

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.025

# 钢结构景观人行桥梁高和铺装对人致振动和阻尼器设计的影响

张笑

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:**以上海临港顶新科学家公园环形景观人行桥为例,详细分析了人行桥行人舒适度评估和质量调谐阻尼器(TMD)的设计过程。在跨径、梁高、桥面附属等外部景观条件的约束下,针对人行桥主梁梁高和桥面铺装厚度两方面的业主要求,对TMD的合理布置、数量的优化做了研究。总结归纳了人行振动计算和TMD的设计经验。

**关键词:**景观人行桥;环形钢结构连续梁;人行振动舒适度评估;质量调谐阻尼器(TMD)

中图分类号:U448.11

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)07-0110-04

## 0 引言

近年来,业主对人行桥的景观造型和艺术表达愈加重视,也非常强调桥梁与周边环境的融入和匹配。本文针对环形人行桥跨径大,梁高低的景观特点,参照《德国人行桥设计指南》和《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》来进行行人舒适度分析和阻尼器(TMD)设计,包括TMD质量单元的选取和合理布置,以及研究了主梁梁高(刚度)和铺装厚度(质量)对TMD的减振效果影响,供今后类似项目参考。

## 1 工程概况

上海临港顶新科学家公园内“莫比乌斯”环形通道内包含2座钢结构人行桥。人行桥结构中心线半径为100.5 m。西侧人行桥为5跨连续梁:跨径54~60 m,总长约287 m;东侧人行桥为2跨连续梁:跨径35~42 m,总长约77 m;两座人行桥的北端分别接入半地下车库顶构筑物,形成环形连续通道;人行桥的南端则分别与公园南侧“科学家社区”文化建筑连通,汇入建筑结构。环形通道效果见图1。

人行桥上部结构采用等高鱼腹式钢箱梁,宽10 m,结构中心线处梁高2.2 m;桥面彩色透水沥青铺装厚度为90 mm。主梁断面见图2。

人行桥桥墩隐藏于景观堆土范围内,梁底距堆土顶保留1.5 m养护空间;主梁和桥墩间连接采用盆式橡胶支座,固定支座布置于中间墩处。其中西侧

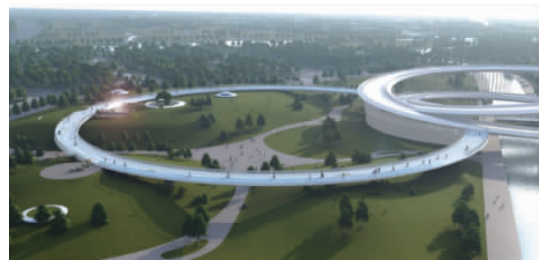


图1 环形通道(人行桥)效果图

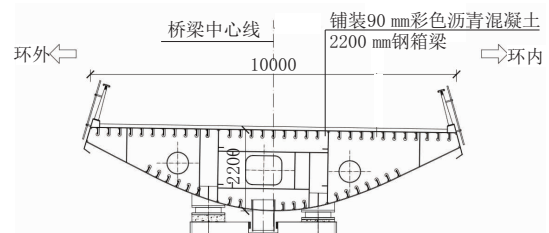


图2 鱼腹式钢箱梁横断面(单位:mm)

5跨人行桥为本文主要研究对象,平面布置见图3。

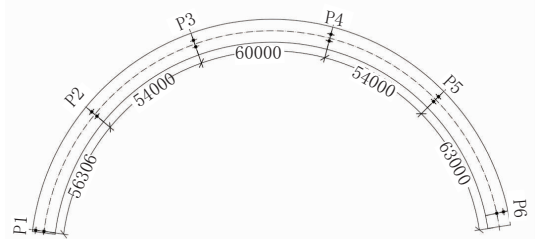


图3 人行桥钢箱梁平面布置(单位:mm)

## 2 减振设计要点

### 2.1 主要设计要求

钢结构人行桥的刚度小,固有基频较低,人行激励下行人舒适度通常需要控制。本项目业主提出的以下景观要求进一步降低了结构的刚度、增加了恒载质量并且减小了结构基频。

(1)人行桥的最大跨径不小于60 m,同时为体现

收稿日期:2023-03-16

作者简介:张笑(1978—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

出上部结构纤细、轻盈,梁高不大于 2.4 m;

(2)人行桥墩柱需要布置在堆土范围内,桥墩露出堆土部分高度控制在 1~2 m,并由绿植遮挡。因此温度效应下不适合采用墩梁固结,无法通过体系变化来改善结构刚度;

(3)钢结构桥面需要采用一定厚度的花纹沥青铺装和布置花池以满足行人步行的舒适性;并通过步道表面花纹展现公园主题艺术。

## 2.2 设计方法和计算参数

环形人行桥属于非规则结构,需要通过模型分析来进行行人舒适度分析。取决于分析结果,进一步判断是否需要减振设计。

本项目结构分析采用 Midas Civil 软件,建立梁单元进行全桥模拟。其中计算截面采用钢箱梁,动力效应分析将二期恒载转化为质量参与计算。其中玻璃栏杆荷载为单边 2 kN/m,铺装 19.7 kN/m,玻璃钢花池范围内(单个长 10 m)为 15 kN/m。钢材取 Q355C,使用状态下的材料阻尼比取 0.005。

## 3 行人舒适度评估

舒适度评估内容主要包括分析结构自振基频、明确舒适度标准和动力分析。

### 3.1 固有频率计算和校核

为避免共振,天桥上部竖向自振频率应不小于 3 Hz<sup>[1]</sup>。分别对 2 跨连续梁和 5 跨连续梁模型进行模态分析。东侧 2 跨钢箱梁跨径(最大跨高比 19.3),一阶竖向弯曲基频为 3.209 Hz,满足要求。西侧 5 跨钢箱梁竖向刚度较低;前 5 阶竖向基频均小于 3 Hz,不满足规范要求。由于主梁梁宽远大于梁高,即横向刚度远大于竖向刚度,低阶基频不存在横向或扭转模态。竖向基频结果汇总见表 1。

表 1 5 跨钢箱梁竖向基频结果汇总

模态	1	2	3	4	5	6
频率 /Hz	1.295	1.457	1.746	2.402	2.761	4.940
振型特征	竖向弯曲					

当人行桥竖向和纵向固有振动频率为 1.25~4.6 Hz 时,则结构容易与行人步频(1.5~3.0 Hz)产生共振<sup>[2]</sup>;因此 5 跨连续梁的前 5 阶竖向基频模态需要做进一步的舒适性分析。

### 3.2 设计工况的评估

人行桥舒适度的设计工况由预期的交通等级和选定的舒适度等级确定。

按业主要求,公园人行桥需要具备在活动日承担大流量游人的需求,参考德国规范,行人交通属于异常繁忙,交通级别为最高 TC5,行人密度  $d=1.5 P/m^2$ 。

行人舒适度的评价标准由结构在人行激励下产生的振动加速度决定。峰值加速度限值见表 2。本项目舒适度等级按“CL1”标准,即竖向加速度限值  $0.5 m/s^2$ 。

表 2 德国人行桥设计规范加速度限值

舒适度等级	舒适度	竖向加速度 /( $m \cdot s^{-2}$ )	侧向加速度 /( $m \cdot s^{-2}$ )
CL1	优	<0.5	<0.1
CL2	中等	0.5~1.0	0.1~0.3
CL3	差	1.0~2.5	0.3~0.8
CL4	不能接受	>2.5	>0.8

### 3.3 人行桥动力分析

有限元动力分析模拟了人行桥在人群激励下的结构加速度时程响应。人群荷载工况为结构满布人群与结构同频行走情况下的简谐荷载<sup>[2]</sup>;

$$p(t)=P \times \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times \frac{n'}{S} \quad (1)$$

式中: $P$ 为步频 $f_s$ 时,单个行人产生的荷载幅值,对竖向激励取 280 N; $t$ 为时间; $f_s$ 为步行频率,假设它等于所考虑的结构基频; $n'$ 为等效行人个数; $S$ 为加载面积(取有效桥宽 9 m × 桥长 287 m); $\psi$ 为考虑步频接近基频变化范围临界值的概率而引入的折减系数<sup>[4]</sup>,折减系数取值见图 4。其中竖向自振基频所处的平台段(1.7~2.3)Hz,为行人步频敏感区域。

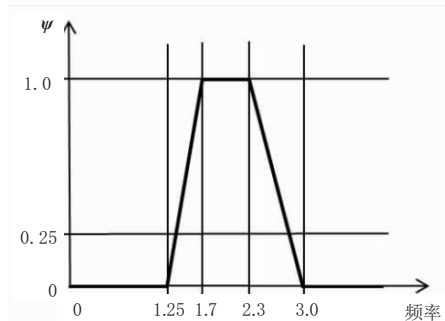


图 4 折减系数与基频关系

将简谐人群荷载按各个振型模态  $f_s$  加载到结构模型,进行加速度时程分析,得到了连续梁每跨跨中最大幅值处(见图 5)的人群荷载加速度时程结果(60 s)。各个模态基频下的最不利位置人群荷载加速度结果示意图 6。

结果显示,结构一阶基频远低于行人步频的敏感区域 1.7~2.3 Hz,有效人群荷载激励较小(折减系数  $\psi=0.091$ ),跨中位置共振加速度为  $0.2 m/s^2$ ;二阶到五阶结构基频落入行人步频区域,因此跨中位

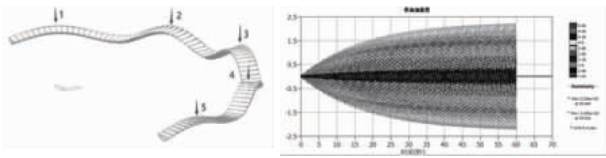


图5 跨中位置加速度时程

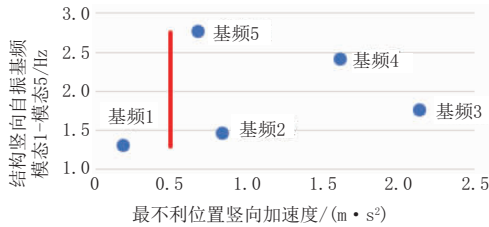


图6 1阶-5阶基频下人行振动加速度

置处人群激励竖向加速度均有超过 0.5 m/s<sup>2</sup> 限值, 需要采取控制措施。

#### 4 阻尼器的设计

质量调谐阻尼器(TMD)在大跨度结构减振措施中应用广泛, 通过把一个较小的振动系统安装在需要减振的主结构上, 和主结构发生相对运动, 从而吸收主结构控制振型的振动能量, 达到抑制主结构振动的效果。本项目采用永磁式电涡流调谐阻尼器, 系统按免维护设计, 无易损件, 减振系统设计寿命大于 50 a。

##### 4.1 阻尼器的设计步骤

TMD 设计的目标是以最少的质量块和最优阻尼比实现控制人行加速度, 满足性能和经济性。主要设计参数包括 TMD 的质量比、频率比和阻尼比。TMD 主要设计过程如下<sup>[2]</sup>:

(1) 选定阻尼器质量与主结构振型模态参与质量  $M$  的比值  $\mu$ , 通常取 1%~5%。

(2) 确定最优频率比  $\alpha_{opt}$  和最优阻尼比  $\xi_{opt}$

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}}, \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3}{8(1+\frac{\mu}{2})}}$$

(3) 计算 TMD 的物理参数

阻尼器质量  $m_d = \mu \times M$ ;

阻尼器刚度  $k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d$ ;

阻尼器阻尼  $c_d = 2m_d \times 2\pi f_d \times \xi_{opt}$ 。

##### 4.2 阻尼器的设计方案比较研究

TMD 单元需布置在受控模态的最大幅值处, 即本项目跨中位置。参考二阶到四阶模态人行共振(无 TMD)加速度响应的数值, 假定 TMD 质量块的数量并计算得出频率比和阻尼比。图 7 为 TMD 质量块在模型中的位置。其中 TMD1、TMD2 和 TMD3 质量块的参数分别针对二阶到四阶基频计算得出。

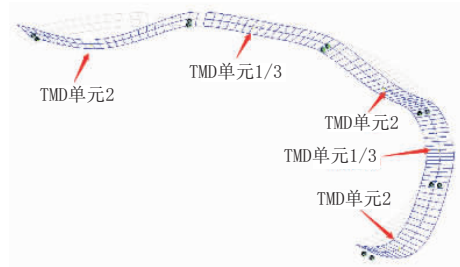


图7 模型 TMD 布置示意图

由于初始阻尼质量为假定值, 设计方案分别比较了不同 TMD 质量块针对各阶基频调频的减振效果。二阶+三阶+四阶基频的 TMD 重量方案一: 2+6+4=12 t ( $\mu=3.5\%$ )、方案二: 2+6+2=10 t ( $\mu=2.4\%$ ) 和方案三: 2+3+2=7 t ( $\mu=1.1\%$ ), 结构共振的最不利位置加速度的比较结果见图 8。

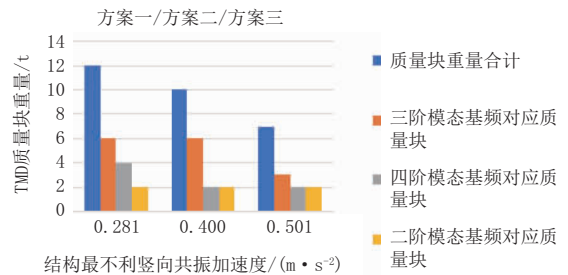


图8 TMD 方案 1、2 和 3 质量块减振效果比较

从结果可以发现:

(1) TMD 质量块需要分散布置在结构二阶到四阶模态最大加速度位置, 刚度和阻尼比等参数按质量块重量计算设定;

(2) 桥面减振效果随 TMD 单元质量的增大而提高。将总质量 7 t 的 TMD 单元质量提高到 10 t 和 12 t, 对应的桥面共振加速度由 0.501 m/s<sup>2</sup> 分别降至 0.4 和 0.281 m/s<sup>2</sup>。

按照舒适度加速度限值 0.5 m/s<sup>2</sup> 控制, 采用方案 2; 即单个 TMD 单元重量为 1 t, 二、四跨跨中各布置 2 个单元(TMD1 和 TMD3), 一、三、五跨跨中各布置 2 个单元(TMD2), 总重量共计 10 t, 最大减振率为 81%, 满足减振要求。

#### 5 结构刚度(梁高)和桥面附属(铺装厚度)对 TMD 减振效果的分析比较

针对本项目业主对梁高和桥面铺装厚度有相关的景观要求, 且两者对结构基频均有影响<sup>[3]</sup>。笔者在原有主梁高度和铺装厚度基础上, 对有限范围内调整梁高和铺装厚度后结构的基频、舒适度评估和 TMD 设计做了研究比较。

##### 5.1 梁高调整对舒适度影响的比较

图 9 显示主梁梁高为 2.2 m、2.4 m 和 2.6 m 情



况下,结构各个模式下的竖向基频随着梁高 / 刚度的增大而变大,2.2 m 梁高的二 ~ 五阶基频与行人步频区域(1.5~3.0 Hz)重叠;随着梁高增大,2.6 m 梁高的一 ~ 四阶基频落入行人步频区。

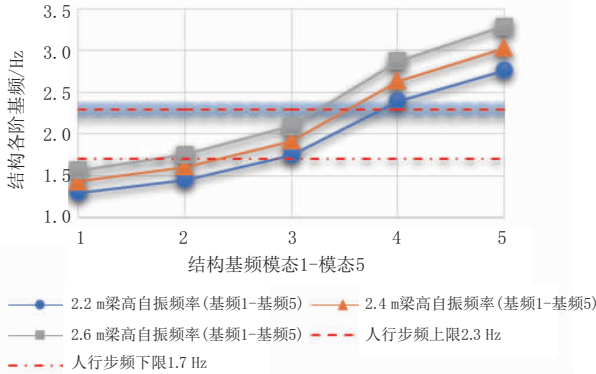


图 9 2.2 m/2.4 m/2.6 m 梁高下结构模式 1- 模式 5 基频对比

同时 2.6 m 梁高的二、三阶竖向基频均落入人群荷载基频敏感区域,即 1.7~2.3 Hz(见图 4)。由于梁高增加造成二阶和三阶基频下的外部激励增大,同等质量(10 t)的 TMD 的减振效果有所减弱、共振加速度增大(见图 10)。

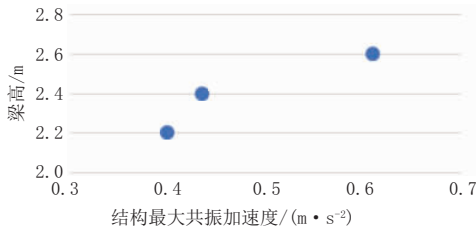


图 10 不同梁高对应同等质量 TMD 减振效果比较

### 5.2 铺装调整对舒适度影响的比较

图 11 显示主梁梁高保持 2.2 m, 沥青铺装厚度分别为 90 mm、30 mm 和 15 mm 时,结构各个模式下的竖向基频随着结构质量减小而逐渐变大。不同铺装的三阶竖向基频仍然位于人群荷载基频敏感范围,即 1.7~2.3 Hz(见图 11)。

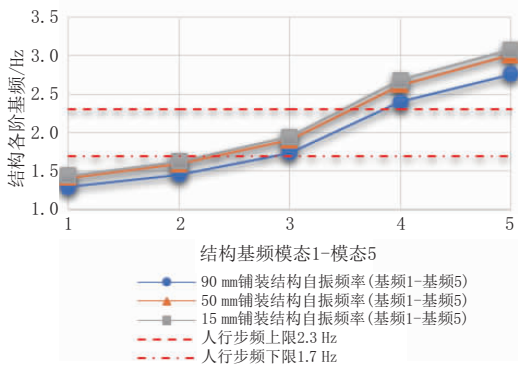


图 11 铺装 90 mm/30 mm/15 mm 下结构模式 1- 模式 5 基频对比

在结构质量减少,外部激励基本不变的情况下引起共振,同等质量(10 t)和位置的 TMD 的减振效

果随铺装厚度减小而逐步降低(见图 12)。

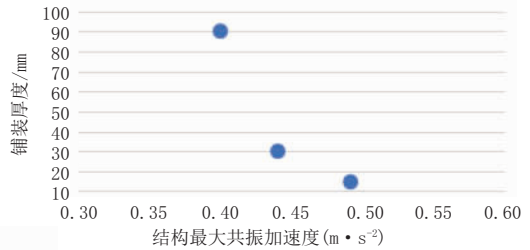


图 12 不同铺装对应同等质量 TMD 减振效果比较

## 6 结语

本工程环形连续钢箱梁 TMD 减振设计着重研究了业主对景观,即梁高和铺装厚度的要求,在满足舒适度标准的基础上,最大程度优化了阻尼器的设计。并且总结设计经验如下:

(1)增加结构刚度可以提高自振基频,但小范围内调整梁高对减振效果影响不大。本项目通过比较跨高比 27.3、25 和 23 的人行桥基频、人行致动加速度和 TMD 减振效果,结果显示由于最大梁高主梁(2.6 m)的 2 阶和 3 阶基频均落入行人步频敏感范围(1.7 ~ 2.3 Hz)内,激励荷载相对最大,因此 TMD 质量块减振效果相对其他梁高(2.2 m 和 2.4 m)反而有所降低。

(2)减轻结构恒载,即减小铺装厚度同样可以提高结构基频。但由于本项目结构各阶基频仍处于敏感步频范围内,人群激励荷载基本不变。因此相比较下,相同 TMD 质量块的减振效果对恒载较大的厚铺装(90 mm)更为有效。

(3)在桥梁景观、墩高、跨径等约束条件下,钢结构连续梁人行桥竖向自振频率通常难以满足大于 3 Hz 的规范要求。解决办法首先是通过人群荷载时程分析来判断桥梁是否满足舒适度要求;如不满足,则需要采用阻尼器进行控制,阻尼器的设计步骤和舒适度的标准,可以参考德国规范和建筑楼盖规范。通过安装调谐质量阻尼器(TMD)来实现钢桥减振,TMD 质量块的计算和布置需要参考原结构的基频模态分布。将 TMD 质量单元布置在多阶基频自振模态下的最大振幅位置处,可以有效的控制 TMD 单元的数量、提高经济性并且最大程度发挥减振功效。

### 参考文献:

[1] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].  
 [2] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
 [3] 叶涛,李亚平,肖海波.钢结构人行桥自振频率影响因素及其分析[J].城市道桥与防洪,2021(2):48-50.  
 [4] JGJ/T 441—2019,住建部.建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].