

高层钢结构建筑的风振响应分析与优化设计

沈燕峰

浙江省建工集团有限责任公司 浙江 杭州 311000

摘要：风振作用会引发高层钢结构产生往复振动变形，不仅会造成结构构件疲劳损伤，影响建筑整体耐久性与稳定性，还会降低室内人员居住与办公的舒适体验，严重时甚至会引发结构安全隐患。为解决高层钢结构风振响应带来的各类工程问题，本文系统阐述高层钢结构风振响应的核心机理与主要影响因素，梳理现阶段风振响应的主流分析方法，从结构体系、构件参数、附属构造及气动外形等多个维度，探究针对性的优化设计策略，总结当前高层钢结构风振设计存在的短板与不足，为高层钢结构建筑的抗风设计、性能提升及工程优化提供理论参考与技术思路，助力提升高层钢结构建筑的整体抗风性能与服役品质。

关键词：高层钢结构；风振响应；响应分析；结构优化；抗风设计

引言

随着城市化进程持续推进，城市土地资源日趋紧张，建筑高层化、超高层化发展趋势愈发显著。钢结构凭借工业化程度高、结构自重小、空间布局灵活、力学性能稳定等突出特点，被广泛应用于高层及超高层公共建筑、商业建筑与办公建筑建设中。相较于钢筋混凝土结构，高层钢结构整体刚度偏柔、自振周期更长、结构阻尼更小，在自然风荷载的持续作用下，极易产生明显的风振效应，包括顺风向振动、横风向振动及扭转振动等多种振动形式。在常规风速作用下，风振引发的结构振动会影响建筑使用舒适度，导致墙体装饰、围护构件出现轻微破损；在强风工况下，过大的风振响应会加剧结构内力与变形，引发构件应力集中、连接节点疲劳破坏，甚至威胁建筑整体结构安全。现阶段，多数高层钢结构设计多侧重结构承载力与抗震性能，对风振响应的精细化分析与系统性优化重视不足，部分建筑存在抗风冗余不足、振动控制能力薄弱等问题。基于此，深入开展高层钢结构建筑风振响应分析，探索科学合理的优化设计方法，规避风振带来的结构隐患与使用缺陷，对提升高层钢结构建筑的安全性、耐久性与舒适性具有重要的工程价值与现实意义。

1 高层钢结构建筑风振响应基础理论

1.1 风振响应核心概念

风振响应是指建筑结构在自然风的脉动荷载作用下，产生的动态振动、变形与内力变化的综合响应效果。自然风并非恒定静态荷载，而是包含平均风与脉动

风两种成分，平均风对结构产生静态风压作用，引发结构静态变形，脉动风具备随机波动特性，是诱发结构动态风振的核心诱因。高层钢结构建筑高度较高，风荷载沿建筑高度呈现梯度分布特征，上部结构承受的风荷载作用更为显著。同时钢结构柔性特征明显，结构自振特性与脉动风的波动特性易产生耦合作用，进而放大结构振动响应。风振响应主要分为顺风向响应、横风向响应与扭转响应三类，三类响应相互耦合、共同作用，决定了高层钢结构在风荷载下的整体受力与变形状态，是结构抗风设计必须考量的核心指标。

1.2 风振响应主要类型

顺风向风振响应是高层钢结构最基础的风振形式，由脉动风的随机扰动引发，表现为结构沿风向的往复振动，会使结构产生轴向力、弯矩与剪切变形，直接影响结构整体承载力与竖向构件稳定性。横风向风振响应垂直于风向，主要由流体绕流建筑结构产生的旋涡脱落现象引发，当旋涡脱落频率与结构自振频率接近时，会产生共振效应，大幅加剧结构振动幅度，是高层钢结构风振破坏的主要诱因之一。扭转风振响应多由建筑平面不对称、风荷载分布不均引发，会使结构产生绕竖向轴线的扭转变形，导致建筑两侧构件受力差异显著，极易造成局部构件过载、节点受损，对于异形平面高层钢结构，扭转风振的影响尤为突出。

1.3 风振响应产生机理

高层钢结构风振响应的产生是流体与结构耦合作用的结果，核心机理为风荷载的动态随机性与结构自身动力特性的匹配耦合。自然风贴近地面流动时，受地面建筑、地形地貌摩擦阻挡作用，风速与风压呈现不规则脉

作者简介：沈燕峰，19940209，男，汉，杭州萧山，本科，工程师，研究方向：工程管理。

动变化,形成随机脉动风荷载。当气流流经高层钢结构建筑主体时,会发生绕流、分离、旋涡生成与脱落等流体运动现象,持续对结构施加动态交变荷载。高层钢结构自振周期长、阻尼衰减速度慢,对低频脉动荷载的吸收响应更为明显,当交变风荷载的频率区间覆盖结构自振频率时,结构振动会被持续放大,形成持续性风振响应,长期往复的振动作用会逐步累积结构疲劳损伤,影响建筑整体服役性能。

2 高层钢结构风振响应主要影响因素

2.1 结构自身动力特性

结构自身动力特性是决定风振响应强度的内在核心因素,主要包括结构自振周期、刚度、阻尼比与质量分布等参数。高层钢结构整体刚度越小,结构自振周期越长,越容易与低频脉动风荷载产生共振响应,风振变形与内力响应更为显著。结构阻尼比直接决定振动能量的衰减速度,钢结构阻尼比远低于混凝土结构,振动能量耗散缓慢,风振振动持续时间更长、衰减速度更慢。同时,建筑竖向质量分布不均、刚度突变会导致结构动力特性不均匀,引发局部振动放大效应,加剧扭转风振与局部构件的振动响应,降低结构整体抗风稳定性。

2.2 建筑外形与布局参数

建筑外形与平面布局直接影响风荷载的分布形式与流体绕流状态,进而改变风振响应的强弱规律。建筑平面形状、立面造型、高宽比、长宽比等参数,会直接决定气流绕流的分离位置、旋涡脱落频率与风压分布规律。高宽比越大,高层钢结构,受风荷载作用的影响范围更广,横风向旋涡脱落效应更突出,风振响应更为剧烈。平面不规则、立面凹凸变化较大的建筑,易形成局部风压集中与气流紊乱,引发不均匀风荷载分布,加剧结构扭转振动与局部振动。而规整平滑的建筑外形能够优化气流绕流状态,弱化旋涡脱落效应,有效降低风振响应幅度。

2.3 环境风荷载条件

建筑所处的自然环境风荷载条件是风振响应的外部诱因,主要包括风速梯度、风湍流强度、地形地貌与周边建筑布局等因素。近地面风场存在明显的高度梯度,建筑高度越高,所处位置风速越大,风荷载作用效应越强。风湍流强度越大,脉动风荷载的随机波动幅度越大,对结构的动态扰动作用越显著,风振响应的随机性与剧烈程度大幅提升。同时,建筑位于开阔场地、山谷风口或建筑群密集区域时,风场特性存在显著差异,周边建筑的遮挡、狭管效应会改变局部风场分布,进而引发不同强度、不同形式的风振响应,直接影响结构抗风

设计的适配性。

3 高层钢结构风振响应常用分析方法

3.1 规范简化分析法

规范简化分析法是现阶段高层钢结构工程设计中应用最广泛的基础分析方法,依托国家建筑结构荷载规范,结合建筑高度、结构形式、场地条件、风场参数等基础指标,通过固定计算公式量化风荷载效应,计算结构风振系数、风振内力与变形响应。该方法操作简便、计算效率高,参数取值标准化,能够快速完成常规规整高层钢结构的风振响应初步计算,满足常规工程初步设计与校核需求。但该方法存在一定局限性,无法精准适配异形结构、复杂场地及超高层钢结构的复杂风振耦合效应,对扭转风振、非线性风振响应的计算精度不足,仅适用于常规建筑的基础风振分析。

3.2 数值模拟分析法

数值模拟分析法依托流体力学与结构动力学数值计算技术,通过专业仿真软件构建建筑结构模型与风场模型,模拟气流与结构的耦合作用过程,精准求解结构风振响应的全过程数据。该方法能够精准还原复杂建筑外形、复杂场地风场下的风压分布、旋涡脱落规律与结构振动状态,可实现顺风向、横风向、扭转风振的全方位精细化分析,同时能够捕捉结构非线性振动响应与局部构件的风振受力特征。数值模拟分析法精度高、适应性强,能够弥补规范简化方法的短板,是现阶段超高层、异形高层钢结构风振精细化分析的核心手段。

3.3 风洞试验分析法

风洞试验分析法属于物理模型试验方法,通过制作缩尺建筑结构模型,在风洞试验设备中模拟真实自然风场环境,实测模型结构的风压分布、振动变形与内力响应参数,推导原型建筑的风振响应规律。该方法基于真实物理试验,数据可靠性高,能够精准还原复杂风场与结构的耦合作用,适用于造型复杂、高度超大、风振效应显著的特殊高层钢结构建筑。风洞试验能够有效规避数值模拟的模型简化误差与算法局限,是高层钢结构风振响应分析与抗风设计校核的重要辅助手段,常与数值模拟结合使用,提升分析结果的准确性。

4 高层钢结构风振优化设计策略

4.1 结构体系优化设计

结构体系优化是降低高层钢结构风振响应、提升整体抗风性能的核心手段。设计过程中需结合建筑高度与平面布局,优选刚度匹配、受力合理的钢结构体系,合理布置框架、支撑、筒体等核心受力构件,提升结构整体刚度与整体性,减小结构柔性振动幅度。通过优化竖

向构件与水平构件的布置形式,实现结构质量与刚度均匀分布,消除竖向刚度突变、质量偏心等问题,有效抑制扭转风振与局部异常振动。同时合理调整结构自振周期,规避脉动风荷载的优势频率区间,避免结构风振共振效应,从根本上弱化结构风振响应,提升结构整体抗风稳定性。

4.2 构件参数优化设计

构件参数优化主要通过调整钢结构构件截面尺寸、构件材质与连接构造,提升结构抗风承载能力与振动耗能能力。针对风荷载作用下受力较大的竖向框架柱、核心支撑、钢梁等构件,合理优化截面形式与截面参数,在控制结构自重的前提下,提升构件抗弯、抗剪刚度,减小结构整体风振变形。优化构件连接节点构造,提升节点刚度与整体性,避免节点松动、变形引发的结构振动放大问题。同时可选用高性能钢材,提升结构材质均匀性与力学稳定性,通过微调构件阻尼参数,增强结构自身振动能量耗散能力,弱化风振持续振动效应。

4.3 气动外形优化设计

气动外形优化通过改良建筑外立面形态与平面造型,优化风场绕流状态,从外部荷载源头降低风振响应。设计中尽量采用规整对称的平面形式,减少建筑立面凹凸、悬挑等复杂构造,避免气流紊乱与局部风压集中。对建筑边角、顶部等气流主要绕流区域进行倒角、切角优化,平滑气流分离路径,弱化旋涡脱落强度与频率,大幅降低横风向风振效应。针对超高层钢结构,可通过分层收分、顶部开孔等轻量化气动优化构造,调整建筑风荷载分布规律,削弱风荷载与结构的耦合振动效应,在不影响建筑功能与造型的前提下,实现风振响应的有效控制。

5 高层钢结构风振主动控制优化技术

5.1 阻尼减振控制技术

阻尼减振控制技术是通过增设阻尼装置提升结构振动耗能能力的主动优化技术,能够有效弥补钢结构阻尼比小、振动衰减慢的缺陷。通过在结构层间、支撑节点、核心筒体等关键位置布置各类阻尼器,在结构发生风振振动变形时,依托阻尼装置的滞回变形消耗风振振动能量,快速衰减结构振动幅度与振动持续时间。该技术无需大幅改动主体结构体系,适配性强,能够有效控制常规风振与强风共振响应,显著提升建筑使用舒适度与结构抗风安全性,是现阶段高层钢结构风振优化应用最成熟的主动控制技术。

5.2 调谐减振控制技术

调谐减振控制技术依托动力调谐原理,通过在建筑上部布置调谐质量减振装置、调谐液体减振装置,形成辅助振动系统。当主体结构发生风振振动时,减振装置会产生与主体结构振动相位相反的反向作用力,抵消结构风振振动能量,抑制结构振动变形。该技术针对性强,能够精准适配结构主要自振频率对应的风振响应,对超高层钢结构顶部大幅值风振振动的控制效果尤为显著,可有效解决强风作用下建筑顶部晃动过大、舒适度不足的问题,大幅提升结构风振控制精度。

5.3 结构被动耗能优化技术

结构被动耗能优化技术通过优化结构支撑、墙体附属构造,增设被动耗能构件,提升结构整体耗能储备。将普通钢结构支撑替换为屈曲约束支撑、耗能支撑等被动耗能构件,在风振往复荷载作用下,通过支撑构件的可控塑性变形消耗振动能量,保护主体结构构件不受损伤。同时可利用建筑围护结构、隔墙构造优化耗能体系,在不影响建筑使用功能的前提下,增加结构整体阻尼储备,弱化风振响应的累积效应,提升高层钢结构在长期风荷载作用下的服役稳定性。

结束语

高层钢结构建筑的风振响应是结构风荷载耦合作用下的复杂动力响应问题,直接关乎建筑结构安全、使用舒适度与长期服役性能。本文通过梳理高层钢结构风振响应的基础理论、核心类型与产生机理,明确了结构自身特性、建筑外形布局、环境风场三大核心影响因素,系统对比了规范简化分析、数值模拟分析与风洞试验分析三类主流风振分析方法的适配性与优缺点。从结构体系、构件参数、气动外形三个被动优化维度,结合阻尼减振、调谐减振、被动耗能三类主动控制技术,构建了全方位、多层次的高层钢结构风振优化设计体系。

参考文献

- [1] 张文山. 高层建筑大跨度钢结构连廊风振舒适度分析[D]. 吉林建筑大学, 2022.
- [2] 贾亚乐. 高层建筑等效静力风荷载计算及数值模拟分析[D]. 河北工程大学, 2020.
- [3] 贾亚乐, 郝雨杭. 高层钢结构风振响应分析[J]. 农村经济与科技, 2020, 31 (10): 392-393.
- [4] 谢军燕. 矩形高层建筑结构扭转风振反应分析[J]. 科技展望, 2026, 26 (23): 24-25.
- [5] 程睿, 陈水福. 钢结构高层住宅的风振模型与风振特性研究[J]. 建筑结构, 2024, 44 (19): 21-25.