

预应力混凝土在市政桥梁中的高效应用策略

文 / 彭辅婷 合肥志诚工程设计咨询有限公司

摘要：为了提升预应力混凝土在市政桥梁中的应用效率，研究围绕材料匹配、结构优化、智能施工及运维策略展开。首先，针对高强混凝土的时变性能，构建预测模型，结合钢绞线应力松弛的耦合机制，提出耐久性提升方案。其次，在结构设计方面，采用预应力损失补偿方法，分析荷载传递特性，并优化空间效应与构造细节协同关系。运维环节，建立退化预测模型，结合损伤识别技术，提高桥梁长期安全性，并构建维护优化策略。结果表明，通过全寿命周期的多层次优化，预应力混凝土的力学性能、耐久性及施工可控性均得到改善，桥梁结构的服役寿命显著延长，长期维护成本有效降低，提供了一套系统性的优化路径。

关键词：预应力混凝土；市政桥梁；韧性设计；智能张拉控制；全寿命周期优化；数字孪生

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.14.061

引言

预应力混凝土因其较高的抗裂性和耐久性，在市政桥梁建设中得到广泛应用。随着城市基础设施建设的快速推进，桥梁工程面临更高的荷载要求和环境适应性挑战，传统设计方法难以充分发挥预应力体系的优势。本研究围绕材料匹配、结构优化、智能施工及运维策略四个方面，探讨高效应用策略，旨在提升预应力混凝土桥梁的整体性能。针对材料特性，分析高强混凝土的时变性能，并优化钢绞线应力松弛补偿方案，以延缓性能衰减。结构设计层面，研究荷载传递机理及空间效应优化策略，提升桥梁整体受力合理性。施工阶段，运用智能张拉控制，精确调整工艺参数，增强施工质量的可控性。运维管理方面，建立退化预测与安全评估体系，提出合理的维护优化方法，降低长期成本。本研究通过系统性的分析与优化，为预应力混凝土在市政桥梁中的高效应用提供理论支撑和工程实践依据。

一、预应力混凝土材料性能匹配理论

（一）高强混凝土时变性能预测模型

混凝土构件作为桥梁施工阶段所使用的重要结构，是预应力施工技术应用的重要基础环节。针对混凝土结构来讲，其重量与尺寸成为约束基本性能的关键因素。混凝土材料经过预应力施工技术的有效处理，施加初始压力并作用于混凝土构件，并使压力可以存于构件内，当构件用于施工，施加的初始压力就能够与其他构件产生的应力彼此抵消，保证构件的安全性。应用预应力施工技术，能够使混凝土形成弹性高、强度大、缩变低等特性，并于桥梁施工阶段起到十分重要的作用^[1]。

预应力混凝土的核心在于高强混凝土的时变性能，其表现受到荷载、湿度、温度以及微观结构演化的综合影响。高强混凝土的力学特性并非固定不变，而是在服役期间经历强度增长、徐变及收缩的复杂变化。不同于普通混凝土，其内部微裂纹扩展受到较高约束，使得早期徐变速率降低，但在长期服役过程中，由于骨料界面

过渡区的应力集中，可能导致非线性应变积累现象。采用多尺度建模方法可以有效解析微观结构对宏观性能的影响，其中，基于纳米尺度胶凝材料水化动力学的数值模型能够预测早龄期强度发展，而结合混凝土微裂纹扩展机制的本构关系则可用于模拟长期徐变行为。对于收缩效应，需考虑内部湿度梯度的动态变化，并建立动态水分迁移模型以修正预测误差。在长期应力作用下，材料的疲劳损伤不可忽视，因此，结合断裂力学方法的损伤演化模型可用于表征极限服役状态。

（二）钢绞线应力松弛多因素耦合机制

预应力钢绞线作为预应力混凝土的关键受力构件，其应力松弛行为直接影响结构长期性能。应力松弛主要源于钢材内部晶格滑移、位错运动及微观损伤演化，且与应力水平、温度环境、加载历程及锚固方式密切相关。在高应力水平下，晶粒内的滑移带分布趋于不均匀，导致塑性应变集中，加剧初期松弛速率；而在较低应力水平下，位错运动受约束，呈现迟滞效应，延缓松弛进程。环境因素同样影响松弛特性，例如，湿度作用可能加速腐蚀裂纹扩展，使局部应力集中加剧，从而改变松弛曲线的演化路径。温度波动则会引起热应力交变，使得材料内部的残余应力调整速率发生变化。

（三）材料-环境协同作用耐久性理论

预应力混凝土的服役寿命受材料与环境的相互作用影响，耐久性评估不仅需要考虑单一因素对材料性能的影响，还需分析多种因素共同作用下的协同退化机制（如图1为环境因素与材料退化关系图）。湿度、温度、氯离子侵蚀、碳化及冻融循环等环境因素均可能引发材料性能退化，导致耐久性降低。在湿热环境中，混凝土内部的毛细孔结构发生水分迁移，水化产物的溶解-沉淀平衡被打破，使界面过渡区的微观结构发生重塑，进而影响整体耐久性。氯离子侵蚀过程中，钢绞线表面氧化膜破坏，局部电化学反应加剧，导致点蚀扩展，从而降低钢筋的粘结性能^[2]。碳化作用则通过降低孔隙溶液的

碱度，使钢筋钝化膜失效，诱发锈蚀。冻融循环导致混凝土内部水分冻结膨胀，诱发微裂纹萌生与扩展，加速材料损伤累积。综合考虑多因素协同作用，可构建耐久性退化模型，其中，基于耦合环境荷载的损伤演化方程能够描述预应力混凝土在复杂环境中的性能变化。通过优化材料配比、提升界面过渡区密实度以及采用智能传感技术进行长期监测，可有效延缓材料退化，提高结构耐久性。

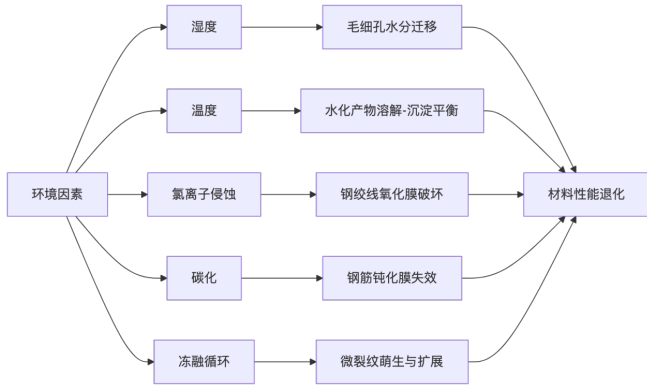


图1 环境因素与材料退化关系图

二、桥梁结构体系优化设计方法

(一) 预应力损失补偿算法

桥梁在长期服役过程中，预应力损失成为影响结构稳定性的重要因素。预应力损失主要来源于弹性短缩、徐变、收缩、钢材松弛及锚固滑移等因素，其累积效应直接决定了桥梁的长期荷载承受能力。由于材料特性、施工条件及环境因素的复杂性，预应力损失的预测与补偿成为结构设计的关键环节。在计算预应力损失时，需要构建多因素耦合模型，以描述混凝土在不同龄期的弹性模量变化，同时考虑湿度、温度等环境条件对徐变和收缩的影响。传统方法主要依赖经验公式进行修正，难以精准适应复杂结构体系。引入基于有限元分析的数值模拟技术，可以构建高精度的损失计算模型，并通过优化预应力分布，形成适应性强的补偿策略^[3]。智能监测技术的应用，使得预应力损失的实时反馈成为可能。

(二) 韧性设计荷载传递机制

桥梁在受力状态下，其承载能力不仅取决于构件的强度和刚度，同时也受到荷载传递路径的影响。韧性设计的核心在于优化荷载分配，使结构在复杂工况下保持高效受力状态，并具备较强的抗破坏能力。对于预应力桥梁而言，荷载传递的路径受预应力分布、结构几何形态及支座约束条件影响较大。在受力过程中，局部构件的变形协调能力决定了桥梁整体的刚度匹配关系，而局部应力集中区域的演化路径则影响桥梁的极限承载能力。为提升桥梁的韧性，需引入分级加载分析方法，模拟不同工况下的荷载转移特性，并构建应力重分布机制，以优化局部构造设计。

(三) 空间效应与构造细节协同理论

桥梁结构受力不仅表现为单一平面内的受力状态，还涉及空间效应的影响。结构的三维荷载传递机制决定了应力在不同方向上的分布特性，而空间效应的协调性直接影响桥梁的整体稳定性。空间效应主要来源于构件之间的连接方式、横向刚度分布及支座的约束特性，合理的构造细节设计可以有效提升桥梁的整体承载能力。对于预应力桥梁而言，空间效应的优化需要从构造细节入手，例如，横向联系结构可提升整体抗扭性能，而合理的梁端构造可避免局部应力集中。在长期使用过程中，结构构件可能因荷载变化导致局部变形积累，而构造细节的不合理设计可能使这些变形失去协调性，进而引发结构失稳问题^[4]。结合新型材料及智能传感技术的应用，可进一步提升构造细节对桥梁整体稳定性的贡献，使其具备更高的耐久性及更优的结构适应性。

三、智能施工控制技术体系

(一) 张拉工艺参数优化模型

预应力混凝土桥梁的施工阶段涉及预应力钢束的张拉操作，其参数设定直接决定了结构的内力分布及长期服役性能。张拉工艺参数的优化需从力学机理出发，分析钢束受力状态，并结合材料特性、施工工艺及环境因素调整张拉力、张拉顺序及持荷时间。在张拉过程中，钢束的弹塑性变形与锚具的非线性接触效应共同影响预应力度的传递，传统的经验公式难以满足复杂结构的需求。因此，采用有限元模拟方法建立张拉过程的多场耦合模型，可以精确计算钢束的应力演变规律，并优化张拉参数以降低局部应力集中。另外，智能施工系统的应用，使得张拉过程能够实现动态监测与反馈控制。基于传感器采集的应力数据，可通过自适应控制算法实时调整张拉力，确保施加的预应力与设计要求高度匹配^[5]。在此基础上，结合历史施工数据进行深度学习训练，建立数据驱动优化模型，使张拉工艺参数能够适应不同桥梁类型，提高施工精度，增强预应力混凝土桥梁的整体稳定性。

(二) 环境温湿度影响修正理论

施工现场的环境温湿度对张拉过程及混凝土性能演变具有直接影响。在温度变化条件下，钢束的热膨胀效应会导致张拉力的波动，使得预应力分布出现偏差。而湿度条件的变化，则会影响混凝土的早期收缩与徐变特性，进而改变钢束与混凝土之间的相互作用。传统施工方法往往忽略环境因素的动态变化，导致张拉过程与实际服役状态存在偏差。为提升施工精度，可构建基于环境因素的修正模型，以温湿度数据为输入变量，结合热力学及水分迁移理论，推导张拉力的修正公式。在模型构建过程中，需引入热应力分析方法，模拟不同温度

场下钢束的变形行为,并建立混凝土孔隙水蒸发模型,预测湿度变化对结构性能的影响。

(三) 智能监控数据融合算法

智能化施工技术的核心在于数据驱动的监测与反馈控制。传统桥梁施工依赖人工经验进行质量评估,而智能监控系统的应用使得施工过程的实时数据能够被高效整合与分析。施工过程涉及应力分布、位移变化、环境参数等多源数据,如何有效融合不同类型的数据,提高计算效率,成为施工优化的关键。智能监控数据融合算法的核心在于多传感器信息的集成处理,通过信号滤波、模式识别及深度学习方法,实现数据的自适应优化。在施工过程中,传感器采集的数据可能存在噪声干扰,数据融合算法可通过时序分析与误差修正,提高监测数据的可靠性^[6]。另外,融合算法能够对历史数据进行特征提取,建立数据关联模型,预测施工过程中可能出现的偏差,并提前进行调整。基于神经网络与贝叶斯推理的优化方法,可使监测系统在复杂工况下仍保持高精度反馈能力,从而提升施工质量,使桥梁结构在建造阶段即具备良好的受力状态,为后续服役期的安全性提供保障。

四、全生命周期运维策略

(一) 预应力体系退化预测模型

预应力混凝土桥梁的长期服役过程中,预应力体系的退化会导致结构承载力下降,影响安全性与耐久性。预应力退化的主要机制包括材料老化、应力松弛、腐蚀扩展以及环境荷载的累积效应。传统的退化评估方法多基于经验公式,难以准确表征复杂工况下的性能演变趋势。为了提升预测精度,需要构建耦合多物理场的退化演化模型。该模型应结合材料微观劣化机理,采用断裂力学方法描述钢绞线在长期受力状态下的疲劳裂纹扩展,并考虑湿热环境对混凝土微观孔隙结构的影响。另外,预应力体系的长期稳定性与施工质量、锚固方式及结构自身的荷载适应性密切相关。基于长期监测数据,可利用机器学习方法对退化趋势进行预测,通过回归分析优化损伤演化参数,使模型能够适应不同环境条件。

(二) 损伤识别与安全评估方法

桥梁在服役过程中,损伤的累积可能导致结构刚度衰减、变形异常及承载力下降。传统的损伤识别方法主要依赖现场检测与人工评估,但在大型复杂结构中,受制于检测周期与人力成本,难以实现高效监测。智能化损伤识别方法的核心在于数据驱动的实时分析,结合结构动力响应特征与应力分布信息,建立损伤特征提取模型。在数据采集方面,可通过光纤光栅、超声波检测及加速度传感器获取结构关键部位的受力状态,并结合数字孪生技术进行虚拟仿真,使得损伤演化路径得以精确重构。安全评估方面,需要基于可靠度理论构建风险量

化体系,采用贝叶斯网络分析不同损伤类型对桥梁整体安全性的影响^[7]。

(三) 维护决策多目标优化理论

桥梁的长期运维管理涉及多种决策因素,包括维护成本、耐久性提升目标、交通影响及环境适应性等。传统的维护策略往往以定期检修为主,缺乏动态优化机制,导致资源配置效率较低。多目标优化理论可用于桥梁维护决策,通过建立基于寿命周期成本的优化模型,平衡安全性、经济性与环境影响。在优化方法上,可采用遗传算法或粒子群优化方法,构建桥梁养护的最优策略集。维护决策的核心在于合理安排检测与修复周期,使结构性能在最低维护成本下保持在安全阈值范围内。

结语

预应力混凝土在市政桥梁建设中的应用,涉及材料性能、结构设计、施工控制与运维优化等多个环节。本研究从材料层面入手,分析高强混凝土的时变特性,提出耐久性协同作用理论,优化钢绞线应力松弛补偿策略,使预应力体系在服役期内保持稳定。结构体系优化方面,针对预应力损失问题,结合荷载传递规律,构建补偿算法,并在空间效应与构造细节之间建立协调机制,提高桥梁承载能力与抗变形能力。施工阶段,基于智能张拉控制技术,调整工艺参数,优化环境温湿度修正模型,使张拉过程更具适应性,从而确保施工质量。运维策略方面,建立退化预测模型,结合损伤识别算法,构建安全评估体系,并利用多目标优化理论,制定合理的维护方案,降低长期运维成本。研究表明,预应力混凝土在市政桥梁的应用,不仅提高了桥梁结构的可靠性,也为后续技术创新提供了方向,推动市政桥梁向更安全、更耐久的方向发展。

参考文献

- [1] 石强. 预应力施工技术在市政桥梁工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(03): 112-113.
- [2] 庄国峰. 试论市政桥梁施工技术[J]. 黑龙江交通科技, 2013, 36(05): 82+84.
- [3] 李萍. 浅析预应力施工技术在市政桥梁工程中的应用[J]. 山西建筑, 2018, 44(32): 180-182.
- [4] 胡皓勇. 市政桥梁建设中的预应力施工探讨[J]. 城市建筑, 2012, (15): 129-130.
- [5] 任洪亮. 浅谈市政公路桥梁工程中的预应力张拉施工技术要点[J]. 黑龙江科技信息, 2014, (20): 185.
- [6] 常全禄. 市政桥梁工程中预应力施工技术的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017, (04): 228-229.
- [7] 靳泉. 市政桥梁工程施工中混凝土的裂缝控制措施[J]. 建材与装饰, 2017, (37): 225-226.