

大跨径人行桥人致振动舒适性研究

周望¹, 周彦锋², 马如进³

(1. 南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210019; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

3. 同济大学, 上海市 200092)

摘要: 国内对大跨径人行桥人致振动舒适性研究较少, 以某大跨径人行斜拉桥为例, 采用强迫振动法和全桥连续行人流荷载模型, 结合德国人行桥设计指南 EN03(2007), 阐述了大跨径人行桥人致振动舒适性的评价过程, 并采取了在桥上安装调频质量阻尼器(TMD)系统的减振措施设计。结果表明, 通过减振措施, 该桥的人致振动舒适性评价从“差”提高到了“最佳”。

关键词: 人行桥; 人致振动; 舒适性; 减振

中图分类号: U448.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0073-04

0 引言

随着材料、施工工艺与现代结构理论的发展, 人行桥跨径不断增大, 结构也更加轻柔, 由此带来的人致振动问题也越来越多, 严重影响到桥上人行行走的舒适性。自英国伦敦千禧桥^[1]、法国巴黎 Solferino 桥等人行桥相继发生大幅振动后, 人致振动分析及舒适性研究就成为人行桥设计过程中必不可少的一部分。

人行过程, 重心的高低起伏和左右摇摆分别产生竖向力和侧向力, 成年人正常行走时的步频(每秒迈步数)为 1.5 ~ 2.4 Hz, 当桥上人行多到一定数目后, 就会自然产生一部分频率相位非常接近同步的人, 如果这部分人的频率正好与结构的固有频率接近, 就会产生明显的桥梁振动。研究发现^[2], 1 阶步频敏感范围(竖向 1 阶 1.25 ~ 2.3 Hz, 侧向 1 阶 0.5 ~ 1.2 Hz)内的人行荷载最容易产生人致振动问题。

总结国内外学者的研究, 人致振动分析方法主要有强迫振动法、自激振动法、参数振动法和随机振动法等。人行荷载模型主要有单人过桥荷载模型、结伴过桥荷载模型和全桥连续行人流模型等。国内对大跨径人行桥舒适度的研究较少, 钱骥^[3]等学者结合主跨 140 m 的一个工程实例介绍了人行桥舒适度评估过程, 但采用的规范较早, 只规定了一个舒适度指标限定值, 且没有对舒适度进行分级。本文以主跨 240 m 的“南京眼”步行桥为例, 采用强迫振动法和全桥连续行人流模

型, 结合德国人行桥设计指南 EN03(2007)^[4]给出的舒适度评价标准, 介绍了大跨径人行桥舒适度评估过程, 并针对该桥提供了合理的减振措施。

1 工程概况

“南京眼”步行桥是南京市标志性建筑^[5], 位于南京市青奥板块中轴线上, 跨越长江夹江, 为双倾斜椭圆形钢塔扁平钢箱梁斜拉桥。跨径布置为 45 m+42 m+58 m+240 m+58 m+42 m+46.5 m=531.5 m, 塔高 102.5 m; 采用扇形密索体系, 标准索距 15 m, 在距索塔 100 m 处边跨桥墩附近设 1 根背索。钢箱梁跨中标准段含风嘴全宽 15.2 m, 高 2.5 m(见图 1、图 2)。

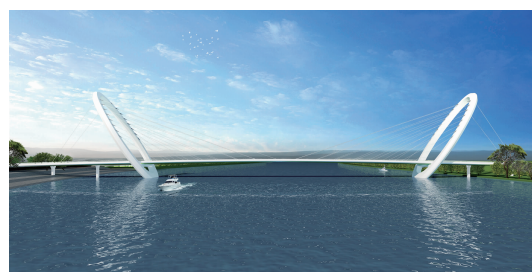


图 1 “南京眼”步行桥效果图

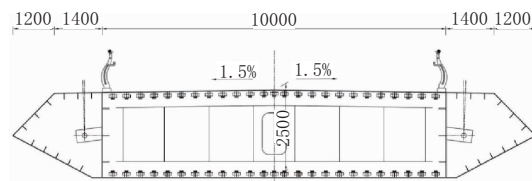


图 2 “南京眼”步行桥跨中钢箱梁标准断面图(单位:mm)

2 结构动力特性分析

采用结构分析软件对“南京眼”步行桥进行结构动力特性分析。其中主梁采用空间三维梁单元模

收稿日期: 2020-06-23

作者简介: 周望(1979—), 男, 学士, 高级工程师, 从事大跨径桥梁及大直径盾构隧道项目管理工作。

拟;主塔与桥墩采用三维空间梁单元来模拟;拉索采用索单元模拟。单梁模型中采用刚臂连结模拟梁—墩以及拉索—主梁处的连接,主从约束模拟塔—梁的连接。边界条件为索塔下端固结,过渡墩及辅助墩约束竖向和横向自由度。

通过动力特性分析,得到该桥处于 1 阶步频敏感范围内的主要竖弯、侧弯振型,见表 1。

表 1 成桥阶段 1 阶步频敏感范围内的振型及频率

振型序号	频率/Hz	对应振型特点
7	1.451 1	主梁二阶正对称竖弯
8	1.643 7	主梁三阶正对称竖弯
11	2.208 3	主梁二阶反对称竖弯
3	1.075 1	主梁一阶正对称侧弯

根据结果可以发现,本桥有不少竖弯和侧弯振型落在了行人步频敏感范围之内,大桥极易在密集人群激励下发生不利振动。

3 人致桥梁振动分析

根据德国人行桥设计指南 EN03 的相关规定进行人行桥最大振动(加速度)响应的计算。按照指南的规定,采用有限元三维模型,以人群共振荷载情况下结构所产生的最大加速度响应来评估其振动舒适性,每个振型下的最大加速度响应都应在舒适性容许值范围之内。

3.1 行人脚步荷载的计算模型

根据德国 EN03(2007)-4.5.1.2 规定,行人脚步荷载模型为:

$$p(t) = p \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times N_p \quad (1)$$

式中: N_p 表示与桥上自由行走的 n 个人的效应等效的同步行走人数; $p \cos(2\pi f_s t)$ 是单人谐波荷载; P 是一阶荷载的幅值; f_s 是桥梁的某一阶模态的频率值,其正好在行人步频范围内且假定其与行人步频相等。荷载模型中 P 的取值见表 2。 ψ 是折减系数,其值按图 3 规定选取。

表 2 荷载模型中 P 的取值

P/N	
280(竖向)	35(侧向)

3.2 人群流动时的等效完全同步人数

根据德国 EN03(2007)-4.3.1 规定,取最大人群密度 $d=1.5$ 人/ m^2 ,即此时交通异常繁忙;主跨步行区总面积 $S=3\,621.035$ m^2 ;相应总人数 $n=d \times S=5\,447$ 人;结构阻尼比。

根据德国 EN03(2007)-4.5.1.2 规定,高密度

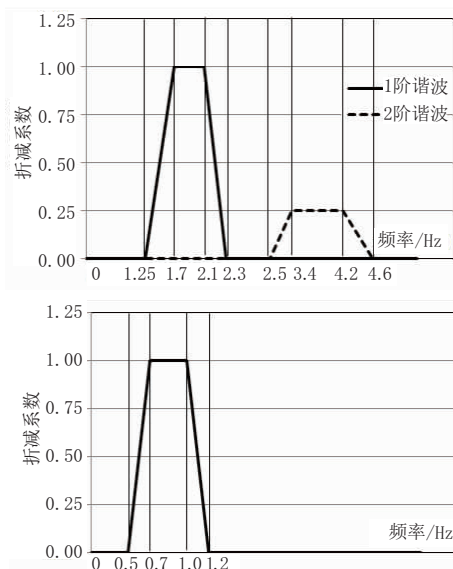


图 3 荷载模型中的取值(上图为竖向,下图为侧向)

人群条件下,行人之间的步频已完全同步,只是相位不同,按照随机概率分布模拟方法,总结出高密度条件下等效同步行人人数计算公式为:

$$N_p = 1.85\sqrt{n} \quad (\text{当密度} > 1.0 \text{ 人}/\text{m}^2 \text{ 时})$$

因此,对于本人行桥,等效完全同步行人人数为:

$$N_p = 1.85\sqrt{n} = 137 \text{ (人)}$$

等效的完全同步人群密度为:

$$n' = \frac{1.85\sqrt{n}}{S} = 0.038 \text{ (人}/\text{m}^2)$$

即相当于 5 447 人自由行走时,可等效为 137 人同步行走且这 137 人沿桥长均匀分布。

等效同步人群的竖向一阶步行荷载:

$$\begin{aligned} p_{v1}(t) &= p \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times N_p \\ &= 280 \cos(2\pi f_s t) \times 1 \times 137 = 38\,360 \cos(2\pi f_s t) \end{aligned}$$

其中,为保守取折减系数 $\psi=1$,频率 $f_s=1.451\,1/1.643\,7/2.208\,3$ Hz。

等效同步人群的侧向一阶步行荷载:

$$\begin{aligned} p_{h1}(t) &= p \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times N_p \\ &= 35 \cos(2\pi f_s t) \times 1 \times 137 = 4\,795 \cos(2\pi f_s t) \end{aligned}$$

其中,为保守取折减系数 $\psi=1$,频率 $f_s=1.075$ Hz。

3.3 人致振动响应分析

将等效同步人群的竖向和侧向一阶步行荷载以均匀分布的余弦荷载在建立的三维结构有限元模型上加载,采用时程分析的方法来计算行人步行荷载作用下主梁结构的加速度幅值,结果见图 4、图 5。

竖向一阶步行荷载作用下,对应振型最大加速度峰值加速度为第 11 阶的 1.001 m/s^2 ,同时第 7 阶为 $0.961\,7$ m/s^2 ;侧向一阶步行荷载作用下,对应第 3 阶振型,最大加速度峰值加速度为 $0.262\,9$ m/s^2 。

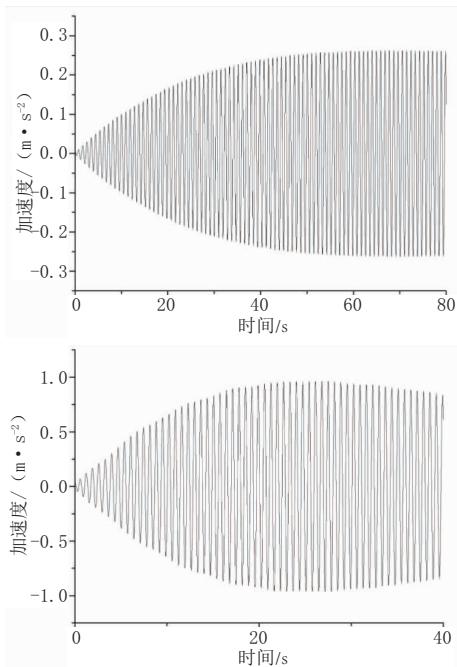


图 4 第 3 阶(侧向)和第 7 阶(竖向)最大加速度时程

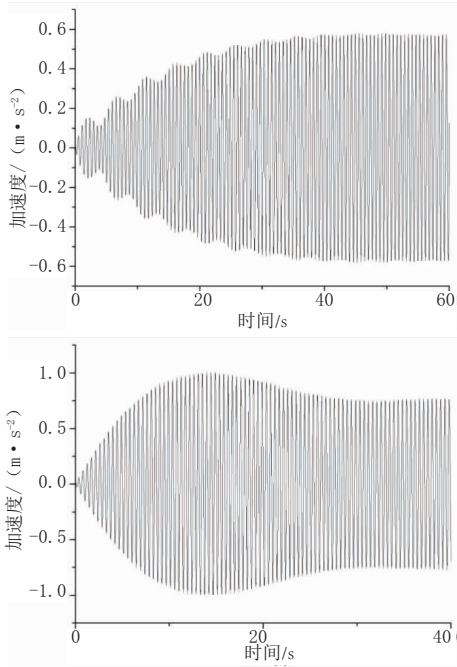


图 5 第 8 阶(竖向)和第 11 阶(竖向)最大加速度时程

4 人行桥行人舒适度评价

欧洲规范 EN1990 规定人行桥桥面任意位置的竖向振动加速度峰值应小于 0.7 m/s^2 ,但新修订草案结合 BS5400^[6]的规定,建议竖向峰值加速度小于和 0.7 m/s^2 .瑞典 Bro 2004 规范采用均方根加速度作为人行桥舒适性评价指标,要求竖向均方根加速度不超过 0.5 m/s^2 .

德国人行桥设计指南 EN03(2007)吸收了 2000 年以来新的研究成果,采取行人承受的峰值

加速度限值的方法规定舒适性等级,相应的舒适性指标用峰值加速度定义见表 3。

表 3 德国 EN03(2007)规定的加速度舒适性指标

舒适性类别	描述	竖向加速度限值 $/(m\cdot s^{-2})$	侧向加速度限值 $/(m\cdot s^{-2})$
CL1	最佳	<0.50	<0.10
CL2	中等	$0.50\sim1.00$	$0.10\sim0.30$
CL3	差	$1.00\sim2.50$	$0.30\sim0.80$
CL4	不可接受	>2.50	>0.80

通过归纳国内外的舒适性评价标准,选择德国人行桥设计指南 EN03(2007)作为评价主要依据,结果见表 4。

表 4 “南京眼”步行桥人致振动舒适性分析

振型阶数	峰值加速度 $/(m\cdot s^{-2})$	舒适度等级
7	0.961 7	中等
8	0.579 9	中等
11	1.001	差
3	0.262 9	中等

竖向一阶步行荷载作用下,最大竖向加速度为 1.001 m/s^2 ,处于 $1.00\sim2.50\text{ m/s}^2$ 范围之内,评级为“差”;侧向一阶步行荷载作用下,最大侧向加速度为 0.2629 m/s^2 ,处于 $0.10\sim0.30\text{ m/s}^2$ 范围之内,评级为“中等”。

5 TMD 减振措施研究

根据人致振动分析结果,该桥竖向加速度响应较大,舒适度难以满足要求,故考虑对竖向振型进行减振设计。涉及到的减振振型为第 7 阶振型及第 11 阶振型,两者均为行人荷载下发生大幅竖向振动的竖弯振型。

由于该人行桥跨径较大且需要考虑美观要求,不易改动结构形式和加设支撑,拟安装调频质量阻尼器(TMD)系统,根据第 7 阶和第 11 阶振型特点,考虑对两个振型都得进行振动控制。对于第 11 阶,分别在 4 个振幅处各布置 2 个 TMD,共计 8 个,编号为 1-1~1-8 号 TMD;对于第 7 阶,在主梁跨中布置 4 个 TMD,编号为 2-1~2-4 号 TMD。平面布置见图 6。

TMD 系统参数取值见表 5。

将设计的 TMD 采用 Mass21 和 combin14 单元模拟加至建立的有限元模型上,与安装前的主梁峰值加速度进行对比,结果见图 7。

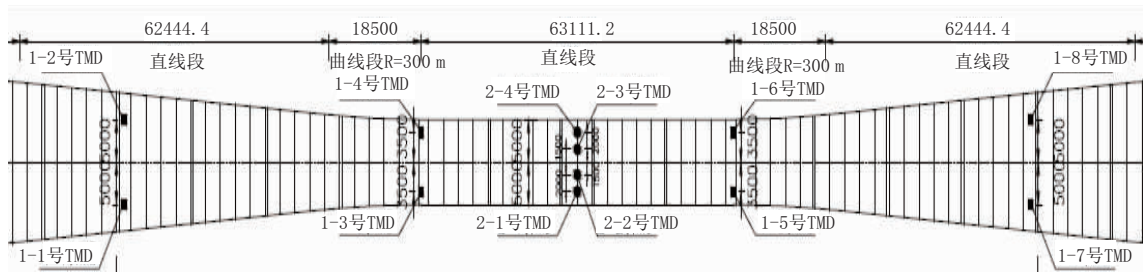


图6 TMD系统布置图(单位:mm)

表5 TMD系统参数表

TMD类型	质量/kg	刚度/(N·m)	阻尼系数/(Ns·m)
1	600.96	116 515.50	723.77
2	1 322.34	110 778.60	1 046.86

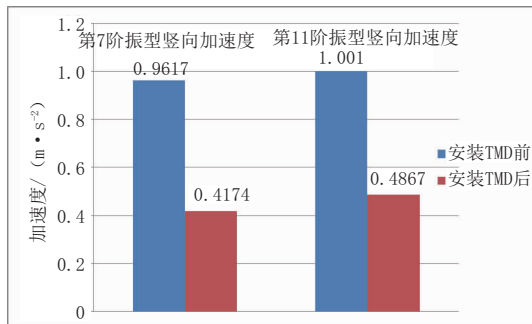


图7 安装TMD前后主梁峰值加速度对比

由图7可以清楚看出,对于第7阶振型,安装TMD后的主梁加速度峰值为安装前的43.4%,加速度等级为“最佳”;对于第11阶振型,安装TMD后的主梁加速度峰值为安装前的48.6%,加速度等级为“最佳”,说明该TMD系统具有较好的减振效果。

6 结语

本文采用全桥连续行人流模型,结合德国EN03(2007)人行桥指南,阐述了“南京眼”步行桥人致振动舒适性的评估过程,并根据评估结果采取了减振措施。结果表明,该人行桥在竖向一阶步行荷载作用下,舒适度评价指标为“差”,在使用TMD系统后,舒适度评价指标均可达到“最佳”,验证了该系统的有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] DALLARD P, FITZPATRICK A J, FLINT A, etc. The London Millennium Footbridge[J]. The Structural Engineer, 2001, 79(22): 17-33.
- [2] 可路, 王达磊, 陈艾荣. 景区大跨径人行索桥人致振动响应研究[J]. 公路交通科技, 2013(11): 101-105.
- [3] 钱骥, 孙利民. 大跨径人行桥人致振动舒适性评估及减振措施[J]. 上海交通大学学报, 2011(5): 677-681.
- [4] FELDMANN M, HEINEMEYER C, LUKIC M, etc. Human-induced Vibration of Steel Structures: Design of Footbridges Guideline, RFS2-CT-2007-00033[R]. Luxembourg: European Commission, 2008.
- [5] 韩大章, 戴捷, 李正, 等. 南京青奥标志——“南京眼”青奥公园步行桥设计[A]. 江苏省公路学会. 江苏省公路学会2014年学术年会论文集[C]. 2014.
- [6] British Standard 5400, British Standards Institution. Steel, concrete and composite bridges: Specification for loads[S].

(上接第57页)

- 公司, 2019.
- [7] 天风研究. 智慧停车: 百亿赛道群雄逐鹿, “头号玩家”谁主沉浮? [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/240897818_772357, 2018-7-13/2020-3-19.
 - [8] 刘凯. 我国智慧停车行业发展策略研究[J]. 企业科技与发展, 2019(6): 38-39.

- [9] 阳卫文. 城市智慧停车现状及存在的问题分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2018(10): 114-115.
- [10] 张磊. 智慧停车在智慧城市建设中的发展与应用前景[J]. 中国安防, 2019(10): 55-57.
- [11] 朱昊, 冯淑媛, 刘涛. 上海智慧停车建设和发展运行模式探讨[J]. 交通与运输, 2016(增刊2): 100, 106-108.