

文章编号: 1003-4722(2026)01-0133-08

DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2026.01.017

重庆黄桷坪长江大桥主桥设计

何铁明, 万田保, 王忠彬

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 重庆黄桷坪长江大桥主桥采用跨径550 m的单跨悬吊双塔地锚式空间索面悬索桥, 大桥采用双层桥面布置, 上层桥面为双向6车道城市快速路+人行道+供水管道, 下层桥面为双向6车道城市主干路+2线轨道交通。加劲梁为三跨连续钢桁梁, 桁高12 m。钢桁梁边跨采用3片主桁, 主跨采用2片主桁。桥塔造型设计取材于“黄桷树芭”, 为门式框架混凝土结构, Z1、Z2号桥塔高度分别为174 m和180 m。主缆由标准抗拉强度1960 MPa的高强钢丝组成, 2根主缆横向中心距沿纵向不断变化, 跨中、塔顶和理论散索点处分别为36.027、8、2.2 m, 共用1个锚体。吊索为空间索面布置, 两端均设置有类似“手臂关节”的大转角关节轴承; 主索鞍采用刚性旋转式结构; 散鞍座采用自适应式结构, 横向两散索鞍通过铸件隔板焊接相连。两岸锚碇均为重力式锚碇, 东锚碇基础采用明挖扩大基础+肋板式挡墙支护, 西锚碇基础采用扩大基础、地下连续墙支护。采用空间有限元分析软件建立全桥模型进行结构静、动力计算, 计算结果表明: 该桥受力性能良好、安全可靠。

关键词: 公轨两用桥; 悬索桥; 空间索面; 钢桁梁; 索鞍; 关节轴承; 桥梁设计

中图分类号: U448.12; U448.25; U442.5

文献标志码: A

Design of Main Bridge of Huangjueping Changjiang River Bridge in Chongqing

HE Tieming, WAN Tianbao, WANG Zhongbin

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The main bridge of Huangjueping Changjiang River Bridge in Chongqing is a two-tower suspension bridge with a suspended main span of 550 m, accommodating two levels of decks, where the upper deck carries 6 vehicle lanes (3 in each direction), side walks and water mains, and the lower deck carries 6 lanes of urban trunk road and dual light rail tracks. The stiffening girder consists of 12 m-deep steel trusses and is arranged in three continuous spans, with three trusses in the side spans and two trusses in the main span. The design of the portal-frame towers is inspired by the "buds of the ficus virens", and the towers Z1 and Z2 rise 174 m and 180 m, respectively. The three-dimensionally arranged two main cables consist of high-strength steel wires of a standard tensile strength of 1960 MPa, whose center-to-center distance varies along the length of the bridge, being at 36.027, 8 and 2.2 m at midspan, tower top and the theoretical splay points, respectively. The hanger cables are arranged in spatial cable planes, fitted with a large-rotation-angle joint bearings, similar to the human elbow joints. The main cable saddles are rigid swivel structures. The two splay saddles that are self-adaptive structures are connected via the welded cast diaphragms. The two anchorages are all gravity anchorages, the east anchorage rests on an open-cut spread foundation that works collaboratively with the ribbed-plate walls, and the west anchorage is mounted on a spread foundation that was excavated with the support of diaphragm walls. The 3D finite element analysis demonstrates that the bridge structure is safe and

收稿日期: 2024-12-14

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划重大专项课题(2022-专项-01)

Project of Science and Technology Research and Development Program of China Railway Group Limited (2022-Special Class-01)

作者简介: 何铁明, 高级工程师, E-mail: dqyhetieming@crecg.com。研究方向: 大跨度桥梁设计。

reliable, with sound load bearing performance.

Key words: road-light rail bridge; suspension bridge; spatial cable plane; steel truss; cable saddle; joint bearing; bridge design

1 工程概况

黄桷坪长江大桥位于重庆市中部槽谷,在南岸区、巴南区、九龙坡区三区交汇处跨越长江,距下游鹅公岩长江大桥约4.0 km,距上游李家沱长江大桥约3.3 km,是重庆市八横线快速路系统、主干道系统及重庆轨道交通24号线共同跨越长江的重点工程。

大桥所在区域为亚热带季风性湿润气候,年平均气温18.3℃,极端最高气温43.0℃,极端最低气温-1.8℃。年最大降雨量1544.8 mm,年最小降雨量740.1 mm。

2 主要技术标准

(1) 设计基准期:100年。

(2) 道路标准:大桥采用双层桥面布置,上层桥面为双向6车道城市快速路+人行道+供水管道,城市快速路设计速度80 km/h,设计荷载为城—A级;人群荷载按2.5 kPa考虑;预留供水管。下层桥面为双向6车道城市主干路+2线轨道交通,城市主干路设计速度60 km/h,设计荷载为城—A级;预留轨道交通24号线,设计荷载为地铁As型车,6节编组,最大轴重150 kN。

(3) 通航标准:桥位处为内河Ⅰ级航道,通航净空为495 m×24 m。最高通航水位+196.27 m(1985国家高程基准,下同),最低通航水位+162.97 m。

(4) 抗震设防标准:E1地震作用下,地震动水平峰值加速度为0.059g(50年超越概率10%);E2地震作用下,地震动水平峰值加速度为0.126g(50年超越概率2%)。

(5) 设计风速:距离地面10 m高处,重现期100年,10 min平均最大风速24.4 m/s。

(6) 设计洪水频率:300年一遇。

(7) 船撞技术标准:通航孔主墩按10 000 t单船校核船撞力,辅助墩按5 000 t级校核船撞力。

(8) 环境类别:I类。

3 总体设计

3.1 断面布置

在既有李家沱长江大桥和鹅公岩长江大桥2条快速路桥梁之间,仅有黄桷坪长江大桥一处规划桥位,位置居中,桥位资源稀缺。经功能需求分析,黄

桷坪长江大桥需要承担重庆市八横线快速路系统、主干道系统、轨道24号线、人行系统和应急供水管道过江的五大功能。

根据通航批复要求,大桥主跨为550 m。受接线条件限制,大桥上、下层的主线交通与两岸相交的滨江路均设置了功能完备的互通立交,东岸二塘立交和西岸黄桷坪立交距离大桥主墩最近仅250 m左右,互通主线变宽段均进入了大桥主梁的设计范围,边跨相较主跨等宽段加宽最大约12 m。这要求大桥的主梁设计需考虑适应不同程度的车行道加宽。

考虑大桥搭载多种过江需求、临近两岸接线立交,大桥推荐采用双层桥面布置,上层桥面为双向6车道城市快速路+人行道+供水管道,下层桥面为双向6车道城市主干路+2线轨道交通。

3.2 桥型方案

受两岸用地规划限制,大桥两岸桥头重要建筑及已发件地块限制较多,其中东岸桥位走廊建设可用最小宽度仅为120 m左右。受限于两岸道路交通及轨道交通的接线影响,大桥边跨距主墩约150 m处,下层的市政主干路与轨道交通需竖向分坡,导致大桥的边跨长度较短。考虑桥头用地范围受限、轻轨竖向分坡影响,在前期方案研究阶段提出了斜拉桥和悬索桥2种桥型方案,并进行了同深度比选。

(1) 斜拉桥方案。斜拉桥方案跨径布置为(105+126+550+126+105) m,全长1 012 m,见图1。主梁采用双层钢桁梁(图2),桁高13 m,上、下层梁高均为2.5 m,斜拉索锚固于主桁处,上、下层车行道范围主梁采用悬臂结构,通过调整钢箱梁悬臂长度适应两岸立交变宽需求。斜拉桥方案将斜拉索锚固于主桁,人行道及过江管线受限于桥面空间布置,只能置于上层桥面两索面之间,轨道交通布置于下层桥面主桁之间,索力直接传至主桁,传力途径清晰合理。斜拉桥造型蕴藏着明确、强劲的力感,彰显简洁大气的现代风格,充分体现了现代城市桥梁的生机与魅力。

(2) 悬索桥方案。考虑锚碇结构尺寸、施工放坡开挖及相关支护措施,常规悬索桥方案在锚碇位置采取极限支护措施后,锚碇建设用地宽度至少需150 m,将侵占已发件用地红线,方案无法满足项目需求。为解决两岸用地矛盾,设计中创造性地在锚

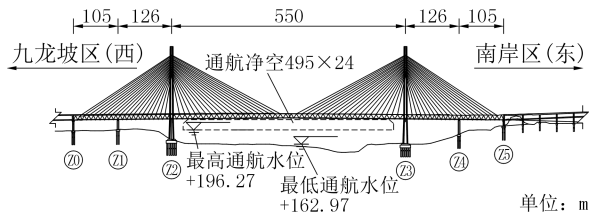


图1 黄桷坪长江大桥斜拉桥方案立面布置
Fig.1 Elevation View of Cable-Stayed Bridge Option of Huangjueping Changjiang River Bridge

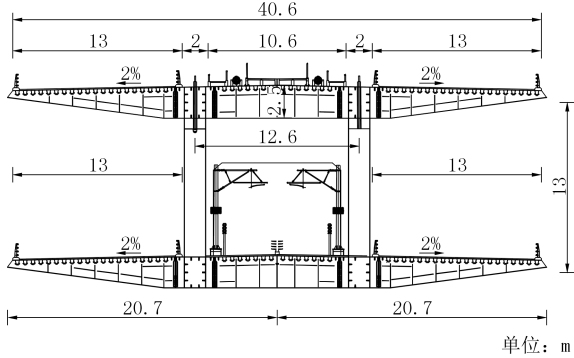
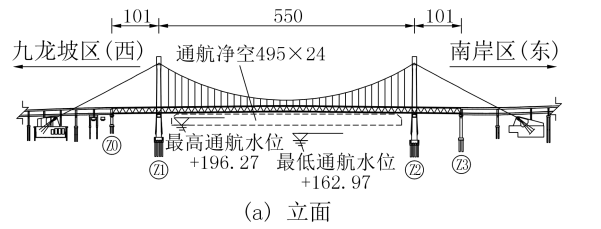


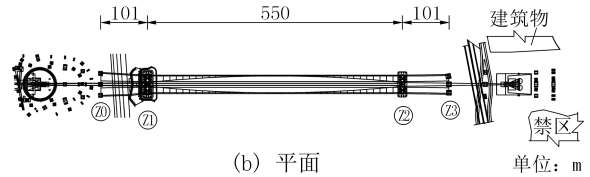
图2 斜拉桥方案标准横断面

跨将2根主缆“合并”,减小边跨两主缆横向距离,并将大桥接线引桥分幅布置,主缆从两幅引桥中间穿过,共用1个锚体,从而减少了锚碇构造尺寸,将锚碇位置建设用地宽度减少至120m左右,避让了已发件用地红线,满足了项目建设条件的限制要求。悬索桥方案采用单跨悬吊双塔地锚式空间索面悬索桥,见图3。主缆跨度布置为(225+550+225)m,横向布置2根,垂跨比采用1/6.875,垂度80m。加劲梁采用三跨连续钢桁梁,跨径布置为(101+550+101)m,桁高12m,见图4。受桥面布置控制,吊索锚固于主桁。加劲梁在桥塔下横梁处、过渡墩顶横向各设置3个支座,上、下游边支座为双向活动支座,中支座为纵向活动、横向限位支座。加劲梁纵向不设固定支座,在桥塔下横梁处采用阻尼约束体系,共设置4台粘滞阻尼器,2个桥塔上、下游边主桁处各设置1台纵向阻尼器。悬索桥方案通过桥塔和主缆的柔美曲线,展示出一个充满魅力与朝气、充满特色和吸引力的城市形象。

斜拉桥方案对两岸已发件用地无影响,可以满足功能需求。但还存在以下不利因素:①边跨深入两岸互通主线与匝道分流区段,主梁结构复杂,用钢量较大,经济性差;②主、引桥间存在刚度突变,过渡墩处局部构造复杂;③人行道布置于两索面之间,跨江后两岸人行系统转换需横跨车行道,且行人视觉效果较差。悬索桥方案采用空间索面悬索结构,锚碇处两主缆合并到一起,锚碇体积小,通过设置支护



(a) 立面



(b) 平面

图3 黄桷坪长江大桥悬索桥方案总体布置
Fig.3 General Layout of Suspension Bridge Option of Huangjueping Changjiang River Bridge

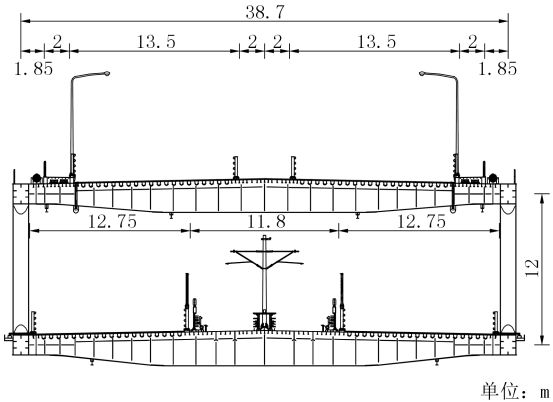


图4 悬索桥方案标准横断面

Fig.4 Standard Cross-Section of Suspension Bridge

结构收坡,对两岸已发件用地影响较小,方案可行。经综合比较,空间索面悬索桥方案可以适应两岸立交接线条件,结构受力合理,对两岸已发件用地影响小,经济性较好^[1-2],因此该桥主桥最终采用单跨悬吊双塔地锚式空间索面悬索桥。

4 结构设计

4.1 加劲梁

主桥加劲梁为三跨连续钢桁梁(图5),跨径布置为(101+550+101)m,总长752m,其中主跨550m范围位于吊索区。钢桁梁采用变桁片式双层桥面结构,三角形桁式,桁高12m,标准节间长度为14.1m,采用焊接整体节点结构形式。受接线条件影响,大桥与两岸接线互通距离较小,互通主线变宽段进入主桥钢桁梁边跨范围,大桥采用单跨吊结构,边跨若采用和中跨区域钢桁梁统一的主桁截面轮廓尺寸,轮廓尺寸由边跨最大内力杆件控制设计,会使中跨区域用钢量偏高,进而使全桥用钢量偏高;另外,大桥下层搭载轨道交通,对梁端转角有严格要求。为满足大桥主、边跨受力需求,并节约用钢量,

大桥加劲梁的设计中首次采用两主桁变三主桁连续桁梁结构(图6),边跨采用3片主桁,主跨采用2片主桁,解决了横向非对称超宽桁梁受力合理性技术难题,显著降低了全桥用钢量,改善了边跨梁端转角,减小了边跨横梁跨度及边跨横向变形,提高了轨道平顺性。中跨钢桁梁等宽,主桁中心距为38.7 m;两边跨钢桁梁变宽,西岸边跨钢桁梁为“双折线”方式变宽,主桁中心距从38.7 m变宽至50.12 m,东岸边跨钢桁梁为线性变宽,主桁中心距从38.7 m变宽至41.4 m。

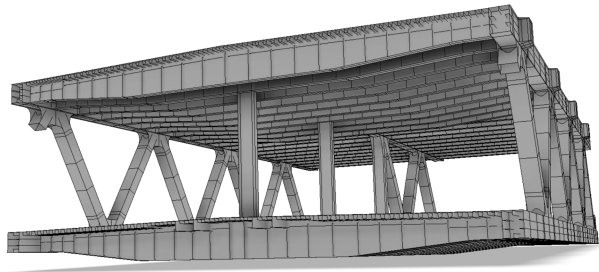


图5 钢桁梁桁片示意

Fig. 5 Details of Steel Truss

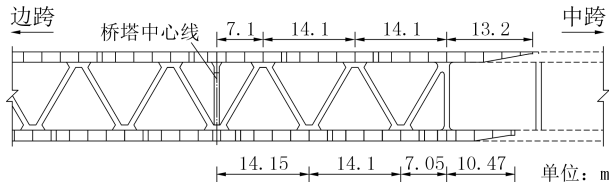


图6 钢桁梁中桁渐变示意

Fig. 6 Mild Variation of Central Steel Trusses

上、下层桥面系均采用钢正交异性板密横梁结构,由桥面板及其加劲肋、节点横梁、节间横梁组成,横向设置2.0%双向横坡,桥面顶板厚16 mm。标准节段桥面系在节点位置设置有节点横梁,节点间每隔2.82 m设置节间横梁。横梁上、下层梁端及下层塔根处采用箱形截面,其余均采用倒T形截面。

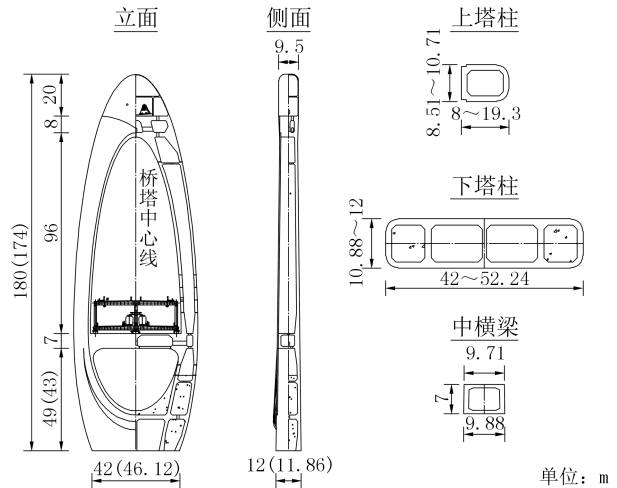
主跨上、下层桥面系桥跨中心线处设置H形竖杆,上端与上层桥面系节点横梁连接,下端与下层桥面系相连,形成整体框架。

4.2 桥塔

黄桷坪长江大桥的桥塔造型设计取材于“黄桷树苞”。黄桷树是重庆的市树,大桥的景观主题定位为“黄桷树元素”,既是对黄桷坪地方文化的致敬,也是对大桥人文内涵的深度挖掘。桥塔以曲线为主要构图元素,塔顶利用包叠交错的体、面变化,抽象地勾勒出“花瓣层叠”的意象;中横梁正好位于桥塔的黄金分割比处,营造了均衡的全塔比例空间;下横梁亦以弧线呼应,勾画了完整、圆润的花型。双塔伫

立,远看就如两枝亭亭玉立的花苞含蕊待发,象征和谐与优雅,全塔力线合理,造型虚实相映,比例适宜,彰显简洁大气的现代风格,充分体现了现代城市桥梁的生机与魅力。

两岸桥塔结构形式相同,均为门式框架结构,Z1、Z2号桥塔高度分别为174 m和180 m,两桥塔上塔柱构造相同(图7)。桥塔采用C55混凝土,除中横梁和上横梁为预应力混凝土结构外,其余部分均为普通钢筋混凝土结构。桥塔塔柱采用矩形空心截面,在靠近实体段和横梁附近设置加厚段。为提高主墩抗船撞性能,下塔柱填充C25片石混凝土。



注: 括号内、外分别为Z1号、Z2号桥塔尺寸。

图7 桥塔构造

Fig. 7 Tower Configuration

4.3 缆索系统

大桥主缆横向中心距沿纵向不断变化,从跨中的36.027 m渐变到塔顶的8 m,横向矢跨比达到1/39.25,缆索系统的空间效应较为明显^[3]。为解决空间索面布置带来的大空间效应,大桥缆索系统的结构设计中采取了一系列措施:吊索两端均设置有类似“手臂关节”的大转角关节轴承,满足了空间吊索在施工及运营过程中大角度的纵、横向转动需求;主索鞍采用刚性旋转式结构,2个主索鞍内倾以抵抗两主缆横向水平分力;散索鞍采用自适应式结构,横向两散索鞍通过铸件隔板焊接相连,平衡了两主缆散索后平弯引起的横向次内力。

(1) 主缆。主桥横向布置2根空间主缆,两主缆跨中横向中心距为36.027 m,考虑主索鞍构造需要,塔顶处横向中心距为8 m,理论散索点处横向中心距为2.2 m,见图8。主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS)法形成,每根主缆由91根索股组成,每股由127根 $\phi 5.95$ mm 高强钢丝组成,标准抗拉强度为1 960 MPa。

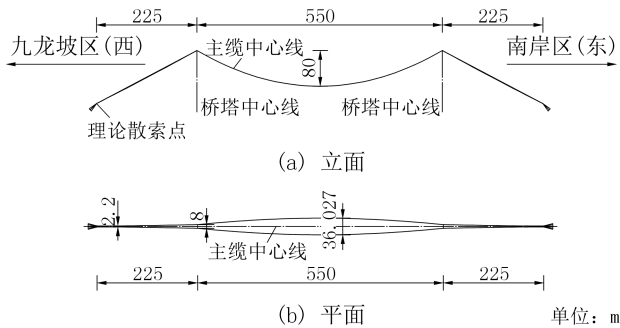


图8 主缆中心线成桥线形

Fig. 8 Centerline of Main Cables in As-Built Bridge

(2) 吊索。成桥状态下吊索为空间索面布置,吊点纵向间距为 $(21.2+36\times 14.1+21.2)$ m,每个吊点处均设置2根吊索,吊索采用 $\phi 7.0$ mm镀锌高强预制平行钢丝,标准抗拉强度为1 770 MPa。吊索两端均设置有类似“手臂关节”的大转角关节轴承,上端通过叉形耳板与索夹销接,销轴与索夹耳孔间设置向心关节轴承;下端通过张拉锚具与钢桁梁外侧承压式钢锚箱连接^[4-5],锚固螺母与钢锚箱承压板间设置推力关节轴承^[6-7],以满足空间吊索在施工及运营过程中大角度的纵、横向转动需求。

(3) 索夹。吊索索夹采用上下对合型结构形式,抗滑安全系数均大于3,满足抗滑要求。除在吊索处设置吊索索夹外,还设置多种无吊索索夹。位于边跨主缆无吊索区的索夹,起到夹紧边跨主缆及支撑主缆检修道的作用;位于主索鞍两侧和散索鞍处的锥形封闭索夹,起到封闭该处主缆的作用。横向限位索夹位于边跨主缆下穿桥面位置前,起到控制两主缆横向间距及抑制两主缆尾流驰振效应的作用。

(4) 主索鞍。主索鞍采用刚性旋转式结构,2个主索鞍内倾以抵抗主缆横向水平分力,单个主索鞍采用铸焊结合的结构形式,鞍体下设嵌槽柱面滑块以适应施工中的相对位移。

(5) 散索鞍。散鞍座采用自适应式结构,单个散索鞍为底座式结构,横向两散索鞍通过铸件隔板焊接相连,平衡了2根主缆散索后平弯引起的横向次内力,鞍座由上部的鞍体和下部的大吨位钢滚轴支座组成。

(6) 锚固系统。主缆锚固系统采用焊接钢拉杆锚固结构^[8],由后锚梁和锚杆组成。前锚面平行于后锚面,前锚面与后锚梁中心距为20 m,主缆理论散索点与前锚面的距离为20 m。

4.4 锚碇

4.4.1 东锚碇

东岸锚碇场地为构造剥蚀浅丘地段,上覆土层

主要为素填土和粉质粘土,厚度较小,下伏砂质泥岩与砂岩不等厚互层,砂质泥岩为软岩、砂岩为较软岩,覆盖层及基岩均为微透水~弱透水层,施工过程不会受到地下水影响,较适宜开挖。

结合地质情况,东锚碇采用重力式锚碇,基础采用明挖的扩大基础+肋板式挡墙支护。基坑开挖深度为16~62 m,基坑边坡根据不同地层结合周边建(构)筑物位置,优先采用自然放坡+绿化护坡分级放坡,每级边坡高8~10 m,每级边坡之间设置2 m宽2%横坡平台,部分段落受周边建(构)筑物限制不具备放坡条件时,采用桩板墙或板肋式锚杆挡墙支护收坡处理,最大坡度1:0.1。东锚碇基础平面布置成矩形,平面尺寸为75 m \times 46 m,基础高度24 m,基底持力层为中风化砂质泥岩。为减小基础开挖量,东锚碇基础纵向设置1个台阶,台阶长19 m,高10 m。锚碇结构由锚碇基础、锚块、散索鞍支墩、锚室(包括底板、侧墙、前墙、顶盖)等部分组成。

4.4.2 西锚碇

西岸锚碇场地为构造剥蚀浅丘地段,上覆土层主要为厚7~17 m的砂卵石层,表层为薄层素填土,厚度较小,下伏砂质泥岩与砂岩不等厚互层,砂质泥岩为软岩、砂岩为较软岩。在锚碇施工期,地下水对其施工影响较大。

综合地质及地形地势情况,西锚碇采用重力式锚碇,扩大基础,锚碇基坑支护形式采用地下连续墙支护。地下连续墙直径70 m,基底置于中风化砂岩,高29.5 m,墙底嵌入弱透水基岩中。西锚碇基础平面为圆形,底面直径62 m,基础高度23 m,为平衡基底应力,内部设置8个6 m \times 5 m \times 10 m空腔及16个6 m \times 5 m \times 12 m空腔,基底持力层为中风化砂质泥岩。锚碇结构与东锚碇一致。

4.5 下部结构

Z1(Z2)号桥塔基础采用钻孔桩基础,矩形承台,平面尺寸为19.5 m \times 56.5(54.5) m,厚6.5 m,承台四周倒2.25 m的圆角。承台下按行列式及梅花形组合布置43根 $\phi 2.5$ m的钻孔桩基础,桩间距5 m,按嵌岩桩设计,桩底持力层为完整的中风化砂质泥岩。

Z0(Z3)号过渡墩为三柱式框架空心墩结构,单个轮廓尺寸为3.8 m \times 5.5 m(5.5 m \times 5.5 m)。承台为分离式结构,单个承台平面尺寸为8.7 m \times 8.7 m(10.5 m \times 10.5 m),厚3.5 m,单个承台布置4根 $\phi 2.2$ m($\phi 2.8$ m)钻孔灌注桩,按嵌岩桩设计,Z3号过渡墩墩底设置29 m高的实体段以抵抗船舶撞击^[9]。

5 结构计算

5.1 计算模型

采用空间有限元软件建立全桥模型进行结构静、动力计算。模型根据实际结构构件进行空间有限元离散,主缆、吊索采用杆单元模拟,桥塔、加劲梁采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟。设计荷载考虑恒载、汽车、轨道交通、人群荷载等主要荷载及风、温度等附加荷载。

5.2 结构静力计算

(1) 结构刚度。大桥在汽车活载、轨道交通活载共同作用下,加劲梁竖向最大挠度为0.611 m,竖向挠跨比为1/917,梁端转角为1.0‰ rad。在列车摇摆力、运营横风向作用下,加劲梁横桥向变形为0.12 m,挠跨比为1/4 583<1/4 000。在活载作用下,塔顶纵向偏位为0.097 m;在横风向强风作用下,塔顶横向位移为0.049 m。计算结果表明,大桥具有较好的刚度。

(2) 桥塔塔底反力。桥塔塔底反力见表1。由表1可知:最不利组合工况下横向、纵向弯矩最大绝对值分别为1 473 747 kN·m和1 384 005 kN·m。

(3) 加劲梁结构内力。①主力作用下,上弦杆、下弦杆、腹杆最大轴拉力分别为25 881.7、23 877.9、26 867.1 kN;主力+附加力组合作用下,上弦杆、下弦杆、腹杆最大轴拉力分别为35 376.2、29 096.0、28 949.3 kN。上弦杆最大轴拉力位于主墩支点位置,下弦杆最大轴拉力位于边跨跨中,腹杆最大轴拉力位于主墩支点位置附近。②主力作用下,上弦杆、下弦杆、腹杆最大轴压力分别为19 452.2、31 173.9、29 727.0 kN;主力+附加力组合作用下,上弦杆、下弦杆、腹杆最大轴压力分别为21 903.4、44 093.0、32 156.9 kN。上弦杆最大轴压力位于边跨跨中,下弦杆最大轴压力位于主墩支点位置,腹杆最大轴压力位于边墩支点位置。按照《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)进行运营阶段杆件强度、稳定、疲劳检算,结果均满足要求。

5.3 结构动力分析

主桥动力分析结果表明:主桥一阶振型为主梁

纵向振动,频率为0.088 8 Hz;主梁一阶对称竖弯频率为0.280 1 Hz,主梁一阶反对称竖弯频率为0.379 2 Hz,主梁一阶对称扭转频率为0.809 7 Hz。

5.4 抗风性能研究

桥址区地形地貌复杂,存在来流风速沿主梁纵向分布不均匀和局部加速的可能性,加之该桥跨度大、桥塔高,结构较为特殊,需对大桥的施工及成桥阶段抗风性能进行研究^[10-13]。

通过多种计算方法得到的成桥状态颤振临界风速见表2,表中,规范法指采用《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)计算的方法。由表2可知:包括规范法在内的所有方法成桥状态颤振临界风速计算结果均远大于成桥状态颤振检验风速54 m/s,表明该桥成桥状态的颤振稳定性满足规范要求。通过计算,关键施工状态下,包括规范法在内的所有方法施工阶段颤振临界风速计算结果基本大于施工阶段颤振检验风速45.4 m/s,表明该桥施工阶段颤振稳定性满足规范要求。大桥在成桥及施工状态下均具有较好的气动稳定性。

表2 成桥状态颤振临界风速

Tab. 2 Flutter Critical Wind Velocity of As-Built Bridge

计算方法	颤振临界风速/(m·s ⁻¹)		颤振检验风速/(m·s ⁻¹)
	正对称	反对称	
规范法	240.5	388.2	54
ESSC法	205.9	333.7	
Van der Put法	226.0	367.1	
Selberg法	209.7	344.4	
Matsumoto法	215.1	353.7	

5.5 车桥耦合振动分析

根据《铁路桥梁抗风设计规范》(Q/CR 9162—2023)建立车-桥及风-车-桥时变系统空间振动分析模型,对列车通过桥梁时的车-桥及风-车-桥系统空间耦合振动动力响应进行仿真分析,采用脱轨系数、轮重减载率来判断列车运行安全性,采用Sperling指标来判断乘坐舒适性(或运行平稳性)^[14-17]。得出如下结果:

(1) 无风条件下,当As型车以80~120 km/h通过该桥时,在所有计算工况下,桥梁的动力响应均在容许值以内,列车竖、横向振动加速度满足限值要求,列车的行车安全性满足限值要求;当As型车以

表1 桥塔塔底反力最大值

Tab. 1 Extreme Reaction Forces at Tower Bottom

荷载工况	竖向轴力/kN		纵向弯矩/(kN·m)		横向弯矩/(kN·m)	
	西岸	东岸	西岸	东岸	西岸	东岸
恒载	1 225 406	1 233 658	-28 517	-5 863	44 273	-31 055
主力	1 284 519	1 292 932	-258 499	-236 401	-704 607	688 740
主力+附加力	1 290 474	1 298 811	-1 332 863	-1 384 005	-1 473 747	1 454 336

注:轴力正值受压,负值受拉;纵向弯矩以塔柱上游侧受拉为正,受压为负;横向弯矩以塔柱东岸侧受拉为正,受压为负。下同。

80~100 km/h(桥梁设计速度段)通过该桥时,列车的乘坐舒适性达到规定的“良好”标准以上,以110~120 km/h(检算速度段)通过该桥时,列车的乘坐舒适性达到规定的“合格”标准以上。

(2) 有风条件下,满足列车走行安全性要求的桥面平均风速~车速阈值达到了我国《铁路技术管理规程》(TG/01-2014)对强风时动车组列车遇大风行车限速的相关规定,表明在强风作用下该桥不会成为全线列车运行速度的控制节点。

仿真计算分析结果表明,该桥受力性能良好、安全可靠。

6 结 语

黄桷坪长江大桥是重庆市八横线快速路系统、主干道系统及重庆轨道交通 24 号线共同跨越长江的重点工程,采用主跨 550 m 的地锚式空间索面悬索桥方案,建成后将成为世界上最大跨度的地锚式公轨两用空间索面悬索桥。为适应两岸复杂的边界条件,设计中创造性地在锚跨减小 2 根主缆横向距离,并将大桥接线引桥分幅布置,主缆从两幅引桥中间穿过,共用 1 个锚体,减小了锚碇用地范围;加劲梁采用两主桁变三主桁连续桁梁结构,解决了横向非对称超宽桁梁受力合理性技术难题;为解决空间索面布置带来的大空间效应,吊索两端均设置有类似“手臂关节”的大转角关节轴承,满足了空间吊索在施工及运营过程中大角度的纵、横向转动需求,主索鞍采用刚性旋转式结构,散索鞍采用自适应式结构,抵抗两主缆横向水平分力。黄桷坪长江大桥 2021 年开工建设,预计 2030 年建成通车,大桥效果图见图 9。



图 9 黄桷坪长江大桥效果图

Fig. 9 Rendering of Huangjueping Changjiang River Bridge

参考文献(References):

[1] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 黄桷坪长江大桥施工图设计[Z]. 武汉, 2023.

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. Construction Drawing Design of Huangjueping Changjiang River Bridge [Z]. Wuhan, 2023. in Chinese)

[2] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 黄桷坪长江大桥初步设计[Z]. 武汉, 2020.
(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. Preliminary Design of Huangjueping Changjiang River Bridge [Z]. Wuhan, 2020. in Chinese)

[3] 黄 振, 王志平, 王新国, 等. 椭圆塔空间缆自锚式悬索桥主索鞍系统设计研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(6): 99-105, 120.
(HUANG Zhen, WANG Zhiping, WANG Xinguo, *et al.* Research on Design of Main Cable Saddle System of Self-Anchored Suspension Bridge with Elliptical Tower and Space Cable[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(6): 99-105, 120. in Chinese)

[4] 洪 彧, 周文钦, 龚顺攀, 等. 大跨度公铁同层斜拉桥锚箱式索梁锚固结构传力机理及参数分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(6): 142-150.
(HONG Yu, ZHOU Wenqin, GONG Shunpan, *et al.* Load Transfer Mechanism and Parameter Analysis of Anchor Box Type Cable-Girder Anchorage for Long-Span Cable-Stayed Bridge with Deck Accommodating both Highway and Railway Traffic[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(6): 142-150. in Chinese)

[5] 吴国强, 邹敏勇, 易伦雄, 等. 锚箱式并排拉索索梁锚固结构与受力分析[J]. 中国铁路, 2020(7): 121-126.
(WU Guoqiang, ZOU Minyong, YI Lunxiong, *et al.* Design and Mechanical Study of Steel-Anchor-Box at Cable-Girder Anchorage Structure for Parallel Cables [J]. China Railway, 2020(7): 121-126. in Chinese)

[6] 肖海珠, 高宗余, 陆勤丰, 等. 南京仙新路长江大桥主桥结构设计[J]. 桥梁建设, 2024, 54(2): 1-7.
(XIAO Haizhu, GAO Zongyu, LU Qinfeng, *et al.* Structural Design of Main Bridge of Nanjing Xianxin Road Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2024, 54(2): 1-7. in Chinese)

[7] 郑水清. 空间主缆独柱塔自锚式悬索桥设计新技术[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 37-42.
(ZHENG Shuiqing. New Design Technique for Self-Anchored Suspension Bridge of Spatial Main Cable and Single Column Tower[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 37-42. in Chinese)

[8] 李永旗, 申世靖. 武汉杨泗港长江大桥锚碇型钢锚固系统施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 135-141.
(LI Yongqi, SHEN Shijing. Key Construction Techniques for Section Steel Anchor System of Yangsigang Changjiang River Bridge in Wuhan [J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 135-141. in Chinese)

- [9] 郑蔚, 诸志强, 肖潜. 浙江温州永宁大桥防船撞方案研究与数值模拟[J]. 工程建设与设计, 2024(9): 128-130.
(ZHENG Wei, ZHU Zhiqiang, XIAO Qian. Research and Numerical Simulation on Ship Collision Prevention Scheme of Yongning Bridge in Wenzhou, Zhejiang Province [J]. Construction & Design for Engineering, 2024(9): 128-130. in Chinese)
- [10] 西南交通大学. 重庆黄桷坪大桥主桥抗风性能研究报告[R]. 成都, 2020.
(Southwest Jiaotong University. Research Report on Wind Resistance of Main Bridge of Huangjueping Bridge in Chongqing [R]. Chengdu, 2020. in Chinese)
- [11] 赵林, 刘鹏, 徐军, 等. 狮子洋大桥设计风参数及主梁断面气动优化研究[J]. 桥梁建设, 2025, 55(1): 15-23.
(ZHAO Lin, LIU Peng, XU Jun, *et al.* Design Wind Parameters and Main Girder Aerodynamic Optimization of Shiziyang Bridge [J]. Bridge Construction, 2025, 55(1): 15-23. in Chinese)
- [12] 王盛铭, 莫威, 杨海忠, 等. 三塔四跨悬索桥施工阶段颤振性能研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(4): 92-98.
(WANG Shengming, MO Wei, YANG Haizhong, *et al.* Research on Flutter Stability of Three-Tower Four-Span Suspension Bridge at Construction Stage [J]. World Bridges, 2024, 52(4): 92-98. in Chinese)
- [13] 朱连任, 李运生, 曹杨, 等. 索承式人行悬索桥自振特性及弯扭耦合特征分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023, 36(3): 14-22.
(ZHU Lianren, LI Yunsheng, CAO Yang, *et al.* Analysis of Natural Vibration Characteristics and Bending-Torsional Coupling Characteristics of Cable-Supported Suspension Footbridges [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2023, 36(3): 14-22. in Chinese)
- [14] 中南大学. 黄桷坪特大桥动力特性及列车走行性分析报告[R]. 长沙, 2020.
(Central South University. Huangjueping Bridge Dynamic Characteristics and Train Running Analysis Report [R]. Changsha, 2020. in Chinese)
- [15] 李永乐, 朱金, 万田保, 等. 大跨度钢-混结合梁悬索桥涡激振动控制指标体系研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(2): 22-30.
(LI Yongle, ZHU Jin, WAN Tianbao, *et al.* Study on Controlling Index System for Vortex-Induced Vibrations of Long-Span Suspension Bridge with Steel-Concrete Composite Stiffening Girder [J]. Bridge Construction, 2024, 54(2): 22-30. in Chinese)
- [16] 李娟燕, 马旭明, 魏汝海, 等. 大跨径人行玻璃悬索桥人致振动舒适度分析及减振设计[J]. 世界桥梁, 2024, 52(5): 104-109.
(LI Juanyan, MA Xuming, WEI Ruhai, *et al.* Analysis of Human Comfort on Long-Span Glass Pedestrian Suspension Bridge under Human-Induced Vibrations and Vibration Mitigation Design [J]. World Bridges, 2024, 52(5): 104-109. in Chinese)
- [17] 李涵, 朱金, 李永乐, 等. 基于风-桥-车-人耦合振动的公路悬索桥竖弯涡激振动条件下驾驶员晕动症研究[J/OL]. 振动工程学报, 1-12 [2025-07-18]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20240402.1124.004>.
(LI Han, ZHU Jin, LI Yongle, *et al.* Evaluation of Motion Sickness of Vehicle Drivers on Highway Suspension Bridge Experiencing Vertical Vortex-Induced Vibration Based on Wind-Bridge-Vehicle-Human Coupled Vibration [J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 1-12 [2025-07-18]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.TB.20240402.1124.004>. in Chinese)



HE Tieming

何铁明

1986—, 男, 高级工程师
2010年毕业于中南大学土木工程专业, 工学学士, 2013年毕业于中南大学土木工程专业, 工学硕士。
研究方向: 大跨度桥梁设计
E-mail: dqyhetieming@crecg.com



WAN Tianbao

万田保

1966—, 男, 教授级高工
1988年毕业于西南交通大学铁道桥梁专业, 工学学士, 1992年毕业于西南交通大学桥隧及结构工程专业, 工学硕士。研究方向: 大跨度桥梁设计
E-mail: wtb1966@163.com



WANG Zhongbin

王忠彬

1978—, 男, 正高级工程师
2003年毕业于石家庄铁道大学桥梁工程专业, 工学学士, 2006年毕业于西南交通大学桥梁工程专业, 工学硕士。研究方向: 大跨度缆索承重桥梁设计与研究
E-mail: 287189208@qq.com

(编辑:王金枝)