

中承式斜拱曲梁组合桥动力特性参数研究

郭太军,何 鹏,吴家盛

(中恩工程技术有限公司,广东 广州 510000)

摘 要:中承式斜拱曲梁组合桥国内类似工程不多,但随着对桥梁景观性的追求,在实际设计中越来越多地被采用,但是关于这一桥型动力特性的研究较少。基于这一现状,以海丝人行景观天桥(26+36+55+22)m为工程背景,采用Midas Civil建立全桥空间有限元模型对其基本动力特性进行分析,研究了二期恒载集度、构件刚度、几何参数和边界条件等关键结构参数对桥跨结构动力特性的影响规律。结果表明:该桥基频为1.53 Hz,对应振型为一阶正对称拱肋侧倾;前10阶自振频率随二期恒载集度增大而减小;主梁刚度对各阶振型频率的影响明显大于拱肋刚度;减小矢跨比可显著提高拱肋侧倾与拱肋弯扭振型频率;拱肋倾角(10°~30°)与曲梁曲率半径(40~80 m)对结构各自振频率影响有限,相应频率变化率不超过5%;主梁与主墩之间弯扭耦合约束可显著提高前5阶振型频率。

关键词:人行景观天桥;中承式;斜拱曲梁;梁拱组合桥梁;动力特性;参数研究

中图分类号:U442

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)05-0076-05

0 引言

斜拱曲梁组合桥融合了单索面、外倾拱肋、曲线梁等结构要素,造型新颖美观,具备良好的立体景观效果。目前国内针对斜拱曲梁组合桥梁的动力特性研究较少。易云焜^[1]依据拱肋、主梁、吊杆三者的夹角关系将外倾式梁拱组合体系分为九类,重点分析了外倾式双索面梁拱组合桥的结构变形、结构内力、吊杆力和结构稳定性能等结构性能指标与拱肋倾角、拱肋与吊杆夹角之间的关系。谢静等^[2]研究了拱肋外倾角对异性空间组合拱肋受力性能的影响,指出外倾角增大使得拱肋整体刚度变小。任翔等^[3]研究了钢管混凝土提篮式拱桥动力特性并进行了参数敏感性分析。汪一意等^[4]重点分析了结构重度、混凝土弹性模量、拉索弹性模量、温度作用等参数对外倾单肋下承式异形钢拱桥内力与线性的影响规律。罗晓群等^[5]研究了下承式单斜面索拱支承曲梁人行桥人致振动控制,得出TMD对该桥型具有良好的减振效果。张凯伦等^[6]以设计时间为轴线对某斜拱曲梁桥进行优化设计并研究了该桥的地震响应。周健华等^[7]对广州塔人行桥敏感模态进行了舒适度研究,并提出了满足舒适度要求的控制方案。宁平华^[8]等分析了大跨度曲梁空间拱人行桥的动力特性。以上研究多针对双索面下承式梁拱组合桥,针对斜拱曲梁桥的研究主要集中在结构受力、抗震和人致振动

等方面。一般而言,桥梁结构动力特性对桥梁抗震设计、抗风稳定性分析、人致振动控制、桥梁健康检测与维护等都具有重要意义。现有研究不能全面揭示中承式斜拱曲梁组合桥的动力特性,也不足以指导桥梁结构动力优化设计。

中承式斜拱曲梁组合桥作为一种新型城市景观桥梁,目前建造数量较少,具备较为广阔的应用前景,有必要对其基本动力特性和影响因素进行系统研究。鉴于此,本文以海丝人行景观天桥(26+36+55+22)m为工程背景,分析了该桥成桥状态下的自振特性,并进一步研究了二期恒载集度、构件刚度、重要几何参数和边界条件对结构动力特性的影响规律,以期对日后同类桥梁设计提供参考。

1 工程背景与有限元模型

海丝天桥位于广东省广州市黄埔区九龙大道,横跨九龙大道,连接缤纷广场与海丝知识中心。桥梁造型由莫比乌斯之环演化而来,寓意对知识的追求永无止境。同时,独特的空间效应与周围错落有致的现代建筑群相得益彰。该桥技术难度较大,目前全桥已经建设完成,于2022年5月初正式投入使用。

该桥主跨采用55 m斜拱曲梁钢拱桥,全桥跨径布置为(26+36+55+22)m,另设跨径分别为4.064 m、19.0 m、15.128 m的3个分支与主梁刚接。主梁采用单箱单室等高钢箱梁,位于曲率半径分别为125 m、58 m的圆弧及直线上。拱肋采用正五边形变高截面钢箱拱,计算跨径58 m,拱高23.2 m,计算矢跨比为

收稿日期:2022-06-14

作者简介:郭太军(1978—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计工作。

1/2.5,拱肋整体外倾 20°。下部结构采用混凝土桥墩承接承台灌注桩基础。全桥采用梁拱分离、墩梁固结、拱脚与承台固结的有推力支承体系。海丝天桥立面布置图与横断面图分别见图 1~图 3。

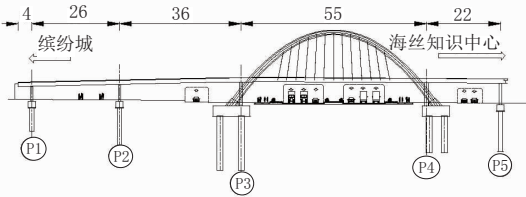


图 1 海丝天桥立面布置图(单位:m)

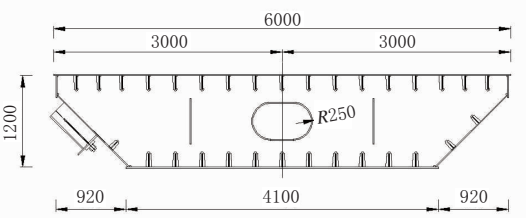


图 2 主梁标准截面(单位:mm)

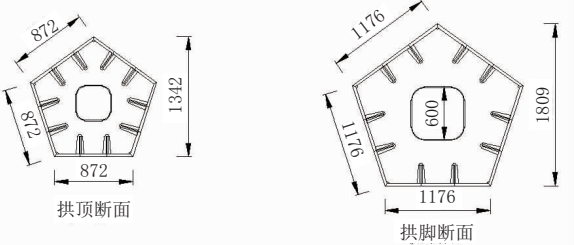


图 3 拱肋截面(单位:m)

采用 Midas Civil 建立全桥空间杆系有限元模型,主梁、拱肋和下部结构均采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,桩土之间相互作用采用土弹簧模拟。

2 动力特性分析

将结构自重与二期恒载转化为质量,采用子空间迭代法进行结构动力特性分析,提取了结构的前 10 阶自振频率与振型,结果见表 1。图 4~图 6 给出了较为典型的拱肋外倾(第 1 阶)、主梁竖弯(第 3 阶)、拱肋弯扭(第 7 阶)振型。

表 1 海丝天桥前 10 阶模态特征

阶次	频率/Hz	振型描述
1	1.53	拱肋外倾
2	2.04	主梁横弯
3	2.80	主梁竖弯
4	2.92	主梁竖弯+拱肋内倾
5	3.19	拱肋扭转+主梁横弯
6	3.37	拱肋弯扭+主梁横弯
7	3.70	拱肋弯扭
8	3.86	拱肋内倾+主梁横弯
9	4.18	拱肋弯扭+主梁竖弯
10	5.55	主梁竖弯

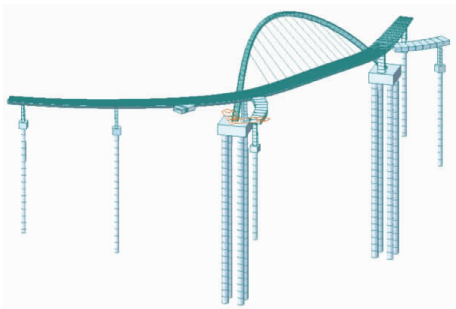


图 4 拱肋侧倾

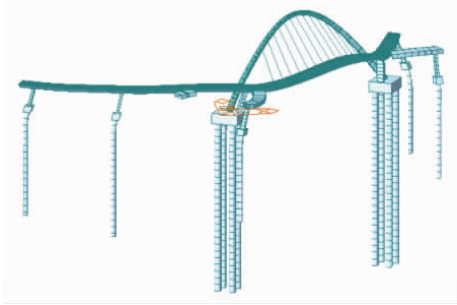


图 5 主梁竖弯曲

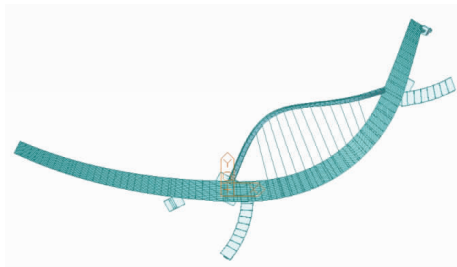


图 6 拱肋弯扭

由表 1 与图 4~图 6 可知,该桥振型较为复杂,难以存在纯正的竖向、横向和扭转振型。总体而言,海丝天桥结构动力特性呈现以下基本特点:

(1)振动形式主要有主梁竖弯、主梁横弯、拱肋侧倾和拱肋弯扭等。阶次越高,振型趋于复杂,耦合振型较多。

(2)第一阶振型模态为斜拱肋外倾,自振频率 1.53 Hz,表明结构整体刚度适中。拱肋面外刚度小于面内刚度且吊索面与斜拱肋不共面,使得斜拱肋面外稳定性问题尤为突出。

(3)主梁竖向振动基频为 2.80 Hz,我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)规定,人行桥竖向基频敏感区间为 0~3 Hz,而德国 EN03 规范规定人行桥竖向基频敏感区间为 1.25~4.6 Hz。可见,海丝天桥竖向基频位于人致振动频率敏感区,需采取有效措施减振并进行舒适性评价。

(4)从振型模态可知,第 5 阶模态才出现扭转振动,说明拱桥抗扭刚度较大,因为拱肋采用弯扭刚度较大的正五边形截面且拱脚与承台固结。由于桥墩较高,抗推刚度较小,前 10 阶振型出现较多主梁横

弯振型。

3 主要结构参数对动力特性的影响

一般而言,在结构动力特性分析中,结构前若干阶自振频率与振型对结构抗风、抗震、减振抑振和健康监测等方面起控制作用。本文主要从二期荷载集度、构件刚度、几何参数、边界条件 4 个方面探讨其对前 10 阶振型频率或典型振型频率(第 1 阶拱肋外倾、第 3 阶主梁竖弯、第 7 阶拱肋弯扭)的影响规律。

3.1 二期恒载集度

二期恒载主要包括由铺装与栏杆自重,对原模型二期恒载集度按不同比例缩放,进行动力特性分析,计算结果见图 7。

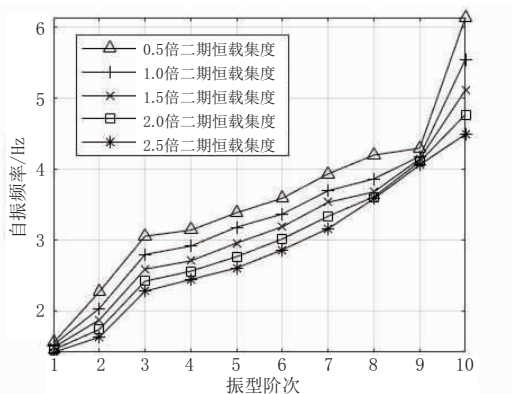


图 7 二期恒载集度对前 10 阶振型影响

由图 7 可知,总体而言,二期恒载集度对结构自振频率影响较大,且各阶振型变化规律基本一致。当恒载集度比例在 0.5~2.5 之间时,第 2~8 阶振型频率变化幅度在 $-0.6 \sim -0.8$ Hz 之间,但第 1 阶振型(拱肋外倾)变化幅度仅为 -0.13 Hz。本次海丝天桥设计桥面铺装采用 25~40 mm 益胶泥与 30 mm 烧面花岗岩,重量较轻,有利于提高结构自振频率。

3.2 构件刚度

一般而言,结构自振频率会随结构刚度增大而增大^[9]。通过查阅大量的文献资料,鲜有关于不同的振型频率对不同构件刚度参数变化的敏感度研究。本文以原有限元模型为基础,分别将斜拱肋面内面外抗弯刚度与扭转刚度、曲梁横向与竖向抗弯刚度和吊杆轴向刚度进行缩放。缩放比例为 0.5~1.5(步长为 0.2),得到成桥状态下典型振型频率(第 1、3、7 阶)的变化规律,计算结果见图 8~图 10。

由图 8~图 10 可知:(1)结构典型振型的自振频率随构件刚度增大而增大,且增长曲线逐渐趋于平缓。(2)不同构件刚度变化对同一振型频率影响差异很大。主梁竖弯刚度对拱肋侧倾振频率影响最大(当

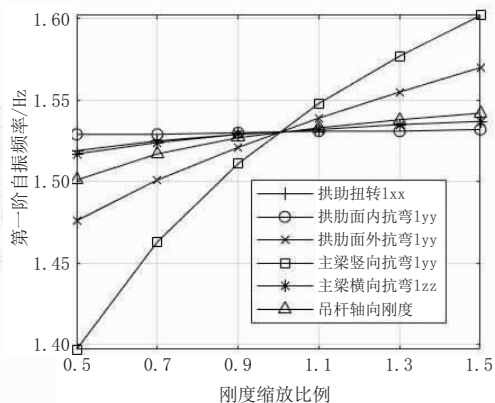


图 8 不同杆件刚度对拱肋侧倾振型影响

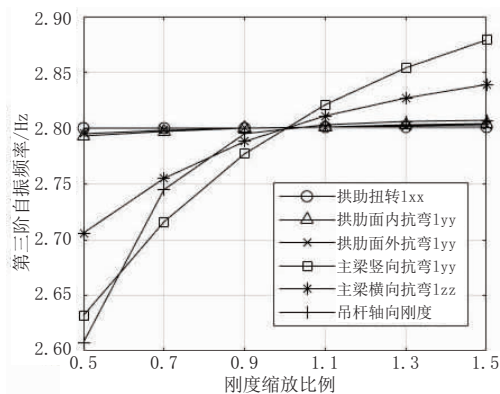


图 9 不同杆件刚度对主梁竖弯振型影响

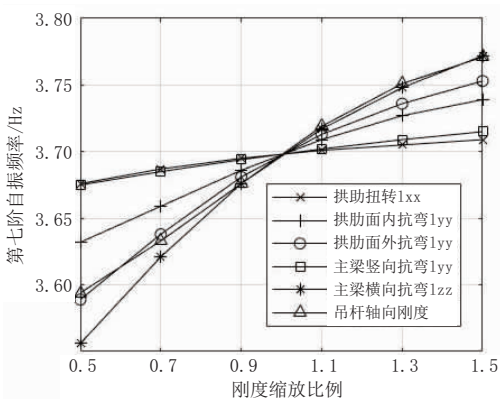


图 10 不同杆件刚度变化对拱肋弯扭振型影响

主梁竖弯刚度缩放比例由 0.5 变化至 1.5,拱肋侧倾振型频率由 1.397 Hz 变化至 1.602 Hz),拱肋面外刚度次之,其他的构件刚度影响很小。主梁竖向刚度对主梁竖弯振型影响最大(当主梁竖弯刚度缩放比例由 0.5 变化至 1.5,主梁竖弯振型频率由 2.632 Hz 变化至 2.879 Hz),横向抗弯刚度与吊杆轴向刚度对主梁竖弯振型影响次之。拱肋刚度(包括面内面外抗弯与抗扭刚度)对主梁竖弯振型频率影响可忽略不计。主梁横弯刚度对拱肋弯扭振型频率影响最大(当主梁横弯刚度缩放比例由 0.5 变化至 1.5,拱肋弯扭振型频率由 3.556 Hz 变化至 3.772 Hz),吊杆轴向刚度与拱肋面内面外刚度影响次之,拱肋扭转刚度与主梁竖弯刚度影响最小。(3)总体而言,主梁刚度变化

对各阶振型频率的影响明显大于拱肋,且主梁竖弯刚度对拱肋侧倾振型与主梁竖弯振型的影响明显大于其他构件刚度因素,设计时应特别注意。拱肋面外抗弯刚度对拱肋侧倾与拱肋弯扭振型均存在较大影响,拱肋面内刚度与扭转刚度对各阶振型影响很小。增大吊杆轴向刚度仅对拱肋弯扭振型影响显著,减小吊杆轴向刚度对各阶振型均影响较大。

3.3 几何参数

拱肋倾角、矢跨比、主梁曲率半径等结构几何参数是影响桥梁造型与景观效果的决定性因素,同时也是影响结构动力特性的关键因素。易云焜^[1]分析了外倾式梁拱组合桥力学性能与矢跨比、拱肋倾角之间的关系,指出合理的拱肋倾角值不超过 30°,合理的矢跨比宜为 1/5 左右。桂成中^[10]亦指出,矢跨比为 1/5 左右时,桥梁抗震性能最优。实际工程中,为追求独特的空间效应,表达桥梁设计理念与寓意,桥梁设计师通常会选择差异性很大的结构参数。本次海丝天桥设计矢跨比为 1/2.5,一方面由于结构形式为中承式,拱肋拱脚位置距离桥面距离达 7.5 m;另一方面是由景观需求决定。为研究其对结构动力特性的影响,以原结构设计几何参数—拱肋倾角 20°、矢跨比 1/2.5、主梁曲率半径 60 m 为基点,通过改变几何参数探讨典型振型频率变化规律。需要说明的是,原设计曲梁曲线由曲率半径分别为 125 m、58 m 的圆弧及直线共同组成。为方便研究,将整个曲梁的曲率半径统一,原模型下部结构节点坐标与单元坐标系方向相应调整。图 11~图 13 为拱肋倾角、矢跨比与曲梁曲率半径变化时,结构典型振型频率变化百分比。

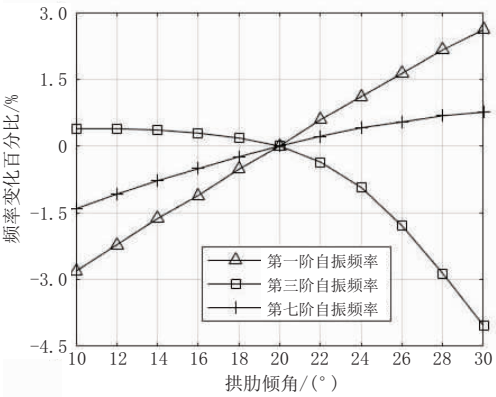


图 11 拱肋倾角对典型振型影响

由图 11~图 13 可知:(1)总体而言,拱肋倾角与曲梁曲率半径变化对各阶振型频率影响有限,主要影响主梁竖弯振型与拱肋侧倾振型,相应频率变化率均不超过 5%。(2)矢跨比变化对拱肋侧倾(自振频率变化率由 -20.3% 增大至 14.3%)与拱肋弯扭(自

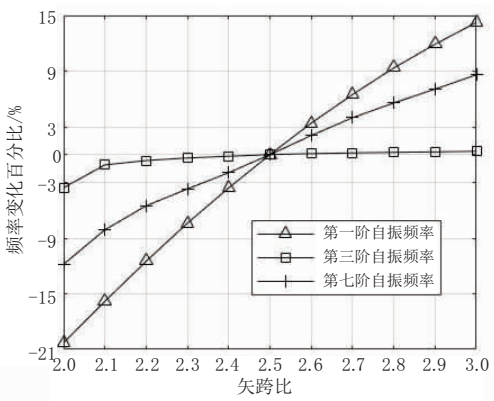


图 12 矢跨比对典型振型影响

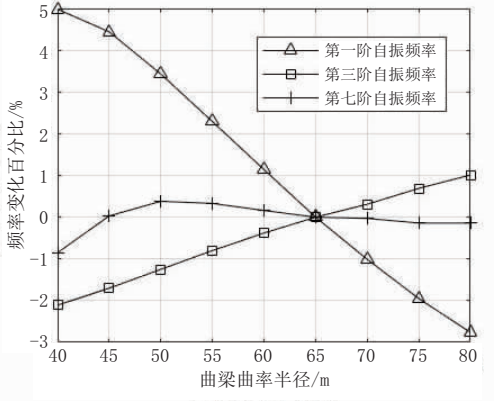


图 13 曲梁曲率半径对典型振型影响

振频率变化率由 -11.8% 增大至 8.6%) 振型影响显著,但对主梁竖弯振型影响很小。由此可见,拱肋刚度变化仅对拱肋弯扭振型影响较大,对主梁竖弯振型影响很小,这一点与本文 3.2 节的研究结论一致。

3.4 边界条件

海丝天桥边界条件为所有墩梁均固结、梁拱分离且拱肋与承台固结。为分析墩梁不同连接方式对结构自振频率的影响,分别考虑所有桥墩与主梁均固结(原设计)、仅东侧主墩与主梁铰接、仅西侧主墩与主梁铰接、东西两侧主墩均与主梁铰接 4 种连接方式,计算结果见表 2。

表 2 主梁与桥墩不同连接方式下前 10 阶频率

阶次	全固结 f_1/Hz	仅东侧 铰接 f_2/Hz	仅西侧 铰接 f_3/Hz	两侧均 铰接 f_4/Hz	$(f_2-f_1)/f_1\%$	$(f_3-f_1)/f_1\%$	$(f_4-f_1)/f_1\%$
1	1.530	1.437	1.507	1.406	-6.1	-1.5	-8.1
2	2.041	1.771	1.937	1.645	-13.2	-5.1	-19.4
3	2.801	2.087	2.207	1.998	-25.5	-21.2	-28.7
4	2.919	2.621	2.797	2.152	-10.2	-4.2	-26.3
5	3.185	2.828	3.101	2.533	-11.2	-2.6	-20.5
6	3.370	3.307	3.363	3.319	-1.9	-0.2	-1.5
7	3.698	3.600	3.711	3.598	-2.6	0.3	-2.7
8	3.865	3.794	3.754	3.711	-1.8	-2.9	-4.0
9	4.180	4.117	4.133	4.038	-1.5	-1.1	-3.4
10	5.546	5.488	4.917	4.825	-1.1	-11.3	-13.0

由表2可知,释放梁墩之间弯扭耦合约束,前10阶自振频率都呈现不同程度下降(最高可达28.7%),前5阶自振频率下降尤为明显。主要是因为释放梁墩弯扭耦合约束降低了结构刚度,但墩梁弯扭耦合约束也会显著增加墩梁内力,桥梁设计时应综合考虑,选择合理的边界条件。

4 结 论

(1)本文系统地研究了二期恒载集度、构件刚度、重要几何参数和边界条件等对中承式斜拱曲梁桥动力特性的影响,可通过合理地设计这些参数调整桥梁动力特性。本文的研究结论可为日后同类桥梁结构动力优化设计提供参考。

(2)海丝天桥竖向刚度大于横向刚度,拱肋面外刚度小于面内刚度,拱肋面外稳定性问题较为突出。该桥基频为1.53 Hz,对应振型为一阶正对称拱肋侧倾。主梁竖向基频为2.80 Hz,不满足规范要求,需采取有效措施减振并进行舒适性评价。

(3)前10阶自振频率随二期恒载集度增大而减小,且变化规律基本一致。当二期恒载集度比例在0.5~2.5之间时,第2~8阶振型频率变化幅度均在-0.6~-0.8 Hz之间,但第1阶振型(拱肋外倾)变化幅度仅为-0.13 Hz。实际工程设计中,采用轻质铺装可提高桥梁自振频率。

(4)主梁弯扭刚度变化对各阶振型频率的影响明显大于拱肋,主梁竖弯刚度对拱肋侧倾振型与主梁竖弯振型频率的影响明显大于其他构件刚度因素。拱肋面外抗弯刚度对拱肋侧倾与拱肋弯扭振型频率均存在较大影响。增大吊杆轴向刚度仅对拱肋弯扭

振型频率影响显著,减小吊杆轴向刚度对各阶振型频率均影响较大。

(5)拱肋倾角($10^{\circ}\sim 30^{\circ}$)与曲梁曲率(40~80 m)变化对各阶振型影响有限,相应频率变化率不超过5%;矢跨比($1/2\sim 1/3$)对拱肋侧倾(自振频率变化率由-20.3%增大至14.3%)与拱肋弯扭(自振频率变化率由-11.8%增大至8.6%)振型影响显著,但对主梁竖弯(自振频率变化率由-3.57%增大至0.36%)振型影响很小。

(6)主梁与主墩之间弯扭耦合约束对前5阶振型频率影响尤为显著,但对第1阶振型(拱肋侧倾)影响相对较小。

参考文献:

- [1] 易云焜.空间梁拱组合体系桥梁的设计理论关键问题研究[D].上海:同济大学,2006.
- [2] 谢静,李爱群,王浩.外倾角对异形空间组合拱肋拱桥受力性能影响的研究[J].公路,2009(11):81-86.
- [3] 任翔,许汉铮.钢管混凝土提篮式拱桥动力特性及参数敏感性分析[J].公路,2008(4):78-84.
- [4] 汪一意,陈建兵,熊秉贤.外倾单肋下承式异形钢拱桥静力参数敏感性分析[J].中外公路,2017,37(4):180-184.
- [5] 罗晓群,张晋,沈昭,等.单斜面索拱支承曲梁人行桥人致振动控制研究[J].振动与冲击,2020,39(11):83-92.
- [6] 斜拱曲梁桥的优化设计和抗震研究[A]//张凯伦,刘爱荣,饶瑞,等.第30届全国结构工程学术会议论文集(第II册),2021.
- [7] 斜拱曲梁人行桥步行舒适度研究[A]//周健华,黄友钦,刘爱荣.第30届全国结构工程学术会议论文集(第II册),2021.
- [8] 宁平华,王晨,华旭刚,等.大跨度曲梁空间拱人行桥动力特性研究[J].中外公路,2021,41(5):147-150.
- [9] 朱慈勉,张伟平.结构力学(下册)[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [10] 桂成中,雷俊卿,张永水.拱辅梁桥拱肋合理矢跨比的确定[J].北京交通大学学报,2014,38(4):115-121.

(上接第41页)

量,改造出符合城市道路功能需求、风貌品质、文化传承的道路空间环境,以“微更新”的手法来完成华丽的身份转变,将是未来无数类似工程都需要面对的课题。

5 结 语

本文以城西大道的整治经验为类似工程提供了一种理性化的思路方法,使得公路转变为市政道路的综合整治手法有迹可循,为更好地适应城市快速

发展提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 吴兵.高速公路与城市道路衔接理论与方法[J].黑龙江交通科技,2013(9):57-58.
- [2] 姜小磊,胡勇.既有改造公路纵断面设计指标优化研究[J].中外公路,2016,36(6):320-323.
- [3] 万梦延.城市双修背景下的道路景观提升规划设计研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.
- [4] 徐飞,魏景丽,刘颖慧.公路与城市道路融合发展模式研究[J].交通工程,2019,19(2):61-66.