

环形钢天桥人行舒适度分析与减振设计

刘 洋

(石家庄冀星路桥工程设计有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 为解决某主干道十字路口环形钢天桥人致振动过大及舒适度不足的问题, 采用有限元软件分析结构振动特性, 对比主梁刚度、墩梁固结形式及环形闭合与否的影响; 依据德国《人行桥设计指南 EN03》进行舒适度评价; 针对竖向基频不满足国内规范限值的情况, 设计调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)进行减振控制。结果表明主梁刚度与支承形式对自振频率影响显著, TMD有效控制了竖向峰值加速度响应, 使其满足舒适度要求, 可为同类环形钢天桥的设计与振动控制提供借鉴。

关键词: 环形钢天桥; 减振设计; 舒适度分析; TMD

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0283-05

Pedestrian Comfort Analysis and Vibration Mitigation Design for Circular Steel Overpass

LIU Yang

(Shijiazhuang Jixing Road and Bridge Engineering Design Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To address the issues of excessive human-induced vibration and insufficient comfort in a circular steel overpass at a major road intersection, the finite element software is used to analyze the structural vibration characteristics, and to compare the impacts of girder stiffness, pier-beam consolidation forms, and whether or not the ring is closed. Comfort is evaluated according to the German Guideline for the Design of Footbridges EN03. In response to the vertical fundamental frequency not meeting the domestic code limits, a Tuned Mass Damper (TMD) is designed for vibration control. The results indicate that the girder stiffness and the support forms significantly influence the natural frequencies, and the TMD effectively controls the vertical peak acceleration responses, meeting the comfort requirements, which provides a reference for the design and vibration control of similar circular steel overpasses.

Keywords: circular steel overpass; vibration reduction design; comfort analysis; TMD

0 引 言

环形天桥造型独特, 具有流畅的曲线和独特的空间形态, 常成为城市地标。与直线桥不同, 环形结构在竖向荷载作用下, 会产生显著的弯矩、扭矩和径向水平力的耦合作用, 属于弯、剪、扭复合受力结构; 在温度作用下, 不同的边界条件和墩柱刚度对下部结构会产生较大影响。环形闭合体系打破传统梁式结构的单向传力路径, 低阶振型呈现竖向弯曲、径向对称变形、整体扭转等多模态密集分布特征, 极易与行人步频发生多阶共振耦合。行人沿环向连续行走时, 荷载作用点位置、方向(切向/法向分量动态转换)及相位持续变化, 形成非平稳移动激励。环形路

径更易诱发群体行走的“环向同步效应”, 即行人无意识调整步频以适应结构振动, 导致荷载能量在特定频率持续累积放大。这使得内力分析和减振设计更为复杂。

近年来, 随着城市交通发展, 环形人行天桥因能有效分离人车流线、实现多方向交通衔接而在主干道交叉口得到广泛应用。这类结构往往采用大跨径轻柔设计, 结构基频较低^[1]。实际工程中, 许多人行桥的竖向自振频率低于《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[2](以下简称国内规范)2.5.4条规定的3 Hz限值。《城市道路交通工程项目规范》(GB 55011—2021)^[3]废止的现行工程建设标准相关强制性条文中包含上述规范2.5.4强条。因此大跨人行桥在不满足“频率限值”时, 应对其进行舒适度评价, 关注对“加速度的限制”。

在工程实践中, 结构固有频率并不是一个绝对

收稿日期: 2026-01-21

作者简介: 刘洋(1993—), 男, 学士, 助理工程师, 从事桥梁设计工作。

的离散点,而是一个带有一定带宽的峰值(受阻尼影响)。因此,需要判断激励频率是否落在了结构的“敏感区”而设定一个避让裕度。如果外界激励频率与结构固有频率两者的偏差小于15%,标记为“高风险”,需要进一步评估结构的最大振动加速度;如果大于20%,通常认为是安全的,即不存在振动问题^[4]。成年人正常行走的步频(即每秒钟迈步数)为1.5~2.4 Hz^[5]。对应人行步频避让裕度最大值为2.88 Hz,因此国内规范从避让结构“敏感区”角度考虑取限值3 Hz。

国内学者对人行桥振动问题进行了广泛研究。张东等^[6]认为环形人行天桥结构竖向自振频率成为设计中的关键因素。童景盛等^[7]认为设计中考虑支座刚度及基桩情况下的基频比在一般支撑条件下和经验公式所得的基频更接近于实际工况要求。王犇等^[8]对不规则景观天桥的不同连接形式、不同约束条件以及结构主梁梁高不断增大情况下的天桥整体舒适度进行了研究。许立言等^[9]采用调整结构自振频率和限制加速度响应相结合的方法,对某大跨度钢-混凝土组合人行天桥进行了人行舒适度分析。乔建刚等^[10]对人行桥舒适度设计进行探讨,认为大跨人行桥竖向基频通常难以满足我国人行天桥规范要求,可参照国外规范进行舒适度评价。某空间曲梁景观步行桥的分析表明,当结构基频不能满足规范要求时,需进行舒适性评估和减振设计^[11]。环形多跨连续钢结构人行栈桥的振动舒适度分析指出,加速度响应与结构竖向自振频率、荷载函数、加载位置等因素密切相关^[11]。调谐质量阻尼器(TMD)在大跨人行景观桥减振中的应用研究表明,TMD能有效降低人致振动下的加速度峰值,满足舒适度要求^[12]。田云雨等^[13]对设置调谐质量阻尼器的结构进行现场实测,TMD振动频率实测值与设计值非常接近,从而可确保实际的减振效果。孙从永等^[14]以某大型人形天桥钢结构工程为例,采用有限元软件对人行天桥设置TMD前后的桥梁频率进行分析,通过现场的TMD安装及减振效果调试,满足规范规定的舒适度要求。

本文以某环形钢天桥为工程背景,针对其基频不满足规范要求的问题,系统研究不同设计方案,对比分析主梁刚度、墩梁连接方式、环形闭合与否3种因素对结构自振特性的影响,以及设置TMD对舒适度的改善效果,提出经济合理的解决方案。

1 工程概况

本环形钢天桥位于商业中心繁华路段交叉口,连接交叉口四个方向的人行道。主桥宽5.5 m,高1.6 m,采用单箱单室箱形截面,跨径为4跨40.4 m+33.2 m+40.4 m+33.2 m椭圆环形连续钢箱梁,长轴半径25.3 m,短轴半径21.5 m,每跨对应圆心角分别为102°、79°、101°、78°,设置7条梯道,主桥桥墩采用花瓶墩,主桥桥墩下接承台及桩基础。这种结构形式使得天桥在空间利用上较为高效,能够适应复杂的城市地形和交通布局。封闭环形设计不仅美观,而且在引导行人流动方面有一定的优势。桥梁总体布置见图1和图2。

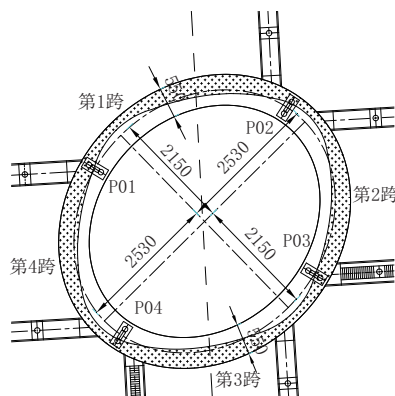


图1 桥梁总体布置图1(单位:cm)

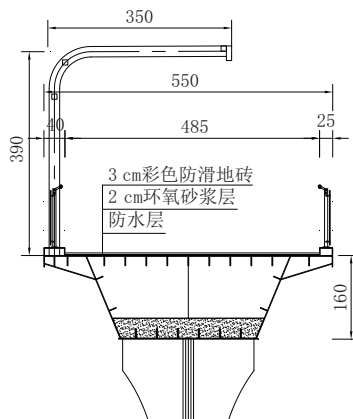


图2 桥梁总体布置图1(单位:cm)

2 结构计算与分析

2.1 有限元模型建立

采用有限元软件建立全桥有限元模型。主梁和下部均采用梁单元模拟。边界条件初始设计为橡胶支座连接。为精确计算主桥自振特性。计算模型考虑了梯道及雨棚结构的影响见图3。

2.2 动力特性分析

在模态分析中,Ritz向量法与子空间迭代法均为

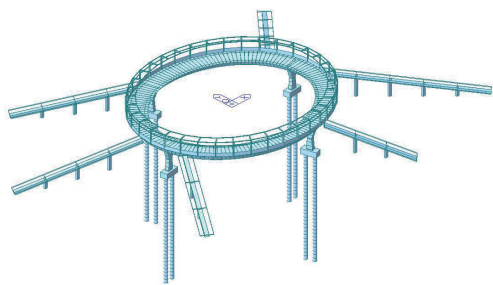


图3 全桥有限元计算模型

求解大型结构矩阵特征值问题的有效方法。两者计算精度相差不大,均能够通过迭代过程逐步逼近真实特征值和特征向量,且收敛过程平稳。Ritz 向量法在效率上通常优于子空间迭代法,而两者在精度上相近,因而本桥模态分析采用 Ritz 向量法,提取前 3 阶频率和振型(见表 1)。

表 1 主要振型结果

阶数	频率/Hz	振型特点	规范限值/Hz	是否满足
1	1.70	竖向振动	3	否
2	2.63	竖向振动	3	否
3	3.46	竖向振动	3	是

3 动力特性影响因素

3.1 结构刚度

调整梁高是改变天桥结构刚度和自振频率的重要手段之一。通过有限元软件对不同梁高下的天桥结构进行模态分析,得到其竖向自振频率。随着梁高的增加,结构刚度增大,竖向自振频率也相应提高。图 4 为不同梁高的基频变化。

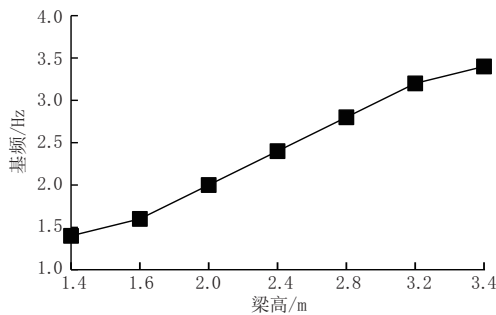


图4 结构自振频率图

结果表明,梁高增加至 3.4 m 时,基频达到 3.09 Hz,可满足规范要求。但梁高增加导致钢材用量显著增加,梯道规模增加,经济性较差,且影响桥梁美观。

3.2 墩梁固结方式

调整墩梁连接方式可改变结构边界条件,影响整体刚度。考虑不同固结墩数,分析其对自振基频的影响。当固结个数增加时,结构的整体刚度提高,竖向自振频率也相应增加。同时,墩梁固结能有效

解决支座脱空问题。在挠度方面,墩梁固结结构的最大挠度较连续梁结构有所减小,在人群荷载作用下的挠度均远小于 1/600 跨度的限值,挠度不控制设计。图 5 为不同数量墩梁固结情况下的基频变化。

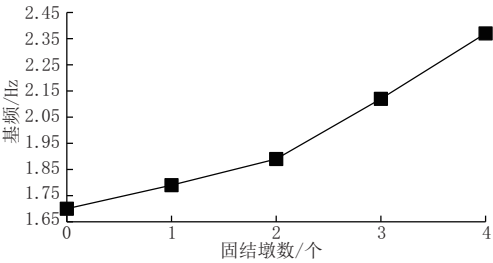


图5 结构自振频率图

结果表明,采用墩梁全固结结构可较大幅增加结构竖向自振频率,基频达 2.37 Hz。墩梁固结方案经济性好,但会对桥墩产生较大水平力和弯矩,需验算桥墩压弯承载能力。

3.3 环形闭合方式

通过对比连续闭合结构和在 1 号墩、椭圆环短轴 1/3 号墩、椭圆环长轴 2/4 号墩分别设置伸缩缝形成非闭合多跨连续梁结构四种闭合形式,分析其对结构主要静、动力计算的影响见表 2。

表 2 结构计算结果表

闭合形式	连续 闭合	短轴 1/3 号墩设缝	长轴 2/4 号墩设缝
自振频率/Hz	1.70	1.46	1.44
人群荷载挠度/mm	17	26	31
恒载支点最大竖向弯矩/(kN·m)	5 899	9 493	10 371
温度作用最大水平弯矩/(kN·m)	193	513	545

结果表明,环形天桥形成连续闭合后,自振频率略微上升,对动力特性影响不大;抗弯、抗扭刚度显著提高;虽然连续闭合结构温度作用下内力更低,但应注意施工阶段闭合过程中,结构可能存在安装偏差或强制合龙导致残余应力。

4 舒适度评价

根据上述研究,本天桥拟采用经济梁高 1.6 m,采用支座连接、连续闭合形式,初步动力分析表明,其竖向基频为 1.70 Hz,低于规范 3 Hz 限值,应进行人致振动舒适度验算。通过比较国内外各规范^[15],推荐采用德国《人行桥设计指南 EN03》^[16](以下简称德国规范)进行人致振动舒适度评价。德国规范采用限制动力响应值法进行控制,指通过计算结构在某种激励下的最大振动响应,并按表 3 的限值来判定竖向振动的行人舒适度。

表 3 德国规范行人舒适度定义

等级	舒适度	加速度/(m·s ⁻²)
1	很舒适	<0.5
2	中度舒适	0.50 ~ 1.00
3	不舒适	1.00 ~ 2.50
4	不可忍受	>2.50

本桥采用有限元软件进行建模计算,桥面人群密度结合本桥位于商业中心人流量大的特点取德国规范行人交通级别表中交通异常繁忙工况 1.5 人/m²,按德国规范单人步行荷载模型作为时程荷载加载到计算模型中。时程荷载加载方向与结构一阶振型方向一致。取各跨跨中计算该点处的动力响应,峰值加速度最大值出现在第 1 跨,其跨中振动加速度时程曲线见图 6。

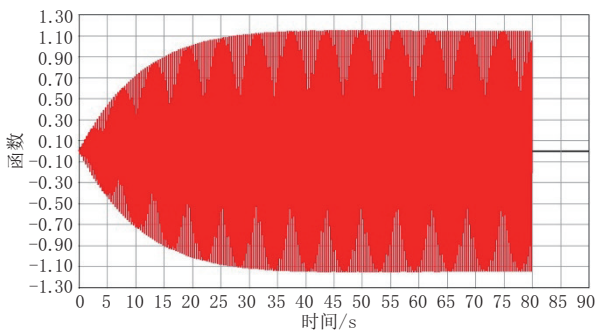


图 6 第 1 跨跨中振动加速度时程曲线

结果表明,本桥结构振动加速度响应峰值为 1.15 m/s²,按德国规范行人舒适度定义可知本桥舒适度评价为不舒适。需要进一步做减振设计。

5 TMD 减振设计

TMD 通过共振原理吸收主结构振动能量,降低动力响应。TMD 由质量块、弹簧及阻尼器三部分组成。当天桥受到外界激励(如行人荷载)而振动时,TMD 会产生与其自振方向相反的惯性力,从而减弱天桥振动。TMD 参数需要根据天桥的具体结构特性和特定振动频率进行设计。

通常主结构会存在结构阻尼, Ioi、Ikeda 提出在正弦移动荷载作用下有阻尼结构的 TMD 系统参数优化计算公式。当以加速度峰值最小化为优化目标时,TMD 系统参数优化的计算公式如下:

$$\tilde{\alpha}_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu}} + (0.096 + 0.88\mu - 1.8\mu^2)\xi_s + (1.34 - 2.9\mu + 3\mu^2)\xi_s^2 \tag{1}$$

$$\tilde{\xi}_{s_{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu(1 + 0.49\mu - 0.2\mu^2)}{8(1 + \mu)}} + (0.13 + 0.72\mu + 0.2\mu^2)\xi_s + (0.19 + 1.6\mu - 4\mu^2)\xi_s^2 \tag{2}$$

式中: $\tilde{\alpha}_{opt}$ 为调谐装置的最优频率比; μ 为 TMD 系统与主结构的质量比; $\tilde{\xi}_{s_{opt}}$ 为调谐装置的最优阻尼比; ξ_s 为结构阻尼比。上述计算公式在满足 $0.03 < \mu < 0.40$ 和 $0 < \xi_s < 0.15$ 范围内误差小于 1%。本桥 μ 取 0.05, ξ_s 取 0.004。根据式(1)和式(2)确定 TMD 系统的最优频率比及最优阻尼比,并计算 TMD 系统的参数公式如下:

$$f_d = \tilde{\alpha}_{opt} \times f_s \tag{3}$$

$$m_d = \mu \times \tilde{M}_j \tag{4}$$

$$k_d = (2\pi f_d)^2 \times m_d \tag{5}$$

$$c_d = 2m_d \times 2\pi f_d \times \tilde{\xi}_{s_{opt}} \tag{6}$$

式中: f_d 为 TMD 装置的频率,Hz; f_s 为受控振型的频率,Hz; m_d 为 TMD 的质量,kg; $\tilde{M}_j$ 为第 r 阶受控振型的模态广义质量,kg; k_d 为 TMD 的刚度,N/m。 c_d 为 TMD 的阻尼,N·s/m。表 4 为 TMD 系统的参数取值。

表 4 TMD 系统参数取值

结构	m_d /kg	k_d /(N·m)	c_d /(N·s·m ⁻¹)
质量块	2 817	—	—
弹簧	—	778 430	—
阻尼器	—	—	12 727

根据表 4 在有限元软件内置一般连接特性中设置 TMD 系统参数,对结构进行动力时程分析。把 TMD 系统设置在每跨的跨中节点,得到第 1 跨最大峰值加速度时程曲线见图 7。

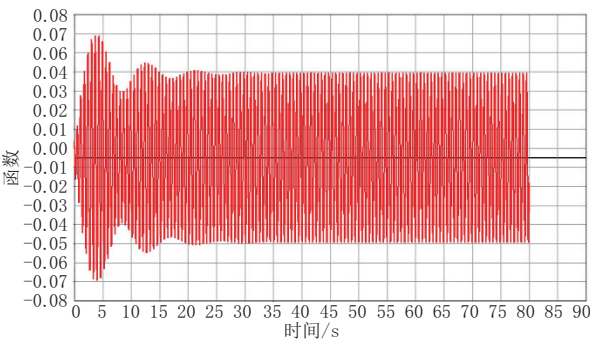


图 7 第 1 跨跨中振动加速度时程曲线

结果表明,设置 TMD 系统后,跨中节点竖向峰值加速度降低到 0.06 m/s²,结构竖向加速度峰值最大降低 95%,TMD 减振器对天桥的人致振动有明显削弱作用。按德国规范行人舒适度要求可知本桥舒适度评价为很舒适。

6 结 语

本文针对位于某主干道交叉口的环形钢天桥,开展了人行振动舒适度分析与减振设计研究。对比

分析主梁刚度、墩梁连接方式、环形闭合与否3种因素对结构自振特性的影响,以及设置TMD对人行舒适度的改善效果,得出以下结论:

(1)现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)^[6]对人行天桥自振频率不低于3 Hz的单一要求,已无法满足当下大跨人行钢结构天桥大规模建设的需求,人行天桥舒适度评价指标除自振频率外,希望引入竖向加速度动力响应作为评价指标。

(2)增加梁高可以提高结构的竖向自振频率,但会大幅增加建设成本和结构自重,工程实践中受到限制。

(3)采用墩梁固结结构可较大幅增加结构竖向自振频率,同时可解决支座脱空问题,减小挠度,提高行人舒适度。但注意对桥墩产生的不利影响。

(4)采用连续闭合结构形式可较大幅增加结构抗弯、抗扭刚度,对自振频率影响不大。需注意施工阶段合龙方式产生不利影响。

(5)设置TMD减振器对天桥的振动有明显抑制作用,当人行桥加速度响应不满足规范要求时,可通过安装TMD控制结构动力响应,使天桥舒适度满足要求。

(6)本研究仍具有一定局限性,舒适度评价标准的不统一和适用性问题一大难点。目前,我国针对人行桥舒适度的评价体系尚不完善,本文建议可参考德国规范的相关标准,但如何与国内工程实践相结合仍需深入探索。特别是在振动感知阈值、可接受振动水平以及步行习惯等主观因素方面。此外,环形天桥的多维耦合振动特性使得单一方向的振动

限值难以全面反映实际舒适度,需要建立多指标综合评价体系,而这方面的研究尚处于起步阶段。

综上所述,对于环形大跨钢结构天桥设计,可选取经济合理的梁高,采用墩梁固结和环形闭合形式,根据天桥的具体情况选择合适的TMD参数做减振设计,使其舒适度评价满足要求。

参考文献:

- [1] 蒋长江,梁俊松.空间曲梁景观步行桥人致振动分析及减振设计[J].城市道桥与防洪,2019(8):76-80.
- [2] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] GB 55011—2021 城市道路交通工程项目规范[S].
- [4] API 674—2010(R2016) American Petroleum Institute[S].
- [5] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [6] 张东,李琳,王玲玲.圆环形人行天桥关键技术分析[J].公路,2016(4):101-103.
- [7] 童景盛,陈红亮,李盈斌.大跨度环形人行天桥支座刚度对基频的影响分析[J].特种结构,2016,33(8):68-73.
- [8] 王彝,程京伟.钢结构人行景观天桥的设计与研究[J].市政技术,2021,39(5):46-51.
- [9] 许立言,陶慕轩,樊健生,等.大跨度钢-混凝土组合人行天桥舒适度分析[J].建筑结构学报,2016,37(5):138-145.
- [10] 乔建刚,魏孟春,刘博海,等.大跨度人行钢拱桥人致振动舒适度评价[J].佳木斯大学学报,2017,35(1):6-9.
- [11] 刘博文,温凌燕,康志宏,等.环形多跨连续钢结构人行栈桥振动舒适度分析[J].特种结构,2020(3):96-100;115.
- [12] 王言泽,施卫星.大跨人行景观桥的人致振动控制研究[J].结构工程师,2022,38(1):61-66.
- [13] 田云雨,张萍,李晓明.TMD在某环形人行天桥项目中的振动控制与实测研究[J].上海建设科技,2024(2):102-105.
- [14] 孙从永,刘明路,王馥琴,等.钢结构[J].佳木斯大学学报,2016,31(5):52-54.
- [15] 宋龚.大跨度人行桥舒适性分析和TMD减振设计[J].城市道桥与防洪,2021(7):118-120.
- [16] EN03—2008 Design of footbridge guideline[S].