

大跨度空间钢结构土木工程的优化设计研究

张润生 张小东

中建材(合肥)钢构科技有限公司 安徽 合肥 230000

摘要: 大跨度空间钢结构因其跨度大、造型多样、受力复杂等特点，在体育馆、航站楼等大型公共建筑中广泛应用。本研究聚焦其优化设计，探讨结构拓扑优化、材料优化及参数优化等方法，借助计算机辅助设计、仿生设计及智能优化算法等技术，旨在提升结构性能、降低材料消耗、缩短施工周期。同时，研究还关注经济性与可持续性的平衡，为土木工程领域的大跨度空间钢结构设计提供理论支撑与实践指导。

关键词: 大跨度空间钢结构；土木工程；优化设计

引言：随着城市化进程的加速，大型公共建筑对空间覆盖与功能多样性的需求日益增长，大跨度空间钢结构作为土木工程的关键技术之一，其优化设计成为提升建筑性能、降低成本的关键。本研究从结构稳定性、材料利用率、施工效率等多维度出发，探讨大跨度空间钢结构的优化设计策略与方法，旨在为推动土木工程领域的技术创新与发展提供科学依据与实践参考，满足现代建筑对美观、安全、经济的综合要求。

1 大跨度空间钢结构的基本概念与特点

1.1 大跨度空间钢结构的定义与分类

大跨度空间钢结构是指跨越距离较大（通常跨度超过30米），通过空间受力体系实现覆盖功能的钢结构体系，广泛应用于体育馆、航站楼、会展中心等大型公共建筑。其分类主要基于结构形态与受力特性：（1）网架结构。由多根杆件按照一定规律组成的网格状空间结构，具有各向同性的受力特点，杆件多采用钢管或型钢，节点形式以螺栓球、焊接球为主，适用于中大型跨度（30-100米）的建筑。（2）网壳结构。曲面形态的空间网格结构，分为球面、柱面、双曲抛物面等类型，通过曲面造型分散荷载，兼具力学合理性与建筑美学，常用于剧院、展览馆等对造型有要求的建筑。（3）悬索结构。以高强度钢索为主要承重构件，通过索的张拉形成受力体系，能实现超大跨度（100米以上），但需配合刚性或柔性支承结构，适用于大型体育馆、桥梁等。此外，还有膜结构、组合空间结构等类型，通过材料组合优化受力性能。

1.2 大跨度空间钢结构的主要特点

（1）空间跨度大，质量要求高：需覆盖广阔区域，结构整体稳定性与安全性至关重要，对材料性能、施工精度的把控远超普通钢结构。（2）结构形式与功能多样性：可根据建筑功能需求设计为平、曲、异形等多种形

态，既能满足体育赛事、交通枢纽等功能，又能塑造标志性建筑形象。（3）材料强度与厚度大：为承受巨大荷载，多采用高强度钢材（如Q355、Q460），部分构件厚度达50-100mm，以保障承载能力。（4）设计难度增加：需综合考虑空间受力分析、风荷载、温度应力等复杂因素，同时兼顾节点构造、施工可行性与经济性，对设计团队的专业能力要求极高^[1]。

2 大跨度空间钢结构优化设计的基本原则与方法

2.1 设计原则

（1）确保结构稳定、安全：这是优化设计的核心前提。需通过精准的力学计算，保证结构在恒荷载、活荷载、地震作用、风荷载等多种工况下的稳定性，避免出现失稳、断裂等安全隐患。同时，要设置合理的冗余度，应对突发荷载或材料性能波动，确保结构在设计使用年限内的可靠运行。（2）考虑建筑用途与功能需求：优化设计需与建筑的实际用途紧密结合。例如，体育馆需满足大空间无柱、声学与照明要求；航站楼则需兼顾人流疏散与行李运输通道的布局。结构形式应服务于功能，避免为追求形式而牺牲实用性，如大跨度屋盖的净空高度需适配建筑内部的使用场景。（3）荷载特性分析：需全面分析荷载的类型、大小、分布及作用方式。恒荷载包括结构自重、屋面系统重量等；活荷载涉及人群、设备等；动力荷载如强风引起的振动、地震波等需特殊考量。通过荷载特性分析，可针对性地优化结构受力体系，提高抵抗荷载的效率。（4）施工可行性与工艺性：优化设计需充分考虑施工条件与技术水平。复杂的节点构造、超大构件的运输与吊装等，若超出施工能力，会导致工期延误或成本激增。因此，设计中应简化施工流程，选用成熟的工艺方法，如模块化预制、分段吊装等，平衡结构性能与施工便利性。

2.2 优化设计方法

(1) 结构拓扑优化：通过调整结构的杆件连接方式、节点位置及整体形态，在满足受力要求的前提下减少材料用量。例如，在网架结构中优化网格密度，在网壳结构中调整曲面曲率，使力流传递路径更直接，避免冗余杆件，实现“形式追随力”的高效受力体系。(2) 材料优化：基于结构各部位的受力差异，合理选用不同强度、厚度的钢材，实现材料的“按需分配”。如在受力较大的主桁架采用高强度Q460钢，而次要支撑构件采用Q355钢；对关键节点区域采用厚钢板焊接，非关键区域采用薄壁钢管，在保证强度的同时降低整体自重，节约材料成本。(3) 结构参数优化：通过对杆件截面尺寸、节点刚度、支撑间距等参数的量化调整，提升结构性能。借助有限元软件进行参数化分析，如优化网架杆件的直径与壁厚、悬索结构的索力大小等，在满足强度、刚度、稳定性指标的基础上，使结构参数达到最优组合，实现安全与经济的平衡^[2]。

3 大跨度空间钢结构优化设计的关键技术

3.1 计算机辅助设计软件的应用

计算机辅助设计软件是大跨度空间钢结构优化设计的重要工具支撑，为设计师提供了从方案构思到细节深化的全流程技术保障。(1) 提供强大的设计功能和分析工具。主流的计算机辅助设计软件集成了三维建模、参数化设计、有限元分析等多元化功能模块。以BIM技术为核心的设计平台，能够构建包含材料属性、几何参数、连接节点等全信息的三维模型，实现结构构件的可视化设计。同时，软件内置的力学分析工具可模拟各种荷载工况，如恒荷载、活荷载、风荷载、地震作用等，通过对结构变形、内力分布、稳定性等指标的精准计算，为优化设计提供量化依据。例如，在大跨度网架结构设计中，软件可自动生成不同网格形式的方案，并快速评估其力学性能差异^[3]。(2) 快速准确地进行结构设计和分析。借助计算机强大的运算能力，设计软件能够在短时间内完成传统手工计算难以实现的复杂分析过程。在参数化设计模式下，设计师只需调整关键参数（如构件截面尺寸、跨度比例等），软件便能自动更新模型并重新进行力学分析，大大缩短了方案迭代周期。此外，软件的优化算法可结合工程约束条件，自动筛选出经济合理的设计方案，有效提高了设计效率和精度。以某大型体育场馆屋盖结构设计为例，通过计算机辅助设计软件的优化分析，相比初始方案节省了15%的钢材用量。

3.2 仿生设计方法的运用

自然界经过亿万年的进化，形成了众多高效、稳定的生物结构，为大跨度空间钢结构的优化设计提供了宝

贵的灵感源泉。(1) 借鉴自然界的生物结构和生物学原理。仿生设计方法通过研究生物的形态结构、受力机理和能量传递方式，将其转化为工程结构的设计理念。例如，蜘蛛网的放射状丝线与环形丝线相互作用，形成了高效的受力体系，这种结构形式被应用于索膜结构的拉索布置中，显著提高了结构的整体刚度；蜂巢的六边形单元结构具有材料利用率高、稳定性好的特点，启发了多面体空间网格结构的设计，使其在相同跨度下重量更轻。此外，树木的分枝结构、鸟类的骨骼构造等生物形态，也为钢结构的节点设计和构件轻量化提供了参考。

(2) 实现更加高效和优化的设计方案。通过仿生设计，大跨度空间钢结构能够在满足力学性能要求的同时，实现材料的高效利用和形态的合理性。仿生结构通常具有良好的受力连续性，能够将荷载均匀传递到基础，减少局部应力集中现象。例如，某会展中心的屋盖结构采用了仿向日葵花盘的放射状网格体系，不仅造型独特美观，而且通过合理的力流路径设计，使结构在风荷载作用下的最大位移降低了20%，同时减少了25%的构件数量。这种设计方法打破了传统结构的设计思维局限，为复杂大跨度结构的优化提供了新的解决方案。

3.3 智能优化算法的应用

随着人工智能技术的快速发展，智能优化算法在大跨度空间钢结构优化设计中的应用日益广泛，为解决复杂的多目标优化问题提供了有力手段。(1) 利用人工智能和机器学习技术。智能优化算法基于人工智能和机器学习的原理，通过模拟生物进化、群体协作等自然现象，构建高效的搜索机制。常见的智能优化算法包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。这些算法能够自主学习结构设计中的规律和经验，通过不断迭代优化设计参数，逐步逼近最优解。例如，遗传算法通过模拟生物的基因遗传、交叉和变异过程，对钢结构的截面尺寸、节点位置等参数进行编码处理，在解空间中进行全局搜索；机器学习技术则可以通过分析大量已有的工程案例数据，建立结构性能与设计参数之间的映射关系，为优化过程提供数据支持^[4]。(2) 对结构进行全局优化和参数搜索。大跨度空间钢结构的优化设计往往涉及多个目标函数和约束条件，如结构重量、刚度、强度、经济性等，传统的优化方法难以同时兼顾多个目标的最优解。智能优化算法具有全局搜索能力强、鲁棒性好的特点，能够在复杂的解空间中找到满足多目标要求的Pareto最优解集。例如，在某机场航站楼钢结构屋盖设计中，采用粒子群优化算法对结构的杆件截面和支撑位置进行优化，在满足结构强度和稳定性约束的前提下，

同时实现了重量最小化和施工便捷性最大化的目标，最终方案相比传统设计方案工期缩短了10%，造价降低了12%。此外，智能优化算法还能够处理非线性、高维度的设计问题，为大跨度空间钢结构的精细化优化提供了可能。

4 大跨度空间钢结构优化设计的挑战与对策

4.1 面临的主要挑战

(1) 结构复杂性与稳定性要求：大跨度空间钢结构多采用异形曲面、复杂节点等设计，导致结构受力状态高度非线性，传统计算模型难以精准模拟。例如，网壳结构的曲面曲率变化会引发局部应力集中，悬索结构的索力分布易受温度、支座沉降影响，若稳定性控制不当，可能出现整体失稳或局部破坏。同时，超大跨度（如超过200米）对结构刚度要求严苛，需在减重与抗变形间找到平衡，增加了设计难度。(2) 材料性能与加工工艺限制：现有高强度钢材的屈服强度、韧性等指标虽不断提升，但在极端环境（如低温、腐蚀）下的性能衰减仍较明显，限制了其在特殊场景的应用。此外，厚钢板焊接易产生残余应力，复杂节点的加工精度难以控制，如螺栓球节点的孔位偏差可能导致杆件受力不均，影响结构安全性，而现有工艺对超大构件的运输与吊装也存在技术瓶颈。(3) 经济性与可持续性的平衡：优化设计需兼顾成本与环保，但两者常存在矛盾。例如，采用新型高性能材料可提升结构性能，但会增加初期投入；为减少用钢量而简化结构，可能导致后期维护成本上升。同时，钢结构生产过程中的碳排放、施工阶段的废弃物处理等问题，对可持续性提出更高要求，如何在经济合理的前提下实现低碳设计，成为重要挑战。

4.2 应对策略与建议

(1) 加强结构形态学研究与应用：通过形态学分析优化结构整体布局，使力流传递路径更直接。例如，基于“最小阻力原理”设计流线型屋盖，减少风荷载冲击；采用分形几何原理划分网格单元，提升结构的空间

刚度。同时，结合参数化设计工具，建立形态与性能的关联模型，实现形态优化与力学性能的协同提升。(2) 推广先进的优化设计方法与技术：进一步融合计算机辅助设计、智能算法与BIM技术，构建全流程优化体系。例如，利用BIM模型进行施工模拟，提前发现节点碰撞问题；通过遗传算法与有限元分析耦合，实现结构参数的自动化优化。此外，引入数字孪生技术，实时监测结构在施工与运营阶段的状态，为动态优化提供数据支持。

(3) 提高钢结构材料性能与加工工艺水平：研发耐候性强、强度更高的低合金钢，如Q690级钢材配合新型焊接材料，减少焊接缺陷；推广模块化预制工艺，在工厂完成节点加工与杆件组装，提高施工精度。同时，探索钢材循环利用技术，建立废旧钢结构回收体系，降低全生命周期的碳排放，实现经济性与可持续性的双赢。

结束语

综上所述，大跨度空间钢结构的优化设计是一个涉及多学科、多因素的复杂过程，需综合考虑结构性能、经济效益与环境可持续性。本研究通过探讨结构拓扑、材料选择、参数调整等优化手段，结合计算机辅助设计、仿生设计与智能算法等先进技术，为大跨度空间钢结构的设计提供了新思路。未来，随着材料科学与信息技术的不断进步，大跨度空间钢结构的优化设计将迈向更高效、更智能的新阶段。

参考文献

- [1]许小英.大跨度空间钢结构施工技术和危险源检测技术研究[J].散装水泥,2022,(08):82-83.
- [2]唐国锋,罗小斌,田漱全,等.大跨度空间钢结构施工的质量控制研究[J].建设监理,2021,(07):75-77.
- [3]赵芳,陈勇.钢结构框架土木工程在大跨度建筑中的设计与施工[J].结构工程师,2023,(03):45-46.
- [4]刘伟华,郑明.钢结构框架土木工程在大跨度建筑中的优化设计[J].建筑技术,2023,(10):89-90.