

DOI: 10.7672/sgjs2026030150

大跨度钢拱桥长期服役疲劳性能评估*

姚文广

(中交路建交通科技有限公司,北京 101399)

[摘要] 针对中、下承式钢拱桥关键构件柔性吊杆疲劳安全问题,以某主跨916m的中承式钢桁拱桥为工程背景,研究耳板式锚固结构疲劳性能。建立全桥三维有限元模型,结合车辆荷载动力分析,揭示拱脚区域1号短吊杆应力达跨中吊杆2.5~3倍的核心规律。通过对比等效疲劳车辆模型及不同国家规范疲劳验算结果,量化锚固结构关键部位应力响应,得到耳板式锚固结构板件最大正应力为51.0MPa,焊缝最大剪应力为21.3MPa,均满足各国规范限值要求。实际工程中应控制销轴与耳板孔径公差 $\leq 0.1\text{mm}$,并实施硬度梯度控制;锚板与耳板焊接过渡区设置半径 $\geq 50\text{mm}$ 的圆弧,并打磨焊趾;以双曲面球铰替代球冠垫块,分丝板孔缘倒半径 $\geq 2\text{mm}$ 的圆角。

[关键词] 钢拱桥;吊杆;锚固;疲劳性能;评估

[中图分类号] U443

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0150-06

Long-term Service Fatigue Performance Evaluation of Long-span Steel Arch Bridge

YAO Wenguang

(CCCC Road Construction Transportation Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: Aiming at the fatigue safety problem of the flexible hangers of the key components of the middle-bearing and below-bearing steel arch bridges, this paper takes a middle-bearing steel truss arch bridge with a main span of 916m as the engineering background to study the fatigue performance of the ear plate anchorage structure. The three-dimensional finite element model of the whole bridge is established. Combined with the dynamic analysis of vehicle load, the core rule that the stress of No. 1 short hanger in the arch foot area is 2.5 to 3 times that of the mid-span hanger is revealed. By comparing the equivalent fatigue vehicle and different national standard load models, the stress response of the key parts of the anchorage structure is quantified. The maximum normal stress of the ear plate anchorage structure plate is 51.0MPa, and the maximum shear stress of the weld is 21.3MPa, which meets the requirements of the multi-national standard limit. In practical engineering, the hole diameter tolerance between pin shaft and ear plate should be controlled equal or lesser than 0.1mm, and the hardness gradient control should be implemented. The arc with radius greater than or equal to 50mm is set in the welding transition zone between the anchor plate and the ear plate, and the welding toe is polished. The hyperboloid spherical hinge is used to replace the ball crown block, and the fillet of the hole edge of the splitter plate is greater than or equal to 2mm.

Keywords: steel arch bridge; hangers; anchorage; fatigue performance; evaluation

0 引言

钢拱桥以其优美的造型、卓越的跨越能力和高效的材料利用率,在现代交通基础设施中占据重要地位。随着我国高速铁路网、高等公路网的持续扩

展及城市进程的加速推进,大跨度钢拱桥相继建成并投入使用,成为连接区域经济、促进社会发展的重要纽带。然而,随着我国交通量的持续增长与荷载环境的日益复杂,大跨度钢拱桥结构性能退化已成为影响路网安全与使用寿命的关键因素。通过对材料退化、疲劳累积、节点损伤及环境影响等多因素耦合作用下的性能演化规律进行研究,可科学

* 中交路建交通科技有限公司科研项目

[作者简介] 姚文广,高级工程师,E-mail:yaowenguang258@yeah.net

[收稿日期] 2025-08-18

预测桥梁剩余寿命,优化维护决策,预防灾难性失效,最终提升重大交通基础设施全寿命经济性与安全性。

已有研究表明,车-桥耦合与桥面退化共同作用加剧了吊杆疲劳损伤,使其疲劳寿命减少 15~30 年。短吊杆对车速及轨道平顺度更敏感,吊杆损伤随车速呈波动上升趋势,轨道平顺度对吊杆损伤也有较大影响。设计活荷载提供了较高的安全储备,满足规范应力要求,但部分跨中短吊杆应力较大,疲劳可靠指标接近临界值,施工及运营期间需重点关注短吊杆受力状态,以确保安全。

吊杆是中、下承式拱桥中连接拱肋与桥面的关键构件,桥面恒荷载和活荷载通过吊杆传给拱肋,车辆、风(雨)、地震导致振动产生的交变应力使吊杆在低于静力强度的情况下可能发生疲劳破坏。因此,需考虑钢拱桥吊杆安全性和耐久性,但柔性吊杆拱桥技术状况影响着构件承载力和安全水平,同时降低了构件耐久性。吊杆抗疲劳性能是否满足设计要求对于确保桥梁在设计基准期内的安全具有重要作用。因此,本文研究了柔性吊杆连接方式,对柔性吊杆疲劳性能进行了评估,并对不同国家给出的规范疲劳验算方法进行了比较。

1 工程概况

某桥梁主桥设计为中承式钢桁拱桥,全桥长度为 916m,采用三主桁钢桁梁结构。边桁与中桁桁高分别为 9.369,9.685m。中桁拱顶至中间支点的高度为 99m,边桁拱顶至中间支点的高度为 99m。拱肋下弦线形为二次抛物线,矢高 88m,矢跨比为 1:4.45。拱上弦线形为二次抛物线,并通过半径为 450m 的反向圆曲线与次边跨上弦衔接。拱顶位置处拱肋上下弦高 11m,中间支点处弦高 52.52m。

吊杆横向间距与桁宽一致,纵向间距与主桁节间相匹配,每个节点均设置吊点,如图 1 所示。选用标准强度 1 670MPa 镀锌平行钢丝成品吊杆,采用单吊杆体系,吊杆规格包括 PES7-151,PES7-187,采用冷铸锚头、HDPE 护套平行钢丝索,其下端设置为张拉端。

该桥拱肋线形复杂,结构局部应力集中明显,焊接节点、耳板销接等构造细节对疲劳损伤敏感,如果缺乏系统性的耐久性评估与健康监测,微裂纹可能逐渐扩展,最终威胁主结构安全。因此,针对此类大跨度钢拱桥,建立涵盖环境侵蚀、材料老化、荷载历程等多因素的性能退化模型,开发基于监测数据的耐久性动态评估方法,并制定科学的管养策略,以保证桥梁长期安全运营。

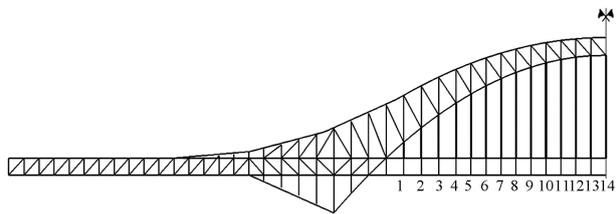


图 1 大桥吊杆布置

Fig. 1 Bridge hangers arrangement

2 钢拱桥连接形式

2.1 柔性吊杆与拱肋连接

柔性吊杆与拱肋连接时,吊杆上端采用耳板式接头锚固于拱肋外侧,该锚固结构主要由接头、索体、销轴及锚固盖板等部件组成,如图 2 所示。

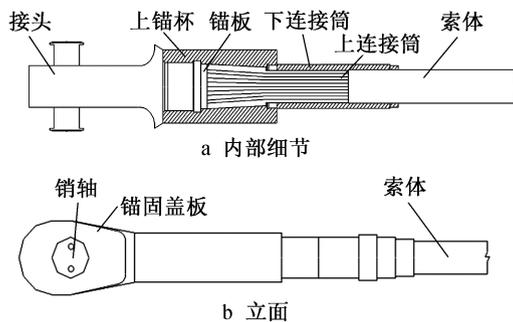


图 2 耳板式接头

Fig. 2 Ear plate type connector

2.2 柔性吊杆与主梁连接

柔性吊杆与主梁通过带球冠垫块的冷铸锚连接,该冷铸锚主要由张拉端锚杯、六角头螺栓、螺母、球形支座及前后盖等部件构成,如图 3 所示。施工时首先将高强钢丝经分丝板穿入锚头,然后向锚杯内腔灌注冷铸填料,经高温养护固化后形成锚固结构。

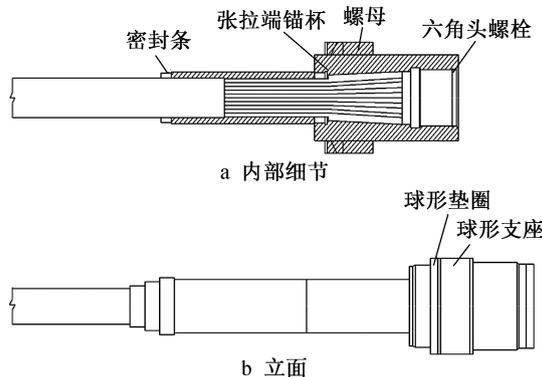


图 3 冷铸锚

Fig. 3 Cold casting anchor

采用平行钢绞线配合夹片式锚具体系,外层以 HDPE 防护套管包裹并预埋于结构中,可有效防止

雨水侵入索体内部。夹片式锚具中防护油脂品质对锚头耐久性至关重要,因此应选用优质耐久的油脂对锚头进行密封防护。

3 有限元分析

3.1 模型建立

利用有限元软件构建全桥三维计算模型(见图4),该模型共包括4 636个结点和8 558个单元,包括71个桁架单元、6 067个梁单元及2 420个板单元。为模拟主桁架中易疲劳的关键点,采用三维桁架单元予以表征,并施加车辆荷载作为荷载工况。



图4 全桥计算模型

Fig. 4 The entire bridge computational model

3.2 疲劳损伤累积理论

Palmgren 于 1924 年首次提出疲劳损伤可线性累积的假设,后经 Miner 进一步理论化并推导出定量公式,用于评估不同荷载水平对疲劳寿命的贡献,该理论被统称为 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论(简称 Miner 法则)。在公式推导中,Miner 假设试件在吸收能量达到其极限值 W 时发生疲劳破坏,此时累积损伤总和为 1,且吸收的能量与循环次数成正比,即有:

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N} \quad (1)$$

式中: W_1 为试件在 n_1 次循环下吸收的能量; W 为试件发生疲劳破坏时的极限吸收能量; n_1 为某应力水平下实际承受的循环次数; N 为该应力水平下试件发生疲劳破坏的极限循环次数,即 $S-N$ (应力-循环次数)曲线中的寿命。

累积损伤度 D 计算如下:

$$D = \sum_{i=1}^j n_i / N_i \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 个应力水平下实际承受的循环次数; N_i 为第 i 个应力水平下极限循环次数。

3.3 结果分析

在车辆荷载作用下,全桥应力云图如图 5 所示。1 号吊杆位于拱脚区域,其长度为全桥最短。依据梁弯曲刚度理论,该吊杆轴向刚度大于其他吊杆。由图 5 可知,在车辆荷载作用下,短吊杆对桥面局部变形的约束更强,导致内力更集中。同时,拱脚作为拱肋与桥墩刚性连接部位,整体刚度较大,进一步加剧了该处吊杆应力响应。实测数据表明,1 号

吊杆应力可达跨中吊杆的 2.5~3 倍,因而成为控制全桥疲劳的关键部位。

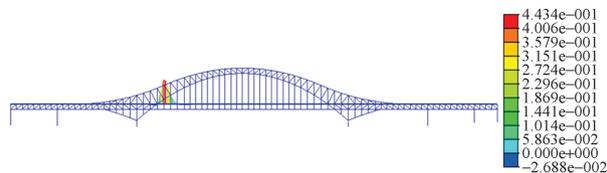


图5 全桥应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress cloud map of the entire bridge(unit:MPa)

4 疲劳验算方法

4.1 美国规范验算方法

美国规范 LRFD *Bridge Design Specifications* 将由荷载导致的结构疲劳细节(构造特征、裂纹萌生风险、 $S-N$ 曲线参数与疲劳阈值,并结合大量试验数据与工程经验确定,用于量化不同构造对疲劳损伤的敏感性)分为 8 个等级,即 A, B, B', C, C', D, E, E'。

根据该规范要求,当疲劳细节的最大应力低于常幅疲劳极限的 1/2 时,可认为该部位能够承受无限次应力循环而不发生疲劳破坏。该规范将常幅疲劳极限定义为在 2×10^6 次循环下疲劳细节所能承受的容许应力,其值为 165MPa。另外,该规范疲劳设计的基准期明确为 75 年。

4.2 欧洲规范验算方法

欧洲规范 Eurocode 3-*Design of steel structures* 将疲劳细节(结构工程中描述易引发疲劳裂纹的构造部位/连接形式)分为 14 个等级,即 36, 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 相关参数取值如表 1 所示。

表 1 欧洲规范参数取值

Table 1 European standard parameter values

特征应力/ MPa	常幅疲劳极限 应力/MPa	疲劳截止极限 应力/MPa
36	26	15
40	29	16
45	33	18
50	37	20
56	41	23
63	46	25
71	52	29
80	59	32
90	66	36
100	74	40
112	83	45
125	92	51
140	103	57
160	118	65

对承受变幅应力作用的构件进行疲劳验算时,

该规范采用三折线型 $S-N$ 曲线,如图 6 所示,该曲线斜率在常幅疲劳极限和疲劳截止极限处发生变化。

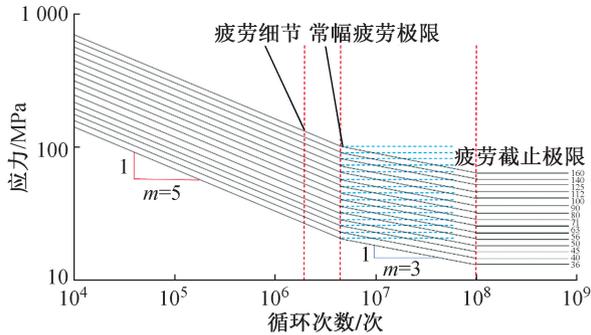


图 6 欧洲规范 $S-N$ 曲线

Fig. 6 European standard $S-N$ curves

对于承受常幅应力作用的构件,该规范采用双折线型 $S-N$ 曲线进行疲劳验算。

4.3 英国规范验算方法

英国规范 BS 5400: *Steel, concrete and composite bridges* 将疲劳细节分为 10 个等级,即 A, B, C, D, E, F, F2, G, S, W。其中, A 级因对制造工艺有特殊要求,通常不用于桥梁结构。该规范基于 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论进行疲劳计算,并以常幅疲劳极限(即 $S-N$ 曲线中对应于 10^7 次循环的应力)作为基准,常幅疲劳极限相关系数如表 2 所示。

表 2 英国规范常幅疲劳极限相关系数

Table 2 British standard constant amplitude fatigue limit correlation coefficient

细节等级	$S-N$ 曲线斜率	与疲劳细节类别相关的常数	疲劳截止应力/MPa
W	3.0	0.16×10^{12}	25
G	3.0	0.25×10^{12}	29
F2	3.0	0.43×10^{12}	35
F	3.0	0.63×10^{12}	40
E	3.0	1.04×10^{12}	47
D	3.0	1.52×10^{12}	53
C	3.5	4.23×10^{13}	78
B	4.0	1.01×10^{15}	100
S	8.0	1.08×10^{22}	82

4.4 我国规范验算方法

我国 GB 50017—2017《钢结构设计标准》规定的钢结构疲劳验算公式如下:

$$\Delta\sigma \leq \gamma_t [\Delta\sigma_c] \quad (3)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4)$$

$$\gamma_t = \left(\frac{25}{t}\right)^{0.25}, t \geq 25\text{mm} \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为构造细节处的名义正应力; σ_{\max} , σ_{\min} 分别为标准疲劳车辆荷载作用于影响面时,在该细节处产生的最大与最小应力; γ_t 为与板厚相关的修正

系数; $[\Delta\sigma_c]$ 为正应力常幅疲劳极限,即对应 500 万次循环的应力; t 为钢板厚度。

如果疲劳细节不满足式 (3) 的要求,应采用式 (6) 进行验算。

$$\Delta\sigma \leq \gamma_t [\Delta\sigma_R] \quad (6)$$

式中: $[\Delta\sigma_R]$ 为对应 200 万次循环的疲劳容许应力。

我国 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》在疲劳细节分类上参考了欧洲规范的基本框架,其 $S-N$ 曲线形式与欧洲规范中用于变幅应力构件的疲劳强度曲线相同,但二者在应力的具体取值上有所不同(见图 7)。此外,我国规范明确规定的桥梁疲劳设计使用寿命为 100 年。

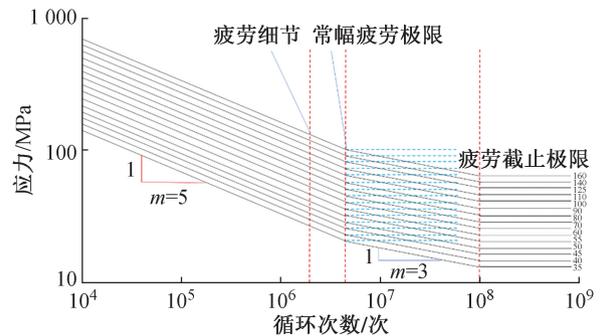


图 7 我国规范 $S-N$ 曲线

Fig. 7 Chinese standard $S-N$ curves

4.5 对比分析

不同国家对桥梁疲劳设计寿命、荷载分项系数等的规定不尽相同,如表 3 所示。各国规范在疲劳验算方法上均秉持安全寿命设计理念,但在具体执行层面存在差异,各有其优势与局限性。

表 3 不同国家疲劳验算方法规定

Table 3 The provisions of fatigue checking methods in different countries

规范	荷载分项系数	疲劳强度分项系数	疲劳设计寿命年限/年
美国规范	有	无	75
欧洲规范	有	有	100
英国规范	无	无	120
我国规范	无	无(与板厚有关)	100

欧洲规范体系最系统和完善,其疲劳细节分类详尽(14 个等级),并明确定义了常幅疲劳极限与疲劳截止极限,采用考虑分项系数的极限状态设计法,安全度较高。其采用的三折线型 $S-N$ 曲线可更精确地描述变幅应力下的疲劳行为,理论较先进,但其复杂的体系对工程设计人员要求更高。

美国规范同样采用极限状态设计法,其疲劳细节分类(8 个等级)和 $S-N$ 曲线形式较简洁,便于工

程应用,75 年的设计寿命基准明确。然而,其未引入疲劳强度分项系数,在安全系数的设置上相较于欧洲规范可能偏于保守或不够精细。

英国规范和我国规范采用容许应力法,概念直观,易于理解和使用。英国规范 120 年的设计寿命最长,较为保守。我国规范在借鉴欧洲体系的基础上,创新性地引入了考虑板厚效应的修正系数,更符合钢结构疲劳性能的实际情况,为重要优点。但容许应力法在本质上未像极限状态设计法那样明确区分荷载和抗力的不确定性,理论体系稍显传统。

综上所述,欧洲规范在理论先进性和系统性上领先;美国规范在简洁性和实用性上具有优势;我国规范和英国规范更注重工程应用的简便性,且我国规范结合国情引入了特色条款。不同国家规范的差异反映了不同的安全哲学和工程实践经验,在实际工程中可根据项目具体要求、技术背景和所处地域环境进行选择或对比参考。

5 柔性吊杆疲劳验算

计算得到耳板式索梁锚固结构等效疲劳车辆荷载值为 1 181kN,美国规范疲劳荷载值为 1 229kN,欧洲规范疲劳荷载值为 1 295kN,英国规范疲劳荷载值为 1 334kN,我国规范疲劳荷载值为 1 462kN。通过疲劳加载计算,获取了各模型作用下锚固结构板件最大正应力及焊缝控制点最大正应力和最大剪应力,结构细节等效常幅应力与容许应力如表 4 所示。

由表 4 可知,从不同疲劳荷载模型的影响来看,各国规范及等效疲劳车辆模型计算得到的等效常幅应力存在明显差异,以关键板件 2 为例,等效疲劳车辆模型计算得到的等效常幅应力(最大正应力)为 44.1MPa,依据我国规范计算得到的等效常幅应力最大,达 51.0MPa,依据美国、英国和欧洲规范计算得到的等效常幅应力为 16.1~47.8MPa。这表明采用不同荷载模型直接影响应力水平计算值,我国规范可能因车辆荷载谱或动力放大系数取值更保守,得到了更高的应力评估结果。因此,在疲劳验算中选择荷载模型时,需考虑其与当地交通状况和

设计理念的契合度。

从关键细节对疲劳性能的影响来看,板件 2 在多数模型下的等效常幅应力高于其他构件(板件 1 和焊缝),这表明其为该结构的疲劳敏感部位。值得注意的是,尽管板件 2 应力水平较高,但在所有模型下的等效常幅应力均低于相应的疲劳抗力或容许应力,在总体上是安全的。然而,焊缝处的应力水平普遍较低,但其疲劳抗力或容许应力通常也较低,因此仍需关注焊接缺陷可能引发的疲劳裂纹萌生风险。

综上所述,疲劳评估结果依赖于所采用的规范与荷载模型,设计人员需根据项目要求进行合理选择。同时,应重点关注高应力构件和抗疲劳性能薄弱环节(如焊缝)的细部设计与制造质量,以确保结构长寿命安全服役。

6 设计建议

耳板式锚固结构疲劳验算结果表明,在等效疲劳车辆模型与多国规范疲劳荷载作用下,各板件等效常幅应力最大值为 51.0MPa,焊缝处等效常幅应力最大值为 21.3MPa,均满足疲劳强度要求,无须加强,着重进行以下优化。

- 1) 控制销轴与耳板孔径公差 $\leq 0.1\text{mm}$,销轴表面硬度须高于耳板,以减轻局部应力集中。
- 2) 锚板与耳板焊接过渡区应设置半径 $\geq 50\text{mm}$ 的圆弧,并对焊趾进行打磨处理,以降低缺口效应。
- 3) 采用双曲面球铰替代球冠垫块,缓解弯折应力。分丝板孔缘应倒圆角,且半径 $\geq 2\text{mm}$,以减少钢丝微动磨损。

7 结语

1) 1 号短吊杆处于拱脚区域,长度最短,刚度较大,在车辆荷载作用下,该区域桥面曲率变化大且受动力冲击作用,短吊杆对局部变形约束较强,导致应力集中,叠加拱脚整体刚度影响,其应力达跨中吊杆的 2.5~3 倍。

2) 根据等效疲劳车辆模型与多国规范疲劳验算结果,耳板式锚固结构最大正应力为 51.0MPa,最大剪应力为 21.3MPa,均低于各国规范限值要求。

表 4 结构细节等效常幅应力与容许应力

Table 4 Structural details equivalent constant amplitude stress and allowable stress

结构细节名称	等效疲劳车辆模型		美国规范		欧洲规范		英国规范		我国规范	
	等效常幅应力/MPa	疲劳抗力/MPa	等效常幅应力/MPa	容许应力/MPa	等效常幅应力/MPa	容许应力/MPa	等效常幅应力/MPa	容许应力/MPa	等效常幅应力/MPa	容许应力/MPa
板件 1	15.6	83.0	16.1	81.5	16.4	83.0	16.9	91.3	18.0	83.0
板件 2	44.1	118.5	16.1	81.5	16.4	83.0	47.8	123.9	51.0	118.5
焊缝	18.7	74.1	19.9	91.3	19.3	74.1	21.3	74.1	21.3	74.1

3)实际工程中建议优化关键构造细部,包括控制销轴与耳板孔径公差、焊接过渡区设置圆弧、采用双曲面球铰替代球冠垫块等。

参考文献:

- [1] 诸葛翰卿,谢旭,廖燕华,等. 横桥向地震作用对钢拱桥地震损伤发展的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(4):702-712.
ZHUGE H Q, XIE X, LIAO Y H, et al. Effect of transverse earthquake action on development of seismic damage of steel arch bridges [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2019, 53(4) : 702-712.
- [2] 胡迎新,王思伟. 非对称式网状系杆拱桥结构力学性能研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(24):45-49.
HU Y X, WANG S W. Mechanical performance of asymmetric network tied arch bridge structure [J]. Construction technology, 2024, 53(24) : 45-49.
- [3] 周聪,陈世鸣,李瑞超,等. 铁路钢桁梁柔性拱桥钢桥面节段模型研究[J]. 结构工程师,2013,29(5):46-51.
ZHOU C, CHEN S M, LI R C, et al. Study on the model of steel deck segment for flexible arch railway steel truss bridges [J]. Structural engineer, 2013, 29(5) : 46-51.
- [4] 王应良. 铁路钢拱桥钢板式吊杆的设计与疲劳评估[J]. 桥梁建设,2012,42(5):15-20.
WANG Y L. Design and fatigue assessment of steel plate hangers of railway steel arch bridge [J]. Bridge construction, 2012, 42(5) : 15-20.
- [5] 戴德军. 试件分离对桥梁钢结构对接焊缝接头残余应力分布的影响[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):70-73.
DAI D J. The influence of specimen separation on residual stress distribution of bridge steel butt weld joints [J]. Construction technology, 2024, 53(3) : 70-73.
- [6] 董留群,张亚楠,柳献. 综合管廊近距离穿越既有桥梁结构安全风险控制研究[J]. 施工技术,2021,50(23):88-93.
DONG L Q, ZHANG Y N, LIU X. Safety risk control of utility tunnel crossing existing bridge structure in short distance [J]. Construction technology, 2021, 50(23) : 88-93.
- [7] 刘争辉,赵峰,刘士清,等. 悬挑环形廊桥静力性能及结构优化研究[J]. 施工技术(中英文),2021,50(22):58-60.
LIU Z H, ZHAO F, LIU S Q, et al. Static performance and structural optimization of cantilevered circular corridor bridge [J]. Construction technology, 2021, 50(22) : 58-60.
- [8] 周志祥,向红,徐勇. 大跨度钢桁拱桥节点疲劳性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2010(6):60-66.
ZHOU Z X, XIANG H, XU Y. Fatigue behavior test of nodes in a large-span steel truss arch bridge [J]. Journal of civil, architectural & environment engineering, 2010(6) : 60-66.
- [9] 殷新锋,丰锦铭,刘扬,等. 考虑车-桥耦合振动及桥面平整度退化影响的拱桥吊杆疲劳分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(9):17-25.
YIN X F, FENG J M, LIU Y, et al. Fatigue analysis for suspenders of arch bridge addressing vehicle-bridge coupled vibration and road surface progressive deterioration [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2017, 44(9) : 17-25.
- [10] 朱利明,申昆,王兴赞. 活载作用下空间三索面斜吊杆异形拱桥吊杆可靠度研究[J]. 中外公路,2023,43(1):76-82.
ZHU L M, SHEN K, WANG X Y. Study on reliability of special shaped arch bridge with spatial three-cable-plane inclined suspenders under live load [J]. Journal of China & foreign highway, 2023, 43(1) : 76-82.
- [11] 罗春林. 高速铁路大跨连续刚构柔性拱组合桥梁设计[J]. 铁道工程学报,2020,37(6):53-57,69.
LUO C L. Design on high-speed railway long-span composite bridge of continuous rigid frame and flexible arch [J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37(6) : 53-57, 69.
- [12] 曾祥春. 柔性吊杆拱桥拱座安全性病害特征及影响分析[J]. 城市道桥与防洪,2019(9):115-118,14-15.
ZENG X C. Analysis on safety hazard characteristic and influence of arch seat in flexible suspender arch bridge [J]. Urban roads bridges & flood control, 2019(9) : 115-118, 14-15.
- [13] 熊晗懿,郑云,侯兆新. 基于局部应力应变法的钢结构疲劳裂纹形成寿命预测[J]. 钢结构,2019(6):25-28,35.
XIONG H Y, ZHENG Y, HOU Z X. Fatigue crack initiation life prediction of steel structure based on local stress-strain method [J]. Steel construction, 2019(6) : 25-28, 35.
- [14] 肖鑫. 基于车-桥一体化监测的铁路钢桥损伤预警及可靠度评估研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2017.
XIAO X. Research on damage alarming and reliability evaluation of railway steel bridge based on vehicle and bridge monitoring [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.