

基于有限元分析的大跨度空间结构力学性能研究

王超 倪靖轲

中国城市建设研究院有限公司，北京，100120；

摘要：在现代工程技术不断发展的背景下，大跨度空间结构以其特有的美学效果与功能需求得到了广泛的应用。本文利用有限元分析方法，对大跨度空间结构力学性能展开深入研究。对结构进行几何建模、设置相关边界条件及加载方式。采用有限元分析，从应力分布、变形、稳定性、承载能力、自然频率、振型、动力响应及阻尼特性等方面详细地分析了其静力及动力性能。另外对结构在地震中的性能也做了评价。研究表明：有限元分析方法能对大跨度空间结构力学行为进行有效预测，并可为设计与施工提供科学依据。

关键词：大跨度空间结构；有限元分析；力学性能；静力分析；动力分析

DOI：10.6979/3029-2727.24.07.022

引言

大跨度空间结构具有跨度大、形式独特、功能多的优点，被广泛用于体育场馆、展览中心、机场航站楼及其他公共建筑。该类结构在设计施工过程中，需要精确地预测力学性能。传统分析方法通常很难精确地捕捉到复杂载荷下结构力学行为，有限元分析方法因计算能力强、精度高，成为大跨度空间结构力学性质研究的一个重要手段。

1 理论基础与方法论

1.1 大跨度空间结构的基本理论

大跨度空间结构作为一种结构类型被广泛地应用于现代建筑当中，其主要应用于大型屋顶、展览场馆、体育馆和飞机库的配套使用。该类结构一般跨度大、几何形状复杂，从而表现出力学性能方面的特殊行为特点。它的理论基础涵盖了弹性力学，结构力学和材料力学的诸多学科。在大跨度结构设计中，一般需综合考虑自重、外部荷载、风力和地震等诸多因素。传统简支梁模型因跨度大不能全面考虑空间结构复杂变形问题，须运用三维空间力学分析方法。大跨度空间结构受力传递方式特殊，常用网架、索膜和薄壳来保证结构稳定和承载能力，其几何构造和选材较为合理。另外，对该类结构进行力学分析时，不只注重静力平衡问题，更需要对其动态响应及稳定性进行深入的研究。

1.2 有限元分析方法

有限元分析（FEA）作为一种关键的数值计算手段，用于解决复杂的工程问题，并在大跨度空间结构的力学性能研究中得到了广泛应用。这种方法是把复杂结构分

解成若干微小而又简单单元，用数学模型来描述各单元物理特性，再由计算机求解获得整体结构应力，变形和振动响应信息。有限元方法能准确地模拟各种荷载作用下结构的反应，充分考虑了材料非线性，几何非线性和复杂边界条件等因素，并给出了较为逼真的力学分析结果。对大跨度空间结构而言，有限元分析尤其适合研究复杂几何形状及各种荷载作用的力学行为，采用细化网格，选取适当单元类型及边界条件等方法，能较精确的预测结构应力分布，变形特性和稳定性。

2 大跨度空间结构的有限元模型建立

2.1 结构几何模型的构建

大跨度空间结构几何模型的建立是有限元分析工作的基础，需要精确地反映出结构真实形态及空间分布情况。在进行结构的几何建模时，通常会使用三维建模技术，并通过计算机辅助设计（CAD）软件来生成与实际设计相匹配的几何图形。大跨度空间结构几何模型可由若干复杂弯曲面，相交支撑网架和曲面壳体组成，需格外关注其准确性及细节。模型的建立既要考虑到结构的几何外形又要考虑构件间的连接方式和约束条件。通常情况下，结构的几何模型可以通过节点和单元的方式进行离散化，每个单元代表一个小区域，节点则连接相邻的单元，这种方法可以有效地进行大跨度空间结构的三维分析。模型的建立需要寻求精度与计算效率的权衡，确保结果可靠与计算高效。

2.2 边界条件与加载的设定

边界条件与加载条件设置是有限元分析的关键环节，对于计算结果的准确性与可靠性有着至关重要的作

用。边界条件一般由约束条件组成,例如支撑点固定约束或者滑动约束,它们决定着结构变形情况以及力传递模式。在设计大跨度的空间结构时,必须考虑到实际的边界条件,例如结构与地面、支撑平台或其他部件的连接方法。同时荷载设置要有静态荷载与动态荷载之分,例如自重、风载、雪载、地震荷载。荷载分布方式、大小、方向及其变化特性对结构受力情况有直接影响,须经合理计算并进行模型验证才能确定。进行有限元分析时,边界条件及荷载的设置既要满足工程实际又要保证计算模型稳定收敛,并为之后力学性能分析提供精确输入数据。

3 基于有限元分析的大跨度空间结构力学性能分析

3.1 静力性能分析

3.1.1 应力分布与变形分析

应力分布和变形分析,是进行大跨空间结构静,力性能研究的依据。对结构进行有限元分析可得到多种静态荷载下结构应力分布。应力分布作为反映结构受外力作用状态的一个重要标志,可以揭示结构各段受力是否均匀集中。如复杂网架结构,由于受力集中,一些节点或者构件会受到很大应力作用,这类位置通常易成为潜在故障点。变形分析为我们展示了结构在受到荷载影响时的具体变形状况,其中涵盖了位移和形变的模式。这些变形既有利于判断结构刚度是否充分,又有利于揭示其受力后的变形规律。大跨度空间结构因规模大、几何形状复杂等特点,变形模式也会比较复杂,一般需建立三维有限元模型才能准确模拟。分析过程中荷载工况及约束条件的合理设定至关重要,这些因素直接影响分析结果精度。通过对应力、变形等因素进行全面分析,使设计者能够发现结构最容易出现破坏的部位,以便有针对性地采取加固措施或者进行设计优化以保证结构实际应用的安全可靠性。通过上述分析,设计者既可以对正常工作荷载作用下的结构行为进行预测,又可以对极端情况下的结构性能进行评价,从而为之后的工程设计与建造提供理论依据。

3.1.2 稳定性与承载能力评估

稳定性与承载能力的评价是大跨度空间结构静力性能综合分析中最核心的部分。有限元分析时,稳定性分析一般采用临界荷载的计算。临界荷载指当外部荷载增大到某一程度后,结构就会丧失稳定性而产生较大变形,甚至坍塌。大跨度空间结构由于结构形式一般比较复杂,因此稳定性评估就显得特别重要。如网架结构和

薄壳结构,当荷载达到某一数值后就有可能因局部失稳或者屈服而诱发整体失稳。利用有限元分析能够准确地模拟出这类结构受力状态及变形过程并发现可能引起稳定性问题的薄弱部位。在评估承载能力时,我们主要关注结构在极端荷载下的性能,以确保在预定的荷载范围内,结构不会出现屈服、损坏或过度的形变。通过对不同荷载作用下结构应力及变形情况进行分析,可评价结构承载能力满足安全规范要求。设计者在承载能力评估时需综合考虑材料强度特性,连接部位受力状态和结构几何形态等因素,而这又直接决定着结构承载极限。通过精细的有限元方法分析,设计人员可以在初始阶段识别出可能的安全风险,并实施必要的加固策略,例如改进支撑结构、增添支撑部件等,以确保建筑在长期使用中的安全与稳定。

3.1.3 敏感性分析与参数研究

敏感性分析的中心内容是通过设计参数的变化来评价它们对结构性能所产生的作用,并确定哪一个参数对于静力性能最有作用。这些设计参数可能包括材料属性(例如弹性模量,泊松比)、几何尺寸(如构件截面、跨度等)、荷载类型(如静载、动载等)等。通过对这些参数进行调节,设计者能够观测到结构响应发生了改变,为优化设计指明了方向。大跨度空间结构一般都是由若干构件构成,而不同构件及构件间可能会相互影响,所以敏感性分析有利于评价不同要素的相对重要程度,从而对设计进行优化。通过参数研究设计者不但可以明确哪些因素对结构性能起着至关重要的作用,而且可以通过调节这些参数使结构整体性能得到改善。如在一些关键支撑点处改变支撑条件或者调整部分构件截面尺寸等,均可明显提高结构稳定性及承载能力。另外,设计者还可通过大范围参数化研究来进一步探究各种设计方案的优缺点,并确定最经济、最安全的方案,以避免设计中不必要的复杂性及材料浪费。敏感性分析有助于设计者在提高设计效率的同时,也可以减少项目中存在的危险,保证结构设计达到最佳平衡状态。

3.2 动力性能分析

3.2.1 自然频率与振型分析

对大跨度空间结构进行自然频率和振型分析是对其动力性能进行评价的一种基本方法。进行动力学分析时,必须先确定其固有频率和振型,而这是评价动力荷载下易产生共振与否的关键所在。大跨度空间结构几何形态及质量分布一般比较复杂,固有频率和振型分布也可能十分复杂,需要建立精细有限元模型才能对其进行精确分析。结构的振型即结构在各种振动模式中的变型

模式,反映出结构振动特性。通过振型分析有助于设计者对结构动力学行为的了解和确定哪种振型有可能引起共振现象。若结构固有频率和外部荷载频率相近,则可能产生共振,从而使振动幅度剧烈上升,甚至诱发结构破坏。所以,保证结构固有频率与外界荷载频率不一致是设计时非常关键的。通过对自然频率和振型的分析,设计者能够识别出可能发生共振的问题,通过调整其质量分布或者几何形态来避免其在外部荷载作用下发生共振,从而保证其稳定安全。另外,上述分析也可作为结构抗震设计和抗风设计的基础,有助于设计者优化其动力性能和增强抵抗外界冲击荷载作用。

3.2.2 动力响应与阻尼特性

动力响应与阻尼特性分析多应用于大跨度空间结构对动态荷载的响应评价。结构受动态荷载作用时的性能一般都很复杂,特别是受地震、风荷载以及其他自然灾害影响时。利用有限元分析可模拟出大跨度空间结构受上述动态荷载作用时加速度、位移和应力的反应。动力响应分析有助于设计者深入理解不同动态荷载下结构行为并确定可能存在的振动幅度和内力变化等重要信息。大跨度空间结构因其规模大、质量分布复杂等特点,在动力荷载作用下会引起很大的振动,从而影响到结构的安全性与舒适性。这时阻尼特性是振动响应控制的关键。该阻尼系统可有效地降低结构振动幅度并减少振动对结构及使用者造成的冲击。有限元分析可以准确地模拟出阻尼系统对振动的影响,并通过调节阻尼参数来优化振动控制。通过对阻尼特性的分析,使设计者能够针对大跨度结构设计出适当的阻尼系统以增强结构的抗震和抗风动力性能。如通过增设耗能装置,改进结构连接方式,能有效地提高其抗震能力与抗风能力并确保其长期稳定安全。

3.2.3 地震作用下的性能评估

在大跨度空间结构抗震设计中,对其进行地震作用性能评估至关重要。大跨度空间结构因其规模大、几何形态复杂等特点在地震荷载作用下会产生急剧的动态响应。通过有限元分析设计者能够模拟出结构在地震荷载下的反应,其中包括位移、加速度和应力等主要数据。这些分析对判断地震作用下结构的性能以及评价结构是否符合抗震规范及设计要求是有帮助的。鉴于地震荷载的不可预知性和突然性,进行地震影响下的性能评估时,必须全方位地考虑所有可能的工况,这包括地震的强度、波形和持续时间等多个因素。设计者在进行分析

时,需着重考虑其非线性行为,屈服现象和可能破坏模式等。有限元分析既可以模拟地震荷载作用下结构的瞬时响应又有助于结构长期服役过程进行耐久性评估,从而保证结构在经常发生地震活动时的稳定。通过地震响应分析设计者可对其进行抗震加固或者优化设计,如通过强化支撑系统及添加抗震材料来提高其抗震能力及安全性。震后性能评估可为结构抗震设计,降低地震灾害造成的危险,保障大跨度空间结构震后及其他极端条件下安全性提供科学依据。

4 结束语

综上所述,通过本论文的研究对大跨度空间结构受各种荷载时的力学行为有了较深的了解,证明有限元分析方法对大跨度空间结构的力学行为研究是行之有效的。研究成果既可为大跨度空间结构设计提供科学依据,又可为其优化与完善指明方向。今后,在计算技术不断提高,有限元分析方法日臻完善的情况下,大跨度空间结构在设计与施工中会变得更科学、更有效、更安全。与此同时,随着对建筑结构性标准日益严格,有限元分析技术在研究大跨度空间结构时将扮演更为关键的角色。

参考文献

- [1] 张静静,饶春华.基于有限元模型的大跨度预应力混凝土连续刚构桥长期下挠因素分析[J].交通世界,2023,(22):135-137.
- [2] 岳建彬,彭涛,杨添翼,稂其林.大跨度钢拱桥平转施工多尺度有限元分析[J].西部交通科技,2022,(08):108-110+150.
- [3] 陈冠.混合单元法在大跨度异形拱桥有限元分析中的应用[J].黑龙江交通科技,2022,45(04):95-98.
- [4] 武宗良,朱嘉男,韩爱红,张贵阳,严若飞.某大跨度悬挑钢框架结构有限元计算与优化分析[J].低温建筑技术,2021,43(12):105-109.
- [5] 徐可,李雷明.大跨度空间网架应力监测及有限元模拟对比分析[J].工程质量,2021,39(12):47-52.

作者简介:

第一作者:王超(1975年3月),男,汉族,上海人,大学本科学历,研究方向:结构工程。

第二作者:倪靖轲(1996年5月),男,汉族,内蒙古人,大学本科学历,研究方向:土木工程。