

地铁上方大跨径、变宽钢箱梁节段拼装施工关键技术

余 洋,王洪新,张志超,毛战战

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200065]

摘 要: 金海路(杨高中路—华东路东侧)改建工程2标工程涉及一座大跨径、变宽钢箱梁桥的施工。该桥梁横跨复杂的城市地理条件及轨道交通设施,施工难度高。工程中最具挑战性的是最大跨径达121 m、宽度由25 m急剧扩展至54 m的钢箱梁的节段拼装和吊装施工。为应对这一挑战,通过精细化模拟和多项创新技术的应用,成功解决了施工过程中的结构稳定性、吊装精度和安全性问题。首先,利用BIM技术和有限元分析法,对钢箱梁的拼装过程进行三维建模与模拟,优化吊装顺序和受力分析,确保拼装过程的精确性与稳定性;其次,采用SPMT短驳模块车组、计算机控制液压同步提升装置等先进施工设备,提高施工效率和安全性;最后,结合智慧监测技术,实现对施工全过程的实时监控与精细化管理。工程的顺利推进,为同类工程的施工提供了技术参考和实践经验。

关键词: 施工模拟;智能建造;大跨钢箱梁;节段拼装

中图分类号: U445;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0306-05

Key Technologies for Segmental Assembly Construction of Long-span Variable-width Steel Box Girders above Metro Lines

YU Yang, WANG Hongxin, ZHANG Zhichao, MAO Zhanzhan

[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China]

Abstract: The Section 2 of the Jinhai Road (Yanggongzhong Road ~ East Side of Huadong Road) Reconstruction Project involves the construction of a long-span variable-width steel box girder bridge. This bridge spans the complex urban geographical conditions and rail transit facilities, making the construction challenging. The most challenging part of the project is the segmental assembly and hoisting construction of the steel box girder with the maximum span reaching 121 m and the width expanding from 25 m to 54 m sharply. To address this challenge, through refined simulation and the application of multiple innovative technologies, the problems of structural stability, hoisting accuracy and safety during the construction process are successfully solved. Firstly, by using BIM technology and finite element analysis, the assembly process of the steel box girder is modeled and simulated in three dimensions to optimize the hoisting sequence and force analysis, which ensures the accuracy and stability of the assembly process. Secondly, the advanced construction equipment such as SPMT short-distance shuttle module vehicle sets and computer-controlled hydraulic synchronous lifting devices are adopted to improve the construction efficiency and safety. Finally, combined with smart monitoring technology, the real-time monitoring and refined management of the entire construction process are achieved. The smooth progress of this project provides the technical references and practical experience for the construction of similar projects.

Keywords: construction simulation; intelligent construction; long-span steel box girder; segmental assembly

1 工程概况

金海路(杨高中路—华东路东侧)改建工程,西起杨高中路,东至华东路东侧,全长7 km。本标段为金海路(杨高中路—华东路东侧)改建工程第2标

段,起点位于金京路东侧,终点至金穗路东侧,工程路段范围为“ZK2+093”~“ZK3+815”,全长约1.722 km。工程规划采用“主线高架+地面辅路”的布置模式。主线高架快速路设计为双向6车道,配套设置3条匝道。

该项目沿线涉及3条轨道交通线路,包括现有轨道交通9号线、在建的崇明线,以及规划中的轨道交通20号线。此外,项目南侧设有220 kV高压输电线路。标段范围内主要的横向交叉道路包括申江路、

收稿日期:2025-09-04

作者简介:余洋(1985—),男,学士,高级工程师,从事市政工程施工工作。

通信作者:毛战战(1995—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁工程设计、施工工作。电子信箱:1055070355@qq.com

金吉路和金穗路。金海路改建工程 2 标工程概况如图 1 所示。



图 1 金海路改建工程 2 标工程概况图

金海路改建工程中的一项技术挑战是跨越金吉路地铁站上方的连续钢箱梁的节段拼装和吊装施工。该桥梁的最大跨径达到 121 m,为市政道路桥梁中的最大跨径,施工条件复杂,技术难度高。该桥梁采用了大节段悬臂拼装施工技术,具有较高的施工要求与技术难度。

2 施工重难点

2.1 交通组织难度较大,协调难度显著

本项目位于上海市浦东新区的交通主干道,所处区域路网复杂,交通流量较大。项目周边厂区、写字楼、办公楼及工业园区密集,尤其是在上、下班高峰时段,人口密集、车流量剧增,给交通组织带来较大挑战,工程现场交通情况如图 2 所示。为保障施工期间交通的顺畅,需要在封路前先行规划并实施临时社会道路。项目所在区域地面附属构筑物较多,且沿线工厂集中,集装箱车及大货车数量众多,转弯半径较大,红线范围内可用于施工的区域有限。这些因素对交通组织方案的确定和实施具有较大影响。



图 2 工程现场交通图

2.2 周边管线复杂,施工影响较大

工程周边现有多条管线与桩基础,且管道敷设及微顶管等施工工序交叉。施工过程中需对原有水管采取避让措施,并对现有超高压电力排管进行保

护。此外,项目南侧沿线有 1 条 220 kV 高压电力线。施工过程会对地面车道的交通组织及南侧上部结构的吊装空间造成严格限制,进一步增加了施工的复杂性。

2.3 桩基与承台距离地铁盾构线较近,对地铁结构的保护要求高

本工程项目位于 3 条轨道交通线路交会处,其中,主线桥梁全线与 9 号线共线,金吉路地铁站正下方为新建桥梁的基础施工区域,桩基与地铁分布如图 3 所示。桩基与承台距离地铁盾构线较近,必须严格控制施工对地铁结构的影响。项目所在区域的桩基设计采用钻孔灌注桩,并要求位于轨道交通 10 m 的保护区内。因此,在桩基施工时,必须加设钢护筒,以确保地铁线路和站点的安全。



图 3 桩基与地铁分布简图

2.4 钢箱梁安装施工工序复杂,施工风险较大

本工程涉及的跨金吉路地铁站连续钢箱梁全长 603 m,最大跨径为 121 m,箱梁最宽处达 54 m,最高为 5.5 m,三联钢结构总质量高达 12.281 t。由于钢箱梁吊装体积大,施工周期长,吊装任务繁重,因此,施工组织复杂,涉及多项技术工艺。该钢箱梁吊装作业需要协调使用多种大型机械,且施工过程中需保证地铁盾构、地面站台及附属构筑物的安全,避免对其造成影响。此外,钢结构施工必须考虑临时钢支撑的合理布置,确保其不对已有地下结构造成影响,同时减少支撑设置对现有交通的干扰。整体施工过程需要高精度操作,且存在较多安全隐患,要求施工人员严格按照操作规范进行作业。

本工程面临多重复杂的施工与交通组织挑战。必须采取精确的施工方案和安全保障措施,确保整个项目在精密的规划和高效的协调下进行,从而顺利完成各项任务。

3 国内钢梁桥施工数值计算方法概况

随着现代桥梁建设技术的不断发展,钢箱梁作

为一种具有较高强度、刚度和耐久性的结构形式,已被广泛应用于大跨度桥梁的建设中。尤其是在涉及跨越复杂的地理条件或城市密集区域的桥梁工程中,钢箱梁因其优异的抗变形能力和良好的施工适应性,成为关键的结构组成部分。然而,对于大跨径尤其是宽度急剧变化的钢箱梁而言,其拼装施工过程中面临诸多技术挑战。因此,在支座条件有限、吊装空间狭窄的情况下,如何精确地完成节段拼装、确保结构的稳定性与施工精度,成为施工过程中的关键问题。

我国学者对钢梁桥施工过程中的数值计算方法有较为深入的研究,主要集中在钢梁桥的施工过程模拟、结构分析、施工应力与变形预测、桥梁施工对整体结构行为的影响等方面。通过数值计算方法,研究人员能够准确地预测施工过程中可能出现的问题,如施工阶段由荷载引起的变形、应力集中、结构稳定性问题等。孟勇等^[1]采用MIDAS软件,分析了超高钢梁在吊装过程中提升不同步的问题,验证了设置柔性支撑,可以有效保证钢梁安装过程中的稳定性。田黎敏等^[2]对钢屋盖结构的同步提升过程进行施工力学模拟,发现结构在脱离支撑时会先提升受力较小的吊点,在就位时会先落受力较大的吊点,以此可以有效降低提升的不同步性。唐阳明等^[3]采用MIDAS软件,对屋盖结构建立包含多施工阶段的有限元模型。考虑到实际施工引起的几何非线性叠加作用,研究对结构中被评定为“危险”的构件进行替换,保证实际施工的安全。苏杭等^[4]运用MIDAS软件,对六安市体育中心体育馆大跨度钢结构屋盖施工进行同步提升和不同步提升全过程的仿真模拟,并将实测结果与仿真模拟结果进行对比,验证了多点不对称整体提升同步控制技术对工程施工的可行性。常海东等^[5]以艺展天地展示中心项目为背景,详细介绍了10层大跨度钢梁的安装过程,分析和总结安装过程中的关键技术。崔晓强等^[6]基于有限元分析方法,开发了针对大跨度钢结构施工过程分析的方法和程序,可以建立在ANSYS、MARC等大型有限元平台上,并充分考虑施工步骤、施工荷载、支撑条件变化和拆撑过程等对结构的影响,对结构施工进行全过程跟踪模拟分析。郑江等^[7]通过有限元分析方法,采用计算机控制多点液压同步提升技术,对大跨钢屋盖施工建立力学模型,并结合工程中的实测结果,对力学模型进行校验和修正,得出提升过程中受力点位移不一致对结构的影响。

尽管诸多学者借助MIDAS等数值模拟工具,在钢梁桥施工过程分析^[8]、应力变形预测^[9-10]及同步提升控制等方面取得了积极进展,但现有研究的关注点仍多集中于桥梁整体提升与常规钢梁桥施工方面^[11-16],缺乏对大跨径、变宽这一特殊结构形式在节段拼装过程中的精细化模拟。因此,为精确把控施工过程中结构的受力与变形情况,确保拼装线形与内力状态符合设计要求,有必要对大跨径、变宽钢梁桥施工节段拼装过程展开精细化模拟。

4 大跨径、变宽钢梁桥施工节段拼装过程精细化模拟

本案例为金海路(杨高中路—华东路东侧)改建工程2标工程,涉及1座主跨达121 m的大跨径钢箱梁桥。该桥梁施工存在的困难:一是主线部分跨越地铁区间;二是施工现场立墩条件复杂。尤其是钢箱梁的最后1跨,位于主线与匝道交会处,桥梁宽度从25 m急剧扩展至54 m,结构中存在多个超宽大横梁。这一特点不仅使得钢箱梁的分段和拼装过程极具挑战性,还使得钢箱梁在安装过程中可能因侧向扭转而导致局部支座脱空,从而影响桥梁的整体稳定性。

为应对上述技术挑战,本项目团队提出对施工过程进行精细化模拟的方案,通过对拼装施工过程的数字化建模与分析,尽可能预测并规避潜在的结构不稳定因素。

4.1 建立三维模型

团队采用BIM(建筑信息模型)技术,将设计方案转化为三维数字模型,提供立体化的可视化展示。通过三维数字模型,设计人员可以更直观地查看建筑的各个细节,包括结构、管线、空间布局等,进而更容易发现设计中潜在的问题与隐患,如结构冲突、功能不合理或空间利用不当等,从而避免施工过程中因设计缺陷而导致的工期延误和额外成本。

4.2 模拟吊装过程与拼装顺序

施工过程BIM模拟如图4所示。利用BIM构建的吊装模型,可以精确模拟施工过程中各构件的吊装过程,并进一步细化施工工序,优化施工方案。通过实时更新与协同工作,施工流程可以得到及时调整和优化,从而确保工程在规定的时间内高质量、安全地完成。

4.3 受力分析并优化拼装过程

团队采用MIDAS软件,精确地建立钢结构分段



图4 施工过程BIM模拟图

拼装模型,对钢结构在施工过程中的行为进行模拟和优化。该模型能够精确模拟吊装过程中的线形变化,确保吊装过程中各分段构件的稳定性。通过对吊装过程的详细分析,团队优化了单步吊装的变形量和应力分布,最大限度地减少因不合理的吊装顺序或方法带来的结构不稳定风险。

4.4 验证与优化

团队采用三维建模、虚拟仿真及有限元分析等技术,结合施工现场的实际情况,系统模拟了钢箱梁拼装过程中的力学行为。通过模拟吊装过程、优化拼装顺序与吊装策略,结合实际情况进行验证与调整,团队有效解决了施工过程中的潜在问题,最大限度地预测与规避施工过程中的风险,确保桥梁结构的稳定性与施工质量。

5 大跨径、变宽钢箱梁节段拼装施工工法

5.1 有限空间作业工法

本工程钢箱梁总质量约为2.3万t,在安装过程中,团队面临焊接点位繁多、焊接工作量庞大,以及工期紧张等一系列挑战。特别是在钢箱梁箱体内部进行焊接时,由于箱体为密闭空间,作业环境较为复杂,夏季作业时箱体内温度最高可达70℃,项目施工对焊接作业人员的安全及健康构成严重威胁。此外,施工环境恶劣、通风不畅,且对操作人员的身体素质要求较高。为保障焊接作业人员的安全并改善施工环境条件,项目部采用移动式空调系统,向钢箱梁腔体内部输送冷风,持续降低箱体内的温度,从而有效改善了夏季高温下焊接作业的环境条件。钢箱梁内部有限空间施工情况如图5所示。

5.2 SPMT 短驳模块车组

在本工程中,部分分段钢箱梁的质量超过500t,远超普通运输车辆的最大承载能力。此外,地铁监理单位将附加荷载的要求严格限制在10kPa/m²,这使得运输条件变得极为苛刻。为了提高施工效率并确保地铁运行的安全性,项目团队采用国内先进的

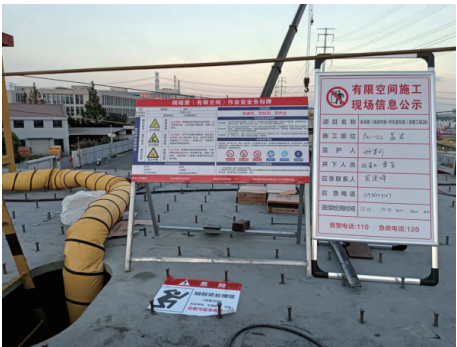


图5 有限空间施工图

SPMT短驳模块车组进行运输。通过精确的受力计算,团队采用了3轴18组共144个轮胎的配置,实现各轴线的受力均衡。SPMT短驳模块车组运输图如图6所示。在运输过程中,团队通过现场遥控系统对车辆转向进行实时调整,成功在狭窄的道路条件下完成钢箱梁的运输作业。



图6 SPMT短驳模块车组运输图

5.3 计算机控制液压同步提升装置

计算机控制液压同步提升技术是一种创新的构件提升安装施工方法。该技术结合了柔性钢绞线承重、油缸集群、计算机控制,以及液压同步提升等先进原理,旨在实现大吨位、大跨度、大面积、超大型构件的高空同步提升。首先在地面完成构件拼装;然后利用计算机控制液压同步提升技术将构件整体提升至预定位置;最后进行精确安装。这种安装方式显著提高了施工的效率 and 安全性。

在本工程中,钢箱梁提升任务涉及最大长度达79m、最大质量达513t的纵梁。提升装置由H型钢、钢绞线、液压系统和精轧螺纹钢锚固系统组成,确保了提升过程中各项受力的均衡性和同步性。液压同步提升装置如图7所示。计算机控制液压同步提升技术通过对多个油缸的精确协调和控制,实现了超高空、超大构件的安全、高效安装。

6 大跨径、变宽钢箱梁节段拼装关键技术

作为一个具有挑战性的城市交通基础设施工程,本项目在钢箱梁拼装、桩基施工和泥浆处理等环节,通过采用预制装配式施工技术、大跨径钢箱梁双

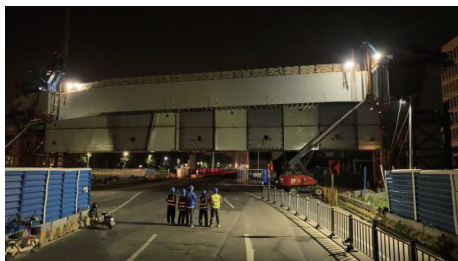


图7 液压同步提升装置图

龙门吊悬臂拼装技术等一系列创新技术,极大地提高了施工效率和质量,且有效减少了施工过程对周围环境的负面影响。

6.1 预制装配式桥梁施工技术

预制装配式建筑是一种先进的建筑形式,其借助高工业化水平的预制装配技术,采用标准化的装配体系,在预制工厂内对建筑构件进行工业化生产,从而显著提高了施工效率和建筑质量。本工程预制装配式桥梁如图8所示,其施工过程如下:首先通过运输车辆将预制构件运送至施工现场;然后通过灌浆、座浆等施工工艺,将各构件与承台及其他构件精准拼接,从而实现结构的稳定性与完整性。本项目的预制率超过90%,不仅提升了建筑的施工效率,还促进了绿色施工、环境保护和资源节约。

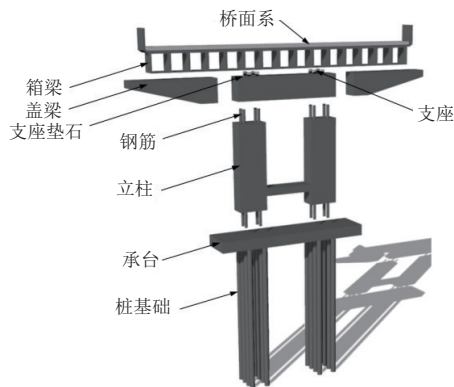


图8 预制装配式桥梁图

6.2 121 m大跨径钢箱梁双龙门吊悬臂拼装技术

本工程全线与轨道交通9号线共线,涉及跨金吉路地铁站上方的钢箱梁吊装施工。在施工中,最大跨径达到121 m,采用连续钢箱梁结构。这是目前国内城市高架建设中跨径最大的连续钢箱梁吊装工程。为确保施工安全与精度,经过多方案比选,团队最终决定采用“龙门吊+提升装置+汽车吊”的复合施工方案。该方案的核心技术在于钢箱梁的悬臂拼装,尤其是2台200 t龙门吊同步协同操作,对称的悬臂拼装两端的钢结构纵梁。双龙门吊悬臂拼装如图9所示。悬臂拼装过程中的关键技术难点在于精确控制拼装精度与同步性,尤其是在拼装过程中龙门

吊的松钩操作需同步完成。



图9 双龙门吊悬臂拼装图

此外,桥面平整度的调节也面临较大的技术挑战。为应对昼夜温差引起的钢箱梁变形,项目团队结合双目立体视觉技术与高精度温度场监测技术,开展了大跨径钢箱梁高精度拼装智能控制技术研究。双目立体相机测量如图10所示。该技术通过数字预拼方案,能够在合龙前进行精准的拼装调节,从而有效保障拼装精度,确保合龙过程顺利进行。

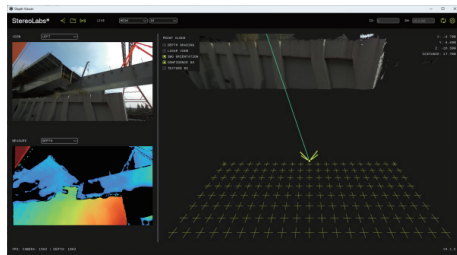


图10 双目立体相机测量图

7 总结与展望

本文全面分析了上海市金海路改建工程2标工程大跨径、变宽钢箱梁的施工过程与技术难点,提出有针对性的技术解决方案,并详细阐述了采用的创新施工工法。首先,针对钢箱梁拼装过程中的技术挑战,团队通过BIM技术和有限元模拟优化了吊装顺序,提升了施工的精确性与稳定性,确保了钢箱梁在吊装过程中的受力平衡与结构稳定性。其次,项目引入SPMT短驳模块车组和计算机控制液压同步提升装置,实现了大吨位构件的高效、安全吊装,弥补了传统吊装技术的不足。

本工程施工过程中的精细化模拟方法及创新施工技术,不仅有效解决了大跨径、变宽钢箱梁施工中的各类技术难题,还为今后类似的项目施工提供了宝贵的经验与技术参考。

参考文献:

- [1] 孟勇,梁汝鸣,张峰,等.超高钢梁安装全过程施工模拟分析[J].建筑结构,2023,53(增刊1):2216-2221.
- [2] 田黎敏,郝际平,李存良,等.大跨度钢屋盖结构整体提升施工过