

悬臂桥梁施工技术在桥梁工程中的应用分析

梁凯

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025040023

摘 要 : 悬臂施工技术凭借跨越能力强、对地形适应性好的优势,在大跨度桥梁工程中应用广泛。本文结合实际工程案例,系统分析挂篮悬浇、悬臂拼装等技术类型的应用场景,探讨挂篮设计、线形控制、合龙施工等关键技术要点,针对施工中的安全控制、环境适应等难点提出应对措施,为同类工程提供参考。

关 键 词 : 悬臂施工; 挂篮悬浇; 桥梁工程; 线形控制; 合龙技术

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

Liang Kai

Zhejiang Jiaotong Hongtu Transportation Construction Co., LTD., HangZhou, Zhejiang 311305

Abstract : Cantilever construction technology is widely applied in long-span bridge projects due to its strong spanning capacity and good adaptability to terrain. This paper, based on actual engineering cases, systematically analyzes the application scenarios of technical types such as hanging basket suspension pouring and cantilever assembly, discusses key technical points such as hanging basket design, linear control, and closure construction, and proposes countermeasures for difficulties such as safety control and environmental adaptation during construction, providing references for similar projects.

Keywords : cantilever construction; hanging basket suspension pouring; bridge engineering; linear control; closure technology

前言

在跨越深谷、江河、交通干线等复杂场景时,悬臂施工技术成为桥梁建设的核心选择。该技术通过从桥墩向两侧逐段延伸施工,无需搭设满堂支架,显著降低对桥下空间的干扰。据统计,国内跨度200米以上的桥梁中,75%采用悬臂施工技术,某长江大桥主跨580米采用悬臂悬浇施工,实现了“零支架”跨越主航道,较传统工艺节省成本40%。

然而,悬臂施工存在工序复杂、精度要求高的特点。某高速公路特大桥在施工中,因挂篮刚度不足导致梁段竖向变形达20mm,合龙时轴线偏差12mm,不得不进行后期调整,增加成本600万元。因此,深入研究悬臂施工技术的应用规律,对提升工程质量、保障施工效率具有重要意义。本文结合12个典型工程案例,从技术类型、关键工艺及应用难点展开分析。

一、悬臂施工技术类型及适用场景

(一) 挂篮悬浇技术

挂篮悬浇技术通过可移动挂篮承载混凝土浇筑,从桥墩向两侧对称施工,每段长度2~5米,适用于变截面连续梁、刚构桥等结构,尤其适合曲线桥、宽幅桥等复杂线形。其核心优势是能适应梁体截面变化,施工精度可达毫米级。^[1]

例如:某黄河特大桥主桥为(100+200+100)米连续刚构,采用菱形挂篮悬浇施工,挂篮自重65吨,与梁段重量比0.65(规范要求 ≤ 0.7),施工中通过预压消除非弹性变形8mm,最终30个梁段轴线偏差均控制在 ± 4 mm内,合龙精度3mm;某城市立交桥为曲线半径300米的变截面梁桥,采用扇形挂篮(可旋转

3°)适应曲线变化,每段施工周期8天,较直线桥增加1天,但曲线平顺度满足规范要求,通车后车辆行驶舒适度提升显著。

(二) 悬臂拼装技术

悬臂拼装技术将工厂预制的梁段(长度3~10米)通过架桥机或浮吊吊装,采用胶接缝或湿接缝连接,适用于等截面T梁、箱梁桥,具有施工速度快(日均1~2段)、工业化程度高的特点。

例如:某铁路大桥(40×50米)采用悬臂拼装施工,梁段在预制场标准化生产,尺寸偏差 ≤ 3 mm,现场用环氧树脂胶接缝(厚度1mm)连接,全桥400个梁段仅用5个月完成,较悬浇施工缩短工期40%,且梁体线形平顺度达98%;某跨海大桥引桥采用“浮吊+悬臂拼装”技术,针对海洋环境设计防腐梁段,吊装时通过GPS定位(精度 ± 2 mm),受潮汐影响最小化,单日最高完成

3个梁段拼装，创同类工程纪录。

（三）混合施工技术

混合施工技术结合悬浇与拼装优势，对变截面段采用挂篮悬浇，等截面段采用悬臂拼装，适用于跨度大、地形复杂的桥梁，可平衡施工精度与效率。

例如：某峡谷大桥主跨350米，两岸各100米等截面段采用拼装（8米/段），中间150米变截面段采用悬浇（3米/段），通过BIM技术模拟衔接精度，实际偏差仅2mm，较全悬浇方案节省工期3个月；某山区桥梁因一侧地势平缓、一侧陡峭，采用“左幅拼装+右幅悬浇”同步施工，左幅拼装效率提升30%，右幅悬浇适应复杂线形，全桥工期缩短15%，且左右幅相对偏差 $\leq 5\text{mm}$ 。

二、悬臂施工关键技术及应用要点

（一）挂篮设计与调试

挂篮作为悬臂悬浇施工的核心设备，其设计需平衡自重与刚度，满足“轻量高效、承载稳定”的要求：自重与梁段混凝土重量比宜控制在0.5-0.7之间，过大则增加梁体负担，过小则可能刚度不足；挂篮总刚度需保证在最大施工荷载下，弹性变形 $\leq$ 梁段长度的1/500，非弹性变形通过预压消除。设计时需验算承重、行走、锚固等多工况受力，重点加强吊带、横梁等关键部位（安全系数 ≥ 2.0 ），并预留调整空间（如吊带高度微调范围 $\pm 50\text{mm}$ ）以适应施工误差。调试阶段需进行1.2倍设计荷载预压（分级加载：0 $\rightarrow$ 50% $\rightarrow$ 100% $\rightarrow$ 120%），测定弹性变形值用于预拱度设置，同时消除焊接残余应力、连接件间隙等非弹性变形。^[2]

例如：某大桥采用菱形挂篮（自重60t）浇筑50t梁段（自重比0.6），预压测得弹性变形12mm、非弹性变形5mm，施工中设置17mm预拱度，实际浇筑后梁段沉降16mm，偏差仅1mm；挂篮行走时通过液压同步系统控制，两侧位移差 $\leq 3\text{mm}$ ，确保轴线精度；某项目因挂篮设计未考虑曲线施工需求，导致曲线段浇筑时挂篮横向变形超8mm，后期通过增加侧向支撑（刚度提升40%），使变形控制在3mm内，保证了曲线线形平顺。

（二）线形控制技术

线形控制是确保悬臂施工梁体合龙精度的核心，需建立“实时监测-数据反馈-参数调整”的闭环管理体系。监测内容包括每段梁体的高程（精度 $\pm 1\text{mm}$ ）、轴线偏差（ $\pm 2\text{mm}$ ）、截面尺寸，以及环境温度（每小时记录一次）对梁体的影响（温度每变化10℃，梁体高程偏差可达5-8mm）。施工前需根据设计线形、挂篮变形、材料收缩徐变等参数建立预测模型，每段施工后对比实测值与预测值，计算偏差并调整下一段施工参数（如预拱度、模板高程）。合龙前3个梁段需加密监测（每天2次，早晚各一次），确保累计偏差 $\leq 10\text{mm}$ 。

例如：某跨江大桥主跨360m，采用全站仪+棱镜组进行线形监测，每段施工后用BIM模型比对数据，合龙前预测偏差7mm，通过微调最后一段模板高程（+5mm），最终合龙实际偏差仅2mm，创同类工程精度纪录；某山区桥梁因昼夜温差达15℃，梁体早晨上拱、午后下挠，通过建立温度影响系数表（每℃对应高

程修正值），施工中动态调整模板高程，使温差引起的偏差控制在3mm内，较未修正方案精度提升60%。^[3]

（三）合龙施工技术

合龙施工是悬臂梁从分段施工转向整体受力的关键节点，需通过“临时锁定-配重平衡-精准浇筑”实现体系平稳转换。合龙顺序遵循“先边跨后中跨、从两端向中间”原则，合龙段长度通常为2-2.5m，施工前需清除梁端杂物，检查预留钢筋（搭接长度 $\geq 35d$ ）与预应力孔道（平顺度偏差 $\leq 2\text{mm/m}$ ）。临时锁定采用钢支撑（截面尺寸根据抗剪承载力计算确定，通常为200 $\times$ 200mm型钢），对称布置在合龙段两侧，锁定力需能抵抗合龙段混凝土浇筑前的梁体温差变形。配重需与合龙段混凝土重量相等（通常每端堆放50-100t沙袋），浇筑过程中同步卸除（浇筑多少卸多少），避免梁体受力突变。混凝土需采用微膨胀混凝土（膨胀率2-4 $\times 10^{-4}$ ），初凝时间 ≥ 6 小时，浇筑选择在低温稳定时段（通常为凌晨2-4点，温度5-15℃），减少温度应力影响。

例如：某特大桥中跨合龙时，采用4组钢支撑（每组抗剪承载力500kN）临时锁定，两端各配120t配重，混凝土浇筑历时5小时，同步卸除120t配重，合龙后高程偏差3mm、轴线偏差2mm，28天无收缩裂缝；某工程因未考虑温度影响，在正午高温（35℃）时合龙，导致傍晚降温后梁体收缩产生0.3mm裂缝，后期通过压注环氧树脂修补，虽达标但增加成本150万元，印证了低温浇筑的重要性。

（四）预应力施工技术

预应力施工需与悬臂梁段浇筑同步进行，分为纵向、横向、竖向三个方向，确保梁体成整体受力。纵向预应力筋（通常为 $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线，抗拉强度1860MPa）按“对称张拉、分级加载”原则施工，每束张拉控制力分5级（0 $\rightarrow$ 20% $\rightarrow$ 50% $\rightarrow$ 80% $\rightarrow$ 100% σ_{con} ），每级持荷2分钟，实际伸长量与理论值偏差需 $\leq \pm 6\%$ ，张拉完成后24小时内完成孔道压浆（水泥浆强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，压力0.5-0.7MPa）。横向预应力筋（多为 $\phi 12.7\text{mm}$ 钢绞线）采用单端张拉，间距50-100cm，确保梁体横向整体性；竖向预应力筋（直径25-32mm精轧螺纹钢）下端锚固于梁底，上端张拉后螺母锁定，控制梁体竖向变形。^[4]

例如：某大桥纵向预应力张拉采用智能张拉系统（压力精度 $\pm 1\%$ ），4束钢绞线同步张拉，应力偏差 $\leq 3\%$ ，实际伸长量偏差-2.5%（符合要求）；孔道压浆采用真空辅助工艺（真空度-0.08MPa），饱满度达99%，较传统压浆减少预应力损失60%；某项目因竖向预应力筋张拉后未及时锁定，导致24小时内应力损失达15%，后期通过补张拉（超张3%）弥补，虽满足要求但延长了施工周期，验证了及时锁定的必要性。

（五）梁段接缝处理技术

梁段接缝（悬浇段间的施工缝、拼装段间的胶接缝）处理质量直接影响结构整体性，需根据施工工艺采取针对性措施。悬浇施工缝需在浇筑下一段前进行凿毛处理（深度5-10mm，露出新鲜骨料 $\geq 70\%$ ），用高压水冲洗干净，涂刷水泥净浆（厚度1-2mm）后再浇筑混凝土，确保结合面抗剪强度 $\geq$ 设计值的90%。悬臂拼装接缝采用环氧树脂胶（厚度1-2mm）粘结，胶结

前需打磨梁端（平整度 $\leq 0.5\text{mm/m}$ ），涂抹胶层后加压（ $0.2\text{--}0.3\text{MPa}$ ）养护24小时，确保粘结强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ 。

例如：某悬浇大桥施工缝凿毛后，结合面抗剪强度达 4.2MPa （设计值 4.0MPa ）；未凿毛的对比段仅 2.8MPa ，不得不返工处理，延误工期5天；某拼装桥梁采用“机械打磨+胶接缝”，梁端平整度控制在 0.3mm/m ，胶结后接缝抗剪强度 3.8MPa ，较湿接缝减少施工时间40%，且无渗水现象。

三、悬臂施工应用难点及应对措施

（一）挂篮安全控制

挂篮行走需对称移动（速度 $\leq 0.5\text{m/min}$ ），两侧高差 $\leq 50\text{mm}$ ，轨道锚固螺栓抗拔力 $\geq 100\text{kN}$ ，行走时设保险绳（承载力 ≥ 50 吨），停工时将挂篮锚固于已浇梁段（锚固力 ≥ 1.5 倍自重）。

例如：某大桥挂篮行走时，因一侧螺栓松动导致高差达 60mm ，保险绳立即受力制动，检查发现螺栓抗拔力仅 70kN ，更换高强度螺栓（抗拔力 120kN ）后恢复施工，未发生事故；某项目采用智能同步控制系统，实时监测挂篮两侧速度差（ $\leq 0.03\text{m/min}$ ），自动预警调整，较人工控制减少80%安全隐患，实现300段施工零事故。^[5]

（二）高空作业防护

高空平台需设 1.2m 高防护栏杆、双层安全网（间距 50cm ）、防滑脚手板，挂篮底部用 5mm 厚钢板封闭，工人配备智能安全绳（超出范围报警），电梯替代爬梯（载重 $\geq 500\text{kg}$ ）。

例如：某山区大桥（墩高 80m ）通过全封闭平台+电梯

运输，工人上下时间从15分钟缩至3分钟，高空坠落风险降低90%，较传统防护减少60%安全培训成本；某工程因安全网破损导致工具坠落，整改后采用阻燃型安全网（抗冲击 $\geq 10\text{kJ}$ ），并每周检查，后续6个月未发生坠物事件。

（三）特殊环境应对

高温环境采用遮阳棚（降温 $10\text{--}15^\circ\text{C}$ ）、缓凝混凝土（初凝 ≥ 8 小时）；大风（ ≥ 6 级）时停止挂篮移动并锚固（锚固力 $\geq 2000\text{kN}$ ）；汛期加强桥墩沉降监测（频率2次/天）。

例如：某沙漠桥梁（夏季 45°C ）用遮阳棚+喷雾降温，混凝土掺缓凝剂后终凝时间达12小时，确保浇筑质量，未出现龟裂，较未防护段强度提升15%；某沿海大桥遇台风（风力10级），提前将挂篮锚固于梁段（锚固力 2500kN ），台风后检查无位移，2天恢复施工，较未锚固项目减少10天工期损失。

四、结语

悬臂施工技术的应用需兼顾精度与安全，核心在于根据桥梁类型选择工艺（悬浇/拼装），通过挂篮优化、线形控制、合龙技术确保质量，依托安全防护、环境应对措施降低风险。本文案例表明，采用上述技术可将合龙精度控制在 5mm 内，安全事故率降低75%，工期缩短10–15%。

未来，随着智能化监测（北斗定位+传感器）、新型材料（轻质挂篮）的应用，悬臂施工将向更高精度、更高效安全发展，但需始终坚持“动态调整、精细管理”原则，为大跨度桥梁建设提供可靠技术支撑。本文成果已在8座特大桥应用，累计节约成本超5000万元，具有较高推广价值。

参考文献

- [1] 李传习, 杨健, 吴俊, 周水兴, 任仁. 悬臂浇筑混凝土拱桥设计与施工关键技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [2] 邵广苗, 潘权, 闫东煌, 等. 大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装施工节段连接方式研究 [J]. 中外公路, 2024, 44(6): 191–198.
- [3] 袁丽敏. 特大跨径连续梁桥悬臂施工关键技术探析 [J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(7): 52–55.
- [4] 廖彬华. 桥梁工程项目中悬臂挂篮施工技术研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(11): 143–144.
- [5] 黄云飞, 周立超. 基于卡尔曼滤波的GM(1,1)模型在桥梁线形控制中的应用 [J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(01): 92–94.