DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250756

某景区人行玻璃悬索桥设计

武建敏[1,2]
(1.天津市政工程设计研究总院有限公司,天津市 300392; 2.天津市基础设施耐久性企业重点实验室,天津市 300392)

摘 要: 人行玻璃悬索桥是一种较为新颖的桥型,具有外形美观、构造简单和受力明确的特点,又因其出色的视觉体验增添了旅游价值,在诸多旅游景点得到了应用。介绍了一座主跨 36 m 的平行索面人行玻璃悬索桥,主缆垂跨比为 1/7.2,采用重力式锚碇,桥塔使用拱形钢管结构,加劲梁采用纵横梁格构体系,格构的露空部分铺设超白钢化夹胶玻璃。详细介绍了此桥的总体设计、细部构造和施工流程,并列出了主要的计算结果。该桥造型简洁,无需设置抗风缆索,适应性强,在中小型景区中有较大的推广价值。

关键词: 人行桥;悬索桥;玻璃桥面
中图分类号: U448.25;TU997 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0216-04

Design of Pedestrian Glass Suspension Bridge in a Scenic Area

WU Jianmin[1,2]
(1. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Infrastructure Durability for Enterprises, Tianjin 300392, China)

Abstract: Pedestrian glass suspension bridge is a relatively novel bridge type, which not only has the characteristics of beautiful appearance, simple structure and clear force, but also increases the tourism value because of its excellent visual experience and has been used in many tourist attractions. A parallel cable-plane pedestrian glass suspension bridge with a main span of 36 m is introduced. The vertical span ratio of the main cable is 1/7. 2, and the gravity anchorage is used. The bridge pylon is made of arched steel pipe structure, and the stiffening beam is a longitudinal and transverse beam lattice system. The exposed part of the lattice is paved with ultra-white tempered laminated glass. The overall design, detailed structure and construction process of this bridge are introduced in detail, and the main calculation results are listed. This bridge has a simple and elegant design without the needs for installation of wind-resistant cables, and its adaptability is strong, making it highly valuable for promotion in small and medium-sized scenic spots.

Keywords: pedestrian bridge; suspension bridge; glass deck

0 引 言

近年来随着我国旅游业的蓬勃发展和玻璃制造技术的不断进步,为了满足游客对旅游体验的更高追求,国内人行玻璃悬索桥的数量和规模也在不断增长。作为现代建筑和旅游的完美结合,人行玻璃悬索桥已成为众多旅游景点的新宠,吸引着无数游客前来探索和拍照留念。这种桥梁采用高强度玻璃作为桥面材料,让游客在行走时可以清晰地看到脚下的优美景色,仿佛在空中漫步。人行玻璃悬索桥不仅具有出色的承载能力和安全性,还能提供前所未有的视觉体验。它的设计既体现了工程师们的智慧,也展现了人类对自然美的追求。

收稿日期: 2025-07-28
作者简介: 武建敏(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

目前国内较为著名的玻璃悬索桥有张家界大峡谷玻璃桥[1-6]、越龙山人行玻璃悬索桥[7]、湟川三峡擎天玻璃桥、红崖谷玻璃吊桥[8]等,跨径均在 400 m 以上,规模较大。这些玻璃悬索桥不仅为游客提供了惊险刺激的体验,还成为了各自所在景区的标志性景点。

相对而言,位于城市建成区范围内景区的人行玻璃悬索桥跨径通常较小,一般在 30 ~120 m,更适合于广场、公园等场所的步行通道或观景平台,既能满足通行需求,又能提供适度的旅游体验。悬索桥线形流畅、造型优美,容易与自然环境融为一体。同时,玻璃桥面的透明性也使得桥梁更加具有现代感和科技感。综合上述优点,小跨径人行玻璃悬索桥以其独特的造型和美观性,在现代园林和景区设计中受到了普遍关注。

1　总体设计

文章的研究对象是宜昌展示中心项目中的一座小跨径人行玻璃悬索桥，桥梁连接园区内的两座小山体，同时上跨公园中的人行步道，效果图见图 1。

图 1　人行玻璃悬索桥效果图

按照保护环境和减少开挖的原则，采用了跨径布置为 10 m+36 m+10 m=56 m 的双塔双索面地锚式悬索桥，主梁支承体系是三跨连续，边中跨比是 0.28，桥梁立面布置见图 2。主梁和桥塔均采用钢结构，塔柱采用拱形造型和圆管形断面，横梁采用工字型断面，为了增强人行悬索桥的竖向和横向刚度，主纵梁采用了箱型断面。主缆矢高 5 m，垂跨比是 1/7.2，通过重力式锚碇固定，锚碇与桥台合建。桥梁基础采用桩基础，桥面使用超白钢化夹胶彩釉玻璃铺装。

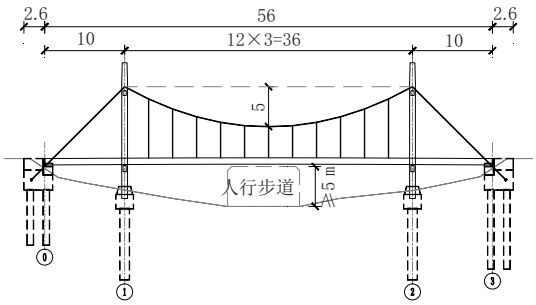

图 2　桥梁立面图（单位：m）

主梁采用等截面布置，纵梁高 0.8 m，标准断面全宽 4 m，人行道净宽 3 m，具体布置为：0.3 m（吊索区）+0.2 m（护栏）+3 m（人行道）+0.2 m（护栏）+0.3 m（吊索区），见图 3。

2　设计标准

（1）设计安全等级：一级。

（2）荷载标准：总体计算中人群荷载取 4.3 kPa。玻璃人行道面板局部计算时人群荷载取 4.5 kPa。

（3）抗震设防烈度为 6 度。

（4）净空高度：桥下人行道不小于 5 m。

（5）风荷载：无人工况设计风速取 V_{10}=26.3 m/s。

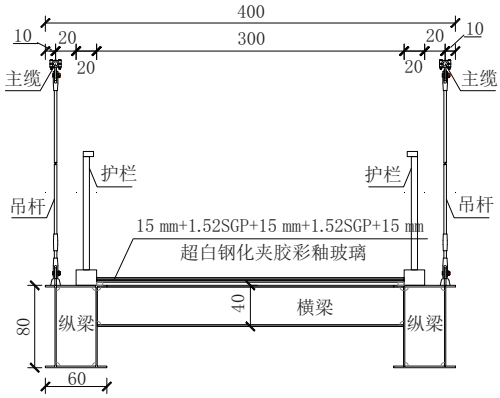

图 3　桥梁横断面图（单位：cm）

3　结构设计

3.1　缆索系统

本桥跨径较小，为了增强桥梁的整体景观性，主缆垂跨比选取为 1/7.2。两根主缆横向间距 3.8 m，成桥线形为多段悬链线。主缆由 61 根直径 5 mm、标准抗拉强度 1 670 MPa 的高强度低松弛镀锌钢丝组成，断面呈正六边形紧密排列。

受地形影响，边跨主缆与水平向夹角较大，采用了中跨主缆及边跨主缆在主塔上分别锚固的方式。主缆为三段式，两侧边跨主缆从塔顶与水平向夹角 45 °向下锚固于桥台处的重力式锚碇上。

吊索上端与索夹吊耳连接，下端与纵梁吊耳连接，吊索顺桥向间距 3 m。吊索采用 Q355 钢材的钢拉杆，直径 25 mm，通过吊杆调节器实现吊索长度调整，吊索强度安全系数不小于 3.0。

3.2　主梁和桥面系

鉴于本桥规模不大，综合考虑景观、经济、抗风稳定和施工便捷性等因素，选取了图 4 所示的纵横梁格构体系。为了增强桥梁的竖向和横向刚度，纵梁采用了箱型断面，两道钢纵梁横桥向中心间距 3.4 m，顺桥向在吊点及两道吊点中央处设置横隔板，间距 1.5 m。主横梁采用工字型断面，顺桥向与吊索对齐 3 m 一道，中间再设一道 T 型桥面支承横梁，顶缘都与纵梁对齐。两种横梁的顶板下方均间隔 1 m 设置承托，以增强对桥面玻璃的支撑。

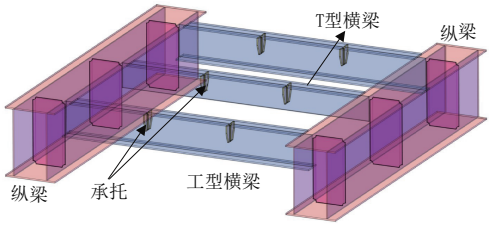

图 4　主梁构造

桥面采用 15 mm+1.52 SGP+15 mm+1.52 SGP+15 mm 的三层超白钢化夹胶彩釉玻璃，铺设在纵梁和横梁之间的露空区域上。中跨单块玻璃尺寸 3 m×1.5 m，边跨单块玻璃尺寸 3 m×1.25 m。

3.3　桥塔、锚碇和桩基

桥塔钢结构全高 17.0 m，外露 15.5 m，塔柱采用外径 720 mm 的圆形无缝钢管，塔冠采用变截面圆形钢管，桥塔根据受力需要设置上下横梁。塔柱下接圆形承台，直径 2.2 m，厚 2 m，采用直径 1.2 m 的钻孔灌注桩。

主缆锚碇采用重力式锚，与两侧桥台共建。锚碇平面投影为顺桥向长 3.6 m、横桥向宽 6.0 m，高 3.0 m。锚碇下采用桩基础，每个锚碇下设 4 根桩基，直径 0.8 m。该区域地质条件较好，中风化泥质粉砂岩埋深较浅，可作为基础持力层。锚碇和桥塔桩基均按嵌岩桩进行设计。

4　施工流程

本项目位于公园中，桥梁规模不大且地形起伏较小，所以采用难度最小的满堂支架法施工。先完成桥塔和主梁的拼装焊接，再挂装主缆和吊索，最后安装桥面玻璃。详细施工过程为：(1)施工桥梁桩基、锚碇和桥塔基础；(2)吊装桥塔钢塔柱并完成塔脚预应力螺纹钢筋的张拉锚固；(3)架设满堂支架，在支架上拼装焊接钢主梁；(4)挂装中跨主缆；(5)挂装边跨主缆，施加 30.2 kN 的初拉力；(6)安装吊索并施加 19.6 kN 的初拉力；(7)拆除满堂支架，安装护栏等附属设施；(8)安装桥面玻璃，全桥竣工。

5　桥梁计算

5.1　总体静力计算

总体计算采用 MIDAS Civil 软件进行，使用梁单元模拟纵梁、横梁和桥塔，使用索单元模拟主缆和吊索，玻璃桥面和附属结构均作为恒载施加，计算模型见图 5。

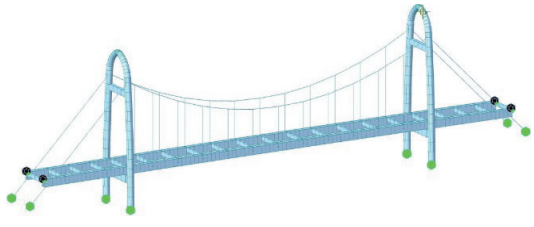

图 5　人行悬索桥计算模型

对模型施加人群荷载、温度荷载、风荷载和不均匀沉降作用，最不利工况是“恒载+人群+温度+运营风+沉降”，各个构件的最大应力见表 1。主梁、桥塔和钢拉杆均采用 Q355 钢材，主缆使用抗拉强度 1 670 MPa 的高强度低松弛镀锌钢丝，表中所列计算结果均未超过《公路钢结构桥梁设计规范》中 Q355 钢材拉压弯 280 MPa 和 1 670 MPa 钢丝抗拉 900 MPa 的强度设计值，满足规范要求。

表 1　桥梁构件最大应力　　单位：MPa

构件	最大应力
纵梁	96.6
横梁	110.1
钢塔柱	100.2
桥塔上横梁	103.3
桥塔下横梁	116.5
中跨主缆	410.8
边跨主缆	513.9
吊索	90.3

5.2　桥面玻璃计算

本工程使用的是 SGP 夹胶玻璃，计算其最大应力和最大挠度时应采用玻璃的等效厚度。国内相关规范[9-13]虽然规定了等效厚度的计算方法，但均未考虑中间胶片层的作用，计算结果偏于保守[14]。本文采用欧标 prEN13474 和文献[15]的方法计算等效厚度，计算公式见式(1)～式(13)，计入了 SGP 胶片层的作用。

$$\sigma = \frac{6mqL^2}{h_{ef:\sigma}^2} \tag{1}$$

$$d_f = \frac{\mu q_k L^4}{D} \tag{2}$$

$$h_{ef:w} = (h_1^3 + h_2^3 + 12\Gamma I_s)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 9.6\dfrac{EI_s h_v}{Gh_s^2 L^2}} \tag{4}$$

$$I_s = h_1 h_{s:2}^2 + h_2 h_{s:1}^2 \tag{5}$$

$$h_s = 0.5(h_1 + h_2) + h_v \tag{6}$$

$$h_{s:1} = \frac{h_s h_1}{h_1 + h_2} \tag{7}$$

$$h_{s:2} = \frac{h_s h_2}{h_1 + h_2} \tag{8}$$

$$h_{1:ef:\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef:w}^3}{h_1 + 2\Gamma h_{s:2}}} \tag{9}$$

$$h_{2:ef:\sigma} = \sqrt{\frac{h_{ef:w}^3}{h_2 + 2\Gamma h_{s:1}}} \tag{10}$$

$$\sigma = \frac{6mqL^2}{h_{ef:\sigma}^2} \tag{11}$$

$$d_f = \frac{\mu q_k L^4}{D} \tag{12}$$

$$D = \frac{Eh_{ef;w}^3}{12(1-\nu^2)} \tag{13}$$

式中：$h_{ef;w}$为挠度计算时的等效厚度，mm；h_1、h_2为胶片两侧钢化玻璃的厚度，mm；h_v为胶片层的厚度，mm；Γ为胶片的剪力传递系数；E为玻璃的弹性模量，MPa；G为胶片的剪切模量，MPa；L为玻璃短边的长度，mm；$h_{1;ef;\sigma}$、$h_{2;ef;\sigma}$为强度计算时胶片两侧钢化玻璃的等效厚度，mm；σ为单片钢化玻璃的最大应力值，MPa；q为荷载设计值，MPa；m为弯矩系数；d_f为最大挠度值，mm；μ为挠度系数；q_k为荷载标准值，MPa；D为玻璃面板刚度，N·mm；ν为玻璃的泊松比。

桥面玻璃是三层时可将相邻的两片视为一片进行计算，厚度采用相邻两片的等效厚度。将玻璃的参数和承受的实际荷载带入式(1)～式(13)，计算得到的结果见表2。桥面玻璃在使用过程中存在爆裂的风险，计算时需考虑其中一片玻璃破碎时的不利工况，破碎后的玻璃和与其相邻的胶片失效退出工作。计算结果证实本工程的玻璃桥面设计合理，能满足工程实际需要。

表2　玻璃桥面计算结果

构件	应力/MPa		变形/mm	
	计算值	限值	计算值	限值
正常工作	8.45	36	0.93	7.5
一片破碎	26.19	54	7.15	12.5

6　结　语

文章介绍了一座适应于中小型景区的人行玻璃悬索桥，对桥梁的总体布置、缆索系统、主梁、桥面系、桥塔、锚碇和基础等主要构造做了详细介绍。最后，提供了总体静力计算和桥面玻璃计算的结果，玻璃计算时考虑了SGP胶片层的作用，证实了此类型桥梁的安全性和可靠性，同时验证了小跨径悬索桥无抗风缆索的适用性，推广了SGP夹胶玻璃的优化计算方法。小跨径人行玻璃悬索桥造型独特，集休闲、观光于一体，能够让人们无需远行就可以获得新奇的体验，可以在中小型景区和各类网红打卡地中推广建设，提升所在地的旅游价值。

参考文献：

[1] 万田保．张家界大峡谷异型玻璃悬索桥设计关键技术[J]．桥梁建设，2017，47(1)：6-11.
[2] 方绪镯，王忠彬，石建华．张家界大峡谷玻璃桥加劲梁设计[J]．桥梁建设，2017，47(2)：78-82.
[3] 王忠彬．张家界大峡谷玻璃桥缆索系统设计[J]．桥梁建设，2017，47(3)：83-87.
[4] 刘科峰，王忠彬．张家界大峡谷玻璃桥桥塔设计[J]．世界桥梁，2021，49(1)：1-6.
[5] 罗华莹，王忠彬．张家界大峡谷玻璃桥基础设计[J]．桥梁建设，2017，47(4)：96-100.
[6] 马亮，郭坤，孙硕凯．张家界大峡谷玻璃桥主要施工技术[J]．桥梁建设，2017，47(3)：99-104.
[7] 刘丰洲，许伟龙，吴强强．越龙山人行玻璃悬索桥总体设计[J]．桥梁建设，2023，53(3)：114-119.
[8] 秦格，刘枫，马明，等．大跨度人行悬索桥结构设计关键技术[J]．建筑结构，2021，51(7)：115-120.
[9] JGJ 113—2015，建筑玻璃应用技术规程[S].
[10] JGJ 102—2003，玻璃幕墙工程技术规范[S].
[11] T/CNPA01—2021，景区玻璃栈道建设标准[S].
[12] DB13(J)/T 264—2018，景区人行玻璃悬索桥与玻璃栈道技术标准[S].
[13] T/CECS 896—2021，玻璃栈道工程技术规程[S].
[14] 陈俊，张其林，谢步瀛，等．四边简支夹层玻璃承载力性能的试验研究[J]．结构工程师，2011，27(4)：115-120.
[15] 刘军进，崔忠乾，李建辉，等．玻璃景观桥桥面设计方法[J]．建筑科学，2020，36(1)：1-6.