

悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析

曹铁锤

浙江交工集团股份有限公司第四分公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2026030036

摘 要 : 悬臂施工技术凭借施工跨度大、对桥下交通干扰小、结构整体性强的优势, 成为大跨度桥梁工程建设的核心技术之一。本文结合桥梁工程实践, 阐述悬臂施工技术的基本原理与适用范围, 分析其在桥梁工程中的具体应用场景、核心工艺实践及典型项目案例(含浙江省义东高速公路东阳段实际工程案例), 探讨施工过程中的质量控制与安全管理措施, 旨在为同类桥梁工程的施工提供技术参考, 推动悬臂施工技术的优化与创新。

关 键 词 : 悬臂施工技术; 桥梁工程; 应用分析; 悬臂浇筑法; 悬臂拼装法; 质量控制

Analysis of the Application of Cantilever Bridge Construction Technology in Bridge Engineerings

Cao Tiechui

Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd. Fourth Branch Company, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : The cantilever construction technology, with its advantages of large construction span, minimal interference to the traffic below the bridge, and strong structural integrity, has become one of the core technologies for the construction of large-span bridges. This paper, based on bridge engineering practice, elaborates on the basic principles and application scope of the cantilever construction technology, analyzes its specific application scenarios, core process practices, and typical project cases (including the actual engineering case of the Yidong Expressway Dongyang section in Zhejiang Province), discusses the quality control and safety management measures during the construction process, aiming to provide technical references for the construction of similar bridge projects and promoting the optimization and innovation of the cantilever construction technology.

Keywords : cantilever construction technology; bridge engineering; application analysis; cantilever casting method; cantilever assembly method; quality control

前言

近年来,随着预应力技术、施工机械智能化水平的提升,悬臂施工技术的应用范围不断拓展,工艺体系日趋完善,在高铁、城际铁路、跨江跨海大桥等重点工程中发挥着不可替代的作用。本文系统梳理悬臂施工技术的应用基础,深入分析其在桥梁工程中的应用场景、核心工艺与实践成效,结合山东省规划 S310 省道跨胶济铁路特大桥、济潍高速跨胶济铁路特大桥及浙江省义东高速公路东阳段变截面现浇连续箱梁工程案例,探讨质量管控要点,以期桥梁工程的高效、安全建设提供理论与实践支撑。^[1]

一、悬臂桥梁施工技术的基本原理与适用范围

(一) 基本原理

悬臂施工技术的核心原理是利用桥梁墩身作为支撑起点,以桥墩为中心,对称向两侧逐段施工梁体节段,每施工一个节段,需及时施加预应力,使节段与已完成梁体形成整体,共同承受施工荷载与后续荷载。该技术遵循“对称、平衡、同步”的施工原则,通过控制两侧悬臂端的荷载平衡,避免结构产生过大的不平衡弯矩,确保施工过程中桥梁结构的稳定性。在施工过程中,需借助挂篮、吊机等专用设备,完成梁体节段的浇筑、拼装与预应力张拉作业,逐步延伸悬臂长度,直至两侧悬臂端在跨中合拢,

形成完整的桥梁主梁结构。^[2]

(二) 适用范围

悬臂施工技术适用于大跨度预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥、斜拉桥等桥梁类型,尤其适合跨越深水河道、繁忙交通干线、山谷等难以搭设支架的施工场景。从跨度来看,该技术常用于主跨 50m 以上的桥梁工程,在主跨 100-500m 的大跨度桥梁中优势更为显著。其中,悬臂浇筑法适用于混凝土连续梁桥、连续刚构桥,其梁体整体性好,结构刚度大,可适应复杂的受力环境;悬臂拼装法则适用于预制节段质量易于控制、施工工期要求严格的桥梁工程,如城市快速路桥梁、跨海大桥引桥等,具有施工速度快、现场作业量小的特点。此外,该技术还可与其他施工

方法结合使用，如桥梁下部结构采用支架施工、上部结构采用悬臂施工，以优化施工方案，降低工程成本。

二、悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用

（一）核心工艺应用实践

1. 悬臂浇筑法的工程应用

悬臂浇筑法（又称挂篮施工法）是公路桥梁工程中应用最广泛的悬臂施工工艺，通过可移动挂篮覆盖梁体节段钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑与预应力张拉全流程。其核心优势在于梁体整体性强、适应跨高速、跨铁路、跨江河等复杂场景，无需满堂支架，能最大限度减少对桥下交通与环境的干扰，在山东、浙江等多地重点公路工程中均为首选工艺。

施工准备阶段，需先完成桥墩墩身验收，在墩顶安装钢管柱或碗扣式满堂支架用于0号块施工。支架基础需针对性加固，软土地基采用注浆或CFG桩复合地基处理，搭设后进行1.2倍设计荷载预压，消除非弹性变形并获取预拱度数据。0号块作为受力核心，长度6-12m需一次性连续浇筑，确保结构整体性。^[3]

挂篮作为核心设备，需经专项设计与有限元验算，安全系数不低于1.5，拼装后进行静载试验。安装时严格校准轴线与高程，偏差不超过5mm；行走采用同步液压驱动，速度控制在0.5m/h以内，两侧同步推进避免倾覆。在规划S310省道跨沈海高速特大桥中，全封闭式挂篮将单节段移动时间缩短至2小时，兼顾安全与效率；浙江省义东高速公路东阳段工程中，采用菱形挂篮，单侧重量约75t，容许变形不大于2cm，行走及施工时抗倾覆安全系数大于2，有效适配跨东阳江的施工需求。

梁体节段施工遵循“对称、平衡、同步”原则。钢筋采用工厂预制现场拼装，预应力波纹管用定位钢筋固定，接缝密封严密。选用C55及以上高性能混凝土泵送浇筑，分层厚度不超过30cm，重点振捣关键部位避免质量缺陷。浇筑后启动智能喷淋养护不少于14天，强度达标后按“先纵向、后横向、再竖向”顺序智能张拉，张拉力与伸长量双控，偏差控制在±6%以内，24小时内完成孔道压浆。

合拢段施工为关键收尾环节，长度1.5-2.0m，按“先边跨后中跨”顺序施工。施工前通过配重、临时预应力调整轴线与高程偏差，选择夜间低温时段浇筑微膨胀混凝土，加强保温养护，强度达标后张拉合拢预应力筋。规划S310省道跨沈海高速特大桥实现一次性合龙，梁体线型误差控制在3mm以内；浙江省义东高速公路东阳段合龙施工中，采用刚性支撑与临时预应力张拉锁定方案，结合水袋配重动态卸载，确保合龙段无裂纹产生。

2. 悬臂拼装法的工程应用

悬臂拼装法通过工厂预制节段、现场吊装拼接形成整体结构，核心优势是施工速度快、现场作业量小、对环境干扰低，适合工期紧张的城市公路桥梁与跨海大桥引桥。该工艺将大量作业转移至工厂，有效控制质量，减少现场环境影响，在山东省内部分高标准公路项目中成功应用。

预制节段采用高精度钢模板制作，长度2-4m，重量控制在

150t以内便于运输吊装。选用高强度低收缩混凝土，通过智能温控防止裂缝，节段端面设置剪力键与定位销确保贴合度。预制后经外观、尺寸与强度检测，合格后方可运输，运输过程做好固定防护。^[4]

吊装选用缆载吊机或汽车吊，按对称原则从桥墩向跨中延伸，利用全站仪精准定位，节段贴合间隙不超过2mm。拼接分为干拼与湿拼，干拼依赖预应力张拉贴合，湿拼采用环氧树脂砂浆增强粘结力，拼接后按规范顺序张拉预应力筋形成整体。体系转换阶段分步拆除临时支架与固结措施，调整预应力使结构从施工状态平稳过渡至运营状态，转换后全面检测确保安全。

（二）典型工程应用案例

1. 规划S310省道跨沈海高速特大桥（山东）

该项目是山东省“十四五”公路网规划重点工程，路线全长约65km，其中K4+206跨沈海高速特大桥作为全线控制性工程，主桥采用悬臂现浇连续箱梁结构，跨径布置为50+85+50m，最大悬臂长度41.5m，边跨和中跨均分为9个悬臂梁段，梁体总宽26m，设计时速100km/h，满足双向四车道通行需求。工程面临的核心挑战是跨沈海高速施工，该路段日均车流量超8万辆，高峰时段车流密度大，安全管控难度极高，且施工区域临近高速边坡，地质条件复杂，需严格控制施工扰动避免边坡失稳。

施工单位严格遵循“标准化、规范化、精细化、智能化、绿色化”的五化理念，建立完善的质量管理与安全生产体系，严格执行《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》（JTG/T 3651—2022）《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50—2020）等最新行业标准。项目创新采用全封闭式智能挂篮，挂篮主桁为菱形结构，重量轻、刚度大，行走系统搭载同步液压驱动装置，实现自动化精准行走，行走偏差控制在2mm以内。全封闭式防护设计采用高强度钢板与防护网组合结构，不仅有效隔离施工区域与高速行驶车道，防止钢筋、混凝土碎块等杂物坠落影响交通，还能抵御高空强风，为施工人员提供安全舒适的作业环境。^[5]

为提升施工效率，项目团队优化施工工序，将钢筋加工、预应力管道预制等工序转移至地面加工厂标准化生产，再通过吊装设备转运至挂篮内进行组装，大幅减少高空作业时间，将原10天一个节段的施工周期缩短至7天。在质量管控方面，项目建立全过程信息化监测系统，在梁体腹板、顶板等关键部位布设80余个应变计、位移计，实时采集梁体应力、变形数据，通过5G技术上传至云端管理平台，技术人员结合监测数据动态调整模板高程与预应力张拉参数，确保梁体线型与结构受力符合设计要求。2025年5月，该桥所有主墩0号块全部浇筑完成，8套挂篮全部具备连续施工条件，截至2025年10月，已完成16个悬臂节段的施工，累计浇筑混凝土3800余立方米，工程质量一次验收合格率达到100%，未发生任何安全事故，为后续合龙施工与项目全线通车奠定了坚实基础。

2. 济潍高速跨胶济铁路特大桥（山东）

济潍高速是山东省“九纵五横一环七射多连”高速公路网的核心组成部分，路线全长约160km，设计时速120km/h，是连接济南、潍坊两大交通枢纽的快速通道。其中跨胶济铁路特大桥是全线重难点工程，主桥采用悬臂现浇连续箱梁结构，主跨径

120m, 共分为11个悬臂节段, 梁体采用单箱单室截面, 顶板宽28m, 底板宽14m, 梁高从墩顶处的6.5m渐变至跨中处的3.0m。施工需跨越繁忙的胶济铁路干线, 该铁路为客货混跑线路, 日均通行列车超过150列, 最小行车间隔仅5分钟, 施工窗口期极短, 且安全风险高, 需严格避免施工对铁路运营造成影响。

为确保工程顺利推进, 施工单位采用集成承重杆件、模板系统、平台防护、智能控制和信息化检测五大系统的智能挂篮, 实现施工过程的数字化与智能化管控。通过BIM技术构建桥梁三维可视化模型, 精准还原地质条件、梁体结构与施工环境, 模拟节段浇筑顺序、挂篮行走路径与合龙工艺, 提前预判挂篮与铁路接触网的安全距离、节段吊装与列车通行的冲突风险, 优化施工方案与时间安排, 将挂篮行走、混凝土浇筑等关键工序安排在铁路“天窗期”内进行。针对施工现场浅埋地基、承载力不足的问题, 对0号块支架基础采用高压注浆加固处理, 注浆深度达15m, 形成复合地基, 承载力提升至250kPa以上, 确保支架在施工过程中无沉降变形。

在预应力施工方面, 采用智能张拉设备, 实现张拉过程的自动化控制, 张拉力误差控制在 $\pm 1\%$ 以内, 同时实时采集伸长量数据, 与理论值对比分析, 数据可实时上传至项目管理平台与铁路运营管控部门, 确保张拉质量可追溯。安全防护方面, 在铁路上方设置双层钢结构防护棚, 顶部铺设防滑钢板与防火阻燃材料, 防护棚两侧设置防撞护栏与警示标识, 防止施工杂物坠落影响铁路运营。该桥于2023年3月正式启动悬臂施工, 2024年8月顺利完成主跨合龙, 历时17个月, 累计浇筑混凝土5200余立方米, 张拉预应力钢束总长超过8000m, 梁体线型误差精准控制在3mm以内, 结构应力符合设计要求, 工程质量达到优良标准。^[9]

3. 义东高速公路东阳(江北至南市)段跨东阳江特大桥(浙江)

该项目是浙江省义东高速公路的关键控制性工程, 其中东阳西互通主线桥左幅第10联(右幅第9联)为50+85+50m变截面现浇连续箱梁, 上跨东阳江, 桥墩编号为第52墩~55墩, 左幅位于半径4600m圆曲线范围, 右幅位于半径3550m圆曲线范围, 墩台径向布置, 桥面设2%单向横坡, 桥宽20.25~22.262m, 梁体采用C55混凝土, 纵横向预应力采用高强度低松弛钢绞线, 竖向预应力采用精轧螺纹钢。工程面临跨东阳江施工、临近临江大桥(老桥)、地质条件复杂(冲洪积平原区, 上覆填土及含砾粉质黏土, 下伏粉砂岩)等挑战, 施工需严格控制对河道防洪、老桥通行的影响。

施工单位严格遵循《公路桥涵施工技术规范》(JTJ/T 3650-2020)等规范要求, 结合浙江省地方标准与工程实际制定专项方案, 核心施工举措如下:

0号块施工: 采用钢管柱复合支撑体系, 主墩两侧设置10根钢管柱(外侧 $\Phi 1000 \times 14\text{mm}$, 中间 $\Phi 800 \times 14\text{mm}$), 与承台预埋钢板焊接固定, 钢管间设水平框架与剪刀撑增强稳定性; 0号块长度12m, 混凝土方量492.4m³, 采用一次浇筑成型, 支架预压荷载为1.2倍梁重(998.82t), 分60%、80%、100%三级加载, 确保支架强度与刚度达标。

挂篮施工: 投入4套菱形挂篮, 左右分幅同步施工, 挂篮主桁为菱形结构, 配备主桁系统、底篮系统、行走及锚固系统, 单侧重量75t, 容许变形 $\leq 2\text{cm}$; 挂篮拼装后进行静载试验, 采用预制混凝土块堆载预压, 最大预压荷载220t, 分三级加载观测弹性与非弹性变形, 为底模预拱度设置提供依据。梁体节段长度3~4m, 浇筑遵循对称原则, 针对53号墩两侧节段砼方量偏差问题(最大累加偏差22.62t), 采用型钢配重平衡荷载; 混凝土浇筑后智能喷淋养护不少于14天, 强度达设计强度90%且龄期不小于7d后, 按“先纵向、后横向、再竖向”顺序张拉, 张拉力误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。

边跨现浇段施工: 采用60cm优质宕渣+15cmC20混凝土硬化基础, 搭设盘扣支架, 立杆间距30cm \times 60cm~90cm \times 90cm(腹板处加密), 设置纵横向水平杆与剪刀撑增强稳定性; 支架预压荷载为1.2倍节段自重, 观测沉降量满足连续24h平均值 $\leq 3\text{mm}$ 后卸载。

合龙段施工: 按“先边跨后中跨”顺序施工, 合龙段长度2m, 采用吊架法施工; 施工前在悬臂端施加50%合龙段砼重量的水袋配重, 夜间低温时段浇筑微膨胀混凝土, 浇筑过程中同步卸载配重; 合龙前安装劲性骨架锁定, 张拉临时预应力束, 确保合龙段线型偏差控制在规范范围内。

安全管控方面, 项目对施工区域实行全封闭管理, 在东阳江河道内设置施工便道与安全防护设施, 主墩临时支撑采用清宕渣回填防护防冲刷; 临近临江大桥施工时, 设置双层防护棚防止坠物影响老桥通行; 建立全过程信息化监测系统, 在梁体关键部位布设应变计与位移计, 实时监测结构应力与变形。该桥悬臂施工于2020年11月启动, 2022年完成主跨合龙, 累计浇筑混凝土9937m³, 张拉预应力钢绞线498.91t, 梁体线型误差控制在3mm以内, 工程质量一次验收合格率100%, 未发生安全事故, 获评浙江省“智慧工地”示范标段。

三、悬臂桥梁施工质量控制与安全管理

(一) 质量控制

严格遵循《公路桥涵施工技术规范》(JTJ/T F50-2020)《公路桥涵施工技术规范》(JTJ/T 3650-2020)等最新规范要求, 建立“三检制”质量管理制度, 对原材料进场、模板安装、混凝土浇筑、预应力施工等关键环节进行全程管控。原材料进场需提供质量证明文件并进行复检, 混凝土配合比需根据施工环境动态调整; 模板安装确保轴线、高程偏差符合要求, 接缝严密不漏浆; 预应力管道采用塑料波纹管, 定位钢筋间距不大于0.6m(曲线段0.3m), 连接采用热熔焊接; 混凝土浇筑分层厚度不超过30cm, 振捣密实, 养护时间不少于14天; 预应力张拉采用“双控”措施, 张拉力与伸长量偏差控制在 $\pm 6\%$ 以内, 张拉后24小时内完成孔道压浆。采用信息化监测技术, 对梁体高程、轴线偏位、结构应力等参数进行实时监测, 数据异常时及时调整施工参数。^[9]

(二) 安全控制

针对悬臂施工高空作业多、风险点多的特点, 建立健全安全

生产责任制，对施工人员进行专项安全培训与技术交底。挂篮拼装、行走及拆除过程中，设置安全防护网与警示标志，严禁违规操作；挂篮行走时设置保险装置，风力达到5级及以上时停止作业。跨线、跨江施工时采用封闭式防护措施，设置交通疏导标识，配合交管部门做好交通管制工作；跨江施工需制定防洪冲刷措施，支架基础加固处理确保承载力达标。构建应急救援体系，制定坍塌、高空坠落、溺水等突发事件应急预案，并定期组织演练；施工现场配备充足的安全防护用品与应急物资，确保施工安全可控。

四、结语

悬臂桥梁施工技术作为大跨度桥梁工程的核心施工技术，其应用成效直接决定工程质量、进度与安全。在桥梁工程实践中，

悬臂浇筑法凭借整体性强的优势成为跨江跨高速等重难点工程的首选，悬臂拼装法则以高效快捷的特点适配工期紧张的建设需求，而智能化悬臂造桥机的推广应用进一步推动了该技术向高精度、高效率、低风险方向发展。结合山东、浙江多地实际工程案例来看，施工过程中需严格遵循“对称、平衡、同步”原则，强化施工监控与质量控制，落实设备安全与高空防护措施，同时结合项目所在地地质、水文、交通等实际条件优化施工方案，才能确保工程建设顺利推进。

参考文献

- [1] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京：人民交通出版社，2018.
- [2] 周水兴，何兆益，邹毅松. 路桥施工计算手册 [M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2019.
- [3] 向中富. 桥梁施工技术 [M]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2021.
- [4] 王伯惠. 大跨度桥梁施工控制技术 [M]. 北京：人民交通出版社，2017.
- [5] 李乔，蔡春声. 悬臂拼装施工技术在大跨度连续梁桥中的应用 [J]. 桥梁建设，2021，51(02)：112-117.
- [6] 张喜刚，马健，王毅. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥悬臂浇筑施工质量控制要点 [J]. 公路交通科技，2019，36(09)：63-69.