

大跨度舞台的舒适度评价与合理设计

王秀丽, 黄 瑞

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 目前对人行桥、楼盖的振动都有相关的舒适度指标规范, 但对大跨度舞台的振动舒适度指标尚无文献报道. 用有限元软件 MIDAS 对大跨度舞台进行竖向动力分析, 根据所得的动力响应时程来进行舒适度评价. 通过借鉴人行天桥舒适度的评价指标, 对舞台的舒适度进行评价. 得出表演人数控制在一定范围内时, 舞台舒适度能得到保证. 根据最终的评价结果再次用舒适度来合理控制舞台设计, 以保证大跨度舞台在舞者密度大的时候其舒适度也能得到满足.

关键词: 大跨度舞台; 动力荷载; 振动; 同步荷载; 舒适度评价

中图分类号: TU318⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1004-0366(2011)03-0057-04

Comfort Evaluation and Rational Design of Large-span Stages

WANG Xiu-li, HUANG Rui

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The dynamic response of loads created by dancers to the large-span stage should not be neglected. Generally the safety of stage structure is guaranteed; if the peak acceleration of stage vibration is too big, the service performance of the stage will be influenced. At present, the vibrations of footbridges and floors are standardized in every country by corresponding comfort index specification, but that of large-span stage is not still formulated. Through the dynamic analysis of large-span stage structure under synchronous loads, the comfort evaluation of footbridge and the comfort level of stage are evaluated. Based on the final evaluation results, the design of large-span stages is reasonably controlled by comfort degree.

Key words: large-span stage; dynamic load; vibration; synchronous load; comfort evaluation

大跨度舞台与人行桥、过街桥类似, 在正常使用情况下容易产生振动, 若振动过于强烈将会对舞者产生严重影响. 正如著名的英国伦敦千禧桥在开放当日就因人致振动过大而一度关闭^[1], 所以人致振动产生的动力响应是不容忽视的. 我们以甘肃省会展中心大剧院单层升降舞台为工程背景, 该舞台跨度为 18 m, 宽度为 3 m, 高度为 4 m, 模型如图 1 所示. 在设计过程中是按静力方法加大安全系数来考虑动力影响的, 因甲方经验要求将挠度控制在 11 mm, 所有杆件截面为矩形钢管, 主要截面尺寸见表 1, 节点形式采用相贯节点. 我们采用通用有限元软件 MIDAS, 在正常使用阶段表演者所产生的动力



图 1 大跨度舞台模型

表 1 舞台主要截面尺寸

管位置	截面尺寸/mm
上弦主管	□100×80×4×4
下弦主管	□80×80×4×4
支座处主管	□100×80×4×4

收稿日期: 2011-04-07

荷载作用下,对此类大跨度舞台支架结构的动力性能进行分析,并依据分析结果对舞台的舒适度进行评价,最后再根据舞台表演密度的选取,用舒适度来合理设计单层舞台。

1 研究思路

舞台在使用过程中本身是受动力荷载的,但在设计中将其动力处理为静力等效问题,其动力性能是不明确的.舞台人群同步表演产生的激励对舞台影响很大,且由于单层舞台的断面宽度大于高度,其竖向刚度比侧向刚度小的多,因此舞台主要承受人群同步竖向振动.目前,一些国内外规范指出,将人行桥、楼板等的竖向振动峰值加速度控制在要求的范围内,就可基本认为该环境下工作或生活人群的舒适度可以得到保证^[2],所以有必要确定舞台的舒适度是否得到保证.因此我们将通过有限元程序 MIDAS 对舞台进行人群动力荷载的瞬态分析,得到结构的最大动力响应,再对其舒适度进行评价.舞台振动通常不会对结构本身带来破坏,但若振动过大,则会给表演者带来不适的心理效应;另一方面人对振动的感受还取决于人本身的生理反应^[3],所以部分表演者对舞台振动的反应可能很敏感,以至于使表演者发挥失常,因此对舞台进行舒适度评价是十分有必要的,但目前的规范对舞台的舒适度并没有做出相关的规定.由于舞台和桥梁具有一定的相似性,均可以近似简化为简支梁,都为大跨度结构,且人群竖向同步荷载为行人桥荷载的一类,如军队齐步过桥时发生谐振^[4].所以借鉴对行人桥的舒适度评价指标来对舞台的舒适度进行评价,并根据最终的评价结果再次用舒适度来合理控制舞台设计。

2 荷载模型、工况及参数选择

早期关于行人桥人致振动使用性的规范内容并没有考虑人群荷载,随着近年来一些大跨度人行桥在大量行人作用下发生的大幅度振动问题,一些人行桥设计规范对此进行了修订,如 BS 5400(BD37/01)、EN 1991 开始建议人行桥振动使用性评价时应当考虑人群荷载,但并未对荷载给出具体规定和分析方法.瑞典规范 Bro2004^[5]以人群荷载验算人行桥振动舒适性的规范,其规定步行竖向力为

$$F = k_1 k_2 \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

其中 $k_1 = \sqrt{0.1BL}$, B, L 为桥面的宽度和跨径,显然是取行人密度为 $0.1 \text{ 人}/\text{m}^2$,采用根号说明人群荷载是按随机步行考虑,没有考虑振动引起一定程

度的同步调; $k_2 = 150 \text{ N}$,表示单人竖向力幅值.规范也难以对人群荷载给出具体的取值,人行桥根据其使用性能,在正常使用中承受的人群荷载集度差别较大,设计人员酌情考虑也可能更为合适。

通过瑞典 Bro 2004 对人群竖向荷载的规范,对单层舞台进行人群竖向动力荷载分析.由于我们考虑的是表演者同步调人致振动分析,所以 k_1 的取值将不采用根号,且舞台的长度和宽度分别为 18 m 、 3 m . Aikaterini(2005)测试统计得出人跳舞时步频约 $1.0 \sim 2.8 \text{ Hz}$ 并取决于音乐的节拍^[6],由于在不考虑共振的前提下,步频越高结构振动强度越大,所以人群荷载的步频都取 2.8 Hz 来进行分析。

由于舞者在舞台面上的分布具有随机性,我们选择舞者布满整个舞台台面的荷载模式,用圆圈表示表演者,荷载模式如图 2 所示.根据表演者密度的不同,将其划分为 4 种工况,具体见表 2。

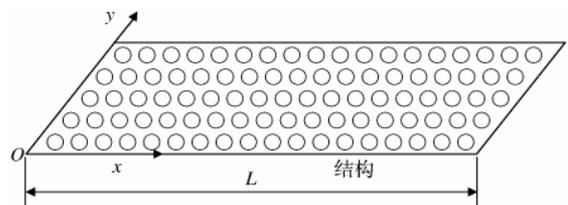


图 2 表演者荷载模式

表 2 表演者荷载工况

工况	人群密度/人·m ⁻²	步频/Hz	荷载模式
1	2.0	2.8	模式 1
2	1.5	2.8	模式 1
3	1.0	2.8	模式 1
4	0.5	2.8	模式 1

3 人致振动分析

利用有限元软件 MIDAS,对 2 种情况的各工况进行分析,得出舞台的竖向振动峰值加速度(见表 3)。

表 3 各工况的竖向振动峰值加速度

工况	舞台满布人数/人	峰值加速度 $a/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1	108	1.065 0
2	81	0.800 1
3	54	0.546 6
4	27	0.268 3

分析时取 2.8 Hz 的频率,属于音乐节奏较快的节拍,通过对比分析,在频率为 $1.0 \sim 2.8 \text{ Hz}$ 时,舞台结构的竖向加速度和位移随竖向同步荷载的频率减弱而降低.工况 1 中分析了不同人群密度满布舞

台的情况下加速度的特征,当人群密度为 2 人/ m^2 时,此时舞台人数为 108 人,其峰值加速度达到 1.065 m/s^2 ,但这个舞台有 108 人同步跳舞的几率较小;工况 2 中的人群密度为 1.5 人/ m^2 ,此时舞台人数为 81 人,其峰值加速度达到 0.8001 m/s^2 ,也 有点偏大;工况 3 和工况 4 的加速度都较小,分别为 0.5466 m/s^2 和 0.2683 m/s^2 。

4 舞台舒适度评价

英国 BS 5400 和欧盟 Euro code 采用结构振动响应的峰值加速度 a_{lim} 作为人行桥的舒适性评价指标;瑞典国家规范 Bro 2400 采用均方根加速度 a_{RMS} 作为人行桥的舒适性评价指标;国际化标准组织 ISO 制定出人行桥振动舒适性的国际通用标准,由表示频率和振动均方根加速度(RMS)关系的感度曲线和处于振动环境中的疲劳容许时间构成。由不同规范比较结果可以看出,在低阶频率范围内($<2 \text{ Hz}$),4 个规范规定的加速度指标均比较接近,而在高阶频率范围内相差很大,比较结果见表 4 和图 3。

表 4 不同规范的最大加速度要求

规范类型	垂直加速度	水平加速度
BS 5400	$a_{\text{max}} \leq 0.5 \sqrt{f} \text{ m/s}^2$	无要求
Euro code	$a_{\text{max}} \leq 0.7 \text{ m/s}^2$	$a_{\text{max}} \leq 0.2 \text{ m/s}^2$
Bro 2400	$a_{\text{RMS}} \leq 0.5 \text{ m/s}^2$	无要求

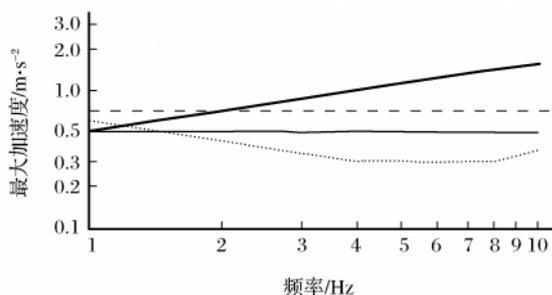


图 3 不同规范的舒适度指标比较

— BS 5400 — Bro 2004 --- Euro code ISO 第 10 137 条

由于采用 RMS 方法会低估峰值加速度对振动舒适性的影响。通过图 3 可以看出在 2.8 Hz 时,各国的允许最大加速度也不是相差很大。相对人行桥来说,舞台的舒适度要求更要高,所以我们采用欧盟 Euro code 峰值加速度评定指标。具体的评价结果见表 5。

5 利用舒适度控制舞台设计

由以上分析可以看出当表演者密度为 1.5 人/ m^2

表 5 各工况舒适度评价结果

工况	峰值加速度 $a/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	对应舒适度评价
1	1.065 0	不在允许舒适度范围
2	0.800 1	不在允许舒适度范围
3	0.546 6	在允许舒适度范围
4	0.268 3	在允许舒适度范围

和 2 人/ m^2 满布舞台的情况下,所产生的振动响应不在允许舒适度范围。所以在设计时根据舞台的一般表演密度进行静力设计,再通过舒适度来控制舞台设计是一种可选的办法。这样不仅考虑到了舞台结构的安全问题还考虑到了舞台的使用性。现根据静力设计方法和动力响应控制,使舞台设计达到良好的安全性、经济性和使用性。

舞者的密度具有随机性。伦敦千禧桥开通当日,高峰时人群密度达 $1.3 \sim 1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$,Arup 对其进行制振加固时按 2 人/ m^2 。户田公园人行桥行人最多时约 2000 人同时在桥上,人群密度达到 $2.13 \text{ 人}/\text{m}^2$ ^[7],此时行人比较拥挤,已难以自由行走。更多的观察研究表明,行人密度达到 $1.0 \sim 1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 时已非常稠密,行人间相互干扰严重,不可避免地碰撞;当行人密度超过 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 达到拥挤状态,行人速度显著下降。一些学者在评估人行桥的振动使用性时采用的人群荷载集度也大多接近上述实际观测结果。Bachmann 认为满足自由步行要求的人群密度最大约 $1.6 \sim 1.8 \text{ 人}/\text{m}^2$ 。可见,人行桥人致振动舒适度评估时的人群密度可大致在 $1.5 \sim 2.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ 范围内取值,通常情况下可取较低值,当人行桥处于行人密集区域或作为体育场馆、车站等专用通道时,人群密度取值可取较高值。参照人行桥密度测试提供的数据,取舞台表演者的密度为 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 。不考虑特殊因素,取一个人的重量为 0.7 kN ,按静力考虑舞台面上 1 m^2 内的荷载为舞台面板的荷载和 1.5 个人的重量。舞台面板重量根据施工人员的提供一般乘以放大系数后约为 1 kN ,但舞者的荷载属于动力荷载,设计时应将表演者的重量乘以放大系数。因此设计时 1 m^2 的荷载应该为: $1 + 1.05 k(\text{kN})$ 。

桥梁荷载设计规范对人群荷载的规定是在公路桥涵取 $3 \text{ kN}/\text{m}^2$,城市郊区行人密集地区取 $3.5 \text{ kN}/\text{m}^2$ ^[8],但也可根据实际情况或参照所在地区城市桥梁设计的规定确定。参照桥梁的人群荷载规范,认为舞台人群荷载密度一般小于桥梁人群荷

载,所以舞台人群荷载设计时取 $>3 \text{ kN/m}^2$ 的荷载认为是安全的.此时 $1.05k$ 必须 >3 ,则 k 值最小由

3.0 开始取.根据 k 值不同,选取6种工况,具体工况见表6.

表6 关于 k 值的6种工况

工况	1	2	3	4	5	6
k 值	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
1 m^2 荷载/kN	4.2	4.7	5.2	5.7	6.3	6.8

分别对以上6种工况进行静力设计,由于最初为满足使用性,甲方要求把竖向挠度控制在 11 mm .所以通过静力设计截面杆件,在保持各杆件应力满足且竖向挠度控制在 11 mm 的条件下,对杆件截面尺寸进行了调整.通过6种工况的计算得出,系数越大,静荷载越大,为了整体竖向变形保持一致所需的杆件截面就越大.由于设计时所加的荷载是参照桥梁规范的,所以在保持舞台结构竖向变形和应力满

足时,这6种工况在静力设计时都是安全的.但由于舞台的跨度大,结构形式轻柔,为保证舞者表演时有足够的舒适度,应用动力分析得出各工况相应加速度,再通过舒适度指标来评价各工况.

在动力分析时根据上述人群荷载的步频同样取 2.8 Hz ,舞者的密度与静力设计相符取 1.5 人/m^2 的密度进行竖向动力分析.得出动力情况下的峰值加速度响应见表7.

表7 各工况的峰值加速度

工况	1	2	3	4	5	6
峰值加速度 $a_{\max}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	0.883 2	0.810 3	0.755 6	0.699 4	0.662 0	0.621 1

由表7看出杆件截面积略小,所产生的加速度就越大,同样采用欧盟 Euro code 峰值加速度评定指标对舞台舒适度进行评价,即认为 $a_{\max} \leq 0.7 \text{ m/s}^2$ 时其舒适度达到要求.由表7看出工况4的加速度为 $0.699 4 \text{ m/s}^2$,即系数 $k > 4.5$ 时,其舒适度刚好满足要求.前3种工况由于在静力设计下舞台结构是安全的,但由动力响应分析得到 $a_{\max} > 0.7 \text{ m/s}^2$,加速度均偏大,不满足舒适度要求.

6 结论

(1) 采用瑞典规范人群荷载公式,对舞台进行人群竖向同步荷载作用下的动力分析.并参照各国对人行桥振动舒适度的评价指标,通过对评价指标的对比分析,采用了较合理的一种对大跨度舞台舒适度进行了评价,认为在表演人数控制在一定范围内时,舒适度都能得到保证.

(2) 为保证大跨度舞台在舞者密度大的时候舒适度也能满足,取舞台表演密度为 1.5 人/m^2 进行分析,根据 1 m^2 内的静荷载值: $1 + 1.05k$ (kN),最

终以舒适度来控制得出取系数 $k > 4.5$ 时,舞台的安全性和使用性都将保证,我们可以在这个系数范围内设计出安全、适用、经济的截面.

参考文献:

- [1] Dallard P, Fitzpatrick A, Flint A, et al. The London Millennium Footbridge[J]. Structural Engineer, 2001, 79(22): 17.
- [2] SCI Publication 076. Design Guide on the Vibration of Floors [S].
- [3] 朱滢. 实验心理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000.
- [4] 王秀丽, 李志利. 螺栓对板式橡胶支座抗震性能影响分析[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(1): 87-90.
- [5] Hauksson F. Dynamic Behaviour of Footbridges Subjected to Pedestrian-induced Vibrations. Master's thesis [D]. Sweden: Lund University, 2005.
- [6] Ginty G, Derwent J M, Ji T. The Frequency Ranges of Dance-type Loads[J]. The Structural Engineer, 2001, 79(6): 27-31.
- [7] Fujino Y, Pacheco B M, Nakamura S I, et al. Synchronization of Human Walking Observed During Lamral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(9): 741-758.
- [8] CJJ-77-98. 城市桥梁设计荷载标准[S].

作者简介:

王秀丽 (1963-), 女, 辽宁省沈阳人, 2004年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业, 获工学博士学位, 现任兰州理工大学土木工程学院教授, 博士生导师, 主要从事空间结构与钢结构的教学与研究.