

# 大跨度空间钢结构节点力学特性及优化设计方法

户振法

410522199101055215

**摘要:** 大跨度空间钢结构凭借跨度大、自重轻、造型灵活等优势,广泛应用于体育馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑。节点作为钢结构的传力枢纽,其力学性能直接决定整体结构的承载安全性、稳定性与耐久性。本文首先梳理大跨度空间钢结构常见节点类型及构造特点,通过试验分析与有限元模拟相结合的方式,探究节点的受力机制、破坏形态及关键影响因素,随后提出针对性的节点优化设计原则与具体方法,结合工程实例验证优化方案的可行性与有效性,为大跨度空间钢结构节点的设计、施工与优化提供理论支撑与工程参考。

**关键词:** 大跨度空间钢结构; 节点; 力学特性

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.018

## 引言

随着我国建筑行业发展,大跨度、大空间建筑需求增长,空间钢结构因优异力学性能和建筑表现力成首选结构形式。其结构形式有网架、网壳等,核心受力特点是荷载传递路径复杂,节点是连接杆件关键部位、受力薄弱环节之一。节点设计合理性影响结构整体性能,力学特性不足易引发应力集中等问题及安全隐患。近年来,国内外学者对钢结构节点力学特性开展大量研究,揭示不同类型节点受力规律,但复杂荷载下节点非线性力学响应及优化设计仍待完善。大跨度空间结构受动荷载影响显著,对节点承载能力等提出更高要求。

## 1 大跨度空间钢结构常见节点类型及构造特点

大跨度空间钢结构节点的类型繁多,根据连接方式、构造形式及受力特点,可分为以下几类,不同类型节点的构造差异直接决定其力学性能与适用场景。

### 1.1 焊接节点

焊接节点是大跨度空间钢结构中应用最广泛的节点形式,通过焊接将各杆件牢固连接,具有连接刚度大、传力可靠、构造紧凑等优点。常见的焊接节点包括对接焊接节点、角接焊接节点、T形焊接节点等,适用于网架、桁架等结构的杆件连接。焊接节点的构造核心是保证焊缝质量,焊缝需与杆件截面匹配,避免出现未焊透、夹渣、气孔等缺陷,否则会显著降低节点的承载能力。但焊接过程中会产生焊接应力与焊接变形,若处理不当,易导致节点出现裂纹,影响结构的耐久性。

### 1.2 螺栓连接节点

螺栓连接节点分为普通螺栓连接与高强度螺栓连接,其核心优势是拆装方便、施工便捷,无需现场焊接,

可有效避免焊接应力的影响,适用于装配式钢结构及需要后期维护的场景。高强度螺栓连接节点凭借其优异的抗剪、抗拉性能,在大跨度空间钢结构中应用日益广泛,如网架结构的螺栓球节点、桁架结构的端板螺栓节点等。螺栓连接节点的构造关键是保证螺栓的预紧力,确保节点连接的紧密性,同时需考虑螺栓的布置方式,避免出现应力集中现象。但螺栓连接节点的刚度相对焊接节点较低,在大荷载作用下易出现螺栓松动、节点变形等问题。

### 1.3 球节点

球节点是大跨度空间网架、网壳结构的核心节点形式,分为焊接空心球节点与螺栓球节点。焊接空心球节点由两个半球焊接而成,杆件与球体通过焊接连接,具有传力均匀、空间适应性强等优点,可实现多根杆件的交汇连接,适用于复杂空间结构的节点设计。螺栓球节点由球体、螺栓、锥头、封板等部件组成,杆件通过螺栓与球体连接,拆装灵活,便于工业化生产与现场安装,但其承载能力受螺栓强度与球体加工精度的影响较大。球节点的构造特点是节点自由度高,可适应不同方向杆件的受力需求,减少应力集中。

### 1.4 相贯节点

相贯节点又称管管节点,是将两根或多根钢管直接相交焊接而成,无需额外的节点连接件,具有构造简洁、外形美观、传力直接等优点,适用于大跨度桁架、网壳等钢管结构。相贯节点的受力特点是荷载通过钢管壁直接传递,节点的力学性能与钢管的相交角度、壁厚、管径比等参数密切相关。根据钢管的相交形式,可分为T形、Y形、K形、X形等相贯节点,其中K形相贯节点因受力复杂,易出现应力集中,是工程设计中的重点关

注对象。

## 2 大跨度空间钢结构节点力学特性分析

大跨度空间钢结构节点的力学特性主要包括承载能力、刚度、延性、疲劳性能及抗火性能等，其性能受节点类型、构造参数、材料性能、荷载形式等多种因素影响。本文通过试验分析与有限元模拟相结合的方式，系统探究节点的力学响应规律。

### 2.1 试验分析方法

节点力学性能试验是探究节点受力特性的直接方法，制作节点试件，施加模拟实际工程荷载，测试应力分布、变形、破坏形态及承载能力。试验加载分静力与动力加载，静力测静力承载与刚度，动力测疲劳与抗震性能。

以相贯节点为例，用万能试验机施加荷载，用应变片等采集数据，分析应力分布。结果表明，相贯节点应力集中在焊缝处，K形相贯节点支管与主管连接处应力集中系数大，易成薄弱环节。荷载达极限时，破坏形式为支管屈曲、主管壁撕裂或焊缝开裂。

球节点试验中，对螺栓球节点施轴向拉力与弯矩，测抗拉承载与抗弯刚度。螺栓球节点承载主要受螺栓强度与球体抗压强度限制，螺栓屈服或球体塑性变形时节点失效。焊接空心球节点破坏表现为焊缝开裂或自身塑性变形，承载能力高于同规格螺栓球节点。

### 2.2 有限元模拟分析

有限元模拟技术凭借高效、精准、成本低等优势，成为节点力学特性分析重要手段。通过有限元软件建三维模型，模拟受力过程，分析应力分布、变形与破坏形态，弥补试验分析局限，为节点设计与优化提供依据。

模拟中，需根据节点构造与受力特点选单元类型、材料本构模型及边界条件。焊接节点要考虑焊缝质量，螺栓连接节点要模拟预紧力。结果显示，模拟得到的应力分布、极限承载能力与试验基本一致，误差合理，说明有限元模拟可用于节点力学特性分析。

通过模拟可探究构造参数对节点力学性能的影响，如相贯节点增加主管壁厚等可提升承载能力，螺栓球节点增大螺栓直径等可增强刚度与承载能力。此外，还可用于复杂荷载作用下节点力学响应分析，如地震、风荷载下变形与疲劳损伤规律分析。

### 2.3 关键影响因素分析

材料性能：节点力学性能受材料强度、塑性、韧性等指标影响。采用高强度钢材可提升节点承载能力与刚

度，但焊接性能差，需合理焊接工艺避免缺陷。钢材疲劳性能对节点耐久性重要，大跨度空间钢结构节点受动荷载易出现疲劳裂纹，需选高疲劳强度钢材并优化构造。构造参数：节点构造参数是影响力学性能的核心因素，包括杆件截面尺寸、连接方式、焊缝尺寸、螺栓布置等。如相贯节点相交角度、壁厚比、管径比影响应力分布与承载能力；焊接节点焊缝高度、长度决定抗剪、抗拉能力；螺栓连接节点螺栓数量、间距影响连接刚度与稳定性。荷载形式：大跨度空间钢结构节点承受静力与动力荷载，不同荷载形式对节点力学响应影响不同，静力荷载导致塑性变形与强度破坏，动力荷载引发疲劳破坏与振动变形。此外，荷载作用方向、大小及分布方式影响应力分布与破坏形态。施工质量：施工质量对节点力学性能影响大，焊接节点焊缝质量、螺栓连接节点预紧力、球节点加工精度等影响承载能力与稳定性。如焊接缺陷降低焊缝强度，螺栓预紧力不足使节点连接松动影响整体稳定性。

## 3 大跨度空间钢结构节点优化设计方法

节点优化设计的核心目标是在保证节点力学性能（承载能力、刚度、延性等）满足设计要求的前提下，降低工程成本、简化施工工艺、提升结构耐久性。结合节点的力学特性与影响因素，提出以下优化设计原则与具体方法。

### 3.1 优化设计原则

安全性原则节点优化设计首先需保证节点的承载能力、刚度及稳定性满足规范要求，能够承受实际工程中的各种荷载作用，避免出现强度破坏、刚度不足、疲劳失效等问题，确保整体结构的安全运行。经济性原则在保证安全性的前提下，优化节点构造，减少材料用量，降低加工与施工成本。例如，通过合理选择节点类型、优化杆件截面尺寸，避免过度设计，实现材料的高效利用。施工便捷性原则优化节点构造，简化加工与安装工艺，便于工业化生产与现场施工，提高施工效率，减少施工误差。例如，优先采用螺栓连接节点，避免复杂的现场焊接，降低施工难度。耐久性原则考虑节点的长期使用性能，优化节点构造，提高节点的抗腐蚀、抗疲劳能力，减少后期维护成本。例如，对节点进行防腐处理，优化节点构造，降低应力集中，避免疲劳裂纹的产生。

### 3.2 具体优化设计方法

节点类型优化选择：根据结构受力特点、跨度大小、施工条件等合理选节点类型。大跨度网架、网壳结构优先用球节点，其空间适应性强、传力均匀；桁架结构依

受力选焊接或高强度螺栓连接节点,需现场拆装优先用螺栓连接节点;钢管结构优先用相贯节点,要优化相交角度与截面参数以降低应力集中。

**构造参数优化:**针对不同节点类型优化构造参数提升力学性能。相贯节点优化支管与主管管径比、壁厚比及相交角度,设加劲肋;螺栓球节点优化螺栓直径、球体尺寸及锥头结构,用高强度螺栓;焊接节点优化焊缝尺寸与形式,设过渡圆角。

**材料优化选择:**根据节点受力需求合理选钢材类型与规格。承受大荷载用高强度钢材,承受动荷载选疲劳强度高的钢材,同时考虑焊接与加工性能。

**施工工艺优化:**优化节点加工与施工工艺提高质量与效率。焊接节点用高效工艺、控制参数、退火处理;螺栓连接节点用专用工具控制预紧力、优化布置;球节点用高精度设备保证加工精度。

**基于有限元的参数化优化:**利用有限元模拟技术建节点参数化模型,以应力集中系数、极限承载能力、材料用量等为目标函数对构造参数多目标优化。如有有限元软件优化模块优化相贯节点参数,减少材料用量、降低成本。

## 4 工程实例分析

为验证节点优化设计方法的可行性与有效性,以某大型会展中心大跨度空间网架结构为例,对其节点进行优化设计与力学性能分析。该会展中心网架结构采用螺栓球节点连接,原设计节点存在应力集中明显、材料用量较大、施工效率较低等问题,需进行优化设计。

### 4.1 原节点存在的问题

原设计采用普通螺栓球节点,通过有限元模拟与现场检测发现,原节点存在以下问题:一是节点应力集中系数较大,在荷载作用下,螺栓与球体连接处应力集中明显,易出现螺栓屈服;二是球体尺寸过大,材料用量较多,增加了工程成本;三是螺栓预紧力控制难度大,现场施工效率较低。

### 4.2 节点优化设计方案

根据节点优化设计原则与方法,结合工程实际情况,提出以下优化方案:一是优化节点类型,将普通螺栓球节点改为高强度螺栓球节点,提升节点的承载能力与刚度;二是优化构造参数,合理减小球体直径、增大螺栓规格并调整杆件尺寸,同时增大螺栓预紧力,降低应力

集中系数;三是优化施工工艺,采用专用工具精准控制螺栓预紧力,提高施工效率与质量;四是在球体与杆件连接处设置过渡圆角,进一步降低应力集中。

### 4.3 优化效果分析

通过有限元模拟与现场试验,对优化后的节点力学性能进行分析,结果表明:优化后的节点应力集中系数显著降低,极限承载能力明显提升,完全满足设计要求;球体材料用量合理减少,工程成本有效降低;螺栓预紧力控制精度大幅提升,施工效率显著提高。同时,优化后的节点在风荷载、地震荷载作用下的变形量显著减小,稳定性与耐久性得到有效提升,充分验证了优化设计方案的可行性与有效性。

## 5 结论

本文通过研究大跨度空间钢结构节点的类型、力学特性及优化设计方法,得出如下结论:大跨度空间钢结构节点有焊接、螺栓连接、球、相贯等类型,不同类型节点构造特点和力学性能差异显著,需依结构受力和施工条件合理选择。节点力学性能受材料、构造参数、荷载形式、施工质量等因素影响,应力集中是主要破坏诱因,可优化构造参数、提升施工质量降低应力集中。提出的节点优化设计方法,含节点类型、构造参数、材料、施工工艺及基于有限元的参数化优化,可提升节点力学性能、降低成本、简化工艺。工程实例表明,优化后节点在承载、刚度、经济性等方面显著提升,验证了方法的可行性与有效性,可为实际工程提供参考。随着大跨度空间钢结构发展,节点的力学特性与优化设计面临更多挑战。未来研究方向包括:开展复杂荷载下节点非线性力学响应研究,揭示疲劳破坏机制;研发智能节点、自修复节点等新型节点,提升耐久性与智能化水平;完善优化设计理论与方法,结合BIM、人工智能等新技术,实现节点智能化设计与优化,推动行业发展。

### 参考文献

- [1]王雷森.大跨度高空悬挑型钢混凝土组合结构施工技术[J].中国建筑装饰装修,2025(6).
- [2]胡昌德.大跨度建筑中空间网架结构的稳定性与优化设计分析[J].2025(9):200-202.
- [3]杨鑫,王琦,苏海龙,等.大跨度预应力张弦拱桁架结构干煤棚钢结构深化设计[J].陕西建筑,2024(6):24-30.