

DOI: 10.7672/sgjs2026020025

# 大跨径上承式钢箱拱桥荷载试验研究\*

康源<sup>1</sup>, 张小宇<sup>2</sup>, 许蔚<sup>2</sup>, 吴永红<sup>2</sup>, 黄辉<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650500;

2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500;

3. 德阳天元重工股份有限公司, 四川 德阳 618000)

[摘要] 澜沧江特大桥是主跨为300m的上承式钢箱拱桥,为研究该桥运营状态下的承载力以及最不利工况下结构的力学性能,对其进行成桥荷载试验。根据桥梁最不利受力状态选择控制截面,在静载作用下测试各个控制截面的挠度、应变;通过脉动试验、行车试验、跑车试验测试其固有频率、阻尼比、冲击系数、行车响应等参数,并对分析试验数据与理论计算数据。结果表明:静载作用下,结构整体在各工况下的挠度、应变校验系数及相对残余变形、应变均满足规范要求,控制测点的相对残余应变和残余变形均有富余;在动载试验中,冲击系数为0.02~0.03,自振频率实测值大于计算值,阻尼比<5%。该桥工作状况处于弹性范围,桥梁实际强度、刚度和承载力满足设计及相关规范要求。

[关键词] 拱桥;校验系数;自振频率;承载力;试验

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0025-07

## Load Testing Research on Long-span Top-deck Steel Box Arch Bridge

KANG Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, WU Yonghong<sup>2</sup>, HUANG Hui<sup>3</sup>

(1. SINOHYDRO Bureau 14 Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming,

Yunnan 650500, China; 3. Deyang Tengen Heavy Industry Co., Ltd.,

Deyang, Sichuan 618000, China)

**Abstract:** The Lancang River Grand Bridge is a top-bearing steel box arch bridge with a main span of 300 meters. To study its load-bearing capacity under operational conditions and structural performance under the most unfavorable working conditions, load tests were conducted on the completed bridge. Control sections were selected based on the bridge's most unfavorable stress states, and deflection and strain measurements were taken at these sections under static loading. Parameters such as natural frequency, damping ratio, impact factor, and dynamic response were tested through pulse tests, vehicle traffic tests, and moving load tests. The experimental data was then compared and analyzed against theoretical calculations. The results indicate that under static loading, the deflection and strain verification coefficients of the structure across all working conditions, as well as relative residual deformation and strain, meet the requirements of the specifications. The relative residual strain and deformation at the control measurement points exhibit significant surplus. During dynamic load tests, the impact factor ranged between 0.02 and 0.03, the measured natural frequency exceeded the calculated value, and the damping ratio was less than 5%. The bridge's working condition falls within the elastic range, and its actual strength, stiffness, and load-bearing capacity comply with design and relevant code requirements.

**Keywords:** arch bridges; verification coefficient; natural vibration frequency; bearing capacity; testings

\* 国家自然科学基金(52369023)

[作者简介] 康源,高级工程师,E-mail:710597035@qq.com

[通信作者] 黄辉,工程师,E-mail:864637682@qq.com

[收稿日期] 2025-08-10

## 0 引言

钢箱拱桥具有经济、美观和跨越能力强等优点,该桥梁属于高次超静定结构,传力路径明确、结

构稳定性好、刚度大、承载力高且具有良好的塑性和韧性,在我国山区及铁路建设中发展迅速<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外通过结构设计、理论计算和模型试验取得丰富成果,为桥梁设计提供了理论依据,并在建造过程中采用数值模拟的方法进行施工阶段全过程稳定性分析<sup>[3-8]</sup>。成桥后通过荷载试验测试结构在不同工况下的响应,对新旧桥梁的结构承载力及使用寿命进行有效评估<sup>[9-10]</sup>。邹云丽等<sup>[11]</sup>研究了 265m 跨度下承式钢箱系杆拱桥的梁拱结合部应力分布,利用精细有限元仿真和 1:4 缩尺模型试验验证了设计结构在最大轴力工况下的材料设计强度,确保了结构的合理性和安全性。王银刚等<sup>[12]</sup>为评估提篮拱桥的承载力,分别在静载及动载作用下对结构响应进行了研究。邹兰林等<sup>[13]</sup>通过模拟吊杆断裂后的状态,分析稳定状态下对结构力学性能的影响。张浩<sup>[14]</sup>对钢箱提篮拱桥吊杆锚固系统受力特性进行了研究,锚固区域存在应力集中的问题,关于汽车荷载、风载等动力作用下锚固系统中吊杆和各构件的疲劳问题还需进一步研究。方华兵等<sup>[15]</sup>对重庆朝天门长江大桥的结构承载力进行了试验研究,结果表明结构各个部位的强度刚度满足要求。

当前,国内大多数大跨度钢箱拱桥采用中承式设计。景海高速澜沧江特大桥作为国内第 1 座大跨径的上承式钢箱拱桥,开展此类桥梁荷载试验评定技术研究,对于确保同类桥梁结构的安全使用、完善桥梁的荷载试验理论都具有重要的现实意义。

## 1 工程概况

澜沧江特大桥位于景洪至勐海高速公路 K7+795 处,全长 523m,全桥设计为(3×40)m 组合梁和上承式钢箱拱桥(2×40)m 组合梁。计算跨径 300m、矢高 60m、矢跨比 1/5,拱轴系数为 1.8,拱轴线为悬链线。主拱采用钢箱拱结构,沿拱轴线采用变高等宽设置,拱脚截面钢箱拱肋高度为 6.008m,跨中截面钢箱拱肋高度为 4.5m。横桥向设置 2 片拱肋,拱肋间设置 8 道桁架式钢风撑。拱上立柱采用钢箱排架结构,横向 2 根立柱,立柱间距 18.5m。依据高度分为 2 种结构尺寸。行车道系为板式钢混组合梁结构,跨度 20.8m。本桥单幅桥宽 12.5m,桥面系采用钢混组合梁,主要由纵梁、主横梁、次横梁及端横梁构成,如图 1 所示。

## 2 荷载试验

### 2.1 静载试验

#### 2.1.1 试验工况及测试截面

试验加载工况、测试截面按 JTG/T J21-01—

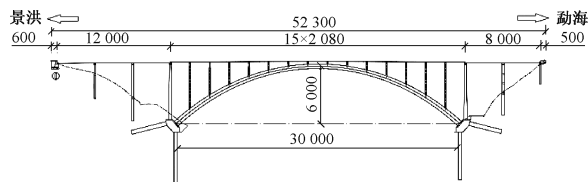


图 1 主桥立面(单位:cm)

Fig. 1 Elevation of the main bridge (unit: cm)

2015《公路桥梁荷载试验规程》确定。本次试验加载控制截面选取景洪侧拱脚最大负弯矩截面(1—1)、1/4 跨最大正弯矩截面(2—2)、拱顶最大正弯矩截面(3—3)、勐海侧拱脚最大负弯矩截面(4—4)、Z1 号立柱最大轴力截面(5—5)、主梁最大正弯矩截面(6—6)、主梁最大负弯矩截面(7—7)、1/8 跨最大正弯矩截面(8—8)和 3/8 跨最大正弯矩截面(9—9),荷载试验控制截面如图 2 所示,静载试验测试工况如表 1 所示。

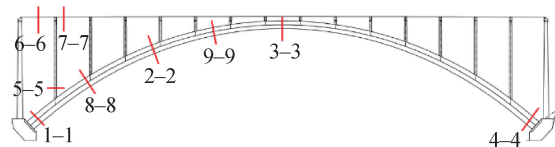


图 2 荷载试验控制截面

Fig. 2 Load test control section

表 1 静载试验测试工况

Table 1 Static load test conditions

测试工况	控制截面	加载项目	测试内容
1	1—1	主拱拱脚 1—1 断面最大负弯矩对称加载	拱脚位移、5 号立柱位移、1—1 截面应变
2	2—2	主拱拱脚 1—1 断面最大负弯矩偏心加载	拱脚位移、5 号立柱位移、1—1 截面应变
3	3—3	主拱 L/4 处 2—2 截面最大正弯矩对称加载	1/4 截面拱肋位移、2—2 截面应变、8—8 截面应变、9—9 截面应变
4	4—4	主拱拱顶处 3—3 截面最大正弯矩及挠度对称加载	拱顶位移、3—3 截面应变
5	5—5	主拱拱顶处 3—3 截面最大正弯矩偏心加载	拱顶位移、3—3 截面应变
6	6—6	主拱拱脚 4—4 断面最大负弯矩对称加载	拱脚位移、4—4 截面应变
7	7—7	Z1 号立柱 5—5 截面最大轴力对称加载	5—5 截面应变
8	8—8	主梁 6—6 断面最大正弯矩偏心加载	主梁桥面挠度、6—6 截面应变
9	9—9	主梁 7—7 断面最大负弯矩偏心加载	主梁桥面挠度、7—7 截面应变

#### 2.1.2 试验荷载

本桥梁设计荷载等级依据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》。试验拟采用 12 辆加载车,前轴重约 70kN,中、后轴重约 140kN,总轴重为

350kN 的 3 轴载重汽车;加载车型号相同,外观尺寸如图 3 所示。荷载试验前,试验单车总重量控制在  $(350 \pm 10)$  kN 以内。

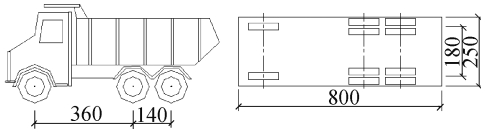


图 3 加载汽车(单位:cm)

Fig. 3 Loading car (unit: cm)

## 2.2 动载试验

桥梁运营期间不可避免地在风荷载、车辆荷载、人群荷载及地震作用下出现振动。特别是在车桥耦合作用下,桥梁的振动问题相对突出,桥梁的动力特性是评价其承载力的重要指标。采用车辆荷载导致桥梁发生受迫振动,在桥梁没有损伤的情况下结构动力特性不会发生改变,测定相应参数可有效判断桥梁结构的整体动力刚度、行车性能。

### 2.2.1 动载试验测点布置

#### 1) 脉动试验

通过脉动试验测量结构的自振频率、阻尼比和振型。结构受到环境激励产生振动,记录下振动时程信号后,对其进行时域及频域分析,求取桥梁结构的自振特性。对环境激励下桥梁响应信号进行多次功率谱的平均分析,得到桥梁各阶自振频率,再利用各个测点的振幅和相位关系,求得桥梁各阶模态相应的振型,利用幅频图上各峰值处的半功率带宽或时域上的自相关确定各阶模态阻尼比<sup>[16]</sup>。脉动测点布置如图 4 所示。

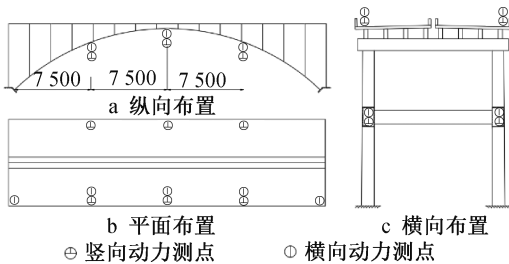


图 4 脉动试验测点布置

Fig. 4 Test points layout for pulsation test

#### 2) 强迫振动试验

利用试验车辆施加动力荷载于桥梁上,测量其动力响应,包括振幅和冲击系数等,并分析所得数据,获取桥梁的动力响应特性。强迫振动试验传感器测点布置如图 5 所示。

### 2.2.2 动载试验工况

动载试验包括脉动试验和跑车试验。动载试验工况设计如表 2 所示。

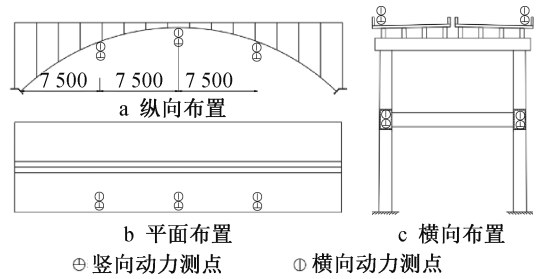


图 5 强迫振动试验测点布置

Fig. 5 Layout of test points for forced vibration test

表 2 动载试验工况

Table 2 Dynamic load test conditions

项目	工况	测试内容及车速
无障骑行车 (跑车试验)	I	结构自振频率、阻尼比
	II	振幅、冲击系数,车速 20km/h
	III	振幅、冲击系数,车速 30km/h
	IV	振幅、冲击系数,车速 40km/h
	V	振幅、冲击系数,车速 50km/h
跳车试验 (中跨跨中)	I	振幅、障碍 5cm,车速 20km/h
	II	振幅、障碍 5cm,原地跳车

## 2.3 荷载试验使用设备

本桥荷载试验关键截面预埋电阻应变片,采用无线静态应变仪采集各截面的应力数据;针对桥梁结构的动力特性相关参数采用无线采集仪采集;截面挠度、桥面线形采用水准仪和全站仪进行测量。

## 3 理论计算

### 3.1 计算模型

澜沧江特大桥采用数值模拟进行荷载试验理论分析。基于弯矩影响线法,计算控制截面在设计荷载作用下的内力值和挠度值。采用子空间迭代法得到设计荷载作用下各阶的振动频率和振型。

有限元计算模型中,拱肋、拱上立柱以及桥面系采用梁单元建模,桥面板、桥面附属设施以荷载的方式施加在结构上(见图 6)。过渡墩底、拱脚均为固结约束,拱上立柱与拱肋间、盖梁与拱上立柱间、扣塔底与交界墩顶间均采用刚性连接,桥面系钢纵梁与盖梁间采用弹性连接模拟支座,水平刚度取值  $10.4 \text{ kN/mm}$ ,混凝土弹性模量为  $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,钢材弹性模量为  $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。

### 3.2 荷载试验效率

根据设计标准活荷载,在该测试截面产生的最不利内力值确定所需加载的车辆数量。将设计标准下的最大计算效应值转换为荷载试验效率。静载试验荷载效率介于  $0.85 \sim 1.05$ 。

$$0.85 \leq \eta = \frac{S_{\text{stat}}}{(1 + \mu)s} \leq 1.05 \quad (1)$$

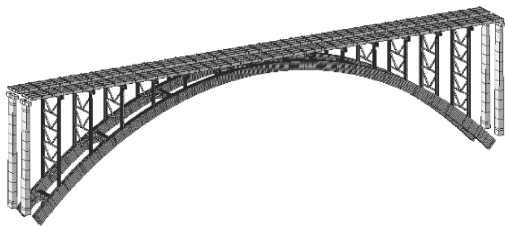


图 6 有限元计算模型

Fig. 6 Finite element calculation model

式中: $\eta$ 为荷载试验荷载效率; $S_{\text{stat}}$ 为试验荷载作用下,某加载试验项目(截面)对控制截面内力或变位等的最大计算效应值; $s$ 为设计标准活载不计冲击荷载作用时产生的该加载试验项目(截面)对应的控制截面内力或变位等最不利计算效应值; $\mu$ 为冲击系数。

引入校验系数 $\delta$ 描述试验值与理论值比较结果,钢桥校验系数应满足 $0.75 \sim 1.00$ ,以评定结构的整体受力性能。

$$\delta = \frac{S_e}{S_s} \quad (2)$$

式中: $S_e$ 为试验荷载作用下测量的弹性变位值; $S_s$ 为试验荷载作用下的理论计算变位值。荷载试验效应如表 3 所示。

表 3 主要工况荷载试验效应

Table 3 Load test effect of main conditions kN · m

工况	控制截面	公路 I 级 汽车荷载效应	试验荷 载效应	试验荷载 效率
1	1—1 拱脚截面	-42 332.4	-37 744.9	0.891
2	1—1 拱脚截面	-36 542.4	-37 317.2	1.021
3	2—2—1/4 跨截面	23 909.5	22 192.0	0.928
4	3—3 拱顶截面	14 925.9	14 513.9	0.972
5	3—3 拱顶截面	13 822.4	13 306.6	0.963
6	4—4 拱脚截面	-42 325.9	-39 592.1	0.935
7	5—5 立柱截面	-1 475.1	-1 351.8	0.916
8	6—6 主梁截面	743.07	635.16	0.854
9	7—7 主梁截面	-626.5	-561.5	0.896

## 4 荷载试验过程及结果

### 4.1 试验加载方式

荷载试验应选择在水温变化不大和结构温度趋于稳定的时间段内进行,试验过程中,应同步测量结构在荷载作用下的结构响应与其表面温度。试验前在桥面预先画出轮位,加载时汽车应按规定顺序准确就位,卸载时车辆退出桥梁结构试验影响区。为了获取结构试验荷载与效应的相关曲线和防止结构意外损伤,每种工况按试验最大荷载的 30%、60%和 100%分 3 级加载。

所有测点在正式加载试验前均应进行零级荷载读数,每次加载或卸载后应立即读数 1 次。试验

时选择结构变位较大的测点进行监测,每级荷载加载到位后稳定 10min 读取数据,应力测点每 1min 读取 1 次,以判断结构变位和应力是否达到相对稳定,只有结构变位达到相对稳定后,才能进入下一荷载阶段。

### 4.2 静载试验结果分析

#### 4.2.1 挠度分析

静载试验作用下,主拱及主梁计算挠度、挠度校验系数及相对残余应变如表 4 所示,各构件不同工况下分级加载的竖向变形如图 7 所示。

表 4 各测试截面挠度校验系数及相对残余应变

Table 4 Deflection validity coefficient and relative residual strain of each measuring section

测试 工况	测试截面	计算挠度最大 值/mm		校验系数	相对残余 应变/%
		左幅	右幅		
1	5 号立柱	23.6	23.6	0.81~0.90	1.4~1.9
2	5 号立柱	20.4	13.6	0.82~0.91	0.9~1.1
3	主拱 1/4 截面	38.6	38.6	0.91~0.92	1.5~1.7
4	拱顶	30.5	30.5	0.93~0.97	1.4~1.8
5	拱顶	30.0	15.5	0.94~0.95	2.1~2.7
6	5 号立柱	44.3	44.3	0.81~0.91	2.1~2.2
7	第 1 跨跨中 (6—6 截面)	17.4	13.9	0.83~0.91	3.2~3.5
8	第 2 跨跨中 (7—7 截面)	13.8	10.2	0.83~0.96	3.5~6.1

由表 4 可知,整体挠度校验系数均在 $0.81 \sim 0.97$ ,校验系数均 $<1$ ,不同截面的试验值均小于计算值。相对残余应变挠度最大值为 $2.7\%$ ,低于规范规定 $20\%$ 的要求,因此,主拱竖向挠度与理论计算值较吻合,线形变化合理,试验中测得的残余变形较小,表明结构整体处于弹性工作范围内。其中,拱上结构测试截面校验系数( $0.81 \sim 0.91$ )小于主拱测试截面校验系数( $0.91 \sim 0.97$ ),分析原因主要如下:①成桥后桥面板、桥面铺装及附属结构共同受力,提高了桥梁刚度,有限元模拟时,以上结构采用均布荷载的方式进行加载,未能考虑到这种协同受力的影响;②有限元模拟时,拱上立柱只建立了纵向加劲肋(并未模拟横隔板),导致荷载试验时,各截面挠度比有限元计算模型低。在进行模拟分析时,尽管存在一定的误差,但这些误差均保持在可接受的范围内。这表明模型预测与实际情况较为吻合,因此可认为模拟结果具有较高的可靠性和实用价值。

#### 4.2.2 应变分析

主拱拱脚、1/4 截面和拱顶处各测点应力如图 8 所示。同一截面不同测点应力不同,拱脚、1/4 截面

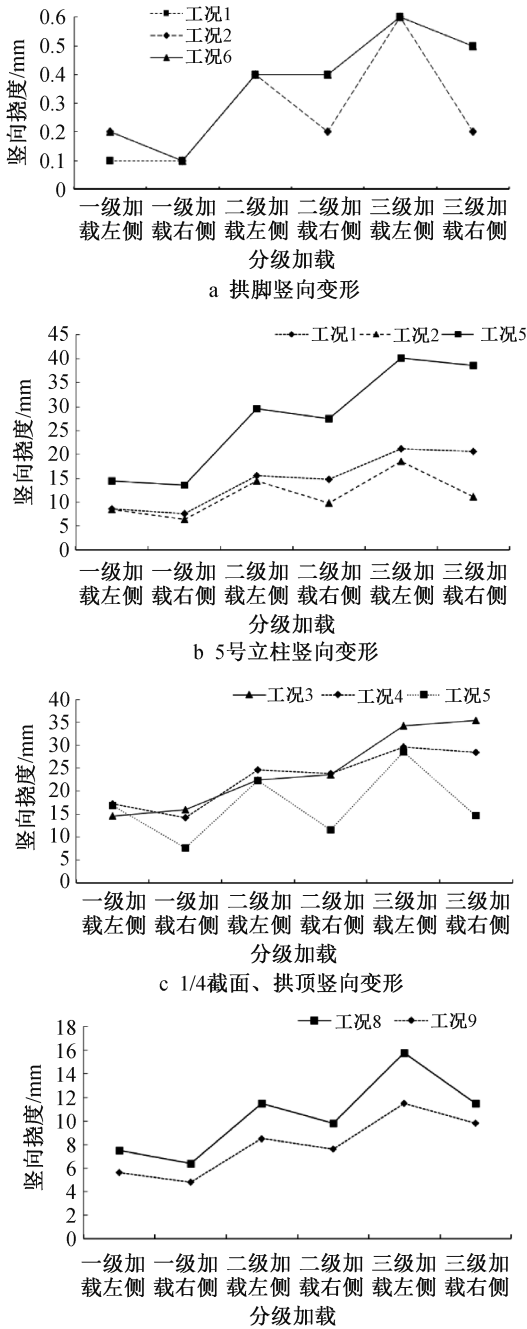


图 7 不同工况下分级加载各构件的竖向变形

Fig. 7 Vertical deformation of each component with graded loading under different working conditions

和拱顶处在中性轴以上测点应力为正,中性轴以下测点应力为负,这和加载位置引起主拱的变形有关,全截面测点应力呈现规律变化且与理论值变化规律相似,实测值小于理论值,表明主拱圈实际的刚度偏大。

各工况下截面校验系数和相对残余应变如表 5 所示,各截面实测值均小于理论值,各截面应变校验系数为 0.77~0.96,相对残余应变最大值为 9.8%,满足规范规定的 20%要求,表明该结构在

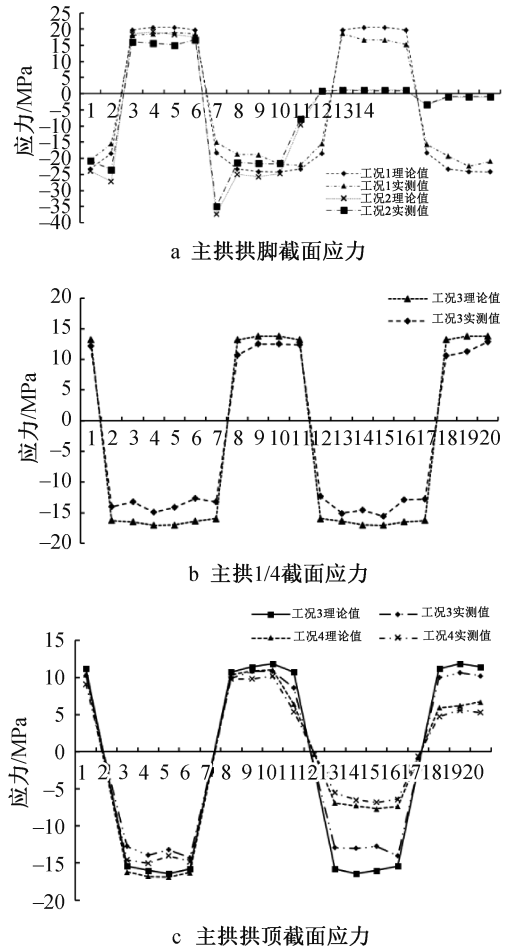


图 8 主拱拱脚、1/4 截面、拱顶应力理论值与实测值  
Fig. 8 Theoretical and measured stress values of the main arch foot, 1/4 section and arch crown

试验荷载作用下处于弹性工作状态,承载力满足要求。

表 5 各截面应变校验系数及相对残余应变

加载工况	控制截面	校验系数	相对残余应变/%
工况 1	1—1	0.78~0.94	0.6~9.3
工况 2	1—1	0.78~0.96	0.4~9.8
工况 3	2—2	0.77~0.94	0.4~9.8
工况 3	8—8	0.78~0.91	1.8~9.1
工况 3	9—9	0.82~0.94	1.1~9.1
工况 4	3—3	0.89~0.92	1.5~1.7
工况 5	3—3	0.93~0.97	1.4~1.8
工况 6	4—4	0.94~0.95	2.1~2.7
工况 7	5—5	0.87~0.91	2.1~2.2
工况 8	6—6	0.85~0.95	1.2~3.1
工况 9	7—7	0.86~0.92	1.7~3.3

重载作用下,主拱肋左、右截面相对应的测点位置应力误差较小;根据工况 2 实测值,偏载作用下同一截面左、右侧对称测点应力相差较小,表明该结构并未出现扭曲。

### 4.3 动载试验结果分析

#### 4.3.1 振动特性

脉动试验测试结果如表6所示,主梁前三阶计算振型如图9所示。澜沧江特大桥主桥实测主梁一阶横向弯曲振动频率为0.35Hz,计算值为0.337Hz,实测值大于计算值,说明实桥的横向动力刚度满足要求。主梁一阶竖向弯曲振动频率实测值大于计算值,表明竖向刚度满足要求。同时竖向一阶振动频率大于横向一阶振动频率,表明该桥竖向刚度强于横向刚度。主梁在第3阶时才出现扭转振动,表明主梁扭转刚度较大,其扭转振动不易出现。

表6 脉动试验结果

Table 6 Results of pulsation test

阶数	计算频率/Hz	实测频率/Hz	阻尼比/%	振型
1	0.337	0.350	3.58	主梁一阶横向弯曲振动
2	0.449	0.575	2.92	主梁一阶竖向弯曲振动
3	0.537	0.850	1.50	主梁一阶扭转振动

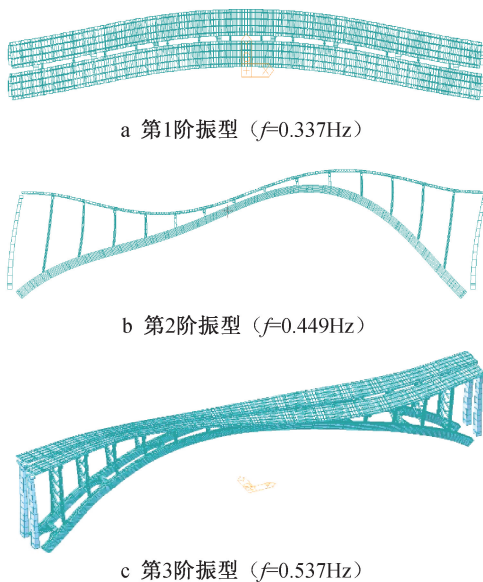


图9 主梁振型

Fig. 9 Main girder vibration mode

#### 4.3.2 动力响应

不同跑车速度下各测点的振幅如图10所示。在60km/h的跑车试验中,主梁3L/4处的竖向振幅最大;而在50km/h的跑车试验中,主梁L/2处的横向振幅最大,横向最大振幅实测值为0.742mm。跳车试验时,在主桥主梁L/2处,竖向最大振幅实测值为0.929mm,横向最大振幅实测值为0.936mm。

20~60km/h速度下,中跨L/2截面处的冲击系数分别为0.02,0.02,0.03,0.03和0.03,实测冲击系数的最大值低于主桥的冲击系数值0.05,表明不

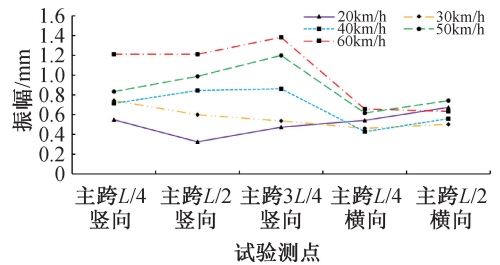


图10 不同跑车速度下试验测点实测振幅

Fig. 10 Measured amplitude values of test points at different sports car speeds

同行车速度下的振动频率小于竖向一阶振动频率,车桥耦合作用下不易出现共振现象。

上述结果表明:①实测阻尼比为1.50%~3.58%,满足钢桥阻尼比正常范围(2%~6%),随着桥梁振型阶数的增加,桥梁阻尼比减小<sup>[17]</sup>,该结构在低阶振型下桥梁结构耗散外部的能量较强,车桥耦合作用下能有效避免共振现象出现;②进行有限元模拟时,拱上立柱只建立了纵向加劲肋,试验中拱上立柱与主拱圈协同工作提高了桥梁的整体刚度,导致理论频率计算值偏小;本桥结构自振频率实测值是相应理论值的1.04~1.583倍,结构动力性能较好。结构在无障碍行车作用下各工况的冲击系数在0.02~0.03,小于规范要求的冲击系数0.05。

### 5 结语

1)静载作用下,各工况下截面挠度校验系数均在0.81~0.97,相对残余应变挠度最大值为2.7%;各截面应变校验系数为0.77~0.96,相对残余应变最大值为9.8%,均满足规范要求。在试验荷载作用下桥梁处于正常工作状态,结构的强度和刚度均较大,且安全储备较大。

2)动载试验实测自振频率高于计算频率,主桥一阶振动频率实测值为0.35,结构在无障碍行车作用下各工况的冲击系数在0.02~0.03,小于根据规范规定的冲击系数0.05,阻尼比为3.58%,大于理论值。该桥梁结构刚度强于理论值,具有较好的承载力,结构处于弹性阶段,工作状态良好,动力性能正常且结构各项性能指标达到设计预期。

3)模拟分析时,未能精确考虑桥面板、桥面铺装和其他附属结构协同作用及拱上立柱结构简化影响理论计算结果,尽管存在误差,但这些误差均在可接受范围内,说明模拟结果具有较高的可靠性;主拱圈截面受力未出现扭曲的现象,表明该结构在荷载作用下的传力路径明确,受力合理;随着振型阶数增加阻尼比减小,在低阶振型下桥梁具有

较好的耗散外部能量能力,行车作用下能有效避免共振现象,确保了结构的安全性。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.  
CHEN B C, LIU J P. Review of construction and technology development of arch bridges in the world[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20(1): 27-41.
- [ 2 ] 颜东煌,刘雪峰,田仲初,等.组合体系拱桥的发展与应用综述[J].世界桥梁,2007,35(2):65-67.  
YAN D H, LIU X F, TIAN Z C, et al. A summarized account of development and application of hybrid system arch bridges[J]. World bridges, 2007, 35(2): 65-67.
- [ 3 ] 王志,梅新咏,苏杨.大跨双层公铁两用钢箱拱桥设计关键技术[J].铁道标准设计,2021,65(11):113-117.  
WANG Z, MEI X Y, SU Y. Key techniques for design of road/rail long span double deck steel box arch bridge[J]. Railway standard design, 2021, 65(11): 113-117.
- [ 4 ] 李前名.大跨四线铁路桥上承式钢桁拱桥拱上梁设计[J].世界桥梁,2020,48(3):12-16.  
LI Q M. Deck design for a deck-type long-span steel truss arch bridge carrying four railway tracks[J]. World bridges, 2020, 48(3): 12-16.
- [ 5 ] 尹泽政,刘新峰,程浩波.下承式系杆拱桥吊杆索力计算方法对比分析研究[J].建筑结构,2023,53(S2):575-580.  
YIN Z Z, LIU X F, CHENG H B. Comparative analysis and research on calculation methods of suspender cable force of through tied arch bridge[J]. Building structure, 2023, 53(S2): 575-580.
- [ 6 ] 邵旭东,陈玉宝,何广,等.钢-UHPC组合桁式拱桥拱肋与腹杆节点性能试验研究[J].土木工程学报,2022,55(5):54-66.  
SHAO X D, CHEN Y B, HE G, et al. Experimental study on performance of joints between arch ribs and web members of steel-UHPC composite truss arch bridge[J]. China civil engineering journal, 2022, 55(5): 54-66.
- [ 7 ] 柴生波,杨清华,王秀兰,等.大跨径中承式钢箱系杆拱桥施工阶段稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(18):8095-8102.  
CHAI S B, YANG Q H, WANG X L, et al. Stability analysis of long-span half-through steel box tied arch bridge during construction[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(18): 8095-8102.
- [ 8 ] 王鹏,刘爽,尤岭.单片钢管混凝土拱桥梁稳定性分析[J].建筑结构,2023,53(S1):1924-1928.  
WANG P, LIU S, YOU L. Stability analysis of single concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Building structure, 2023, 53(S1): 1924-1928.
- [ 9 ] 唐堂,钱永久.震后大跨径混凝土拱桥荷载试验研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(4):139-146.  
TANG T, QIAN Y J. Research on load test of post-earthquake long-span concrete arch bridge[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2015, 37(4): 139-146.
- [ 10 ] 廖平,赵人达,贾毅,等.某刚架拱桥荷载试验研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):958-964.  
LIAO P, ZHAO R D, JIA Y, et al. Loading test study of a rigid frame arch bridge[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2017, 37(6): 958-964.
- [ 11 ] 邹云丽,叶华文,王正源,等.265m下承式钢箱系杆拱桥梁拱结合部应力分析与模型试验研究[J].建筑结构,2022,52(S1):1392-1397.  
ZOU Y L, YE H W, WANG Z Y, et al. Stress analysis and model test of beam-arch joint of 265m through steel box tied arch bridge[J]. Building structure, 2022, 52(S1): 1392-1397.
- [ 12 ] 王银刚,程华强,高云,等.某大跨中承式钢箱提篮拱桥荷载试验[J].科学技术与工程,2022,22(18):8087-8094.  
WANG Y G, CHENG H Q, GAO Y, et al. Load tests of a large-span half-through steel box basket-handle arch bridge[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(18): 8087-8094.
- [ 13 ] 邹兰林,胡言书.空间网状吊杆系杆拱桥吊杆断裂对结构的力学性能分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):28-33,68.  
ZOU L L, HU Y S. Analysis of mechanical properties of the structure caused by the fracture of the suspension rod of spatial mesh suspension rod tied arch bridges[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (natural science edition), 2023, 36(4): 28-33, 68.
- [ 14 ] 张浩.钢箱提篮拱桥吊杆锚固系统受力特性研究及优化分析[D].武汉:华中科技大学,2022.  
ZHANG H. Research on stress characteristics and structural optimization analysis of suspender anchoring system of steel box handle-basket arch bridge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [ 15 ] 方华兵,李鸥.重庆朝天门长江大桥成桥荷载试验研究[J].铁道建筑,2015,55(2):12-15.  
FANG H B, LI O. Experimental study on completed load of Chongqing Chaotianmen Yangtze River Bridge[J]. Railway engineering, 2015, 55(2): 12-15.
- [ 16 ] 李湛,李鹏飞,姜震宇,等.不同激励模式下桥梁实测阻尼比差异[J].振动与冲击,2016,35(3):62-67.  
LI Z, LI P F, JIANG Z Y, et al. Difference of bridge damping ratio under different excitations[J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(3): 62-67.
- [ 17 ] 石军伟,徐宙元,汪志昊.装配式简支T梁桥静动载试验与评定研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(5):12-17.  
SHI J W, XU Z Y, WANG Z H. Static and dynamic load test and evaluation of a fabricated simply supported T-beam bridge[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition), 2021, 42(5): 12-17.