

下层悬挂纵移开启桥设计关键技术

王青桥, 顾民杰

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 宁波市梅山春晓大桥作为连接梅山岛与北仑区的大型跨海桥梁, 在设计上大胆创新, 采用人车上下分离的布局, 同时首创了下层纵移开启的模式, 是国内外首座下层纵移开启式桥梁, 其中涉及了一系列设计关键技术。这些技术旨在精准匹配土建结构与开启机械系统的精度需求, 从而能够确保下层桥顺利实现纵移开启。该桥的创新设计, 成功打破了传统模式的束缚, 有效解决了桥上交通与大型船舶同时通行时可能产生的冲突问题, 为桥梁工程的发展提供了新的思路与范例。

关键词: 梅山春晓大桥; 钢桁拱桥; 变形适应性; 纵移开启

中图分类号: U448.26

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0115-04

Key Technologies for Design of Lower Suspended Longitudinal-moving Openable Bridge

WANG Qingqiao, GU Minjie

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The Meishan Chunxiao Bridge in Ningbo is a large-scale cross-sea bridge connecting Meishan Island and Beilun District. Its design features bold innovations, adopting a vertically separated layout for pedestrians and vehicles while pioneering a lower-level longitudinal-moving opening mode, which is the first lower-level longitudinal-moving openable bridge at home and abroad, and involves a series of key design technologies. These technologies aim at precisely matching the accuracy requirements between the civil engineering structure and the opening mechanical system, thereby ensuring the smooth longitudinal movement and opening of the lower bridge deck. The innovation design of this bridge successfully breaks the constraints of traditional models, and effectively resolves the possible conflicts that may arise when traffic on the bridge passes simultaneously with large ships, which provides the new ideas and exemplary solutions for the development of bridge engineering.

Keywords: Meishan Chunxiao Bridge; steel truss arch bridge; deformation adaptation; longitudinal-moving opening

0 引言

在城市发展和区域交流日益紧密的当下, 桥梁作为连接高等级航道两岸的关键纽带, 其引桥延伸部分却常常成为阻碍城市空间拓展和区域协同发展的瓶颈。传统桥梁为满足通航要求, 往往需要将梁底高程设置得较高, 进而导致引桥过长。这不仅占用了大量宝贵的城市土地资源, 还增加了建设成本, 影响了城市的整体布局与交通流畅性。开启桥的出现, 为这一难题提供了有效的解决途径。开启桥凭借其独特的开合结构, 能够灵活调整桥梁的通航空间, 大大降低两岸引桥的高度, 减少工程量, 有效缓

解传统桥梁带来的诸多问题。历史数据显示, 仅美国在20世纪70年代前就建成超过2 000座开启桥, 广泛应用于水域发达地区。

现有开启桥主要分为平转式、竖转式、垂直提升式3种形式^[1-2]。平转式通过竖向轴心转动实现开合, 竖转式则分为单叶片与双叶片结构, 在立面上完成旋转动作^[3], 而垂直升降式通过塔架与平衡重系统来调节桥面高度。然而, 这些传统形式存在明显缺陷: 开合过程中需中断车流通行, 且受限于机械起重能力, 开启宽度不足, 迫使船舶减速甚至频繁启闭桥体, 从而严重影响水陆交通效率。

随着现代城市对复合交通与高效航运的需求日益增长, 传统开启桥的局限性愈发突出。为此, 有研究者^[4-5]提出了创新性解决方案——下层悬挂纵移开启桥, 旨在实现车船通行互不干扰, 同时推动桥梁技术的集约化与人性化发展。

收稿日期: 2025-02-13

作者简介: 王青桥(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

1 下层悬挂纵移新型开启桥

宁波市梅山春晓大桥作为连接梅山岛与北仑区的大型跨海桥梁,在设计上大胆创新,采用了人车上下分离的布局,同时首创了下层纵移开启的模式,是国内外首座下层纵移开启式桥梁^[6-7]。该工程采用双层纵移开启设计^[8-9],主桥为336 m中承式桁架拱结构,上层衔接城市主干道,满足双向6车道公路通行需求;下层悬挂式桥体分为固定段与活动段,通过活动段的纵向移动来实现开合功能。当大型船舶需通行时(如500 t级海轮避台风),活动桥段向两侧缩进至固定桥架内部,提供16 m净高与105 m净宽的航道空间;闭合状态下,下层可维持9 m净高和300 m净宽,保障游艇全天候通行。这一设计不仅解决了传统桥梁纵坡过长(原需1 000 m接线),与堤岸道路衔接困难的问题,还大幅降低了开启频率,仅需为低频次大型船舶操作。

梅山春晓大桥总体布置图、下层桥开启状态示意图和纵移开启桥横断面布置图见图1至图3。

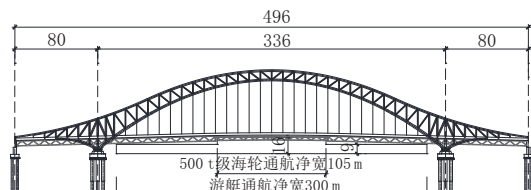


图1 梅山春晓大桥总体布置图(单位:m)

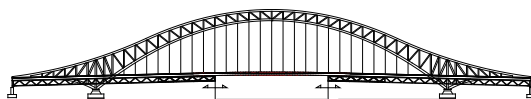


图2 下层桥开启状态示意图

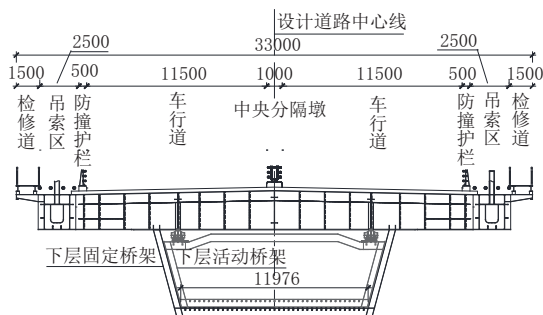


图3 纵移开启桥横断面布置图(单位:mm)

该新型结构的核心优势包括:

(1)交通连续性保障。下层开合过程中上层车流不受干扰,彻底消除了传统开启桥的交通中断弊端,保障了城市道路交通的顺畅。

(2)人本化设计。双层布局降低了非机动车道纵坡坡度,为骑行过江者提供了安全、便捷的过江体

验,充分体现了对慢行交通的关怀。

(3)资源优化配置。日常小型船舶通行无须启闭桥体,减少了机械损耗和运营成本,提高了资源的利用效率。

(4)技术创新突破。多点悬挂驱动系统^[10]突破了传统起重限制,可支持更大开启宽度,确保船舶以正常航速通行,提升了航运效率。

2 走行系统变形适应性技术

下层活动桥架在不中断上层交通的情况下纵移开启,开启系统在开启过程中需适应主桥的竖向和横向变形。主桥的竖向变形来源较为复杂,主要包括上层桥汽车荷载作用下产生的变形、桥架自身纵移开启动作引起的变形以及温度变化导致的变形;横向变形则主要由风荷载的作用和日照温差引起。

由于受到汽车荷载等多种动态因素的影响,主桥的线形始终处于不断变化的状态。为了保证开启系统在行走过程中能够顺畅运行,不出现卡顿现象,就需要其具备适应最不利变形情况的能力。走行系统采用悬挂油缸伸缩的方式来适应主桥变形,油缸的伸缩行程完全取决于主桥的变形程度。

走行系统变形适应性示意图见图4。

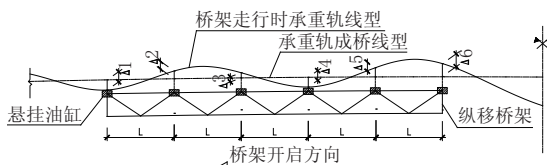


图4 走行系统变形适应性示意图

为了精确确定油缸的行程,通过构建主桥变形函数,将车辆荷载、桥架纵移开启荷载和温度荷载等外部活荷载作为自变量,油缸行程设定为因变量,进而求解目标函数的最大值。

油缸行程伸缩量求解流程图见图5。

油缸最大总行程 Δ 由汽车荷载、开启桥架荷载和温度荷载引起的分项行程线性叠加得出:

$$\Delta = \Delta_Q + \Delta_w + \Delta_T \quad (1)$$

式中: Δ_Q 、 Δ_w 和 Δ_T 分别代表汽车荷载、开启桥架荷载和温度荷载引起的油缸行程。

考虑安全系数 K ,油缸设计行程 $[\Delta]$ 为:

$$[\Delta] = K \times \Delta = L/200 \quad (2)$$

式中: L 为相邻悬挂吊点间距。

基于钢桁架拱桥结构,研发了以上开启系统变形适应性分析技术,该技术可进一步推广至斜拉桥、梁桥等其他桥型。

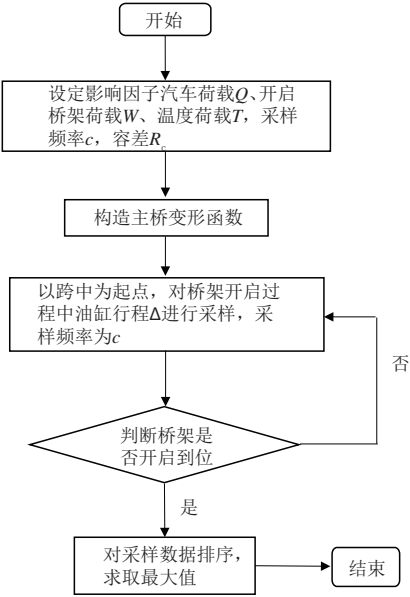


图5 油缸行程伸缩量求解流程图

3 承重轨二次高精度调差

活动桥架由于自身刚度较大且悬挂点众多,为了确保悬挂机构的同步协调行走,对承重轨道的安装精度提出了极高要求。在 55 m 的长度范围内,承重轨道的直线度偏差必须严格控制在 2.5 mm 以内,轨道铺设面的标高偏差也需控制在 5 mm 以内。然而,承重轨道是通过螺杆与上层横梁连接的,上层横梁的安装精度及其在使用过程中的变形情况,都会对承重轨的定位产生较大影响。此外,日照引起的钢结构温差变形也会给轨道安装定位带来极大的干扰。

针对上述情况,研发了承重轨高程和悬挂吊耳调整构造,有效突破了在桥梁存在厘米级误差情况下,实现纵移轨道毫米级精度控制的难题。

3.1 承重轨高程调整构造

承重轨道与主梁连接,主梁钢结构安装精度直接影响着承重轨道的安装定位。针对上层主梁存在的安装偏差,研发了一种承重轨道现场二次调差构造。施工过程中,首先在承重轨与上层主梁下缘之间预留一定的间隙;然后根据现场实际测量得到的间隙大小,选择不同高度的垫块进行精确调平,从而保证承重轨的线形和高程符合设计标准,为悬挂机构的稳定运行奠定基础。

承重轨高程调整构造示意图见图 6。

3.2 悬挂吊耳调整构造

下层活动桥架通过多组吊耳与悬挂机构相连。为了确保悬挂油缸受力均匀,活动桥架吊耳中心与承重轨面的距离应保持一致。但在实际安装过程中,

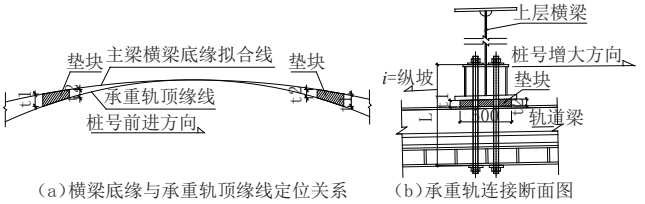


图6 承重轨高程调整构造示意图

由于最终的承重轨线形与理论线形往往存在一定偏差,安装现场一般很难保证所有吊耳中心与承重轨面的距离完全相等。

为了解决这一问题,专门开发了一种可根据现场安装线形进行调整的吊耳构造。在工厂加工吊耳时,预先开设椭圆孔。在施工现场,施工人员会根据实测的承重轨安装线形,通过焊接弧形钢板的方式来精确调整吊耳中心位置,从而实现所有吊耳中心与承重轨面距离相等的目标,保证悬挂油缸受力均匀,提高桥梁运行的稳定性。

悬挂吊耳调整构造示意图见图 7。

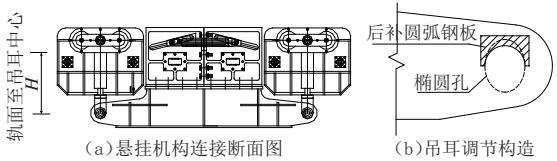


图7 悬挂吊耳调整构造示意图

通过采用承重轨二次高精度调差技术,并研发出相应的承重轨高程和悬挂吊耳调整构造,成功突破了精度控制的瓶颈。这不仅显著提升了轨道铺设的精度,还极大地提高了桥梁工程的整体质量,为桥梁的长期稳定运行提供了有力保障。

4 钢结构高精度制造和安装技术

下层纵移开启机械系统对钢结构的精度要求与一般工程钢结构存在显著差异。为了确保纵移系统的顺利开启,钢桁拱的制造和安装必须达到高精度标准,使其精度与开启机械系统匹配。

4.1 模块化制造与焊接变形控制

全焊钢桁拱节段焊缝密集,熔透焊缝多,焊接变形不易控制,采用模块化方法可以将焊接变形在桁片及块体拼装、节段拼装分部进行控制消化,降低变形控制难度^[11-12]。同时研发了能满足节段间高空多方位、多拼口、高精度的对拼措施,以实现桁架节段高效拼装和空间多接头高精度连接,对位精度达到了±1 mm。

具体控制措施有:通过预留焊缝收缩量,提前考虑焊缝在冷却过程中的收缩情况,以减少变形量;采用同步对称焊接工艺,使焊接过程中的热量分布均

匀,以降低变形的可能性;运用反变形技术,预先设置与焊接变形方向相反的变形量,以抵消焊接产生的变形;现场焊接时,选用超低氢焊材,以减少焊缝中的氢含量,提高焊缝质量;配备有效的防风措施,避免风对焊接过程的干扰;利用电热板进行焊前预热,控制道间温度,并在焊后进行缓冷处理,确保焊缝的性能稳定。此外,还采用C级超声波对焊缝进行严格检测,全方位确保现场焊缝质量达到高标准^[13]。

4.2 三维数字化预拼装技术

通过高精度三维激光扫描数据采集、数据预处理、高精度几何模型逆向重建、模型轻量化处理与三维可视化呈现、多维度构件姿态分析等技术体系,完整构建了钢桁三维数字化实景复制系统,并将其创新性地应用于多接口钢桁节段数字模拟预拼装场景(见图8)。通过三维扫描数字化模型与设计BIM模型的深度融合对比分析,成功实现了钢桁整体节段多接口环缝拼接的智能偏差校正,关键对位精度控制在2 mm以内,显著提升了复杂钢桁装配质量与效率。

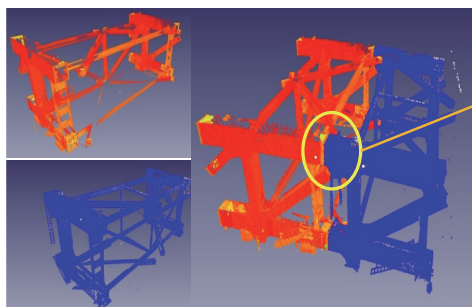


图8 钢桁节段数字化预拼装

同时针对海上超高、超重构件,提出了海上大吨位异型钢桁整体竖转起吊和定点起吊方法,实现了异型超高超重构件安全、高效和高精度(± 3 mm)安装^[14-15]。

5 下层桥面高差补偿设计

在下层桥架开启的过程中,下层活动桥架会向两端方向移动。移动轨迹是进入下层固定桥架中部预先规划好的活动桥架移动通道,直至完全收纳进下层固定桥架内部。因此,固定桥架和活动桥架的桥面存在高差。

设计提出了一种高差补偿装置^[16],专门用于满足人非通行时的高差调整需求。高差补偿装置借助销轴与固定桥架相连,在其下方配备了滑动轮组,当桥架开启运作时,滑动轮组能够跟随桥架一同进行纵向移动。同时当局部存在高差变化时,连接销轴会随之发生旋转运动,进而驱动连接装置调整其倾

斜角度,从而有效地实现对不同高差情况的补偿,确保人非通行的安全性和舒适性。

下层桥面高差补偿装置见图9。

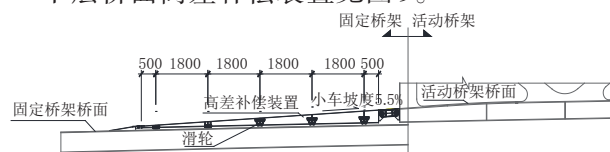


图9 下层桥面高差补偿装置(单位:mm)

6 结 语

在桥梁设计的发展历程中,宁波市梅山春晓大桥凭借其首创的下层纵移开启创新设计,成功打破了传统模式的束缚,有效解决了桥上交通与大型船舶同时通行时可能产生的冲突问题。这座桥梁所运用的一系列创新设计和关键技术,为未来开启桥的建设提供了宝贵的经验和全新的思路,有望为推动开启桥建设作出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 张显杰,韩振勇,张振学.天津海河开启桥的修复与开启桥的发展趋势[C]//2008年全国桥梁学术会议论文集.杭州:中国公路学会桥梁和结构工程分会,2008:234-240.
- [2] 陈翠丽,陈娟丽.南京江宁正方大道秦淮河大桥开启桥方案研究[J].公路与汽运,2020(4):158-160.
- [3] 陈文捷,刘慧君,张文兵.英国窄运河的转型路径与环境艺术设施研究[J].城市建筑,2021(31):190-194.
- [4] 汤晓波,胡星宇,任聪.基于主梁纵向平移的伸缩式开启桥[J].产业与科技论坛,2011(8):108-109.
- [5] 刘辉.梅山春晓大桥下层纵移开启桥架设计[J].城市道桥与防洪,2020(4):72-74.
- [6] 顾民杰,王青桥.宁波梅山春晓大桥(梅山红桥)总体设计[C]//2019年全国桥梁学术会议论文集.杭州:中国公路学会桥梁和结构工程分会,2019:232-239.
- [7] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.一种下层纵移开启式桥梁:中国,CN201920690424.3[P].2019-05-14.
- [8] 马翥,顾民杰,王青桥.2018年我国菲迪克获奖项目介绍[J].中国工程咨询,2018(10):20-24.
- [9] 马翥,顾民杰,王青桥.悬挂纵移开启式钢桁拱桥关键技术研究[J].中国科技成果,2022(20):66-67.
- [10] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.一种纵向平移式开启桥的驱动机构:中国,CN201920695071.6[P].2019-05-14.
- [11] 高波,李叶茂.重庆千厮门嘉陵江大桥钢桁梁制造关键技术介绍[J].公路交通技术,2014(6):117-120.
- [12] 李明涛.白居寺长江大桥钢桁梁制造及精度控制关键技术研究[J].工程技术与应用,2024(10):76-78.
- [13] 彭伟文.桁架式整体节点钢结构焊接及加工变形控制措施[J].物流工程与管理,2013(12):194-195.
- [14] 孟续东.宁波春晓大桥主拱施工关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2017(6):185-188.
- [15] 陈伟.钢桁拱桥固塔少扣索缆索吊装施工技术[J].中国高新科技,2022(2):120-121.
- [16] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.一种开启桥用高差补偿装置:中国,CN110144807A[P].2019-08-20.