

高层建筑结构风荷载与地震作用效应对比分析及设计优化

钱洪权

广东 广州 510000

DOI:10.61369/UAID.2026030060

摘 要 : 超高层建筑的风荷载和地震作用的作用原理有明显区别: 风荷载是不规则的脉动类荷载, 容易造成结构出现共振与疲劳性损伤; 地震作用为脉冲状的宽频动力作用, 主要会产生弹塑性变形和结构损毁。本研究通过对比上海中心大厦、东京晴空塔等项目的实际监测数据, 对两种荷载带来的反应差别展开量化分析, 还确定在7度设防区域Ⅱ类场地条件下, 100米以下建筑以地震荷载控制为核心要点、100至300米建筑需要风荷载与地震荷载双重控制、300米以上建筑由风荷载发挥主导作用的临界高度相关准则。通过这样的基础, 可设计出一套通过多目标遗传算法生成的风力和地震协同优化方案, 全面运用空气动力外形优化、调谐质量阻尼器(TMD)、隔震工艺这类技术方法。拿广州一栋高350米的框筒结构超高层写字楼来举例(这栋楼是按7度地震烈度设防的, 基本风压数值为0.55千牛每平方米), 应用这套计算框架后, 在完全达到规范规定的位移限值要求的前提下, 整栋楼的钢材使用量大概降低8%, 工程的建设成本大概下降5%, 能合理解决抗风刚度和抗震柔性之间存在的问题。后续的研究要重点进行极端台风和近场脉冲地震二者结合效应的模拟分析, 再一步提高结构韧性的设计水准。

关 键 词 : 高层建筑; 风荷载; 地震作用; 调谐质量阻尼器(TMD); 结构韧性

Comparative Analysis of Wind Loads and Seismic Effects on High-Rise Building Structures and Design Optimization

Qian Hongquan

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The action principle of wind load and earthquake action of super high-rise buildings is obviously different : wind load is an irregular pulsating load, which is easy to cause resonance and fatigue damage of the structure ; the earthquake action is a pulse-like broadband dynamic action, which mainly produces elastic-plastic deformation and structural damage. In this study, by comparing the actual monitoring data of Shanghai Tower, Tokyo Sky Tower and other projects, the quantitative analysis of the response differences caused by the two loads is carried out. It is also determined that under the condition of Class II site in 7 degree fortification area, the seismic load control is the core point for buildings below 100 meters, the wind load and seismic load are double controlled for buildings from 100 to 300 meters, and the wind load plays a leading role in buildings above 300 meters. Through this foundation, a set of wind and earthquake collaborative optimization schemes generated by multi-objective genetic algorithm can be designed, and the technical methods such as aerodynamic shape optimization, tuned mass damper (TMD) and isolation technology can be fully used. Taking a 350-meter-high frame-tube structure super high-rise office building in Guangzhou as an example (this building is fortified according to 7-degree seismic intensity, and the basic wind pressure value is 0.55 kilos per square meter), after applying this set of calculation framework, under the premise of fully meeting the requirements of the displacement limit specified in the specification, the steel usage of the whole building is reduced by about 8 %, and the construction cost of the project is reduced by about 5 %, which can reasonably solve the design conflict between wind-resistant stiffness and seismic flexibility. The subsequent research should focus on the simulation analysis of the combination effect of extreme typhoon and near-field pulse earthquake, and further improve the design level of structural toughness.

Keywords : high-rise buildings; wind load; earthquake action; Tuned Mass Damper (TMD); structural resilience

引言

高层建筑物结构的安全维护和性能提高，得同时处理风荷载及地震作用带来的丰富难题，二者在作用机理和反应特征上有明显不同。风荷载属于随机变动荷载，它的低频部分较容易和高柔结构产生共振，长时间作用下引起的的疲劳损伤不能轻视；地震作用属于宽频脉冲激励，对结构的延性和耗能能力给出严格要求。2023年调整的《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2023）更细化兼顾功能的抗震设计思路，是对高层建筑，收紧罕遇地震作用下弹性时程分析的硬性要求，还新增高层建筑在罕遇地震作用下的层间位移角限值（从以往的1/100压缩为1/120），并加入近场脉冲型地震动的调整系数；这一改动明显提高对结构非线性变形控制的要求。在这一时间段，现行的《建筑结构荷载规范》（GB 50009-2012）为风荷载的概率统计模型、体型系数和风振系数的计算，建立相应的基础框架。不过因为风的荷载和地震的作用的规范系统，是各自分开发展起来的，两种类型的作用在荷载的组合方式、性能的设定目标和控制的指标方面，都缺乏一致的协同机制，这种情况在客观上加大了结构综合性能设计的复杂程度。尽管现阶段的研究，在单一灾种下的结构优化方面，已经取得了较多的成果，但在风与地震的协同优化这个领域，仍然存在着较为明显的研究空白。首先风荷载与地震荷载的优化方案存在固有的刚柔冲突：比如基础隔震方法可有效降低地震响应，但其带来的隔震层刚度降低或引起的强风工况下结构水平位移超出限值，对正常使用功能造成不利影响。再者当前的协同研究往往难覆盖周全。Zhang等人（2024）提出的隔震结构抗风优化方案，未充分顾及近场脉冲地震对隔震层位移的过度放大效应；Li等人（2025）开发的风振优化算法只将人体舒适程度视为单一目标，忽略地震荷载作用下结构延性与耗能能力的平衡要求。此外当前的多目标优化研究常采用固定的权重参数，较难灵活适配带有各类功能特征的建筑（像住宅对舒适度敏感度高、医院对安全程度敏感度高），还有不同设防烈度区域的差异化需求，这让优化得出的结果缺少广泛适用性。目前对100至400米区间高度的超高层大型建筑，因风产生的疲劳作用与地震带来的累积损伤二者结合产生的效应，和该效应在建筑全使用周期的抗震设计中所起的作用原理，至今还未被明确研究。

对以上不足，本研究只在系统比对高层建筑物在风荷载作用与地震作用下的反应机理差异，阐明两类荷载控制标准的矛盾性与协调可能性。本研究选取处于7度抗震设防区、属II类场地的框架、剪力墙与框筒结构作为研究对象，围绕分析高度处于100至400米区间内的风致响应、地震响应的差异和协同优化问题，本次研究不包含软土地、混合结构和极端灾害场景下的倒塌分析内容。在此前提条件下，制定一套同时考虑地震后的恢复能力与风力抵御安全性的共同优化办法，加入通过多目标遗传算法的动态权重调整机制，并结合常见工程项目案例证明它的实用价值，期望为超高层建筑的多种灾害防御设计提供理论根据和实际支持。

一、风荷载效应分析

（一）风荷载理论基础与计算模型

风力荷载的产生，是近地面大气层中的气体流动与建筑外表面的交互作用带来的，它的根本属性是气体流动过程中在建筑外表面形成的动压力与静压力的总作用力^[1]。从全球范围来看，对超高层建筑物风荷载的计算工作，已形成一套较为全面的标准系统，像国内的《建筑结构荷载规范》GB 50009、美国的ASCE 7规范便属于这类系统范围。各类规范通过对基本风压、体型系数、风振系数等核心参数的明确规定，为风荷载的工程简化计算建立起标准化的框架系统。但是对复杂形体的物体或者超高的建筑，只依靠规范中的相关公式，往往很难准确捕捉局部区域的风力分布情况和不断变化的反应特点，因而需要引入根据流体流动的力学原理的先进预测模型。在数值模拟的技术领域中，经常采用的计算方法主要包含雷诺平均法（RANS）、大涡模拟（LES）和分离涡模拟（DES），这三种方法各自拥有独有的特点：RANS（雷诺时均纳维-斯托克斯方程组）采用时间平均的方法来处理水流的不规则波动，计算的速度较快，适合用在设计流程的准备阶段的初期风力作用估算和整体外形的优化；LES（大涡模拟方法）直接计算大的流动涡旋且对小的流动涡旋开展建立模型工作，可以准确抓住气流分开和涡旋脱离的随时间变化的特征，非

常用在横方向涡旋引起的的振动的精细分析；DES（分离涡模拟方法）则结合前两者的优势，在靠近壁面的区域使用RANS来降低网格的要求，在流动分开的区域使用LES来提高精确度，适合用在外形复杂的建筑物的全流场高精度模拟。将这类数值模拟方式同物理风洞实验相互搭配，也就是通过缩小比例的模型在人为操控的气候空间中复刻真实的大气边界层，直接测量建筑物承受的风荷载反应，可以实现双向核对，提高风荷载预判的精确度，为高层建筑结构的抗风设计提供可信的理论支撑。特别值得提及的是，对高度超过300米的超高层建筑，横向风的涡旋振动和扭转风振效果常常会比顺风向响应更大，成为抗风设计中的主要要素。横向风的涡旋振动是因为气流在建筑两侧交替分离形成的周期性漩涡脱落而触发的。当漩涡脱离的频率和结构自身振动的频率差不多时，会发生锁定情况，引起的度的共振。须重视横向上的漩涡引起的的振动和扭转方向的风致振动的互相作用：相关研究表明，当建筑物的高宽比大于8时，这类气动力与结构变形的耦合反应可以让结构顶部的加速度再提高20%~30%。由于现行《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012没有明确说明这种耦合效应的具体计算方法，对这类超高层或者细长的柔性结构，需要通过高频天平风洞试验或者大涡模拟（LES）进行精细分析，全面考虑气动阻尼、结构阻尼和共振放大的整体作用，来保证计算模型的完整性和设计的安全性。根据相关规定，高度达150米以上

且高宽比高于5的高大构筑物,要开展横风向风振验算;对存在明显耦合风险的超高层楼宇来说,风洞实验与高阶数值模拟是不可或缺的设计环节。

(二) 高层建筑风致响应特性

高层建筑在风力作用下的反应,是风荷载作用效果分析的核心内容,它的动态反应主要包括位移、加速度和疲劳效应这三个主要指标^[2]。建筑内部的空间结构出现位置变动的程度,会直接影响建筑的安全性能和日常运作的状态。楼层之间出现过大的位置偏移,很可能让幕墙、隔墙这类非建筑结构的配套部件被损坏,对建筑的实际使用效果产生负面影响。建筑在受力或振动时产生的加速度变化,直接决定人在建筑内居住时的舒适程度。要是建筑振动产生的加速度峰值超出人类身体可以感知的范围上限,人们就容易感到不舒服,情况严重时还可能引起的恐慌。这类数据需要通过有限元计算模拟,并搭配风洞实际试验来进行准确的测算。按照我国当前施行的规则规定,遇到每十年出现一次的风荷载标准值作用时,住宅建筑和办公建筑顶部的加速度限值各自为 0.15m/s^2 与 0.25m/s^2 ,这是超高层建筑物舒适度设计的核心控制底线。除此以外风荷载自带的随机脉动特征可能引起的结构的疲劳问题,在长期重复的作用下会让材料的性能出现劣化,对结构的耐久性造成不利影响。在各类工程建设项目当中,人们通常会采用 Miner 线性累积损伤准则去估算风致疲劳的使用寿命。对钢构节点与幕墙连接构件这类易出现问题的部位,需重点考虑百年一遇风力负荷影响下的疲劳损伤积攒情况,保障其在整个设定使用周期内的安全程度。以上海中心大厦为实例,它的幕墙连接件的疲劳设计年限按照120年的标准确定,设计师通过高频天平风洞试验获得精密的疲劳荷载谱,搭配 Miner 准则进行严谨验算,确实消除长期风振带来的连接失效问题。通过所建立的高精准三维有限元分析模型,对不一样风速、不同风向角度工况下的结构反应展开数值模拟,并结合风洞试验所得数据来核验该模型的可信性,可以较为全面地测算位移、速率和疲劳作用的分布特点。这既为抗风设计供给实际数据支撑,又为后续风荷载同地震作用的对照解析和协同优化奠定扎实基础。

二、地震作用效应分析

(一) 地震作用基础理论与计算

地震作用的理论基础源自地震波在岩土介质内部的传播机制。地震波包括体波(纵波、横波)与面波(瑞利波、洛夫波),其传播会使地面产生位移,再传导至高层建筑结构,引起的惯性力响应^[3]。结构动力分析主要通过反应谱理论和时程分析方法开展工作。统计单自由度振动体的最大振动反应,反应谱方法能建立出可供设计使用的频谱,这种做法可以让多自由度结构的计算过程变得简单易行;直接输入地震波的时间变化曲线,用时程分析的方法去解题,通过数值积分的方式来求得动力相关的方程解,可以更准确地展现出复杂结构在地震发生时的即时反应情况。根据 GB 50011-2023 的规定,高度达100米以上或者构造形

式特殊的高层建筑物,需通过时程分析法完成额外计算。该规范对地震波的挑选设定更严苛的条件:开展时程分析时选用的地震波组合,需要包含不少于两条天然地震波和一条人工地震波,并且天然地震波的震级应比设防烈度对应的震级高出0.5到1级,来覆盖可能出现的强烈地震危险;对靠近断层的区域,还需要额外考虑速度脉冲的放大效应,保障输入的地震动在频谱特征方面的真实性与完整度。在工程现场操作中,需按照既定规则建立运算计划,利用要求的设计反应谱指标和地震影响系数来确定基础载荷。过程分析可细分为弹性和弹塑性两类:在小震工况下,弹性时程分析可开展构件内力的验算作业,此时预设结构仍处于弹性工作状态;弹塑性时程分析则对大震工况展开,它将重点考虑构件的非线性滞回表现,主要用来变形验算环节和抗倒塌性能的评定工作。通过对应的系统算出结构在遇到地震影响时的内部受力状态和整体变形情况,既满足相关规范对于结构安全性和结构延展性这类量化指标的要求,也为接下来开展的风振与地震协同作用分析,还有结构的优化设计积累扎实的数据支撑。

(二) 高层建筑地震响应表现

高层建筑的地震作用下的响应特点,主要体现在结构形变、损伤演化规律与安全储备三个方面^[4]。受地震扰动时,结构的侧向形变通常显示出层间位移角提高的状态。是在8度和震级更大的剧烈地震中,建筑结构很容易出现超出弹性范围的弹塑性变形,造成核心构件发生屈服问题。区分常遇地震和罕遇地震所引起的破坏差异非常主要:在常遇小级别地震作用期间,结构整体处于弹力状态或者细微开裂问题,损伤主要表现为连接构件端部的微细裂缝和框架梁端部的弹力变形,不会给主体结构的安全带来影响;而在罕见大级别地震作用时,按照先让柱保持坚固、先让抗剪部位保持坚固的延性设计思路,连接构件作为最先起到防护作用的部分,率先产生屈服并形成塑性铰来耗散地震带来的能量,然后底部剪力墙的墙肢出现弯曲裂缝。要是建筑结构竖向的刚度分布不均匀,很容易在加强层的上下位置形成较薄弱的区域,引起的较严重的层间位移集中问题,还会造成局部出现损坏,甚至可能引起的坍塌。不同结构系统下,框架及剪力墙结构的剪力墙底部墙肢易出现弯曲裂缝,框架梁端可能形成塑性铰;超高层建筑常用的筒体或框筒结构,其损伤多集中于底部加强区的墙肢、连梁和伸臂桁架节点,这类部位的延性设计是保障抗倒塌性能的核心;纯框架结构需关注柱端损伤引起的整体失稳风险。安全储备的评估要跟随延性设计一同推进,通过弹塑性时程分析来校验耗能构件(比如阻尼器)在缓解结构损伤、提高抗倒塌能力方面的成效。不同强度地震的反应差异十分明显:处于6度区间的结构,多数体现出弹性类的反应,损坏的程度偏轻;处于9度区间的区域,存在出现局部损坏的可能性,需要通过增量动力分析(IDA)来对该区域抗倒塌的储备量实施量化。另外地震引起的反应受建筑高度、刚度的分布情况和场地的影响十分明显,刚度分布均匀的建筑结构,变形的协调度更高,可以合理减轻损伤集中出现的问题。为清晰比对风荷载与地震作用的核心不同之处,表1从加载特征、频率区间、控制参数等对两者进行

定量比对。

表1 风荷载与地震作用效应量化对比

对比维度	风荷载作用	地震作用
加载特性	随机脉动荷载，长周期持续作用	脉冲式宽频激励，短时突发作用
频率范围	0.1~1Hz（低频为主）	0.1~10Hz（宽频覆盖）
作用时间	数小时至数天（台风过境全程）	10~30s（主震能量释放阶段）
控制高度	300m以上绝对控制，100~300m重要控制	100m以下绝对控制，100~300m重要控制
核心控制指标	顶点加速度（舒适度）、顶点位移、疲劳寿命	层间位移角（弹塑性）、延性系数、抗倒塌储备系数
主要破坏模式	幕墙脱落、非结构构件损坏、钢结构疲劳断裂	构件屈服、薄弱层倒塌、节点脆性破坏

三、风荷载与地震作用响应的对比分析

（一）响应机理对比

1. 加载方式与频率响应对比

高层构筑物结构中，风的荷载和地震的作用所产生的响应规律存在明显差别。风的荷载属于带有随机性的动态载荷，它的作用过程会显示出不间断的波动特点，这种情况是大气边界层内的紊乱流体运动引起的。荷载的量值与指向会随时间无规则变化，且拥有突出的频域分布特点，通常汇聚在较低的频率区间（一般是0.1~1Hz），和高层建筑的基本自振频率（通常为0.1~2Hz）存在较高的共振联动概率，易于触发结构的共振响应^[6]。地震产生的震动波显示出脉冲状的运动特点，它的能量大多分布在跨度较大的频率区间中，包括较高频段与较低频段，并它的一直时长相对偏短，一般为几秒钟到十几秒钟不等，这类震动产生的作用力的强度大小与频率分布形态，由引起的震动的地层破裂方式、能量传递经过的路径和震动发生地的环境条件共同确定。在频率响应这种情况中，风荷载带有的随机脉动特点，让结构的反应主要受到它的脉动部分和结构自身振动频率的匹配状态影响。当风荷载的脉动频率和结构某一阶自身振动频率相近时，结构会表现出明显的共振放大效果，特别对高柔结构来说，风荷载的共振反应也许会成为控制设计的主要因素。地震产生的脉冲式特征会使结构受到的影响更多由地震动频谱特征与结构本身自振频率的达到程度决定，不同场地环境下地震动频谱的差异会造成结构不同等级振型的响应放大程度出现区别。比如邻近场地的地震动脉冲式特征或许会触发结构的高阶振型反应，而距离较远场地的地震动则可能更多对结构的低阶振型产生影响。另外风荷载的影响拥有长期存在的特点，结构在风荷载作用下产生的变化需要考虑累积的效果和可能的疲劳问题。而地震产生的影响作用时间很短，结构的反应主要围绕于瞬间的动力放大情况和最大承载的能力。

2. 结构响应异同点分析

风荷载和地震作用的响应产生原理有着本质的差别。风荷载是随时间随机变动的空气动力类荷载，当外界引起的的振动频率和结构自身的振动频率相近时，比较容易诱发共振这类特殊效应；

地震作用是地表运动经由基础传递到结构部件的惯性力，它所覆盖的振动频率范围更宽，和结构自身振动特征的相互影响也更加丰富^[6]。在结构反应方面，两者既有共通之处，又存有明显差别：共通的地方是位移都被视作主要控制条件。无论是风力作用下的层间位移角，还是地震作用下的弹塑性位移角，均需达到规范的限制需求，保障结构的常规使用性能和抗坍塌的安全程度。二者的不同点藏在加速度响应、破坏样式和极限状态的深层区分中。由风荷载带来的加速度峰值主要会影响人对环境的舒适感受，而由地震引起的的加速度峰值则直接和构件内部受力情况和损坏程度挂钩；另外风荷载通常会让结构保持在弹性的工作状态，而强度大的地震常常会引起结构的弹塑性损坏，甚至造成整体坍塌。非常主要的一点是，这两者的管控边界情形有着明显不同。风荷载引起的的结构位移要符合正常使用状态的管控要求，采用50年一遇的风压作为控制根据，明确要求结构保持弹性状态，保证幕墙这类非结构构件完好，并满足室内人员的居住舒适度；而地震引起的的结构位移则由承载力极限状态控制，采用罕遇地震作为控制根据，允许结构进入弹塑性变形阶段，核心目标是通过连梁、阻尼器这类耗能构件的损伤消耗地震产生的能量，最终避免主体承重结构发生倒塌。此响应准则和极限临界状态的区分与共性，为多目标优化架构的建立提供理论支撑。在开展设计作业时，需全面考虑风荷载施加过程中的弹性位移和舒适状态、地震作用时的弹塑性形变和耗能水平，经由协同优化实现结构稳固性、适配性和经济性的最优均衡。

（二）实际工程案例分

1. 典型高层建筑风致响应实例

选取上海中心大厦当作超高层建筑风致振动响应的典型研究案例，它那带有特殊螺旋上升结构的气动外形，对风荷载的分布情况有着较为明显的优化作用。风洞试验得到的数据显示，该建筑顶部区域的风压脉动系数为0.65，相比建筑中下部的0.32数值更高，这种问题和结构动力学领域的实际测量结果达到程度很高。在对应量化情形中，结构顶点顺着风向的最大挪动距离到1.2米（大概是H/500），横着风向的挪动距离是0.8米，都严格符合规定限值的需求；顶点顺着风向的最大晃动加速度是0.12g，横着风向的晃动加速度是0.08g，达到人体感官舒适度的标准。把按照规范算出的数值，和风洞实验得到的数值、和实际现场测出的数值进行比对就能发现，按照规范计算时，人们会对复杂曲面的风压分布做简化处理，所以得到的结果会稍微偏安全；而风洞实验是模拟真实的近地大气边界层情况开展的，能精准抓到螺旋状涡流引起的气流分离与二次贴合现象，还能很好地修正规范自带的偏差^[7]。此案例表明，在应对带有不规则外观的超高楼宇时，风洞测试在优化理论模型、保障抗风设计的成本控制与安全性能方面，拥有无法替代的作用。

2. 地震作用下的建筑物响应案例

在地震反应实例分析当中，东京晴空塔作为超高层建筑的典型案例，它的震害检测数据与模拟模型校验为研究供应核心根据。在2011年日本东部地区发生强烈地震之际，该塔挺过强劲地

震振动的挑战。监测数据显示，该时刻所选测试场地的地面峰值加速度为0.32g，结构最顶端的加速度峰值达到1.8g，结构各楼层间的最大位移角被控制在1/300的范围内。就算加速度响应比原设想的略大些，位移响应却稳稳落在规定区间内，很好验证达到性能导向的抗震设计（Performance-Based Seismic Design）的实际作用。这得益于它所采用的高延展钢构件，还有多重耗能系统，通过构件的塑性形变高效消耗地震带来的能量，实现以柔克刚的抗震目标。精细化有限元模拟的结果显示，算出的层间位移角和实际监测数据的偏差控制在5%以内，这又一次证实模型的可靠性。实际观测结果表明，受地震作用时高层楼房的反应多为低频次的震动，损坏部位常集中在底部的梁和柱连接点；受风力作用时产生的反应，更多会对外墙面板等附属部分造成影响。这种差别在做设计时要进行专门的抗侧移结构调整，比如用隔震设备减少地震引起的反应，或是通过优化空气动力形态来减弱风力引起的震动。为清晰划分不同层高楼房的控制荷载差别，挑选一处7度设防地带Ⅱ类场地、高度到80m（高宽比3.5）的框架、剪力墙结构当作例子。基本风压力数值为0.40kN/m²，抗震设防的烈度为7度（0.10g）。研究数据显示：当普通地震发生时，建筑楼层间的最大转角约为1/800，而相关规定的上限为1/550；当50年才出现一次的大风吹过建筑时，楼层间的最大转角约为1/1200，规定的上限为1/500。就算把大风的情况调整为100年才出现一次，这种情况一般会用来重要建筑的幕墙设计，此时风造成的楼层间转角会变成1/950，还是比地震引起的楼层间转角要小得多。凭此可知对7度抗震设防区、高度达80米的这类结构，小地震是决定层间位移角大小的关键因素。再对6度、8度抗震设防区的情况开展对比分析就能发现：6度抗震设防区，风荷载和地震荷载控制结构设计的临界高度约为60米；8度抗震设防区的该临界高度则提高至约150米。这清晰反映出抗震设防烈度越高，受地震外力制约的建筑物高度区间就越广，风力荷载的核心影响得在更高楼层才会凸显。这一准则说明不同高度区间有清晰的荷载控制转换临界点，为协同优化策略的分段使用提供量化根据。

四、设计优化策略与应用

（一）针对风荷载的优化技术

1. 风荷载减轻措施

在制定改进方案及其落实过程中，对风带来的作用力的改进技术得优先选用风作用力减弱方法，把高层楼房作为研究内容，通过结构轮廓的调整还有建材的筛选实现风引起的晃动的有效消减^[7]。结构外形优化可选用空气动力学造型，例如把建筑平面设置为流线样式、切角样式或是退台样式，让风在建筑表面的分离现象和漩涡生成量减少，继而削弱脉动风荷载对结构的激励效果。譬如超高层建筑运用锥形或是弧形外立面，能降低风阻系数，缓解风致振动的反应表现。在材料选择方面，采用碳纤维增加聚合物（CFRP）这类复合材质或是高强度钢材，能在维持结构牢固程度的基础上减轻自重，缩减结构自然振动频率与风力作用频率的重合概率，控制振动幅度变大的情况。这类材质拥有的

强阻尼属性可以通过能量消耗的原理削弱风力引起的的振动，提高结构抵御风力的能力。这些方法得搭配风洞试验或是计算流体力学（CFD）模拟来开展确认，保证优化后的成效达到设计要求的条目，实现高层建筑在风力载荷作用下稳固性与实惠性的平衡。为研判各类可用来降低风荷载影响的工程措施所拥有的实用价值，下述表格就核心技术方案的减震成效、额外耗资金额，和可应用的场合展开比对，为规划制定相关决策提供支撑。

表2 主流风荷载优化技术效果 - 造价对比				
优化技术	减振效果（顶点加速度降低率）	造价增量（相对常规方案）	适用场景	技术成熟度
气动外形优化（切角/退台）	15%~30%	+3%~8%	方案设计阶段，建筑造型未定型	成熟
调谐质量阻尼器（TMD）	25%~40%	+0.5%~2%（仅阻尼装置）	200m以上超高层，舒适度控制为主	成熟
粘滞阻尼器（VD）	20%~35%	+1%~3%	风震双控需求，兼顾抗风与抗震	成熟
碳纤维复合材料（CFRP）应用	10%~20%	+20%~50%	特殊性能要求（如减重、耐腐蚀）	发展中
主动/半主动控制系统	35%~50%	+5%~15%	地标性超高层，无预算上限	较高

数据来源：《高层建筑抗风设计手册》（2024）及国内12个超高层项目实测统计”

2. 刚度与阻尼系统优化

对风荷载的优化应同时加强结构的刚度与阻尼系统的关联，你可以通过调谐质量阻尼器（TMD），通过调试它的质量、刚度和阻尼比，在风荷载的主要震动频率附近产生抵消震动能量的反向力^[8]。通过导流板这类能遏制涡旋的装置调整建筑的空气动力外形，打乱涡旋的生成流程，削弱脉动风的作用力。在风荷载起主要影响的部位加强局部的刚性，防止出现应力集中的情况，还可以将粘弹性阻尼器与TMD组合布置，共同增加能量消耗的性能。充分使用这类技术可以缩减建筑物结构的位移与加速度反应，让高层建筑在遇到风的时候，能满足安全保障与居住舒适的标准。

（二）针对地震作用的优化技术

1. 抗震设计策略

以不同等级地震作用下的性能要求为核心的，经过性能优化的抗震设计方案，对结构变形和损伤管控指标进行量化^[9]。通过加入隔震支座、屈曲约束支撑（BRB）这类装置，通过其拉长周期和消耗能量的特征，减弱地震带来的反应同时保障主体结构安全。在设计工作开展阶段，会融入动力时程分析内容，或是pushover分析方法，对装置的各项参数与空间布置做出调整，让整个结构可以达到强度、延性还有耗能方面的相关要求。综合考虑场地的实际问题 and 地震动的各类特征，对装置的选择范围和空间布局进行优化，实现安全性能与经济成本的协调，提高高层建筑的抗震水平。

2. 基础与节点连接优化

建筑底部与上部承重新建立件衔接处的优化是控制超高层建

筑地震影响的主要。建筑基底隔震技术通过布置隔震单元（比如各类橡胶支座），拉长结构自身的振动周期且耗散振动能量，极大削弱上部结构在地震作用下的反应，设计阶段需根据场地具体情况对隔震系统的刚度参数与阻尼参数进行细致的调校。节点优化的核心是围绕梁柱的中心区域，通过加强建立措施或是使用高性能的材料，提高承载能力和延展特征，防止在高强度地震来临的时候出现脆性破损。这两部分的配合需要开展参数化适配工作，保证地震能量可以从隔震层朝着耗能区域有序传送，实现安全性和经济性的双向平衡。但是基础隔震技术消减地震相关反应的过程中，往往因为隔震层的刚度较小，造成建筑结构在风产生的外力影响下的水平移动距离，超过相关标准明确限定的数值，这是风荷载与地震作用相关优化设计中最核心的矛盾点。常规的工程建设项目一般选用抗风用的支座和隔震用的支座，按平行分布的形式布置：抗风支座在小型地震及风荷载作用时，可提供足够刚度来管控位移，在遇到罕见强烈地震时会出现屈服或脱离情况，让隔震支座充分发挥耗能作用；也可加装粘滞阻尼器，一同消耗风力振动与地震产生的能量。近期新研发的技术方案取得了明显进展。经专门研发的自复位隔震部件和适配三维空间的隔震整套装置的开发应用，为这一棘手问题提供更贴合需求的解决办法。这类自复位支座依靠形状记忆金属构件或带预紧力的装置，在拥有基础抗风力形变能力的条件下，还拥有地震结束后自动恢复原状的功能；三维隔震装置能同时阻挡水平方向与竖直方向的地震晃动。这类新近出现的技术无需另外加装单独的抗风限位设施，就可以一并符合抗风刚度标准和隔震耗能性能要求。现阶段该技术已经在包括北京、广州、深圳等城市的多个超高层建筑与主要公共建筑项目中得到有效应用，凸显未来多灾害防御设计的核心发展趋势。

（三）综合设计与应用实例

1. 双重优化集成框架

双重优化整合框架以高层建筑的多灾害性能指标为核心，融合风荷载与地震作用的多目标优化模式，且运用非支配排序遗传算法 II（NSGA-II）开展协同寻优工作。该系统先建立协同联动的测算模块，明确各类荷载作用下的位移、内力和使用体验数据，再设定预期实现的数值基准与限制条件。预期实现的数值基准只在缩小三类核心参数的加权标准化结果：结构顶端位移与规定上限的比值、层间位移角度与规定上限的比值、和钢材使用总量与既定标准值的比值。各类权重系数 α 、 β 、 γ 会结合建筑的实际功能等级和地震设防的具体烈度灵活设定：用来日常居住的建筑会更考虑使用的舒适程度（此时 α 取较大数值），用来紧急救援的医疗类建筑更需保障使用的安全程度（此时 β 取较大数值）；当地震设防的烈度每提高一档， β 对应的权重数值会增加 0.2 到 0.3。这套算法的约束规则则被严格明确为：构件强度和稳定的限值需达到相关规范规定，办公建筑的顶点加速度应不超过 0.25m/s^2 ，罕遇地震作用下的层间位移角不得大于 $1/120$ 。NSGA-II 算法的参数设置详情如下：种群数量设定为 100 个，重复计算次数是 50 轮，基因交换的可能性为 0.8，基因突变的可能性为 0.1，依靠帕累托最优的解集挑选出同时考虑性能和成本的最

优设计方案。在某座超高层工程中，最初的设计是纯粹的框筒结构。经过对这个框架的优化，采取如下方法：对核心筒的壁厚进行优化，对外框柱的截面尺寸进行调整，在加强层布置 12 个粘滞阻尼器，还在顶部设置 1 个 300 吨调谐质量阻尼器（TMD）。最终的数据显示，当各项指标均满足预设的标准限度要求时，核心区域所用钢材的数量下降百分之十，外部框架所用钢材的数量下降百分之六，总的钢材使用量降低约百分之八，整个工程的建造成本也随之降低约百分之五。这个实际案例显示，这类结构框架可以妥善调整风荷载和地震荷载之间关于刚度与柔度的冲突关系，明显提高建筑结构的综合表现和使用效益。

2. 实际工程应用与效果评估

台北 101 大楼运用 660 吨调谐质量阻尼器（TMD）悬吊在 87 层至 92 层之间，结合核心筒、外框筒一同构成抗侧结构系统，核心筒采用 C80 级别的高强度混凝土搭配型钢材料，外框柱为钢骨混凝土结构样式。该调谐质量阻尼器的调谐频率包括风荷载的主频率（约 0.12 赫兹）和结构的第一阶自振频率（约 0.14 赫兹），通过把阻尼比值调整到 8% 到 10% 之间（普通调谐质量阻尼器的数值约为 5%），完成风致振动响应与地震响应的共同管控：当风荷载施加至结构体时，调谐质量阻尼器（TMD）可输出附加阻尼，用以减弱涡激共振的影响；当遇到地震作用时，调谐质量阻尼器（TMD）会同时吸纳部分地震输入能量，削减主体结构所受损伤。通过风洞试验和地震模拟计算完成优化后，遇到 50 年一遇风荷载工况时，建筑顶层的加速度数值从 0.15g 降到 0.08g，达到人员活动的舒适度要求；当出现 7 度的强地震时，建筑每层之间的最大位移角度不超过 $1/500$ ，比相关规范要求的 $1/400$ 更小。当台风莫拉克产生影响时，建筑顶部的位移偏差数值控制在百分之五以内，TMD 装置的减振效果超过百分之四十，这一情况体现受风与地震共同作用下的结构设计是可行的，能给超高层建筑物的抗风防震相关工作提供有用的参考。

五、总结

本次研究围绕高层房屋建筑所承受的风力荷载、地震施加的外力，展开成系统的对照分析与共同优化研究，得到以下核心论断

（1）对响应差异和控制规则开展量化比对。风荷载多表现为一直的水平来回作用力，易于引起的结构共振和疲劳损坏；地震作用归属于短时的多向宽频激励，在强震条件下易于引起的构件屈服甚至出现坍塌现象。经由实例分析，明确不同高度区间的荷载主导准则。高度在 100m 及以下的建筑，地震引起的作用是主要控制因素；高度处于 100 到 300m 的建筑，需实施风力、地震双重控制类设计；300m 以上的超高型建筑，风力带来的荷载变成主要控制要素。

（2）提供通过多目标遗传算法的风载、震载协同优化策略。建立包括顶点最大位移、层间位移角限值和建筑钢材总用量的多目标函数，融入动态权重系数调控机制，确实消解抗风结构刚度与抗震结构柔度间的固有矛盾，实现建筑结构力学性能和工程成

本的平衡。

(3) 核验优化框架的可用性。真实工程实例表明,该框架达到风荷载顶点位移(1/500)、地震层间位移角(1/250)的规范限定标准后,能使整体钢材耗用量下降约8%,明显提高了结构的抗风防护力和抗震耐久度。

不过本研究依然存留部分局限情况:仅对 II 类场地的情况进行考虑,未包括软土、硬岩这类复杂场地对结构响应的作用;优化算法多围绕于初期的建设费用,未融入全周期的维护与修复成

本效益分析;此外也未开展极端台风和近场脉冲地震同时发生时的耦合效应分析。

后续的研究工作可围绕于三个核心领域:(1)研究超强台风与近距离突发地震的联动作用机制,和结构在复杂作用下的非线性反应特征;(2)开发通过深度学习算法的风洞实验数据快速预测模型,来有效提高多目标优化的计算效率;(3)建立兼顾风致疲劳损伤与地震累积损伤效应的全生命周期韧性设计方案,为超高层建筑的长期安全提供理论支撑。

参考文献

- [1] 肖正直,韦玮,黄诚为,等.复杂地形下超高层双塔建筑风荷载特性研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(01):1-7.
- [2] 王腾飞,邹良浩,孙艳.高层住宅建筑风荷载特性及风致响应[J].土木工程与管理学报,2018,35(04):164-168+198.
- [3] 苏成,黄志坚,刘小璐.高层建筑地震作用计算的时域显式随机模拟法[J].建筑结构学报,2015,36(01):13-22.
- [4] 汪小平,高伦浩,李桅,等.建筑结构地震损伤模型的研究进展[J].四川建筑科学研究,2015,41(04):1-6.
- [5] 李阳阳.风和地震作用下 PC 框架-剪力墙高层隔震结构响应分析[D].兰州理工大学,2021.
- [6] 祝军.风电机组在运行及地震荷载作用下的结构动力响应分析[J].浙江水利水电学院学报,2025,37(01):85-90.
- [7] 冷玉霞.现代高层建筑设计中的风荷载分析与优化设计研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(11):31-33.
- [8] 栾志萌,窦培林,王艳,等.基于 15 MW 单桩式海上风机的调谐质量阻尼器优化设计[J].造船技术,2025,53(04):28-34.
- [9] 谢川东.高强钢框架-自复位钢板剪力墙双重抗侧力体系抗震性能化设计方法研究[D].西安建筑科技大学,2024.
- [10] 庾光忠.建筑隔震橡胶支座性能研究及在普通高层建筑中的应用[D].湖南大学,2014.