索斜拉桥在市政道路中的设计与施工方法探讨

王　阳
四川中新海川建设有限公司　四川　绵阳　622650

摘　要：斜拉桥以其跨越能力强、结构轻盈、造型优美等优势，在现代市政道路建设中扮演着日益重要的角色，尤其适用于跨越宽阔河流、深谷或城市主干道等场景。本文系统探讨了斜拉桥在市政道路工程中的设计与施工关键技术。在设计方面，深入剖析了结构体系选型（如半漂浮体系）、主梁截面形式（预应力混凝土箱梁、钢-混组合梁）、索塔构造及斜拉索布置等核心要素，并强调了基于《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01—2020）的精细化分析。在施工方面，详细阐述了索塔的爬模法与劲性骨架法、主梁的悬臂浇筑与悬臂拼装工艺、以及斜拉索的冷铸锚安装与分级张拉技术等关键工序。文章探讨了BIM技术在协同设计、碰撞检测和施工模拟中的赋能作用，并对市政斜拉桥未来向智能化、装配化发展的趋势进行了展望。研究表明，通过科学的设计选型与精细化的施工控制，斜拉桥能够完美契合市政工程对功能、安全、经济与美学的综合要求。

关键词：市政道路；斜拉桥；结构设计；悬臂施工；斜拉索；BIM技术

引言

随着我国城市化进程的不断深化，城市交通网络日益复杂，对桥梁工程提出了更高的要求。传统的梁桥、拱桥在面对宽阔水域、繁忙交通走廊或复杂地形时，往往显得力不从心。在此背景下，斜拉桥作为一种高效、经济且极具视觉冲击力的现代桥型，凭借其卓越的跨越能力、良好的结构性能和优美的建筑造型，越来越多地被应用于市政道路的关键节点工程中。从连接城市新区与老城的跨江大桥，到疏导城市核心区交通的立交枢纽，斜拉桥已成为展现城市现代化形象的重要地标。然而，斜拉桥结构体系复杂，涉及索、塔、梁三者的高度协同受力，其设计与施工技术难度远高于常规桥梁。尤其是在空间受限、环境敏感、交通组织复杂的市政环境中，如何确保斜拉桥的安全性、耐久性与经济性，并最大限度减少施工对城市正常运转的干扰，是摆在工程技术人员面前的重大挑战。交通运输部发布的《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01—2020）为斜拉桥的设计提供了权威的技术依据，而成熟的悬臂施工、非开挖基础等工法则为复杂环境下的建造提供了可能。本文旨在系统梳理斜拉桥在市政道路工程中的设计逻辑与施工路径，深入探讨各关键环节的技术细节，以期为同类工程的规划与建设提供有益的参考。

1 市政斜拉桥的设计要点与体系选型

斜拉桥的设计是一个多目标优化的过程，需在满足结构安全的前提下，兼顾经济性、施工可行性、后期维护便利性以及城市景观美学。其设计核心在于合理选择结构体系，并对索、塔、梁三大构件进行精细化设计。

1.1 结构体系的合理选择

斜拉桥根据塔、梁、墩之间的约束关系，主要可分为四种基本体系：漂浮体系、半漂浮体系、塔梁固结体系和刚构体系。对于市政道路工程而言，半漂浮体系因其优异的综合性能而成为最常用的选择。（1）半漂浮体系：主梁在桥塔处通过竖向支座支撑，但顺桥向可自由活动，并辅以高阻尼橡胶支座或油压阻尼器来耗散地震或风荷载能量。这种体系能有效释放温度变化、混凝土收缩徐变引起的次内力，减小主梁和索塔的受力，同时保证了结构的整体稳定性。其抗震性能优越，特别适合于地震区的市政桥梁[1]。（2）塔梁固结体系：将主梁与索塔刚性连接，形成一个整体的门式刚架。该体系主梁的负弯矩峰值较大，但结构整体刚度大，抗风稳定性好。通常用于跨度相对较小、对主梁高度有严格限制的市政立交桥。相比之下，全漂浮体系对支座和阻尼器的依赖性过高，而刚构体系则因巨大的基础反力和复杂的受力状态，在市政工程中应用较少。因此，设计初期应结合桥梁跨度、地质条件、抗震设防烈度及景观要求，审慎选择最合适的结构体系。

1.2 主梁与索塔的精细化设计

1.2.1 主梁截面形式

市政斜拉桥的主梁设计需平衡结构效率、施工便捷性与经济成本。常见的截面形式包括：（1）预应力混凝土箱梁：这是中小跨度市政斜拉桥的主流选择。其优点是刚度大、抗扭性能好、养护成本低，且与城市环境协调性高。设计时需重点考虑箱梁的顶板、底板厚度，腹板的倾斜角度及预应力钢束的合理布置，以抵抗由斜拉

索集中力引起的局部应力和主梁的整体弯矩、剪力。（2）钢-混凝土组合梁：在大跨度或对结构自重敏感的市政桥梁中应用广泛。钢结构部分（通常为开口或闭口钢箱）负责承担施工阶段的全部荷载，成桥后与混凝土桥面板通过剪力钉共同工作。这种形式充分发挥了钢材抗拉和混凝土抗压的优势，显著减轻了结构自重，从而降低了对索塔和基础的要求，但其制造、架设精度要求高，且后期防腐维护成本较高。

1.2.2 索塔构造设计

索塔是斜拉桥的“脊梁”，主要承受巨大的轴向压力和由不对称索力引起的弯矩。市政斜拉桥的索塔多采用钢筋混凝土结构，其外形常被赋予强烈的美学意义（如H形、A形、倒Y形）。设计的关键在于：（1）锚固区设计：索塔上部的拉索锚固区是应力高度集中的部位。根据《公路斜拉桥设计规范》，必须采用精细化的有限元模型（如实体单元）进行局部分析，并配置足够的间接钢筋（如井字形箍筋、螺旋筋）来约束混凝土，防止开裂。对于大吨位拉索，常采用钢锚箱或鞍座式锚固构造，将集中力有效扩散至塔柱截面。（2）横梁设置：对于高耸的索塔，通常在塔柱中部或下部设置横梁，以增强塔柱的整体稳定性和抗扭刚度，并为施工提供平台。

1.3 斜拉索系统的参数化设计

斜拉索是斜拉桥的“生命线”，其设计直接影响桥梁的刚度、动力特性和经济性。设计过程主要包括：（1）索面与索距布置：市政斜拉桥多采用双索面布置，以保证主梁的抗扭稳定性。索距（即相邻拉索在主梁上的间距）是关键参数，一般为6-12米。较小的索距能更有效地减小主梁弯矩，但会增加索塔上的锚固点数量和施工复杂性[2]。（2）拉索规格与防护：拉索通常采用高强度平行钢丝束（如1770MPa或1960MPa），外裹热挤高密度聚乙烯（HDPE）护套，并注入防腐油脂，构成全封闭的防腐体系。设计时需根据成桥状态和施工各阶段的索力，确定钢丝束的根数，并验算其疲劳性能和静力安全系数。

2 市政斜拉桥的关键施工技术

斜拉桥的施工是一个动态、非线性的过程，其最终成桥状态是通过一系列复杂的施工步骤逐步形成的。施工的核心在于精确控制结构的几何线形和内力状态，确保与设计预期高度吻合。

2.1 索塔施工：爬模法与劲性骨架法

索塔作为高空构筑物，其施工质量和垂直度控制至关重要。（1）液压自爬模法：这是目前裸塔（无大型横梁）施工的主流工法。爬模系统由模板、支架、液压爬升机构和操作平台组成。每完成一个标准节段（通常4-6米）的钢筋绑扎和混凝土浇筑后，液压系统驱动整个模架沿预埋在塔壁的锥形螺母自动爬升至上一节段，无需外部起重设备。该方法施工速度快、安全性高、混凝土外观质量好。（2）劲性骨架挂模提升法：适用于带有大型横梁的复杂高塔。首先在地面或已建塔柱上安装由型钢组成的劲性骨架，作为后续混凝土浇筑的内部支撑和定位基准。模板系统悬挂于劲性骨架上，待混凝土达到强度后，利用千斤顶将整个模板和骨架系统同步提升。此方法能有效保证复杂几何形状的施工精度，但工序相对繁琐。

2.2 主梁施工：悬臂浇筑与悬臂拼装

主梁施工是斜拉桥建设的核心，普遍采用对称悬臂施工法，以平衡索塔两侧的荷载。（1）悬臂浇筑法（适用于混凝土主梁）：施工始于索塔顶部的0号块。随后，采用专用的牵索挂篮作为移动式施工平台。其特点是将待浇梁段的部分重量通过临时连接传递给对应的斜拉索，形成“前支点”，从而大幅减小挂篮自身结构尺寸和主梁的施工内力。典型工序为：挂篮就位→安装模板及钢筋→挂设并初张拉斜拉索→浇筑混凝土→混凝土养护至设计强度→再次张拉斜拉索并完成体系转换→挂篮前移。此过程循环往复，直至主梁合龙[3]。（2）悬臂拼装法（适用于钢主梁或组合梁）：主梁在工厂分段预制，运输至现场后，利用大型浮吊或桥面吊机从索塔向两侧对称吊装。每安装一个节段，即挂设并张拉对应的斜拉索，使该节段的重量立即由斜拉索承担。此方法施工速度快，受天气影响小，但对构件制造精度、运输和吊装能力要求极高。

2.3 斜拉索施工：精准安装与分级张拉

斜拉索的施工是实现设计意图的关键环节，其核心是精确的索力控制。（1）索体制作与安装：斜拉索通常在专业缆索厂内制成成品索，卷盘运输至工地。安装时，先将索体从塔端穿入预埋的索导管，再牵引至梁端锚固位置。对于超长索，需采用连续千斤顶或卷扬机系统进行牵引，避免索体损伤。（2）锚具与张拉：市政斜拉桥普遍采用冷铸锚体系。其原理是在钢丝束末端镦头后，灌入低熔点锌铜合金并冷却固化，形成可靠的锚固。张拉作业在梁端或塔端进行，采用专用的穿心式千斤顶。由于斜拉桥的成桥状态是各索力共同作用的结果，张拉必须遵循严格的分级、对称、循序渐进的原则。通常需要经历多次张拉调整（如初张拉、二期恒载张拉、成桥调索），并通过高精度的压力传感器和频率法索力仪进行实时监测，确保最终索力与设计值偏差在允许范围内（通常±2%）。

3 BIM技术在市政斜拉桥全周期管理中的应用

面对斜拉桥设计与施工的极端复杂性，传统的二维图纸和经验管理模式已难以胜任。建筑信息模型（BIM）技术的引入，为项目全生命周期管理带来了革命性变革。

3.1 协同设计与冲突预控

在设计阶段，各专业（结构、建筑、机电、管线）可在统一的BIM平台上协同工作。通过三维可视化模型，设计师能直观地审视索塔锚固区的钢筋排布、主梁内的预应力管道与普通钢筋的空间关系。利用BIM软件的自动碰撞检测功能，可以提前发现并解决硬碰撞（如管道与结构冲突）和软碰撞（如维修空间不足），避免了大量施工阶段的设计变更和返工，显著提升了设计质量和效率。

3.2 施工模拟与方案优化

进入施工阶段，BIM模型的价值进一步凸显。通过将施工进度计划（4D）与模型关联，可以动态模拟整个悬臂施工过程，包括挂篮移动、节段吊装、斜拉索张拉等关键工序。这有助于施工单位优化工序逻辑，合理配置大型机械设备（如塔吊、浮吊）的站位和作业范围，并对潜在的施工风险（如大型构件吊装时的空间干涉）进行预演和规避[4]。此外，对于复杂的索塔劲性骨架安装或主梁合龙段施工，可通过BIM进行详细的虚拟建造，指导现场精准作业。

4 市政斜拉桥的发展趋势与挑战

随着新材料、新工艺和信息技术的飞速发展，市政斜拉桥正朝着更高、更轻、更智能的方向迈进。一方面，超高性能混凝土（UHPC）的应用，有望彻底改变传统混凝土桥梁的性能边界。UHPC具有高达150MPa以上的抗压强度和优异的韧性，可用于制造更纤细、跨度更大的主梁或索塔节段，甚至实现无筋或少筋设计，极大减轻自重并提升耐久性。另一方面，智能建造与数字孪生技术正在重塑桥梁工程的全生命周期管理模式。通过在桥梁关键部位（如索力、塔偏、梁挠度、伸缩缝）预埋光纤光栅、MEMS等微型传感器，构建一个实时感知的物联网（IoT）网络。这些数据流与高保真的BIM模型深度融合，形成动态更新的“数字孪生”体。管理者不仅能实时监控桥梁的健康状况，还能利用AI算法对海量数据进行分析，预测潜在病害，实现从被动维修到主动预防的转变。然而，这些前沿技术也带来了严峻挑战：UHPC等新材料的成本高昂，相关设计与施工规范尚不完善；智能传感系统的长期稳定性、数据安全与隐私保护问题亟待解决；同时，行业也极度缺乏既懂土木工程又精通信息技术的复合型人才。未来，如何在保障安全与品质的前提下，推动技术创新与工程实践的深度融合，并建立与之匹配的标准体系和人才培养机制，将是市政斜拉桥领域持续探索的核心主题。

5 结语

斜拉桥作为现代桥梁工程的杰出代表，其在市政道路建设中的应用充分体现了工程技术与城市美学的完美结合。成功的市政斜拉桥项目，离不开科学严谨的前期设计和精细可控的施工过程。从结构体系的合理选型，到索、塔、梁的精细化构造设计；从索塔的高效爬模施工，到主梁的精准悬臂作业，再到斜拉索的分级张拉控制，每一个环节都凝聚着工程智慧。BIM等数字化技术的深度应用，更是为这一复杂工程的顺利实施提供了强大赋能。展望未来，随着技术的不断进步，斜拉桥必将在构建安全、高效、绿色、智慧的城市交通体系中发挥更加不可替代的作用。

参考文献

[1]党子鑫.独塔无背索斜拉桥设计参数及主塔施工方法研究[D].石家庄铁道大学,2025.DOI:10.27334/d.cnki.gstdy.2025.000156.

[2]周跃,张百泉,蔡铁臣.双塔无背索斜拉桥施工技术方案比选[J].天津建设科技,2024,34(04):40-44.

[3]田焕祥,陈海军,李根,等.双索面无背索斜拉桥拱形钢结构索塔施工技术探讨[J].四川建筑,2024,44(01):144-148.

[4]胡成明.无背索斜拉桥吊装施工技术研究[J].黑龙江交通科技,2022,45(04):118-120+123.