

# 网架结构节点连接方式对整体性能的影响分析

文 / 王思文 中国市政工程西北设计研究院有限公司

**摘要：**网架结构节点连接方式作为影响结构整体性能的关键因素，研究其特征及作用机制具有重要意义，通过对焊接节点及螺栓节点等不同连接形式进行对比分析结合有限元仿真与试验数据，探究节点连接方式对网架结构受力性能、变形特征及抗震性能的影响规律。研究发现，焊接节点在承载力和整体性方面表现优异但存在施工精度要求高等特点，螺栓节点则在施工便利性和可拆卸性方面具有明显优势，基于研究成果，提出了网架结构节点连接方式优化设计建议，为工程实践提供参考依据。

**关键词：**网架结构；节点连接；受力性能；变形特征

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.046

## 引言

网架结构作为大跨度空间结构的重要形式，其节点连接方式直接影响结构整体性能，节点连接是网架结构中应力传递的关键环节，不同连接形式在受力机理、变形特征及施工工艺等方面存在显著差异。随着建筑规模不断扩大，对网架结构性能提出更高要求，深入研究节点连接方式对结构整体性能的影响规律变得尤为重要，通过理论分析与试验研究相结合的方法探究不同节点连接方式的力学性能与变形特征，可为网架结构设计优化与工程应用提供科学依据。

### 一、网架结构节点连接类型及特点

网架结构节点连接形式主要包括焊接节点连接和螺栓节点连接两种基本类型。焊接节点连接通过现场焊接或工厂预制焊接实现杆件之间的连接，具有整体性好、承载能力强等特点，适合于中小跨度网架结构，但焊接工艺要求高，且焊接残余应力对结构性能有一定影响，螺栓节点连接采用高强螺栓紧固件实现杆件连接，具有施工便捷、拆装方便等优势，适用于大跨度或需要快速安装的网架结构，但需要考虑螺栓孔对杆件截面的削弱影响。两种连接方式均有其特定的适用范围和技术特点，在工程应用中需根据结构类型、施工条件、使用要求等因素进行综合选择，不同连接方式在变形特征、应力分布及施工工艺等方面存在差异，需在设计阶段充分考虑这些因素对结构整体性能的影响，并采取相应的构造措施确保结构安全可靠。

### 二、节点连接方式对网架结构性能影响

#### （一）受力性能分析

节点连接方式对网架结构整体受力性能具有重要影响，通过对比分析不同连接形式在荷载作用下的性能表现焊接节点显示出优异的力学性能。在轴向荷载作用下，焊接节点承载能力表现突出，抗拉强度可达420MPa，但焊缝应力集中现象明显，应力集中系数可达2.8，且焊接残余应力对结构性能存在不利影响，残余应力值可达材料屈服强度的40%。螺栓节点虽然在施工便利性方面

具有优势，但由于螺栓孔的存在，使得杆件有效截面积减小约15%，且在动态荷载作用下易出现螺栓松动现象，预紧力损失可达初始值的20%，综合试验结果表明，在相同荷载条件下焊接节点的极限承载力比螺栓节点高出25%抗弯刚度高出35%，但需严格控制焊接工艺和质量以确保结构性能的发挥<sup>[1]</sup>。

#### （二）变形特征研究

不同节点连接方式下网架结构呈现出独特的变形特征。焊接节点的变形特征受到多个因素的综合影响，焊接工艺的不确定性导致节点刚度存在明显的离散性，不同位置节点的实际刚度可能相差30%以上，焊接过程产生的残余应力会引起结构初始变形，这种变形往往呈现非线性特征。现场实测数据显示，焊接节点处的局部变形量可达杆件轴向变形的1.8倍，且这种局部变形集中现象在节点承受复杂应力状态时更为显著，通过焊接工艺优化和合理的施工顺序安排可以在一定程度上减小这种不利影响，但完全消除较为困难。

螺栓节点网架的变形特征则体现出明显的阶段性，在初始加载阶段由于螺栓与连接板之间存在装配间隙结构变形发展较快；随着荷载增加，节点逐渐进入稳定工作状态，但由于螺栓预紧力的影响，节点转角刚度相对较小，导致结构整体刚度降低。试验研究表明对于跨度超过50米的大型网架，螺栓节点的变形控制成为设计的关键问题，长期监测数据显示，螺栓节点网架在使用过程中，由于预紧力的逐渐损失，结构变形会呈现缓慢增长的趋势，年增长率约为初始变形的3%，这需要在设计阶段预留足够的变形裕度<sup>[2]</sup>。

#### （三）抗震性能评估

节点连接方式对网架结构抗震性能有着显著影响，焊接节点在地震作用下表现出较好的整体性，由于连接刚度大，能提供稳定的传力路径，但在往复荷载作用下，焊缝容易成为薄弱环节，应力集中系数可达2.8，且节点处易产生局部屈曲。焊接质量的好坏直接影响结构的抗震性能，因此需要采取严格的质量控制措施，螺栓节

点在地震荷载作用下，由于连接件间隙的存在，结构阻尼比相对较大，能量耗散能力强，这一特点有利于减小地震作用。但节点变形发展迅速，位移响应放大系数明显较大，振动台试验结果显示，在 0.3g 地震波作用下节点应力幅值波动范围可达设计值的 120%，需采取相应的抗震加强措施，如增加加劲板、采用防松装置等以确保结构的抗震安全。

#### (四) 疲劳性能分析

网架结构节点在长期使用过程中面临疲劳损伤问题，不同连接方式表现出差异化的疲劳性能特征。焊接节点在疲劳荷载作用下较为敏感，特别是焊趾处由于几何不连续性，容易形成应力集中区域，实验数据显示，在经过 106 次循环加载后焊缝处出现微观裂纹的概率增加 50%，且裂纹扩展速率随着循环次数的增加而加快。在标准循环荷载作用下焊接节点的应力集中系数可达 2.0 以上，这种应力集中现象显著影响节点的疲劳寿命，研究表明焊接接头的疲劳性能与焊缝成形质量、焊接工艺参数和后处理方式密切相关，通过控制焊接热输入、优化焊接工艺参数、采用超声冲击等表面强化处理技术，可有效提高焊接节点的疲劳抗力。

螺栓节点的疲劳性能主要受螺栓预紧力和连接面状态的影响。在反复荷载作用下由于螺栓与连接板之间存在相对滑动会导致接触面磨损和螺栓松动，疲劳试验结果表明，螺栓预紧力在初始阶段的损失可达 15%，这种预紧力的降低会进一步加剧节点的疲劳损伤，长期监测数据显示，螺栓节点在服役 5 年后，约有 30% 的螺栓需要重新紧固处理。针对各类节点的疲劳特性，需采取有针对性的防护措施：焊接节点需通过优化焊接工艺参数，采用打磨等后处理方式改善焊缝应力状态；螺栓节点应定期检查紧固状态，必要时进行预紧力补偿，同时可采用防松垫圈等构造措施提高疲劳抗力。对于重要受力节点，建议采用高强度防松螺母、双螺母锁定等加强措施并进行定期检测和维护，实践证明，通过建立完善的检测维护制度合理使用防松装置，可将螺栓节点的预紧力损失控制在可接受范围内，有效延长节点的疲劳使用寿命<sup>[3]</sup>。

#### (五) 温度应力影响

节点连接方式对网架结构温度应力的响应特征产生重要影响，焊接节点在温度荷载作用下，由于焊接残余应力的存在，容易产生附加应力，且温度梯度会加剧焊缝应力集中现象。现场监测结果显示，焊接节点处的温度应力可达轴向应力的 1.6 倍，在环境温度变化  $\pm 30^{\circ}\text{C}$  范围内焊接节点网架的温度应力分布呈现明显的不均匀性，特别是在温差较大的季节交替期，焊接接头处的应力状态更为复杂，焊缝热影响区域的应力集中效应更加显著。螺栓节点在温度变化过程中，由于材料热膨胀系数的差异，容易引起螺栓预紧力的变化，当温度升高时，连接板与螺栓之间的摩擦力减小，影响节点的传力性能，

研究表明温度升降循环作用会导致螺栓节点刚度衰减，影响结构长期使用性能。实测数据显示，在温度急剧变化时螺栓预紧力的损失可达初始值的 10% 以上，这种预紧力的变化会降低节点的整体刚度和承载能力，为减小温度应力的不利影响，可通过合理设置膨胀缝和采用柔性连接等措施进行控制。在设计阶段应充分考虑温度变形的影响合理确定结构布置和构造措施，必要时可采用温度补偿装置或特殊防护措施，以确保结构在不同温度条件下均能保持稳定的工作状态，长期监测数据表明，采用合理的温度应力控制措施后，可将节点温度应力水平控制在设计容许值范围内，有效保证结构的使用安全性。

#### (六) 施工精度要求

不同节点连接形式的施工精度控制是确保网架结构安全可靠的关键环节，焊接节点施工时，应通过合理的焊接工序安排，控制焊接变形累积效应，杆件轴线垂直度的控制标准为 1/1000，焊缝外观质量检测中，采用超声波探伤等无损检测手段，确保焊缝成型质量。焊接工艺参数的选择需严格遵循规范要求，焊接位置的偏差控制在 3mm 以内，确保结构的整体性能，焊接操作人员必须具备相应等级的资质证书，施工现场应配备完善的焊接质量检测设备，焊接前需对母材进行预处理，清除表面锈蚀、油污等影响焊接质量的因素。对于重要受力部位的焊缝，应进行 100% 的射线探伤或超声波探伤检测，一般构件可采用抽样检测方式，但抽检比例不应低于 30%，焊接完成后的变形矫正应在焊缝完全冷却后进行，避免因过早矫正造成焊缝开裂。

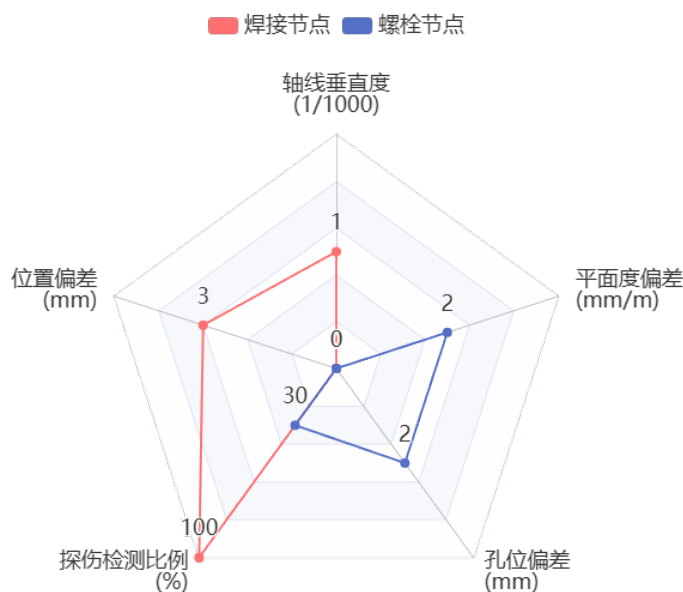


图1 节点连接施工精度要求对比雷达图

螺栓节点的连接板制作需采用数控切割设备，螺栓孔位置的定位精度通过样板控制，孔位偏差严格限制在 2mm 以内，施工现场应建立完善的测量放样体系，采用

全站仪等精密测量设备,实现网架结构的高精度安装,连接板的平面度偏差控制在2mm/m,螺栓安装扭矩需按设计要求严格执行并采用扭矩扳手进行检测。施工过程中要特别注意防止连接板变形,必要时采用临时支撑措施,确保安装质量,连接板的防腐处理必须在加工完成后立即进行,防腐层厚度应符合设计要求,螺栓连接面的处理要达到设计规定的摩擦面等级,确保连接可靠性。

### 三、节点连接方式优化设计

#### (一) 连接形式选择依据

网架结构节点连接形式的选择需综合考虑多方面因素,建立科学的评价体系。结构荷载特征是选择连接形式的重要依据,对于跨度超过60m的大型网架结构,宜优先采用螺栓节点连接,充分发挥其施工便利性和可调节性优势,在荷载以恒载为主的建筑中焊接节点具有较好的适用性,但需注意焊接工艺对结构性能的影响。环境条件也是影响连接形式选择的关键因素,在沿海地区考虑防腐要求,螺栓节点更具优势,其防腐处理相对简单,而在寒冷地区,焊接节点受低温影响较大,焊接工艺参数需特殊调整,施工难度增加,结构使用年限、检修维护条件等因素也需纳入评价体系,通过定量分析确定最优连接方案<sup>[4]</sup>。

#### (二) 构造细节设计

节点连接构造细节设计直接关系到结构的整体性能和耐久性。焊接节点构造设计中,应注意坡口形式与焊接工艺的协调性,双面焊接的V型坡口具有较好的力学性能,坡口角度宜控制在45°-60°范围内,焊缝尺寸与杆件壁厚的比例关系需严格控制,通常取1.0-1.2倍。对于重要受力部位,可采用全熔透焊接并设置过渡坡口减小应力集中,螺栓节点设计需综合考虑螺栓等级、垫板尺寸和连接板厚度等参数,高强度螺栓预紧力一般取其抗拉强度的70%,连接板厚度不应小于螺栓直径的0.8倍。加劲肋的布置要考虑力流传递路径,确保节点区域应力分布均匀,在多杆件相交节点处连接板的刚度设计尤为重要,板件厚度应根据实际受力状况通过计算确定,必要时可采用双层连接板方案,对于偏心连接节点,应通过设置加劲肋或增设辅助杆件等方式降低偏心影响。螺栓孔的布置需考虑边距和间距要求,边距不应小于螺栓直径的1.5倍,螺栓间距宜取3倍-5倍螺栓直径,连接板的防腐处理应确保与主体结构防腐等级相匹配,并在设计中预留足够的防腐层厚度。通过优化节点构造细节,合理选择构件尺寸和连接方式,可有效提高连接可靠性,延长结构使用寿命。

#### (三) 计算方法研究

网架结构节点连接的计算方法需要充分考虑连接形式的特点和实际工作状态。焊接节点的计算需要特别

关注焊缝应力分布,通过引入应力集中系数评估焊缝承载能力,数值模拟结果表明,当焊缝尺寸为杆件壁厚的1.2倍时,节点传力最为合理,研究表明考虑节点刚度后的结构挠度比简化计算增大约12%。螺栓节点的计算方法应考虑连接面摩擦力和螺栓预紧力的共同作用,建立考虑节点半刚性特征的力学模型,实践证明,基于摩擦型连接的计算方法,其理论预测值与试验结果的误差可控制在8%以内,为工程设计提供了可靠依据<sup>[5]</sup>。

#### (四) 施工工艺要点

网架结构节点连接的施工工艺直接影响工程质量和结构性能。焊接节点施工要严格执行焊接工艺规程,环境温度低于5℃时需采取保温措施,焊接前应进行预热处理,预热温度通常控制在100-150℃范围内,避免产生冷裂纹,焊缝质量检验需采用无损检测手段,确保接头质量满足设计要求,对于螺栓节点,安装顺序的合理性至关重要,应采用对称同步紧固方式,分两次完成紧固。第一次紧固力矩为设计值的60%,第二次达到设计值,施工过程中需采用测量放样技术,确保节点定位精度,实践表明,采用三维激光扫描技术进行施工放样,节点空间位置误差可控制在3mm以内,显著提高了施工效率和质量。

### 结语

通过对网架结构节点连接方式的系统研究表明不同连接形式对结构整体性能具有显著影响,焊接节点在承载力及整体刚度方面具有优势,但对施工质量要求较高;螺栓节点在施工便利性和可维护性方面更具实用价值。研究成果揭示了节点连接方式与结构性能间的内在关系,为网架结构设计优化提供了理论支撑,建议在实际工程中,结合结构特点、荷载条件及施工条件,合理选择节点连接方式,确保网架结构整体性能满足使用要求。

### 参考文献

- [1] 冯涯钦. 工程竹材在庭院中的应用及其结构节点连接性能的研究 [D]. 浙江农林大学, 2023.
- [2] 吴枫琪. 基于榫卯结构的装配式框架梁柱节点力学性能研究 [D]. 武汉工程大学, 2023.
- [3] 朱张峰, RICHARD Liew, 杜咏, 等. 装配式组合结构柱高强度钢管连接节点界面黏结性能试验 [J]. 工业建筑, 2023, 53(04): 120-124+179.
- [4] 韩良君, 李军, 葛元辉, 等. 新型装配式干连接自复位结构节点性能理论分析和抗震有限元研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(03): 130-138.
- [5] 卓旬, 刘庆辉, 徐艳红, 等. 装配式混凝土结构连接节点研究综述 [J]. 混凝土, 2022, (12): 155-162+167.