

柔性人行悬索桥在不同结构参数下的动力特性研究

李运生^{1,2}, 薛辉^{1,2}, 张彦玲^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:为研究新兴的人行玻璃悬索桥的动力特性,以某景区人行悬索桥为工程背景,利用Midas Civil 2019建立了三维有限元模型,在经过主缆找形、风缆找形、合并找形得到的成桥模型上通过多重Ritz向量法进行了人行玻璃悬索桥的自振特性研究;然后用控制变量法从主缆直径、加劲梁布置形式、风缆预拉力及约束方式等方面进行了参数动力分析。结果表明,该人行悬索桥基频小,柔性大,但在人流正常通行时不会引起共振破坏;增大主缆直径可提高加劲梁的横弯及竖弯刚度,对加劲梁设置斜撑和加密横梁可提升其抗扭和抗弯刚度;适当增大风缆预拉力、采用三跨两铰和三跨连续约束对全桥刚度有提升作用。

关键词:悬索桥;人行;自振频率;振型;结构参数

中图分类号: U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)02-0010-06

随着旅游业的飞速发展,人行玻璃悬索桥大量兴起,其新颖之处在于加劲梁使用了钢桁架和玻璃面板,但一般柔性较大^[1-3]。由于景观悬索桥兴起时间较短,加之其设计的独特性,各构件参数对桥梁的动力性能影响仍需进一步研究,并且需要一定的经验和数据积累。

在悬索桥的动力性能方面,刘志翁等^[4]人采用子空间迭代法研究了悬索桥的自振特性及散索装置对动力性能的影响;屈国^[5]针对单跨悬索桥主缆的初始平衡状态进行研究,并在此基础上分析了悬索桥成桥状态下的结构动力特性;李林^[6]对加劲梁、主缆、主塔的刚度进行了动力参数分析。West et al^[7]更深层次地探究了桥梁的竖弯特性,分别考虑了加劲梁竖弯刚度、纵移刚度和主缆矢跨比。虽然国内外有不少学者已经对悬索桥的动力特性进行过研究,但对于集大跨度、钢桁梁、地锚式玻璃悬索桥为一体的结构的动力研究较少。

以某景区人行玻璃悬索桥为研究对象,通过建模着重分析桥梁的动力特性,针对参数进行动力研究,最终选取最优设计参数,同时得到不同参数下人行悬索桥的规律变化,为以后的人行玻璃悬索桥提供一定的设计依据。

1 工况简介

该玻璃悬索桥工程位于生态旅游景区内主峰两山体顶部,桥位呈西南-东北走向,横跨山谷两岸。全桥跨径为40 m+192 m+50 m=282 m,矢跨比1/10;吊杆间距顺桥向为3 m,横桥向2.8 m;桥面计算宽度为2.3 m,铺设12 mm+12 mm+12 mm平面特种玻璃;风缆系统与水平面夹角39.02°,长201 m,矢跨比为1/12;两座桥塔塔身高度均为26.4 m。图1为全桥概图。

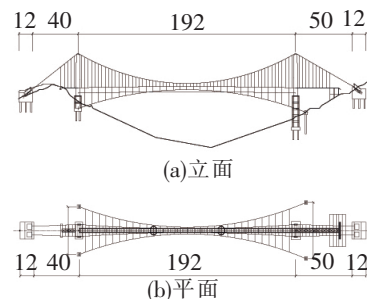


图1 全桥布置图(单位:m)

收稿日期:2020-06-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20200096

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51908382,51778377);河北省自然科学基金青年项目(E2019210311);河北省自然科学基金(E2018210149)

作者简介:李运生(1970—),男,博士,教授,研究方向为组合结构桥梁。E-mail:liysh70@163.com

李运生,薛辉,张彦玲.柔性人行悬索桥在不同结构参数下的动力特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(2):10-15.

2 有限元模型

用 Midas 对该人行悬索桥建立全桥模型,经过主缆找形、风缆找形、合并找形后得到一次成桥模型^[8-9],见图 2。本桥加劲梁采用三跨连续梁方案,梁端分别进行固结和铰接,桥塔与加劲梁相交处用刚性连接实现塔、梁的共同竖向移动,边界条件如表 1 所示。

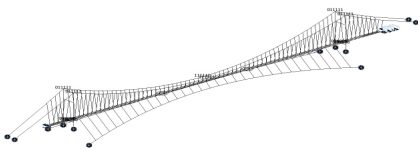


图 2 全桥模型

表 1 边界条件

连接方式	节点位置	D_x	D_y	D_z	R_x	R_y	R_z
一般支承	缆索、塔身	1	1	1	1	1	1
	主梁端部(左)	1	1	1	1	0	1
	主梁端部(右)	0	1	1	1	0	1
刚性连接	鞍座处	0	1	1	1	1	1
	刚性中央扣	1	1	1	1	1	1
	塔梁连接	0	0	1	0	0	0
节点弹性支承	引桥	0	0	1	0	0	0

注:1 为约束,0 为放开。

3 自振特性分析

利用软件中的特征值求解功能,对前 15 阶模态下的振型及自振频率进行描述^[10],如表 2 所示。同时列举出主要振型图,如图 3 所示。

表 2 频率及振型

模态	频率/Hz	振型描述	注
1	0.312 143	主跨一阶反对称横弯	
2	0.347 850	主跨一阶反对称竖弯	
3	0.382 366	主跨一阶正对称横弯	
4	0.436 854	主跨一阶正对称竖弯	
5	0.509 612	主跨二阶正对称横弯	
6	0.598 743	主跨一阶反对称扭转	
7	0.611 416	主跨二阶正对称竖弯+风缆一阶正对称竖弯	风缆为主
8	0.657 146	主跨二阶反对称竖弯	
9	0.662 942	主跨二阶反对称横弯	
10	0.676 668	主跨二阶反对称横弯+主跨一阶正对称扭转	横弯为主
11	0.760 042	主跨二阶正对称竖弯+风缆反向侧振	风缆为主
12	0.841 002	主跨二阶正对称竖弯+风缆反向侧振	竖弯为主
13	0.843 083	主跨一阶正对称扭转	+Y 方向
14	0.856 802	主跨一阶正对称扭转	-Y 方向
15	0.880 739	风缆一阶反对称横弯+竖弯	

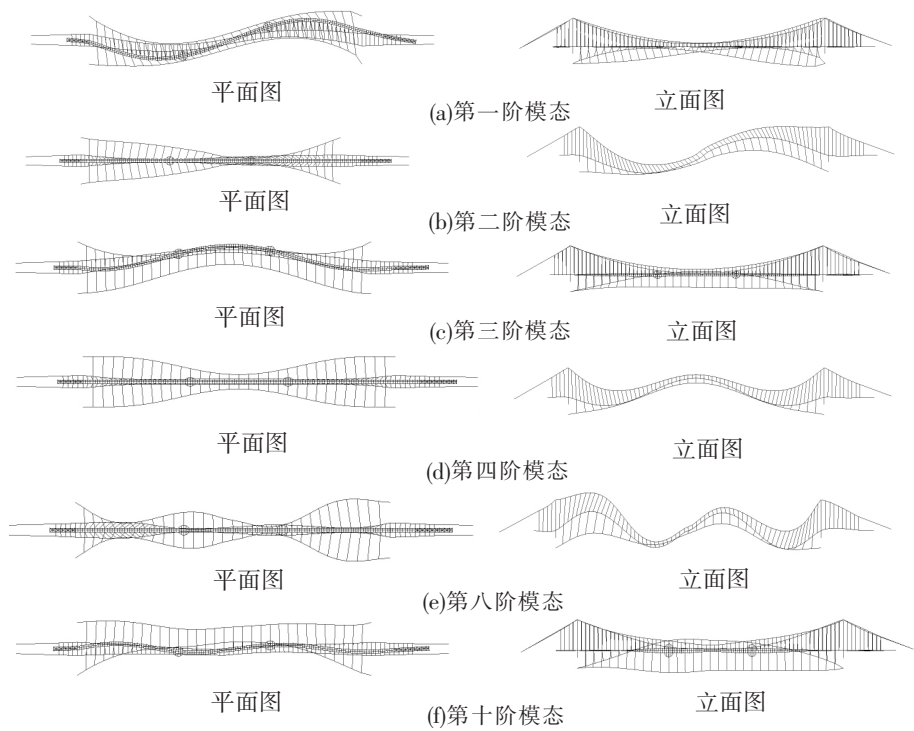


图 3 主要振型图

由表 2 和图 3 可知：

- (1) 此人行悬索桥前 15 阶模态频率在 0.312 1~0.880 7 Hz 范围变化,可以看出该悬索桥基频低,整体柔性偏大。
- (2) 从振型图可以看出,该桥先出现反对称横弯,后出现反对称竖弯,故而其横向刚度偏小。扭转振动出现在第六阶模态,梁的抗扭刚度较小。随着模态升高,缆索系统也随之振动,逐渐出现竖弯、横弯、扭转以及缆索振动耦合的趋势。
- (3) 该桥的主要用途是供游客通行,而行人过桥时产生的频率为:竖向一阶 1.25~2.3 Hz,横向一阶 0.5~1.2 Hz。通常人行桥的人致振动以竖向振动为主,二阶简谐人行荷载理论上可以引起桥梁竖向振动,但至今未有此类记载^[11-12]。本桥的一阶竖弯和横弯频率均在行人步频范围外,按照避开敏感步频法所述,在正常运营通行的情况下不足以引发严重的人桥共振^[13-14]。

4 动力参数分析

4.1 主缆直径

悬索桥的结构刚度和自振特性会受到主缆的影响,本桥按主缆直径 8.5 cm 进行设计,主缆的内力与线形会随着主缆直径的变化而改变,所以此节通过增减平行钢丝改变主缆直径分别为 6.5、7.5、8.5、9.0、9.5 cm。通过数值模拟对结构进行重新找形后得到前几阶振型的变化,并将所对应的频率绘制成曲线进行规律分析。自振特性对比如表 3 所示。

表 3 主缆直径对自振特性的影响

振型	6.5 cm		7.5 cm		8.5 cm		9.0 cm		9.5 cm	
	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号
一阶反对称横弯	0.312 3	1	0.312 2	1	0.312 1	1	0.312 1	1	0.312 1	1
一阶反对称竖弯	0.350 0	2	0.348 8	2	0.347 8	2	0.347 3	2	0.346 5	2
一阶正对称横弯	0.375 2	3	0.379 5	3	0.382 3	3	0.383 5	3	0.384 7	3
一阶正对称竖弯	0.424 8	4	0.432 5	4	0.436 9	4	0.438 6	4	0.440 4	4
一阶反对称扭转	0.609 6	7	0.604 0	7	0.598 7	6	0.595 8	6	0.591 0	6

由表 3 可知:

(1)主缆直径的变化对一阶反对称横弯、一阶反对称竖弯几乎没有影响,频率分别减小了 0.06%和 1.00%,说明改变主缆直径对初始低阶模态影响甚微。

(2)随着主缆直径的增大,第三、四阶模态(一阶正对称横弯和一阶正对称竖弯)出现了与一二阶模态频率相反的趋势,不仅频率都在增大,而且增加幅度愈大,分别增加了 2.53%和 3.61%,说明桥梁的横向及竖向刚度增加。

(3)随着主缆直径增大,一阶反对称扭转出现的模态在提前,对应的频率逐渐降低,说明主缆直径的增大并不能增加桥梁的抗扭刚度,反而使主梁在桥梁整体结构体系中的相对抗扭刚度降低。

4.2 加劲梁布置形式

加劲梁布置形式与全桥刚度密切相关,对结构的频率及振型有一定影响,加劲梁布置形式分为组合 1,2 根纵梁;组合 2,3 根纵梁;组合 3,3 根纵梁+中横梁;组合 4,3 根纵梁+中横梁+边跨部分斜撑;组合 5,3 根纵梁+中横梁+全部斜撑。5 种组合方案如图 4 所示,并得到表 4 所示的自振特性。

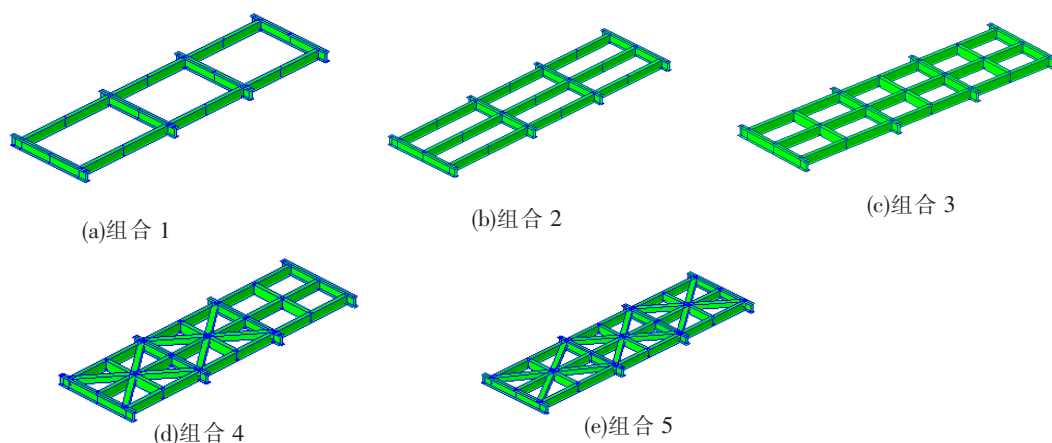


图 4 加劲梁组合方案

表 4 加劲梁布置形式对自振特性的影响

振型	组合 1		组合 2		组合 3		组合 4		组合 5	
	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号
一阶反对称横弯	0.298 3	1	0.281 3	1	0.304 3	1	0.312 1	1	0.335 4	1
一阶反对称竖弯	0.367 6	2	0.349 2	2	0.347 8	2	0.347 9	2	0.346 5	2
一阶正对称横弯	0.378 8	3	0.357 4	3	0.378 8	3	0.382 4	3	0.384 8	3
一阶正对称竖弯	0.467 5	4	0.439 1	4	0.436 6	4	0.436 9	4	0.431 4	4
一阶反对称扭转	0.558 4	7	0.603 4	8	0.596 6	6	0.598 7	6	0.714 7	9

由表 4 可知:

(1)增加纵梁根数,可滞后扭转振动出现的模态,但在中横梁的影响下,扭转的模态降低,频率也相应减小。随着斜撑的增加,抗扭刚度逐渐上升,直至斜撑布满全桥,扭转振动推迟到第九阶。

(2)在几种组合下,横弯的规律一致,增加纵梁对横向弯曲的刚度没有提升,但增加横梁和斜撑对横弯刚度有明显提升。

(3)随着主梁布置形式的复杂化,质量增加,使竖弯的频率也随之降低。

因此在设计时需要适当增加横梁及斜撑,提高横弯刚度,但也要考虑梁体自身刚度对竖弯的影响。

4.3 风缆预拉力

玻璃悬索桥一般建设在景区,位于两峰之间,此处风速较大,故而设风缆系统以稳定桥身。对风缆进行找形时设定的预拉力为 785.705 kN,本节探究预拉力分别为 800、900、1 000、1 100、1 200 kN 时对全桥自振特性的影响。经重新找形后将前几阶振型汇总如表 5 所示。

表 5 风缆预拉力对自振特性的影响

振型	800 kN		900 kN		1 000 kN		1 100 kN		1 200 kN	
	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号
一阶反对称横弯	0.313 0	1	0.319 0	1	0.324 8	1	0.330 5	1	0.336 0	1
一阶反对称竖弯	0.348 7	2	0.354 9	2	0.361 0	2	0.367 0	2	0.372 8	2
一阶正对称横弯	0.383 3	3	0.389 1	3	0.393 7	3	0.397 5	3	0.400 9	3
一阶正对称竖弯	0.438 0	4	0.445 6	4	0.452 8	4	0.459 7	4	0.466 4	4
一阶反对称扭转	0.601 1	6	0.617 4	6	0.633 1	6	0.648 5	6	0.663 5	6

由表 5 可知:

(1)增大风缆预拉力对各个振型的频率均有一定的提升,分别增大了 7.33%、6.90%、4.58%、6.49%、10.38%,说明对整体刚度的提升有利。从频率对比发现,增加风缆预拉力对抗扭刚度提升的影响最明显,其次为横向刚度。

(2)风缆预拉力的设定不仅需保证整个风缆系统的安全性,还要不使风缆系统出现松弛,最低设定为可以抵消最大风速产生的静风横向荷载。

由此可见人行悬索桥架设抗风缆的必要性。在保证抗风缆安全性的情况下,风缆预拉力可在原方案基础上适当增加。

4.4 外部约束方式

本节探究加劲梁的不同外部约束方式对结构动力特性的影响,约束方式分为:约束 1,三跨连续全漂浮;约束 2,两端简支,塔梁连接处有刚性连接,即实桥的约束状态;约束 3,三跨两铰;约束 4,三跨连续。得到振型和频率的结果如表 6 所示。

表 6 外部约束方式对自振特性的影响

振型	约束 1		约束 2		约束 3		约束 4	
	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号	频率/Hz	模态号
一阶反对称横弯	0.298 9	1	0.312 1	1	0.343 6	2	0.347 4	2
一阶反对称竖弯	0.309 1	2	0.347 9	2	0.350 6	1	0.359 4	1
一阶正对称横弯	0.381 2	3	0.382 4	3	0.384 0	3	0.384 1	3
一阶正对称竖弯	0.432 2	4	0.436 9	4	0.430 1	4	0.436 9	4
一阶反对称扭转	0.598 3	7	0.598 7	6	0.599 7	6	0.600 0	6

由表 6 可知:

(1)改变约束方式对一阶反对称横弯和竖弯的影响较大,频率分别增大了 13.96%和 14.01%。改变约束方式对其他振型频率也有提升,但变动较小。

(2)全漂浮结构虽然将扭转的模态推迟,但相对应的频率没有大的变化,故而对扭转刚度无提升作用。

(3)在桥塔处约束可有效提高竖弯刚度。

4.5 参数选用

从主缆直径、加劲梁布置形式、风缆预拉力、外部约束方式 4 方面进行了动力参数分析。通过上述分析再结合资金投入和桥梁景观性,明确了该悬索桥在动力分析下的最优参数。得到的结果如表 7 所示。

表 7 最终参数

参数	主缆直径/cm	加劲梁形式	风缆预拉力/kN	外部约束
最终选定	8.5	组合 4	1 100	三跨两铰

5 结论

本文模型是在合并找形完毕后进行的自振特性研究,然后从主缆直径、加劲梁布置形式、风缆预拉力及约束方式等方面进行参数变化的动力分析,得到一定的规律并从中优化结构。

(1)该人行玻璃悬索桥的振动频率在 0.312 1~0.880 7 Hz 之间,基频低,柔性高,但结合行人步频范围判断在正常人流情况下不足以发生人桥共振。

(2)各种常见设计参数下第一模态均为横弯,说明该桥侧向刚度小,有加抗风缆的必要。增设抗风缆并加大预拉力对各向刚度的提升均有利,可在保证风缆系统应力合格的情况下适当增大风缆预拉力,以抵抗两峰间较大的风速;抗风缆是柔性人行悬索桥设计中的关键构件。

(3)加劲梁的横弯及竖弯刚度会随着主缆直径的增大而增加,但抗扭刚度会相应降低,可通过设置斜撑使其抗扭刚度增加,加密横梁可进一步提高其横向抗弯刚度,应尽量在成本的控制下设计出最优用钢量,保证主梁应力安全。

(4)从约束条件来看,本桥使用三跨两铰和三跨连续的约束方案均对全桥刚度有提升作用。

参 考 文 献

- [1]马文刚.大跨径CFRP缆索悬索桥静动力性能分析[D].西安:长安大学,2008.
- [2]梁艳.桥梁造型质量评价[D].上海:同济大学,2006.
- [3]薛佳.城市步行桥空间研究[D].上海:同济大学,2006.
- [4]刘志翁,刘世忠,武维宏.钢桁式加劲梁悬索桥动力特性分析[J].兰州交通大学学报,2010,29(4):95-101.
- [5]屈国.鸭绿江悬索桥动力特性分析[J].北方交通,2010(6):21-24.
- [6]李林.悬索桥结构参数对自振特性敏感性分析[J].中国高新技术企业,2011(13):74-76.
- [7]Harry H West, Joseph E Suhoski, Louis F Geschwindner. Natural frequencies and modes of suspension bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(10):18-21.
- [8]巩明.某景区人行玻璃悬索桥力学性能分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- [9]沈宏任.悬索桥主缆找形及施工过程力学行为分析[D].成都:西华大学,2019.
- [10]周广盼.超宽混凝土自锚式悬索桥成桥状态控制与空间力学行为研究[D].南京:东南大学,2018.
- [11]涂波.人行荷载作用下结构的竖向振动分析与控制[D].武汉:武汉理工大学,2014.
- [12]袁旭斌.人行桥人致振动特性研究[D].上海:同济大学,2006.
- [13]陈得意.人行桥人致振动舒适度研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [14]朱准峰.自锚式人行悬索桥人致振动及振动控制研究[D].长沙:中南大学,2014.

Dynamic Behavior Study of Flexible Pedestrian Suspension Bridge with Different Structural Parameters

Li Yunsheng^{1,2}, Xue Hui^{1,2}, Zhang Yanling^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of the new pedestrian suspension bridge, the 3D finite element model of a pedestrian suspension bridge in a scenic area was built by using Midas civil 2015. The completed model was obtained by the main cable shape finding, wind cable shape finding and combined shape finding, and then the natural vibration characteristics were analyzed by the multiple rite vector method. A parametric analysis was performed including the main cable diameter, the arrangement of stiffening beam, the pretension of the wind cable and the restraint conditions. The results show that, the pedestrian suspension bridge has a low first-order frequency and a high flexibility, but will not cause resonance damage under normal pedestrian load. Increasing the diameter of the main cable can improve the transverse and vertical bending rigidity of the stiffening beam; Diagonal brace and densified cross beam can improve its torsional and bending rigidity; Increasing the pretension of the wind cable and adopting three-span simply-supported stiffening beam or three-span continuous stiffening beam can improve the rigidity of the bridge.

Key words: suspension bridge; pedestrian; natural frequency; vibration mode; structural parameters