

路桥工程采用悬臂挂篮施工及应用研究

高峰

周口市市政服务中心 河南 周口 466000

摘要：随着我国交通基础设施建设向大跨径、高难度方向持续迈进，预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥等结构形式因其优异的力学性能和良好的行车舒适性而被广泛应用。悬臂挂篮施工法作为此类桥梁上部结构建造的核心技术，凭借其无需大量支架、对桥下交通干扰小、适应性强、施工精度高等显著优势，已成为跨越深谷、河流、既有交通线等复杂地形地貌条件下的首选施工方案。本文系统性地探讨了悬臂挂篮施工技术的理论基础、核心工艺流程、关键控制要点及其在现代路桥工程中的深化应用。研究首先深入剖析了挂篮的结构体系、工作原理与主要类型；其次，详细阐述了从0号块施工、挂篮拼装、标准节段循环作业到边跨与中跨合龙的全过程精细化施工技术；进而，重点论述了施工过程中线形控制、应力监控、混凝土质量保障及安全风险管理等核心环节；最后，结合智能建造的发展趋势，对悬臂挂篮施工技术的未来演进方向进行了展望。研究表明，悬臂挂篮施工不仅是成熟的工程技术，更是一个集结构力学、材料科学、测量控制与项目管理于一体的综合性系统工程，其科学应用是确保大跨径桥梁建设成功的关键。

关键词：路桥工程；悬臂挂篮；施工技术；线形控制；合龙精度

引言

对于跨越能力要求极高的场景，如深切峡谷、宽阔江河或繁忙的铁路公路枢纽，传统的满堂支架现浇或预制吊装方法往往因成本高昂、技术受限或对既有交通造成严重干扰而难以实施。在此背景下，悬臂浇筑施工法应运而生，并以其独特的技术经济优势，迅速成为大跨径预应力混凝土桥梁建设的主流工法。悬臂挂篮施工的核心思想在于“化整为零、逐段成型、自平衡推进”。它利用已建成的桥墩和初始梁段（0号块）作为支撑点，通过一套可移动的专用承重平台——挂篮，对称地向两侧逐段浇筑混凝土梁体。每完成一个节段，待其达到设计强度并施加预应力后，挂篮即向前行走至下一节段位置，如此循环往复，直至全桥合龙。这一方法巧妙地利用了桥梁自身的结构来承载施工荷载，极大地减少了对地面空间的依赖，实现了高空作业的安全化与高效化。然而，悬臂挂篮施工亦是一项高度复杂的系统工程。其成功实施不仅依赖于挂篮这一关键设备的合理设计与制造，更贯穿于从前期准备、过程控制到最终合龙的每一个细节之中。施工过程中，结构体系不断变化，受力状态极其复杂，任何微小的误差都可能在悬臂端部被放大，最终影响成桥线形与内力状态，甚至危及结构安全。因此，深入理解悬臂挂篮施工的技术内涵，掌握其全过程的质量与安全控制要点，对于推动我国桥梁建设事业向更高水平发展具有重要的理论与实践意义。

1 悬臂挂篮的结构体系与工作原理

1.1 挂篮的基本构成与功能

挂篮本质上是一个集承重、模板、操作平台于一体的多功能、可移动式施工托架。其主要由五大系统构成：承重系统、行走系统、锚固系统、模板系统和操作平台系统。承重系统是挂篮的骨架，通常由主桁架（或主梁）、横梁、前上横梁、后上横梁等组成，负责将整个挂篮的自重、模板重量、新浇混凝土重量以及施工荷载传递至已浇筑的梁段上。行走系统则使挂篮能够在完成一个节段后，平稳、准确地前移至下一个工作位置，常见的有滑道式和滚轮式两种^[1]。锚固系统是挂篮安全的生命线，通过精轧螺纹钢、锚杆等将挂篮牢固地锚定在已成梁体上，以抵抗施工过程中产生的倾覆力矩和滑移力。模板系统包括底模、侧模和内模，用于塑造新浇梁段的几何外形。操作平台系统则为钢筋绑扎、预应力管道安装、混凝土浇筑等作业提供安全、便捷的工作环境。

1.2 挂篮的主要类型与选型依据

根据承重主桁架的结构形式不同，挂篮主要可分为菱形挂篮、三角形挂篮、弓形挂篮和斜拉式挂篮等。菱形挂篮结构稳定、受力明确、整体刚度大，适用于各种跨度的桥梁，是目前应用最广泛的类型。三角形挂篮结构相对简单、自重较轻、加工方便，但其横向稳定性略逊于菱形挂篮。弓形挂篮造型优美，能有效减小风阻，但构造较为复杂。斜拉式挂篮则通过斜拉索将荷载传递至主塔或已成梁体，适用于超大跨径桥梁。挂篮的选型需综合考虑桥梁的跨度、梁段重量、施工周期、经济性、安全性以及现场制造和拼装条件等多种因素，其设计必须满足强度、刚度和稳定性三大基本要求，并留有足够

的安全储备。

1.3 悬臂施工的基本原理与流程概述

悬臂挂篮施工的基本原理是基于结构的自平衡与对称加载。施工从桥墩顶部的0号块开始,0号块作为整个悬臂施工的根基,其尺寸较大,需在墩顶设置强大的托架或支架进行浇筑。0号块完成后,将两套挂篮对称地安装在其两端。随后,进入标准节段的循环施工阶段:在挂篮上完成钢筋绑扎、预应力管道定位、模板安装、混凝土浇筑、养护、预应力张拉与孔道压浆等一系列工序。待本节段所有工作完成且混凝土强度、弹性模量达到设计要求后,解除挂篮的后锚约束,利用千斤顶或卷扬机等动力装置,驱动挂篮沿梁顶滑道同步、平稳地前移至下一节段的设计位置,重新锚固,开始新的循环。当两侧悬臂施工至接近合龙口时,需进行精确的边跨现浇段施工和最终的中跨合龙段施工,从而将分段施工的梁体连成一个完整的、连续的超静定结构。

2 悬臂挂篮施工全过程关键技术

2.1 0号块及临时固结施工技术

0号块是悬臂施工的起点和支点,其施工质量直接关系到后续所有节段的精度与安全。由于0号块体积大、钢筋和预应力管道密集、混凝土水化热高,施工难度极大。通常需要在墩身周围搭设强大的牛腿托架或落地支架作为支撑。为确保在悬臂施工初期(尤其是不平衡施工阶段)桥墩与梁体形成一个稳定的T构,防止倾覆,必须在墩梁之间设置临时固结措施。临时固结通常采用在墩顶四周布置多根大直径钢管混凝土柱或高强度硫磺砂浆锚固钢筋等方式,在合龙前承担施工期间产生的不平衡弯矩和剪力。临时固结的设计与施工是0号块阶段的关键,其拆除时机也必须精确把握。

2.2 挂篮的拼装、预压与行走控制

挂篮在0号块上的拼装是后续施工的基础。拼装必须严格按照设计图纸进行,确保各构件连接可靠、尺寸精准。拼装完成后,必须进行加载预压试验。预压的目的是消除挂篮非弹性变形(如节点间隙、焊缝压缩等),测量其弹性变形值,为后续各节段立模标高的精确计算提供依据。预压荷载通常取最大施工荷载的1.2倍,分级加载并观测变形。挂篮行走是风险较高的工序,必须严格遵循“同步、缓慢、平稳”的原则^[2]。行走前,需仔细检查滑道铺设的平整度、润滑情况以及反扣轮(或限位装置)的可靠性。行走过程中,两侧挂篮必须保持绝对同步,防止产生偏载导致结构扭转。行走到位后,须立即进行精确就位和后锚固,确保其在下一节段施工中的绝对稳固。

2.3 标准节段循环施工工艺

标准节段的施工是悬臂挂篮法的主体,其工艺流程高度标准化,但对细节控制要求极为苛刻。钢筋绑扎需保证间距均匀、保护层厚度准确;预应力管道的定位是重中之重,其坐标偏差直接影响到成桥后的预应力效果和结构内力,必须使用精密的定位网片进行固定。模板安装不仅要保证几何尺寸,更要确保接缝严密,防止漏浆。混凝土浇筑应选择在一天中温度较低且稳定的时段进行,采用分层、对称、连续浇筑的方式,以减小温度应力和不对称荷载。振捣必须充分、均匀,杜绝蜂窝、麻面等缺陷。养护工作同样不可忽视,尤其是在干燥、高温或低温环境下,必须采取覆盖、洒水或保温措施,确保混凝土强度正常发展。

2.4 合龙段施工与体系转换技术

合龙是悬臂施工的收官之战,也是技术难度最高、精度要求最严的环节。合龙的成功与否直接决定了全桥的线形和内力是否符合设计预期。合龙施工主要包括边跨合龙和中跨合龙。合龙前,必须对两侧悬臂端的高程、轴线进行连续多日的精密监测,选择在一天中温差最小、结构变形最稳定的时段(通常是后半夜)进行锁定和浇筑。合龙段的长度通常很短(1.5~2.0米),但其内部配筋和预应力管道异常密集。为抵消合龙时可能存在的微小高差和轴线偏差,常在合龙口两侧设置强大的劲性骨架进行强制锁定。合龙段混凝土宜采用早强、微膨胀、低收缩的特种混凝土,并在浇筑后加强养护^[3]。合龙完成后,即开始进行体系转换:依次拆除各墩顶的临时固结,张拉合龙束,并完成剩余的预应力钢束张拉。这一过程标志着桥梁从施工阶段的T构体系正式转换为设计要求的连续梁或连续刚构体系,是整个施工过程中力学状态最为复杂的阶段。

3 悬臂挂篮施工的核心控制要点

3.1 施工线形与高程的精密控制

悬臂施工的最大挑战在于如何确保最终成桥线形与设计线形高度吻合。由于施工过程中存在混凝土收缩徐变、预应力损失、挂篮弹性变形、日照温差、临时荷载等多种复杂因素的影响,每一节段的立模标高都不能简单地按照设计标高设置,而必须进行动态的、前瞻性的预测与调整。这依赖于一套完善的施工监控系统。该系统通过在梁体关键截面埋设应力、应变、温度传感器,并结合高精度全站仪对梁端高程和轴线进行定期测量,实时采集数据。然后,利用正装计算和倒装分析相结合的方法,建立桥梁施工过程的仿真分析模型,预测未来节段的变形趋势,并据此反算出当前节段最合理的立模

预抬值。这种“监测-分析-预测-调整”的闭环控制模式,是实现毫米级合龙精度的根本保障。

3.2 结构应力状态的实时监控

与线形控制同等重要的是对结构内部应力状态的监控。在关键截面(如0号块根部、L/4截面、合龙口附近等)埋设振弦式或光纤光栅式应变计,可以实时监测混凝土在施工各阶段(浇筑、张拉、挂篮行走、合龙等)的应力变化。通过将实测应力与理论计算值进行对比,可以及时发现异常情况,如预应力张拉不足、混凝土开裂、临时固结受力异常等,从而采取预警或纠偏措施^[4]。应力监控不仅是验证设计安全性的手段,更是优化施工方案、指导张拉顺序的重要依据,对于防止结构出现不可逆的损伤至关重要。

3.3 混凝土工程质量的全过程保障

悬臂节段的混凝土质量是桥梁百年大计的基石。从原材料进场开始,就必须严格控制水泥、骨料、外加剂等的质量。配合比设计需兼顾工作性、强度、弹模、耐久性和水化热等多重目标。在浇筑过程中,要严格控制入模温度、坍落度,并确保振捣密实。养护是保证混凝土性能发展的关键环节,尤其是在早期,必须防止水分过快蒸发导致塑性收缩裂缝。对于大体积的0号块,还需采取内部冷却水管等温控措施,防止内外温差过大产生温度裂缝。此外,预应力孔道压浆的质量也直接关系到结构的耐久性,必须确保浆体饱满、密实,无空洞。

3.4 全方位的安全风险管理

悬臂挂篮施工属于高风险的高空作业,安全风险贯穿始终。首要风险是挂篮本身的结构安全,必须确保其设计、制造、拼装、锚固和行走均符合规范要求,并定期进行检查维护。其次是高空坠落风险,所有操作平台必须设置牢固的临边防护和安全网。再次是起重吊装风险,在钢筋、模板等材料的吊运过程中,必须严格执行起重作业规程。最后是恶劣天气风险,如遇6级以上大风、暴雨、大雪等天气,必须停止一切高空作业,并对挂篮

采取加固措施。建立完善的安全管理体系,强化人员安全教育培训,是防范各类事故发生的根本。

4 结语

悬臂挂篮施工技术作为现代大跨径预应力混凝土桥梁建设的标志性工法,其成功应用是结构理论、施工工艺、材料科学与精细管理深度融合的结晶。通过对挂篮结构体系、全过程施工工艺及核心控制要点的系统研究,可以清晰地认识到,该技术远非简单的设备操作,而是一个动态、复杂、多变量耦合的系统工程。其中,以施工监控为核心的线形与应力双控体系,是确保桥梁成桥状态符合设计意图的灵魂所在;而对混凝土质量和安全风险的全过程、全方位管控,则是工程实体质量和人员生命安全的根本保障。展望未来,随着智能传感、物联网、大数据和人工智能等新一代信息技术的飞速发展,悬臂挂篮施工技术正朝着智能化、数字化的方向演进。例如,开发具备自感知、自诊断、自适应能力的“智能挂篮”,利用BIM+GIS技术构建全生命周期的数字孪生模型,实现施工过程的虚拟预演与实时纠偏,都将极大地提升施工的精度、效率与安全性。然而,无论技术如何革新,对结构力学原理的深刻理解、对施工细节的极致追求以及对工程质量的敬畏之心,始终是每一位桥梁建设者不可或缺的核心素养。唯有如此,才能在崇山峻岭与大江大河之上,铸就一座座经得起历史检验的丰碑。

参考文献

- [1]胡行.悬臂挂篮桥梁施工技术应用探讨[J].散装水泥,2026,(04):104-106.
- [2]陈杰.路桥工程采用悬臂挂篮技术的施工效果[J].黑龙江交通科技,2021,44(09):91-92.
- [3]王勇.路桥工程采用悬臂挂篮技术的施工效果[J].运输经理世界,2021,(04):92-93.
- [4]林康.高速预应力桥梁悬臂挂篮施工关键技术的应用[J].汽车画刊,2026,(03):116-118.