

大跨度空间建筑结构设计关键技术研究

李宝鉴

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]大跨度空间建筑是现代工程技术上最具挑战性的建筑类型。本文基于设计要求, 介绍了结构形式选取、参数化设计、设计荷载、抗震抗风设计、梁柱节点设计、配筋构造、结构优化以及设计方案评估等方面的技术问题, 并提出了结构参数优化与新材料应用两个方面的改进措施。研究结果表明, 大跨度空间结构的设计应追求经济、安全、美观的目标, 在此基础上利用先进的设计理念和技术手段进行设计是提高大跨度空间结构设计水平的有效途径。

[关键词]大跨度空间结构; 结构选型; 参数化设计; 抗震抗风设计

DOI: 10.64635/ja.2026.1201

中图分类号: TU393.3

文献标识码: A

Research on Key Technologies in the Structural Design of Large-Span Spatial Buildings

Li Baojian

Hebei Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract: Large-span spatial buildings are among the most technically challenging building types in modern engineering. Based on design requirements, this paper introduces technical issues related to structural form selection, parametric design, design loads, seismic and wind-resistant design, beam-column joint design, reinforcement detailing, structural optimization, and design scheme evaluation. It also proposes improvement measures from two aspects: structural parameter optimization and the application of new materials. The results show that the design of large-span spatial structures should pursue the goals of economy, safety, and aesthetics. On this basis, the use of advanced design concepts and technical methods is an effective approach to improving the design level of large-span spatial structures.

Keywords: large-span spatial structure; structural form selection; parametric design; seismic and wind-resistant design

引言

大跨度空间建筑大量应用于体育场馆、机场航站楼、会展中心等现代公共建筑, 它最大的优点就是摆脱传统的梁柱体系所限制的空间, 在合理的曲面以及合适的材料配合下可以轻松跨越很大距离。一般而言, 当建筑跨度大于 60m 之后, 传统的梁柱体系由于弯矩的影响呈指数增加的趋势, 需要采用空间受力体系。大跨度空间结构的设计有多种不同规模的荷载相互作用、明显的几何非线性和复杂的节点连接方式, 在很大程度上依靠设计师的经验来进行设计是低效而且缺乏准确性的。空间结构设计是一个非常困难的问题, 因为它需要考虑大量的因素并且具有很高的维度以及较强的几何非线性。伴随着《空间网格结构球型节点技术要求》(GB/T 44534—2024) 在 2025 年 4 月 1 日开始执行, 大跨度空间结构的设计正在发生巨大的变化, 在工程实际应用以及理论上都对大跨度的空间建筑物的设计技术进行了总结。

1 大跨度空间建筑结构设计标准与要求

1.1 规范体系与标准依据

超大跨空间建筑物结构的设计必须要符合我国现行的相关法律、法规和技术标准的规定, 在很大程度上是为了维护结构的安全、适用和耐久等方面的要求。在工程施工设计时所常采用的规范有《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010), 该条规定了空间网架结构类型的选择规则、荷载组合规定、内力计算方法、节点构造方案和装配施工技术措施等内容;《钢结构设计标准》(GB 50017) 规定了钢材使用准则、材料强度选取原则、构件稳定性校核手段、连接设计指导建议等内容, 也是大跨度钢结构屋面的重要参考;《建筑结构荷载规范》(GB 50009) 规定了各类建筑恒载、活载、风荷载、雪荷载及地震作用等荷载的取值方式, 作为结构设计提供荷载基准数值。此外特别需要注意的是,《空间网格结构球型节点技术要求》(GB/T 44534—2024), 该标准将从 2025 年 4 月 1 日开始发布实

施,对于螺栓球节点、焊接空心球节点的分类、尺寸表示法、技术指标、检验检测流程、标识打包、运输存放等方面都做了详细规定,为节点产品质量管理及工程实践提供了更加全面的基础依据,有助于提升节点产品的一致性和工程安全性。

1.2 结构类型选择与设计基本要求

大跨屋盖结构是指跨度大于等于 60m 的建筑物的屋盖系统,其结构形式的选择要根据跨度大小、建筑设计用途、施工技术和经济要求综合确定。常见的结构有桁架、刚架、拱等形式的平面结构,也有网架、网壳、悬索、索膜等三维空间结构形式。相比于一般结构,大跨度结构自重重大、受力复杂、整体稳定性控制难等问题突出,在设计中需重点处理好结构的整体刚度、抗扭转能力、温度效应等方面问题。而且特别对于风速和烈度较大的区域还要进行动力特性分析和稳定评价,防止发生倒塌或过大的摆动造成不适感。另外由于大跨度空间结构节点密集、节点种类繁多,节点的质量会直接影响到整个结构的安全,设计时需要加强节点的设计计算,同时也要结合施工方案进行节点的安装验收规定,以保证结构长期使用的安全稳固。

2 大跨度空间建筑结构设计的关键技术

2.1 结构形式选择

结构形式选择是大跨度空间建筑设计第一个问题。大跨度空间结构形式多样,主要有网架结构、网壳结构、悬索结构、张拉整体结构和膜结构等。网架是由许多杆件按一定规则构成的空间几何图形,在节点处相互连接而形成的,由于其美观大方、承载能力大、安全可靠等特点成为发展迅速的一种空间结构形式。空间结构可以分为两类,一类是非预应力空间结构,另一类是预应力空间结构。非预应力空间结构利用材料本身的强度以及构件之间几何关系承受荷载作用,由刚性或者铰接方式组成一个稳定受力体系,如桁架结构、网壳结构等,在中小型体育馆及厂房中使用较为普遍。预应力空间结构是利用预应力维持其预定形状,在内部重新分配内力以抵抗外荷载产生的拉压应力而提高其跨越能力的一种结构形式,主要有张拉整体结构以及索穹顶等,由于其重量较轻、施工快捷的特点被广泛应用于体育馆、候机楼等大跨房屋建筑中^[1]。但是,在工程应用时也要根据具体工程条件进行选择,如建筑物平面尺寸、荷载大小、跨度、支撑情况及经济效益等^[2]。

2.2 参数化设计

参数化设计是大跨度空间结构精细化设计的有效方法。不同于以往依靠设计师的经验给出一个初步设计方

案,然后用有限元软件进行检查优化的过程,参数化设计把结构的几何外形、构件大小以及节点形式都作为可以调节的参数,在计算机程序控制下自动生成满足力学要求的空间结构形式。全国工程勘察设计大师冯远认为,当代的空间结构应该以高效、高强、轻质为宗旨,遵循力随形、形定力的原则,在保证结构的安全可靠的前提下,兼顾美观与实用。近年来,随着 AI 技术的应用和发展也使参数化设计更加完善。最近一篇综述总结了近五年共 78 篇文章的研究成果,总结了无监督、监督、强化以及深度学习方法应用于大跨度空间结构设计的情况,表明人工智能的方法对于处理高维变量、强几何非线性等问题具有很大的优越性。参数化工具有效地加快了设计速度,而且也使得结构的受力性能以及材料的使用都得到了提高。

2.3 设计荷载

合理确定设计荷载是大跨度空间结构安全性的基础。荷载按其性质分为永久荷载、可变荷载以及偶然荷载三种类型。永久荷载包括结构自重、屋面覆盖层以及附属设施等;可变荷载包含屋面活荷载、风荷载、雪荷载以及施工荷载等各种情况。而风荷载以及雪荷载往往尤为重要。依据《建筑结构荷载规范》GB 50009 第 7.1.2 条的规定,对于雪荷载敏感性较大的结构应采用 100 年一遇雪压,其说明中指出雪荷载敏感性较大结构主要是指大跨轻质屋盖结构,在这种结构中雪荷载往往是起控制作用荷载,在极端情况下大雪会引发整个建筑物倒塌,后果十分严重。大跨度建筑体形系数大小与建筑外形及风向有关,在大风情况下会受到明显风振影响,需要经过风洞实验或者计算得到。同时大跨度建筑还要考虑地震以及温度等因素造成的荷载。

2.4 抗震及抗风设计

抗震及抗风设计是保障大跨度结构在遭受强烈外力时仍能正常使用的最后一道防线。由于大跨度结构质量大、刚度小、周期长等原因,其在地震以及风的作用下的反应不同于一般民用建筑。从抗震角度来看,近几年取得一定的进展。中建八局研制了一种基于“摩擦阻尼-自复位”的大跨度钢结构自适应连接装置并应用于河南大学工程训练中心主馆中^[2]。此装置主要由可互换摩擦阻尼器以及形状记忆合金自复位螺栓组成,“耗能-限位-复位”。振动台试验表明,相比于传统的刚接节点,该方案可以使主体结构受到的地震加速度响应降低 40%以上,在模拟 9 度罕遇地震之后,节点残余变形不大于 0.2%,达到“大震不倒、震后 usable”的目的;而对于跨径大于 60m 的体

育建筑，在抗风方面，推荐使用混合减震的方法，在拱顶设置调谐质量阻尼器的同时对屋面开孔率进行优化设计以减少 80% 以上的风致加速度响应。

2.5 梁柱关键节点设计

梁柱节点是大跨度空间结构传力的重要部位，节点设计合理与否将直接影响整个结构的安全性，在空间网格结构中，主要节点形式有焊接空心球节点、螺栓球节点等。焊接空心球节点是由两个热压或者冷压半球焊接而成，杆件焊接在其上，结构简单、传力明确，整体性强，适用于大跨度、重荷载工程；而螺栓球节点则是由实心钢球、高强度螺栓、套筒以及锥头等组成，安装方便快捷，便于工厂预制及现场组装。焊接球节点用于双层或多层网架或网壳时，应作为铰接考虑。对于单层网壳而言，应按刚接考虑，所有节点应使各杆件轴线汇交于一点，以防产生偏心而造成额外弯矩，在近年出现了一种具有自适应特性的节点设计思路，在节点内设置可耗散能量的装置使节点在大震下可以有一定量的位移并且可以在震后恢复原状。

2.6 关键节点配筋构造

节点配筋是影响节点承载力以及整个结构体系的重要因素，在钢-混凝土组合结构中，配筋是否合理对节点延性和抗剪能力有较大影响。而在大跨度空间结构中，由于节点处受到多种力的作用，除了轴力、弯矩外还有较大的剪力存在，因此节点核心区箍筋布置非常重要。对于钢-混凝土组合结构节点，在节点区应配备一定数量抗剪连接件以使钢材和混凝土共同工作。对于装配式大跨度结构，现浇节点与传统的预制构件之间连接构造是影响整个结构性能的关键因素，钢筋锚固长度及搭接形式应符合设计规定，保证节点刚度不小于预制构件自身刚度，才能达到“等同现浇”。而在满足承载力富裕的前提下，兼顾施工方便性，就是节点配筋构造设计所要解决的主要矛盾。

2.7 结构优化设计

结构优化设计是在保证安全、耐久以及使用功能的基础上，尽量减少所用材料、提高其承载能力的一种综合性方法。对于大跨度空间结构优化主要包括拓扑优化、形状优化及尺寸优化三方面内容，在拓扑优化中可根据受力情况对结构中的杆件进行布置并删除多余的部分；而在材料上则可以通过使用新型材料来解决这一问题，如高性能钢材以及复合材料等，中国建研院开发出一种 Q690D 级低合金高强度钢，利用控轧控冷方法使其屈服强度达到 690MPa 以上^[3]；而尺寸优化就是通过对杆件截面大小进行调整使得所有杆件的应力均布。此外，拓扑优化与人工

智能相结合也正在革新传统的设计理念，给超大跨度结构提供了一种新的精细化优化的方法。

2.8 大跨度空间建筑结构设计效果分析

采用以上各种方法结合，大跨度空间结构设计优劣可以从承载力、整体刚度、施工速度以及造价等方面进行比较分析如表一所示。

表 1 大跨度空间建筑结构设计效果分析

设计维度	关键技术手段	优化目标与效果指标
承载能力提升	预应力技术、自适应连接系统	地震响应加速度降低 40% 以上、残余变形率控制在 0.2% 以内
材料节约	拓扑优化、高强度钢应用	用钢量显著降低、材料消耗降低 15%~25%
设计效率提升	参数化建模、AI 优化算法	设计周期缩短、自动生成多套拓扑方案
抗风性能优化	混合减振技术、风洞试验	抑制 80% 以上风致加速度响应
节点可靠性	焊接球/螺栓球节点标准化	保证受力明确、传力路径清晰

3 大跨度空间建筑结构设计的技术优化策略

3.1 结构参数优化

结构参数优化是提高大跨度空间结构设计水平的重要方法，在优化过程中以传力路线最短、应力最均匀、节省钢材为原则进行综合调整结构跨度、矢跨比、网格尺寸、构件截面等主要设计参数。其中网格尺寸选择非常重要，一般应在 2~6m 范围内，太大则会引起杆件内力增大以及用钢量增加，太小会导致节点过多而给施工带来不便；网架高度要结合跨度确定，一般为跨度的 1/10~1/20。对于网架结构，四周均有支撑的正方形平面宜采用斜放四角锥网架，因为这种形式更有利于受力并且所用钢材较少。从计算上讲，网架及下部结构应作为一个整体来进行计算分析，而不应该只把支座简化成固定铰支而忽略了支座沉降以及水平位移对内力造成的影响。同时利用人工智能辅助设计的方法可以在大量的设计方案中迅速找到最优解。

3.2 新材料应用

新材料应用是大跨空间结构进步的动力源泉。高强度钢、高性能混凝土、碳纤维复合材料以及新型合金材料等在工程中的应用，使得结构更加轻盈，跨越能力进一步增强。在钢铁方面，目前我国已经可以生产出屈服强度高达 Q690 级别的高强钢，在大跨空间结构中使用高强钢可以大幅度减少构件截面尺寸，从而减轻结构重量。相比于传统的用于建筑工程中的普通钢材，宝钢 Q690 系列高强钢

可以使构件变薄,进一步减轻建筑物自重,减少用料也意味着成本节约以及碳排放减少^[4]。在复合材料方面,碳纤维增强复合材料具有质量轻、强度高、抗腐蚀性强等特点,在工程上已经打破目前的技术难题。而在空间网架结构的杆件生产中,使用新型复合材料制成的杆件可以减少杆件截面尺寸,从而降低整个结构的质量。同时,伴随着材料的发展,功能梯度材料以及具有自适应能力的材料在未来的大跨结构中也会成为一种新的选择。

4 结语

大跨度空间建筑结构设计是集结构力学、材料学以及信息技术为一体的综合性工作。本文总结了大跨度空间建筑结构设计中所涉及到的技术问题,包括结构形式选取、参数化设计、设计荷载、抗震抗风设计、梁柱节点设计、配筋构造、结构优化及设计效果分析等九个方面的内容,并提出结构参数优化以及新材料应用两个发展方向。可以

看出,参数化设计以及人工智能正在改变传统的设计理念,而新型高强度材料以及智能化连接方式的发展则为结构性能提升奠定了良好的基础。而从长远来看,在高性能计算设备普遍应用、传感器检测手段不断提高以及智慧建造理念逐步实现后,大跨度空间结构的设计会越来越精细化、智能化和绿色化。

【参考文献】

- [1]李思龙.大跨度空间建筑结构设计关键技术研究[J].现代工程科技,2025,4(22):53-56.
- [2]颜贵东.大跨度空间建筑结构设计的标准技术[J].大众标准化,2025,(14):30-31.
- [3]鲁思慧.大跨度空间建筑结构设计关键技术研究[J].住宅与房地产,2025(32):92-94.
- [4]汤薛.大跨度空间建筑结构设计的关键技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(07):47-49.