

工业建筑钢结构设计与优化研究

肖青云

河北天艺建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050071

[摘要]钢结构因为强度高、施工速度快、空间利用率高等特点,在工业建筑中得到了广泛的使用。文中论述了工业建筑钢结构的设计原则,剖析了目前设计中结构选型不合理、构件材料利用率低、节点设计复杂、结构稳定性控制不力、经济性与安全性协调不佳等状况,并从改善结构体系布局、提升构件截面设计合理性、改良节点连接方案、加强结构稳定性分析和控制、推进 BIM 技术辅助设计并达成安全性和经济性协同优化这五个方面给出优化策略,希望给工业建筑钢结构设计给予参照。

[关键词]工业建筑; 钢结构; 结构优化; 稳定性分析; BIM 技术

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20036

中图分类号: TU27

文献标识码: A

Research on Design and Optimization of Industrial Building Steel Structures

XIAO Qingyun

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

Abstract: Steel structures have been widely used in industrial buildings due to their high strength, fast construction speed, and high space utilization efficiency. The article discusses the design principles of industrial building steel structures, analyzes the current situation of unreasonable structural selection, low utilization of component materials, complex node design, ineffective control of structural stability, and poor coordination between economy and safety. Optimization strategies are proposed from five aspects: improving the layout of the structural system, enhancing the rationality of component section design, improving node connection schemes, strengthening structural stability analysis and control, promoting BIM technology assisted design, and achieving coordinated optimization of safety and economy. It is hoped that this will provide reference for the design of industrial building steel structures.

Keywords: industrial building; steel structures; structural optimization; stability analysis; BIM technology

引言

钢结构由于具有自重轻、抗震性能好、施工周期短、工业化程度高等优点,在工业厂房、仓储物流、大跨度生产车间等工业建筑中得到越来越广泛的应用。钢结构建筑采用工厂预制、现场组装的工业化建造方式,可以减少人力依赖、减少施工浪费,是我国建筑工业化发展的主要方向。但是钢结构的设计在工艺的选择以及技术的应用上要求很高,如果规划不当就会对结构的承载能力、使用寿命造成严重影响。工业建筑钢结构设计要遵照安全、适用、经济、耐久的准则,不过目前仍存有荷载取值和受力分析不准、结构选型同功能需求不符、材料选用不适配等状况,从而致使结构设计品质受到影响。本文从工业建筑钢结构实际出发,对目前设计中存在的主要问题进行分析,并提出相应的改进措施。

1 工业建筑钢结构设计原则

工业建筑钢结构设计要遵照系统化的主要准则,保证结构安全性和经济性的有机融合。建筑钢结构设计要遵照安全可靠、经济合理、施工方便、绿色环保的基本准则,并且还要考虑结构性能和实际使用要求。安全可靠是钢结构设计的基本原则,要求结构在各种荷载和作用下不发生破坏或者失稳,构件的强度、刚度和稳定性指标要符合规范要求。适用性原则是指结构的功能要和工业生产实际需要相适应,即满足工艺设备布置、吊车运行、空间尺度等各方面的要求。经济合理性原则即在保证安全和适用的前提下,尽可能减少工程造价,用钢量、构件截面、节点构造等都应合理控制。耐久性原则就是对钢结构在工业环境下所具有的抗腐蚀性以及长期使用性能进行考虑。上述原则之间存在着内在联系,安全可靠和适用性是基本前提,经济合理性和耐久性要以安全为前提,在安全的前提下进行系统的优化,使各方面的协调统一达到最佳效果。

2 工业建筑钢结构设计存在的问题

2.1 结构选型合理性不足

结构选型是工业建筑钢结构设计的第一步,它直接决定工程是否经济、施工是否可行。目前结构选型存在的主要问题有:结构体系的选择与生产工况不相匹配,不同的建筑类型对应着最佳的结构体系,需要考虑跨度、高度和使用要求,门式刚架适用于跨度为12~30m的中轻型厂房,钢框架适用于多层工业建筑,钢桁架及网架适用于超大跨度建筑。当工业厂房跨度大于30m时,门式刚架的用钢量明显增大,而钢桁架或者网架结构在受力效率以及材料用量方面更加优越,但是设计人员大多固守已有的结构体系,缺少方案比选。支撑系统布置没有系统性地考虑,支撑体系设计需要设置柱间支撑、屋面水平支撑,承受水平荷载,保证结构整体稳定,但是实际设计中常常没有考虑到支撑的位置和间距。另外,对于分期建设的工业厂房,在选型时没有给以后扩建留出足够的接口条件,增加了后期改造的难度和成本。部分项目在结构选型阶段没有全寿命周期的考虑,在后期的维护管理、设备更新、功能调整方面考虑不够周到,造成结构适应性差,建筑长期使用效益和投资回报水平受到影响。

2.2 构件材料利用率不高与节点设计复杂

构件材料利用率、节点设计是反映钢结构设计水平的两个重要指标,二者互相影响。就材料利用而言,对目前钢结构建筑行业存在产业化程度低、构件型材使用率低、生产自动化水平低等状况进行分析,可以从截面规格序列以及结构标准化设计这两方面来改善。设计人员一般会用焊接组合截面而不是直接使用轧制型材,造成制造效率下降。构件设计存在明显的截面尺寸偏大问题,部分设计为了简化计算而使用统一截面,而不是变截面设计,造成材料浪费。优化构件截面形式,采用H型钢、箱型截面等高效截面可以提高材料利用率,但是高强度钢材的使用还比较少。从节点设计上看,节点构造复杂化明显,部分设计为了追求理论受力性能而采用复杂的节点,增加了现场焊接量和安装难度^[1]。节点设计要遵循“强节点、弱构件”的原则,刚接节点一般采用腹板螺栓连接、翼缘焊接的形式,但是实际设计中常常出现节点形式过于复杂的情况。节点标准化程度低,同类构件节点差别大,不能实现高效拼装。该示范工程构件型材使用率达到了97.81%,节点标准化程度为78.5%,建造效率提高了208.3%,说明了

标准化设计对施工效率的影响很大。

2.3 结构稳定性控制存在不足

钢结构稳定性问题属于影响钢结构安全、经济性的主要因素。随着现代工业建筑向大跨度、高层化发展,稳定性控制的不足也愈加明显。钢结构稳定性问题一直被设计人员所重视,考虑荷载、支撑条件、构件形式等因素对提高钢结构稳定性有着十分重要的作用。整体稳定计算存在简化失当,部分设计只做平面框架分析,没有考虑空间协同效应,在大跨度单层厂房中,屋盖系统的空间刚度非常重要。钢梁应验算抗弯强度、抗剪强度、整体稳定和局部稳定,受压翼缘应设置加劲肋防止局部失稳。局部稳定验算不够细致,薄壁构件的腹板高厚比、翼缘宽厚比一般依靠经验值来控制,局部屈曲提前发生的可能性大。二阶效应及非线性分析的不足,在大荷载、长细比大的情况下,常规线弹性分析不能很好地反映结构变形所引起的附加内力。吊车梁疲劳稳定性控制不足,伴随着我国经济水平的迅速提高,许多原有的钢结构厂房已经不能满足现代工业生产的需要,其中钢吊车梁存在的问题最为明显,在反复吊车荷载的作用下,节点区域以及变截面处的应力集中和疲劳累积没有得到系统的验算。

2.4 经济性与安全性协调不够

经济性和安全性是工业建筑钢结构设计的主要矛盾,目前两者之间存在失衡现象。设计阶段没有形成有效的成本控制意识,在没有充分必要性的情况下选取过高的安全冗余,造成用钢量远远超过合理的范围。不同类型厂房钢结构设计方案经济性及可行性比较研究显示,在技术指标、成本效益等各方面综合考虑之后,可以为项目团队提供更好的方案选择,从而达到经济、环保和社会效益的统一。构件选材上高强钢的使用明显不够,主要采用高强高效钢材,在保证受力要求的前提下减小截面尺寸,降低钢材用量和成本,但是设计人员对于更高强度钢材的应用存在顾虑。目前,钢结构产业链上下游协同不足、钢材性能与设计要求不符、成本优化途径不明等问题都对行业发展产生影响^[2]。全生命周期成本意识薄弱,设计上过分看重一次性建造成本,对于运营期间的维护成本、能耗成本以及将来改造的难易程度没有提前预见,从而造成长期成本的被动上升。设计流程里经济性评价机制还没有形成,各个方案的造价比较大只停留在估算阶段,缺少全方位的综合经济评价。

表 1 钢结构设计问题与优化策略对应关系表

问题编号	问题类别	主要表现	对应优化策略
2.1	结构选型合理性不足	体系选择与工况脱节，支撑布置不当，扩建预留不足	优化结构体系布局，科学比选方案
2.2	构件材料利用率不高与节点设计复杂	轧制型材占比低，节点标准化程度低，焊接工序多	提高构件截面设计合理性并优化节点连接方案
2.3	结构稳定性控制不足	整体稳定简化，局部稳定不精准，吊车梁疲劳隐患	加强结构稳定性分析与控制
2.4	经济性与安全性协调不够	设计保守，高强钢应用不足，全生命周期成本意识弱	推进 BIM 技术辅助设计并实现安全性与经济性协同优化

3 工业建筑钢结构优化设计策略

3.1 优化结构体系布局

优化结构体系布局，提高工业建筑钢结构设计水平。首先要建立方案比选机制，在设计初期就对不同的结构体系进行多方案的综合比较。根据厂房跨度（单跨 $\leq 36\text{m}$ ，多跨不大于 24m ）、高度（檐口高度一般为 $6\sim 12\text{m}$ ）来确定刚架形式，保证柱距（一般为 $6\sim 9\text{m}$ ），吊车梁、檩条的布置。跨度大于 30m 的工业建筑一般采用钢桁架、网架结构来减小用钢量，提高空间利用率。其次要合理设置各种支撑系统，屋面水平支撑、柱间支撑位置及间距要经过通盘考虑，保证结构在各种情况下整体抗侧移刚度符合规范要求。主厂房钢结构方案经过精确选择结构体系，在保证结构可靠度的基础上，达到设计选型准确合理、工程经济性最好、工程投资和施工难度最小的目的。最后要考虑到分期建设的实际需要，在结构布局上留出足够的接口条件，减少后期改造施工的难度以及经济成本。

3.2 提高构件截面设计合理性并优化节点连接方案

提高构件截面设计的合理性，改善节点连接方案可以从标准化、轻量化、预制化三个方面一起推进。从标准化角度出发，应该优先采用轧制型材代替焊接组合截面，热轧 H 型钢去掉焊接工艺的预处理、焊接、矫正等六个工序，吨钢成本比焊接 H 型钢低，需要设计人员改变固有的思维模式。轻量化方面要根据受力分布特点合理选择变截面设计，在保证强度的前提下优化截面尺寸，加大高强度钢材的使用比例。装配式复杂钢结构建筑在节点优化上应该用数字设计技术进行正向协同设计，寻找 AI 辅助设计，依靠数据来驱动的系统集成设计。节点构造应以简单可靠为原则，在保证承载力满足“强节点、弱构件”的基础上，尽量采用螺栓连接代替焊接连接，减少高空焊接作业量。以空心管柱为结构体系的钢框架结构标准设计，节点标准化率 78.5% ，建造效率提高 208.3% ，说明该种标准设计有明显的优势。

3.3 加强结构稳定性分析与控制

加强结构稳定性分析与控制，必须从计算方法和构造

措施两个方面一起进行。随着现代建筑结构向大跨度、高层化发展，钢结构稳定性问题一直被当作影响钢结构安全性、经济性的重要因素。计算方法上要创建起由总体到局部的多层稳定分析体系，用空间有限元模型代替传统的平面框架简化分析，考虑屋盖系统空间刚度和面外支撑的协同约束。局部稳定上要精细控制构件的宽厚比、高厚比，按实际情况来决定加劲肋的数量、位置。对于二阶效应比较明显的大型构件，一般采用直接分析法或者引入放大系数的方法来考虑 P- Δ 效应的影响^[3]。经过研究得知，利用有限元分析建立不同的工况下稳定性的计算模型，并且用数值模拟来验证其准确性，可以提高钢结构稳定性设计的准确度。从构造措施上来说，支撑系统布置要和计算模型中所给出的约束条件相一致，保证实际结构的性能同理论分析结果相吻合。对吊车梁等受反复荷载作用的构件要进行疲劳验算，在构造设计上采用圆弧过渡、焊缝打磨等方式来减小应力集中。

3.4 推进 BIM 技术辅助设计并实现安全性与经济性协同优化

采用 BIM 技术对设计进行辅助，是达成钢结构设计安全和经济的双赢办法。数字化设计以及 BIM 技术的发展已经成为钢结构厂房设计及施工的主要趋势，BIM 技术利用创建三维数字模型的方式给钢结构厂房的设计、施工、运维等各方面提供全方位的支持。在设计阶段用结构化设计软件创建高精度的钢结构 BIM 三维模型，用模型进行构件优化排版、碰撞检测和冲突解决，保证各个构件之间协调、无缝连接。同时还要建立钢结构设计全生命周期成本评价体系，方案比选不能只看初始建造成本，应该考虑运营维护成本、能耗成本和未来改造的方便性。钢结构建筑由于具有高效、环保、可循环等特点，已经成为建筑工业化和绿色建筑发展的主要方向，在设计阶段就应该将它的成本考虑进去。设计团队应该采用钢结构深化设计、预制化协同的工作流程，用 BIM 模型直接产生加工详图和数控加工数据，从而达成设计到制造的数据贯通^[4]。在安全性与经济性的平衡方面，应该采用基于可靠度的优化

方法,对不同的构件重要程度和失效后果加以区分,合理安排安全储备,借助成本-安全敏感性分析找出最能带来优化效益的部位,达成安全性同经济性的动态均衡并促进协同改善。

4 结语

工业建筑钢结构设计属于一项包含技术性以及经济性双重属性的系统工程。本文从结构选型、构件材料利用率、节点设计、稳定性控制、经济性和安全性协调等方面对目前设计存在的问题进行分析,并提出体系布局优化、截面和节点优化、稳定性分析与控制、BIM 技术辅助等优化措施。经过研究可知,工业建筑钢结构设计的优化要达到安全可靠与经济合理动态平衡的目的,必须依靠数字化设计手段,实行标准化、预制化,增强稳定性分析的能力,从而实现设计水平的全面提高。伴随着工业生产的发

展以及工艺要求的不断提高,钢结构设计也必须不断革新、改进,才能满足日益复杂多样的工业建筑需要。

[参考文献]

- [1]翟宏磊,张嘉麟,郝少杰.工业建筑结构设计优化[J].居舍,2019(19):89.
- [2]王丽,王海林.钢结构在工业建筑设计施工环节中的优化研究[J].四川水泥,2018(9):349.
- [3]张德亮,杨凯强.工业建筑结构设计的安全性及安全性问题[J].中国建筑装饰装修,2026(9):69-71.
- [4]顾晓山.工业建筑钢结构技术的发展与实践[J].钢结构(中英文),2024,39(11):40-45.

作者简介:肖青云(1993—),女,汉族,河北邢台市人,助理工程师,桂林理工大学毕业,现就职于河北天艺建筑设计有限公司,从事结构设计工作。