

超高层建筑风荷载作用下结构优化设计方法研究

文 / 张鑫 安徽瓴昂建设有限公司

摘要：超高层建筑在现代城市中日益普及，如何在高风荷载环境中确保结构安全与功能可靠，已成为土木工程与建筑学领域的关键课题。伴随建筑高度不断攀升，风振效应、涡激振动及风向湍流影响更趋复杂，传统设计准则难以全面应对。为满足安全性、经济性与可持续性的多重诉求，需要从风环境参数获取、材料性能调控、结构体系选型及动力学分析等多元角度展开研究。本论文以超高层建筑在风荷载作用下的结构优化设计为核心议题，结合理论探讨与前沿文献观点，聚焦风荷载特性识别、结构适应性策略、施工过程干预及整体安全评估。期望通过系统化的思维与方法，为建筑设计单位、科研机构及相关从业人员提供可行参考，最终实现超高层建筑在不同风场条件下的安全、高效与可持续发展。

关键词：超高层建筑；风荷载；结构优化；动力响应；安全评估

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.101

引言

近年来，随着科技的进步与人口的剧增，超高建筑得以迅速发展。现代高强轻型的建筑材料以及先进的施工技术，使得超高层建筑愈发轻柔，进而成为了风敏感建筑，风荷载成为其控制荷载。^[1]目前，超高层建筑逐渐成为衡量城市现代化水准的重要标志。风荷载对此类建筑的影响尤为突出，既涉及外部的流体动力学特征，也关联内部结构构件的整体刚度、材料强度与抗疲劳性能。随着建筑高度和柔度的不断提升，对风环境的认识与利用已超出传统工程范畴，需要在学术研究与工程实践间建立更加紧密的联动。为此，有必要探究系统性的结构优化设计方法，通过深化风荷载机理认知，强化结构体系与新型材料的应用，从多角度保障建筑全生命周期的安全与效益。

一、风环境参数获取与特征分析

（一）探讨风环境分布规律与涡振效应

超高层建筑的风环境研究首先需要全面掌握风力在建筑表面分布的基本规律与涡振效应的动态特征。风环境的空间分布受气流流经建筑物表面时的多重复杂影响，如建筑体型、风向角度以及建筑周围的城市群地形等因素。深入分析这些规律，可以明确气动压力在建筑表面的分布模式，进而有效地指导建筑抗风设计参数的初始设定。涡振效应的研究尤为关键，其特点在于风速与建筑结构自振频率的匹配可能引发共振现象，从而对结构安全构成重大威胁。理论模型的构建需要涵盖涡旋生成、分离以及再附着的过程，以揭示其对结构应力与位移的具体影响。^[2]利用精准量化这些外表气动特征，可以为后续的抗风策略制定提供科学依据。同时，综合考虑风环境的随机性，需引入概率分析方法，以全面评估建筑在不同气象条件下的抗风能力。

（二）采用数值模拟与风洞试验结合方法

通过数值模拟与风洞试验相结合的方式，可以捕捉

风荷载在超高层建筑表面的压力分布及其随风向、风速等因素变化的复杂特性。数值模拟以其高效性与灵活性在早期阶段发挥重要作用，可通过有限元方法或计算流体动力学技术对建筑外表的气动特性进行预测与优化。基于不同风向角度与雷诺数的输入条件，模拟能够提供细化的压力场与流场数据；另外，风洞试验作为传统且可靠的手段，能够验证数值模拟的精度与可靠性。在风洞中进行缩尺模型试验，可以直观地观察涡振生成、涡脱及其对结构动态响应的影响（如图1为某高层建筑数值模型风洞试验图）。

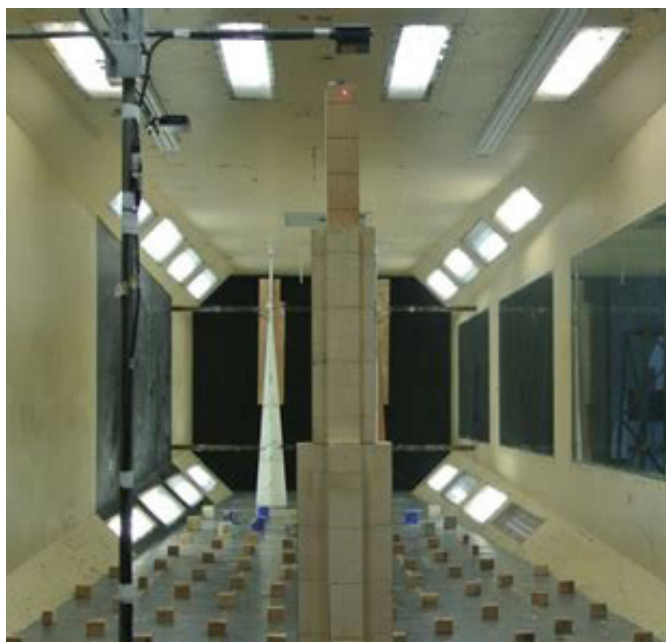


图1 某高层建筑数值模型风洞试验图

（三）建立高层区域气象数据库

针对超高层建筑所在区域，构建长期的气象数据库是进行风荷载分析的基础工作。此类数据库需要涵盖多年实际观测数据与统计模型结果，包括最大风速、平均风速、风频分布以及极端气候条件下的变化趋势。整合

遥感监测、地面气象站观测与气象模型模拟数据，可以形成全面的区域风环境描述框架。同时，数据库的动态更新机制对于反映风环境的时空变化特征尤为重要，例如城市热岛效应对局地风速的潜在影响。数据库还应支持三维可视化功能，便于研究人员在不同高度和不同时间尺度上对风环境进行直观分析。这些数据在建筑设计阶段的直接应用体现在对风荷载的准确量化以及对建筑外形优化方案的理论指导上。另外，结合长期数据与统计模型，可以预测未来气候变化对风环境可能带来的影响，为建筑的耐久性设计提供前瞻性参考。

二、结构体系与构件协同设计

（一）引入框架-核心筒混合模式

框架-核心筒混合模式是一种有效应对超高层建筑风荷载作用的结构体系，其设计目标在于实现侧向刚度与质量分布的均衡，同时降低风致振动的幅度。核心筒作为建筑的抗侧力主体，可以提供较大的刚度以抵抗水平荷载，而框架结构通过外围布置，增强建筑的整体抗扭性能。在实际设计中，混合模式的优化应结合建筑的高度、体型以及功能分区，以确保构件布置的合理性。为了进一步减小风振效应，需要对框架和核心筒之间的协作关系进行精确分析。例如，在框架布置中，采用变截面梁柱组合可以有效调整质量分布，从而降低建筑的振动频率与风振响应；^[3] 核心筒内部的剪力墙与周边框架间可通过阻尼器联动设置，以吸收能量并减小风荷载作用下的位移。引入这些设计策略，不仅可以提升整体结构的抗风能力，还能兼顾建筑的经济性与施工可行性。

（二）在关键受力区域尝试新型高性能材料

针对超高层建筑风荷载作用下的关键受力区域，选用新型高性能材料是一种提升结构安全裕度的重要手段。超高层建筑区域通常包括核心筒周边的剪力墙、框架梁柱交界处以及风振控制设备的安装位置。高性能混凝土（HPC）因其优异的抗压强度和耐久性，已被广泛应用于剪力墙构件中，以增强其抗压与抗剪能力。而在框架梁柱连接处，高强钢材的引入则可显著提高节点的延性与抗疲劳性能；另外，纤维增强复合材料（FRP）作为一种新兴材料，也逐渐在风振设备的基础构件中得到应用，其质量轻、强度高且耐腐蚀的特性，使其能够适应复杂风场环境并延长使用寿命。

（三）通过耦合分析方法校核主次构件协同性能

在超高层建筑的结构设计中，主次构件的协同性是确保整体结构稳定性的重要因素。在风荷载作用下，主次构件的响应往往呈现出复杂的动态耦合关系，传统的单独分析方法难以全面揭示这一现象。因此，耦合分析方法成为校核主次构件协同性能的有效工具。建立精细化有限元模型可以模拟主次构件在风荷载作用下的应力分布与变形行为。例如，在框架-核心筒结构中，主构

件核心筒承担大部分抗侧力，而次构件框架的刚度与其协同性直接影响建筑的抗扭性能。耦合分析不仅能够识别主次构件间的力学失配，还可以为调整截面尺寸、材料选型及节点设计提供依据。^[4] 动态分析方法的引入则进一步提升了协同性的校核精度，尤其是在考虑风振与涡激振动的情况下，能够有效预测主次构件的联合变形模式。利用这种系统化的分析与优化，可以确保整体结构在风荷载作用下保持稳定，并满足弹塑性性能的多重需求。

三、施工过程风效应与动态控制

（一）运用临时支撑与调平技术降低风振位移与应力集中

在超高层建筑施工阶段，未封闭结构的抗风能力较弱，易受到风荷载引发的振动和应力集中的影响。针对这一问题，临时支撑与调平技术成为确保施工安全的关键手段之一。临时支撑系统可根据施工进度动态调整其布局与强度，提供额外的结构刚度以抵御风力作用。其设计应结合建筑高度、施工阶段荷载分布以及局地风场特征，以确保支撑系统的稳定性与有效性。调平技术则主要用于控制施工过程中结构构件的偏移，通过设置液压千斤顶或智能校准装置，实时调整框架或核心筒的姿态，防止累积误差导致的应力集中。具体操作中，需对关键节点如梁柱连接处、外墙支撑区域进行重点监测，以避免局部应力超出材料容限。在使用这些技术时，还需对临时构件的疲劳性能和安装精度进行严格校核，确保整个支撑体系在长时间风荷载作用下的安全可靠。

（二）设置实时监测网络跟踪振动幅值与预判潜在风险

超高层建筑施工过程中，风荷载的随机性与复杂性要求采用实时监测网络，以精确掌握振动幅值的动态变化并评估潜在风险。监测系统应覆盖建筑的关键部位，包括顶部未封闭区域、施工设备承载点以及临时支撑连接处，通过高频传感器采集风荷载引发的振动响应数据。监测网络不仅需要具备高灵敏度，还需结合无线数据传输技术，确保实时数据能够快速传递至控制中心。^[5] 在振动幅值超出预警阈值时，系统应立即触发报警并生成详细报告，为施工计划的调整提供依据。例如，通过分析不同高度的振动频率与幅值变化，可以识别潜在的结构不稳定区域，以便采取针对性措施进行加固或优化。监测网络还需兼顾材料配比的反馈机制，采集关键构件的应力与变形数据，动态调整材料使用比例，以达到施工过程中的最优性能表现。

（三）制定降振方案确保关键时段施工安全

超高层建筑的施工过程中，恶劣气象条件对结构安全构成严重威胁。为有效应对施工高峰期或极端天气下的风荷载影响，提前制定完善的降振方案尤为重要。降

振方案应包括外部防护措施与施工流程的动态优化。外部防护方面,可以采用设置临时风屏障或加装阻尼装置的方式,减少风力直接作用于未封闭结构的面积,并通过增加建筑外部的阻尼比吸收部分振动能量。施工流程的调整则应注重对施工计划与人力资源的合理安排,在大风天气时暂停高风险作业,优先完成风荷载影响较小的内部施工任务。关键时段的降振策略还需综合考虑不同高度的风场特征与结构响应,设计区域化的应急方案以提高执行效率。例如,在临时支撑与监测系统联动的基础上,可在高风险区域增加多功能振动控制设备,以降低风振带来的应力集中风险,确保施工进度与安全性能同时达标。

四、整体安全评估与性能优化

(一) 构建多层次动力分析模型

为了科学评估超高层建筑在风荷载作用下的实际安全性,需要建立多层次的动力分析模型。这一模型应包括整体结构响应、局部构件行为以及长期疲劳性能等多个层面。在整体结构层面,模型需精确反映建筑在不同风速和风向条件下的动力特性,通过捕捉关键参数如风振加速度、层间位移比以及侧向刚度变化,评估建筑的稳定性与舒适性。局部构件层面则着重分析主要受力区域,如核心筒周围剪力墙、外框架梁柱等,研究它们在高频振动中的应力分布与疲劳寿命。^[6]此外,模型应嵌入时间序列分析模块,模拟长期风荷载引起的构件损伤累积过程,为疲劳寿命的预测提供数据支撑。在实现这些功能时,可以结合有限元分析与计算流体动力学(CFD)技术,提升模型的精度与适用性。采用动态调整建模参数,确保模型在多变风场条件下的适配性,从而为超高层建筑的安全评估提供全面且可靠的依据。

(二) 轻量化与高强度兼备的配套方案

在超高层建筑的设计中,如何平衡经济投入与抗风效率是一个重要挑战。轻量化设计是降低材料使用量与施工成本的核心手段,同时还能减少建筑自重带来的基础荷载。然而,轻量化通常伴随着刚度与强度的下降,因此高强度材料的引入成为关键解决方案。例如,在核心筒的关键受力区域,可以采用高性能混凝土,其高抗压性能与低收缩特性能够同时满足抗风与施工需求。框架梁柱的设计则可以通过高强度钢材或复合材料的应用来实现轻质与高强的结合;阻尼器和风荷载调节装置的加入能够显著提升结构的抗风性能,减少额外的材料需求,从而进一步优化整体经济性。

(三) 借助智能算法与参数灵敏度分析

随着建筑信息化技术的发展,智能算法在超高层建筑结构设计中的应用逐渐普及。通过引入人工智能与参数灵敏度分析,可以显著提升结构优化的效率与精度。智能算法如遗传算法、粒子群优化等,可以在庞大的设

计参数空间中快速定位最佳组合,例如寻找结构刚度与重量的最优平衡点。参数灵敏度分析则可以揭示关键设计变量对结构性能的影响程度,例如建筑高度、材料特性与风荷载方向的变化如何影响整体稳定性。^[7]这一过程不仅帮助优化结构设计,还能提供明确的设计指导,减少试错成本。结合建筑信息模型(BIM)与云计算平台,可以实现实时优化与多方案比较,为应对多变风场条件与复杂使用功能提供动态设计支持。这种基于智能算法的迭代设计方法,为超高层建筑的高效设计与安全运营开辟了新的路径。

结语

综合上述研究可见,超高层建筑在风荷载作用下的结构优化设计,既要关注风环境参数的精细化获取,也要面向施工过程与全生命周期的多维度管控。新材料的运用与多学科耦合分析手段的引入,让结构体系更能有效应对高风荷载环境,减小振动与疲劳破坏概率。施工阶段的临时支撑与监测手段,为动态控制提供了可行途径,使得建筑在未封闭的临时状态下仍能维持相对稳定。随着使用功能的日益多样化,超高层建筑需在刚度、舒适度与经济性之间寻求平衡;借助大数据与智能算法,不断迭代优化结构方案,可以满足多变的气象与功能需求。面向未来,学术界和工程界仍需深入开展超高层建筑风致振动机理研究,推广更具前瞻性的设计理念与施工技术,以期在结构安全、资源利用和城市景观等多方面取得更高水平的发展。通过系统化的安全评估与性能优化策略,超高层建筑的建设将具备更强的可持续性与社会价值,引领城市高层建筑向更高水平的风环境适应与结构创新迈进。

参考文献

- [1] 孔德坤,樊佳.超高层建筑表面风荷载数值模拟研究[J].重庆建筑,2014,13(11):56-58.
- [2] 白硕,赵利军,赵娜,等.荷载作用下超高层建筑结构风荷载响应仿真[J].计算机仿真,2024,41(09):243-246+391.
- [3] 郭增涛.超高层建筑风荷载数值模拟研究[J].建材技术与应用,2022,(03):1-4.
- [4] 贾世龙,陈凯荟,刘莉,等.风荷载作用下超高层建筑脚手架立杆稳定性研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(04):676-684.
- [5] 刘润富.某超高层建筑风荷载分析[J].低碳世界,2016,(30):149-150.
- [6] 史文鋈,王金锋.超高层建筑设计风荷载的选用[J].广东土木与建筑,2013,20(06):26-27+42.
- [7] 黄剑,顾明.超高层建筑风荷载和效应控制的研究及应用进展[J].振动与冲击,2013,32(10):167-174.