

# 大跨度桥梁悬索施工技术的应用与发展趋势

马文豪

湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430051

**[摘要]** 大跨度悬索桥凭借卓越的跨越能力和灵活的结构, 在许多重要交通项目中得到了广泛应用, 尤其在长江、尼罗河等大水域的桥梁建设中占据着关键位置。这类桥梁的施工不仅涉及高空作业、精确的钢索张拉与测量, 而且施工过程中常常受到环境条件的限制。随着桥梁规模的不断增大, 施工环境的复杂性也日益提升, 传统的施工技术已无法满足现代工程的需求, 因此, 新技术的引入已成为一种必然趋势。

**[关键词]** 大跨度桥梁; 悬索施工技术; 发展趋势

DOI: 10.33142/sca.v8i2.15468

中图分类号: U445

文献标识码: A

## Application and Development Trend of Suspension Construction Technology for Large Span Bridges

MA Wenhao

Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430051, China

**Abstract:** Large span suspension bridges have been widely used in many important transportation projects due to their excellent spanning capacity and flexible structure, especially occupying a key position in bridge construction in large water bodies such as the Yangtze River and Nile River. The construction of such bridges not only involves high-altitude operations, precise steel cable tensioning and measurement, but the construction process is often limited by environmental conditions. With the continuous increase of bridge scale and the increasing complexity of construction environment, traditional construction techniques can no longer meet the needs of modern engineering. Therefore, the introduction of new technologies has become an inevitable trend.

**Keywords:** large span bridges; suspension construction technology; development trend

### 引言

大跨度悬索桥作为跨越复杂地形的重要交通枢纽, 广泛应用于连接江河、深谷等特殊地理环境, 独特的结构特点与施工要求使得索桥的建设面临诸多挑战。随着交通需求的不断增长, 传统施工技术已难以满足现代工程对于高效、安全与精确的要求, 这一现实促使了新型施工技术的不断发展, 分析大跨度悬索桥施工技术的应用现状、关键技术要点及未来发展趋势, 为未来桥梁建设提供理论依据与技术支持。

### 1 大跨度桥梁悬索施工技术的重要性

#### 1.1 促进现代交通发展

大跨度悬索桥在现代交通建设中占据着至关重要的位置。随着城市化进程的加快及全球化的不断推进, 传统的桥梁建设方法已无法满足日益增长的交通需求。凭借独特的结构优势与卓越的承载能力, 悬索桥成为跨越江河、峡谷等复杂地形的理想解决方案, 尤其在跨越广阔水域或面对特殊地理条件时, 能够实现巨大的跨度缓解交通瓶颈, 提升道路的通行能力与效率, 不仅缩短了区域之间的时空距离, 大跨度悬索桥的建设还显著推动了区域经济一体化的进程。例如, 悬索桥为港口、工业园区与旅游景区等地的互联互通提供了关键支持, 促进了物流、人员流动及资

源共享的高效运转。对国家或地区而言, 悬索桥的建设不仅有助于提升综合交通枢纽的功能, 更加深了区域间的经济互动。推动大跨度悬索桥施工技术的进步与应用, 不仅符合现代交通发展的需求, 也为提升国家竞争力及推动区域协同发展发挥着关键作用。

#### 1.2 适应复杂地理环境

大跨度桥梁悬索施工技术在应对复杂地理环境方面展现出独特的优势。许多桥梁建设项目需要跨越广阔的水域、深峡谷或险峻山脉, 而传统的桥梁结构常常难以满足这些特殊环境下的跨度、稳定性或承载力要求。凭借独特的索结构, 悬索桥能够轻松跨越长距离, 克服地理障碍连接被隔离的区域。例如, 在跨越深河或峡谷时, 悬索桥提供的稳定结构依赖极少的支撑, 不仅有效减少对地形的依赖同时降低了建设成本。悬索桥还具备极强的适应性, 能够应对多变的气候与地质条件, 在强风或地震频发的海域及山区, 悬索桥的结构具有出色的抗风与抗震能力, 能够有效抵御极端天气与地震的威胁。对于复杂的岩土条件, 悬索桥的施工技术同样表现出灵活性, 根据具体情况调整施工方案, 确保桥梁的稳固性与安全性。借助先进的施工技术, 悬索桥不仅能在常规地理环境中顺利建成, 更能在复杂地理条件下保证其耐久性与长期稳定运行, 悬索桥技

术的广泛应用,已成为解决复杂地理环境中交通连接问题的重要工具。

## 2 大跨度桥梁悬索施工技术要点

### 2.1 悬索桥的结构特征与施工流程

悬索桥的独特结构特点,使其在大跨度桥梁建设中占据重要地位。悬索桥主要由桥塔、桥面及悬挂的钢索构成,桥面与桥塔之间的巨大跨度依赖钢索来承载,核心结构为悬挂在桥塔上的主缆,主缆承受着桥面上的交通荷载,并通过多个吊索将桥面稳固连接,通过主缆所施加的张力悬索桥得以跨越广阔空域,避免了中间支撑的过多使用,使它在跨越河流、峡谷等复杂地形时具有无可比拟的优势。施工的第一步是桥塔基础的建设,通常采用打桩或加固的方式确保塔身的稳定性,随后的关键步骤是主缆的架设,主缆通常通过逐步吊装或滑移法从一端拉至另一端。缆索的张力控制在此过程中至关重要,必须确保张力均匀以保持桥梁的结构平衡。在此基础上,吊索与桥面钢梁逐步连接,桥面最终成型。最后,通过张拉钢索并精确调整张力,确保桥梁的承载能力与稳定性达到设计要求。悬索桥的施工过程技术要求极为严格,每一个环节都涉及精密测量与质量控制。施工过程中,各项工序需要高度协作,任何细小的疏忽都可能影响桥梁的安全性及使用寿命。为了确保施工质量,悬索桥的建造通常依赖于详尽的规划、先进的设备以及经验丰富的技术团队的共同努力,以确保各项工序得以顺利进行,从而完成一座高性能的大跨度桥梁。

### 2.2 钢索架设与张拉技术

钢索的架设与张拉是悬索桥施工中的关键技术环节,直接影响着桥梁的结构安全与稳定性。钢索的架设通常分为多个阶段,初步步骤是通过滑车系统或吊装设备将主缆从一端传递至另一端,考虑到悬索桥的巨大跨度,钢索的布置与拉伸要求极为精确,每根钢索的张力必须均匀分布,任何张力的不均衡都会导致桥梁结构的变形从而影响整体稳定性。完成钢索的架设后,张拉过程成为确保桥梁稳定性的核心环节,通过专用的张拉设备钢索逐步被拉紧,以实现设计要求的承载能力。在此过程中,精确的张拉控制至关重要,确保张力的准确性,施工过程中通常会使用电子张力计和激光测量系统进行实时监控与调整,确保每根钢索的张力符合标准要求,张拉操作必须严格遵循设计步骤,以避免因过度张拉或张力不均而带来的结构安全隐患。钢索张拉不仅涉及力学操作,还需要考虑施工环境的多重因素。外部气候条件如风速和温度,都会对钢索的拉力产生影响。因此,施工人员必须密切关注气候变化并灵活调整张拉方案。在实际操作中,钢索张拉通常是分阶段进行的,每个阶段的张拉力度都需经过精确计算与调整,防止过度变形或损坏从而确保桥梁在施工过程中的稳定性与安全。

### 2.3 张力控制与精确测量

张力控制与精确测量在悬索桥施工中占据至关重要

的位置,直接关系到桥梁的安全性及使用寿命。桥梁的稳定性受到钢索张力的直接影响,任何张力不均或控制不当,都会显著影响桥梁结构的完整性,精确的张力控制不仅要求对每根钢索进行独立调节,还需要确保主缆与吊索之间的协同配合以实现整体结构的平衡与稳定。在施工过程中,张力的精确控制依赖于一系列技术手段,电子张力计与激光测量系统作为常用的精密设备,能够实时监测每根钢索的拉力变化,确保每个阶段的张力调整精确无误,通过数据采集与反馈系统,施工人员能够实时获得钢索的张力数据并据此做出微调,这种细致入微的控制方式有效避免了张力过高或过低所带来的结构安全隐患。环境条件同样是影响张力控制的重要因素,温度波动、风速变化及湿度等自然因素,都会对钢索的伸缩性产生影响进而影响张力的稳定性,施工团队必须根据实时气象数据及时调整张力控制方案,确保在不同气候条件下,钢索的张力保持在最佳状态。为了实现最佳的张力效果,张拉过程通常分为多个阶段,每个阶段的张力值均经过精确计算与验证,确保张力过渡平稳,并避免对桥梁结构施加过大的压力。

### 2.4 施工过程中的质量控制与安全保障

在大跨度悬索桥施工中,质量控制与安全保障是确保项目顺利进行及桥梁长期稳定运营的核心环节。施工质量的把控贯穿整个建造过程,从原材料的选择到每个施工环节的执行,都必须严格遵循设计要求与技术规范。特别是桥梁的核心结构部件,如钢索、桥塔与吊索必须经过严格的质量检测与实验,确保在施工过程中的强度与稳定性,为了实现这一目标,通常采用高精度的检测仪器进行实时监控,确保每个结构部件都能达到设计标准。大跨度悬索桥的建设涉及高空作业、重型机械操作等高风险因素,安全管理在施工现场必须严格执行,施工人员应经过专业培训,以应对各种可能发生的突发情况。同时,对环境条件的评估也至关重要,风速、温度等外部因素的变化必须得到实时监控,避免在不适宜的天气条件下进行关键施工工作。为了进一步保障安全,现场还会部署现代化监控设备,如实时视频监控与传感器系统,全天候监控施工现场,及时发现潜在的安全隐患,并迅速采取应急应对措施。为确保质量与安全得到双重保障,施工团队会在每一个重要环节或阶段完成后,进行全面的检查与验收。

## 3 大跨度桥梁悬索施工技术的发展趋势

### 3.1 新型材料与施工设备的应用

随着科技的不断发展,大跨度悬索桥施工技术正朝着更高效、安全的方向不断迈进。新型材料与先进施工设备的应用,推动了这一领域的技术革新,近年来轻质高强度钢索与高性能混凝土等新型材料的问世,为桥梁结构优化提供了更多的选择,这些材料不仅在强度上超越了传统材料,还能显著减轻桥梁的自重,同时具备更强的耐腐蚀性与抗老化能力,从而显著延长桥梁的使用寿命。例如,耐

疲劳的高强钢丝绳替代传统钢索,不仅能够更长时间内保持稳定的张力,还有效地降低了桥梁的维护成本<sup>[1]</sup>。在施工设备方面,自动化与智能化技术的引入,极大地提升了施工精度与效率,数字化控制的张拉设备与自动化架设机械,使钢索张力的控制更加精确,从而最大程度地减少了人为误差。在施工环境日益复杂的情况下,采用高空作业平台、无人机以及智能机器人等先进设备,能够有效协助施工团队完成危险或难以到达区域的工作,确保施工的安全性与高效性。同时,激光测量与三维建模技术的应用,使施工方案的精度得到了显著提升,从而避免了因结构误差可能带来的风险。通过这些先进技术的应用,大跨度悬索桥施工的精度与效率得到了前所未有的提升,推动了桥梁建设技术的发展,为未来更加安全、环保的桥梁建设奠定了坚实的基础。

### 3.2 数字化与自动化技术的引入

数字化与自动化技术的引入,正深刻改变着大跨度悬索桥的施工模式,显著提升了施工精度、效率与安全性。借助数字化技术,工程师能够通过三维建模与建筑信息模型(BIM)对桥梁进行精确设计与模拟,从而预测并解决施工过程中可能出现的问题。例如,在设计阶段,BIM技术能够帮助团队精确计算所需材料、优化施工方案,并通过虚拟现实(VR)技术进行施工演练,进而降低设计与施工过程中错误的发生概率。在施工阶段,所有数据均通过数字化方式进行实时监控,施工进度、材料使用、设备运行等信息得以清晰呈现,大大提高了项目管理的透明度与协作效率<sup>[2]</sup>。在施工过程中,自动化技术的应用也发挥了至关重要的作用,以钢索架设与张拉为例,自动化设备能够精确调控钢索的张力与位置,显著降低了人工操作失误的风险。全自动施工机械的引入,能够替代人工完成繁重且危险的作业,特别是在高空及复杂地形中,极大提升了施工的安全性,通过无人机进行空中监控,施工团队得以实时获取高精度现场数据,确保施工进度与质量始终处于可控范围内。数字化与自动化技术的结合,进一步推动了施工各环节的协同运作,确保信息流的高效传递与处理。例如,施工管理系统能够实时收集并分析来自各方的数据,从而精确预测并调整施工进度与设备使用情况,确保项目能够按时按质地完成。

### 3.3 智能化施工与实时监控技术的创新

智能化施工与实时监控技术的创新,正为大跨度悬索桥建设提供更为高效与精确的施工保障,这些技术不仅显著提高了施工过程的自动化水平,还增强了对各项施工数

据的实时采集与分析能力,从而在提升施工质量的同时也加强了安全管理。智能化施工的应用,主要体现在自动化设备与机器人技术的使用上,对于悬索桥建设而言,高空作业与精细操作通常需要大量人工干预,而智能化设备的引入,诸如自动化钢索张拉系统和机器人焊接设备,能够代替人工完成那些高精度和高风险的任务<sup>[3]</sup>。这些技术不仅提高了施工效率,还有效减少了人为错误与安全事故的发生。例如,在钢索架设过程中,智能吊装系统能够实现全自动操作,通过实时反馈调整吊装的角度与力度,确保每一环节都精准到位。实时监控技术的引入,使施工管理变得更加精细与透明,通过传感器、物联网及大数据分析,施工现场的各类数据得以实时上传并进行监控。关键参数如温度、湿度、钢索张力与风速等,均可通过智能传感器实时采集并传送至中央控制系统,施工团队可以根据这些实时数据及时调整施工方案,规避潜在的风险。此外,无人机与视频监控技术的结合,进一步提升了对施工现场安全隐患的预警能力,施工人员能够远程监控高危区域,有效保障人员的安全。值得注意的是实时数据的应用不仅限于施工阶段,它同样为桥梁后期的运营与维护提供了宝贵的数据支持。通过对施工阶段与运营阶段数据的比对分析,运营团队能够制定更为科学的养护计划,提前发现结构性问题,进而延长桥梁的使用寿命。

## 4 结语

大跨度悬索桥施工技术的不断进步,显著提升了桥梁建设的效率、智能化水平与安全性。新型材料、先进施工设备以及数字化和自动化技术的广泛应用,优化了施工精度与质量控制,从而确保了项目的顺利推进。智能化施工技术 with 实时监控系统的引入,不仅提高了施工过程的整体效率,而且为桥梁的长期运行与后期维护提供了宝贵的数据支持。随着技术的持续创新,悬索桥施工将在未来变得更加高效、环保与智能化。

### [参考文献]

- [1]毛伟琦,胡雄伟.中国大跨度桥梁最新进展与展望[J].桥梁建设,2020,50(1):13-19.
- [2]莫嘉俊.跨越大跨度桥梁的结构设计及施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(31):187-189.
- [3]江启军.大跨度桥梁设计关键点及优化措施研究[J].工程技术研究,2020,5(3):228-229.

作者简介:马文豪(1982.8—),男,现任职称路桥中级,籍贯:江苏涟水县。