

Performance study of wind load on double column towers in series

Lei Zhang¹ Weijuan Wang² Yaguang Yan^{1*}

1. Civil Engineering College, Hebei Polytechnic University, Handan, Hebei, 056000, China

2. Shougang Jingtang Iron and Steel United Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063200, China

Abstract

With the increasing prevalence of super-tall buildings and large-scale public structures in recent years, serial twin-tower column structures have gained popularity due to their high spatial efficiency and visually appealing aesthetics. However, their complex geometric configuration results in intricate wind load responses, influenced by factors such as tower interference effects, pulsating wind pressure, and coupled dynamic responses. Conventional wind load analysis methods for single-tower structures or conventional frame systems are not fully applicable to serial twin-tower column structures. This study investigates wind load responses under various environmental conditions by analyzing distribution characteristics, dynamic response patterns, and design optimization strategies. Key findings include optimized methods for adjusting tower spacing, improving column cross-sectional shapes, regulating tower-column damping, and enhancing auxiliary structural configurations. These insights provide valuable references for designing similar structures.

Keywords

serial double-tower column; wind load performance; pulsating wind pressure; tower interaction; structural optimization

串列双塔柱风荷载性能研究

张磊¹ 王伟娟² 闫亚光^{1*}

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056000

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 中国·河北 唐山 063200

摘要

由于近年来超高层建筑和大尺度公共建筑的日益增多, 串列双塔柱结构由于其空间利用率高、视觉效果佳而获得了人们的青睐。由于其特殊的几何形体, 串列双塔柱结构的风荷载响应比较复杂, 会受到塔间的干扰影响、脉动风压的影响、结构动力响应的耦合作用影响等, 通常的单塔或一般框架的风荷载研究方法并不完全适用串列双塔柱结构。因此, 从串列双塔柱结构风荷载的分布特征、动力响应特点、设计优化措施入手, 对不同风环境下的串列双塔柱结构的风荷载响应进行研究, 并提出了塔间距变化的优化方法、塔柱截面形状优化的方法、塔柱的阻尼调节的方法及辅助结构的优化方法, 为类似结构的设计提供参考和依据。

关键词

串列双塔柱; 风荷载性能; 脉动风压; 塔间干扰; 结构优化

1 引言

双塔柱结构是在城市中的高层和超高层中常见的塔式结构形式, 其特征为两根塔柱并排, 两塔间距一定的结构, 双塔柱塔间采用连廊、附建构件等结构进行连接。与单塔结构相比, 双塔结构更有较高的空间利用率, 能给人以更好的外观效果, 但结构在风荷载作用下的结构响应更具有复杂性

和多样性, 风荷载组成除了平均风压荷载外, 还有脉动风压荷载和由于湍流产生的涡激, 而塔柱间的相互作用又会影响到塔柱附近的风场分布改变, 使结构感受的荷载和振动特征表现出非线性的特点。

2 串列双塔柱风荷载研究的工程价值

2.1 理论指导意义

从理论上, 开展双塔并列结构串列双塔柱的风荷载研究是有必要的。目前风工程理论研究大部分是关于单塔结构风荷载研究, 或者是适用于规则框架的风荷载研究, 例如对单塔结构的平均风压计算研究、结构动力分析研究、涡激响应研究, 而应用于双塔结构塔间并无合适理论可运用。双塔并列形成串列塔柱后, 塔间风荷载的显著特征是对塔间气动

【作者简介】张磊(1999-), 男, 中国山东潍坊人, 硕士, 从事高层结构抗风研究。

【通讯作者】闫亚光(1978-), 男, 中国河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事隧道空气动力学研究。

效应的相互耦合作用,导致双塔的迎风区、塔间区及背风区的风压分布具有非均匀性特征,而且由双塔背风区产生的脉动风荷载与涡激力具有显著的非线性特征^[1]。深入研究串列双塔柱的风荷载特性,可以完善风工程理论的研究内容,有利于丰富多塔结构的风荷载计算模型,对于研究复杂几何条件下的数值仿真方法提供必要的信息,对于提高风荷载计算精度、风工程理论从单塔向多塔结构和非规则建筑物的研究都有促进作用,这都有利于拓展和丰富风工程理论的研究内容。

2.2 工程安全性提升

超高层建筑的风工程计算对增强结构的耐风效果、提高结构安全可靠是非常有意义的。对于“并立”双塔柱体系结构,其塔柱所受风压力作用下易产生较大的塔柱水平位移、连廊结构振动及局部结构的应力集中等问题,对于结构的安全性和可靠性影响很大。基于结构的平均风压分布、脉动风压特性、塔间影响系数,分析“串列”双塔柱结构塔柱所受风激振动幅值、塔柱的共振频率、涡激振动影响幅宽等问题,对结构产生位移幅度,提高塔柱和连廊结构的稳定性具有很强的针对性。基于风工程分析对结构进行优化设计,从而减小塔柱、连廊结构的位移幅度,局部结构应力集中值,结构降低其疲劳破坏率具有显著的效果。

2.3 结构优化与经济性

综上所述,针对结构的经济性,要对结构的性能做优化分析,结构风荷载就是一种优化研究,考虑的因素主要有塔柱截面类型、塔柱间距、设置连廊的结构形式和阻尼系统的配置等,找出各种设计参数对风振响应的贡献关系,对塔柱间距、塔柱的截面类型和连廊的布置结构等的优缺点进行优化设计,合理设置结构阻尼器,降低涡激振动值,减缓结构受到的风振作用。因此,利用风荷载研究数据对于串列双塔柱结构来说,在安全可靠的使用情况下也使结构的成本有一定程度的节省,达到结构的经济性、资源的有效利用。

3 串列双塔柱风荷载分布与动力响应特性分析

3.1 平均风压分布

平均风压分布是判断结构的受力条件及设计风荷载大小的重要指标。与单塔相比,由于双塔的并列布置会导致较大的风场改变,使得各塔柱的不同位置处的平均风压会具有很大的非均匀分布特征,对风压影响最明显的位置一般位于塔体的迎风侧中间部位,而空气回流和风速减小会在塔间处形成负压区或是出现局部回流区,致使塔柱外侧的风压分布特征不对称。其大小不仅取决于塔体的相对位置和距离,同时也取决于塔柱的高度以及塔顶至地面的风速变化。设计时若忽略塔间的耦合作用,仅根据单塔经验很容易产生塔间区域结构受力不足或安全裕度不足。

3.2 脉动风压与涡激效应

结构的平均风荷载作用、结构对脉动风的反应是影响

塔柱间结构响应的主要原因,脉动风主要是由风的湍流特征与塔柱的表面风—结构的相互作用而引起,其瞬时性的波动不仅叠加在风压之上,还会引起塔柱结构的高频振动;涡激力是塔柱尾流脉动风流场中的涡旋规律作用于迎风面而形成的涡旋,并导致结构出现有规律的周期横向振动^[2]。当双塔柱组合结构塔柱间距、高度、质量等参数不同时,由于塔间气动干扰的影响会使涡旋形成和分布的规律发生改变,可能会产生塔间的局部分组共振现象,从而使塔柱的横向振动幅值增加,尤其是风频与塔柱结构自振频率接近时涡激响应更为强烈,脉动风压力与涡激力的耦合作用会使得结构受力较为复杂,从而使其横向位移、连廊振动、附属结构所受力也会发生变化。

3.3 塔间干扰效应

互涡干扰作用是串塔结构在风力作用下最明显的动力行为特征,它会影响塔柱的受力和结构的动态效应。两侧塔柱通过风相互作用使风场在塔柱间重新分布,在塔柱迎风面可能出现负压增强以及尾流涡量增大形成局部压力峰值或涡激振动集中效应。塔间距小则干扰作用强,塔柱在迎风面的风压和在背风面的尾流涡量增大,塔结构受力更加复杂化,塔结构振幅增大,局部结构会出现疲劳、振动甚至共振的危险。塔间距大则干扰作用小,分布较为均匀但占用面积增加,材料费用也增加。

4 串列双塔柱结构风荷载性能优化策略

4.1 塔间距优化

塔间距是串列双塔结构风荷载性能优化的重要控制因素之一,不合理将会造成塔间气动干扰较大、风压分布不均匀、结构动力响应较大等诸多问题。塔间距过小将造成迎风区域流速低、塔间形成回流区及负压区,塔后涡旋强度提升,随之增强涡激振动幅值,引起塔柱横向位移增大,局部结构应力过大,影响到连廊和附属结构稳定性,甚至造成连廊及附属结构疲劳破坏;另一方面塔间距过小将导致塔柱在大风作用下出现不协调振动,进一步加剧结构动力响应问题。塔间距过大有助于削弱扰动效应对塔柱受力均匀性,但是会造成建筑面积及材料浪费较大、塔间距过大对周边建筑功能布局也有一定影响。因此塔间距的优化需要保证安全性、经济性与适用性的最佳结合,需要基于准确的数值模拟与风洞试验模拟对不同塔间距下的平均风压及脉动风压幅值和涡激响应进行比较,确定塔间距对结构振动、塔体涡激频率响应及位移幅值的影响,最后结合参数化分析确定出最优的塔间距范围,保证结构在不同风向、不同风速条件下具有较好的稳定性和舒适性。

4.2 截面形状优化

塔柱截面形状是串列双塔柱结构风荷载性能优化最直接影响结构受力的重要设计参数,它直接影响结构受风作用下的风向压力分布、涡激幅值和结构的振动动力响应。矩形

或方形截面形状在强风作用时容易产生脉动风压的局部集中和尾流漩涡,导致横向最大位移幅值增大、局部应力的不均匀,增大塔柱和连廊的疲劳破坏风险。为减小结构抗风性能恶化效应,对截面采用圆形、椭圆形、倒角、流线型等,此类截面可有效改变其迎风流动,使风压在结构受风面上分布均匀,减轻尾流漩涡强度及涡激力效应,从而减小结构横向位移和振动幅值^[3]。塔柱截面优化设计要结合塔高、塔间气动干扰效应、风速风向剖面与变化规律,通过高精度数值模拟和风洞实验分析评估各类塔柱截面风致平均风压及脉动风压幅值,以及塔柱的涡激响应规律和参数变化规律,并最终得到最佳的塔柱截面设计。塔柱截面优化设计除了满足上述风荷载效应、施工应用及经济等方面的要求外,还要注意截面形状对塔柱结构重力、结构材料和施工便利的要求,使塔柱在满足抗风的前提下实现结构的经济合理性。塔柱最优化的截面形状能更有效地降低塔柱风致振动位移幅值,且能均衡受力,为塔柱结构阻尼系统的合理设计奠定较好的动力基础,从而优化了串联双塔柱结构的结构安全、结构舒适和经济效益,并为后续连廊结构和附属结构的布置设计预留了设计灵活性和优化空间。

4.3 阻尼调控

阻尼控制是串联双塔柱结构风响应设计中的关键技术之一,其主要功能是控制塔柱涡振现象、降低塔柱振动幅度及改善塔柱结构损伤强度等;串联双塔柱结构之间由于塔间气动干扰的存在,塔柱受力规律呈现出较强的非线性,仅仅通过调整塔间间距和塔柱横截面的尺寸不能完全消除塔柱结构的涡振现象,因此,有必要对塔柱结构进行阻尼布置设计,具体阻尼形式有被动阻尼、调振质量阻尼器(TMD)和主动控制阻尼装置,可用于不同频率区段、不同振动模态,对其进行有效的抑制;塔柱阻尼布置需考虑塔柱结构高度、截面形式、塔间气动干扰特性及风激励等,合理阻尼器位置和大小选择能使结构达到合理的塔柱结构阻尼,塔柱结构最大振动区段的涡激频率段能够达到有效的控制功能,从而结构在主要涡激频率区段能够获得最大的耗能作用,减小结构在振动方向上的位移幅度和涡激响应的幅值,减小结构连廊及附属建筑的振动影响;其次,效率高且长效的阻尼器需考虑成本低、施工安装便捷性及保养维护便捷等综合考虑,使得塔柱结构能长期、可靠的运行使用。基于串联塔柱结构在风作用下的动力响应特点进行合理阻尼布置,可改善、减少结构在极限风区段的破坏现象,降低塔柱结构的涡激共振影

响,使得塔柱结构的安全和舒适度提高。

4.4 连廊及附属结构优化

对于串联双塔柱结构建筑,其在形式及功能上都需要借助连廊及附属结构来实现连接,而连廊及附属结构不仅对双塔柱结构的整体风荷载分布以及结构的动力响应具有影响,其不同的截面形状、不同的开孔形式、不同的开孔位置、不同的开孔高度及截面刚度都对塔间气流流动的影响。这样将会导致塔间流动出现某些阻力较大的局部位置,使得塔间气流通道出现堵塞,或者诱发塔间气流绕射,导致局部集中风压升高,从而易造成塔柱以及附属结构的偏心受压、横向振幅幅值较大。为了实现对双塔柱结构建筑合理有效的风荷载优化控制,必须合理优化塔间连廊及附属结构的设计形式,以便最终能够在满足实际功能需求的基础上,通过优化塔间连廊及附属结构的设计形式,将塔间风流动阻力降至最低,尽量避免塔间流场形成塔间涡流及塔间脉动风的影响,避免出现较大的集中力矩影响塔柱及附属结构的稳定性。塔间气流流动的变化影响和塔间流场分布的变化会引发塔柱及附属结构结构内力重新分布和变化,亦会影响到双塔柱结构建筑的舒适性与抗风安全性,因此连廊及附属结构的布置设计是双塔柱建筑连廊及附属结构优化设计的主要课题。

5 结语

并列双塔结构的水平排列位置和较高的相对高度使得其风荷载特性相对于普通超高层单塔结构更加复杂并且是特殊和独特的,是双塔结构在大尺度空间轴力、涡激以及塔间干扰和脉动风荷载作用下风动力作用的直接结果。把握平均风压的分布规律以及脉动风压和塔间干扰因素是结构设计的基础和关键,合理布置塔间距、截面形状、阻尼以及连廊也是改善结构安全性和经济性的必备工作。后续探索可结合更高精确度的非结构分析和智能控制,对于超高层并列双塔结构的风荷载准确预测以及积极主动控制都是现实而必要的手段,以期保障超高层建筑物的安全和可持续。

参考文献

- [1] 晏华健,孙诗兵,李文浩,金晓冬.风荷载窄腔室薄型中空玻璃应力应变行为模拟与实验研究[J].硅酸盐通报,2025,44(6):2320-2327.
- [2] 常柱刚,魏标,蒋丽忠,李红利.中承连续飞燕式钢桁拱桥抗风性能研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(5):1898-1908.
- [3] 陈振华,向活跃,郭玉佳.不规则截面双柱式桥塔抗风性能研究[J].河北水利电力学院学报,2023,33(2):28-33.