大跨度钢桁架结构荷载作用下稳定性优化设计探析

朱　婧

呼和浩特市建设工程施工图审查中心有限公司　内蒙古　呼和浩特　010010

摘　要：大跨度钢桁架结构因跨度大、杆件多、受力路径复杂，其稳定性问题往往比强度问题更具控制性，是结构设计中的核心关切。本文从大跨度钢桁架结构的受力特征出发，系统分析了恒荷载、活荷载、风荷载、温度荷载及地震荷载等主要荷载类型对结构稳定性的影响机理，阐述了整体失稳、局部失稳及有侧移失稳等典型失稳模式的形成条件。在此基础上，从构件截面优化、支撑体系布置、节点刚度控制、结构拓扑调整及预应力技术应用等维度，提出系统的稳定性优化设计策略。本文还探讨了初始几何缺陷、残余应力等非线性因素对稳定承载力的削弱效应，并强调了基于二阶弹性分析与几何非线性的设计方法在稳定性优化中的必要性。

关键词：大跨度钢桁架；稳定性；荷载作用；优化设计；整体失稳

引言

随着建筑功能需求的不断提升，桁架结构的跨度纪录被持续刷新——百米级甚至两百米级的大跨度钢桁架已不鲜见。跨度增大带来的直接后果是结构柔度增加、稳定问题凸显。在诸多工程事故与结构失效案例中，由稳定性不足引发的整体垮塌或局部屈曲所占比例远超强度破坏，这使得稳定性设计在大跨度钢桁架中的地位举足轻重。稳定性问题的复杂性在于其不仅与构件的截面承载能力有关，更与结构整体的刚度分布、支撑条件、荷载作用方式及初始几何缺陷等因素深度耦合。传统设计方法常将强度计算与稳定校核相对独立处理，以计算长度系数简化稳定分析，这种方式在跨度不大、杆件布置规则的情况下尚可满足工程精度；但对于大跨度空间桁架体系，杆件之间相互约束关系复杂，失稳模态多样，简化的计算长度法难以准确捕捉结构的真实稳定承载力。因此，从稳定性角度出发对桁架结构进行优化设计，具有重要的理论意义和工程实用价值。

1 大跨度钢桁架结构的受力特征与荷载类型

1.1 结构受力基本特征

大跨度钢桁架结构通常由上弦杆、下弦杆、腹杆（包括竖杆和斜杆）以及节点板构成。在外荷载作用下，桁架杆件主要承受轴心力——上弦杆在正弯矩区段受压、下弦杆受拉，腹杆则根据其布置方向分别承担拉力或压力。与实腹式梁不同，桁架结构的受力特点是“化弯为轴”——将整体弯矩转化为上下弦杆的轴力拉压，以此实现材料的高效利用。然而，这种受力模式也决定了受压杆件的稳定性成为控制设计的关键因素。桁架的高度、节间长度、支撑布置及杆件的截面特性，共同决定了结构在荷载作用下的整体刚度和稳定承载能力。

1.2 主要荷载类型及其作用特征

大跨度钢桁架结构在其服役期内需承受多种类型的荷载作用，各类荷载对稳定性的影响方式和程度各不相同。恒荷载是结构自重的体现，对于大跨度桁架而言，自重往往占总荷载的较大比例。自重沿桁架全长分布，使上弦杆在全跨范围内承受较为均匀的压力，是决定弦杆稳定设计的主要荷载成分。活荷载包括屋面使用荷载、雪荷载、积灰荷载等。其分布具有不确定性——可能为全跨满布，也可能为半跨不均匀布置。半跨活荷载作用下，桁架可能出现局部杆件内力反向，使原本受拉的杆件转为受压，这对稳定设计构成了额外的复杂因素[1]。风荷载对大跨度桁架的影响尤为显著。由于桁架结构透风率较高，风荷载主要表现为作用于屋面上下表面的风压差，以及可能出现的风吸力。风吸力作用下，下弦杆可能由受拉转为受压，改变了结构的受力格局。此外，风荷载的脉动特性可能诱发结构振动，进一步加剧稳定问题。温度荷载在大跨度结构中不可忽视。桁架在温度变化下产生自由伸缩，当受到支座约束或结构自身超静定约束时，将产生温度应力。对于大跨度钢桁架，温度效应引起的杆件附加轴力可能与主力叠加，推高受压杆件的应力水平，降低稳定安全裕度。地震荷载对桁架结构的作用主要表现为水平惯性力。由于大跨度桁架通常高度较大，地震作用产生的倾覆力矩使柱脚和下部支承结构承受较大负担，也可能使桁架整体产生侧向位移，诱发有侧移失稳。

2 大跨度钢桁架结构的稳定性问题分析

2.1 整体稳定性

整体稳定性是指桁架结构在荷载作用下保持原有平衡状态的能力。对于大跨度钢桁架，整体失稳主要表现为两种形式：一是平面内整体失稳，即桁架在其自身平面内发生侧向弯曲与竖向挠曲的耦合变形，最终丧失承载能力；二是平面外整体失稳，即桁架在平面外发生扭转或侧向弯扭屈曲。对于上承式或下承式桁架，若横向支撑布置不足，平面外失稳的临界荷载可能远低于平面内失稳临界荷载，形成结构的薄弱方向。整体稳定承载力与结构的抗弯刚度、抗扭刚度、支承条件及荷载分布密切相关，是稳定性优化的首要关注对象。

2.2 局部稳定性

局部稳定性涉及单个杆件或板件的稳定问题。在大跨度桁架中，受压弦杆和受压腹杆的杆件稳定性是最基础的局部稳定问题。当杆件的长细比超过一定限值，杆件将在远未达到材料屈服强度时发生弯曲失稳。此外，由钢板焊接组成的 H 形或箱形截面杆件，其翼缘和腹板自身也存在板件局部屈曲的可能[2]。局部失稳虽不等同于结构整体破坏，但局部杆件的退出工作将导致内力重分配，可能触发相邻杆件的连锁失稳，最终危及整体安全。

2.3 有侧移失稳与二阶效应

对于下部支承刚度较弱的大跨度桁架结构，在水平荷载或不对称竖向荷载作用下，结构可能产生显著的侧向位移。位移的存在使竖向荷载产生附加倾覆力矩——即 P-Δ 效应，这种二阶效应对稳定承载力的削弱作用在大跨度柔性结构中尤为突出。二阶弹性分析通过迭代计算结构变形后的平衡状态，能够较为真实地反映稳定承载力，是现代大跨度钢结构设计的核心方法之一。然而，许多设计者对二阶效应的重视程度仍显不足，习惯于采用线性分析加放大系数的方式，这在特定情况下可能低估失稳风险。

2.4 初始缺陷与残余应力的影响

实际工程中的钢桁架结构不可避免地存在初始几何缺陷（构件初弯曲、节点初始偏位、安装偏差等）和残余应力（焊接残余应力、冷弯残余应力等）。这些非线性因素对稳定承载力的影响不可小觑。初始缺陷使杆件在加载之初即存在附加弯矩，降低了构件的屈曲临界力，其影响程度与缺陷幅值和构件长细比密切相关。残余应力则改变了杆件截面的有效受力区域，使部分材料提前进入塑性，削弱了截面的整体稳定承载能力。因此，在稳定性优化设计中引入初始缺陷和残余应力的考虑，是提高设计可靠性的必要举措。

3 稳定性优化设计策略

3.1 构件截面的合理选型与优化

截面选型是稳定性优化的首要环节。对于受压弦杆和受压腹杆，在相同的截面面积条件下，应优先选用回转半径较大的截面形式。箱形截面和方形钢管截面因其在弱轴方向具有较大的回转半径，是桁架受压杆件的优选截面类型；H 形钢截面则需注意强弱轴方向的稳定差异，适当控制弱轴长细比。对于以承受轴力为主的杆件，不宜采用过于细柔的截面，长细比宜控制在规范限值的下限范围内。在截面尺寸确定上，应综合杆件受力大小、有效长度和局部稳定要求进行多方案比选，避免经验主义导致的截面偏小或过度保守。此外，杆件截面的分级与标准化对于整体经济性具有重要意义[3]。一个合理的优化设计应在满足稳定承载要求的前提下，尽可能减少截面规格的种类，便于钢材采购和加工制作，同时也使节点构造更加规整。截面分级的基本原则是将受力相近的杆件归并为同一规格，避免“一对一”定制导致的材料浪费和制作成本上升。

3.2 支撑体系布置与平面外稳定加强

平面外支撑是大跨度桁架结构保证侧向稳定的关键措施。优化设计的核心在于使支撑系统的刚度与桁架平面外变形需求相匹配。上弦平面应设置足够的横向水平支撑，将各榀桁架的上弦连成整体，约束其平面外位移；下弦平面同样应设置水平支撑，尤其在受拉弦杆可能因风吸力转为受压时，下弦支撑的必要性显著上升。相邻桁架之间应设置垂直支撑或系杆，形成几何不变体系，减小受压弦杆的计算长度。支撑的布置间距并非越小越好，应根据桁架的跨高比、荷载大小和支承条件综合确定，在满足稳定要求的前提下尽量减少支撑数量，以获得更为开阔的建筑使用空间。对于超长或超大跨度的桁架结构，可沿纵向设置多道横向支撑加强带，将结构在平面外方向划分为若干稳定区段。

3.3 节点刚度的合理控制

节点刚度是影响桁架稳定性的重要但常被忽视的因素。理论上，桁架杆件的计算长度系数与节点的转动约束刚度相关——当节点为理想铰接时，杆件的计算长度系数为 1.0；当节点为刚性连接时，系数可降低至 0.5 至 0.7。实际工程中，焊接节点和螺栓节点具有一定的转动刚度，既非理想铰接也非完全刚接，其半刚性特性对杆件的有效长度和稳定性有不可忽略的影响。优化设计的策略在于：对主要受压弦杆的节点应适当增加节点板的

厚度和焊缝尺寸，提高转动约束刚度，有效减小弦杆的计算长度；而对次要腹杆节点，则可在满足传力要求的前提下采用铰接构造，避免不必要的刚度贡献导致计算模型失真。节点设计的核心原则是受力路径明确、构造简洁可靠，避免因节点刚度突变引起局部应力集中和提前失稳。

3.4 结构拓扑与几何构型的优化

结构拓扑优化是从结构体系的宏观层面提升稳定性的重要手段。桁架的高度是影响整体稳定性的最敏感参数之一——高度增加使上下弦杆的轴力减小，从而降低了弦杆的受压需求，但同时也增加了腹杆的长度和自重，需在二者之间寻求最优平衡。一般经验表明，简支钢桁架的高跨比在 1/10 至 1/15 之间较为经济合理。桁架的节间划分同样影响稳定性，节间过多虽可减小弦杆的节间弯矩，但腹杆数量增加提高了结构的超静定程度，也可能造成内力重分配复杂化[4]。在几何构型方面，采用变高度桁架（如折线形或拱形桁架）往往比等高桁架具有更好的稳定性能。变高度桁架的弦杆内力分布与弯矩图更加吻合，能够更高效地利用材料，同时降低了跨中区域的压应力水平，有利于整体稳定。对于特别大的跨度，可考虑采用张弦桁架体系——在桁架下弦设置预应力拉索，形成“撑杆 + 拉索”的协同工作模式，显著提高结构刚度和稳定承载能力。

3.5 预应力技术的应用

预应力技术是提升大跨度钢桁架稳定性的主动控制手段。其基本思路是在桁架的下弦或特定位置施加预应力，使受压弦杆产生预拉力或减小其工作状态下的压应力，从而推迟失稳的发生。常见的预应力施加方式包括下弦拉索张拉、支座顶升或设置预应力撑杆。预应力桁架不仅提高了稳定承载能力，还可以有效控制使用阶段的挠度变形，改善结构的外观效果和使用性能。需要指出的是，预应力设计应进行全过程分析——考虑预应力施加过程中结构的受力和变形状态、预应力损失以及长期效应，确保预应力的效果在结构全生命周期内得以保持。

3.6 非线性分析方法的应用

稳定性优化的有效性依赖于准确的分析方法。对于大跨度钢桁架，线性屈曲分析虽然计算简便，但其给出的临界荷载往往偏高，因为它忽略了初始缺陷、残余应力和几何非线性等因素的影响。因此，在优化设计过程中应引入考虑几何非线性（P-Δ 效应和 P-δ 效应）的二阶弹性分析或弹塑性稳定分析。该方法通过增量迭代求解结构在逐级加载下的平衡路径，可以更真实地反映结构的稳定承载力。同时，在分析中引入等效初始几何缺陷（通常按结构最低阶屈曲模态的比例施加）和焊接残余应力的等效模型，使分析结果更加贴近实际。将非线性分析结果反馈至优化过程，有助于识别结构的真正薄弱环节，实现“有依据的优化”而非“经验性的调整”。

4 结语

大跨度钢桁架结构的稳定性优化设计是一项涉及多因素、多层次的复杂课题。本文从荷载作用特征出发，系统揭示了大跨度钢桁架整体失稳、局部失稳及有侧移失稳的机理，阐明了初始缺陷和残余应力对稳定承载力的削弱效应。在此基础上，提出了涵盖截面选型、支撑体系布置、节点刚度控制、拓扑构型优化、预应力技术应用以及非线性分析方法等多维度优化策略。核心认识在于：稳定性优化不应是对强度设计的被动补充，而应作为大跨度桁架结构设计的主动导向；优化的本质是在各类荷载作用下，通过合理配置结构的刚度、强度和质量分布，使结构在各种可能的失稳模式下具有均衡的安全裕度。随着结构分析方法不断进步和设计理念持续更新，稳定性优化设计将朝着更加精细化、全概率化的方向发展，为大跨度钢桁架结构的安全与经济提供更强有力的保障。

参考文献

[1] 陈以一, 王帆, 赵宪忠. 大跨度钢桁架结构整体稳定性能及设计方法研究 [J]. 建筑结构学报,2022,43(6):23-34.

[2] 童根树, 张磊. 钢桁架受压杆件计算长度取值方法的再探讨 [J]. 工程力学,2023,40(4):178-186.

[3] 刘锡良, 李国强. 初始几何缺陷对大跨度桁架稳定承载力的影响分析 [J]. 土木工程学报,2024,57(2):56-65.

[4] 范峰, 沈世钊. 大跨空间钢结构稳定性分析的二阶效应与非线性方法 [J]. 建筑结构,2023,53(10):45-52.