

# Lightweight Design and Economic Analysis of Long-Span Roof Structures for Industrial Plants

Wen Li

North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

With the continuous expansion of industrial production scale, the demand for large-span factories in the industrial sector is increasing. As a core component, the design level of the roof structure directly affects the safety, applicability, and economy of the factory. Lightweight design, relying on its advantages in material conservation, energy consumption reduction, and construction convenience, has become the core mainstream direction in the field of large-span roof structure design. This paper comprehensively reviews the core theories and design criteria of lightweight design for large-span roof structures of industrial factories, analyzes the implementation methods of lightweight design from three dimensions: structural system selection, material optimization application, and construction detail design. It discusses the economic impact points and evaluation approaches of lightweight design through practical cases. Standardized lightweight design can optimize the total life cycle cost while ensuring structural safety.

## Keywords

industrial plant; large-span roof; lightweight design; Economic analysis

## 工业厂房大跨度屋盖结构的轻量化设计与经济性分析

李稳

中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

伴随工业生产规模的不断拓展, 工业领域对大跨度厂房的需求日益扩大, 屋盖结构作为核心组成部分, 其设计水准直接影响厂房的安全性、适用性及经济性, 轻量化设计依仗它在材料节约、能耗降低、施工便捷等范畴的优势, 已成为大跨度屋盖结构设计领域的核心主流方向。本文全面梳理工业厂房大跨度屋盖结构轻量化设计的核心理论及设计准则, 从结构体系选择、材料优化应用、构造细节设计三个维度深入分析轻量化的实现方法, 借助实际案例探讨轻量化设计的经济影响要点及评估途径, 规范的轻量化设计可在保证结构安全的基础上, 实现全生命周期成本的优化。

## 关键词

工业厂房; 大跨度屋盖; 轻量化设计; 经济性分析

## 1 引言

当制造业处于转型升级的背景里, 工业用厂房正慢慢朝着大跨度、大空间的方向拓展, 为满足规模化生产、大型设备装设及工艺流程改进的要求, 屋盖结构属于大跨度工业厂房的核心承重组成, 不仅需承担自身质量、风雪荷载等外力, 也需契合工业生产活动对应的特殊环境要求。以往的屋盖结构设计多把强度与稳定性放在优先考量的位置, 往往会出现材料用量偏高、结构自重偏沉这类问题, 不仅推高了初期建设成本, 也加重了施工的难度及后期维护的压力。

【作者简介】李稳(1987—), 男, 中国安徽萧县人, 本科, 工程师, 从事建筑设计研究。

## 2 大跨度屋盖结构轻量化设计的理论基础与设计原则

### 2.1 轻量化设计的核心理论体系

大跨度屋盖结构轻量化设计借助结构力学、材料力学、优化设计理论等核心理论, 核心目标在于满足结构承载力、刚度、稳定性及耐久性等基本要求。借助合理技术途径减轻结构自身重量, 结构力学为轻量化设计支撑起受力分析的基础, 厘清各类结构形态的传力路径及受力特征, 为结构体系的选型及优化构建理论依据; 材料力学主要针对材料性能与受力的联系展开探讨, 协助设计人员恰当发挥材料强度及韧性的作用, 避免材料浪费。轻量化实现离不开优化设计理论这一关键技术支撑。通过建立数学模型, 结合约束参数, 就结构参数展开优化求解工作, 实现结构自身重量与性能表现的均衡状态。全生命周期理论同样能为轻量化设计提供关键指导。规定设计需兼顾的不只是初期建设成本, 需综合兼

顾施工阶段、使用阶段与拆除阶段的成本及能源消耗,实现全生命周期内的效益最大化,此类理论彼此融合渗透,创立了大跨度屋盖结构轻量化设计的完整理论体系。

## 2.2 大跨度屋盖结构的轻量化需求与约束条件

工业厂房大跨度屋盖结构的轻量化需求源自工业生产实际需求及绿色发展理念的要求,从生产需求来看,轻量化构造可缓解下部结构面临的承重压力,降低柱、基础等构件的材料投入量,同时为厂房内部创造更宽敞的区域,便于生产设备的布局与工艺流程的升级,从绿色发展角度,轻量化设计可降低钢材、混凝土等建材的消耗总量,减少建材生产阶段的能源消耗和碳排放,符合低碳发展要求<sup>[1]</sup>。轻量化设计不是毫无约束地减少结构自重,而是需于多重约束条件下实现优化,首要约束条件是结构安全性,务必达到各类荷载作用下的强度、刚度与稳定性要求,防止因结构自重下降引发失效事故,其次是适用性约束,得适应工业厂房的作业环境,如高温、高湿、粉尘多等特殊条件,保障结构的耐久性与使用功能。设计方案应契合当前施工技术的实际水平,助力构件的制作、转运及装配,要规避因设计过度烦琐引发的施工成本大幅上涨。

## 2.3 轻量化与经济性协同的设计原则

大跨度屋盖结构轻量化设计需遵循“安全优先、轻量化与经济性协同、全生命周期优化”的核心原则。安全优先原则是结构设计的核心前提,各类轻量化优化举措均需将结构安全保障作为根本前提,依托周密的力学核算及性能验证,确保结构满足相关规范要求。轻量化与经济性协同原则明确设计过程需权衡结构自重及成本之间的联系,需防止因盲目追求轻量化而选用成本过高的材料或技术,需通过多方案对比,筛选出轻量化成效与经济成本最优的设计方案。

# 3 大跨度屋盖结构轻量化设计的技术实现路径

## 3.1 结构体系的选型与优化

结构体系的恰当选型是实现大跨度屋盖轻量化的关键要素,常用的大跨度屋盖结构体系包括空间桁架结构、网架结构、索膜结构、壳体结构等。各类体系在轻量化成效及适用场景方面呈现差异,空间桁架结构与网架结构依靠杆件的空间受力实现荷载传递,拥有自重轻量、跨度宽阔、整体协调性好等优势,适用于各类大跨度工业厂房,借助杆件布置及截面规格的优化,可进一步降低结构自重。索膜结构把高强度索与薄膜材料当作核心受力构件,依托自重极轻的优势,成为轻量化设计的理想选项,可应用于大跨度、大空间且采光要求达到一定程度的工业厂房,但索膜结构对节点设计与施工精度的要求相对较高,需结合厂房使用环境进行合理设计。壳体结构借助曲面形态达成荷载传递,依靠材料抗压性能实现自重降低,适用于特定造型需求的厂房。在选型过程中,需结合厂房跨度、使用功能、施工条件等要素实施全面研判,需采用混合结构体系时可酌情实施,兼顾轻量化

效果与实际应用性能。

## 3.2 轻质高强材料的优化应用

采用轻质高强材料,是达成轻量化设计的核心手段之一,恰当选择复合材料可在保障结构性能的前提下,可大幅减少结构的自重负荷,优先采用高强度钢材,其具备更高的强度与韧性,能缩减钢材的消耗数量,也能强化结构的抗震能力及耐久特性<sup>[2]</sup>。在构件加工过程中,采用薄壁型钢与空腹截面等结构形式,能进一步减少钢材的消耗需求,同时保证构件的承载能力,复合材料借助其轻质、高强、耐腐蚀等长处,在大跨度屋盖结构范畴内的应用规模逐步扩大,纤维增强复合材料具备比强度高、抗疲劳性能佳等特性,适用于屋盖受力构件与围护构件的制造,同时降低结构的自重,能契合工业厂房的腐蚀环境。轻质围护材料的选用也不可或缺,譬如采用压型钢板、夹芯保温板之类的轻质围护材料,可替换掉传统厚重的围护结构,可有效降低屋盖的整体重量,材料优化运用的关键并非简单采用高价高强材料,而是要结合结构受力特点与经济性要求实施合理配置。针对结构承载压力较大的区域,宜采用高强度材料,在次要部位选取普通材质,实现材料性能的精准匹配;需重视材料加工及施工相关的成本考量,优先选用加工便捷、货源充沛的材料,防止因材料短缺引发成本上升,还需关注材料的耐久性,选用抗腐蚀、抗老化的材料,降低后期维护成本。

## 3.3 构造细节的轻量化设计

构造细节设计对大跨度屋盖结构的轻量化表现存在显著的关键作用,以构件连接、围护结构、支撑系统等构造细节的优化为手段,可进一步减少结构的自重,提升整体经济性。在构件连接方面,采用螺栓连接、焊接连接等高效连接方法,减少连接结构件的数量及自重,同时可保障连接的可靠程度。对于装配式构件,优化连接节点的构造形式,提高装配效率,降低施工成本,围护结构构造优化需兼顾轻量化及保温、隔热、防水等功能需求,采用双层围护结构设计,内层采用轻质保温材料,外层采用高强防水板材,以使用功能符合要求为前提,降低围护结构自重。恰当布置屋面采光带和通风口,选用轻质透光材料,既能契合厂房对采光与通风的实际需要,又能规避额外增加过多自身重量。

# 4 大跨度屋盖结构轻量化设计的经济性分析与实践保障

## 4.1 经济性分析的核心维度与评估方法

开展大跨度屋盖结构轻量化设计的经济性分析,需覆盖多个维度,核心涉及初始建设成本、施工执行成本、使用阶段费用以及全生命周期总成本,初期建设成本主要覆盖材料费用、构件加工费用等,轻量化设计借助缩减材料用量及构件数量,可直接压缩初期建设成本,施工阶段成本与结构自重、构件复杂度呈密切关联,轻量结构能降低运输难度及吊装费用,缩减施工机械的投入数量及作业时长,由此实现

施工成本的降低。使用阶段的费用涉及维护成本、能耗成本等，轻量化结构采用的高强耐腐材料可减少构件的维修与更换次数，降低维护成本；建筑结构自重下降可减少下部结构的能耗支出。若结合轻质围护材料与节能构造，还能降低厂房的采暖、制冷能量消耗，全生命周期成本分析则将综合考量上述各阶段的成本。通过建立成本模型，比对不同设计方案的全生命周期成本数值，为设计方案的选择提供科学依据。

#### 4.2 不同类型厂房的轻量化设计实践案例

**机械加工厂房大跨度屋盖设计案例：**某机械加工厂房需契合大型设备安装及生产空间的要求，屋盖采用网架结构体系，采用高强度钢材及轻质压型钢板作为围护用料，在设计过程中，借助有限元分析对网架杆件的截面及布置进行优化，简化传力路径，并对节点构造实施优化调整。采用一体化螺栓拼接的连接节点，屋盖结构自身重量明显下降，前期建设费用及施工支出均出现下降，投入使用后，因借助耐腐材料实施构造优化，维护成本较低，且厂房空间开阔，满足了机械加工的工艺需求，间接提升了生产效率<sup>[1]</sup>。  
**仓储物流厂房大跨度屋盖设计案例：**某仓储物流厂房跨度偏大、空间需求突出，同时需高频开展货物吊装作业，屋盖采用索膜结构及网架结构组成的混合体系，受力构件采用高强度钢材及纤维增强复合材料，围护结构采用轻质夹芯保温板，核心优化索膜结构的张拉体系及节点构造，降低结构自重的同时，保障屋盖的稳定状态及抗风能力。此方案既降低了材料消耗，又缩短了施工时长，同时为仓库空间提供了良好的采光保障，降低了照明系统的能源消耗，全生命周期经济性优势显著。  
**化工厂房大跨度屋盖设计案例：**某化工厂房的周边环境存在腐蚀性，要求屋盖结构具有较高的耐久性，屋盖结构采用空间桁架体系，受力部件采用耐腐高强度钢材，采用纤维增强复合材料板材作为围护结构。在设计过程中，对桁架杆件的截面形态及连接节点进行优化，采用密封防腐处理，同时简化支撑系统，降低结构自重。此结构实现了腐蚀性环境下的耐久性指标要求，同时压缩了前期基建投入及后续运维成本，防止了构件受腐蚀后出现的频繁更换，增强了厂房的运营稳定性。

#### 4.3 设计实施的保障措施与行业趋势

要达成大跨度屋盖结构轻量化设计的有效实施，需完善技术标准与规范体系，各相关机构需贴合行业发展实际需

求。补充修订大跨度屋盖结构设计规范，清晰界定轻量化设计的技术要点、计算方式及质量管控规范，为设计及施工环节提供参考支撑。企业应当构建健全内部技术审核体系，增强轻量化设计方案力学性能验证及经济合理性评估的强度，保障方案的安全性及合理性符合要求。技术保障方面，需加大数字化与智能化技术的应用范围与深度，借助 BIM 技术达成结构设计、施工及运维的全周期数字化管控，精准复现结构受力状态及施工推进流程，对设计与施工阶段的问题做到提前排查，降低优化相关的成本开销；采用人工智能算法围绕结构设计参数进行自动化优化，提高设计实施效率与优化成果质量，加强产学研合作，促进轻质高强材料、新型结构体系等核心技术的研发与落地，为轻量化设计提供技术支撑。从行业趋势来看，未来大跨度屋盖结构轻量化设计将更重视绿色低碳与智能化发展，随着低碳建筑理念的深入，轻量化设计将同节能及环保技术实现深度融合，可进一步减少结构的碳排放数量；智能技术会被大量运用到结构的设计、建造及运维全流程，实现结构性能的实时监测与智能化调控。模块化及装配式的设计模式将成为行业主流，通过标准化构件制作及装配式施工方法，提高建设效率，助力大跨度工业厂房屋盖结构设计往更高效、经济、绿色的方向升级。

## 5 结语

针对工业厂房大跨度屋盖结构开展的轻量化设计，是能同时兼顾结构安全、使用功能及经济性的关键设计理念，其核心内涵是借助科学的结构体系选型、合理的材料优化应用及精细的构造细节规划，以结构性能有保障为前提缩减自重，本文通过系统梳理轻量化设计的理论基础、技术路径及经济性分析，得出以下结论：轻量化设计的开展需依托结构力学、优化设计等相关理论，需严守安全首位、轻量化与经济性协同等准则，在多维度约束情形下达成结构优化；结构体系选择、轻质高强材料应用及构造细节优化为轻量化达成的核心技术路径，应结合厂房类型与使用需求合理采用。

### 参考文献

- [1] 张睿,李宇琛,王东旭.某核工业厂房钢桁架——混凝土组合屋盖设计[J].山西建筑,2020,46(05):35-37.
- [2] 江文龙.雁形板结构在水电站大跨度厂房屋盖系统中的应用[J].工程技术研究,2016,(07):105+112.
- [3] 王毅,遇瑞,罗永峰.某厂房钢屋盖整体滑移施工分析[J].结构工程师,2008,(05):141-144.