

大跨度空间网格结构风荷载响应及优化设计

谢佳伟

北京首钢国际工程技术有限公司

DOI:10.32629/bd.v9i6.4498

[摘要] 大跨度空间网格结构在建筑领域应用广泛,但其风荷载响应及设计优化面临诸多挑战。本文首先阐述其风荷载作用机制,指出风荷载具有随机性等特性,作用形式分静、动风荷载,且诸多因素影响其效应。接着介绍风荷载响应分析方法,包括风洞试验、有限元建模及静动力响应分析。最后提出抗风设计优化策略,涵盖结构选型、构件布置、材料选用以及体型系数与风振系数优化。旨在为大跨度空间网格结构在复杂风环境下的设计与优化提供理论支撑与实践指导,保障结构安全稳定。

[关键词] 大跨度; 空间网格结构; 风荷载响应; 优化设计

中图分类号: TU311.3 文献标识码: A

Wind Load Response and Optimization Design of Large-Span Spatial Grid Structures

Jiawei Xie

Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd.

[Abstract] Large-span spatial grid structures are widely used in the construction field, but their wind load response and design optimization face many challenges. This paper first elaborates on the mechanism of wind load action, pointing out that wind load has characteristics such as randomness, acting in both static and dynamic forms, with many factors affecting its effects. Then it introduces wind load response analysis methods, including wind tunnel tests, finite element modeling, and static and dynamic response analysis. Finally, it proposes wind-resistant design optimization strategies, covering structural selection, component arrangement, material selection, and optimization of shape coefficient and wind vibration coefficient. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for the design and optimization of large-span spatial grid structures under complex wind environments, ensuring structural safety and stability.

[Key words] large-span; spatial grid structure; wind load response; optimization design

引言

在建筑工程领域,大跨度空间网格结构凭借其独特的空间优势和广泛的应用场景,成为现代建筑发展的重要方向。然而,此类结构在复杂风环境下,风荷载作用机制复杂,其响应规律难以精准把握,给结构设计与安全保障带来巨大挑战。本文深入剖析大跨度空间网格结构风荷载作用机制,详细阐述其风荷载响应分析方法,包括风洞试验、有限元建模等,并针对性地提出结构选型、构件布置、材料选用及系数优化等抗风设计策略,为工程实践提供理论支撑。

1 大跨度空间网格结构风荷载作用机制

风荷载源于空气流动对结构产生的压力,具有随机性、脉动性与空间相关性,风速和风向随时间、空间不断变化,致使风荷载大小与方向难以确定。脉动风压作为风荷载关键构成,频率成分复杂,易引发结构振动。同时,风荷载在结构表面分布不均,不同区域风压系数存在差异,结构边缘、凸起等气流变化剧烈处

风压系数通常较大。风荷载对大跨度空间网格结构的作用形式主要有静风荷载和动风荷载两种。静风荷载是风对结构产生的稳定压力,会导致结构出现静力位移和内力变化;动风荷载由风的脉动特性引发,会使结构产生振动,可能造成结构疲劳破坏或影响使用功能。在风荷载作用下,结构会产生包括竖向、水平和扭转振动等在内的复杂动力响应,其中风振响应是结构设计需重点关注的方面。诸多因素会影响大跨度空间网格结构的风荷载效应,结构外形是影响风荷载分布的关键因素,平面、曲面、拱形等不同形状结构在风作用下的风压系数分布规律差异显著;风向角变化会改变结构表面风压分布,使结构最不利风向角不同;地形地貌和周围环境也会对风场产生影响,在山区、城市中心等复杂地形和环境下,风速和风向改变会进而影响结构风荷载效应。

2 大跨度空间网格结构风荷载响应分析

2.1 风洞试验技术

大跨度空间网格结构风荷载响应分析中,风洞试验技术是重要研究手段,进行风洞试验时,先按实际结构比例制作刚性模型,确保模型材料与表面粗糙度符合要求,精准还原结构外形特征^[1]。在模型表面合理布置测压点,保证测压点全面覆盖结构各部位,以此获取准确的风压数据。试验过程中,依据实际风况设定来流风速、风向角等关键参数,模拟出多种不同的风环境。借助压力扫描阀等专业设备,对测压点的风压进行实时测量,从而得到结构表面风压分布情况。风洞试验具有直观性,能清晰地呈现结构在风作用下的风压分布特征。通过该试验获取的数据,可作为后续有限元分析的重要依据,为结构的抗风设计提供基础支撑。准确利用风洞试验结果,有助于深入了解大跨度空间网格结构在风荷载作用下的响应规律,进而优化结构设计,提高结构在复杂风环境下的抗风性能与安全性。

2.2 有限元建模与分析

运用有限元软件构建大跨度空间网格结构数值模型,是分析其风荷载响应的关键环节。在建模过程中,需依据结构实际力学特性挑选合适的单元类型,像用梁单元、壳单元分别模拟不同构件,以保证模型能准确反映结构特征,同时要精准设置边界条件,让模型与结构真实的约束状态相契合,为后续分析奠定基础。完成建模后,将风洞试验测得的风压数据,依据相应的荷载转换规则加载到有限元模型上,实现数据与模型的有效融合。之后开展有限元分析,一方面,计算结构在静风荷载作用下的位移和内力变化情况,通过与强度和刚度要求对比,评估结构是否达标;另一方面,考虑风振对结构的影响,确定风振系数,深入分析结构在风荷载下的动力特性,如振动频率、振型等。通过综合考量这些因素,全面评估结构在风荷载作用下的安全性,为结构的优化设计和抗风加固提供科学依据,确保大跨度空间网格结构在复杂风环境中能够安全稳定运行。

2.3 静力响应分析

大跨度空间网格结构受风振因素影响会产生振动,开展风振响应分析是评估其在风荷载作用下动力特性的关键举措。进行风振响应分析时,首要任务是综合风洞试验与有限元分析获取的数据来确定风振系数,此系数是精确剖析结构风振响应状况的重要前提,不同结构形式在相同风荷载或同一结构形式在不同风荷载下,风振响应特性有差异,部分柔性大的结构如索膜类在风荷载下风振响应更突出,此时要重点考量风振对结构安全性和使用功能的影响。动力响应分析能精准评估结构在风荷载作用下的振动幅度、振动频率等关键参数,这些参数直接呈现结构在风作用下的动力状态,借助分析可深入了解结构实际受力与变形情况,判断其是否满足安全和使用标准^[2]。依据分析结果能为结构抗风设计提供科学依据,设计人员可据此合理调整优化结构刚度、阻尼等参数,改进结构形式或布局,确保大跨度空间网格结构在复杂风环境中具备充足抗风能力,保障其安全稳定运行,避免因风振引发结构损坏或功能丧失,为结构长期可靠使用奠定基础。

2.4 动力响应分析

大跨度空间网格结构受风振因素影响会产生振动现象,开展风振响应分析是评估其在风荷载作用下动力特性的关键步骤,进行该分析需综合运用风洞试验与有限元分析获取的数据确定风振系数,此系数是精准剖析结构风振响应情况的重要依据,其准确性直接影响后续分析结果的可靠性。不同结构形式在相同风荷载条件或同一结构形式处于不同风荷载环境时,风振响应特性差异明显,柔性较大的结构如索膜结构在风荷载下风振响应更显著,此时要着重关注风振对结构安全性和使用功能的影响,因风振可能导致结构局部应力集中、变形过大等问题,影响整体安全性和正常使用功能,必须重视。动力响应分析能准确评估结构在风荷载作用下的振动幅度、振动频率等关键参数,这些参数直接反映结构在风作用下的动力状态,通过深入分析可详细了解结构实际受力与变形情况,进而判断是否满足安全和使用要求,若不满足可及时调整^[3]。基于详尽的分析成果,设计人员可依托这些分析数据,精准且合理地调控与优化结构的刚度特性、阻尼配置等关键参数,灵活改进结构的整体形式或构件的布局方式。通过这些针对性的设计调整,可以确保结构在复杂多变的风环境条件下,具备卓越的抗风性能与足够的承载能力,从而保障其安全、稳定地运行。

3 大跨度空间网格结构抗风设计优化策略

3.1 结构选型优化

网架结构空间受力性能优良,能有效分散风荷载,适用于对空间受力有较高要求的场景。索膜结构质量轻盈,然而对风的作用较为敏感,需着重关注风吸力带来的影响,一般用于对造型有独特要求且风荷载相对较小的项目。拱形预应力张弦桁架结构融合了拱形结构与张弦结构的优势,承载能力较高,抗风性能好,适用于大跨度且面临较大风荷载的工程。在风荷载较大且风向相对固定的地区进行结构选型时,应优先挑选空间受力合理、刚度大的结构形式,如拱形预应力张弦桁架结构,以此增强结构的抗风能力。选型过程中,要全面综合考虑建筑的功能需求与美观要求,对各结构形式的优缺点进行权衡,选出既符合抗风需求又契合建设目标的类型^[4]。在实际工程中,建筑功能多样,不同功能对空间、造型等有不同要求,同时美观需求也各不相同。像一些大型公共建筑,既要有足够的大跨度空间来满足使用功能,又要具有独特的外观造型以体现建筑特色,此时就需要综合分析多种结构形式在抗风性能、空间利用、造型塑造等方面的适用性,通过对比和评估,选择出最优的结构方案。

3.2 构件布置优化

构件布置的合理性对大跨度空间网格结构的抗风性能有着直接影响。在结构设计中,需精心规划关键受力构件的位置与数量。在风荷载主要作用的方向,适当增加竖向支撑构件的数量,能够显著提高结构的侧向刚度,进而有效减少风致位移,增强结构在风作用下的稳定性。对于那些容易产生风振效应的部位,合理设置阻尼装置等耗能构件十分必要。这些耗能构件可以耗散风振产生的能量,抑制结构出现过度振动的情况。不同类型的阻尼装置,如黏滞阻尼器、调谐质量阻尼器等,可根据结构的实

实际需求进行选择和安装,以降低结构的风振响应,保障结构的安全。同时,要依据风压分布规律来调整构件的疏密程度。风压分布在不同区域存在差异,在风压较大的区域,结构所承受的风荷载较大,此时应适当增加构件的截面尺寸或者数量,以此提高结构在该区域的承载能力,确保结构能够承受较大的风力作用。而在风压较小的区域,结构所受风荷载相对较小,可适当减少构件的数量,降低材料成本。

3.3 材料选用优化

钢材具备强度高、韧性好的特性,能够承受较大的风荷载,因此常被应用于主要受力构件。其良好的力学性能使其在面对强风时,可以保证结构主要受力部分的稳定性和可靠性,为结构整体抗风提供坚实支撑。新型高性能复合材料同样具有独特优势,其强度能够达到要求,同时还具备抗疲劳和轻量化的特点,适用于对自重较为敏感的部位,这类材料在减轻结构自重的同时,还能有效提高结构的承载能力,为结构抗风设计提供了新的选择。依据风荷载效应分析结果,在风荷载较大、对强度要求较高的区域,应优先选用高强度钢材,以此保障结构在该区域的安全性和稳定性,防止因风荷载过大而导致结构破坏。而在风振响应敏感、需要减轻自重的部位,则应考虑采用轻质且耗能性能良好的复合材料,通过这种选择,可以实现材料性能与结构抗风需求的最佳匹配^[5]。具体而言,在大跨度空间网格结构的节点部位,采用高强度钢材能确保节点的连接强度,使结构在风作用下保持整体性;在结构的屋面部分,采用轻质复合材料可减轻屋面自重,进而降低风荷载对结构的影响,保障结构的安全使用。

3.4 体型系数与风振系数优化

现行规范里的体型系数和风振系数等参数,因难以全面涵盖大跨度空间结构多样的形式,致使实际设计时难以精准考量风荷载对结构的影响,故而需借助风洞试验和数值模拟等手段,结合具体结构形式与风环境特点对二者进行优化。风洞试验作为准确测量结构表面风压分布的有效方式,通过在风洞中对结构模型开展测试,能够获取结构表面各位置的风压数据,进而依

据风压系数计算体型系数,尤其对于形状复杂的大跨度空间结构,其提供的数据更为精准,可有效避免规范中体型系数因涵盖范围有限而产生的误差,为抗风设计提供更符合实际的依据;数值模拟则能模拟不同风荷载下结构的响应,借助计算机软件设定风荷载参数,经大量计算分析确定风振系数,该方法灵活高效,可模拟多种复杂风环境条件。将风洞试验和数值模拟的结果相结合,对体型系数和风振系数进行修正优化,使其更贴合实际工程,提高大跨度空间结构抗风设计的准确性,保证结构在风荷载作用下具备足够的安全性和稳定性,满足工程建设需求。

4 结束语

综上所述,大跨度空间网格结构的风荷载响应及优化设计对保障其安全稳定至关重要。通过深入剖析风荷载作用机制,运用风洞试验与有限元分析明确其响应规律,从结构选型、构件布置、材料选用以及体型系数与风振系数优化等多方面制定策略,可有效提升结构的抗风性能。未来,随着技术不断进步,应持续探索更精准、高效的分析方法与优化手段,以应对日益复杂的风环境,推动大跨度空间网格结构在更多领域安全可靠地应用与发展。

[参考文献]

- [1]罗淘浪,邹新宽.空间网格钢结构在大跨度建筑中的力学特性与分析研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(16):13-15.
- [2]郭兆伟.大跨度钢结构屋盖风荷载作用下的动力响应与稳定性分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(11):218-221.
- [3]丁阳,赵奕程.大跨度空间钢管桁架结构的风振响应和风振控制研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2006,33(3):17-21.
- [4]吴晓龙,张渊.245m超大跨度拱形预应力张弦桁架结构设计施工[J].建筑科学.2022,38(7):10.
- [5]张渊,陶勇,郭恒,等.大跨料场封闭结构设计问题探讨[J].天津设科技,2024,34(3):71-74.