

桥梁施工期临时结构（支架、挂篮）安全性评估与轻量化设计

马 岩

郑州路桥建设投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：本文系统梳理了支架与挂篮在桥梁施工中的典型应用形式与受力特点，深入分析了影响其安全性的关键因素，包括材料性能退化、施工荷载不确定性、风荷载作用及地基沉降等。在此基础上，介绍了安全性评估方法体系。针对轻量化设计需求，提出了以高性能材料应用、拓扑优化、模块化标准化设计及智能感知技术集成为核心的综合轻量化路径。研究表明，安全性评估与轻量化设计并非对立目标，而是可通过精细化设计与智能技术实现协同优化，为推动桥梁施工临时结构向更安全、更经济、更绿色的方向发展提供理论支撑与实践指导。

关键词：桥梁施工；临时结构；支架；挂篮；安全性评估；轻量化设计；可靠性分析；拓扑优化

引言

我国交通基建发展迅猛，大跨径等复杂桥梁工程增多，支架法等施工工艺广泛应用，支架和挂篮作为核心临时承重结构至关重要，需承受多重作用，在动态环境中保持性能。但近年来多起桥梁施工安全事故，暴露出临时结构在设计、制造、安装及使用环节问题诸多。原因一是重视程度不足，将其视为“一次性”或“辅助性”设施，设计标准低、验算不充分；二是传统设计理念保守，造成资源浪费、结构自重大，增加失稳风险。在此背景下，科学精准评估临时结构安全性并有效轻量化设计，是桥梁工程领域关键问题。轻量化是在确保安全裕度前提下，实现结构性能与资源消耗最优平衡，契合绿色建筑要求，也是提升建造水平的重要途径。本文将探讨临时结构安全性评估方法与轻量化设计策略，提供理论依据和技术参考。

1 桥梁施工临时结构概述

1.1 支架系统

支架主要用于现浇梁桥、拱桥等结构的施工，为混凝土浇筑提供稳定的作业平台和支撑。根据构造形式，主要分为满堂支架、梁柱式支架和移动模架等。满堂支架由大量立杆、横杆、剪刀撑等组成的空间网格体系，适用于地基条件较好、桥墩较低的场合。其整体性强，能够均匀传递荷载，但用钢量大、搭拆耗时，在软弱地基或高墩条件下经济性和安全性均面临挑战。相比之下，梁柱式支架通过在桥墩或地面上设置立柱，再在立柱上架设主梁（如贝雷梁、工字钢等），形成承载平台，能有效跨越障碍物，适用于高墩或软弱地基区域，材料利用率相对较高，且便于局部调整。而移动模架则

是一种集模板、支撑、行走于一体的大型专用设备，可在已完成的桥跨上自行前移，实现逐孔现浇，其自动化程度高、施工效率高，但初始投资巨大，通常仅用于大规模标准化桥梁项目。

1.2 挂篮系统

挂篮是悬臂浇筑法施工连续梁桥、斜拉桥主梁的核心设备。它悬挂在已浇筑的梁段上，承担新浇筑节段的全部重量，并能沿桥梁纵向行走。典型的挂篮由承重系统、行走系统、锚固系统、模板系统和工作平台等部分构成。其中，承重系统（包括主桁架、前后横梁）是挂篮的主要受力骨架，其构型（如三角形、菱形）直接影响整体刚度与稳定性；行走系统需保证挂篮在梁顶平稳、同步前移，避免偏载；锚固系统则通过精轧螺纹钢或预应力束将挂篮牢固锚固于已成梁段，是抵抗倾覆力矩的关键；模板系统负责混凝土成型，其精度直接影响桥梁线形；工作平台则为施工人员提供安全操作空间^[1]。挂篮的设计必须综合考虑最大悬臂状态下的抗倾覆稳定性、主桁架的强度与刚度、以及行走过程中的动力响应，任何环节的失效都可能导致灾难性后果。

2 临时结构安全性评估的关键因素与方法

2.1 主要风险源分析

桥梁施工期临时结构的安全性受多重不确定性因素耦合作用，其失效往往是多种风险叠加演化的结果。为系统识别并管控这些风险，有必要从材料、荷载、边界条件及施工过程四个维度进行深入剖析。

2.1.1 材料性能退化与缺陷

临时结构多采用周转性钢材（如钢管、型钢、贝雷片等），在多次拆装、运输、露天存放及恶劣环境作用

下,其力学性能不可避免地发生退化。最典型的表现是表面锈蚀与局部腐蚀,这不仅削弱构件有效截面,还可能诱发应力集中,加速疲劳裂纹萌生。此外,焊接节点在反复荷载或冲击作用下易出现微裂纹、未熔合等制造或使用缺陷;部分老旧构件还可能存在初始几何 imperfection(如杆件初弯曲、节点偏心),这些都会显著降低其实际承载力和稳定性。然而,现行设计规范通常基于新材性能取值,对材料性能随使用次数和环境劣化的折减缺乏量化标准,导致结构实际安全储备被高估。

2.1.2 荷载作用的随机性与非线性

临时结构所承受的荷载具有高度复杂性和不确定性。永久荷载(如结构自重、模板重量)虽可计算,但因制造误差、材料密度波动等因素,实际值常与理论值存在偏差。施工活载则更具随机性——人员、机具、小型设备及临时堆载的位置、数量和持续时间难以精确预控,极易形成局部超载或偏心加载工况。更关键的是环境荷载,尤其是风荷载。对于高墩支架或悬臂状态下的挂篮,其迎风面积大、重心高,对风极为敏感^[2]。风荷载不仅具有静力效应,其脉动成分还可能激发结构共振,产生显著的动力放大效应。极端天气(如突发阵风、台风)虽概率低,但一旦发生,往往造成灾难性后果。此外,温度变化引起的热胀冷缩会在超静定结构中产生附加内力,若设计未充分考虑,也可能成为安全隐患。

2.1.3 边界条件的不确定性

临时结构的力学行为对其支承边界极为敏感,而边界条件恰恰是最难精确确定的环节之一。对于支架系统,立柱底部的地基承载力和沉降特性是核心变量。尤其在软土、回填土或岩溶发育地区,地质勘察的离散性、地下水位波动及施工降水扰动,均会导致地基实际性能与勘察报告存在较大出入。不均匀沉降会迅速改变支架各立柱的受力分配,引发附加弯矩甚至失稳。对于挂篮系统,其后锚固体系是抵抗倾覆的关键。后锚点通常通过精轧螺纹钢或预应力束锚固于已浇筑梁段混凝土中。然而,在长期持荷或温度变化下,预应力可能松弛;混凝土在局部高应力区可能发生微裂缝或压碎;锚具本身也可能存在滑移。这些因素共同作用,使得锚固刚度与设计值产生偏差,严重削弱挂篮的抗倾覆能力。

2.1.4 施工过程中的人为与管理因素

再完善的设计也需通过施工来实现,而施工过程本身充满人为与管理不确定性。混凝土浇筑顺序不当(如不对称浇筑)、浇筑速度过快、振捣不均等操作,会使结构受力状态严重偏离设计假定的对称、分级加载工况,导致局部应力骤增。工人安全意识不足、违规拆除

支撑或擅自更改施工方案,更是直接触发事故的常见原因。此外,项目管理层面的缺陷,如技术交底不清、监测预警机制缺失、应急预案流于形式等,也会放大前述各类技术风险。因此,施工过程不仅是荷载施加的过程,更是风险暴露与放大的关键阶段,必须将其纳入安全性评估的整体框架之中。

2.2 安全性评估方法体系

传统的安全性评估主要基于容许应力法或单一安全系数法,其局限性在于无法量化各种不确定性的影响。现代评估方法趋向于采用更为科学的概率可靠度理论。

2.2.1 基于极限状态的确定性评估

这是目前工程中最常用的方法。根据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)等标准,对临时结构进行承载能力极限状态(强度、稳定)和正常使用极限状态(变形、振动)的验算。通过引入分项安全系数(如荷载放大系数、材料强度折减系数)来覆盖不确定性。

2.2.2 基于可靠度理论的概率评估

将荷载效应 S 和结构抗力 R 均视为随机变量,结构失效概率 $P_f = P(R < S)$ 。通过一次二阶矩法(FOSM)、蒙特卡洛模拟(MCS)等方法计算可靠度指标 β ($\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$)。这种方法能更真实地反映结构的安全水平,为风险决策提供量化依据。例如,可以评估不同风速重现期下挂篮的倾覆失效概率。

2.2.3 数值模拟与现场监测融合的动态评估

利用ANSYS、MIDAS/Civil等有限元软件建立精细化模型,模拟施工全过程,分析最不利工况下的应力、变形和稳定性。尤其对于复杂节点和非线性行为(如材料塑性、几何大变形)的分析具有优势。在关键部位(如支架立柱、挂篮主桁架、后锚点)布设应变计、位移计、倾角仪、风速仪等传感器,实时采集结构响应数据。将监测数据反馈至数值模型,进行模型修正(Model Updating),使其更贴近真实结构状态。基于修正后的模型进行剩余寿命预测和预警,实现从“静态验算”到“动态感知”的转变。

3 轻量化设计的核心策略

3.1 高性能材料的应用

材料革新是轻量化的根本驱动力。传统临时结构多采用Q235或Q345普通碳素钢,其强度潜力未被充分利用。转向更高强度级别的低合金高强度结构钢(如Q420、Q460)可显著减小构件截面尺寸,在同等承载力下大幅降低自重。例如,Q420钢的屈服强度较Q345提高约22%,若合理设计,可实现15%以上的减重效果。对于非主要承重但对自重敏感的部件,如挂篮的模板系统、

工作平台护栏等, 铝合金因其密度仅为钢材的三分之一且耐腐蚀性优异, 成为理想替代材料^[3]。尽管其弹性模量较低, 需通过合理构造弥补刚度不足, 但其轻质优势在高空作业中尤为突出。此外, 纤维增强聚合物 (FRP) 等复合材料凭借高比强度、高比模量及绝缘耐腐特性, 在特定连接件、临时拉索或特殊模板中有探索应用价值, 虽然当前成本较高限制了大规模推广, 但其在极端环境或特殊功能需求场景下的潜力值得关注。

3.2 先进结构优化技术

轻量化不能仅依赖材料升级, 更需通过先进设计方法挖掘结构内在效率。拓扑优化为此提供了强大工具。该方法在给定的设计域、边界条件及荷载工况下, 通过数学算法 (如SIMP法) 自动寻找最优材料分布, 生成高效传力路径, 去除低应力区冗余材料。对于挂篮主桁架这类复杂空间框架, 拓扑优化可突破传统经验构型的局限, 生成仿生或有机形态的轻质高强结构, 其力学效率远超常规设计。在拓扑优化确定宏观构型后, 还需进行尺寸与形状优化, 对杆件截面参数 (直径、壁厚) 及节点几何细节进行精细调整, 以兼顾制造可行性、成本控制与性能目标。与此同时, 模块化与标准化设计是实现轻量化工程落地的关键。将支架或挂篮分解为若干功能明确、接口统一的标准模块 (如标准节立柱、通用桁架单元、快装节点), 不仅便于工厂预制、质量控制和现场快速拼装, 缩短工期, 更能通过规模化生产降低成本。更重要的是, 标准化模块经过反复验证, 其力学性能与安全边界更为清晰可靠, 有助于提升整体系统的安全性及可预测性, 形成“轻量化—标准化—高可靠”的良性循环。

3.3 智能化与信息化赋能

轻量化设计的实施离不开智能化与信息化技术的深度赋能。建筑信息模型 (BIM) 技术贯穿设计、制造与施工全过程。在设计阶段, 三维协同BIM模型可直观展示结构细节, 提前发现并解决各专业间的空间冲突, 优化施工方案; 在施工阶段, BIM模型作为信息集成平台, 可关联材料属性、构件编码、施工进度及监测数据, 实现

临时结构的全生命周期数字化管理。更进一步, 智能感知与预警系统将轻量化结构置于实时监控之下。通过在关键受力部位部署应变计、位移计、倾角仪、风速风向仪等传感器, 并依托物联网 (IoT) 技术构建传感网络, 可连续获取结构健康状态数据^[4]。结合边缘计算与云平台, 系统能自动分析数据趋势, 当监测值逼近或超过预设安全阈值时, 立即触发分级预警机制 (如黄色预警提示加强巡查, 红色预警强制停工撤离), 将安全管理由被动响应转变为主动预防。这种“感知—分析—决策—执行”的闭环, 不仅保障了轻量化结构的安全运行, 也为后续设计优化积累了宝贵数据。

4 结语

本文聚焦桥梁施工期临时结构的安全性评估与轻量化设计展开系统探讨。研究指出, 安全性是轻量化前提, 要摒弃“临时即次要”观念, 运用融合极限状态理论等多种方法的综合评估框架, 对临时结构全生命周期动态管控。轻量化是系统工程, 依赖高性能材料、先进算法、模块化理念及智能信息技术融合, 单一改进难有突破。且安全性与轻量化并非对立, 科学轻量化设计可提升结构稳定性与动力性能, 减轻自重降低地基要求和风荷载效应, 二者协同增效。展望未来, 临时结构将向智能化、绿色化、一体化演进, 人工智能融入健康诊断与风险决策, 新型材料广泛应用, 设计协同加强, 探索“临时转永久”模式。推动其发展体现工程进步, 践行“人民至上”理念, 意义深远。

参考文献

- [1]张宝刚.桥梁工程中挂篮施工安全管理[J].散装水泥,2025,(04):211-213.
- [2]史超.桥梁悬臂挂篮施工安全监理要点[J].中国建筑金属结构,2025,24(06):163-165.
- [3]邓万军,金秀男.公路桥梁悬臂浇筑挂篮系统轻量化研究[J].公路,2025,70(02):183-190.
- [4]戴健.高速桥梁大悬臂盖梁支架体系力学性能研究[J].中国水运,2025,(14):115-117.