

模块化轻钢复合结构抗风灾性能优化设计研究

许正安 安徽凯迪建设有限公司

摘要

模块化轻钢复合结构凭借自重轻、装配效率高、工业化程度高、施工周期短等优势，在临时建筑、保障性住房、乡村住宅、文旅配套建筑中得到广泛应用。但该类结构整体刚度偏弱、围护系统抗风揭能力不足、模块间连接节点薄弱，在台风、强对流大风等极端风灾作用下，易出现屋面掀翻、墙板脱落、节点失效、整体侧移甚至倾覆等破坏问题，严重制约其在沿海、台风多发区的推广应用。本文基于风灾作用机理与模块化轻钢复合结构受力特点，系统分析结构在风荷载下的典型破坏模式，从风荷载精准取值、结构体系优化、构件截面设计、节点连接强化、围护系统抗风构造、气动外形优化、数值模拟验证等维度，开展抗风灾性能优化设计研究，提出多维度、全流程的抗风优化策略与构造措施，为提升模块化轻钢复合结构抗风安全储备、完善抗风设计体系、拓展工程应用场景提供理论支撑与实践参考。

关键词：模块化轻钢复合结构；风灾；抗风性能；优化设计；节点连接；围护系统

引言

在我国装配式建筑快速发展与乡村振兴、应急安置、城市更新等工程需求推动下，模块化轻钢复合结构建筑迎来规模化应用阶段。模块化轻钢复合结构以冷弯薄壁型钢、轻钢框架为主体骨架，搭配保温复合墙板、轻钢楼板、模块化屋面系统，通过工厂预制、现场拼装实现快速搭建，具备节能环保、工业化生产、可拆装复用等显著优势，契合绿色建筑与低碳发展理念。我国东南沿海、华南地区属于台风高发区，内陆地区强对流大风、雷暴风频发，极端风荷载对轻型建筑的安全威胁突出。

大量风灾现场调研与工程实践表明，传统模块化轻钢复合结构抗风设计多照搬普通民用建筑规范，未充分考虑结构自重小、模块拼装整体性弱、围护构件与主体协同性差等特点，抗风安全冗余不足。在台风作用下，常出现屋面系统整体风揭破坏、复合墙板连接件失效脱落、模块拼接节点受拉破坏、结构整体水平位移过大等问题，造成建筑损毁、财产损失甚至人员伤亡。同时，当前行业内针对模块化轻钢复合结构的专项抗风设计规范不完善，构件选型、节点构造、围护系统设计缺乏精细化优化方法，气动外形、风振效应、负压吸力等因素常被简化处理，导致设计与实际风灾工况存在偏差。

因此，深入研究模块化轻钢复合结构的风致破坏机理，开展抗风灾性能优化设计，明确结构体系、构件、节点、围护系统的抗风优化要点，完善抗风设计技术路径，对提升该类建筑极端气候适应能力、推动模块化轻钢结构安全规模化应用、完善建筑抗灾减灾体系具有重要工程价值与现实意义。

一、模块化轻钢复合结构风灾作用机理与典型破坏模式

（一）风荷载作用机理

风对模块化轻钢复合结构的作用包含顺风向风压、横风向涡脱效应、屋面与墙面负压吸力三

大形式。模块化建筑体型规整、多为低层或多层结构，屋面檐口、墙角、建筑角部区域气流分离显著，负压吸力远大于迎风面正压力，是风致破坏的高发区域。强风作用下，水平风荷载使结构产生整体侧移、层间剪切变形；竖向风吸力直接作用于屋面、墙板，产生上拔力，破坏围护系统与主体结构的连接；脉动风引发结构风致振动，长期反复荷载作用易造成连接件疲劳破坏、节点松动失效。

相较于传统混凝土建筑，模块化轻钢复合结构自重轻、刚度小、自振周期长，风振效应更为显著，风荷载控制结构设计，而非地震或竖向荷载。同时，模块化拼接形式使结构存在大量拼接缝与连接节点，传力路径不连续，进一步放大风荷载带来的结构损伤。

（二）结构典型风致破坏模式

1. 围护系统风揭破坏

围护系统是模块化轻钢建筑抗风第一道防线，也是最薄弱环节。屋面复合板、墙面夹芯板在强负压作用下，自攻螺钉、连接件被拔出，板材整体掀起脱落；檐口、屋脊、墙角等风压集中区域，墙板、屋面系统率先破坏，进而引发雨水倒灌、内部构件受损。复合墙板与轻钢龙骨连接薄弱，在水平风荷载作用下易出现板面开裂、脱落、局部鼓曲变形。

2. 模块间连接节点失效

模块单元之间通过螺栓、插接件、连接板连接，风荷载产生的反复拉剪作用易造成螺栓松动、滑移、断裂，连接板屈曲变形；上下模块竖向连接受竖向风吸力上拔作用，出现连接失效，模块整体分离；水平方向模块拼接节点抗剪刚度不足，引发模块错位、整体侧移。节点破坏具有连锁效应，局部节点失效可导致整体结构失稳。

3. 主体轻钢框架构件失稳破坏

轻钢龙骨、框架柱截面薄壁、刚度较小，在水平风荷载弯矩、轴力共同作用下，易发生局部屈曲、整体失稳；层间抗侧支撑布置不合理时，结构水平位移过大，层间变形超限；地基抗拔承载力不足时，强风上拔力造成基础滑移、倾覆。

4. 整体结构倾覆与变形超限

低层模块化建筑自重小、重心高，极端大风作用下抗倾覆力矩不足，发生整体倾覆；结构整体刚度不足，风振作用下侧移过大，导致围护构件破损、门窗变形、使用功能丧失。

二、模块化轻钢复合结构抗风灾性能现存主要问题

（一）风荷载取值偏保守，未考虑体型与局部风压差异

多数工程直接套用规范常规风压系数，未结合模块化建筑方正体型、屋面檐口构造、模块拼接缝隙等特点，忽略角部、屋脊、檐口负压放大效应；台风区、强对流风区未考虑极端风速重现期，风振系数简化取值，导致实际风荷载大于设计值。

（二）结构体系布局不合理，抗侧刚度与整体性不足

轻钢框架、支撑体系布置随意，缺少斜撑、剪刀撑等抗侧构件，水平刚度偏弱；模块化单元拼接未形成连续传力路径，模块之间协同工作性能差；建筑平面狭长、迎风面过大，增大风荷载作用效应。

（三）构件截面选型偏小，抗风承载力储备不足

轻钢龙骨、檩条、框架柱截面规格偏小，未按风荷载控制设计；复合墙板、屋面板材厚度、强度不足，连接件规格偏小、间距过大，无法抵抗负压吸力；构件防腐处理不到位，长期锈蚀降低抗风承载力。

（四）节点连接构造薄弱，抗疲劳、抗拔性能不足

模块拼接节点、围护构件连接节点设计简单，多采用普通螺栓、自攻螺钉，缺少抗拔、抗剪加强措施；节点未考虑风荷载反复作用下的疲劳性能，缺少柔性消能构造；基础与模块柱脚连接抗拔措施不足，易发生基础拔起破坏。

（五）围护系统抗风构造缺失，气动外形设计不足

屋面、墙面未设置抗风夹、压条、加强件，檐口、女儿墙抗风构造薄弱；建筑外形方正、棱角分明，气流分离严重，局部负压过大；缺少导风、减压构造，进一步加剧风致破坏风险。

三、模块化轻钢复合结构抗风灾性能优化设计关键技术

（一）精准风荷载计算与取值优化

基于《建筑结构荷载规范》GB 50009，结合风洞试验、CFD 数值模拟，精准确定风压系数、风振系数。针对模块化建筑角部、屋脊、檐口等风压集中区域，采用局部放大风压系数；台风区、大风区提高基本风速重现期，考虑强对流风瞬时冲击效应；采用时程分析法模拟脉动风作用，评估风振疲劳损伤，实现风荷载精细化取值，避免设计荷载偏小或过度保守。

（二）结构体系整体布局优化

1. 建筑体型优化：优先采用方形、紧凑平面布局，减少狭长平面，降低迎风面积；屋面优先选用双坡屋面，优化屋面坡度，引导气流、降低负压吸力；圆角处理建筑棱角，减少气流分离，降低局部风压。
2. 抗侧体系优化：轻钢框架结合轻钢斜撑、剪刀撑、横向桁架，形成框架—支撑抗侧体系，提升结构水平刚度；支撑采用端部加密、中部稀疏布置，强化迎风面、角部抗侧能力；模块单元之间设置连续连接板、抗剪键，保证模块协同受力，构建完整传力路径。
3. 基础抗倾覆优化：增大基础尺寸，设置抗拔锚杆、地梁，提高基础抗拔、抗滑移能力；配重基础结合压重构件，提升整体抗倾覆力矩，抵御竖向风吸力。

（三）主体构件截面与材料优化设计

构件以风荷载为控制工况进行截面选型，轻钢框架柱、龙骨选用加厚冷弯型钢，增大截面惯性矩，提升抗弯抗剪能力；檩条加密布置，檐口、屋脊区域檩条间距缩小；选用高强镀锌轻钢构件，提升防腐性能，延长服役寿命。

复合墙板、屋面系统采用高密度岩棉、聚氨酯夹芯复合板，提高板材抗弯、抗风揭性能；板材厚度根据风压分区差异化设计，迎风面、角部区域选用加厚板材。同时采用有限元软件模

拟构件应力分布，优化构件尺寸，实现强度、刚度、经济性平衡。

（四）模块连接节点抗风专项优化

节点是抗风设计核心，重点优化竖向抗拔、水平抗剪、疲劳性能。模块竖向连接采用高强螺栓+抗拔连接板，增设防松垫圈，抵抗竖向风吸力；水平拼接节点采用加厚连接板、双排螺栓，提高抗剪承载力；梁柱节点设置加劲肋，提升节点域刚度，避免局部屈曲。

围护构件与主体连接采用加长、加粗自攻螺钉，加密连接件间距，檐口、屋脊区域增设抗风夹、压条；节点采用柔性消能构造，通过螺栓滑移、构件轻微变形耗散风振能量，降低疲劳损伤。

（五）围护系统抗风揭构造优化

构建“板材—连接件—龙骨—主体结构”连续抗风传力体系。屋面采用直立锁边系统，配套抗风夹具，提升抗风揭能力；檐口、屋脊、女儿墙设置压顶件、加强件，密封拼接缝隙，防止风灌入形成内部压力；墙面复合板竖向通长固定，底部设置防水抗风基座；门窗周边加强密封与固定，避免风压从缝隙侵入。

按风压分区差异化设计，将建筑划分为迎风区、背风区、角部负压区，角部区域加密连接件、提高板材强度，实现分区抗风优化。

（六）基于 CFD 与有限元的数值模拟验证优化

利用 CFD 计算流体力学模拟建筑周围气流场，得到表面风压分布云图，识别高负压区域，针对性优化构造；采用 SAP2000、Midas Gen 建立结构精细化有限元模型，进行风荷载静力、动力时程分析，计算结构侧移、应力、倾覆稳定性，评估薄弱部位；通过参数化分析，优化构件尺寸、节点形式、支撑布置，迭代完善抗风设计方案，确保结构在极端风荷载下安全可靠。

四、模块化轻钢复合结构抗风优化设计实施保障措施

（一）完善抗风设计标准与专项规范

结合台风、大风地区工程实践，制定模块化轻钢复合结构专项抗风设计指南，明确风压取值、构件选型、节点构造、围护系统设计标准；区分普通地区、台风多发区、强对流风区，实行分级抗风设计，规范设计流程。

（二）强化工厂预制质量管控

模块化构件、节点连接件全部工厂预制，严格把控轻钢构件加工精度、镀锌防腐质量、板材性能；连接件、抗风配件统一标准化生产，确保强度达标；出厂前开展抗拔、抗剪试验，验证构件与节点抗风承载力。

（三）现场施工精细化管控

严格按照设计要求进行模块拼装、节点紧固，高强螺栓采用扭矩扳手施工，保证预紧力；围护系统连接件间距、抗风夹安装位置精准落实；做好防腐、密封施工，避免施工缺陷降低抗风性能；大风区建筑完工后开展抗风专项验收。

（四）后期运维与定期检测

建立模块化轻钢建筑常态化运维机制，定期检查螺栓松动、连接件锈蚀、板材破损、节点变形情况；台风来临前开展加固排查，及时更换老化构件，保障结构长期抗风安全。

五、结论

模块化轻钢复合结构凭借装配式优势拥有广阔应用前景，但自重轻、刚度弱、节点薄弱的特点使其在极端风灾下易发生围护系统脱落、节点失效、整体失稳等破坏。其抗风灾性能优化设计需以风荷载精细化取值为基础、结构体系整体性为核心、节点连接可靠性为关键、围护系统抗风揭为重点、数值模拟验证为手段，通过优化建筑气动外形、完善抗侧支撑体系、优化构件截面、强化节点抗拔抗剪构造、分区优化围护系统、开展数值仿真分析，构建全流程抗风优化设计体系。

在实际工程中，应根据项目所处风区等级，实行分级差异化抗风设计，兼顾安全性、经济性与工业化装配需求；同时完善设计标准、严控预制与施工质量、落实后期运维，全面提升模块化轻钢复合结构的抗风灾能力。该研究可为沿海台风区、内陆大风区模块化轻钢建筑设计提供技术支撑，推动轻量化装配式建筑安全发展，助力我国城乡建筑防灾减灾体系建设。

参考文献

- [1] 杨庆山,金玉芬,李启.轻钢房屋围护结构台风灾害调查与抗风优化对策[J].建筑结构学报,2010,31(S2):197-201.
- [2] 张石,钟海滨,张爱林.模块化轻钢框架结构风荷载特性及抗风设计研究[J].建筑科学,2024,40(03):78-84.
- [3] 王清霖,苏明周,叶继红.模块化轻钢复合墙体抗侧及抗风性能试验研究[J].工程力学,2023,40(08):156-163.
- [4] 陈桂龙,孙新宇.轻钢建筑屋面板连接件抗风揭性能优化设计[J].高速铁路技术,2025,16(02):57-62.
- [5] 宋芳芳,欧进萍.轻型模块化钢结构风灾易损性分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(06):71-80.