

大跨度钢桁架人行桥舒适度探讨

杜洪亮

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要: 对大跨度钢桁架人行桥的约束条件、桁架高度、人行道位置、桁架杆件截面尺寸等因素进行分析, 从中选出对人行桥的自振频率影响最敏感的因素。结合实际情况优化设计方案, 人行桥的自振频率不满足中国相关规范规定时, 通过对国际主流规范的分析, 发现德国规范操作性强和适用性广, 故可以按照德国规范对大跨度钢桁架人行桥进行舒适性分析, 笔者对不满足德国规范舒适性要求的情况, 进行了阻尼器设计, 并提出了调频桥面板的设计展望。

关键词: 人行桥; 大跨度; 钢桁架; 舒适度分析; 调频桥面板

中图分类号: U448.11; U448.21+1

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)03-0071-06

Discussion on Comfort Level of Long-span Steel Truss Footbridge

DU Hongliang

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 611130)

Abstract: This paper analyzes the constraint conditions, truss height, sidewalk location, truss rod section size and other factors of long-span steel truss footbridge, selects the most sensitive factors affecting the natural vibration frequency of footbridge, and optimizes the design scheme based on the actual situation. However, when the natural vibration frequency of footbridge does not meet the relevant Chinese regulations, through the analysis of international mainstream norms, it is found that the German code has strong operability and wide applicability, so the comfort analysis of long-span steel truss footbridge can be carried out according to the German code. In the case of not meeting the comfort requirements of the German code, the damper design is carried out, and the design prospect of frequency modulation bridge panel is put forward.

Keywords: Footbridge; Long-span; Steel truss; Comfort analysis; Frequency modulation bridge panel

0 引言

钢桁架作为一种传统的桥梁结构, 在铁路桥梁中应用较成熟与普遍, 在公路行业中也稳步发展。近年来随着城市建设的蓬勃发展, 城市天桥等人行桥工程的发展同样采用大跨度结构, 钢桁架结构以其特有的跨越优势逐渐被应用于人行桥中。大跨度钢桁架人行桥因其桥宽较窄、跨宽比大、刚度小、变形及动力特性与车行桥相差较大, 而使高柔性问题变得较为突出, 从而使设计内容上有别于公铁桥梁。因此国内外学者对此进行了大量研究, 人行荷载参数是进行振动问题研究的基础资料, 而步频是其中最为关键的参数。国外学者通过相关试验分析和统计得出了正常行走的步频在 1.8~2.5 Hz 之间^[1-4]; 中国的陈政清教

授等人对 1 万多人次进行了步行状态观测实验, 经过统计分析得到行人步频平均值为 1.8 Hz 左右^[5]; 从 1961 年英国的 Harper 等人对步行力进行试验研究并经统计分析得出了步行力特点开始^[6], 国内外学者进行了很多研究, 取得了一系列经典成果, 其中包括行人荷载模型都可以表达为几个傅利叶级数的和的形式等重要结论; Yong 在总结多人研究成果的基础上提出了行人荷载系数与步频的关系式^[7]; 国内外学者还对双向行人模型、人车共存模型及不同材质桥梁上应用了相关荷载模型^[8-11]; 李红利博士利用刚臂模拟人与桥之间的联系, 利用模态累加法考虑人桥耦合问题, 并利用强迫振动识别理论实现了人桥耦合反馈^[12-13]; 西班牙学者 Alonso 利用人一桥相互作用模型对人桥间的能量交换进行研究^[14]。

笔者首次全面剖析大跨度钢桁架人行桥舒适

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司科研项目
(大跨度钢桁架人行桥成套关键技术研究: P55522)

度影响因素,并从实际应用的角度出发给出最合理方案。此文首次提出采用调频桥面板解决人行桥舒适度问题。

1 项目概况

该项目横跨城市内河,河道两侧设有堤坝,根据相关部门要求需采用一跨过河,且需满足人行和给水管道敷设要求。结合现场实际情况,桥梁

布置采用 1.0—90.0 m 钢桁架,桥宽 5.5 m,桁高为 4.5 m。上下弦杆和腹杆采用“工字形”截面,平联采用“T 形”截面,桥梁刚度控制设计。

2 自振频率影响因素及敏感性分析

2.1 边界条件的影响

对简支钢桁架桥的四个支座位置进行如下边界条件的模拟,约束条件影响分析见表 1。

表 1 约束条件影响分析表

约束位置	编 号							
	1		2		3		4	
0 号桥台约束情况	dxdz	dz	dxdydz	dydz	Rydxdydz	Rydydz	RxRydxdydz	RxRydydz
1 号桥台约束情况	dxdydz	dydz	dxdydz	dydz	Rydxdydz	Rydydz	RxRydxdydz	RxRydydz
自振频率 /Hz	1.530		1.530		1.547		1.547	
影响比例 /%	0		0		1.1		1.1	

约束位置	编号							
	5		6		7			
0 号桥台约束情况	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz
1 号桥台约束情况	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz	RxRyRzdxdydz
自振频率/Hz	1.547		1.847		1.929			
影响比例 /%	1.1		20.5		21.6			

注:dx、dy、dz、Rx、Ry、Rz 分别表示对相应支座节点的 XYZ 方向的平动自由度和绕 XYZ 轴的转动自由度进行约束

小结:支座的自由度对竖向自振频率的影响程度不同,纵桥向的水平自由度对桥梁结构的竖向基频影响最大。

针对该项目而言,因跨度较大且主梁为钢结构材料,约束 x 方向水平位移后导致温度应力过大,对于该项目不是最佳解决方案。

2.2 桥面板位置影响

因该桥为给水管桥与人行桥的结合,桥面板的设置位置可以有两个布置方案。方案一,将给水管设置在人行道板上;方案二,将给水管设置在桁架弦杆横梁上,在腹杆中间某个位置设置独立的人行道板层。针对两种方案进行自振频率影响分析,桥面板位置影响表见表 2。

表 2 桥面板位置影响表

项目	自振频率 /Hz
人行道板与管道同高程	1.532
人行道板位于腹杆上	1.512
影响率 /%	-1.292 558 747

腹杆中间增加一层桥面板导致结构质量增加,使得自振频率降低。方案一结构自振频率较高,给水管道检修维护较方便,但是占用人行道有效使用空间,且影响美观。方案二可以遮挡给水管,保证景观效果,行人也更加方便,且自振频率仅稍有降低,比例较小。经综合比较采用方案二。

2.3 桥面板刚度影响

人行道板铺设于钢桁架腹杆中间横梁上,计算模型中一般仅考虑其质量分布影响。为精细计算该桥的实际自振频率,可考察桥面板刚度对自振频的贡献。

桥面板刚度影响表见表 3。桥面板刚度对自振频率影响较小,且桥面板沿桥长方向为非连续构件,即计算中可不考虑桥面板刚度影响,仅考虑其质量分布。

表 3 桥面板刚度影响表

项目	自振频率 /Hz
未考虑桥面板刚度影响	1.512 198
考虑桥面板刚度影响	1.523 394
影响率 /%	0.740 379 236

2.4 构件截面尺寸影响

构件截面尺寸对结构的刚度和质量影响较大,分别对相同弦杆改变腹杆尺寸及相同腹杆改变弦杆尺寸进行考察,桁架弦杆及腹杆截面尺寸对自振频率影响见图 1。

随着弦杆截面尺寸增大,自振频率随之增大,但贡献率逐渐降低。随着腹杆截面尺寸的增大,自振频率缓慢减小,影响率基本不变。

通过改变截面尺寸的方式调整结构自振频率,应优先选择弦杆,同时尽可能减小腹杆截面尺

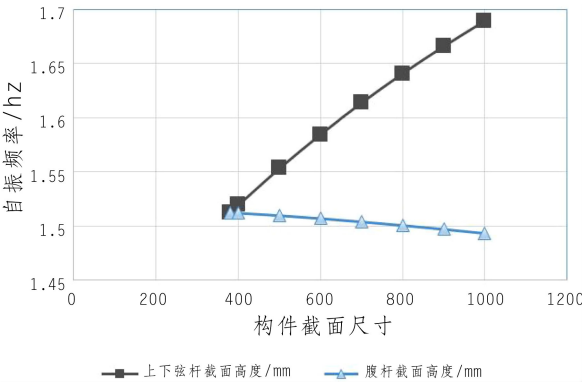


图 1 桁架弦杆及腹杆截面尺寸对自振频率影响

寸,该方案增加了结构质量,对刚度贡献较低,代价较大,不是最优方案。

2.5 桁架高度影响

对桁架刚度影响最大的是桁架的高度,通过对桁架不同的高度进行分析。

桁架高度对自振频率影响见图 2,竖向自振频率随着桁架高度增加而缓慢增大,增大速率逐渐变缓,最后由于质量增加过多而抵消自振频率增大,出现减小现象;横向自振频率随着桁架高度增大而降低。因该桥位于城市中心区域,桁架高度太高会增大周围居民的压抑感,故维持桁架初始尺寸不变。

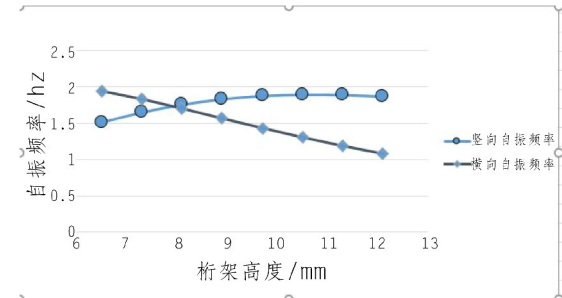


图 2 桁架高度对自振频率影响

桁架横联高度对自振频率影响见图 3,在桁架高度增大的同时增大横联的高度,自振频率均出现明显减小;对竖向自振频率影响最大。

人行道板位置对自振频率影响见图 4,在桁架高度增大的同时提高桥面板的位置,自振频率均出现明显减小;其变化趋势与横联的影响类似,对竖向自振频率影响最大。因该桥需要预留给排水管日常检修空间,故该桥的桥面板尽可能放置在给水管上最小的距离内。

由上图数据可知,提供刚度的质量应尽可能

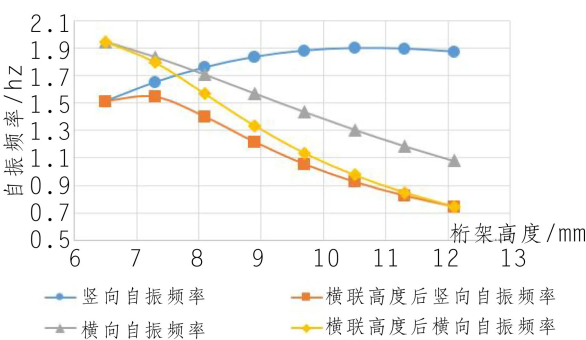


图 3 桁架横联高度对自振频率影响

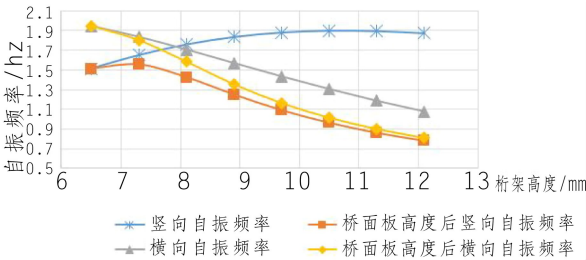


图 4 人行道板位置

分布在桁架上下弦杆处,才能使材料的效用最大。

3 舒适度分析

考虑了以上各种因素后也无法满足现行人行天桥与地道设计规范的要求,但国内桥梁规范未规定处理办法。若按照规范要求的 3 Hz 进行控制桥梁的自振频率,通过以上分析可知效率较低,且代价较大。此文拟通过国际上通用的规范中寻求解决办法,国际规范对此的考虑方式见表 4。

表 4 国际规范对桥梁自振频率的考虑方式

编号	规范名称	考虑方式
1	英国 BS5400	规定了单人行荷载模型作用下的结构最大竖向响应,并用最大加速度与人体运动测试实验得到的峰值加速度进行比较
2	中国桥梁规范	规避敏感频率法
3	欧洲规范	对人行桥的竖向及侧向的舒适性进行分析,并给出了不同振动形式对应的舒适度指标限值
4	瑞典规范	采用竖向人群荷载模型进行竖向加速度计算,采用加速度平方根进行舒适度判别
5	国际标准化组织 ISO 规范	给出了荷载模式并推荐了四种工况考虑人行桥的响应
6	德国规范 EN03	“规避敏感频率法”和“响应限值法”相结合的方式来处理舒适度问题,其对敏感区内的行人交通级别进行划分,再按规定的荷载模型进行分析

经比较分析,德国规范 EN03 适用性较强,

应用较广,操作性也较强,故该桥应用此规范进行设计。

3.1 求解自振频率

采用 Midas Civil 建立全桥三维有限元模型,

求解结构自振频率。结构横向基频见图 5,横向基频为 1.94 Hz,大于德国规范的要求 1.2 Hz,不需要进行横桥向舒适度分析。结构竖向基频见图 6,竖向基频为 1.51 Hz,需要进行舒适度分析。

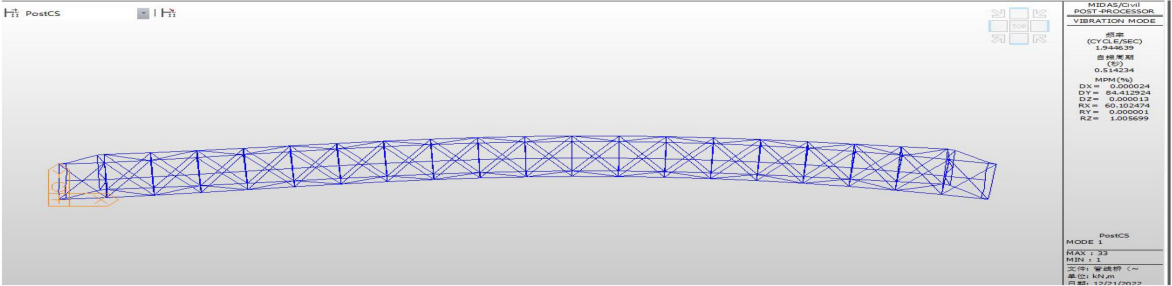


图 5 结构横向基频

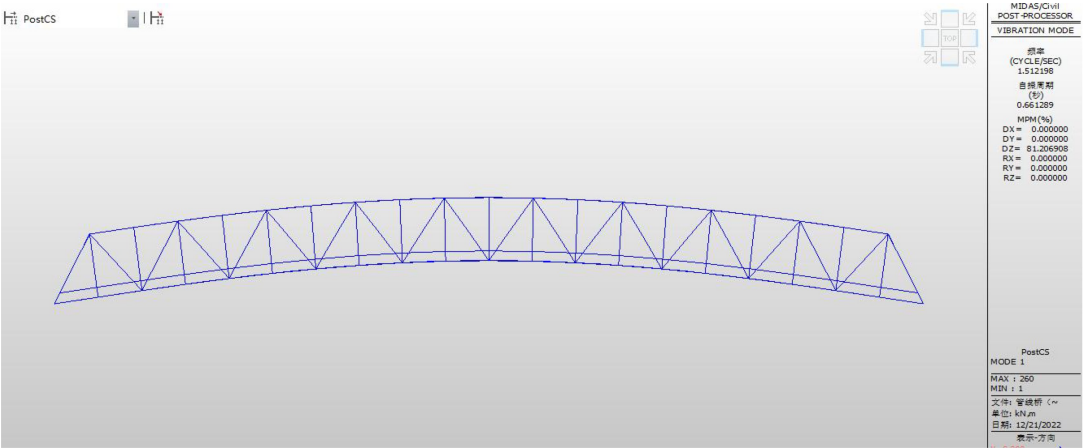


图 6 结构竖向基频

3.2 确定人行荷载模型函数

按照规范推荐的公式进行荷载模型表达式求解。公式为:

$$P(t)=P\times\cos(2\pi f_s t)\times n'\times\Psi$$
$$=280\times\cos(2\pi\times1.51\times t)\times n'\times\Psi$$

式中: P 为单人产生的荷载幅值,根据规范取竖向 280 N; f_s 为步频,按人行桥基频为 1.51 Hz 取值; n' 为等效行人密度, s 为加载面积,按下式计算:

$$n'=\frac{1.85\sqrt{n}}{s}=\frac{1.85\sqrt{(s\times d)}}{s}$$
$$=\frac{1.85\sqrt{(90\times5.5\times1.5)}}{90\times5.5}=0.1018$$

Ψ 为折减系数,根据规范换算得 0.5778;参数带入规范公式得:

$$P(t)=P\times\cos(2\pi f_s t)\times n'\times\Psi=280\times\cos(2\pi\times1.51\times t)\times0.1018\times0.5778=16.469\times\cos(2\pi\times$$

$$1.51\times t)\text{ N/m}^2$$

3.3 求解分析

该桥为区域内连接两岸的唯一人行桥,根据人流量分析及相关调查,得设计参数见表 5。

表 5 设计参数

交通级别	行人密度 d $/(P\cdot\text{m}^{-2})$	特点	舒适度类别
TC5	1.5	异常繁忙,拥挤、行走	CL2
		不舒适,不能自由	
		选择步伐	

人行荷载应根据基频对应模态的形状进行加载,人群荷载加载图示见图 7。

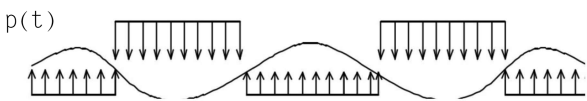


图 7 人群荷载加载图示

3.4 基本结构的舒适度评价

选择舒适度控制关键点,对舒适度进行判别。跨中节点的加速度结果见图 8,跨中节点最大加

速度为 3.127 m/s², 不满足德国规范对舒适度要求, 需要进行结构振动控制。

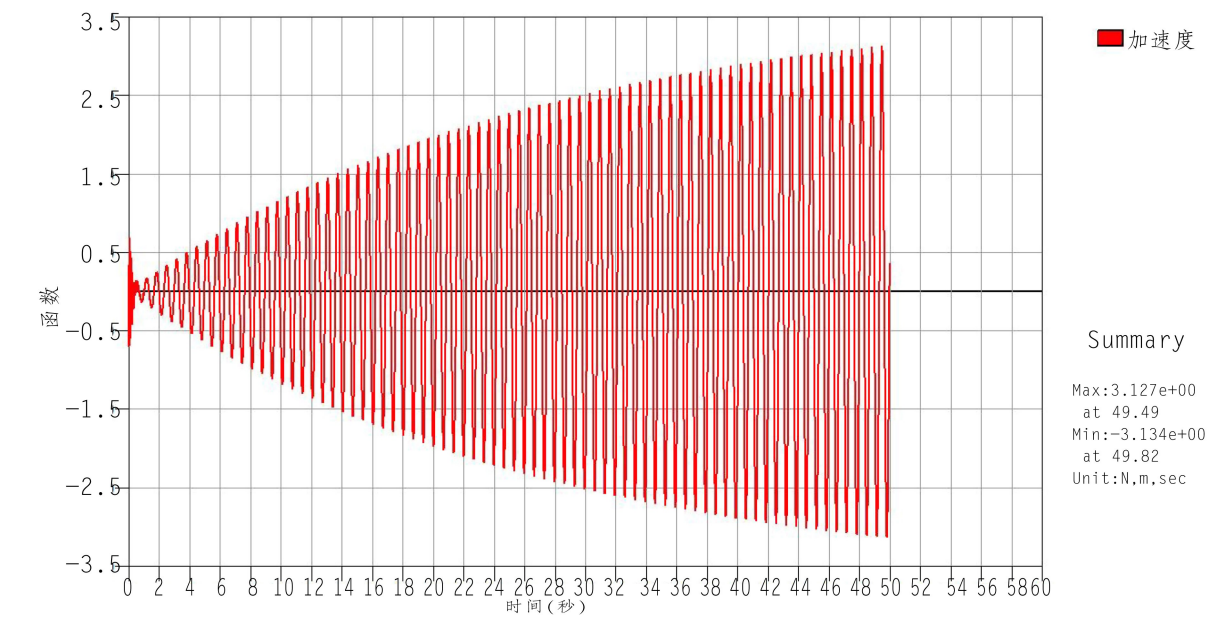


图 8 跨中节点的加速度结果

3.5 舒适度控制设计

该项目采用常用的增设 TMD 阻尼器的方案。根据 Den Hartog 建立的无阻尼结构体系 TMD 控制最优参数公式, 其计算参数如下:

μ 为 TMD 质量与主质量之比, 其值一般为 0.01~0.05, 取 0.04; TMD 与主结构的频率比 $\lambda_{opt} = \frac{1}{1+\mu} = \frac{1}{1+0.04} = 0.9615$; m_0 为主结构阵型模态质量, 经计算其值为 28 537 kg; 则 TMD

质量 $m_d = \mu m_0 = 0.04 \times 28\,537 = 1\,141.48\text{ kg}$; 主质量固有角频率 $\omega_0 = 2\pi f = 9.4876$; 最优刚度 $k_{opt} = \lambda_{opt}^2 \omega_0^2 m_d = 94\,990.38\text{ N/m}$; 最优阻尼比 $\zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} = 0.1155$;

最优阻尼系数 $C_{d,opt} = 2\zeta_{d,opt} \lambda_{opt} \omega_0 m_d = 2\,405.39\text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。

增设 TMD 阻尼器后跨中节点, 跨中节点增设阻尼器后的加速度结果见图 9。

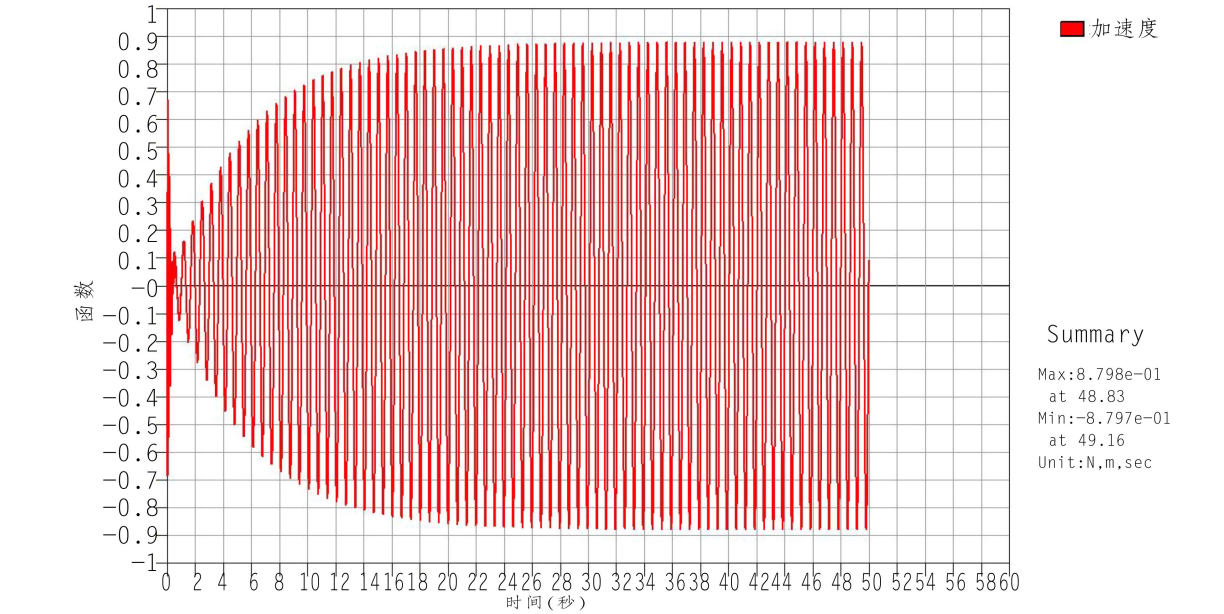


图 9 跨中节点增设阻尼器后的加速度结果

增设阻尼器后结构跨中的加速度为 0.87 m/s² 满足德国规范对舒适度类别 CL2 的加速度要求。

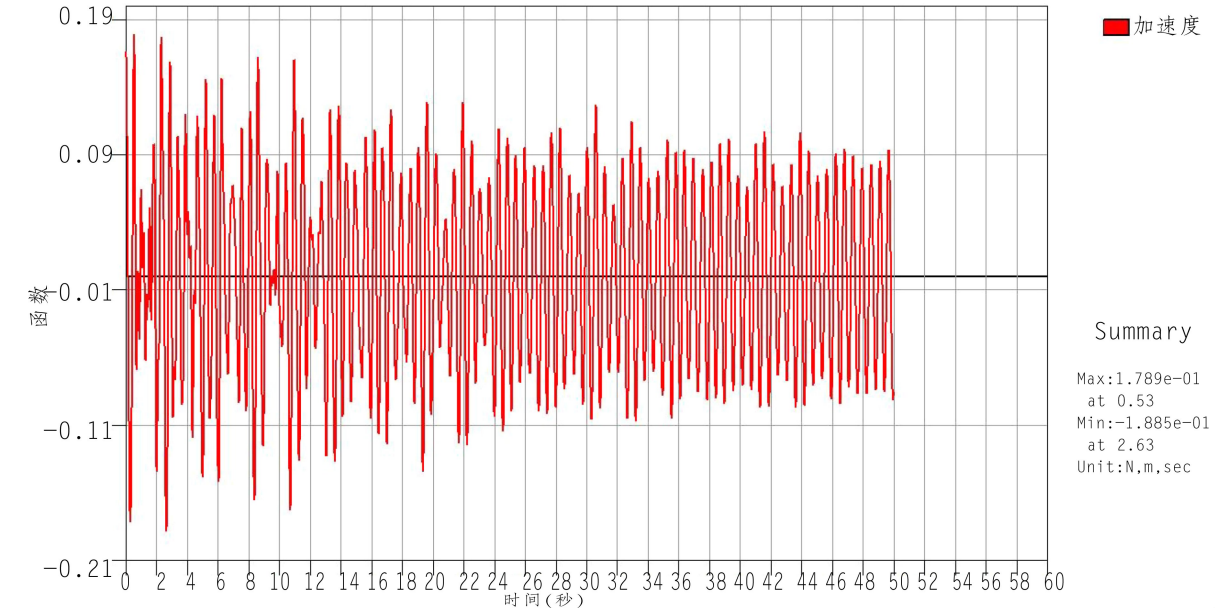


图 10 跨中节点增设调频装置后的加速度结果

跨中节点增设调频装置后的加速度结果见图 10,其可以满足德国规范对舒适性的要求。

3.7 变频桥面板理论分析

行走在人行桥上的行人是具有独立思想且可以接收外界变化,并可以产生个性化响应的主观能动性个体。行人潜意识会根据周围人的行走步态调整自己的步态,形成“一致”现象,进而形成正常激励,使桥梁结构形成受迫振动。根据此现象可以将人行道板下设不等频率的调频装置或在桥面板上铺设塑胶等柔性铺装,将行人输入人行桥的激励频率改变,使其不形成主导激励,从而改善行人的舒适性。

4 结 论

- (1) 该桥采用增设 TMD 阻尼器的方式降低人致震动的影响,其效果可以满足德国规范的要求。
- (2) 调整边界条件和桁架高度对桁架自振频率的影响较大,在确定方案时可优先采用。
- (3) 将材料分配到桁架上下弦杆轴线位置对提高承载能力和自振频率帮助均较大。
- (4) 当采用整体式、刚度较大的通长设置的桥面板时,应考虑桥面板刚度对桁架自振频率的影响。

3.6 调频桥面板设计

利用减隔震原理,将桥面板与主桥采用弹性调频装置连接后考察其对舒适度的影响。

(5)调频桥面板是解决舒适性问题的一个新的理论构想,其效果和可行性需进一步研究。

参考文献:

[1] S. C. Kerr, N. W. M. Bishop. Human induced loading on flexible staircases[J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 37-45.

[2] Matsumoto Y. /Nishioka T. A study on design of pedestrian over-bridges[J]. Transcations of JSCE, 1972, 12(3): 50-51.

[3] Bachmann H. Vibration Problems in Structures; Practical Guidelines[J]. Basel Brikhauser Verlag, 1 995, 21(2): 31-34.

[4] 付一小. 车辆及人行荷载激励下钢结构人行桥的动力响应分析及舒适度评价[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010, 6-7.

[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, 20-106.

[6] Cross R. Standing, walking running and jumping on a force plate[J]. American Journal of Physics. 1999, 67(4): 304-309.

[7] 张彦伦. 行人—桥梁多自由度系统耦合振动研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013, 10-11.

[8] 李泉, 樊健生, 聂建国. 双向行走激励条件下人行桥的随机振动问题研究[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 74-81.

[9] 温青, 华旭刚, 陈政清. 大跨度双层曲线斜拉桥人致振动试验研究[J]. 振动工程学报. 2016, 29(4): 585-593.

[10] 温青, 华旭刚, 陈政清. 基于稳态简谐激励的人行桥模态参数识别[J]. 中国公路学万方数据报, 2017, 30(2): 98-106.

(下转第 83 页)

重要,为此,项目部可以设立定期的内部会议制度,如每周的合同汇报会和每月的合同专题会议。在这些会议中,定期检查每一项合同事项的进展情况,包括进度款结算、结算争议、变更事项和索赔事项。这样不仅能及时发现并解决问题,而且可以确保每个关键成员都了解项目的最新合同状态。此外,定期的内部会议也可以用来评估合同执行过程中存在的问题、风险、争议的处理情况,以及各方的反应等。这有助于评估合同执行效果,优化合同管理,提高未来的合同执行效率。

与合同相关方的外部交流同样重要,可以通过与工程师、业主等相关方定期举行合同月会,来进一步的沟通和调整合同思路。这样不仅可以及时解决在合同执行过程中遇到的问题,还可以增进彼此之间的相互理解和信任,从而提高合同执行的效率。

此外,所有的文档资料,包括合同本身、变更记录、相关通信记录等,都需要得到妥善归档,以便在将来需要时能够方便查阅。同时,还应根据合同执行情况,及时总结经验教训,用于改进未来的合同管理,通过设立专门的合同闭环管理流程和机制,结合有效的内外部管理,可以更好地监控和管理合同执行过程,提高合同执行效率,保护项目和公司的利益。

5 结 语

(上接第 76 页)

[11] 谢旭,钟婧如,张鹤,等. 人一桥竖向耦合振动计算方法[J]. 振动与冲击,2016,35(5):108-114.

[12] 李红利,陈政清. 考虑荷载随机性的人行桥人致振动计算方法研究[J]. 湖南大学学报,2013,40(10):22-31.

[13] 李红利,陈政清. 人一桥竖向动力相互作用效应理论研究与试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(6):78-87.

(上接第 79 页)

[2] 蔡斌,李国庆. 南欧江六级水电站坝型方案的选择[J]. 水利水电施工,2015,(5):29-31.

[3] 高诗莉. 老挝南欧江六级电站坝型比选分析[J]. 山西建筑,2015,41(32):210-212.

[4] 色拉龙. 水电站坝型选择研究[J]. 红水河,2022,41(4):21-25.

[5] 张峰. 水库大坝坝型选择[J]. 东北水利水电,2008,26(5):1-3.

全过程管控在国际工程商务合同管理中具有重要作用。这是一个全面且系统化的任务,需要强调全过程合同管理理念,并持续提升合同管理人员的专业水平。为了在国际项目竞争中赢得优势,需要把提高管理质量和效率作为核心目标。这包括深入理解合同条款和技术要求、提高合同执行的准确性和有效的风险控制,优化合同执行流程,及时解决相关问题。只有如此,工程项目才能国际化的步伐中稳步前行,实现国际业务可持续发展。

参考文献：

[1] 辛太列. 建筑工程项目中工程监理的合同管理分析[J]. 建材与装饰,2020,(17):151-152.

[2] 何毅. 国际工程商务合同管理要点探析[J]. 现代商贸工业,2022,(3):197-198.

[3] 李欣渝. 浅谈工程施工合同管理在建设过程中的重要性——以城市污水处理厂为例[J]. 建材与装饰,2020,(16):113,116.

[4] 陈松. 探讨合同管理在建筑工程建设管理中的应用[J]. 建材与装饰,2020,(30):210-211.

[5] 陈小峰. 合同管理在建筑工程建设管理中的应用[J]. 散装水泥,2023,(5):50-52.

作者简介：

江伟超(1992-),男,四川成都人,工程师,工学学士,从事公路桥梁工程施工合同与管理工作.

(编辑:廖益斌)

[14] Javier Fernando Jimenez-Alonso, Andres S;iez. Vertical Crowd-Structure Interaction Model to Analyze the Change of the Modal Properties of a Footbridge[J]. Journal of Bridge Engineering,2016,21(8):C4015004.

作者简介：

杜洪亮(1986-),男,吉林人,高级工程师,硕士,从事桥梁设计.

(编辑:廖益斌)

作者简介：

刘 斌(1984-),男,四川仪陇人,高级工程师,硕士研究生,从事水工结构设计及项目管理;

钱小燕(1987-),女,四川资中人,硕士研究生,高级工程师,从事水工结构设计;

刘 朦(1996-),男,湖北孝感人,学士,从事水利水电工程项目管理.

(编辑:廖益斌)