

曲弦连续钢桁架有轨电车桥梁设计

夏 刚

(中铁大桥局集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

摘 要: 桥梁工程 2-1 桥为有轨电车专用桥, 桥面通行双线有轨电车, 接连园区多个古典欧式风格小镇, 并兼顾汽车及行人通行需求。桥梁跨径布置为 (50+110+50) m, 为三跨变高度曲弦连续钢桁桥。桁架的上、下弦杆设计成反向多次曲线, 桥梁外形整体呈现出仿链型悬索的仿古造型。桁架上、下弦杆采用焊接 π 字形截面, 局部通过高强螺栓连接外贴板进行加厚。桁架节点板处综合采用了栓、焊、铆相结合的连接方式, 其中铆钉均设置在桁架可视面, 以突出古典欧式风格。深化设计采用调整钢桁架系统线的方法设置桥梁预拱度, 减小了现场调整工作量。结构有限元计算结果表明, 桥梁结构受力计算各项指标满足规范要求。

关键词: 曲弦; 钢桁架; 仿古桥梁; 铆接; 系统线

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0113-05

Design of Bridge with Curved Chord Continuous Steel Truss for Tramway

XIA Gang

(China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: Bridge Engineering 2-1 Bridge is a tramway bridge, and the bridge deck is open to double-track trams, which connects to a number of classical European style towns in the park, and takes into account the needs of cars and pedestrians. The span arrangement of the bridge is (50+110+50) m, and it is a three-span variable-height curved chord continuous steel truss bridge. The upper and lower chord rods of the truss are designed to reverse multiple curves, and the overall shape of the bridge presents an antique shape of the imitation chain suspension cable. The upper and lower chord rods of the truss are welded in π -shaped sections and partially thickened by connecting the outer plate with high-strength bolts. The joint plate of the truss is connected by a combination of bolt, welding and rivet, in which the rivets are set on the visible surface of the truss to highlight the classical European style. In the deepening design, the method of adjusting the steel truss system line is adopted to set up the bridge camber, which reduces the field adjustment workload. The results of structural finite element calculation show that each index of structural stress calculation of the bridge meets the specification requirements.

Keywords: curved chord; steel truss; ancient-style bridge; riveting; system line

1 工程概况

1.1 桥梁背景

桥梁 2-1 工程为有轨电车专用桥, 位于广东东莞市华为松山湖基地内。华为松山湖基地一共分为 12 个建筑组团, 按照松山湖的自然地形, 因地制宜的分别模仿了欧洲的牛津、温德米尔、卢森堡、布鲁日、弗里堡、勃艮第、维罗纳、巴黎、格拉纳达、博洛尼亚、海德尔堡、克伦诺夫十二个小镇, 小镇之间设置有轨电车连通。桥梁 2-1 桥位于 2#地块与 4#地块之间, 所处桥位处的园区建筑均为欧式古典风格。

1.2 建设条件

拟建场地地貌单元较简单, 场地部分经人工整平, 地面相对平坦, 部分为原始地貌, 地面起伏较大。场地现状为荔枝林、鱼塘、水沟、菜地、废弃道路、湿地等, 场地建筑环境空旷。

场地地基基本稳定, 场区内中风化混合岩、中风化花岗岩分布稳定, 下部无软弱下卧层、溶洞、临空面等不良地质条件分布, 力学强度高, 适宜作为桩基础持力层。

1.3 主要技术标准

- (1) 桥梁类型: 有轨电车桥梁(需通行汽车)。
- (2) 车道数: 双线有轨电车。
- (3) 设计活载^[1-2]: 有轨电车荷载, 按建设方选定的车辆和编组进行计算, 对应车辆荷载如图 1 所示,

收稿日期: 2025-02-14

作者简介: 夏刚(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工程。

单线最多按3辆车考虑。

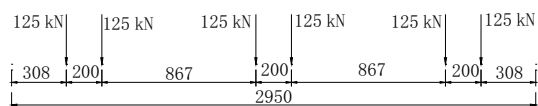


图1 一辆有轨电车荷载

汽车荷载:城-B。

车辆荷载按以下三种工况最大值进行控制设计:一是双向有轨电车;二是双向城-B;三是单向有轨电车+单向城-B。

(4)横断面布置:1.6 m(检修道)+0.8 m(桁架)+2×4.6 m(双线有轨电车)+0.8 m(桁架)+1.6 m(检修道)=14 m。

(5)设计洪水频率:1/50。

(6)桥下净空:桥下有轨电车线路通行净空按照不小于4.5 m控制,非机动车及人行道路净空按不小于2.5 m控制。

(7)结构使用年限:桥梁结构设计使用年限为100 a。

(8)环境类别:I类

2 总体布置

2.1 桥跨布置

桥梁2-1工程为有轨电车专用桥,连接2号地块及4号地块。桥梁2-1为(50+110+50) m三跨变高度曲弦连续钢桁桥^[3],全长210 m。主桥全宽14 m。桁架中心距为10 m。桥梁承载两线有轨电车,线路中心间距为4 m。支承体系布置:靠近2#地块中墩采用固定铰支座,其余墩均为活动铰支座。同一个桥墩横向设

置两个支座,其中沿线路前进方向左侧为横向固定支座,右侧为横向滑动支座(见图2)。

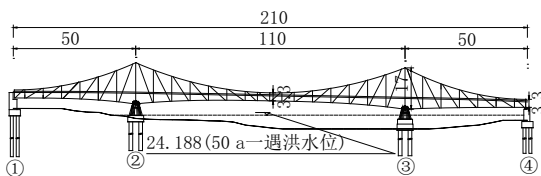


图2 桥梁立面布置(单位:m)

桁架主桁采用变高度“N”形桁式,桁架跨中桁高为3.3 m,中间支点处桁高为17.0 m,边支点处桁高为3.3 m。全桥采用变节间布置,共有5、7.5 m两种节间形式。其中上弦杆线型采用二次曲线(抛物线),下弦杆线型采用三次曲线^[3](见图3)。

2.2 设计要点

桥梁的整体美感来自于设计本身的美学品质,采用新古典主义风格,是周边欧式建筑风貌的高度

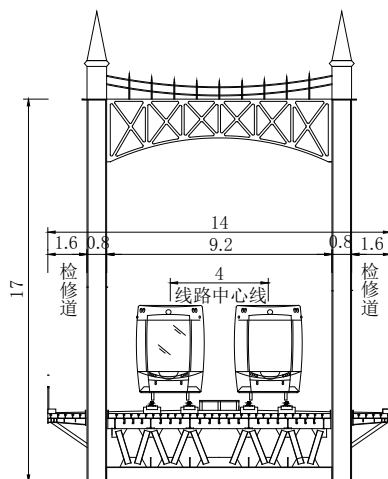


图3 桥梁横断面布置(单位:m)

凝练和概括,桥梁建筑在兼顾建筑环境同时,以结构自身的科学合理性,结构选型的尺度和视觉吸引力,给人的印象程度等共同构成优雅精致的桥梁之美。除此而外,行人在行进时体验到的整体空间美感和高视角的景观视域的喜悦,也体现了桥梁建筑巧妙的内在品质、设计质量。同时也应涵盖技术的先进性,结构质量的安全度,耐久性,施工难易,造价的合理性等因素。桥梁结构总体设计遵循以下的原则。

(1)功能满足:桥梁必须满足其通行的使用功能,使用功能和美必须统一起来,使用居优先的地位。桥面系采用钢-混凝土叠合桥面板,钢桥面板上设置D22圆柱头焊钉,将桥面板与钢梁连成整体。电车轨道采用埋置式结构,有轨电车工程可采用槽型钢轨,电车轨道与行车路面容易衔接,满足桥梁通行机动车的需求,也不破坏桥梁整体景观效果。

(2)形式与韵律:桥梁的形式与韵律是桥梁设计中不可忽视的元素,它们共同作用,使得桥梁不仅能够满足交通需求,还能够成为一道美丽的风景线。桥梁的形式受到其功能、材料和技术的影响;韵律则通过重复、渐变、对称等手法来实现。桥梁跨度及尺寸比例的选取突出桥梁景观外形,其梁体尺寸和跨度的选择布置反应出韵律感和形式美。主桁架采用变高度“N”形桁式以适应弯矩变化,同时也能实现美观复古的仿链型悬索造型。为了强调结构外形变化特点,将钢桁架上、下弦杆线型由常规平直线变为反向多次曲线,其中边跨上弦杆线型采用二次曲线,下弦杆线型采用三次曲线,中跨上弦采用三次曲线,下弦采用六次曲线。上下弦杆之间的腹杆,既有竖直布置,又有倾斜布置,在满足结构受力需要的前提下,又在一定程度反映出结构的整个桥梁外观曲线变化的外观,与桥位环境协调一致。

(3)设计结合环境:桥梁建筑装饰力求和周边相融合。根据桥位的周边环境,制定出与建筑群环境、绿化景观环境相协调的方案。从注重桥梁结构建筑的美观出发,同时桥梁总体的建筑造型以地块总体设计要求为主,与桥梁所在地块的古典欧式景观小镇总体风格相协调,融合一致,即桁架的整体风格按照仿欧式风格钢桁架进行设计,以钢桁架弦杆和腹杆等构件为线条勾勒出优美的外观造型,拱顶和桥墩处设置装饰件固定于桥梁结构外立面上。

(4)色彩与材质:桥梁总体选用深灰色彩,造型浑厚,配置低沉的涂装颜色,塑造出庄重华贵的复古韵味。

3 结构设计要点

3.1 主桁架

主桁架由上下弦杆,直腹杆和斜腹杆构成,其中主桁弦杆为焊接“Π”形截面,截面宽度为 1 200 mm,截面高 650 mm,板厚根据不同区域进行区别。其中翼缘板厚度分为 35 mm 与 (35+28) mm 两种;腹板厚度分为 35 mm、(35+28) mm 及 (35+28+12) mm 三种;翼缘板中双层不同厚度的板通过铆钉连接,腹板中多层不同厚度的板通过高强度螺栓连接(见图 4、图 5)。

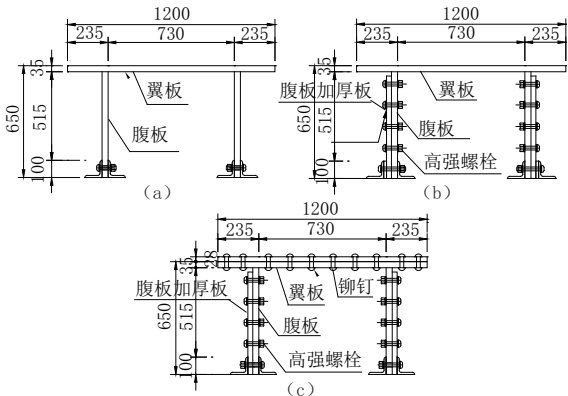


图 4 上弦杆截面(单位:mm)

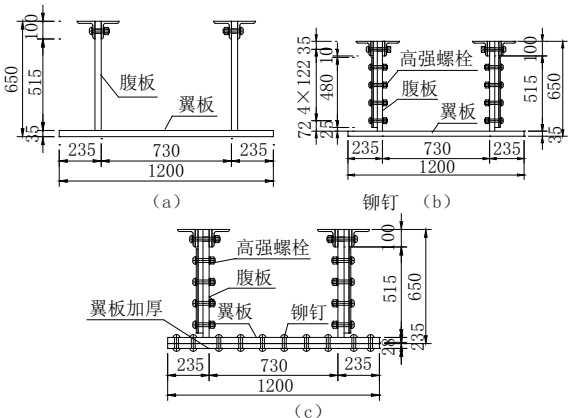


图 5 下弦杆截面(单位:mm)

腹杆横桥向通过四个“[”构件及缀板构成。其中单个“[”构件采用钢板+角钢进行拼接,截面高度分为 350 mm、450 mm 及 600 mm 三种,截面宽度为 105~120 mm,其中腹板厚度为 30 mm,角钢根据不同截面高度分为 L75×75×10,L90×90×10 两种(见图 6)。

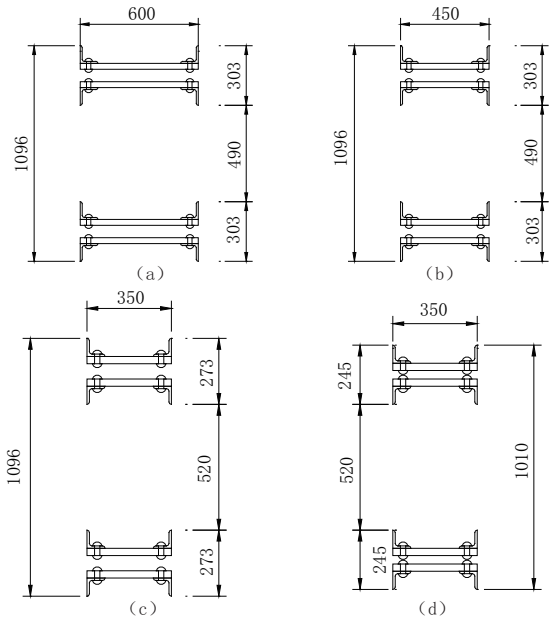


图 6 腹杆截面(单位:mm)

中间支点处腹杆采用焊接箱型截面,截面横桥向尺寸为 800 mm,截面顺桥向尺寸为 1 200 mm,板件厚度为 35 mm(见图 7)。

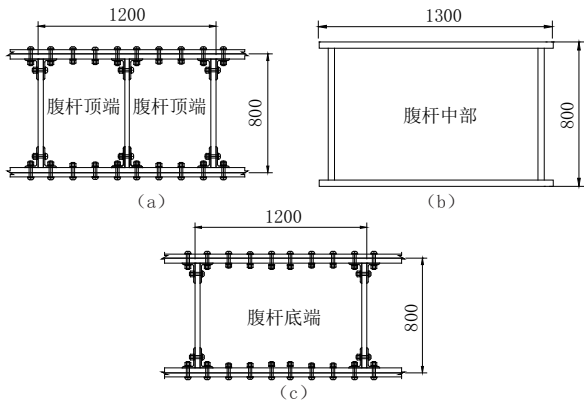


图 7 中支点腹杆截面(单位:mm)

主桁节点除在中支点处腹杆与上下弦杆采用整体节点外,其余均采用拼装式节点。节点板通过弦杆腹板下伸形成,具体大小根据连接处受力及构造要求设置,节点板厚度分为 35 mm、(35+28) mm。

3.2 桁架节点构造

桁架节点板^[4]构造有外贴式,内插式和全焊式等多种,其中外贴式节点方式构造、安装均较为简单,采用内插式节点方式则钢材用量较少,但节点局部构造相对复杂,全焊接式节点由于现场施工量大,

施工质量及工期难以保证,不能体现桥梁体仿古的欧式景观特点。

本项目有轨电车桥梁的节点设计采用类似外贴式的节点构造,但局部进行调整,即节点板采用弦杆腹板下伸形成,腹杆与弦杆连接采用铆钉、高强螺栓连接。同一个节点构造中综合用到焊接,高强螺栓连接,铆钉连接^[5-6]三种方式。其中:节点处的弦杆的翼缘板和腹板通过焊缝连接,腹板与腹板外贴板通过高强螺栓连接,腹板、腹板外贴板和直腹杆、斜腹杆采用铆钉连接。通过高强螺栓、焊缝、铆钉将上翼缘板、腹板、腹板外贴板、腹杆连接成整体,形成钢桁架桥的整体节点。特别的是铆钉用在可视面,其他位置采用高强螺栓连接。既实现了欧式全铆接钢梁的外观造型,又以部分扭剪型高栓代替铆钉降低了大面积铆合连接施工难度(见图8)。

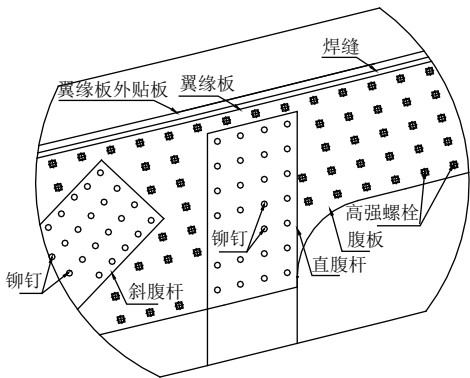


图8 整体节点连接方式

该种结构构造^[7]与外贴式节点构造形式相比,省去了节点板,既节约了材料,又减少了现场对孔的难度。同时,与采用高强螺栓连接的节点构造相比,铆钉连接更能体现出年代感和工业革命的气息,特别是铆钉连接突出了钢桁架桥的年代厚重感,又与工业革命年代的机器大生产所对应的成就相呼应,将工业现代化的成就体现得淋漓尽致。

整体节点的设计方法充分利用了栓接、焊接、铆接的特点,结合钢桁架桥制造及架设施工的特点,在钢桁架节段制造时,工厂制造部分采用焊接和高强螺栓连接,现场拼装部分采用铆钉连接。既能确保了杆件的制造精度和质量,现场施工环节少,兼顾了结构受力和复古外观的要求。

3.3 预拱度设置

本桥钢桁梁散拼施工,节段分段通过焊接、高强螺栓、铆钉连接,整个钢桁架成桥前,从墩顶向两侧对称双悬臂架设,利用设置的桥下支架辅助支撑,施工过程中线型的调整有限;对整个钢桁梁的制造线

型精度提出了较高要求。桥梁设计时需提供理论线型,既理论系统线。由于桥梁结构的自身重力作用,以及桥上通行荷载影响,桥梁结构会发生一定的位移,与理论状态的系统线存在一定的偏差,为保证桥上通行的轨道列车过桥时线路平顺、乘客舒适,提高线路的运行质量,可通过设置预拱度调整最终成桥线型。预拱度的设置采用结构恒载和1/2活载之和采用。

桥梁预拱度^[8-9]引起的桥梁线型变化,通过调整桁架系统线,在工厂进行钢桁架杆件制作时,预先微调部分杆件尺寸及铆钉孔位置,实现成桥后的桥梁线型满足预拱度设置的需求。从预拱度值来看,由于边跨恒载和活载预拱度抵消,仅需在中跨设置预拱度。由此可见,边跨各杆件尺寸,螺栓孔位置与设计线型、位置保持一致,无需调整。中跨由于需设置向上的预拱度,杆件尺寸、螺栓孔位置需进行调整。不同调整方式如下。

(1)叠加预拱度曲线影响分别重新拟合上、下弦杆曲线,以保证中跨各节点处标高按不同节点位置处对应上拱计算值进行预抬。考虑预拱度后,下弦杆缩短、上弦杆伸长、直腹杆保持铅垂且长度不变、斜腹杆长度变化,斜腹杆与弦杆夹角变化。

(2)考虑到设置上拱度后,弦杆在实际上将有一个微小的倾斜角度,而弦杆节点处直腹杆与弦杆之间节点可视作刚性状态。为了保证落架后直腹杆保持铅垂状态,则预先将直腹杆倾按一定角度倾斜设置。

为达到设置的预拱度,以上两种方式通过改变钢桁架系统线都可以实现目的,从调整方式来看,系统线调整钢桁梁预拱度不太常规,且较为复杂,而且会直接影响中跨弦杆处节点定位、放样以及杆件长度控制等内容。对以上两种方式,进行研究对比选择(见表1)。

表1 预拱度设置方式

方式	方法一	方法二
预拱度设置方法	直腹杆铅直	直腹杆倾斜
上弦	缩短	缩短
下弦	伸长	伸长
直腹杆	直腹杆不变	伸长
斜腹杆	改变	改变
铆钉孔位	改变	不变
施工变化	预先改变孔位	预先改变直腹杆长度

从以上两种预拱度设置方式来看,都是通过改变桁架系统线的方法来实现,如果存在杆件制造时按设计的桁架尺寸进行,则下料尺寸与设计长度存在偏差,导致杆件安装完成后整体桁架线型的偏差。

为此,按照调整后的预拱度,预先修改进行杆件尺寸、铆钉位置,既可以实现成桥后线型满足预拱度设置的要求,同时,施工过程简化,杆件制造安装后,现场无需在合拢前再通过顶升或配重等方式对桁架进行调整,合拢工序简化。

从施工难度上来看,在工厂进行杆件拼装时,最大的困难在于需将腹杆与上、下弦杆按照设计的铆钉孔进行对接,从以上两种方式来看,方式一预先调整孔位,保证了直腹杆安装时处于铅直位置,对孔容易,成桥后拆除支架时,仅在恒载作用下,直腹杆略有一定的倾角,但角度十分微小,基本不影响桁架整体造型及景观效果。因而,从简化施工,加快工期方面考虑,采用方案一进行全桥预拱度的设置。

3.4 桥面系

桥面系采用正交异性板整体桥面结构,由纵肋(梁)、横肋(梁)及其加劲的钢桥面板组成。桥面结构的横肋(梁)与桥面板,和主桁的下弦杆焊接在一起组成板桁组合新型结构^[10]。

车行道桥面采用钢—混凝土叠合桥面板,其中混凝土桥面板厚度为 200 mm,钢板厚度为 12 mm,钢板底缘采用一字肋进行加劲,并沿横桥向布置 5 道小纵梁;行人道区域采用钢桥面板,板厚 16 mm,钢板底缘采用一字肋进行加劲。桥面沿纵桥向设置横隔板,其间距为 1.7~3.0 m。在主桁节点处设置一道横梁。在桥面与腹杆交接处,采用桥面开孔的方式将桥面系与主桁架体系分离。混凝土桥面板与钢梁之间通过布置于钢梁顶板的 D22 圆柱头焊钉连接。

4 结构计算

桥梁设计荷载(作用)考虑了自重、二期荷载、有轨电车荷载、汽车荷载、检修荷载、温度效应(均匀升降温、差异升温,主梁截面(人行道区域)梯度温度)、沉降等。荷载按照《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1—2017)进行组合。

桁架受力分析采用有限元分析软件 MIDAS Civil 对全桥建模进行静力计算(见图 9)。

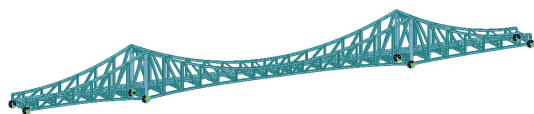


图 9 计算模型

通过计算可知,组合作用下上弦最大正应力为 108.3 MPa,最大剪应力为 39.6 MPa;下弦最大正应力为 119.8 MPa,最大剪应力为 82.3 MPa,满足要求。直

腹杆最大正应力为 130.7 MPa,斜腹杆最大正应力为 117.7 MPa,均满足《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)的相关规定。

边跨跨中挠度相对值为 31.5,挠跨比为 1/1587,活载作用下中跨跨中挠度相对值为 91.2,挠跨比为 1/1206,满足《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)的相关规定。

5 结 语

(1)提出了一种变高度“N”形主桁架设计方案,通过上下弦杆设计成反向多次曲线,实现变高度钢桁梁的仿链型悬索的仿古桥梁造型,钢桁梁在结构受力需求与景观外型的协调,在充分考虑结构受力满足双向通行的有轨电车荷载的需求下,桥梁造型和节点构造等力求反应出古典欧式风格,与桥位处环境融为一体。

(2)钢桁架杆弦杆设计采用焊接“π”型截面,腹杆设计采用角钢拼接,并通过在桁架各杆件结构的可视面上大量采用铆钉,其他位置采用高强螺栓连接,突出了欧式全铆接钢梁的外观造型,提出了一种采用栓、焊、铆相结合进行桥梁设计的方法,将铆钉连接运用到桁架可视面,实现桥梁欧式全铆接景观需求及结构受力需求的融合。

(3)提出了一种通过调整钢桁架系统线进行预拱度设计的方法,减小了成桥合拢时桁架线型调整的难度,有利于加快现场施工进度;通过调整钢桁架系统线,预先微调杆件尺寸及铆钉孔位置,实现成桥后线型满足设置将预拱度的需要,简化施工步骤。

参考文献:

- [1] TB 10002.1—2017,铁路桥涵设计基本规范[S].
- [2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] 汤秋华.大跨度变高度连续钢桁架桥设计[J].城市道桥与防洪,2020(8):94-97.
- [4] 张强,高俊启,刘鹏.钢桁架桥钢节点有限元分析[J].公路,2020(7):135-140.
- [5] 丁德豪,刘新华.金沙江特大桥钢桁加劲梁设计关键技术[J].桥梁建设,2023,53(增刊1):69-75.
- [6] 陈开利,叶庆早.日本钢桥高强度螺栓病害处治与新型螺栓研究[J].世界桥梁,2021,49(4):98-105.
- [7] 夏刚,周超舟.一种采用栓、焊、铆组合连接的钢桁架桥节点施工方法:中国,108867314B[P].2018-11-23.
- [8] 季伟强.大跨铁路曲弦钢桁加劲连续梁预拱度设置研究[J].高速铁路技术,2018,9(2):19-22.
- [9] 焦亚,萌金令.大跨度连续钢桁结合梁设计研究[J].铁道勘察,2020(2):113-117.
- [10] 郭飞.广州南沙港铁路龙穴南特大桥主桥变更设计[J].桥梁建设,2019(5):91-96.