩;  $q$  为单位长度的重量, 包括梁自重、叠合板自重、装饰面层重量;  $g$  为重力加速度。

由式(1)可知, 组合楼盖基频主要受截面抗弯刚度、楼盖质量和跨度控制。将式(2)梁的跨中挠度计算式带入式(1), 即可得到一阶竖向自振频率  $f$  简化计算公式<sup>[14]</sup>, 如式(3)所示:

$$\Delta = \frac{5ql^4}{384E_s I_0} \quad (2)$$

$$f = \frac{17.8}{\sqrt{\Delta}} \quad (3)$$

式中  $\Delta$  为梁跨中挠度, mm。

T 形截面组合梁(图6)中工字梁的截面尺寸为  $1\,000 \times 280 \times 12 \times 22$ , 楼板的换算宽度为  $418\text{mm}$ , 厚度为  $120\text{mm}$ 。相应的计算参数取值如下: 跨度为  $20\text{m}$ , 钢梁重量为  $2\,115.7\text{N/m}$ , 楼板重量为  $1\,399.68\text{N/m}$ , 装饰面层重量为  $1\,481.3\text{N/m}$ , 组合截面惯性矩为  $9.336 \times 10^9 \text{mm}^4$ , 工字钢对组合截面形

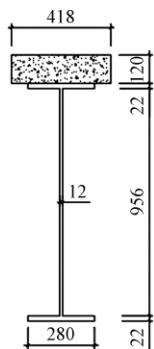


图6 T形截面组合梁模型



图7 结构整体有限元模型

心轴的惯性矩为  $6.387 \times 10^9 \text{mm}^4$ 。由 T 形截面组合梁惯性矩计算结果可知, 工字钢的抗弯刚度占组合梁抗弯刚度的  $68.4\%$ , 表明该组合楼盖的竖向刚度主要由工字钢梁提供。

将 T 形截面组合梁模型相关参数带入式(2), (3), 计算得到楼盖一阶竖向自振频率为  $7.73\text{Hz}$ 。与楼盖一阶竖向自振频率实测结果相比, 简化计算结果偏大  $20.7\%$ , 误差较大的主要原因在于简化模型未考虑纵梁和钢柱的竖向变形对楼盖整体竖向刚度的折减效应。虽然简化计算公式存在一定误差, 但其可用于结构初步设计阶段楼盖一阶竖向自振频率  $f$  估算。

#### 4 楼盖竖向振动舒适度有限元分析

##### 4.1 模型建立

采用有限元分析软件 ANSYS 建立结构整体有限元模型, 分别选用 Beam188, Shell63 单元模拟梁柱和楼板, 两种混凝土板通过钢筋可靠连接, 可视为整体, 用 Shell63 单元来模拟; 分别采用箱形、圆形等不同截面形式的 Beam188 单元模拟立柱、斜柱之间的桁架结构; 采用质量单元(Mass21)模拟悬挂于主体结构的楼梯附加质量。用刚接模拟梁、板之间的抗剪栓钉的作用; 释放梁、柱连接节点绕纵轴转动的转动自由度; 选用铰接模拟立柱与斜柱之间的各榀桁架结构的螺栓连接; 对立柱底部的节点施加全部自由度约束。此外, 考虑到动力影响, 混凝土弹性模量放大  $1.2$  倍<sup>[6]</sup>。

准确地模拟楼盖装饰面层需采用精细化的壳单元, 建模过程相对繁琐且效率较低。研究表明<sup>[9]</sup>, 由于混凝土板与装饰面层的物理参数较为接近, 可根据刚度、质量等效的原则通过增加板厚的方法等效模拟装饰面层对楼盖结构刚度贡献。楼盖装饰面层材料物理特性见表1, 根据刚度等效原则将装饰面层等效成结构楼板, 等效厚度通过密度比例关系进行换算, 等效厚度见表2。

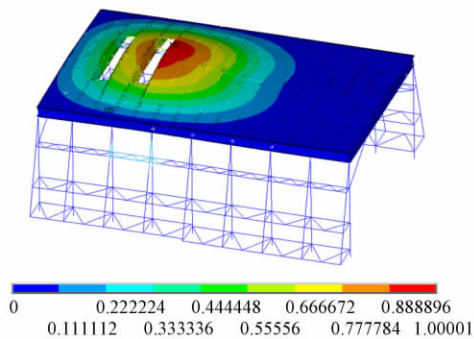


图8 结构一阶竖向振型

楼盖材料参数 表 1

名称	厚度/mm	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/(×10 <sup>4</sup> MPa)
地砖	25	2 500	2.787
水泥砂浆	30	2 000	—
混凝土垫层	70	2 500	2.787
C30 混凝土预制板	60	2 500	2.979
C30 混凝土现浇板	60	2 500	2.979

楼盖材料等效结果 表 2

名称	原厚度/mm	等效厚度/mm
地砖	25	25
水泥砂浆	30	24
混凝土垫层	70	70

### 4.2 模态分析

最终建立的结构整体有限元模型见图 7, 计算分析得到该楼盖一阶竖向自振频率为 6.33Hz, 与实测值 6.40Hz 之间的相对误差仅 1.10%, 表明本文建立的结构有限元模型精度较高。由图 8 给出的楼盖结构一阶竖向振型可知, 楼梯口附近楼盖的振动位移较大, 为楼盖最不利振动位置。

### 4.3 时程分析

考虑到结构使用功能主要是供游客参观, 预计作用在楼盖的动荷载形式主要有行人的走动, 偶尔可能会有个别游客跳跃。因此, 楼盖振动舒适度有限元时程分析的人致荷载输入考虑单人步行、多人步行以及单人跳跃 3 种工况。

根据《建筑振动荷载标准》(GB/T 51228—2017)<sup>[14]</sup>, 单人行走的竖向振动荷载  $F(t)$  计算式如下:

$$F(t) = \sum_{i=1}^k a_i Q \sin(2\pi i f t - \varphi_i) \quad (4)$$

式中:  $Q$  为人的重量, 取为 0.6kN;  $k$  为所考虑的荷载阶数;  $f$  为振动荷载频率;  $a_i$  为第  $i$  阶荷载频率的动力因子;  $t$  为时间;  $\varphi_i$  为第  $i$  阶荷载频率的相位角; 荷载频率阶数只计及前 3 阶, 振动荷载频率取为 2.11Hz。

前 3 阶荷载频率的动力因子和相位角取值如

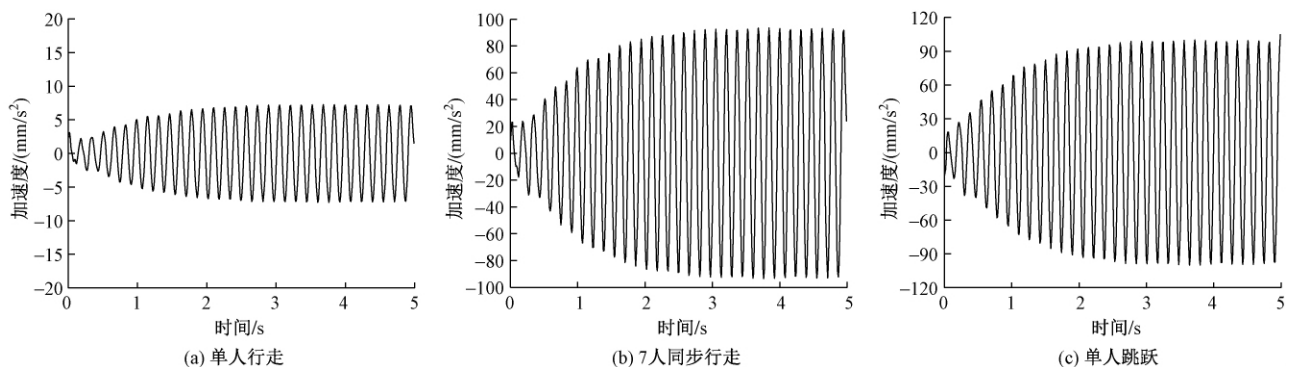


图 9 各工况楼盖最不利振动点加速度时程曲线

下:  $a_1=0.41$ ,  $a_2=0.10$ ,  $a_3=0.06$ ;  $\varphi_1=0$ ,  $\varphi_2 = \pi/2$ ,  $\varphi_3 = \pi/2$ 。

根据《建筑振动荷载标准》(GB/T 51228—2017)<sup>[14]</sup> 规定, 单人跳跃参照人群有节奏运动竖向振动荷载的计算式:

$$F(t) = \sum_{i=1}^k a_i Q \sin(2\pi i f t - \varphi_i) \cdot N \cdot C(n) \quad (5)$$

式中:  $N$  为人数;  $C(n)$  为人群有节奏运动的协调系数。

参见文献[15], 综合楼盖一阶竖向自振频率计算值, 本文跳跃荷载的第 1 阶谐波频率取为 3.16Hz。Ji 等<sup>[16]</sup> 提出跳跃荷载模型傅里叶级数所需谐波阶数  $N$  应依据各阶谐波对结构振动响应贡献的大小取值, 计算式为:

$$N = \text{int}(\omega_1/\omega_p) \quad (6)$$

式中:  $\omega_1$  为结构的一阶自振圆频率;  $\omega_p$  为跳跃荷载的跳跃圆频率。

对于本结构, 可以取前 2 阶谐波来模拟单人跳跃荷载, 相应参数取值如下:  $N=1$ ;  $C(n)=1$ ;  $a_1=1.63$ ,  $a_2=0.84$ ;  $\varphi_1=0$ ,  $\varphi_2=0$ 。

参考楼盖的实际可能行人流量, 取楼盖上的人群密度为 0.8 人/m<sup>2</sup>, 此时对应人群密度较大, 人员行走不便的情况<sup>[17]</sup>。低密度人群(行人密度小于 1 人/m<sup>2</sup>) 自由行走时的等效人数计算公式<sup>[18]</sup> 为:

$$N_p = 10.8 \sqrt{n\zeta} \quad (7)$$

式中:  $N_p$  为等效人数;  $n$  为行人总人数;  $\zeta$  为结构阻尼比, 取实测值 2.16%。

选取楼盖最不利振动区域位置周围 25m<sup>2</sup> 的区域(图 2 所示阴影) 作为人群分布区域。按照 0.8 人/m<sup>2</sup> 人群密度计算得到人群分布区域的行人总人数约为 20 人, 根据式(7) 计算出等效人数为 7。7 人同步行走的荷载函数按式(5) 计算, 振动频率取 2.11Hz, 其他参数取值如下:  $N=7$ ;  $C(n)=1$ ;  $a_1=0.50$ ,  $a_2=0.25$ ,  $a_3=0.15$ ;  $\varphi_1=0$ ,  $\varphi_2 = \pi/2$ ,  $\varphi_3 = \pi/2$ 。将 7 人同步行走的荷载均匀布置在楼盖人群

分布区域的位置,见图2。由图9给出的楼盖最不利振动点动力响应计算结果可知:楼盖在单人行走、跳跃和7人同步行走激励下的峰值加速度分别为0.007,0.099,0.094m/s<sup>2</sup>;单人跳跃荷载引起的楼盖加速度响应明显大于单人行走引起的楼盖加速度响应,且与7人同步行走引起的楼盖加速度响应峰值较为接近。

### 5 楼盖振动舒适度评价

目前楼盖结构振动舒适度评价指标主要有结构自振频率和振动峰值加速度。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[19]</sup>规定大跨度公共建筑混凝土楼盖的竖向自振频率不宜低于3Hz。《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273:2010)<sup>[20]</sup>规定组合楼盖在正常使用时自振频率不宜小于3Hz,也不宜大于8Hz。本文楼盖一阶竖向自振频率实测值6.40Hz、有限元计算值6.33Hz,均满足振动频率指标要求。但是仅仅依据楼盖基频单一指标评价振动舒适度往往并不科学、全面,还有必要进一步考虑竖向振动加速度限值指标。

根据本文楼盖的使用功能,可以参照商场标准对该楼盖舒适度进行评价。《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273:2010)<sup>[20]</sup>对楼盖在正常使用下的舒适度限值做出了规定,即楼盖的竖向振动峰值加速度应不超过0.15m/s<sup>2</sup>。根据有限元计算结果,单人行走、多人同步行走与单人跳跃工况的振动峰值加速度分别为0.007,0.094,0.099m/s<sup>2</sup>,均小于0.15m/s<sup>2</sup>,满足规范规定的振动加速度峰值要求。综合振动频率与振动加速度的舒适度评价,可知该楼盖满足振动舒适度要求。

### 6 结论

(1)由工字钢梁、钢架梁和混凝土叠合板组成的钢-混凝土叠合板组合楼盖的整体竖向刚度主要由工字钢纵梁提供,且楼盖整体竖向刚度较大,结构振动舒适度评价较好。

(2)获得了大跨度钢-混凝土叠合板组合楼盖的动力有限元建模近似模拟方法:通过钢筋有效连接的现浇板和预制板的混凝土叠合板可视为整体;叠合板和钢梁之间连接方式按刚接处理;楼盖装饰面层依据刚度、质量等效原则通过增加板厚模拟。

### 参 考 文 献

[1] 娄宇,黄健,吕佐超. 楼板体系振动舒适度研究[M]. 北京: 科学出版社,2012: 3-4.  
[2] NIMMEN K V, LOMBAERT G, ROECK G D, et al. Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the

current codes [J]. Engineering Structures, 2014, 59 (2): 448-461.  
[3] 华旭刚,温青,陈政清,等. 大跨度双层曲线斜拉桥人致振动减振优化与实测验证[J]. 振动工程学报, 2016,29(5): 822-830.  
[4] WENDELL D, VARELA R, BATTISTA C. Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks [J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2485-2494.  
[5] 吕佐超,娄宇. 天津环渤海大饭店楼板结构振动舒适度设计[J]. 建筑结构,2012,42(9): 66-69.  
[6] 舒兴平,廖荣庭,卢倍嵘. 远大小天城楼盖人致振动舒适度实测及研究[J]. 工业建筑,2015,45(10): 36-41.  
[7] 谢伟平,洪文林,李霆. 某体育馆楼板振动舒适度研究[J]. 噪声与振动控制,2010,30(2): 80-83.  
[8] 操礼林,李爱群,陈鑫,等. 人群荷载下大型火车站房大跨楼盖振动舒适度控制研究[J]. 土木工程学报, 2010,43(S1): 334-340.  
[9] 何卫,谢伟平. 基于舒适度评价的大跨度车站结构精细化模型研究[J]. 土木工程学报,2014,47(1): 13-23.  
[10] 管宇,石宇,高立. 冷弯薄壁型钢-石膏自流平砂浆组合楼盖基频研究[J]. 振动与冲击,2018,37(20): 207-215.  
[11] 张志强,马斐,李爱群,等. 大跨度钢桁架-压型钢板混凝土组合楼盖实测及舒适度参数分析[J]. 建筑结构学报,2016,37(6): 19-27.  
[12] 屈文俊,莫立标,郭朋. 基于舒适度的压型钢板-混凝土楼盖板厚取值研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2016,33(6): 30-36.  
[13] 汪志昊,皇幼坤,李晓克,等. 大跨度钢网架-玻璃组合楼板动力特性研究[J]. 振动与冲击,2018,37(13): 195-202.  
[14] 建筑振动荷载标准: GB/T 51228—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2017.  
[15] 陈隽. 人致荷载与人致结构振动[M]. 北京: 科学出版社,2016: 96-105.  
[16] JI T, ELLIS B R. Floor vibration induced by dance-type loads: theory [J]. Structural Engineer, 1994, 72(3): 37-44.  
[17] 谢伟平,马朝霞,何卫. 大跨度楼盖结构自振频率与人致振动舒适度关系研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012,34(4): 96-101.  
[18] 李庆武,胡凯,倪建公,等. 某大跨度悬挑楼盖结构人行舒适度分析与振动控制[J]. 建筑结构,2018,48(17): 34-37.  
[19] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.  
[20] 组合楼板设计与施工规范: CECS 273:2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.