

综合交通枢纽车站结构的人致振动特性研究*

崔聪聪 雷晓燕 张 凌

(华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对“站桥合一”的大型综合交通枢纽工程,通过建立有限元模型对其进行模态分析,研究在人致振动作用下候车厅楼板以及大跨度悬挑商业夹层结构的振动响应。以南昌西站、南京南站的站房结构为例,分别在有限元模型竖向阵型最大点施加人行荷载,在南昌西站不同区域的 25 m 跨中、18 m 跨中、悬挑商业夹层处,在南京南站跨中楼板的不同区域(正线区域、正常区域),研究同频率不同相位作用下和同频率同相位作用下人行荷载作用的振动响应。研究结果表明,人致振动同步调作用响应较大不可忽略,大跨度商业夹层处的振动响应比楼板响应大。

关键词 综合交通枢纽;车站结构;人致振动;模态分析;动力响应

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.011

On Human Induced Vibration Characteristics of Station Structure at Integrated Transport Hub

CUI Congcong, LEI Xiaoyan, ZHANG Ling

Abstract A finite element model is established for a modal analysis of the large-scale integrated transport hub project which is a station-bridge unity, in order to study the vibration response of the waiting floor and the large span cantilever structure under the action of human induced vibration. Firstly, taking the station structure of Nanchang West Railway Station and Nanjing South Station as the examples, the maximum load of the vertical formation model is applied in the finite element model respectively. In different areas of Nanchang West Railway Station, including the 25m span, 18m span and the cantilever commercial interlayer, and in different areas of Nanjing South Station, the vibration response to the people loading in different phases of the same frequency, and that in the same phases of the same frequency are studied. The results show that the response of the human induced vibration can not be neglected, the vibration response at the larger span, like the commercial interlayer is also larger.

Key words integrated transport hub; station structure; human induced vibration; modal analysis; dynamic response

Author's address State Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

随着高速铁路的迅猛发展,国内外相继建成一些具有标志性的集铁路、地铁、公交、航空等多种交通方式为一体的“站桥合一”的大型综合交通枢纽工程。

近年来,国内外学者在人致振动的研究上做了大量工作,也取得了一定成绩。文献[1]对大跨度屋顶结构的振动及控制方法进行了相关研究;文献[6]考虑梁板结构和人体耦合的作用,研究了相关方法对结构的动力特性的响应。

以往的人致振动响应主要研究大跨度建筑物和人行天桥。综合交通枢纽是一种新的建筑形式,关于这方面的人致振动响应研究较少。综合交通枢纽的楼板跨度大、结构自身阻尼小,而且在综合交通枢纽中容易出现人员密集的情况,在人群荷载激励下容易出现共振,因此有必要对综合交通枢纽的大跨度楼板的振动特性进行分析。本文主要研究不同跨度、不同形式楼板的人致振动响应。

1 人致振动分析

为模拟人行荷载激励,本文采用的人行荷载曲线为国际桥梁及结构工程协会(IABSE)提供的步行时程曲线,式(1)为其表达式。

$$F(t) = G \left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(2\pi f_s t + \Phi_i)) \right] \quad (1)$$

为了提高计算精度,可以考虑人行荷载的前 3 阶荷载频率,从而得到更精确的结果,见式(2)。

$$F(t) = G \sum_{i=1}^3 (a_i \cos(2\pi f_s t + \Phi_i)) \quad (2)$$

* 国家自然科学基金项目(51478184)

式中：

F ——行人激励；

t ——时间；

G ——人的体重，按 70 kg/人考虑；

f_s ——步行频率；

a_i ——竖向力的第 i 阶动载因子， $a_1 = 0.4 + 0.25(f_s - 2)$ ， $a_2 = a_3 = 0.1$ ；

ϕ_i ——初始相拉角， $\phi_1 = 1$ ， $\phi_2 = \phi_3 = \pi/2$ 。

本文以 IABSE 的单人步行荷载模型为基础，采用人群荷载激励模拟。考虑到同频率不同相位的影响，采用频率服从均值为 2 Hz、方差为 0.173 的正态分布，人群行走相位差服从 $[-\pi, \pi]$ 的均匀分布。

2 综合交通枢纽车站计算模型

南昌西站、南京南站站房结构为“建桥分离”的结构体系。由下到上依次为地下层、轨道层、高架层、高架夹层。南昌西站站房主体最高点距离地面 41.7 m，建筑外墙南北进深 385.5 m，东西宽 133 m；南昌西站的楼板采用双向预应力钢筋混凝土框架结构，候车厅层标高约 8.5 m。南京南站建筑外墙南北进深 450 m，东西宽 156 m；南京南站楼板采用了钢桁架-混凝土组合楼板结构，候车厅层位于整个站房结构地上二层，标高约 11 m。

在综合交通枢纽站房有限元模型中，钢轨用空间梁单元 BEAM188 模拟，钢轨扣件和轨道板支座采用弹簧阻尼单元 COMBIN14 模拟，轨道梁采用实体单元 SOLID45 模拟，上部结构中的梁、柱和杆件采用 BEAM181 单元进行模拟，各层楼板采用 SHELL163 单元模拟。

3 综合交通枢纽车站结构的动力特性分析

3.1 模态分析

建立综合交通枢纽车站有限元模型，进行模态分析。南昌西站和南京南站的部分自振频率及振型见表 1。

表 1 南昌西站和南京南站的部分自振频率及振型			
位置	主模态	振动频率/Hz	振型
南昌西站候车厅楼板	1	3.001 85	楼板的纵向平动
	2	3.802 73	楼板局部竖向弯曲
	3	4.400 77	楼板竖向弯曲
南京南站候车厅楼板	1	2.991 80	楼板的纵向平动
	2	3.202 70	楼板局部竖向弯曲
	3	3.300 70	楼板竖向弯曲

由表 1 可以看出，当结构的自振频率在 3 ~ 5 Hz 时，楼板出现竖向振动。而人行荷载的频率一般处在 1.7 ~ 3.5 Hz 之间，结构的自振频率与人行荷载的主要频率较为接近，因此应该考虑人致振动舒适度问题。

3.2 确定性人行荷载下结构振动响应分析

3.2.1 综合交通枢纽车站楼板区域划分

将南昌西站划分为 3 个区域，本文研究区域介绍如下：南昌西站楼板区域通过伸缩缝分隔划分：A、B、C 这 3 个区域位于楼板 25 m 跨中，D 区域位于楼板 18 m 跨中，F 区域位于大跨度商业夹层。南京南站楼板区域通过正线分隔划分为区域 A 和区域 B。

在以下分析中，南昌西站区域 A(跨度为 32 m × 25 m)为楼板区域一，区域 D(跨度为 25 m × 18 m)为楼板区域二，区域 C(跨度为 25 m × 15 m)为楼板区域三，区域 B(跨度为 25 m × 25 m)为楼板区域四，大跨度商业夹层区域 F 为楼板区域五。如图 1 ~ 2 所示。

在南京南站的荷载工况中，区域 A(板跨中 27 m 跨度一般区域)为楼板区域一，区域 B(板跨中 27 m 跨度正线区域)为楼板区域二。如图 3 所示。

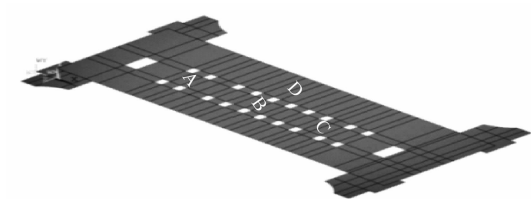


图 1 南昌西站楼板区域划分



图 2 南昌西站大跨度商业夹层区域

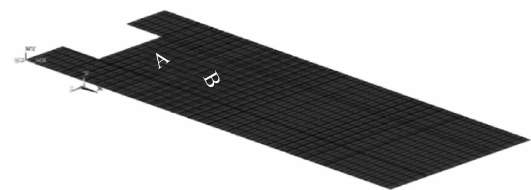


图 3 南京南站楼板区域划分

3.2.2 人行荷载工况

本文所谓的同频率不同相位是指选取的位置

区域人群荷载中各人的步频、动载因子等均相同,各排人的相位不一样,该方法可以考虑一定概率的荷载同步调。

工况 A:荷载时程曲线按原地踏步施加在节点上,该节点为竖向振型位移最大的点,在模态分析时可以得到节点位置。通过比较不利振动点的位移,分别对大跨度悬挑结构、候车厅楼板竖向位移最大的点施加单人荷载时程曲线。

工况 B:行人慢走(走动频率 1.7 Hz)、普速(走动频率 2 Hz)、慢跑(走动频率 2.5 Hz)、快跑(走动频率 3 Hz),所有人具有相同频率不同相位,按 1 人/m² 作用楼板 10 m×10 m 位置区域。

工况 C:在不同的人行荷载频率下,所有人具有相同频率同相位,按 1 人/m² 作用楼板 10 m×10 m 位置区域。

工况 D:在不同的人行荷载频率下,所有人具有相同频率不同相位,按 2 人/m² 作用楼板 10 m×10 m 位置区域。

工况 E:在不同的人行荷载频率下,所有人具有相同频率同相位,按 2 人/m² 作用楼板 10 m×10 m 位置区域。

3.2.2.1 工况 A

工况 A 情况下的典型荷载曲线如图 4 所示。

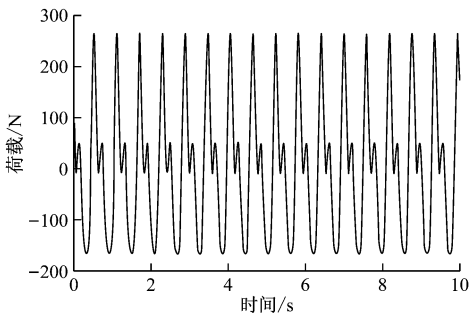


图 4 工况 A 情况下的典型荷载曲线(步频 1.7 Hz)

将不同步行频率下的典型荷载曲线加载到南昌西站楼板与大跨度商业夹层,得到的峰值加速度见表 2。

表 2 工况 A 情况下不同区域的加速度峰值(南昌西站)			
步行频率/Hz	活动类型	不同区域加速度峰值/(m/s ²)	
		候车厅楼板	大跨度悬挑结构
1.7	慢走	0.001 8	0.002 6
2.0	普速	0.002 2	0.036 4
2.3	快走	0.002 9	0.038 1
2.5	慢跑	0.047 5	0.026 4
3.0	快跑	0.001 4	0.025 0

将不同步行频率下的典型荷载曲线加载到南京南站楼板,得到的峰值加速度见表 3。

表 3 工况 A 情况下不同区域的加速度峰值(南京南站)		
区域	步行频率/Hz	区域中心加速度峰值(m/s ²)
模态分析响应最大位置	1.7	0.029 4
	2.0	0.030 8
	2.3	0.032 8
	2.5	0.033 3
	3.0	0.026 4

从以上分析的数据可知,南昌西站、南京南站两种结构的楼板在人致振动作用下的响应规律较为一致;随着步行频率的增加,激励点的峰值加速度先是呈现增加的趋势,当达到一定的值时又出现下降趋势。

3.2.2.2 工况 B

工况 B 加载到有限元模型不同区域上的典型时域曲线如图 5 所示。

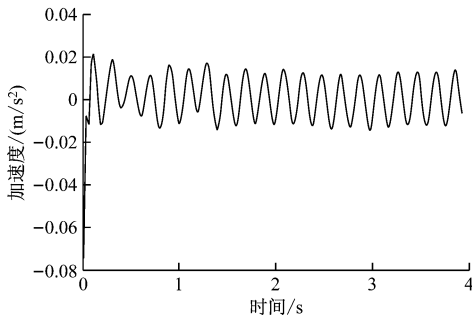


图 5 工况 B 情况下的典型时域曲线

由图 5 可以看到,在加载的初始阶段,突加荷载效应导致的响应比较大。对于实际情况来说,并不存在计算中的荷载突加阶段,因为人群行走荷载是一直存在的,故在下文所有的工况中,均采用加速度时程进入稳定状态以后的稳定响应来计算和评价楼板的振动舒适度,这样得到的评价结果也更加接近实际情况。图 5 考虑加速度以 0.019 m/s² 为平衡位置。

3.2.2.3 工况 C

工况 C 加载到有限元模型不同区域上的典型时域曲线与频谱曲线如图 6 所示。

综合以上分析,将上述分析得到的荷载曲线加载到有限元模型上,将有限元模型进行加载,得到如下的加速度变化响应:

(1)南昌西站不同区域在同步调不同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 7

所示。

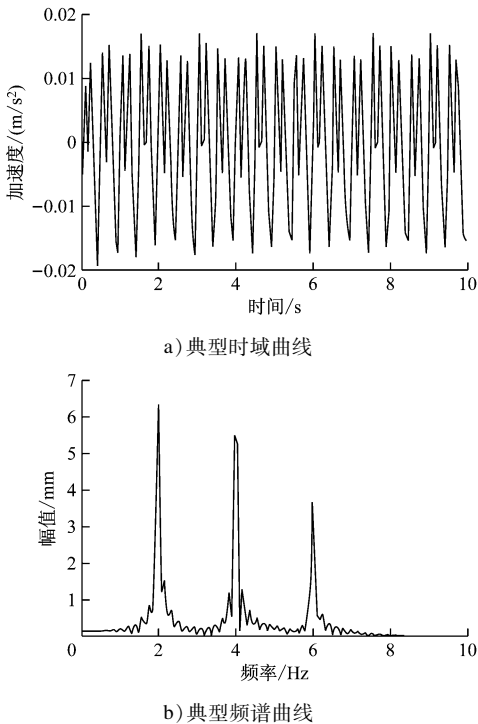


图 6 工况 C 情况下的典型时域曲线和典型频谱曲线
(人行荷载 1.7 Hz)

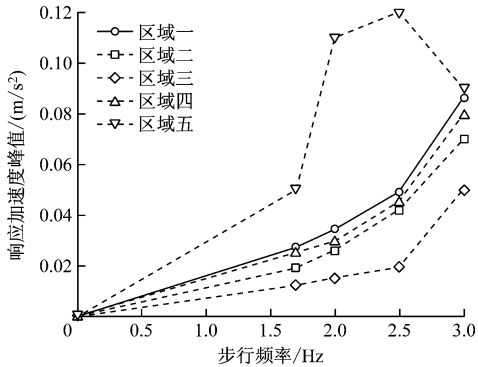


图 7 南昌西站不同区域、不同步行频率下的峰值
加速度(同步调不同相位作用下)

(2) 南昌西站不同区域在同步调同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 8 所示。

从以上的数据分析可知,在人群荷载的整体同步调作用下,随着步行频率的增加,激励点的峰值加速度先是呈现增加的趋势,当达到一定的值时又出现下降趋势,趋势较为一致;在人群荷载的部分同步调作用时,大跨度悬挑结构峰值加速度先出现下降趋势。

在选取的五块区域中,区域二与区域四相比较说明,18 m×25 m 跨度楼板的振动响应比 25 m×

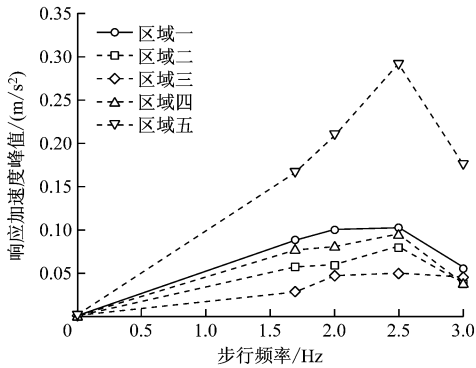


图 8 南昌西站不同区域、不同步行频率下的峰值
加速度(同步调同相位作用下)

25 m 跨度楼板的振动响应偏小。区域五步行频率为 2.5 Hz 时加速度幅值较大,最大达到 354 mm/s²。由此可见,在此频率,大跨度商业夹层悬挑部分容易在人的步行频率作用下产生共振现象。

(3) 南京南站不同区域在同步调不同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 9 所示。

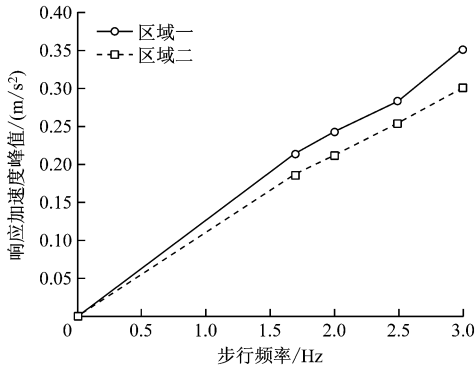


图 9 南京南站不同区域、不同步行频率下的峰值
加速度(同步调不同相位作用下)

(4) 南京南站不同区域在同步调同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 10 所示。

(5) 南昌西站典型区域、不同人群密度在同步调不同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 11 所示。

(6) 南昌西站典型区域、不同人群密度在同步调同相位作用下,不同步行频率的峰值加速度变化响应如图 12。

通过对比分析可以看出:

(1) 两种不同形式的楼板的加速度振动响应趋势是一致的,人群密度对楼板的振动响应有影响,而同步调、同相位的作用影响更为明显。同频率、

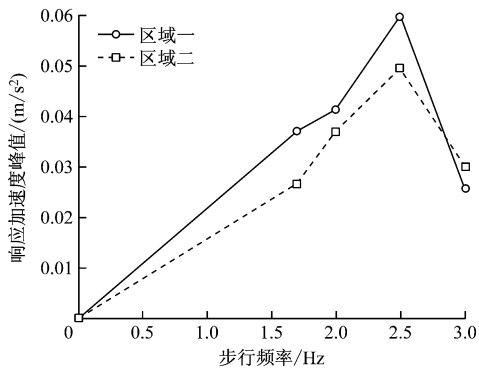


图 10 南京南站不同区域、不同步行频率下的峰值加速度 (同步调同相位作用下)

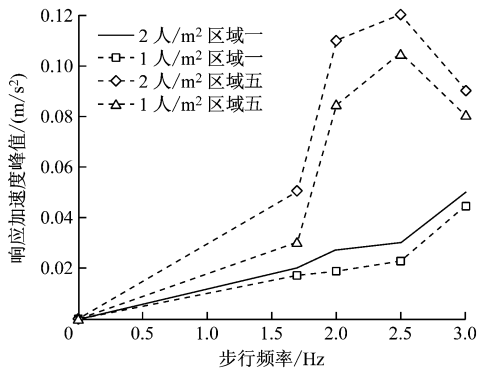


图 11 南昌西站不同区域、不同人群密度、不同步行频率下的峰值加速度 (同步调不同相位作用下)

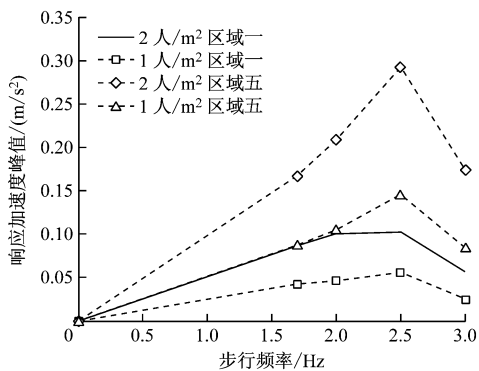


图 12 不同区域、不同人群密度、不同步行频率下的峰值加速度 (同步调同相位作用下)

同相位作用的人行荷载在荷载频率为 2.5 Hz 时对综合交通枢纽车站结构的振动响应较大,因此,对于大跨、轻质结构,在注重结构安全性的同时,需要

考虑结构振动舒适度的问题。

(2)通过对南昌西站不同区域的加速度响应进行比较分析可知,大跨度商业夹层的加速度响应比其他区域的加速度峰值大,而最大峰值加速度并不随着人行步频的增大而增大,因此进行舒适度分析时应合理选择人行步频。

4 结论

本文基于南昌西站、南京南站结构,进行有限元分析,充分考虑了不同楼板形式、不同人群密度、不同荷载模型下的人致振动响应,得到以下结论:

(1)综合交通枢纽车站候车厅大跨度组合楼板具有典型的模态密集特性,且前几阶模态频率均在 3 Hz 左右,与人群激励荷载频率较接近,容易引发人致振动问题,因此应当考虑人致振动舒适度。

(2)综合交通枢纽车站不同跨度的楼板层对人群荷载的同步调响应有一定差异。跨度 25 m 楼板层的跨中振动响应比跨度 18 m 楼板层的大。

(3)南昌西站的楼板采用双向预应力钢筋混凝土框架结构,南京南站楼板采用了钢桁架-混凝土组合楼盖结构,两种结构楼板在人致振动作用下的响应规律较为一致。

参考文献

- [1] 李泉,樊建生,聂鑫. 人行荷载作用下大跨楼盖多模态振动控制方法研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 42.
- [2] 李昊,简方梁. 人群行走荷载作用下的人致结构振动[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 125.
- [3] 孙利民,闫兴非. 人行桥人行激励振动及设计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 996.
- [4] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] NAKAMAURA S, KAWASAKI T. Lateral vibration of footbridge by synchronous walking [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(11): 1148.
- [6] 何浩翔,闫维明,张爱林. 人行激励下梁板结构与人体耦合作用研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 130.

(收稿日期:2017-04-11)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998. com