

单轨线路轨道梁结构受力特性与维护要点研究

王生勇 聂建军

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 400000

【摘要】：单轨线路轨道梁在车辆偏心荷载、曲线工况及温度变化的共同作用下呈现出独特的受力模式，其弯扭耦合作用显著影响整体稳定与结构耐久。当梁体在频繁循环荷载下产生微裂、接头区刚度差异加剧局部应力集中时，运行平顺性随之下降，长期累积会扩大结构隐患。围绕此受力特性构建维护要点，可通过识别关键受力区、控制变形发展、管理疲劳累积以及监测梁体连接状态的方式减轻不利效应。围绕偏心荷载敏感部位进行重点巡检，并结合形变趋势判读可提升维护精准度，使轨道梁在复杂运营环境下保持稳定性能。

【关键词】：单轨线路；轨道梁；受力特性；弯扭耦合；维护要点

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.014

引言

单轨交通在城市立体交通系统中以灵活占地与较高爬坡能力受到关注，而其运行品质很大程度上取决于轨道梁的结构表现。梁体在车辆荷载作用下呈现独特的力学反应，弯曲、扭转与局部变形相互叠加，形成区别于常规轨道结构的受力模式。运营阶段的细微扰动往往先在梁体上显现，通过应力分布、裂缝形态与连接部位微小变化逐步传递至运行平顺性。围绕这些力学特征展开探讨，有助于揭示影响结构稳定的关键因素，并为后续维护策略提供逻辑起点，使读者能够在理解力学机制的基础上进入更深入的技术分析。

1 轨道梁受力特征、常见病害及成因分析

轨道梁在单轨线路中承担车辆偏心荷载、曲线运行与环境温度变化的共同影响，其受力模式呈现出明显的矛盾特征，且与病害发展密切相关。车辆荷载集中于轮轨接触带，在梁体截面上形成非对称力流，使弯曲效应与扭转效应相互叠加。当列车密集通过时，偏心压力对腹板、横隔板处的应力分布造成显著差异，梁体局部区域出现应力峰值，而相邻区域应力水平偏低，结构整体性受到削弱^[1]。温度梯度使上、下缘混凝土产生不同程度伸缩，与荷载诱发的弯扭效应共同作用，拉压区域划分随工况变化不断移动，成为病害萌发的主要诱因。

常见病害类型：结合运营实际，单轨轨道梁常见病害主要集中于混凝土结构及连接部位，核心类型包括：一是混凝土裂缝，分为表面微裂、腹板斜裂及贯通裂，多分布于剪跨区、腹板根部及梁端；二是混凝土表层损伤，表现为起皮、剥落、露筋，集中于梁体上缘轮轨接触对应区域及下缘受拉区；三是连接部位病害，包括梁端接头松动、剪力键损坏、螺栓锈蚀及预应力锚固区渗漏；四是几何变形病害，表现为梁体挠度超标、扭转角异常及轨道板翘曲。

病害成因分析：各类病害均与受力特性及环境因素直接相关：其一，循环偏心荷载导致梁体边缘纤维反复拉压，混凝土疲劳累积，形成微裂并逐步扩展，长期作用下出现起皮、剥落，

甚至露筋；其二，弯扭耦合作用使腹板、横隔板受力不均，应力集中部位易产生斜裂，曲线区段因抗扭刚度不足，病害更为突出；其三，温度变化与湿度侵蚀叠加，混凝土收缩膨胀不均，加剧裂缝发展，同时导致预应力锚固区密封失效、螺栓锈蚀；其四，梁端连接部位刚度不均，荷载传递异常，引发接头松动、剪力键损坏，进一步放大结构变形，诱发连锁病害。

2 轨道梁受力特征中的关键矛盾

轨道梁在单轨线路中承担车辆偏心荷载、曲线运行与环境温度变化的共同影响，其受力模式呈现出明显的矛盾特征。车辆荷载集中于轮轨接触带，在梁体截面上形成非对称力流，使弯曲效应与扭转效应相互叠加。当列车密集通过时，偏心压力对腹板、横隔板处的应力分布造成显著差异，梁体局部区域出现应力峰值，而相邻区域应力水平偏低，结构整体性受到削弱。温度梯度使上、下缘混凝土产生不同程度伸缩，与荷载诱发的弯扭效应共同作用，拉压区域划分随工况变化不断移动，使轨道梁在长期运营中形成复杂的内力演化轨迹。多种因素叠加，使梁体既要抵抗周期性竖向弯曲，又需承受由偏心荷载引起的扭矩，这种耦合状态构成受力矛盾的核心。

面对高频荷载冲击，轨道梁表层及连接部位常出现微裂，尤其在横向稳定性不足的区段更易形成局部拉张破坏倾向。裂缝本身并非主要问题，其产生与扩展过程往往更能暴露力流路径的变化。当梁端连接处刚度不均时，荷载传递出现局部转折，引起剪跨区附加弯矩上升，使应力集中进一步增强。曲线梁因外轨侧荷载更大，轨道梁截面抗扭刚度相对不足，内力分布更加偏斜，桥面附属构造也随之承受额外变形。循环荷载带来的疲劳累积，使边缘纤维反复进入拉压交替状态，缩短混凝土与钢筋的协同能力保持时间。梁体在这种应力与变形交替的运行环境中，比直线、高刚度结构更易暴露受力短板，表现出结构矛盾的突出性。

运营持续推进后，这些受力矛盾逐渐体现在可观测的状态变化上。梁体变形曲线的微小偏移、支点沉降差异、轨道系统

局部高低不平顺都会成为结构受力演化的表征。车辆在高架结构上运行时, 轮轨力的轻微偏差立即作用于梁面, 使轨道梁的弯扭响应进一步放大, 从而形成结构行为与车辆动力之间的互动; 这种互动若长期得不到控制, 受力矛盾会在多个部位同步积累。梁端剪力键、预应力筋锚固区、横隔板连接处等都可能成为弱点, 使受力路径更加复杂化。轨道梁因此呈现出一种典型特征: 在满足整体承载的前提下, 局部区域依旧可能因受力矛盾而产生超常变形与疲劳扩散, 构成后续维护与结构管理的核心难点。

3 弯扭耦合作用下的结构响应分析

弯扭耦合在单轨轨道梁中呈现高度敏感的力学反应, 当车辆偏心荷载作用于梁面时, 竖向弯矩与扭矩同步传递, 使截面纤维处于复杂的拉压组合状态。荷载偏移距离越大, 扭矩越明显, 进而改变截面主应力方向, 使腹板内力呈现斜向扩散趋势。在这种状态下, 梁体上缘和下缘的应力幅值不再沿纵向均匀分布, 而是随扭转角变化产生差异^[2]。高架单轨结构常设于城市窄通道, 曲线半径往往偏小, 车辆通过时产生附加离心力, 使弯扭耦合的幅度进一步增大, 导致截面抗扭刚度的薄弱部位在动态响应中表现更为突出。转角区段的横隔构件受力路径随扭转变形发生偏移, 使结构局部出现额外剪力峰值, 这些变化构成轨道梁特有的受力响应模式。

在复杂工况叠加下, 梁体不同区域的位移、角变形和剪切应变呈现协调与失衡的交错状态。弯扭耦合使梁顶轨道板出现轻微翘曲趋势, 轨道标高的微差持续影响轮轨接触几何, 使动态荷载呈现周期性波动。梁底在扭转作用下产生不均匀拉应变, 使混凝土微裂纹沿斜向扩展, 反映出内部力流路径的偏移。预应力体系在这种工况下承担多重功能, 其偏心布置可在一定程度上抵消弯矩, 但难以完全抑制扭转变形带来的次应力, 使锚固区出现复杂的应力重新分配现象。当车辆以高频率通过时, 扭转角在短时间内不断反复, 使应力幅值呈现疲劳型循环, 边缘纤维表现出明显的拉压交替, 使梁体进入更复杂的结构响应区域。

随着运营工况持续作用, 弯扭耦合带来的结构变化逐渐体现在长期性指标上。轨道梁挠度曲线的缓慢偏移、扭转角累积、支墩约束条件的局部松弛都会影响整体响应过程, 形成结构行为的时间效应。曲线区段更易在梁端附近形成附加竖向位移, 使承载路径出现重新组织的趋势, 剪跨区的主拉应力方向也随扭转角周期变化而调整, 形成多向应力组合。动力放大效应在梁体扭振模式下更为明显, 当车辆速度接近结构自振频率时, 耦合响应呈现显著放大, 使轨道结构表现出局部振动敏感性。弯扭耦合因此成为轨道梁在运营中最关键、最复杂的结构反应之一, 对梁体细部构造、材料耐久性以及整体运行平顺性产生持续影响, 并决定后续维护关注的主要方向。

4 循环荷载引发的隐患识别路径

循环荷载在单轨轨道梁中不断叠加, 使结构在长期作用下呈现疲劳型演化特征, 隐患往往在微小变形与局部损伤的累积过程中逐步显现。车辆轮轨力的周期性输入使梁体上缘与下缘反复进入拉压交替区, 纤维应力幅值在局部截面不断放大, 使混凝土内部出现早期微裂迹象。随着荷载次数增加, 裂纹沿应力主方向产生扩展倾向, 尤其在剪跨区和腹板根部更易形成隐性损伤带^[3]。轨道梁截面存在受力不均时, 内部力流路径可能发生缓慢迁移, 使一些区域在宏观上看似完好, 却处于较高应力比的长期状态, 成为隐患萌发的起点。梁端约束、连接节点和预应力锚固区更易在循环激励下产生应力重分布, 使潜在弱点逐渐暴露。

随着时间推移, 结构状态的细微变化成为识别隐患的重要依据。轨道梁挠度曲线的缓慢偏移、扭转角幅值的不对称增长和轨道板几何形态的微扰都反映着内部受力趋势的改变。车辆通过时的动力响应可通过振动幅值变化体现梁体刚度衰减, 当局部区域出现疲劳损伤时, 固有频率可能发生轻微下移, 使结构动力特征产生可捕捉的差异。连接缝的微小开合、横隔板的细微变形以及螺栓或剪力键的接触状态变化也属于隐患识别的重要线索。这些征兆在早期往往很难引起注意, 但与循环荷载密切相关, 可以通过形变监测、加速度响应分析与应变分布追踪逐步建立结构状态的判读路径, 使隐患在早期具备可识别性。

隐患识别不仅依赖对结构表象的观测, 还需通过对运行条件与受力模式的关联分析构建完整路径。车辆密度、速度波动和曲线通过时间分布都会改变循环荷载的输入节奏, 使梁体在不同时段呈现不同累积态。温度梯度与荷载激励相互叠加时, 会加速局部裂纹的扩展速率, 使平时难以觉察的细部变化在特定工况下被放大。基于这种演化规律, 可将重点区域划入监测范围, 通过对剪跨区主拉应力趋势、梁端转角变化及腹板局部歪斜的追踪, 逐步锁定隐患发展路径^[4]。

5 基于受力规律与混凝土病害发展的维护控制策略

基于受力规律与混凝土病害发展规律构建维护控制策略, 核心是聚焦混凝土病害防控、强化运营安全保障, 从轨道梁在弯曲、扭转与循环荷载耦合作用下的力学表现入手, 结合混凝土自身病害的演化路径, 明确不同工况对结构性能、混凝土病害发展的关键影响, 将这些影响转化为可执行、可落地的维护控制措施, 重点围绕混凝土病害处置、关键部位管控, 提升维护精准度, 保障运营安全。偏心荷载长期作用于梁体, 使截面纤维持续承受非对称应力, 直接推动混凝土病害发展, 维护工作需针对受力突出的区域、混凝土病害高发区, 开展更高精度的监测与处置。轨道板与梁体连接处、剪跨区主拉应力集中带、腹板根部及预应力锚固区, 均属于混凝土病害高发区和维护重

点部位,通过布设应变计、位移计与角变形监测装置,可实时记录结构应力路径的变化趋势,同时结合超声波、表面波法等无损检测手段,定期检测混凝土内部微裂、表层损伤等病害状态^[5]。梁端转角、竖向挠度与扭转角的微量变化能够反映内部力流重分布,而混凝土裂缝的扩展速度、表层损伤的发展程度,直接反映病害恶化趋势,维护控制策略的核心在于通过这些指标,识别受力异常与混凝土病害恶化的早期信号,及时处置,避免局部损伤进入不可逆阶段,防范运营安全风险。

在动态荷载作用明显的区段,维护策略需围绕动力响应特征、混凝土病害防控进行调整,聚焦维护重点,提升维护有效性。弯扭耦合使梁体局部刚度对动力荷载更为敏感,也使局部区域混凝土病害发展速度更快,因此可通过振动模态、加速度峰值与轨道平顺度变化,锁定潜在薄弱区及混凝土病害高发区;当车辆频繁通过导致局部区域出现疲劳累积迹象时,混凝土内部损伤可能以微裂形式生成,这一过程难以通过肉眼直接观察,需重点运用无损检测手段,如超声波检测、表面波法和电磁感应,对梁体内部的微细损伤进行精准识别,根据损伤程度调整维护频次、优化维护方案,重点处置混凝土微裂、表层起皮等早期病害,遏制病害恶化。对于动力响应放大的曲线区段,可适度调整轨道几何参数,降低轮轨力的不均匀输入,减少对混凝土结构的冲击,保障运营安全。

在受力规律与混凝土病害发展规律逐步明确之后,控制策略需要形成体系化的管理逻辑,聚焦维护重点,强化运营安全保障,实现维护工作的规范化、精细化。针对不同受力阶段、

混凝土病害发展的不同程度,建立差异化维护阈值,明确混凝土裂缝、表层损伤等病害的处置标准,使梁体在正常波动范围内的应力变化、轻微病害不至于被过度干预,而超过阈值的情况,可在短时间内触发巡检或加密监测,及时处置,防范病害恶化。预应力体系的有效性、连接节点的抗剪能力以及梁端约束的可靠性,均需纳入长期检验范围,这些部位的性能衰减会间接加剧混凝土病害发展,需定期检测、及时维护,通过对这些构造要素的性能衰减规律进行跟踪,实现维护策略与受力规律、混凝土病害发展规律的动态匹配。结构在运营期间的温度应力、荷载谱变化以及材料老化,会逐步改变梁体的力学状态,加速混凝土病害发展,通过构建受力规律与混凝土病害发展的数据库、变形—应力—病害关联模型,可让维护控制从经验模式转向数据驱动,精准识别维护重点、优化维护方案,切实保障运营安全。

6 结语

轨道梁在单轨线路中的受力表现与运营状态紧密相连,各类荷载在结构中形成的弯扭耦合、疲劳累积与力流重分布构成性能变化的主导因素。围绕这些特征展开的分析,使梁体在长期运行中的潜在风险与关键控制点逐渐清晰。受力规律的深化认知为维护策略、结构调控和性能提升提供了有效路径,使轨道梁在复杂工况下仍能保持稳定的力学行为。随着监测手段与结构分析方法的不断完善,轨道梁的安全性与可靠性将得到更扎实的保障。

参考文献:

- [1] 解庆贺,毕研美,于泽明,等.高精度轨道梁模板变形与快速脱模技术研究[J].混凝土世界,2025,(11):63-70.
- [2] 肖乾,汪寒俊,周新建,等.单轨车辆-轨道梁耦合振动特性及试验方法研究[J].噪声与振动控制,2025,45(03):1-7+54.
- [3] 张冲,仵叔强.悬挂式单轨交通轨道梁数控自动化组装机开发与研制[J].智能制造,2024,(03):57-62.
- [4] 姬艳强.跨座式单轨旅游交通系统轨道梁顶板不平顺研究[D].中南大学,2023.
- [5] 张华龙.悬挂式单轨线路设计研究[J].现代城市轨道交通,2022,(05):7-13.