

轻型钢结构人行天桥整体稳定性分析与设计优化

董靖波

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20589

[摘要] 针对寒区轻型钢人行天桥稳定性偏弱、安全储备不足的问题,结合实际工程开展有限元模拟与二阶弹性分析,探究结构屈曲特性及风雪耦合受力响应。结果显示,原结构跨中易发生侧扭屈曲,稳定系数未达规范标准。经截面优化、节点加固及增设减振装置后,结构整体稳定性显著提升,风振响应得到有效控制。研究成果可为寒区同类钢结构天桥的设计优化提供借鉴。

[关键词] 轻型钢结构; 人行天桥; 整体稳定性; 屈曲分析; 设计优化; 寒区工程

引言

轻型钢结构人行天桥凭借自重轻、跨度适应性强、装配化程度高、施工周期短等优势,广泛应用于城市市政过街工程。内蒙古呼和浩特地区属于典型寒温带大陆性季风气候,常年大风、冬季积雪量大、极端低温持续时间长,风、雪、低温多场耦合荷载对轻型柔性钢结构的整体稳定性产生显著不利影响。相较于常规地区,寒区轻型钢天桥更易出现侧扭屈曲、平面外失稳、风振超限等病害。当前国内研究多聚焦常温地区钢结构静力稳定分析,针对寒区多耦合极端工况下结构失稳机理及精细化优化技术研究较为匮乏。本文依托呼和浩特市实际市政天桥工程,基于非线性有限元理论开展整体稳定性能分析,精准定位结构薄弱环节,提出针对性优化方案并完成性能验证,为寒区轻型钢结构人行天桥的安全设计与提质优化提供工程借鉴。

1 工程概况

1.1 项目背景

本文研究对象为呼和浩特市学苑东街人行天桥,为城市轻型钢结构过街专用设施,主要服务周边中小学师生及市民过街,桥梁上跨城市主干道,无车辆荷载作用,属于轻型民用市政钢结构工程。项目场地气象参数严苛,依据建筑结构荷载规范要求,场地50年重现期基本风压 0.65kN/m^2 ,基本雪压 0.70kN/m^2 ,极端最低气温 -32.4°C ,大风、积雪、低温耦合作用为结构稳定控制核心工况。

1.2 结构原始设计参数

该天桥主桥为单跨简支钢管桁架结构,净跨38m,桥面全宽4.0m,双侧设置钢筋混凝土梯道,梯道净宽2.4m。主承重桁架采用Q345B低合金高强度结构钢,上下弦杆原始截面为 $200\times 200\times 8\text{mm}$,腹杆截面为 $120\times 120\times 6\text{mm}$;桥面采用花纹钢板铺装,下部采用C30钢筋混凝土独立基础,支座采用普通板式橡胶支座。结构设计人群荷载标准值 3.5kN/m^2 ,结构总自重85t,为典型大跨度轻型柔性钢结构。



图1 天桥整体实景图

1.3 设计难点

结合寒区工况与结构形式,该工程存在三大稳定控制难点:一是结构跨径大、自重轻、整体柔度高,竖向自振频率偏低,风振响应显著,易诱发动力失稳;二是内蒙古地区风雪耦合荷载叠加效应明显,远超单一荷载工况,结构侧扭屈曲风险大幅提升;三是原结构节点连接刚度偏弱,空间协同受力性能差,局部应力集中易引发整体稳定失效。

2 整体稳定性分析

2.1 分析方法与模型建立

采用Midas Gen有限元分析软件建立全桥整体精细化模

型，主桁架、腹杆、联系梁均采用梁单元模拟，共计划分梁单元 1286 个、结构节点 1342 个，精准还原结构实际构造与受力体系，如图 2 所示。分析采用二阶 P-Δ 弹性分析法，考虑几何非线性效应，同时按照钢结构设计规范要求，施加 L/1000 跨中初始几何缺陷，模拟施工偏差、结构变形等初始缺陷对整体稳定性的不利影响。

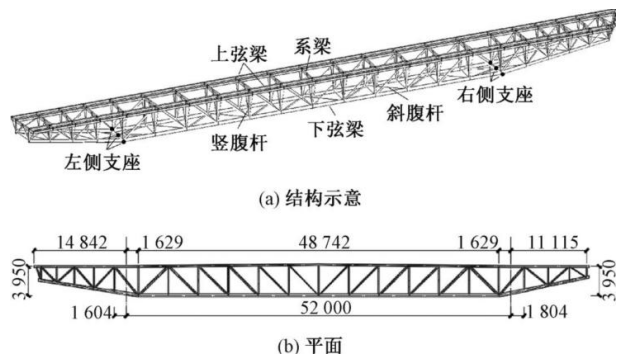


图 2 全桥有限元数值模型图

结合寒区最不利工况，确定四类荷载组合：①恒载+人群静力荷载；②恒载+横向风荷载；③恒载+雪荷载+纵向风荷载；④恒载+人群荷载+风雪耦合荷载（控制工况）。

2.2 屈曲分析结果

通过特征值屈曲分析，提取结构前 3 阶屈曲模态及临界荷载系数，临界荷载系数为判断钢结构整体稳定性的核心指标，寒区轻型钢结构规范限值要求 ≥ 2.2 ，原始结构分析结果如表 1 所示。

表 1 原结构屈曲分析结果

屈曲阶数	屈曲模态特征	临界荷载系数	规范限值
1	跨中主桁架侧扭屈曲	1.82	≥ 2.2
2	跨中腹杆平面外屈曲	2.05	≥ 2.2
3	梯道与主桥连接节点屈曲	2.18	≥ 2.2

由表 1 可知，原始结构前三阶屈曲模态均集中于跨中核心受力区域，整体失稳模式以侧扭屈曲为主，一阶临界稳定系数仅 1.82，与规范限值差距较大，结构整体稳定安全储备不足，在寒区风雪耦合荷载作用下存在失稳破坏风险。

2.3 荷载响应分析

在最不利风雪耦合荷载工况下，对原结构刚度、挠度及应力性能进行验算，结果显示：结构跨中最大竖向挠度

116.8mm，挠跨比 L/325，超出规范限值 L/400；横向风振最大位移 12.5mm，风致振动峰值加速度 0.17m/s^2 ，不满足人行天桥舒适度 0.15m/s^2 的控制标准；主桁架跨中底部最大压应力 285MPa，接近 Q345B 钢材设计强度 310MPa，应力储备极低，整体受力安全冗余不足。

3 设计优化方案

针对原结构稳定不足、刚度偏小、风振敏感等问题，从结构体系、构件截面、节点构造、减振措施四方面优化。

3.1 空间受力体系重构与侧扭稳定补强

原结构采用纯平面桁架受力体系，平面外抗扭刚度、侧向约束刚度极低，在横向风荷载与雪荷载偏心作用下，极易产生 P-Δ 二阶附加弯矩，诱发跨中侧扭屈曲，是结构整体稳定失效的主导因素。依据钢结构稳定设计标准空间结构协同设计原则，对结构体系进行空间化重构：在主桥 1/4 跨、跨中、3/4 跨关键变形控制截面设置三道矩形横向联系梁（ $150\times 150\times 8\text{mm}$ ），约束左右主桁架相对侧向位移；在主桁架上下弦杆之间对称布设 $\Phi 114\times 6\text{mm}$ 圆管斜向支撑，形成“桁架主体+横向系杆+斜撑”的超静定空间受力体系。该优化可有效分担平面外水平荷载，降低结构长细比，抑制二阶效应产生的附加内力，从体系根源上解决轻型桁架侧扭失稳问题，大幅提升结构整体屈曲临界荷载。

3.2 构件截面精细化优化与稳定承载力提升

原结构主次杆件截面尺寸偏小，杆件长细比超标，轴心受压构件稳定系数偏低，跨中受压弦杆稳定承载力接近极限状态，安全储备不足。基于轴心受压构件稳定计算公式 $\varphi Af \geq N$ ，以降低杆件长细比、提升截面惯性矩为核心目标，开展截面精细化优化：主桁架上下弦杆作为核心受压、受弯构件，截面由 $200\times 200\times 8\text{mm}$ 升级为 $220\times 220\times 10\text{mm}$ ，截面惯性矩提升约 28.6%，有效降低竖向弯曲变形与轴向压缩变形；腹杆作为传力关键构件，截面由 $120\times 120\times 6\text{mm}$ 优化为 $140\times 140\times 8\text{mm}$ ，大幅提升平面外抗屈曲能力。同时依据梯道受力梯度采用变截面设计，匹配受力特性实现轻量化设计。优化后杆件长细比均控制在规范允许范围内，结构整体抗压、抗弯稳定承载力显著提升，整体自重仅增加 8.2%，

实现刚度、稳定性与经济性的最优匹配。

3.3 节点刚性强化与寒区耐久优化

钢结构整体稳定性高度依赖节点约束刚度，原结构杆件采用铰接连接，节点转动自由度大，无法有效传递弯矩，导致结构整体刚度折减，放大屈曲变形。结合寒区低温、冻融工况，开展节点刚性强化与耐久优化：将全部主次杆件铰接节点改为 8.8 级 M24 高强螺栓+双面坡口焊接的刚接组合连接形式，刚接节点可有效约束杆件转动，传递弯矩与剪力，消除节点刚度弱化带来的整体稳定折减；节点板厚度由 12mm 加厚至 16mm，降低节点局部应力集中系数，避免局部先行屈曲引发整体失稳。同时替换普通橡胶支座为耐寒高阻尼橡胶支座，适配-30℃以下极端低温环境，规避低温导致的支座刚度退化、变形失效问题，保障寒区工况下结构约束体系持续稳定。

3.4 基于风振耦合的 TMD 减振稳定优化

项目地区常年大风频发，轻型钢天桥刚度小、自振频率低，易与近地风脉动荷载产生共振，引发风振超限、动力失稳，进一步削弱结构整体稳定性。基于结构动力减振理论，采用调谐质量阻尼器（TMD）开展动力稳定优化：根据原结构一阶竖向自振频率 2.8Hz，定制匹配频率的 TMD 减振系统，在跨中及 1/4 跨振动幅值最大的关键区域布设 6 套单重 500kg 阻尼器。通过 TMD 系统与主体结构的反向共振效应，抵消风致振动能量，抑制结构竖向与横向振动位移、加速度响应，解决寒区大风工况下轻型钢结构动力失稳与舒适度超标问题，从动力层面完善结构整体稳定体系，实现静力稳定与动力稳定双重保障。

4 优化效果验证

4.1 稳定性验证

对优化后结构重新开展特征值屈曲分析，结果如表 2 所示。优化后结构屈曲模态得到显著改善，无明显局部屈曲与大幅侧扭变形，各阶临界荷载系数均高于规范限值，整体稳定性满足寒区工程设计要求。

4.2 刚度与舒适度验证

优化后在最不利风雪耦合工况下，结构各项性能指标全

面达标：跨中最大竖向挠度 73.1mm，挠跨比 L/520，优于规范 L/400 限值；横向风振位移降至 6.8mm，风致振动峰值加速度 0.12m/s²，满足人行舒适度要求；主桁架跨中最大压应力 220MPa，较优化前降低 22.8%，远低于钢材设计强度，结构应力安全储备充足，节点区域应力分布均匀，无局部集中现象。

表 2 优化后结构屈曲分析结果

屈曲阶数	屈曲模态特征	临界荷载系数	规范限值
1	跨中主桁架轻微侧扭屈曲	2.57	≥2.2
2	腹杆整体屈曲	2.63	≥2.2
3	节点局部屈曲	2.71	≥2.2

5 结语

本文以呼和浩特市学苑东街轻型钢人行天桥为依托，开展寒区大跨度轻型钢人行天桥整体稳定性分析与设计优化研究。结果表明，原结构因柔度大、节点刚度不足，在风-雪耦合荷载作用下整体稳定性与风振舒适度不满足规范要求；通过空间体系构建、截面强化、节点刚接及 TMD 减振布设，结构整体稳定系数提升 41.2%，风振峰值加速度降低 29.4%，各项指标均满足寒区规范要求。研究创新点在于针对内蒙古寒区风-雪耦合极端工况，提出“体系-截面-节点-减振”四位一体优化技术，解决了轻型钢天桥稳定与风振控制难题。但本文未考虑长期低温环境下钢材疲劳性能衰减影响，后续可开展寒区环境下结构疲劳损伤演化规律研究，进一步完善轻型钢天桥全生命周期稳定设计理论。

[参考文献]

[1] 杨超. 城市复杂环境下钢结构人行天桥设计关键技术探究——以宜家印象城人行天桥为例[J]. 工程建设与设计, 2025(14)

[2] 曹自祥. 变高度钢桁架人行天桥参数敏感性分析[J]. 中国新技术新产品, 2025(13)

[3] 唐佳鑫;杨建荣. 人行天桥人致振动舒适度评价[J]. 施工技术(中英文), 2025(15)

[4] 凌中正. 西安市上林路-丰登路人行天桥方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(02)