 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9323

Selection and Mechanical Performance Analysis of Large Span Steel Structure Roof System

Haifeng Zhu

China Railway Times Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241000, China

Abstract

Large-span steel structure roof systems are widely adopted in large-scale public buildings such as sports stadiums, convention centers, and airport terminals, owing to their advantages including extensive span coverage, lightweight design, aesthetic appeal, and controllable construction timelines. The selection of roof systems directly determines the functional realization, structural safety, and economic rationality of buildings, with mechanical performance analysis serving as the core method to validate the scientificity of system selection and ensure structural stability. Therefore, in-depth research on the selection principles of roof systems, precise analysis of their mechanical properties, and achieving synergistic optimization between system selection and mechanical performance constitute the core challenges in large-span steel structure roof design. Based on existing research findings and engineering practices, this paper systematically analyzes the selection criteria and mechanical properties of mainstream roof systems.

Keywords

Large-span steel structure; Roof system; Design selection; Mechanical properties; Stability analysis

大跨度钢结构屋盖体系选型与力学性能分析

朱海峰

中铁时代建筑设计院有限公司，中国·安徽 芜湖 241000

摘　要

大跨度钢结构屋盖体系凭借其跨度覆盖能力强、自重轻、造型美观、施工周期可控等优势，广泛应用于体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑。体系选型直接决定建筑功能实现、结构安全性能及经济合理性，而力学性能分析则是验证选型科学性、保障结构稳定的核心手段。因此，深入研究屋盖体系的选型规律，精准分析其力学性能，实现选型与力学性能的协同优化，是大跨度钢结构屋盖设计的核心课题。本文基于现有研究成果与工程实践经验，对主流体系选型及力学性能展开系统分析。

关键词

大跨度钢结构；屋盖体系；选型设计；力学性能；稳定性分析

1 引言

随着建筑行业向大跨度、大空间、个性化方向发展，大跨度钢结构屋盖体系的应用愈发广泛。通常认为，跨度大于 60m 的屋盖结构可界定为大跨度屋盖，其核心需求是在满足建筑功能与造型要求的同时，实现结构安全、经济高效与施工可行的统一。钢结构因材料强度高、韧性好、工业化程度高，成为大跨度屋盖的首选材料，而屋盖体系的选型作为设计初期的关键环节，直接影响后续力学分析、施工方案及运营维护成本。

【作者简介】朱海峰（1991—），中国安徽合肥人，硕士，工程师，从事结构设计研究。

2 大跨度钢结构屋盖主流体系类型及特点

2.1 空间桁架体系

空间桁架体系由杆件通过节点连接形成三维受力结构，杆件主要承受轴力（拉力或压力），受力形式简洁，能充分发挥钢材的高强度性能。该体系按网格形式可分为正放四角锥、正放三角锥、斜放四角锥等类型，适用于跨度 60-120m 的矩形、多边形或圆形建筑。

空间桁架体系的优势在于结构整体性好，节点构造相对简单，可采用标准化杆件与节点工厂预制、现场拼装，施工效率高，成本可控；对支座沉降的适应性较强，能通过调整杆件布置优化受力。其局限性在于跨度超过 120m 后，杆件内力与截面尺寸显著增大，自重上升导致经济指标变差，且造型灵活性有限，难以实现复杂曲面造型。

2.2 空间网壳体系

空间网壳体系是由曲面网格组成的壳体结构，融合了

桁架的受力特点与壳体的空间受力优势，通过曲面形态将外部荷载转化为轴力、剪力与弯矩的组合作用，受力均匀合理，跨度覆盖能力更强，适用于跨度 80-200m 的圆形、椭圆形或异形曲面建筑。

根据曲面形态，网壳体系可分为球面网壳、柱面网壳、双曲抛物面网壳等。球面网壳受力最优，能将风荷载、恒载等均匀传递至支座，适用于大跨度圆形建筑；柱面网壳适合矩形平面的长跨度建筑，具有较好的横向刚度。网壳体系的核心优势是造型美观，可实现多样化曲面设计，结构刚度大、稳定性好，自重相对较轻；但节点构造复杂，曲面加工与安装精度要求高，施工难度与成本高于空间桁架，对施工工艺的依赖性强 [1]。

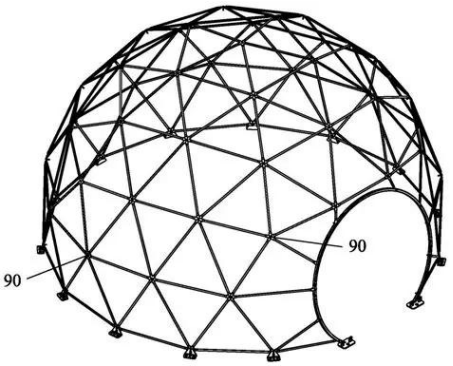


图 1 空间网壳体系案例

2.3 索膜组合体系

索膜组合体系以高强度拉索为受力骨架，以柔性膜材为覆盖材料，属于大跨度轻钢结构体系，核心受力特点是通过拉索的预张拉形成稳定的受力体系，膜材主要承受张力，无受压或受弯工况，能最大限度发挥材料性能，适用于跨度 100-300m 的超大跨度建筑。

该体系分为索网体系、膜结构体系及索膜协同体系，具有自重极轻（仅为传统钢结构的 1/10-1/5）、跨度能力极强、造型灵动（可实现大悬挑、异形曲面）等优势，且施工周期短，便于拆卸与改造。其局限性在于稳定性依赖拉索预张力控制，对风荷载敏感，易产生风振响应，膜材耐候性、防火性较差，需定期维护更换；同时对支座刚度要求极高，需设置专用锚固结构。

2.4 张弦梁体系

张弦梁体系是由上弦受压梁、下弦拉索及中间撑杆组成的组合结构，通过拉索预张拉抵消上弦梁的部分弯矩，使上弦梁从受弯为主转化为受压为主，显著降低梁的截面尺寸，优化受力性能。该体系适用于跨度 60-150m 的矩形或椭圆形平面建筑，尤其适合体育场馆、会展中心的看台屋盖。

张弦梁体系的优势的是受力清晰，兼具钢结构的刚度与拉索的轻量化特点，施工简便，可采用分段拼装、整体提升工艺，经济成本介于空间桁架与索膜体系之间；造型简洁大方，能适应一定的曲面变化。其局限性在于跨度超过 150m 后，撑杆与拉索的受力集中问题突出，需加强节点设计，且对预张拉精度要求高，张拉偏差易导致整体受力失衡 [2]。

2.5 混合组合体系

混合组合体系是结合两种及以上单一体系优势形成的复合结构，如网壳 - 索膜组合、桁架 - 张弦梁组合、钢桁架 - 混凝土组合等，通过不同体系的协同受力，弥补单一体系的缺陷，满足超大跨度、复杂造型及特殊功能需求，适用于跨度 150m 以上的超大型建筑。

该体系的核心优势是受力优化，能根据建筑功能分区调整结构形式，兼顾刚度、稳定性与经济性，造型灵活性极强。例如，北京奥运会主体育场（鸟巢）采用了桁架柱 - 空间桁架混合体系，通过桁架柱提供竖向支撑，空间桁架形成屋盖受力骨架，既满足了异形造型需求，又保障了超大跨度下的结构安全。

3 大跨度钢结构屋盖体系选型影响因素分析

3.1 建筑功能与跨度规模

建筑功能是选型的核心前提，不同功能建筑对屋盖的跨度、净空、荷载条件要求差异显著。例如，机场航站楼需大跨度无柱空间以保障人流通行与飞机停靠，适合采用索膜体系、网壳体系；体育场馆需兼顾跨度与看台支撑，张弦梁体系、混合组合体系更为适用；工业厂房的大跨度屋盖则优先选择空间桁架体系，兼顾成本与实用性。

跨度规模直接决定体系类型的选择：跨度 60-120m 可优先考虑空间桁架、普通张弦梁体系，经济成本最优；跨度 120-180m 需选用网壳体系、优化型张弦梁体系，平衡刚度与成本；跨度超过 180m 则需采用索膜组合体系、混合组合体系，依托轻量化与协同受力实现超大跨度覆盖。

3.2 建筑造型与美学需求

现代大型公共建筑对造型美学的要求日益提高，屋盖体系选型需与建筑造型深度融合。若建筑追求简洁规整的形态，矩形平面可选用空间桁架、张弦梁体系，圆形平面可选用球面网壳体系；若追求灵动异形的曲面造型，索膜体系、双曲抛物面网壳体系、混合组合体系更能满足需求。

需注意的是，造型设计需兼顾受力合理性，避免为追求美学而导致结构受力失衡。例如，大悬挑异形屋盖需通过组合体系优化受力路径，控制悬挑端的挠度与振动，实现美学与力学性能的统一 [3]。

3.3 受力环境与荷载条件

受力环境包括风荷载、地震作用、温度变化及特殊荷载（如积雪荷载、积灰荷载），是选型的关键技术依据。强风地区的大跨度屋盖需优先选择刚度大、抗风振性能好的体系，如网壳体系、混合组合体系，避免索膜体系因风振导致失稳；地震高烈度地区需选用延性好、耗能能力强的体系，如空间桁架、张弦梁体系，通过杆件塑性变形吸收地震能量；多雪地区需加强屋盖刚度与承载力，优先选择空间桁架、网壳等受力均匀的体系。

3.4 施工条件与周期

施工条件包括施工现场场地大小、起重设备能力、运

输条件及施工技术水平，直接影响体系选型。场地狭窄、起重设备受限的工程，可选用索膜体系、分段拼装的张弦梁体系，减少现场焊接与起重工作量；运输不便的偏远地区，优先选择标准化程度高、杆件可拆分的空间桁架体系，降低运输成本。

施工周期要求严格的工程，索膜体系、张弦梁体系施工效率更高，可缩短现场作业时间；而网壳体系、混合组合体系施工工艺复杂，周期较长，需结合工程进度需求合理选择。

3.5 经济成本与维护需求

经济成本包括设计成本、材料成本、施工成本及运营维护成本，是选型的重要约束条件。空间桁架体系材料与施工成本较低，维护简单，适合预算有限的工程；索膜体系材料成本高，膜材需定期更换，维护成本高，但自重轻可降低基础造价，需综合权衡；混合组合体系设计与施工成本最高，仅适用于超大跨度、特殊功能需求的重点工程。

维护需求需结合建筑使用年限与环境条件，工业建筑需选择耐腐蚀、维护简便的体系，如镀锌空间桁架；大型公共建筑需平衡美观与维护成本，合理选择膜材、钢材的防腐防火处理方案[4]。

4 大跨度钢结构屋盖体系力学性能核心指标及分析方法

4.1 核心力学性能指标

4.1.1 强度性能

强度是指结构构件抵抗破坏的能力，大跨度钢结构屋盖的强度控制核心是杆件与节点在轴力、弯矩、剪力组合作用下，应力不超过钢材的设计强度。由于大跨度结构内力分布复杂，需重点关注受力集中区域（如节点、支座、撑杆与拉索连接部位）的强度，避免出现局部屈服、断裂破坏。

钢材的强度等级选择直接影响强度性能，常用 Q355、Q460 等高强度钢材可有效减小杆件截面尺寸，优化强度性能，但需配合相应的焊接工艺与节点设计，防止焊接缺陷导致强度折减。

4.1.2 刚度性能

刚度是指结构抵抗变形的能力，大跨度钢结构屋盖的刚度不足会导致过大挠度，影响建筑使用功能（如屋面排水、吊顶平整性），甚至引发二次受力。刚度控制指标通常为屋盖最大挠度不超过跨度的 1/250-1/400（具体限值依据规范与建筑功能确定）。

影响刚度的关键因素包括结构体系形式、杆件截面尺寸、材料弹性模量及支座约束条件。索膜体系、张弦梁体系需通过预张拉控制挠度，网壳体系则依托曲面形态与网格密度提升刚度，空间桁架体系可通过增大杆件截面或优化网格布置增强刚度。

4.1.3 稳定性性能

稳定性是大跨度钢结构屋盖的核心控制指标，因跨度大、自重轻，结构易在外部荷载作用下发生整体失稳或局部失稳，且失稳破坏具有突发性，危害极大。稳定性包括整体稳定性与局部稳定性：整体稳定性指结构作为整体发生屈曲、倾覆的风险，局部稳定性指杆件、节点发生局部屈曲（如压杆失稳、节点板屈曲）的风险。

影响稳定性的因素包括结构形态、荷载分布、杆件长细比、节点刚度及预张拉水平。网壳体系的曲面形态可显著提升整体稳定性，索膜体系的预张拉水平直接决定稳定性能，压杆杆件需控制长细比，避免局部失稳。

4.2 主流力学分析方法

4.2.1 静力分析方法

静力分析是力学性能分析的基础，用于评估结构在恒载、活载、积雪荷载等静力荷载作用下的强度、刚度与稳定性。传统静力分析采用简化计算模型（如桁架位移法、壳体理论），适用于结构形式简单的空间桁架、普通网壳体系。

随着计算机技术发展，有限元法已成为静力分析的主流方法，通过建立三维实体模型或杆系模型，模拟结构的受力状态，精准计算杆件内力、节点位移及应力分布。常用有限元软件包括 ANSYS、SAP2000、MIDAS Gen 等，可实现复杂体系（如混合组合体系）的多荷载工况叠加分析，为强度、刚度优化提供数据支撑。

4.2.2 稳定性分析方法

稳定性分析分为线性稳定分析与非线性稳定分析。线性稳定分析基于小变形假设，通过求解特征值确定结构的临界荷载，适用于初步评估结构的稳定性能，计算简便但精度有限，适合方案设计阶段。

非线性稳定分析考虑材料非线性（如钢材屈服）、几何非线性（如大变形）及边界条件非线性，能更真实地模拟结构的失稳过程，精准计算临界失稳荷载与失稳形态，适用于施工图设计阶段的精准分析。对于索膜体系、网壳体系等对稳定性敏感的结构，必须采用非线性稳定分析，确保结构在最不利荷载组合下不发生失稳破坏。

5 结语

大跨度钢结构屋盖体系选型需综合建筑功能、跨度规模、造型需求、受力环境、施工条件及经济成本等多因素，形成技术与经济协同优化的决策方案。空间桁架体系适用于中跨度、预算有限的工程，网壳体系适用于中大型跨度、曲面造型工程，索膜体系适用于超大跨度、轻量造型工程，张弦梁体系适用于中大型跨度、兼顾成本与性能的工程，混合组合体系适用于超大跨度、特殊功能需求的工程。

参考文献

[1] 夏风顺,倪信. 超高大跨度钢结构施工阶段应力模拟与监测分析[J].山西建筑,2025,51(21):57-61.

[2] 张晋勋,段先军,李传浩,等. 大跨度钢结构全螺栓装配容差控制技术及重大工程应用[J].工业建筑,2025,55(08):76-83.

[3] 王耀,张浩,张峰,等. 大跨度钢结构屋盖预应力反张拉施工方法及过程优化[J].工业建筑,2025,55(08):268-276.

[4] 王强. 某水世界乐园场馆大跨度钢结构设计[J].建筑结构,2022,52(08):16-20+98.