

斜拉索管道跨越结构的发展现状及特征

袁 勇

中石化石油工程设计有限公司 山东 东营 257000

摘要：斜拉索管道跨越结构历经早期技术探索、现代技术突破，形成独特技术体系。其核心特征体现在力学性能、环境适应及经济施工方面。在应用场景上，对复杂地形、多样介质及不同气候均有良好适应性。当下呈现智能化、新材料应用及结构创新等发展趋势，为管道跨越工程提供高效解决方案，推动行业向更高水平迈进。

关键词：斜拉索管道跨越结构；技术发展；核心特征；应用场景；发展趋势

引言：管道跨越工程在能源输送领域意义重大，传统结构面临诸多局限。斜拉索结构源于桥梁领域，20世纪中后期开始向管道工程迁移。历经多年发展，从早期技术迁移面临的诸多挑战，到现代材料与工艺突破带来的结构升级，再到当前智能化等热点技术兴起，斜拉索管道跨越结构不断演进，成为解决管道跨越难题的关键技术方向。

1 斜拉索管道跨越结构的技术发展脉络

1.1 早期技术探索

斜拉桥技术的成熟为管道跨越工程提供了重要启示。20世纪中后期，工程师开始尝试将斜拉结构体系迁移至管道工程领域，通过拉索的轴向受拉特性替代传统管道的受压跨越模式，以解决大跨度场景下的结构稳定性问题^[1]。这一阶段的技术迁移面临诸多挑战，核心矛盾在于桥梁工程与管道工程的受力机制差异。桥梁斜拉索以承受竖向荷载为主，而管道跨越需同时应对自重、介质压力及环境荷载的复合作用。初始材料选择多沿用桥梁领域经验，采用普通钢索作为拉索主体，混凝土锚固块作为端部约束装置。然而，普通钢索的抗疲劳性能不足，在长期交变荷载作用下易出现断丝现象；混凝土锚固块体积庞大，对地基承载力要求高，且在温差作用下易产生开裂，导致密封性能下降。这些局限性制约了早期斜拉索管道跨越结构的跨度拓展与工程适应性，促使技术向轻量化、耐久化方向演进。

1.2 现代技术突破

材料科学的进步为结构升级提供了物质基础。高强度绞线凭借优异的力学性能逐渐取代普通钢索，其抗拉强度可达1860MPa以上，且采用多丝绞合工艺，显著提升了抗疲劳与抗腐蚀能力。耐腐蚀合金索体的研发进一步拓展了结构应用场景，通过添加铬、镍等元素形成致密氧化膜，有效抵御氯离子侵蚀，适用于海洋或化工等强腐蚀环境。防腐体系同步实现迭代，多层护套结构成为

主流。外层采用高密度聚乙烯（HDPE）管材，通过螺旋缠绕工艺增强抗冲击性能；内层涂覆环氧树脂或聚氨酯涂层，形成化学屏障，阻断水分与氧气渗透。密封技术从单一O型圈密封发展为组合式密封，通过热缩套与焊接法兰的协同作用，实现锚固端的气密性提升。制造工艺方面，整体挤出成型技术使管道直线段与弯段的尺寸精度达到毫米级，减少了现场拼接误差；自动化张拉设备通过液压同步控制系统，确保多索张拉力的均衡性，施工效率较人工操作提升数倍。

1.3 当前技术热点

智能监测技术的集成应用标志着结构向数字化运维转型。光纤光栅传感器沿索体布设，可实时采集应变与温度数据，通过算法模型反演索力状态，监测精度达±1%以内。无线传感器网络覆盖管道关键节点，对介质压力、流速及环境温湿度进行动态感知，数据传输延迟低于0.1秒，为结构安全评估提供多维度支撑。模块化设计理念推动施工标准化进程。预制索段与管道单元在工厂完成质量检验，现场通过快速连接装置实现拼装，单跨施工周期缩短至72小时内。快速施工技术结合非开挖定向钻进工艺，减少对地表生态的干扰，尤其适用于城市管廊或生态敏感区建设。这些技术热点共同构建了斜拉索管道跨越结构的智能化、绿色化发展框架，为未来超大跨度、复杂环境下的工程实践奠定了技术基础。

2 斜拉索管道跨越结构的核心特征

2.1 力学性能特征

斜拉索管道跨越结构的力学特性源于拉索与管道的协同受力模式。斜拉索以轴向受拉为主，通过索力传递将管道自重及介质压力转化为沿索方向的拉力，形成自平衡体系。管道则同时承受轴向压力与横向弯矩，其压弯组合作用需通过合理布置索间距与管道曲率实现平衡。索间距过密会导致局部应力集中，过疏则可能引发整体刚度不足，因此需结合跨度与荷载条件进行优化设

计。管道曲率设计需兼顾流体输送效率与结构稳定性，曲率半径过小会增加介质流动阻力，过大则削弱索力对管道的约束作用。长期荷载作用下，斜拉索的疲劳与松弛问题直接影响结构安全性。钢索在交变应力下易产生微裂纹扩展，需通过材料选型（如高强钢绞线）与表面处理（如镀锌或环氧涂层）提升抗疲劳性能。松弛现象则源于材料内部应力重分布，需通过预张拉工艺设定初始索力，并预留索力衰减补偿空间。部分工程采用可调节锚具，通过液压装置定期调整索力，确保结构长期处于设计受力状态。

2.2 环境适应性特征

抗风振设计是保障结构安全的关键。斜拉索在风荷载作用下易发生涡激振动，需通过调控索体自振频率避开风振敏感频段^[2]。具体措施包括调整索长、改变索截面形状或增设阻尼装置。阻尼器多采用黏滞阻尼器或摩擦阻尼器，通过消耗振动能量抑制索体振幅。对于超大跨度结构，还可结合气动措施，如在索体表面设置螺旋线或凹坑，破坏气流分离，降低风振风险。耐腐蚀策略需根据环境条件差异化设计。海洋环境下，氯离子侵蚀是主要威胁，需采用不锈钢索体或耐候钢，并配套多层防腐体系。外层HDPE护套可阻挡紫外线与机械损伤，内层涂层则提供化学防护。工业环境中，酸碱气体或盐雾需通过增加涂层厚度或选用特种合金（如哈氏合金）应对。温度适应性方面，管道热膨胀与索体弹性变形需协调统一。通过设置膨胀节或滑动支座，允许管道在温度变化时自由伸缩，同时利用索体弹性吸收部分变形，避免局部应力过大。

2.3 经济性与施工特征

经济性优势体现在材料用量与施工效率的双重优化。斜拉结构将管道受压转化为拉索受拉，显著减少管道壁厚与钢材用量。以某跨河工程为例，采用斜拉体系后管道重量减轻40%，运输与安装成本随之降低。施工周期缩短得益于标准化与模块化技术，预制索段与管道单元在工厂完成质量检验，现场通过高精度激光校准实现快速对接，自动化安装设备进一步减少人工误差。集中采购与设备合理调度可额外降低材料与机械租赁成本，结合绩效考核机制提升人工效率。某城市管廊项目采用此工艺后，单跨施工时间从15天压缩至3天，综合成本下降25%。标准化流程还降低了对施工人员技能依赖，推动行业向工业化建造模式转型，全生命周期成本优势进一步凸显。

3 斜拉索管道跨越结构的应用场景与适应性

3.1 地形适应性

斜拉索管道跨越结构对复杂地形具有显著适应能

力。在跨海或跨江场景中，结构需应对强风浪与船舶撞击的双重挑战。为提升抗风浪性能，索体常采用高强钢绞线与多层防腐护套组合，通过增大索径与调整索形（如扇形布置）增强整体刚度。防船撞设计则通过设置防撞套筒或柔性缓冲装置实现，部分工程还在锚固区增设混凝土护墩，分散撞击能量。水下锚固技术是关键环节，需根据地质条件选择重力式基础或打入桩基础。软土地基中，重力式基础通过增大底面积提高稳定性；岩层地基则采用钻孔灌注桩，确保锚固端与基岩紧密结合。山区或峡谷场景下，结构需充分利用地形高差实现经济跨越。索力动态调整技术在此类场景中尤为重要。通过在锚固端设置可调节锚具，结合实时监测数据，可针对不同高差段优化索力分布，避免局部应力集中。例如，某跨峡谷工程中，通过将索体分为多段并独立张拉，使管道在垂直方向形成平滑过渡曲线，既减少了材料用量，又提升了结构稳定性。此外，地形起伏还为索力调整提供了天然条件，利用山体坡度可降低索塔高度，进一步压缩工程成本。

3.2 输送介质适应性

不同输送介质对管道设计提出差异化要求。天然气管道需重点关注密封性与防爆性能，索体与管道连接处采用双层密封结构，并增设压力监测装置，确保介质泄漏风险可控。原油管道则需应对高黏度与沉积问题，管道内壁涂覆防粘涂层，索体设计预留热膨胀补偿空间，避免因介质凝固导致索力突变。成品油管道对洁净度要求较高，需在锚固区设置过滤装置，防止杂质进入管道影响输送质量。高压或高温工况下，结构强化措施涵盖材料升级与构造优化。高压管道采用厚壁无缝钢管，并通过局部加厚设计增强关键部位承压能力。高温介质输送时，索体与管道间增设隔热层，减少热量传递对索力稳定性的影响。部分工程还采用耐高温合金索体，配合自动化张拉系统，确保结构在温度变化时仍能维持设计受力状态。

3.3 气候适应性

极寒地区需解决防冻胀与材料低温韧性难题。管道外护管选用低温柔性材料（如改性聚乙烯），确保在零下40摄氏度环境下仍能保持弹性。锚固区基础设计预留冻胀变形空间，通过设置滑动支座允许结构自由伸缩，避免因冻胀力导致索体断裂。湿热地区则需应对紫外线老化与生物附着挑战，外护管添加抗紫外线稳定剂延长材料使用寿命，内壁涂覆防生物涂层抑制藻类与贝类附着。引入纳米改性涂层与迁移型阻锈剂，提升涂层抗老化与抗渗透能力，部分沿海工程还在索体表面设置铜合

金牺牲阳极,通过电化学防护降低腐蚀速率,结合湿度控制系统实时调控锚固区环境,确保结构在长期湿热环境中仍能稳定运行。在强紫外线地区,还可采用遮阳套管辅助防护,进一步延缓材料老化进程。

4 斜拉索管道跨越结构的未来发展趋势

4.1 智能化与数字化

数字孪生技术将推动斜拉索管道跨越结构向全生命周期智能化管理迈进。通过构建基于BIM的三维模型,可集成结构几何参数、材料属性及施工信息,形成与实体结构同步演化的数字镜像^[3]。在运营阶段,传感器网络实时采集索力、应变、温度等数据,驱动数字模型动态更新,实现结构状态可视化监测。结合机器学习算法,系统能自主分析历史数据规律,预测索力衰减趋势与潜在病害风险。例如,利用深度神经网络对索体微裂纹扩展进行模拟,可提前6个月预警断裂风险,为维修决策提供科学依据。AI驱动的智能运维平台将进一步优化管理效率。通过自然语言处理技术,平台可自动生成结构健康报告,标注异常参数并推荐处置方案。强化学习算法则能根据环境荷载变化动态调整索力控制策略,在台风或地震等极端工况下实现主动防御。部分前沿研究正探索将区块链技术引入数据管理,确保监测数据的不可篡改性及可追溯性,为结构安全评估提供可信证据链。

4.2 新材料与新工艺

碳纤维复合材料斜拉索的试验性应用标志着材料技术突破。碳纤维索体具有密度低、强度高、耐腐蚀等优势,其抗拉强度可达3500MPa以上,是钢索的2倍以上。早期试验聚焦于小跨度人行桥,近期已逐步向管道跨越领域延伸。某跨河工程中,碳纤维索体与钢索混合布置,既降低了结构自重,又提升了跨越能力。关键技术难点在于锚固系统设计,需通过特殊夹具实现纤维束与金属锚具的可靠连接,避免应力集中导致纤维断裂。3D打印技术为复杂节点构造提供定制化解决方案。传统工艺中,斜拉索与管道连接节点需通过多块钢板焊接成型,存在应力集中与施工误差问题。3D打印可直接制造异形节点,材料选用高强度合金粉末,通过逐层堆积实

现整体成型。某山区工程中,采用3D打印节点后,节点重量减轻40%,安装效率提升3倍。该技术还能打印内置传感器的智能节点,实现应力与温度的实时监测,推动结构向功能集成化方向发展。

4.3 结构形式创新

斜拉-悬索混合体系研究旨在融合两种结构优势。斜拉结构适合中短跨度,悬索结构则在大跨度场景中更具经济性。混合体系通过合理分配荷载,可在800米至1500米跨度范围内实现最优解。某概念设计中,主跨采用悬索结构,边跨改用斜拉结构,既减少了悬索主缆的锚固难度,又降低了斜拉索的用量。关键技术包括混合体系动力特性分析与索力协同控制算法,需通过风洞试验验证抗风稳定性。多管共架技术深化应用将提升管道输送效率。传统跨越结构多采用单管设计,多管共架通过共享索塔与锚固系统,可同步输送天然气、原油、氢气等多种介质。某沿海工程中,三层管道共架设计使土地占用减少60%,施工成本降低35%。技术难点在于不同介质管道的热膨胀系数差异,需通过滑动支座与柔性连接装置协调变形,避免相互干扰。未来研究将聚焦于模块化共架单元开发,推动技术向标准化、规模化方向发展。

结束语

斜拉索管道跨越结构在发展进程中,不断融合新技术、新材料,展现出强大生命力。智能化与数字化管理提升运维效率,新材料与新工艺突破拓展应用边界,结构形式创新满足多元需求。在能源输送需求持续增长背景下,该结构将持续优化升级,为管道跨越工程提供更可靠、高效、经济的建设方案,推动行业持续进步。

参考文献

- [1]曹沛,彭雪,李寒.大跨度管道斜拉桥屈曲性能分析[J].市政技术,2022,40(7):126-132.
- [2]孙勇,申奥,李明敏,等.大跨度矮塔斜拉桥施工预埋索导管角度的修正方法[J].黑龙江科技大学学报,2024,34(5):717-721,728.
- [3]张嘉钦,鲁佳琪,刘均华,等.大跨度石油管道悬索桥风缆动力性能及优化研究[J].公路交通技术,2023,39(6):69-79.