建筑结构风致振动响应分析与控制策略

李人君
中承文和建设集团有限公司　江西南昌　330000

摘　要：随着高层建筑和超高层建筑的不断涌现，风致振动问题已成为影响建筑结构安全和使用功能的重要因素。本文首先介绍了风致振动的基本概念和影响因素，然后详细分析了建筑结构在风荷载作用下的振动响应特性。在此基础上，探讨了多种有效的风致振动控制策略，包括被动控制、主动控制和半主动控制等方法，并对它们的优缺点进行了比较。最后，提出了在实际工程中选择合适控制策略的建议。

关键词：风致振动；振动响应；振动控制；高层建筑

引言

随着城市化进程的加快，高层和超高层建筑在城市中越来越普遍。这些结构在设计和施工过程中，不仅要考虑其承载力和稳定性，还要充分考虑风荷载对建筑结构的影响。风致振动是高层建筑在风荷载作用下产生的一种动态响应，它不仅影响建筑的正常使用，还可能对结构安全造成威胁。因此，对建筑结构风致振动响应进行分析，并采取有效的控制策略，是现代高层建筑设计中不可或缺的一部分。

一、建筑结构风致振动响应机理与分析方法

（一）风荷载特性及其对结构的作用机理

风荷载是作用在建筑结构上的重要外部荷载，其特性复杂且对结构影响显著。风荷载通常包含平均风压和脉动风荷载两个主要成分。平均风压相对稳定，作用在结构上会产生一个持续性的静力效应，导致结构整体或局部产生静力位移。例如，高层建筑在平均风压作用下会发生一定程度的侧向倾斜。而脉动风荷载则是一种随机变化的动力荷载，其强度和方向随时间快速波动。这种脉动成分会引起结构的动力响应，包括结构的振动、加速度变化等。当脉动风荷载的频率与结构的自振频率接近或一致时，还可能引发结构的共振，导致振动幅度显著增大。典型的风致振动现象包括涡激振动和颤振。涡激振动是由于气流绕过结构物时，在结构物背风面周期性脱落涡旋，这些涡旋产生交替变化的横向力，驱使结构发生周期性振动。这种现象的发生与结构的外形、尺寸以及风速有关，通常在特定的风速范围内出现。颤振则是一种更为复杂的气动弹性不稳定现象，涉及结构自身的振动与气动力之间的强烈耦合作用，可能迅速导致结构破坏[1]。

（二）结构动力特性与风致振动响应关系

结构自身的动力特性，即其质量分布、刚度大小和阻尼特性，是决定结构对风荷载响应程度和形式的关键因素。结构的质量越大，在相同风荷载作用下，其加速度响应通常越小，但惯性力可能越大。结构的刚度则直接影响其自振频率和变形能力，刚度较大的结构自振频率较高，通常不易与低频的风荷载脉动成分发生共振，产生的位移也相对较小；而刚度较小的柔性结构，自振频率较低，更容易与风荷载发生耦合，产生较大的位移和振动。阻尼是结构吸收和耗散振动能量的能力，阻尼越大，结构振动衰减越快，振幅也相对较小，有助于减轻风致振动的危害。理解这些动力特性如何影响响应，需要借助模态分析。

（三）风致振动响应的主要分析方法

为了准确预测和评估建筑结构的风致振动响应，研究者们发展了多种分析方法。理论分析方法通常基于结构动力学和空气动力学的基本原理，通过建立简化的数学模型来描述结构在风荷载作用下的行为。例如，对于某些规则结构，可以采用集中质量模型或连续体模型，结合经验或半经验的风荷载公式，推导出结构位移或内力的解析表达式或近似解。数值模拟方法是现代工程中广泛采用的技术。其中，有限元法（FEM）能够精细地模拟结构的几何形状和材料特性，计算出结构的动力特性。计算流体动力学（CFD）则用于模拟风流经结构周围的复杂流动场，预测作用在结构表面的风压分布和气动力。将FEM与CFD结合，可以对结构–流体相互作用进行更全面的模拟，预测结构的风致振动响应。此外，风工程领域也发展了基于实测风谱和结构动力特性的谱

分析方法，通过数值积分求解运动方程来预测结构的随机振动响应。实验研究方法，特别是风洞试验，是验证理论分析和数值模拟结果的重要手段[2]。

二、建筑结构风致振动的主要控制策略

（一）被动控制策略

被动控制策略是建筑结构风致振动控制中应用较早且广泛的一类方法。常见的被动控制装置包括调谐质量阻尼器（TMD）、调谐液体阻尼器（TLD）、黏滞阻尼器以及阻尼墙等。这些装置的工作原理主要是通过向结构中附加额外的质量、刚度或阻尼元件，来改变结构的整体动力特性，例如调整结构的自振频率，使其远离风荷载的卓越频率，从而避免共振；或者直接吸收和耗散结构在风振过程中产生的振动能量，将其转化为其他形式的能量（如热能）散失掉，以此来减小结构的振动幅度和加速度响应。被动控制装置的主要优势在于其结构相对简单，不需要外部能源供应，因此在运行过程中维护工作量较小，可靠性较高。然而，被动控制也存在明显的局限性，其控制参数（如质量、刚度、阻尼值）在设计时是固定不变的，这使得它们对于风特性变化或结构自身动力特性发生改变（如结构损伤、附加荷载变化）的适应性较差，可能无法在整个风速范围或结构服役期内都保持最优的控制效果。

（二）主动控制策略

主动控制策略则代表了风致振动控制技术中的更高层次。其基本原理是，通过安装在结构上的传感器实时监测结构的振动状态，如位移、速度或加速度，并将这些信号传输给控制系统。控制系统根据预设的控制算法，迅速计算出需要施加的控制力，然后驱动作动器产生一个与结构振动方向相反的力，施加到结构上，以此来抵消或抑制风振引起的结构响应。常见的主动控制装置有主动质量阻尼器（AMD）和主动拉索系统等。主动控制的优势在于其响应速度快，能够根据实时的结构状态精确地施加控制力，对于抑制突发性或频率变化的风振效果较好。但是，主动控制系统的劣势也十分明显。它完全依赖于外部能源来驱动作动器，需要复杂的传感器网络来感知结构状态，以及高性能的控制计算机来处理信息和发出指令，这导致其初始成本高，系统结构复杂，且对能源供应、传感器精度和作动器可靠性要求很高，维护也相对复杂[3]。

（三）半主动与混合控制策略

半主动控制策略是介于被动控制和主动控制之间的一种折衷方案。它不直接产生外部能源驱动的控制力，而是通过消耗相对较少能量的方式，如动态地改变系统自身的阻尼特性或局部刚度，来调整控制装置的工作状态，从而适应结构响应或外部激励的变化，达到优化控制效果的目的。智能材料，例如磁流变阻尼器，是半主动控制中极具应用潜力的技术。这类阻尼器内部的流体粘度可以通过施加变化的电场或磁场来快速调节，从而改变阻尼器的阻尼力，实现对外部激励的快速响应和适应。混合控制策略则是综合运用被动控制和主动控制的优点而设计的一种复合控制方法。其基本思路是根据结构所处的不同工作状态或外部环境条件，灵活地切换或组合使用不同的控制方式。

三、控制策略对风致振动响应的影响与实现考量

（一）控制策略对响应的影响分析

不同的风致振动控制策略对建筑结构的关键响应指标，如位移、加速度以及长期累积的疲劳损伤，会产生程度和特点各异的影响。被动控制装置，如TMD或阻尼器，主要通过增加结构的有效阻尼或调整局部刚度，来直接减小特定频率下的振动幅值，尤其对减小顶点位移和层间位移有明显效果，同时也能降低结构的加速度响应，从而提升居住者的舒适度。然而，其对宽频带激励或频率变化的适应性有限。主动控制系统能够根据实时监测的振动状态，精确地施加反向控制力，因此不仅能在较大范围内有效抑制位移和加速度，对于抑制突发性、非周期性的风致扰动也更为有效。半主动控制策略则结合了两者的特点，通过智能调节自身的阻尼或刚度参数，能在一定程度上适应风荷载的变化，对位移和加速度的控制效果介于被动和主动之间，但通常能耗较低。混合控制策略旨在综合不同控制方式的优点，例如在常规风况下利用被动装置维持基本稳定性，而在强风或接近共振时启动主动控制力进行强化抑制，以期在保证控制效果的同时兼顾经济性和可靠性。这些控制策略的实施，本质上是通过改变结构的动力特性来实现的。例如，增加阻尼会提高结构的阻尼比，使得振动能量更快地被耗散，衰减速度加快；调整质量或刚度则可能改变结构的固有频率，使其避开风荷载的主要能量频段，从而避免共振的发生或减轻其影响。这些动力特性的改变直接决定了结构在风荷载作用下的振动形态和响应水平[4]。

（二）控制策略的选型与优化

选择何种风致振动控制策略是一个需要综合考量的过程。决策者必须详细分析结构本身的特性，包括其类型（如框架、剪力墙、筒体结构）、高度、平面和立面外

形（这些因素直接影响风荷载的大小和分布）、以及结构的关键性能指标。同时，结构所处的具体风环境，如场地风速、风向分布、周围建筑物的干扰效应等，也是重要的输入参数。明确控制目标同样关键，是需要优先保障结构的安全极限状态，还是更侧重于提高使用者的舒适度水平。经济性是现实约束，包括控制系统的初始投资、安装费用以及长期的运行和维护成本。系统的可靠性，即在结构整个设计使用年限内稳定有效工作的能力，也是必须重点考虑的因素。在选定控制策略后，控制参数的优化是确保其效能发挥的关键环节。对于被动控制装置，如TMD，需要通过理论计算或数值模拟，优化其质量块与主结构质量的比例（质量比）、调谐频率与结构自振频率的比值（频率比）以及内部阻尼器的阻尼比，以达到最佳的减振效果。对于主动控制系统，则涉及控制算法的选择与参数整定，例如线性二次调节器（LQR）或H∞控制算法中，需要确定状态变量的权重矩阵或优化鲁棒性能指标，使控制力既能有效抑制振动，又不过度消耗能量或对结构产生不利影响。

（三）控制策略的实施挑战与注意事项

尽管风致振动控制策略在理论上能有效解决问题，但在实际的工程实践中，其成功实施会面临一系列挑战。设计阶段就需要进行复杂的计算和分析，不仅要精确预测风致响应，还要精确设计控制装置本身及其与主体结构的连接方式。施工安装过程可能因为控制装置的尺寸、重量或对安装精度的要求而变得困难，需要特殊的工装和严格的工序控制。成本控制始终是一个敏感问题，高性能的控制装置和复杂的监测、控制系统往往价格不菲。控制系统的长期可靠运行也依赖于定期的检查、维护和必要的更换，这构成了持续的成本投入。此外，控制系统的运行，特别是主动控制系统，可能会产生额外的能耗，而某些装置（如拉索的调整）在操作时也可能产生噪音，这些都是需要评估的环境影响。因此，在应用控制策略时，必须强调其不能脱离于结构整体的设计、施工和后续的运维管理过程。控制策略应作为结构体系的一部分，在概念设计阶段就被纳入考虑，与主体结构协同设计，确保其安装空间、连接节点的可行性。在施工阶段，需要制定专项的安装方案和质量控制措施。在结构投入使用的整个运营期间，控制系统的运行状态需要被纳入常规的监测和维护计划中，确保其持续有效地发挥作用，保障结构的安全和适用性[5]。

结语

建筑结构风致振动响应分析与控制策略是现代高层建筑设计关键研究领域。研究风荷载与结构动力特性、运用多种分析方法，可掌握建筑结构风致振动响应。不同控制策略如被动、主动、半主动与混合控制各有优劣，为振动控制提供多种选择。不过，该领域仍待完善。风荷载特性方面，虽对平均风压和脉动风荷载有一定认识，但因大气环境复杂，精确预测风荷载仍有挑战，复杂地形和不同气候下的风荷载变化规律需深入研究。控制策略选型与实施上，缺乏高效系统方法来根据具体工程选最优策略，其长期可靠性和稳定性也需更多实践验证，如主动控制装置设备性能受环境影响会影响控制效果。未来研究可多学科交叉融合，结合流体力学等多学科知识，开发先进风荷载预测模型和高精度分析方法，研发新型智能材料和控制装置提高适应性与可靠性，如用纳米材料和智能传感器开发自适应控制装置。此外，加强实际工程案例监测分析很重要，通过长期监测收集风致振动数据，验证改进现有方法策略，建立工程案例数据库供后续参考。总之，该研究对保障高层建筑安全使用意义重大，需深入研究解决问题，推动领域发展，为高层建筑建设提供技术支持。

参考文献

[1]郑庆星.超高层建筑风致振动响应与结构动力特性实测研究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术，2021（11）：3.

[2]吴红华，谢尚钊，李正农，等.某高层建筑结构风致扭转响应特性研究[J].地震工程与工程振动，2020，40（5）：13.DOI：10.13197/j.eeev.2020.05.61.wuhh.007.

[3]智国梁，张成，赵不移，等.膜结构风致振动响应的数值分析[J].山西建筑，2019，45（14）：2.DOI：10.3969/j.issn.1009-6825.2019.14.026.

[4]张成，赵一聪，智国梁，等.不同风向角对膜结构风致振动响应的影响分析[J].山西建筑，2019，45（11）：2.DOI：10.3969/j.issn.1009-6825.2019.11.029.

[5]符天民.高层结构风致响应的实测与可视化研究[D].湖南大学，2021.