

某S形人行景观桥的方案优化与深化设计

施政

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:对某S形人行景观桥进行方案优化与深化设计的过程,包括主梁结构体系、菱形斜交网架、桥墩造型三个方面的优化。三者都是基于三维参数化设计。设计的最终目标,是在尽量还原方案造型的基础上,使得景观桥梁的主梁、网架、桥墩各部分比例和谐,达到形态与受力的统一。

关键词:人行桥;钢结构;斜交网架;参数化设计;S形景观桥

中图分类号: U443.38

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0086-06

1 桥梁形态的生成与构造

某景观人行桥位于江苏省,桥位北岸接规划道路,南岸接滨河公园,定位为休闲人行景观桥,对设计造型要求较高。设计方案源于中国传统文化“如意”与“锦鲤”造型,桥梁段总长162.4 m,桥宽度6~9 m,主桥为S形曲线,梁高1.4 m,结构形式为4跨连续钢箱梁,跨径布置为40.689 m+41.503 m+41.503 m+40.689 m,其中南、北侧均有约110 m长的菱形景观网架与约84 m长的木质座椅,从栏杆基座向上延展出三维曲面网架造型,网架的高度由栏杆处的0.9 m渐变至最高处3.6 m。桥梁总面积约1 231.17 m²,效果图见图1所示,图2为桥面视角线稿图。

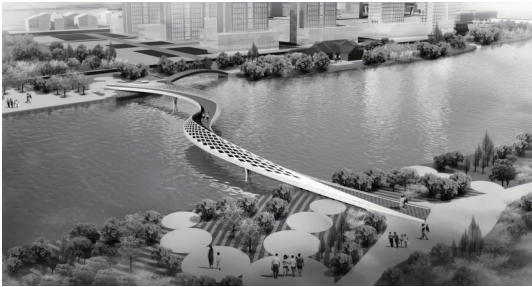


图1 景观人行桥效果图

2 上部网架结构形态的拟定与优化过程

在最初景观方案中,桥梁不满足中心对称,网架形态较为自由,网架向内倾角过大,且未考虑人行护栏的高度,不能满足行人行走净空的要求,因此对以下五点进行优化。

收稿日期: 2023-04-05

作者简介: 施政(1991—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

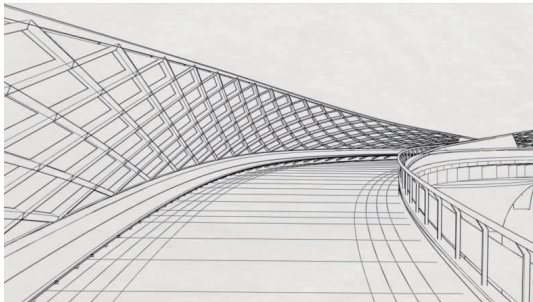


图2 桥面视角线稿图

(1)因地制宜,对称设计。

考虑桥梁的形态近似对称,两岸标高基本相同,河底地层分布均匀,从地质条件与建筑形态上均满足对称布墩要求,因此对方案进行规整,将主梁以及南、北侧网架均围绕中墩呈中心对称布置,网架整体呈左、右围合的半包围形态,形成一阴一阳对称的格局,受力对称,跨径对称(见图3)。

图4为人行桥结构爆炸图。

从上至下:网架+玻璃栏杆-基座加劲斜杆-座椅-钢箱梁-桥墩。

(2)抬高网架,桁架做底。

原设计网架过于压缩人行宽度,优化时将网架提升0.9 m,留出行走的空间,也便于将网架底杆与前后栏杆衔接;空出的下部采用加劲斜杆组成三角桁架,提供足够的连接刚度;桁架的节奏与网架统一,约3.3 m一节,桁架的两侧用开孔铝板封闭,采用参数化开孔,形成平滑的具有建筑机理的侧面。基座顶杆尺寸取200 mm×150 mm,为异形五边形截面杆件,网架杆件为150 mm×100 mm,两者差50 mm,两侧预留各25 mm焊脚空间,便于现场安装焊接。

图5为网架与基座加劲桁架斜杆示意图。

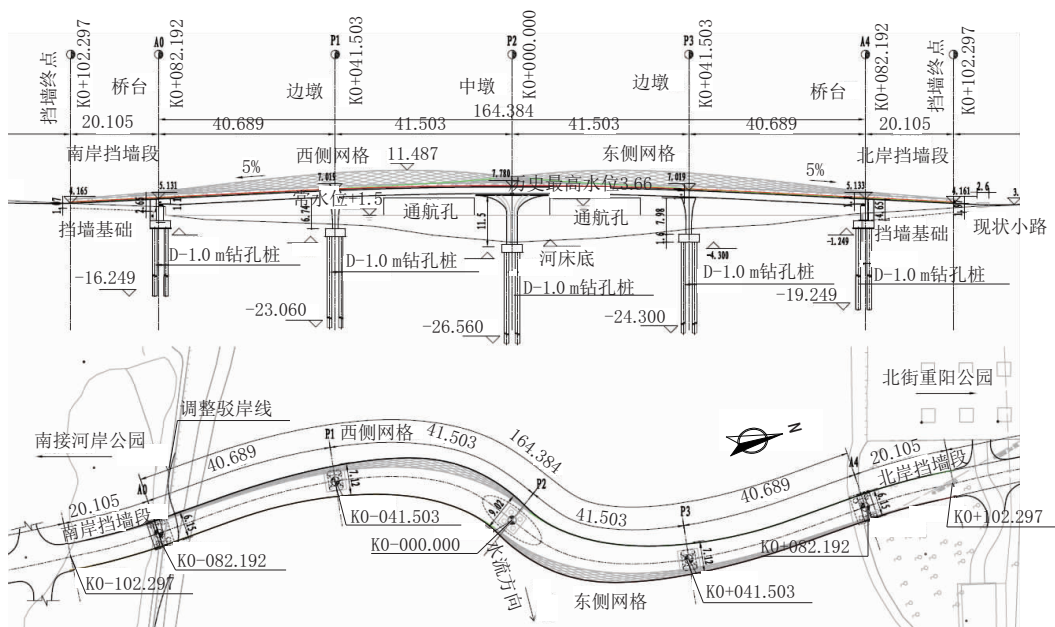


图 3 S 形人行桥平面、立面布置图

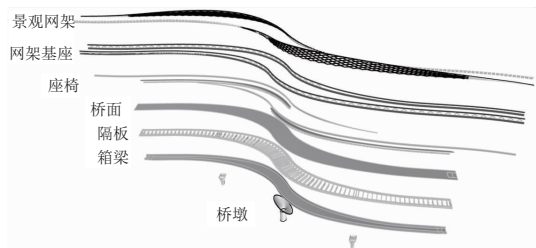


图 4 人行桥结构爆炸图

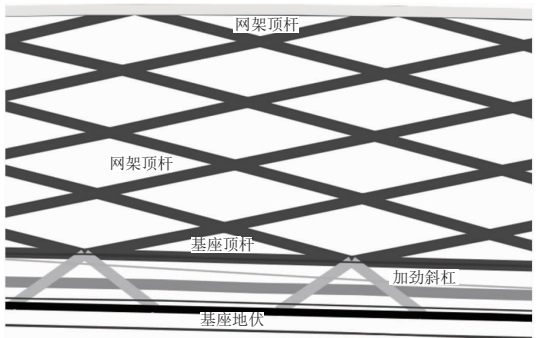


图 5 网架与基座加劲桁架斜杆示意图

(3)网架玻璃,合二为一。

考虑周边幼儿园、小学等儿童使用者较多,业主提出在没有网架的位置,应设置玻璃栏杆,桥梁视野更为通透。为满足业主要求,同时保证景观网架形态的整体性,在网架的前后区段,通过精细调整网架顶杆(下称“眉毛线”)的控制点,使之下降至与地伏相交,与之融为一体(见图 6);同时又基本维持网架曲面形状,前后顺接流畅;在顶杆高度不足 1.1 m 的位置均设置点抓式玻璃栏杆,如图 7 所示的前、后两段。

(4)流动曲面,斟酌适度。

构成网架的杆件由基本曲面生成,曲面的造型如羽毛、机翼一般,呈流线形态,从网架最高点往左、

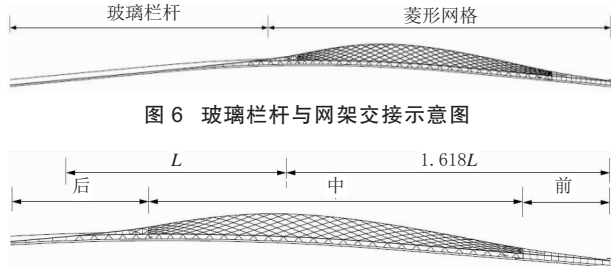


图 6 玻璃栏杆与网架交接示意图

图 7 网架立面分段与黄金分割比例示意图

右两侧设计呈黄金分割比例,如图 7 所示。

菱形网架的异形曲面,用 Rhino 软件生成,由顶、底两条曲线,以及两条线的起点连线与终点的连线,共 4 条线构造而成,曲面特征为 U 向(桥纵向)为曲线,V 向(竖向)均为直线,曲面构造线按 Rhino 中 EdgeSurf 的形式定义,即两曲线两两控制点之间连直线定义;在保证造型的基础上,上下两条构造线的控制点数量尽量保持相同,使曲面布线较为合理;通过参数化软件 Grasshopper 里,Lunchbox 插件组中的 DiamondGrid 运算器,将曲面参数化分格,形成菱形杆件。然后对弧面进行合适的分段,仅中段做菱形,前、后段做简单的竖向支撑杆+铝板蒙皮的方式,避免杆件在起终点的交织重叠,难以施工的问题;网架生成的流程见图 8 所示。

图 9 为桥梁标准横断面图。图 10 为 Rhino 模型主梁横断面透视图。

(5)座椅净空,两者兼得。

为满足人行桥净空要求,在受到网架遮挡净空不满足 2.2 m 的位置,设置木质座椅进行遮挡,防止行人走入净空不够的区域。座椅采用三角悬臂支撑,

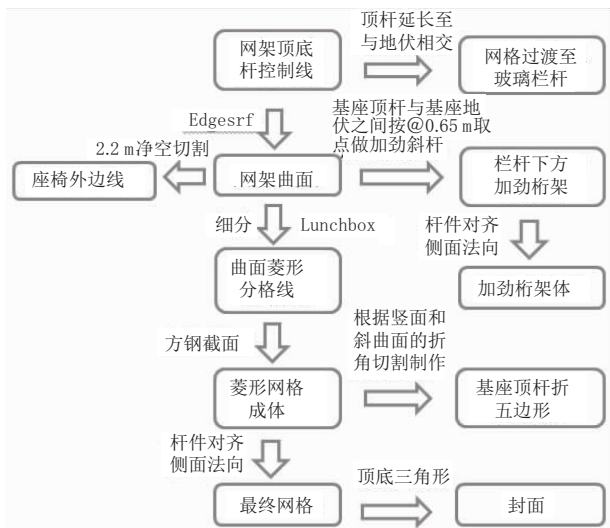


图 8 Grasshopper 生成菱形网格的流程图

充分利用加劲斜杆与下方地伏提供的支撑点,将结构部分隐藏于内,座椅有漂浮感,景观性好;座椅的边缘曲线也与网架的顶底杆线的走向一致,产生对话关系,融入了整体的造型。座椅采用木质,与桥梁钢结构形成材质对比(见图 11 至图 13)。

3 桥墩形态优化

此方案中,异形中墩作为人行桥景观的一部分,设计为不等边开花造型,断面均为椭圆形,墩顶开花尺寸达到接近 26 m,较为夸张,施工图设计时将中墩规整为墩底小椭圆 2.4 m $\times$ 3.1 m,墩顶大椭圆 16.0 m $\times$ 6.0 m,两者长短轴旋转了 90°,通过 2 个控制断面+边缘线扫略生成异形体。

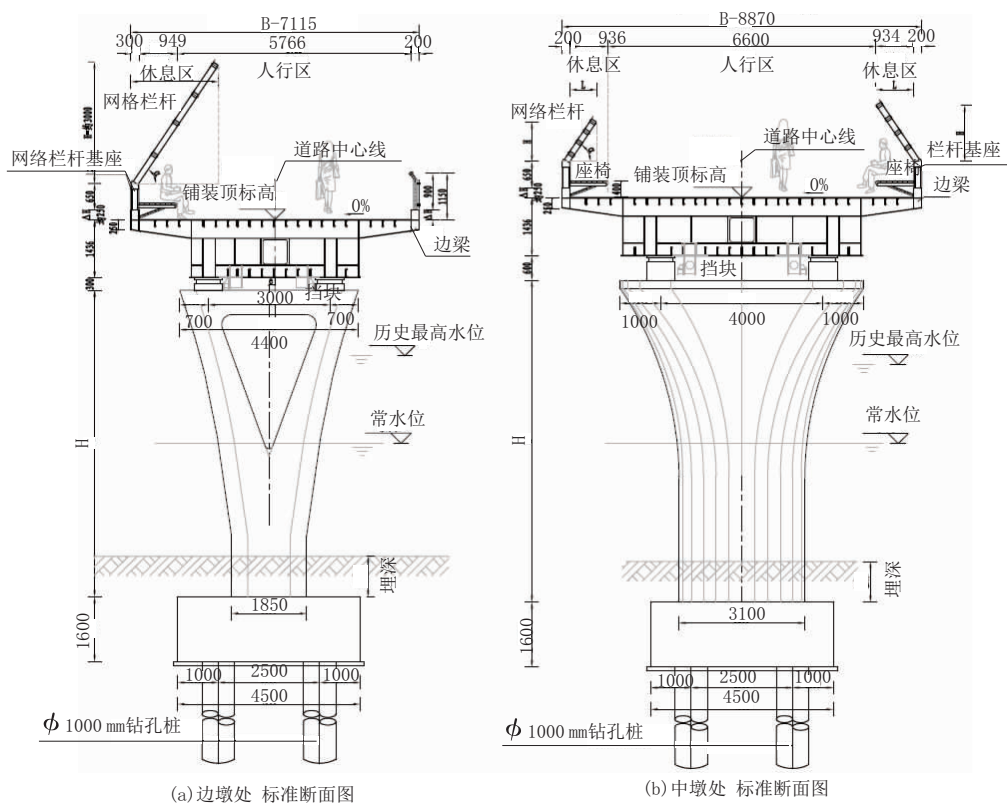


图 9 桥梁标准横断面图(单位:mm)

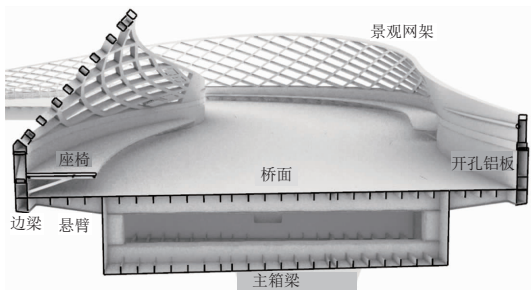


图 10 Rhino 模型主梁横断面透视图

由于主梁弯扭,中墩若梁柱固结温度应力很大,对此下部设橡胶支座,中墩的大悬臂根部受力仅承

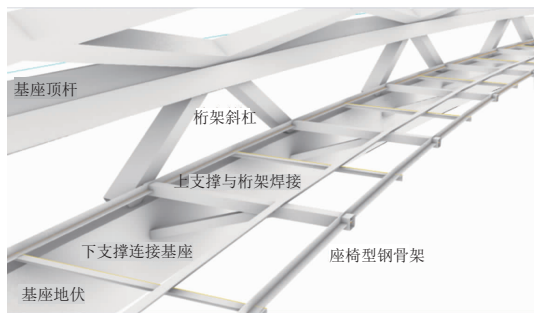


图 11 木质座椅与三角支撑结构示意图

受混凝土悬臂自重;基于防撞考虑,中墩内填满混凝土,施工时墩外壁造型靠钢厂定做弯扭钢模板实现,



图 12 木质座椅总平面图



图 13 最终模型三维图

并永久保留。

在此方案中,边墩的设计为圆润的倒Y形,中间留空,虚的造型与中墩实体形成虚实对比;边墩表面均为曲面,经过计算与调整,墩身规整为带倒角的矩形截面,墩底尺寸1.85 m×1.3 m,墩顶受拉混凝土梁尺寸3.0 m×0.6 m。其效果图如图14所示。

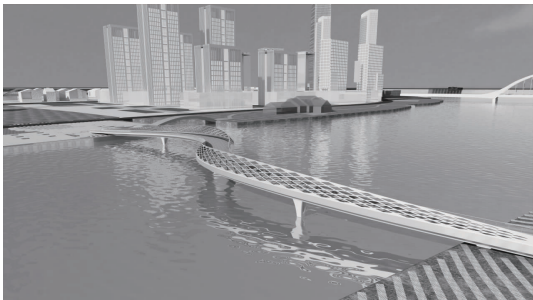


图 14 墩、梁优化后全桥鸟瞰效果图

4 主梁两种边界条件比选

该桥由于S型弯曲,主梁在横活载以及温度应力下的变形特点与直桥不同,支座的约束形式需重点研究。考虑两种边界条件下的方案。

方案1(固定):中墩固结,两边墩及桥台设球钢支座,约束方向如图15所示。

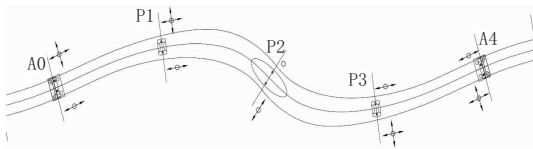


图 15 方案1球钢支座约束方向图示

方案2(释放):墩顶、桥台顶全部设板式橡胶支座,中墩、边墩支座均为GBZY 600×113,支座水平刚度在3 000~3 500 kN/m;桥台支座为GBZYH 350×87。

采用Midas Civil软件,对以上两种方案下的主梁、墩的受力情况进行比选,主要看墩顶水平力和弯矩、扭矩,结果见表1。

可见,此方案下,主梁弯曲的形态,造成整体升降温工况下,引起中墩的水平力、扭矩均很大,恒载

表 1 墩梁固结+球钢支座 支座反力结果表

节点	恒载 + 二期				整体升温		
		F_x /kN	F_y /kN	F_z /kN	F_x /kN	F_y /kN	F_z /kN
桥台	左 864	-1.03	3.06	374.14	6.76	-20.17	2.41
A0	右 865	0.0	0.0	356.42	0.0	0.0	-3.02
边墩	左 862	0.0	0.0	1 161.8	0.0	0.0	25.5
P1	右 863	2.42	-16.2	1 266.7	-21.03	140.9	-21.9
中墩	左 860	-145.92	114.9	1 289.9	1 458.1	-1 149.5	-2.17
P2	右 861	145.98	-115.2	1 292.4	-1 458.5	1 150.7	-3.82
边墩	左 858	0.00	0.00	1267.4	0.0	0.0	13.25
P3	右 859	-2.49	16.45	1 162.1	-12.6	83.3	-15.4
桥台	左 856	1.02	-3.05	356.56	-6.87	20.5	-3.13
A4	右 857	0.0	0.0	373.41	0.0	0.0	2.53

引起的也较大,中墩支座间距为4 m,水平力偶引起墩底扭矩达到3 712.4 kN·m,导致桩数增多,中墩配筋增大,经济性差,尤其墩位处于河床中央淤泥层较厚的地基上,较大的水平力、扭矩对全桥安全较为不利。表2为设橡胶支座,其支座反力结果表。

表 2 设橡胶支座,其支座反力结果表

节点	恒载 + 二期				整体升温		
		F_x /kN	F_y /kN	F_z /kN	F_x /kN	F_y /kN	F_z /kN
桥台 A0	左 864	-0.157	0.468	374.43	-1.424	4.247	-2.21
	右 865	-0.157	0.468	356.07	-1.425	4.251	1.56
边墩 P1	左 862	-1.768	-0.548	1 164.54	-57.12	4.84	6.19
	右 863	-1.689	-0.536	1 264.28	-58.15	4.68	-1.63
中墩 P2	左 860	-0.177	0.012 2	1 289.70	-3.49	0.067	-4.73
	右 861	-0.039	-0.097	1 292.13	-3.73	0.252	-3.34
边墩 P3	左 858	1.793	0.565	1 264.94	62.05	-5.47	-2.39
	右 859	1.889	0.579	1 164.84	60.87	-5.65	7.25
桥台 A4	左 856	0.153	-0.456	356.212	1.211	-3.61	1.29
	右 857	0.153	-0.456	373.691	1.210	-3.61	-1.99

可见,橡胶支座方案,由于支座释放了中墩处的水平约束,因此受到整体升降温、梯度升降温引起的中墩支座水平力均较小,对中墩有利,该方案较为合理。

5 菱形网架对桥梁静力和动力特性的影响

桥梁设置景观菱形网架后,对主梁基本组合下的应力以及1阶竖弯模态频率产生一定的影响,以下对比主梁在有菱形网架、无菱形网架时的区别,具体分析如下(见图16至图19以及图20、图21)。



图 16 有网架时,主梁基本组合上缘应力(最大 95 MPa)



图 17 无网架时,主梁基本组合上缘应力(最大 92 MPa)

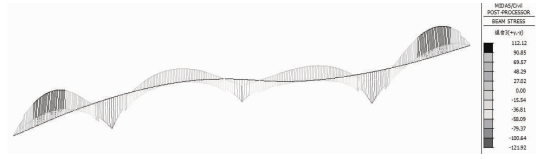


图 18 有网架时 主梁基本组合下缘应力(最大 121.9 MPa)

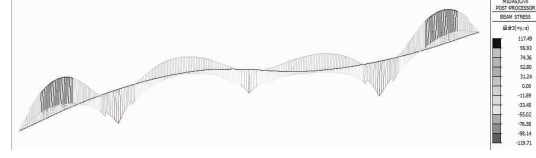


图 19 无网架时,主梁基本组合下缘应力(最大 119.6 MPa)

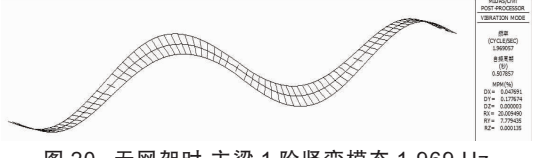


图 20 无网架时 主梁 1 阶竖弯模态 1.969 Hz

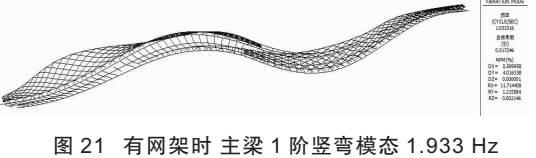


图 21 有网架时 主梁 1 阶竖弯模态 1.933 Hz

可见,网架的存在,使主梁上缘应力增加了 3 MPa,下缘应力增加了 2.3 MPa,分析表明网架的存在,增加了主梁重量,也提高主梁的抗弯刚度,前者影响更为显著,因此总体表现为主梁的应力有微小的增加。

可见,有网架时与无网架相比,主梁 1 阶竖弯频率仅提高了 0.036 Hz,相差很小,说明景观菱形网架给主桥提供了额外的竖向刚度,但也增加了质量,总体来说结构贡献不大,以装饰性为主。由于频率仍然 <3 Hz,因此需要进行舒适度计算。人行激励荷载模型采用《德国人行桥设计指南 NE03(2007)》提供的连续步行荷载(N/mm^2)。表 3 为人行桥连续步行荷载表。

表 3 人行桥连续步行荷载表

交通级别	交通状况说明	行人密度 / ($P \cdot m^{-2}$)	描述	特点	舒适级别
TC3	经常往返者	$D=0.5$	交通繁忙	行走不受限制	CL1
TC4	桥梁的竣工典礼、节日庆典	$D=1.0$	交通十分繁忙	行走不舒适,变得拥挤,行人不能自由选择步伐	CL3

建立人行荷载模型,钢结构阻尼比取 0.02,采用直接积分法:

桥长 162.4 m,桥宽 $B=6 \sim 9$ m,桥面面积 $S=1\,231\,m^2$; TC3 级别下,人群密度 $d=0.5\,P/m^2$,桥上总人数 $n=d \times S=615.5$ 人;

$$\text{行人流等效人数 } n' = \frac{10.8\sqrt{\xi n}}{S} = 0.030\,8\,P/m^2。$$

单位面积行人流荷载函数:

$$\begin{aligned} p_v(t) &= p \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times n' \\ &= 280 \cos(2\pi \times 1.933 \times t) \times 1 \times 0.030\,8 \\ &= 8.624 \cos(3.866\pi t) \end{aligned}$$

节点力取 $8.624 \times 7.5 \times 2 = 129.36\,kN$

TC4 级别下,人群密度 $d=1.0\,P/m^2$,桥上总人数 $n=d \times S=1\,231$ 人

$$\text{行人流等效人数 } n' = \frac{185\sqrt{n}}{S} = 0.052\,7\,(P/m^2)$$

单位面积行人流荷载函数:

$$\begin{aligned} p_v(t) &= p \cos(2\pi f_s t) \times \psi \times n' \\ &= 280 \cos(2\pi \times 1.933 \times t) \times 1 \times 0.052\,7 \\ &= 14.756 \cos(3.866\pi t) \end{aligned}$$

节点力取 $14.756 \times 7.5 \times 2 = 221.34\,(kN)$ 。

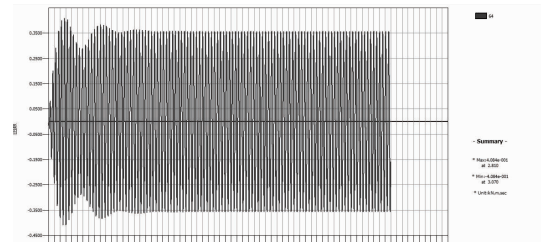


图 22 交通级别 TC4 时 跨中节点的加速度表图示

跨中节点最大加速度 $0.41 < 0.5$,位于“很舒适”区间,无需额外设置 TMD 减震。

6 施工图阶段全桥钢结构深化

S 形态的桥梁构造复杂,用 Grasshopper 进行全桥钢构件的施工图深化,具体过程为:

(1)中心线拟定,根据最新 100 a 一遇洪水位,调整桥的纵断,形成两侧 5%的纵坡,中间圆弧线渐变。由于平曲线较复杂,该桥采用正立面投影纵坡的方式,将纵坡线导入 Rhino,根据中心线的立面投影图调整其纵坡直到与导入的纵坡线一致。

(2)桥面重建:根据隔板位置线(中心线垂线方向)一列线顺序 Loft 形成桥面,纵坡足够排水,断面不考虑横坡;边梁、悬臂亦按此方式建模。

(3)箱梁顶底板、腹板,根据中心线放样得到。

(4)箱梁横隔板,考虑主梁弯曲加密,间距按每2 m弧长一道,分为实腹式、空腹式,每3道隔板中,1道实腹式,2道空腹式;在支座附近做3道间距1 m的实腹式隔板,并在支座上方设加劲十字肋、悬臂梁跟着隔板走。横隔板开人孔和板上加劲的位置,根据GH编写公式自动建模。

(5)箱梁顶板、底板的加劲肋,在最宽的位置根据中心线下拉得到加劲肋片,然后等间距偏移得到其他肋片,由于桥梁变宽,随宽度变化,加劲肋在隔板处做截断。

(6)由于洪水位较高,为满足规范规定支座在水位以上,桥台处支座需提高,因此主梁起终点需局部削梁高,按1:8坡度1.4 m减小至1.1 m。

(7)基座栏杆顶杆,由于上接倾斜的方钢杆件,下接桁架杆件,断面需做成五边形,并在接面前后留出约20 mm面宽进行焊接,如图23所示。

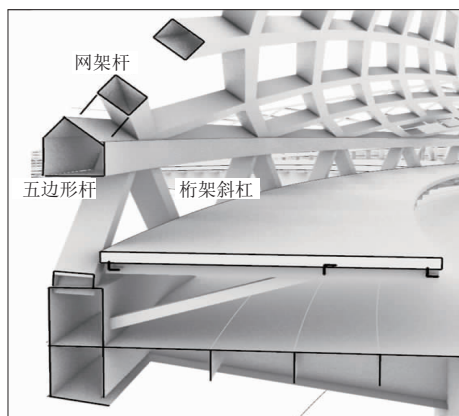


图23 杆件五边形断面

(8)杆件方向的提取与对正:在做施工图深化时,为简化施工,菱形网架中各杆件需要做成直杆,同时各杆件的方向需要对齐各处的曲面法向量,因此先用uvPoint运算器,提取曲面在各节点处的法向量,然后提取杆件线条,用Perpframe运算器生成线条起、终点的法平面,并将它们对齐各节点处的法向量,此处数据结构需一一对应。

7 结 语

如今在城市景观桥的设计中,业主对景观造型的要求越来越高,因此设计过程中对整体形态和构

造细节的把控显得尤为重要。本文通过对某景观人行桥的设计与优化全过程的介绍,有以下结论:

(1)桥梁的美感通过结构来表达,结构各组成部分的形态与体量要配合适度,构件不仅仅起到结构功能,而更多地是多重功能的统一体,并从属于桥梁的整体形态。比如:该桥的座椅,有行人休息、遮挡净空不足位置、引入木材质与钢产生对比、强化桥侧曲线美感,共4重功能。通过对菱形网架的优化设计,综合考虑桥梁的景观性与通透性,桥梁的通行功能、城市家具功能,对网架、下方加劲斜杆的尺寸的优化设计,能得到较为完美的解决方案。

(2)对于平面S形连续梁桥,与主梁中墩固结方案相比,采用板式橡胶支座能显著减小温度引起的水平力,进而优化下部结构的造价,总体更优。

(3)分析了网架对人行桥的影响,网架的存在略微减小了主梁应力,并提高了主梁1阶竖弯频率。网架富有纹理的结构形式丰富了建筑语汇的表达。虽然计算表明网架对主梁自振频率的提高帮助不大,但通过舒适度计算,该桥自振频率仍满足人行舒适度要求,无需设置TMD。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].
- [3] 谢忠良,徐羿.杭州亚运会乒乓球馆运河亚运公园体育馆斜交网格钢结构设计[J].2022,52(15):105-109.
- [4] 姬爽,王小盾,陈志华,等.某文博中心大跨度楼盖钢结构方案设计[J].振动与冲击,2021,40(23):143-151.
- [5] 王茜,王春生,俞欣,等.钢桥塔的构造设计研究[J].公路,2008(5):46-50.
- [6] 乔帅斌.某斜交网格结构参数化建模与分析[J].甘肃科技纵横,2022,51(9):36-40.
- [7] 樊春雷,包献博,郝际平,等.菱形网格支撑框架结构基于性能的抗震设计方法研究[J].振动与冲击,2021,40(23):143-151.
- [8] 周健,汪大绥.高层斜交网格结构体系的性能研究[J].建筑结构,2007,37(5):87-91.
- [9] 任晓霏.基于参数化建模的建筑“编织”主题研究——以莱州博物馆概念设计方案为例[D].南京:东南大学,2018.
- [10] 陈彬磊,郭宇飞,张勇.深圳湾体育中心钢结构方案设计[J].建筑结构,2013,43(17):63-67.