

独塔单索面跨铁转体斜拉桥技术创新

李 佳^{1,2}, 陈经纬³

(1. 浙江爱丽智能检测技术集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710048;

3. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海市 200070)

摘 要: 嘉兴市快速路上跨沪昆铁路立交工程主桥采用(140 m+140 m) 2跨独塔混凝土斜拉桥。为研究该桥的受力特点、优化设计方案, 针对宽幅箱梁第一、第二体系应力分别进行了总体和局部计算。计算时, 考虑到钢筋混凝土桥塔索塔锚固区较易开裂, 而采用传统钢锚梁或钢锚箱形式锚固时要求桥塔构造尺寸较大, 在桥梁中央隔离带宽度有限的现状下, 采用了鞍座式锚固方式来回避以上问题。研究表明: 桥梁设计时通过综合考虑第一、第二体系应力, 可优化主梁截面形式; 通过控制主梁刚度, 可减少桥塔两侧不平衡索力; 改用鞍座锚固形式, 可优化主塔结构及受力状态。另外, 通过采用大直径钢球铰, 降低了转体施工过程中受压面应力, 确保了转体安全性和稳定性。

关键词: 转体法; 设计创新; 独塔斜拉桥; 单索面; 宽幅箱梁; 转体球铰

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0009-05

Technological Innovation in Single-pylon Single-plane Cross-railway Rotational Cable-stayed Bridge

LI Jia^{1,2}, CHEN Jingwei³

(1. Zhejiang Aili Intelligent Inspection Technology Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The main bridge of the expressway crossing Shanghai-Kunming Railway interchange project in Jiaxing is a (140 m+140 m) two-span single-ylon concrete cable-stayed bridge. In order to study the force characteristics of the bridge and optimize the design scheme, the overall stress and local stress of the first system and the second system of the wide box girder is calculated respectively. In the calculation, considering that the anchoring area of the reinforced concrete bridge cable pylon is prone to cracking, the construction size of the bridge pylon is required to be larger when using the traditional steel anchor beam or steel anchor box form for anchorage. The saddle-type anchorage is used to avoid the above problems under the limited width of the central isolation belt of the bridge. The study shows that through comprehensive consideration of the first and second system stress, the section form of the main girder can be optimized during the bridge design. By controlling the stiffness of the main girder, the unbalanced cable force on both sides of the bridge pylon can be reduced. And by changing to the saddle anchor form, the structure and stress state of the main pylon can be optimized. In addition, by using large-diameter steel spherical hinges, the compressive stress on the stressed surface during the rotational construction process is reduced, and the safety and stability of the rotation is ensured.

Keywords: rotation method; design innovation; single-ylon cable-stayed bridge; single-plane; wide box girder; rotating spherical hinge

0 引 言

近年来, 新建工程上跨既有营业线立交工程越来越多。为尽量减少对营业线的干扰, 这些工程首选转体施工方案, 利用一个天窗时间实现一次转体到位。

如此既可节约工期、又可减少对铁路运营的影响^[1-4]。

本文以嘉兴市快速路上跨沪昆铁路立交工程转体桥为例, 提出了多点联合称重技术, 并对单索面宽幅箱梁的主梁优化设计、索塔锚固设计和转体系统设计进行了总结, 以为类似工程提供参考。

1 工程概况

根据嘉兴市快速路总体路线走向, 新建桥梁中心线与沪昆铁路相交, 桥梁设计中心线与沪昆铁路

收稿日期: 2024-12-30

作者简介: 李佳(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构检测与评估工作。

通信作者: 陈经纬(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计与评估工作。电子邮箱: 124034130@qq.com

下行中心线夹角为 40.6° 。主桥采用140 m+140 m独塔混凝土斜拉桥(转体施工)跨越铁路,主桥平面位于直线上,主桥全长279.8 m,桥宽29.4 m。转体主墩设于沪昆铁路北侧。

转体重量约3.2万t,转体后跨铁路主跨在铁路南侧合龙,合龙段长2 m。合龙段与南侧最近1股道铁路距离8.8 m,与最近接触网立交距离6.54 m。主桥立面布置图见图1。

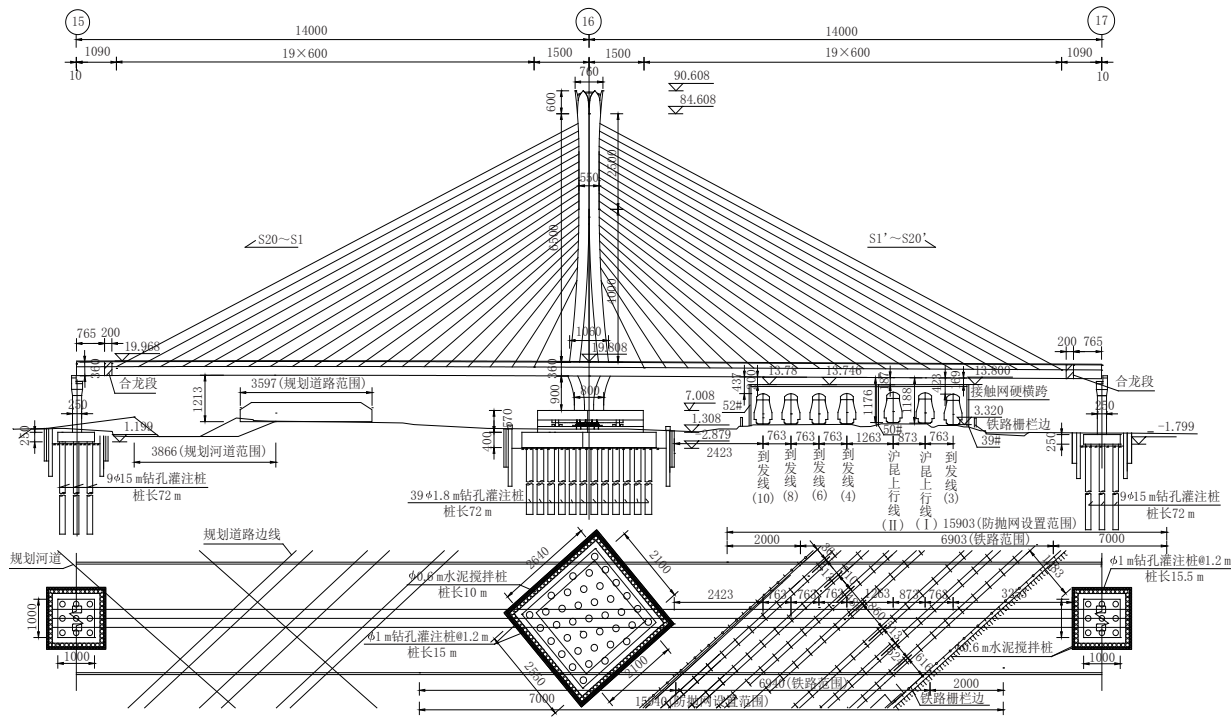


图1 主桥立面布置图(单位:cm)

跨铁路位置桥梁标准横断面布置为:0.60 m(HA防撞护栏)+0.50 m(路缘带)+10.75 m(行车道)+0.50 m(路缘带)+4.70 m(中央分隔带)+0.50 m(路缘带)+10.75 m(行车道)+0.50 m(路缘带)+0.60 m(HA防撞护栏),桥梁结构总宽为29.40 m。桥梁标准横断面布置图见图2。

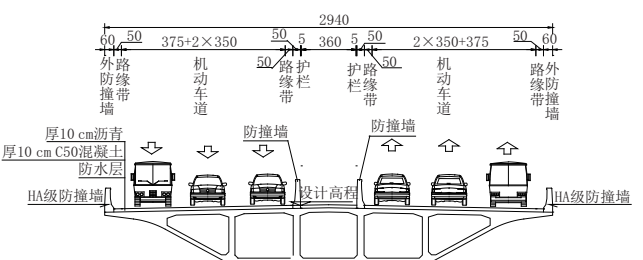


图2 桥梁标准横断面布置图(单位:cm)

2 技术特点

- (1)本桥宽度达29.4 m,采用中央单索面布置,桥面横向悬臂大,主梁纵横向受力复杂^[5]。
- (2)转体重量约3.2万t,目前国内桥梁转体超过3万t重量的项目并不多见,大吨位转体系统设计、超大基础设计、超大基坑设计难度较大^[6]。
- (3)按照铁路管理要求,荷载需按照公路I级荷

- 载提高1.3倍进行设计^[7],进一步提高了设计标准。
- (4)该桥跨越繁忙干线沪昆铁路,施工期间对运营铁路的防护要求极高^[5]。
- (5)采用单箱5室截面,第一体系纵向受力,第二体系横向受力,避免叠加应力过大。
- (6)主塔索塔锚固采用鞍座式锚固方式,使得主塔完全承受竖向力,回避了塔壁水平拉力的不利影响。
- (7)控制球铰半径和摩擦系数,有效地降低了球铰整体应力水平和变形,保障了转体的稳定性^[8-9]。
- 铁路安全防护措施主要考虑设置HA防撞墙并在墙上加装高度不低于2.5 m的防抛网;施工期间严禁基坑降水、严禁施作具有挤土效应的各类桩,按照要求24 h进行邻营监测。

3 主梁断面优化

3.1 单箱3室截面

主梁采用单箱3室斜腹板断面,梁体中心梁高3.6 m。箱梁顶宽29.4 m,箱梁底宽12.4 m,悬臂板长3.0 m,端部厚0.2 m,根部厚0.65 m。标准段顶板厚25 cm,箱梁边腹板厚25 cm,中腹板厚40 cm,箱梁底

板厚 25 cm;梁端和塔柱附近底板加厚至 40 cm,边腹板加厚至 30 cm,中腹板加厚至 60 cm,梁端和塔柱附近顶板分别加厚至 40 cm,按折线变化。拉索横梁间距 6.0 m,非拉索区横梁间距 3.0 m。

单箱 3 室标准断面见图 3。

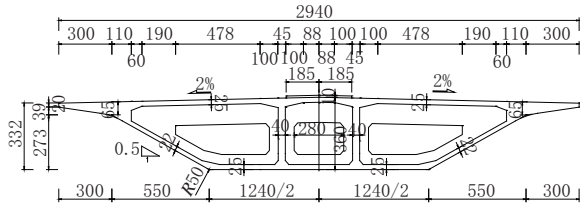


图 3 单箱 3 室标准断面(单位:cm)

成桥阶段主梁全截面受压,上缘最大压应力为 11.18 MPa,下缘最大压应力为 14.99 MPa。运营阶段主梁上缘最大压应力为 17.28 MPa,主梁下缘最大压应力为 17.39 MPa。承载能力极限状态和正常使用极限状态下,最小主梁抗弯承载力安全系数为 1.04,最小抗剪承载力安全系数为 1.55,最小抗压承载力安全系数为 1.7,均大于 1.0。主梁活荷载最大竖向挠度-80.06 mm,挠跨比 1/1 737,各项指标均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)要求。

纵向非拉索区每隔 3.0 m 设置 1 道小横梁,桥面系第二体系为纵向单向板受力。

3.2 单箱 5 室截面

主梁采用单箱 5 室斜腹板截面,拉索锚固于中箱。主梁标准横断面顶板宽 29.4 m,底板宽 13.4 m,结构中心处梁高 3.6 m。箱梁顶面设双向 2% 横坡,底板水平。标准段顶板厚 28 cm,底板厚 28 cm,中腹板厚 45 cm,边腹板厚 40 cm,外侧斜腹板厚 28 cm。拉索对应位置统一设置厚 50 cm 拉索横梁,非拉索区无横梁。

单箱 5 室标准断面见图 4。

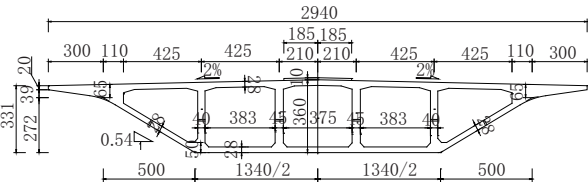


图 4 单箱 5 室标准断面(单位:cm)

成桥阶段主梁全截面受压,上缘最大压应力为 10.47 MPa,下缘最大压应力为 13.21 MPa。运营阶段主梁上缘最大压应力为 16.66 MPa,主梁下缘最大压应力为 15.71 MPa。

纵向根据拉索间距 6.0 m 设置横梁,桥面系第二体系为横向单向板受力。

3.3 断面优化比较

第一体系应力是反映构件主方向强度的重要指标之一。第二体系应力在设计阶段较容易忽略。本桥第二体系计算按照车辆荷载局部加载,分析桥面板纵、横向应力^[10]。

单箱 3 室截面第二体系应力图见图 5;单箱 5 室截面第二体系应力图见图 6。

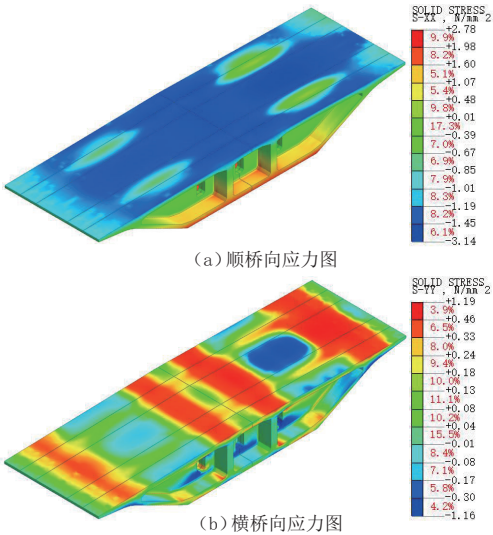


图 5 单箱 3 室截面第二体系应力图(单位:MPa)

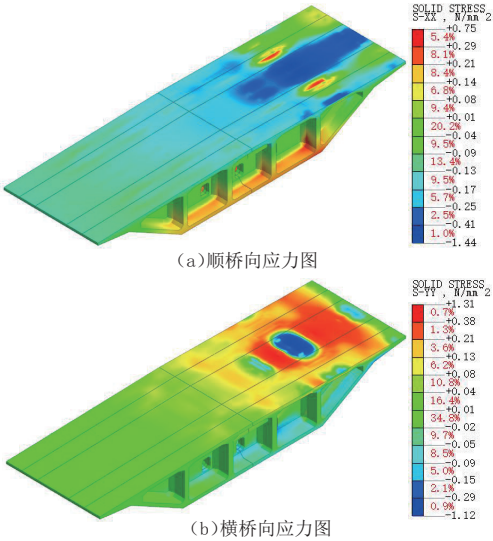


图 6 单箱 5 室截面第二体系应力图(单位:MPa)

在结构设计和分析中,需要考虑构件的第一、第二体系应力,第二体系方向与第一体系方向尽量避免一致。通过对比分析发现,采用单箱 3 室截面和小横梁体系时,结构体系应力叠加后应力较大(见表 1)。

表 1 主梁第一、第二体系应力表				单位:MPa
断面	第一体系纵向应力	第二体系横向应力	第二体系纵向应力	第一+第二体系应力
单箱 3 室	17.28	1.16	3.14	20.42
单箱 5 室	16.66	1.31	0.75	17.41

斜拉索采用高疲劳性能拉索,要求拉索锚具组件的疲劳性能需满足应力上限 $\sigma_{b0.45}$,疲劳应力幅250 MPa,200万次疲劳试验断丝率小于2%,其他满足《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》(GB/T 30826—2014)要求。成桥阶段主塔全截面受压,最大压应力为13.08 MPa。

为便于后期养护更换,塔上每根拉索均采用抗滑键方式锚固^[11];每根钢绞线边跨侧布置抗滑键,用以克服施工和运营期间两侧拉索的不平衡索力^[12],单根钢绞线的抗滑力不小于100 kN。

拉索锚固构造图见图7;拉索索力表见表2。

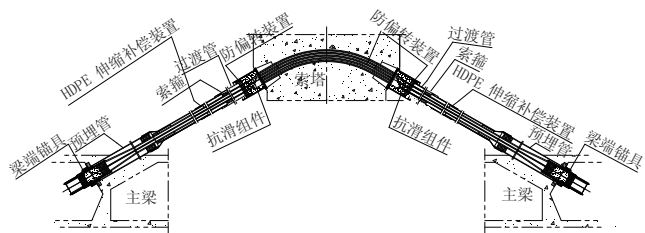


图7 拉索锚固构造图

建立杆系单元模型,弱化主梁抗弯刚度,其他刚度不变,一次落架计算成桥索力^[13],并以此作为目标索力进行施工阶段正装分析,计算各阶段索力^[14]。根据《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)

第3.3.1条,施工阶段斜拉索最大应力为563.6 MPa,安全系数为3.30,大于2.0,满足上述规范要求;运营状态下,斜拉索最大应力为781.5 MPa,安全系数为2.38,大于1.85,满足上述规范要求。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第13.2.2条规定,平行钢绞线束的疲劳细节 $\Delta\sigma_e=160$ MPa,采用疲劳荷载模型I进行计算,常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_0=15.53$ MPa,满足上述规范要求。

4 转动体系设计

转体系统由上转盘、球铰、平面耐磨滑板、撑脚、下转盘、牵引索、助推反力座等组成^[15-17]。转体吨位3.2万t。球铰直径5.6 m,设置在上下转盘之间;转盘采用C55混凝土。上转盘尺寸为21 m×21 m×3.3 m,滑道位置设置10组撑脚,每个撑脚由2根 $\phi 900$ mm钢筒焊接组成;下转盘尺寸为26.4 m×25.5 m×5.5 m,滑道半径8.1 m,滑道四周设置4组反力座。根据牵引转动分析,采用30根 $\phi 15.2$ mm预应力钢绞线作为牵引索使转体转动,设计起转牵引索力为2×3 567 kN,设计转动牵引索力为2×2 140 kN。转体完成后,通过封铰混凝土将上、下转盘连接形成整体承台。转体系统布置图见图8。

表2 拉索索力表

编号	基本组合下 索力/kN	运营安全 系数	总不平衡 索力/kN	弯曲 半径/m	疲劳应 力幅/MPa	编号	基本组合下 索力/kN	运营安全 系数	总不平衡 索力/kN	弯曲 半径/m	疲劳应 力幅/MPa
S20	7 208.7	2.40	298.6	5.0	13.0	S10	6 903.7	2.50	94.9	3.5	14.9
S19	7 150.7	2.42	222.4	5.0	10.3	S9	6 748.3	2.56	84.4	3.5	15.3
S18	7 108.9	2.43	133.4	4.5	8.3	S8	5 886.5	2.94	87.2	3.5	15.5
S17	7 091.6	2.44	59.5	4.5	7.2	S7	5 348.7	2.43	79.1	3.5	15.5
S16	7 206.0	2.40	25.6	4.5	7.7	S6	5 055.6	2.58	77.4	3.0	15.1
S15	7 094.0	2.44	32.9	4.0	9.2	S5	4 742.0	2.75	73.4	3.0	14.3
S14	7 108.4	2.43	47.2	4.0	10.7	S4	4 641.6	2.81	66.9	3.0	13.1
S13	7 106.3	2.43	61.9	4.0	12.1	S3	4 255.2	2.39	58.4	3.0	11.3
S12	7 075.9	2.44	75.2	4.0	13.2	S2	4 276.5	2.38	50.1	3.0	8.9
S11	7 011.5	2.46	86.3	3.5	14.2	S1	4 257.1	2.39	47.6	3.0	6.5

转体过程中,考虑2种工况。工况1:竖向无偏心荷载,上球铰均匀传递竖向力;工况2:竖向考虑15 cm偏心荷载^[18-19]。2种工况下的球铰计算结果汇总于表3;工况2上球铰、下球铰Mises应力分布云图见图9、图10。

由表3可知:

(1)在工况1正载作用下,Mises最大应力为70.3 MPa,满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》要求;球铰最大变形值为2.13 mm;上、下球铰不均匀变形差最大值为0.05 mm。

(2)在工况2偏载作用下,Mises最大应力为70.7 MPa,满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》要求;球铰最大变形值为2.24 mm;上、下球铰不均匀变形差最大值为0.05 mm。

5 结 语

(1)通过体系应力对比分析,采用单箱5室截面主梁,取消非拉索区小横梁,可以很好地改善第二体系受力,使得结构受力流线顺畅。

(2)塔顶拉索弯曲半径大于3 m,通过控制单根

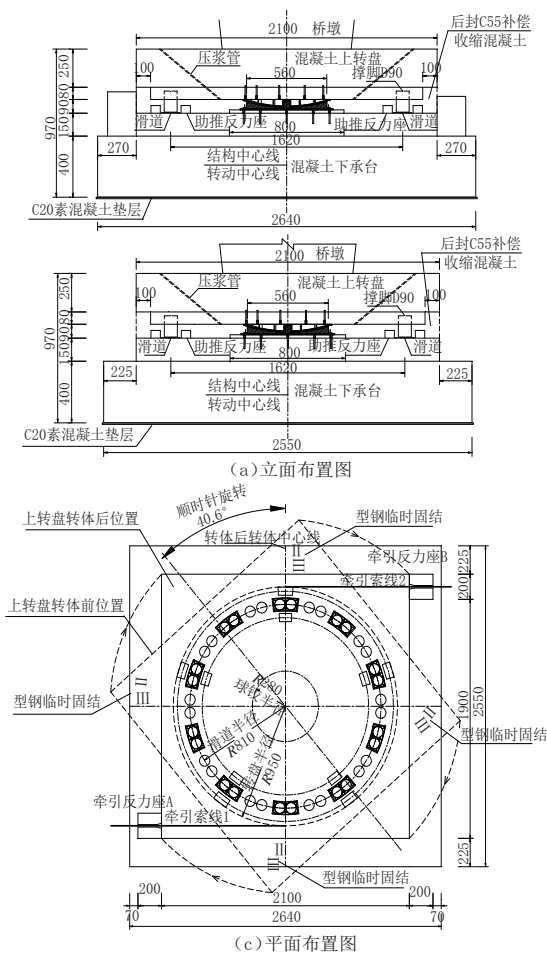


图 8 转体系统布置图(单位:cm)

表 3 球铰计算结果汇总

位置	工况 1		工况 2	
	应力/MPa	变形/mm	应力/MPa	变形/mm
球铰整体	1.0~70.3	1.98~2.13	0.8~70.7	1.89~2.24
上球铰	1.0~60.7	2.03~2.13	0.8~60.5	1.94~2.24
下球铰	4.2~70.3	1.98~2.08	4.1~70.7	1.89~2.18

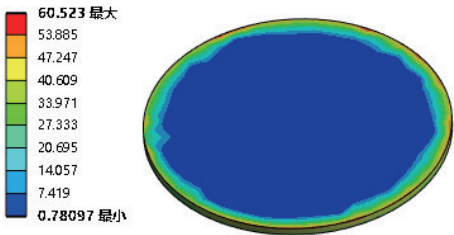


图 9 工况 2 上球铰 Mises 应力分布云图(单位:MPa)

拉索不平衡索力不小于 100 kN 以及拉索的疲劳应力,可以将鞍座式拉索锚固形式应用到常规斜拉桥索塔锚固中。

(3)球铰应力和变形均在可控范围内。配置合理的转动牵引力,可保障转体过程中的稳定性。

(4)本文研究成果可供类似大吨位单索面独塔

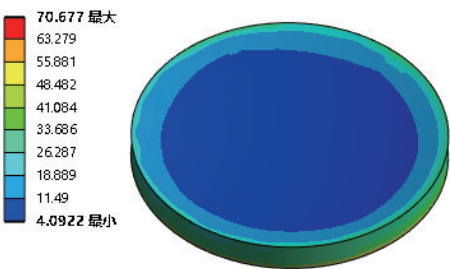


图 10 工况 2 下球铰 Mises 应力分布云图(单位:MPa)

斜拉桥设计借鉴和参考。

参考文献:

[1] 汪志斌,陈永宏,张文学,等.保定市乐凯大街斜拉桥转体施工控制技术[J].铁道建筑,2020,69(9):53-56.

[2] 余艳霞,王德志.福厦高铁(95+125)m 非对称独塔部分斜拉桥设计[J].铁道标准设计,2020,64(10):147-151.

[3] 朱华中.九江快速路跨铁路斜拉桥转体结构及铁路防护设计[J].世界桥梁,2021,49(6):8-13.

[4] 李卫东,戴灿磊.大吨位混合梁转体斜拉桥主梁受力特性分析[J].世界桥梁,2022,50(5):101-108.

[5] 文望青,林 骋,王斌,等.双幅同步转体矮塔斜拉桥设计[J].桥梁建设,2021,51(2):112-117.

[6] 靳飞.非对称独塔单索面超宽幅曲线大吨位转体斜拉桥设计与创新[J].铁道标准设计,2021(9):110-115.

[7] 张雷,周岳武,杨斌.唐山二环路特大吨位转体斜拉桥设计[J].世界桥梁,2019,47(6):6-10.

[8] 简方梁,徐升桥,高静青,等.超大吨位转体桥梁关键技术研究[J].铁道标准设计,2021(11):179-184.

[9] 蔡建业.独塔斜拉桥超大吨位转体结构体系设计研究[J].铁道工程学报,2021(4):44-49.

[10] T/CECS 1161—2022,钢混组合梁斜拉桥设计标准[S].

[11] 黄锦源.斜拉桥索鞍抗滑键基于超张负摩阻锁紧的作用原理及施工工艺[J].中国市政工程,2016,5(187):18-21.

[12] 席利飞,徐康妣,张 丹,等.矮塔斜拉桥分丝管索鞍滑移效应分析[J].市政技术,2022,40(12):94-98.

[13] 谢剑,王绪续,谢宝来.独塔混合梁转体斜拉桥合理成桥状态确定方法研究[J].特种结构,2018,35(5):51-56;62.

[14] 赵会东,陈良江,周友权.铁路斜拉索疲劳强度设计值研究[J].铁道标准设计,2020,64(增刊1):23-26.

[15] 贾宝红.郑万铁路上跨郑西客专联络线特大桥主桥转体结构分析[J].铁道标准设计,2017,61(5):65-69.

[16] 曾甲华,刘智春,陈裕民,等.转体施工钢箱梁独塔斜拉桥设计[J].世界桥梁,2016,44(4):11-15.

[17] 王新国,周继,严定国,等.武汉市杨泗港快速通道转体斜拉桥设计[J].铁道标准设计,2019,63(1):70-76.

[18] 宋建平,王 勇,姜文英.偏载状态下的桥梁转体球铰性能分析[J].铁道建筑,2017(6):49-52.

[19] 贾希望.转体混凝土球铰的参数分析与不利工况下关键问题研究[D].武汉:华中师范大学,2022.