

大跨度工业建筑结构设计关键技术研究

崔丽娜

河北天艺建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050071

[摘要]随着工业建筑规模的不断扩大,大跨度空间钢结构由于具有优良的承载能力以及灵活的布置方式,在大型工业厂房中得到了广泛的应用,结构跨度也越来越大,有的已经超过了150m。但是大跨度工业建筑结构设计还存在着选型不合理、荷载分析不够准确、稳定控制难度大、节点构造复杂等技术难题。文中对以上问题产生的原因及表现进行系统的分析,从结构体系优化、计算精度提高、稳定性抗震设计和节点施工协同等几个方面提出优化措施,以期给大跨度工业建筑结构设计高性能设计提供理论上的依据和实践上的借鉴。

[关键词]大跨度工业建筑; 钢结构设计; 技术应用

DOI: 10.33142/ucp.v3i3.20378

中图分类号: TU356

文献标识码: A

Research on Key Technologies for Structural Design of Large-span Industrial Buildings

CUI Lina

Hebei Tianyi Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050071, China

Abstract: With the continuous expansion of industrial building scale, large-span spatial steel structures have been widely used in large industrial plants due to their excellent bearing capacity and flexible layout. The structural span is also increasing, and some have exceeded 150 meters. However, there are still technical challenges in the design of large-span industrial building structures, such as unreasonable selection, inaccurate load analysis, difficulty in stable control, and complex node structures. The article systematically analyzes the causes and manifestations of the above problems, and proposes optimization measures from several aspects such as structural system optimization, improvement of calculation accuracy, stability seismic design, and node construction coordination, in order to provide theoretical basis and practical reference for high-performance design of large-span industrial building structures.

Keywords: large-span industrial buildings; steel structure design; technology application

引言

随着工业制造工艺的不断发展,现代工业厂房对于内部空间的无柱化、大开敞的要求越来越高,大跨度工业建筑也逐渐成为主流的形式。当跨度大于30m的时候,传统的梁柱体系的弯矩效应呈指数级增加,造成材料用量急剧上升,结构自重增大。利用拱形受力、张力传递等力学原理,把复杂的荷载转化为轴向力或者膜应力,大大提高了材料的利用率,悬索结构比传统的框架可以节省钢材50%以上。大跨度钢结构一般指跨度大于或等于60m的结构,可以采用桁架、刚架、拱等平面形式,也可以采用网架、网壳、悬索等空间形式。钢结构由于强度大、自重轻、施工周期短等特点,在大跨度工业厂房中被广泛应用。但是大跨度工业建筑结构设计牵涉到力学、材料、施工等诸多学科的交叉,跨度增大之后出现结构稳定、荷载效应、节点构造等一系列的技术难题。

1 工业建筑结构设计的基本原则

大跨度工业建筑结构设计要遵守安全性、适用性、经济性、耐久性这四个基本准则。安全性是结构设计的一个目的,结构在施工和使用期间要能承受各种可能的荷载作用而不破坏,并留有足够的安全余量。《空间网格结构技术规程》(JGJ7-2010)规定,在设计空间网格结构时要从工程实际情况出发,合理选择结构方案、网格布置和构造措施,综合考虑材料供应、加工制作和现场施工安装方法,取得良好的技术经济效益。适用性要求结构变形控制在规范允许的范围内,保证工业生产设备正常运转。经济性要求在保证安全的前提下选择经济合理的结构体系,大跨度门式刚架结构在工业厂房中应用越来越广泛,为了提高结构构件利用率、降低工程造价,对钢材强度进行优化尤为重要。耐久性要求考虑环境侵蚀、疲劳损伤等各方面因素,保证结构在设计使用年限内性能稳定。

2 大跨度工业建筑结构设计存在的问题

2.1 结构选型与体系设计合理性不足

大跨度工业建筑结构形式多样,有网架、网壳、桁架、悬索、张弦梁、膜结构等,不同的结构体系力学性能和经济指标相差很大。实际工程中设计人员一般依靠经验或者习惯来选取结构形式,没有对建筑功能、跨度大小、荷载情况、地质状况以及施工能力等各方面进行综合比较,造成选型同工程需求相脱离。跨度大小直接决定结构形式是否可行,30m~60m多用桁架或者网架,60m以上可以考虑网壳、悬索或者张弦梁,网壳结构造型丰富,可以根据建筑需要设计成球面、圆柱面等形状,在受力上以薄膜内力为主,充分发挥材料力学性能实现超大跨度。结构布置方面,杆件截面、网格尺寸等参数的确定比较随意,索承网架结构依靠拉索和网格构件的协同受力来达到以拉代压的力学优化,大幅度减轻自重30%~50%,提高材料利用率40%以上,但是很多项目没有充分挖掘出高效结构体系的优势^[1]。另外网壳结构可以分为单层网壳和双层网壳,单层网壳构造简单、自重轻,但是稳定性差,对节点和杆件要求高;双层网壳稳定性好,但是用钢量大,盲目追求新颖造型而选用受力效率低的结构体系,会带来材料浪费。

2.2 荷载取值与分析精度有待提高

大跨度工业建筑所受的荷载有恒载、活载、风载、雪载、温度作用、地震作用等,风荷载、雪荷载的不均匀分布对结构响应的影响比较大。大跨度钢结构的屋盖面积大、多为高低错落的复杂造型,容易造成雪荷载不均地堆积,近些年来由于积雪引发的屋盖结构局部破坏乃至整体倒塌事故时有发生,灾害调查显示,在设计阶段对雪荷载作用的估计不足属于重要原因。在雪荷载较大的地方,大跨度钢结构设计时要考虑雪荷载不均匀分布带来的不利影响,当体形复杂且没有可靠的依据时,可以采用风雪试验或者专门的研究来确定设计用的雪荷载。目前设计中风载体型系数、雪荷载分布系数取值一般直接采用规范基本值,缺少对具体建筑形态及周围环境的风洞试验或者数值模拟验证。结构分析上,线性弹性分析仍然占据主导地位,忽略了几何非线性、材料非线性对大变形结构的影响,计算精度不能满足实际需要,对初始几何缺陷的考虑过于理想化。

2.3 结构整体稳定性控制难度较大

大跨度工业建筑以受压、受弯构件为主,整体稳定性、

局部稳定性是设计的主要难题。对拱结构、单层网壳、跨厚较大的双层网壳及其他受压为主的网格结构,应做非线性整体稳定分析,结构稳定承载力应通过弹性或弹塑性全过程分析来确定,在分析时应考虑初始缺陷的影响。单层网壳、跨厚较大双层网壳都存在整体失稳的可能,设计某些单层网壳时稳定性还会起到控制作用,必须做稳定性计算。由于施工过程中存在偏差,造成实际完成结构和设计结构之间存在一定的缺陷,这些缺陷会使得实际结构的极限承载力降低,因此,在对大跨空间钢结构进行几何非线性分析的时候,应该考虑到初始几何缺陷的影响,用一致缺陷模态法把结构的最低阶屈曲模态当作初始缺陷分布模态来进行稳定性分析。从计算结果可以看出,结构对于初始缺陷比较敏感,缺陷的存在会使结构的稳定承载力明显下降。现行钢结构规范主要是解决构件、板件的稳定性问题,并且近似地用构件的稳定性来保证结构整体的稳定性,但是这种方法只适用于规则框架结构,对于大跨度钢结构整体稳定分析则不适用^[2]。另外大跨度工业建筑动力特性复杂,抗震设防烈度为8度及以上网架结构、7度及以上网壳结构均应做抗震验算,体形复杂的大型钢结构还需采用时程分析法,同时考虑竖向和水平地震作用。

2.4 节点构造复杂与施工经济协调不足

大跨度工业建筑节点形式多样,有焊接球节点、螺栓球节点、铸钢节点、相贯节点等,节点区域杆件汇交密集、应力集中严重,设计计算难度大。空间结构节点形式的选择要遵循节点设计的基本原则,复杂节点的受力性能很难用常规的杆单元模型来准确地反映出来,需要通过实体有限元分析或者足尺试验来验证。节点构造不合理会形成应力集中、焊接缺陷、疲劳开裂等质量隐患。焊接空心球节点、螺栓球节点、铸钢节点是常用的结构节点形式,结构简单、安装方便、成本低是节点设计的主要考虑因素。在经济性和安全性之间的平衡上,用钢量对比明显,网架结构大约40~80kg/m²,悬索结构大约20~40kg/m²,过度考虑安全储备会造成材料浪费,而过度压缩成本又会危及结构安全,两者难以协调。另外,结构设计同施工方案之间存在欠缺之处,没有考虑到吊装、拼装精度以及临时支撑等实际情况,借助有限元方法对具体的结构展开大位移弹塑性整体稳定分析来确定结构的整体稳定特点,具有十分重要的工程实用性,不过很多项目因为工期和成本问题,分析工作只停留在形式上。

表 1 大跨度工业建筑结构设计主要问题汇总

问题类别	具体表现
结构选型与体系设计合理性不足	结构形式比选不充分、盲目追求新颖造型、用钢量偏大；杆件截面与网格尺寸缺乏系统优化
荷载取值与分析精度有待提高	风雪荷载分布系数取值粗糙、缺少风洞试验验证；忽略几何与材料非线性效应
结构整体稳定性控制难度较大	初始缺陷考虑理想化、稳定安全系数取值经验化、非线性全过程分析不足
节点构造复杂与施工经济协调不足	节点受力分析流于形式、应力集中与焊接缺陷风险高；设计施工协同不足、安全经济矛盾突出

3 大跨度工业建筑结构设计优化措施

3.1 优化结构体系与经济协调设计

对于结构选型和体系设计的问题，要创建多方案比选机制，在方案阶段对网架、网壳、桁架、悬索以及组合结构等不同形式受力效率、用钢量、施工难度、耐久性进行综合比较。悬索结构以柔性索为主承重构件，依靠索的拉力来平衡荷载，结构自重轻、用料省、跨度大，建筑造型独特；张弦结构由索、撑杆、刚性上弦梁组成，索梁协同受力、刚度可调，适合 50~150m 跨度的工业厂房。采用参数化建模和优化算法，对不同的结构体系的网格尺寸、矢跨比、杆件截面等参数做全局寻优，找到安全性与经济性最佳的平衡点。索承网格结构是大跨度空间建筑领域里的一种高效结构形式，也是跨度为 150~300m 建筑的首选方案。另外在条件允许的大跨度工业建筑中采用预应力网壳或者弦支穹顶等高效结构形式来提高材料利用率，发挥材料的强度优势。

3.2 提高结构分析与计算精度

应对荷载取值和分析精度的问题，要对体形复杂的大型工业建筑进行风洞试验或者数值风洞模拟，根据建筑物周围环境、相邻建筑的干扰效应等对风压分布系数进行专门的修正。大跨度钢结构屋盖要同时考虑风荷载和雪荷载的不均匀分布工况组合。设计时需要从构造和计算分析两个方面来保证，对雪荷载的考虑要充分，对于体形复杂的屋面应分别按照不同的积雪分布模式进行计算验算。结构分析时应将大跨度空间结构作为一个整体进行建模，下部支承结构应包括在整体模型内进行计算分析，对于体形复杂、跨度大的结构，在地震等动力荷载作用下下部支承结构可能会发生损伤，并且与上部结构之间会产生耦合动力影响，因此需要建立整体模型^[3]。全面采用几何非线性和材料非线性分析，对大变形结构进行弹塑性全过程分析，确定结构在极限荷载作用下屈曲模态和破坏机理，提高计算精度和分析深度。

3.3 加强整体稳定与抗震性能设计

针对大跨度工业建筑设计中整体稳定性控制难题，在大跨度工业建筑设计中全面开展弹性及弹塑性全过程稳定分析，大跨度结构整体稳定性是大跨度结构极限承载力的决定性因素，大跨度结构在达到极限承载力之前就表现

出较大的非线性效应，整体稳定性分析必须考虑几何非线性，必要时还要考虑几何非线性与材料非线性相互耦合的双重非线性。分析时应采用一致缺陷模态法把结构最低阶屈曲模态当作初始缺陷分布模态，对结构开展稳定性分析，恰当选取稳定安全系数。大跨度钢结构的抗震设计有两个明显的特点，竖向地震作用影响大，多个振型（含高阶振型）参与共振，所以设计时要同时做水平和竖向抗震验算。当用振型分解反应谱法时，计算振型数应使各振型参与质量之和不小于总质量的 90%；对体型复杂的大型钢结构，抗震验算应采用时程分析法。大跨度钢结构中长细比大、受压的构件严格控制构件的长细比、板件宽厚比防止局部屈曲造成整体倒塌。

3.4 优化节点构造与强化施工协同

为了解决节点构造复杂和施工经济协调性差的问题，对焊接球节点、螺栓球节点、铸钢节点等关键节点形式做专项受力分析，用有限元法对不同荷载工况下节点的应力分布特征进行模拟验证。对复杂的网格结构节点，要准确估计节点刚度、节点重量，严格控制节点加工制作工艺和质量控制要点。焊接空心球连接 H 型钢 Z 字形螺栓节点适合于全装配大跨度弦支穹顶结构体系上部网壳连接，弦杆用热轧 H 型钢，便于栓接、施工方便、制造能耗低，可以实现部品部件到体系的标准化^[4]。施工协同上要充分运用数字技术，依靠 BIM 技术创建多专业协同平台，提前解决结构碰撞问题，准确调整杆件和节点，从设计源头保证结构稳定，利用 BIM 仿真精度高的特点，对施工所需的构件进行精确排布优化，实现构件的工厂化、批量化、预制化生产，提升现场施工效率和精度。同时创建设计团队和施工单位之间的协同机制，加强施工过程模拟以及临时支撑方案的设计，在保证结构安全的基础上合理控制工程成本，使设计优化与施工方案达到最佳匹配。

4 结语

大跨度工业建筑结构设计包含力学、材料、施工等诸多领域，随着工业建筑向着更大的跨度、更复杂的使用需求方向发展，结构设计所遭遇的技术难题愈加明显。本文对结构选型不合理、荷载取值及分析精度不够高、整体稳定性控制难、节点构造复杂、施工经济协调不好等技术问

题进行了系统的梳理,提出了改善结构体系设计、提高计算精度、加强稳定抗震设计、优化节点构造、BIM 协同应用等系统化的技术措施。研究表明,大跨度工业建筑结构设计优化要以全寿命周期为理念,在保证结构安全的基础上,用科学选型、精细计算、高效协同的方法来达到工程安全性和经济性的一致。伴随着数字化设计工具的不断发展以及工程经验的不断积累,大跨度工业建筑结构设计技术一定会越来越完善。

[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]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.

[3]杜晶.工业建筑大跨度管桁架钢结构设计优化[J].四川水泥,2024(10):94-95.

[4]梁文捷.大跨度空间结构施工创新技术及试验研究[J].四川水泥,2026(5):21-24.

作者简介:崔丽娜(1981—),女,汉族,河北邢台人,高级工程师,河北工程学院毕业,现就职于河北天艺建筑设计有限公司,从事结构设计工作。