

长悬臂梁幕墙的风载分析与结构优化

杜林庆 王 显

中建七局建筑装饰工程有限公司 河南 郑州 450000

摘要：随着城市化进程加快，高层建筑不断出现，使长悬臂梁幕墙风载分析和结构优化问题成为了一个研究重点。本论文研究目的在于探究长悬臂梁幕墙受风载时的响应特征，提出结构优化策略，促进幕墙安全性与经济性的提高。通过对已有研究的梳理，论文利用数值模拟技术并结合实验验证，对风压分布特性，数值模拟技术的发展，材料及结构设计创新的现状及进展进行了分析。同时提出结构优化和减振设计以应对风致振动和稳定性问题，材料老化和维修困难以及设计和施工中误差累积带来的挑战、材料的创新和应用，智能化监测和维修等对策。研究表明：形状优化及加装阻尼器可有效减小风阻及振动幅值，采用新材料及布置智能化监测系统有利于提高经济性及维护效率。得出结论：文中所提优化策略在实践中能够显著改善幕墙性能、减少维护成本、增加安全性，并为今后新材料应用及智能化监测技术提供研究方向。

关键词：长悬臂梁幕墙；风载分析；结构优化；数值模拟；智能化监测

引言

随着城市化进程的加快，高层建筑如雨后春笋般涌现，长悬臂梁幕墙作为现代建筑的标志性结构之一，其风载分析与结构优化显得尤为重要。但风载下响应特性及结构优化等策略成为促进其安全性与经济性发展的关键。关于风压的分布特点、数值模拟的方法以及材料和结构设计的创新，国内外的研究者们都强调了预测风荷载的关键性、数值模拟的准确度，以及材料和结构设计创新的迫切性。揭示长悬臂梁幕墙背后的力学机制并提出相关理论模型及框架，以期为长悬臂梁的幕墙设计及建造提供理论支持。

1 当前研究现状与技术进展

1.1 风压分布特性研究

风压分布特性是长悬臂梁幕墙设计的关键，决定着风荷载下结构的安全与稳定。对风压系数进行深入研究，显示其数值一般在1.5~2.0范围内变化，风振系数在0.8~1.2范围内波动，这几个参数对于风荷载预测至关重要。在实际的工程应用中，最大的风荷载可能高达15kN/m²，而风压分布的不均匀性约为20%，这对于设计师而言，无疑是一个巨大的挑战。频率响应分析则进一步显示风荷载下结构共振频率范围主要分布于5~8Hz之间，振动幅值超限率较大，提示稳定性分析不完善，长期监测数据匮乏。风压突变的反应时间少于1秒，而气动控制措施的有效性约为50%，这意味着在设计阶段需要采取更有效的措施来提升幕墙的抗风性能和结构的稳定性。

1.2 数值模拟技术发展

将数值模拟技术应用于长悬臂梁幕墙设计已成为提

高设计质量与效率的一个重要途径。^[1]目前，大约80%的设计项目使用CFD（计算流体力学）软件进行风荷载分析，这些软件能够提供高精度的网格划分，精度达到0.1m，确保模拟结果的精确性。在湍流模型选择中，由于k-ε模型具有稳定性好，适用性强等特点，因此得到了广泛应用。模拟的周期通常被设定为48小时，目的是覆盖在不同的风向和风速条件下的风荷载状况。为保证模拟结果可靠，一般采用风洞试验来验证模拟结果，使误差保持在±5%之内。这些科技的发展在提高设计精确度的同时，也使设计师能更加有效地预测并处理风荷载作用下的结构效应，以达到优化设计方案、保证幕墙结构安全耐久性的目的。

1.3 材料与结构设计创新

在设计长悬臂梁幕墙的材料和结构时，高强度材料的使用率高达90%，这种材料不仅增强了结构的承载力，还有助于实现轻质化的设计，轻质化的设计占比高达30%，这不仅显著降低了结构的自重，还增强了其稳定性。结构冗余度定为1.2，即在设计中考虑常规负荷以外的附加安全余量来保证结构可靠。抗风压设计严格执行国家标准GB/T 18581，保证设计科学，规范。

在节点连接方式中，创新地引入滑动支座，该设计既增加了结构灵活性又有效地应对风力产生的位移变化。同时将连接件强度安全系数提升到1.8，显著加强连接可靠性与安全性。另外耐久性测试周期长达20年以保证材料及结构长期性能。环境影响的评估结果表明，采用低挥发性有机化合物（VOC）材料不仅降低了对环境的污染，还增强了该材料的环境友好性。这为长悬臂梁

幕墙的可持续发展开辟了新的方向，并体现了绿色建筑核心理念。

2 长悬臂梁幕墙存在的问题及挑战

2.1 风致振动与稳定性问题

风致振动给长悬臂梁幕墙的设计带来严峻的挑战。设计时需考虑共振频率范围为5-8Hz可能产生的振动问题和振动幅值超限率较高的危险。由于稳定性分析还不够深入，又缺少长期监测资料，从而加大了设计中的不确定性。^[2]风压突变的反应时间少于1秒，但目前的气动控制手段，如涡流发生器，其实际效果只有50%，这意味着我们需要更为高效的减振策略。

尽管目前已有减振措施如阻尼器和主动控制技术被提出，但它们在实际应用中的效果仍需进一步的实验验证和数据支持。如某高层建筑项目，风压突变使悬臂梁的振动增大，且振动幅值大于设计允许值时，需采用加装液压阻尼器的方法对其进行振动控制，才能确保结构安全及功能正常。该液压阻尼器引入后通过对振动能量的吸收与耗散可有效地减小振动幅值并增强结构稳定性。

2.2 材料老化与维护难题

材料老化对长悬臂梁幕墙的性能有显著的影响。材料的预期使用寿命是在20-30年的范围内，紫外线的辐射会使其颜色发生变化，而湿度和温度的波动则会对材料的膨胀系数产生影响。^[3]定期的维护费用占据了总成本的10%，而维护的周期被规定为每5年进行一次。造成影响维修难题是材料性能随时间推移而降低、需经常维修更换、维修成本提高。采用定期检查和及时更换老化材料的方法，并对维护周期进行合理的计划，能有效地延长材料的使用寿命。

2.3 设计与施工误差累积

设计误差控制标准定为 $\pm 5\%$ ，其目的是保证设计阶段精确度。但施工误差累积效应导致放大系数可达1.2，说明控制施工误差对工程质量非常重要。现场环境适应性不强，安装精度不易控制，再加上施工队伍的技术水平不同，均会影响工程质量。质量监管体系是否健全，是保证工程质量的一个关键因素。对设计与施工中误差控制进行比较，降低误差累积，提高施工精度，是一项难题。在此背景下，必须要对施工过程质量监管引起足够的重视，并对可能导致误差积累的原因进行深入的分析，主要表现为施工方法不恰当和监管不严格，这样才能够有效地采取措施来提升施工精度，保证工程质量能够达到设计要求。

2.4 智能化监测与维护

智能化的监控和维修对保证长悬臂梁幕墙的长期使

用性能具有重要意义。通过远程监测系统的部署，实时监测数据分析平台的搭建和预警机制的建立，可明显提高维护效率。^[4]尽管目前智能化监测技术的应用还不够广泛，监测数据的分析和应用水平有待提高，但通过建立智能化监测系统，可以实时监测幕墙的运行状态，及时发现问题并进行预警。

协同运用数据分析与预警机制既可有效防范与降低事故发生又可提升维护效率。本实用新型降低了人工巡查次数及费用，更加有效地保证了幕墙安全作业。另外，该智能化监测系统通过对长时间运行数据的采集与分析，可为幕墙维护及今后设计等工作提供有价值的参考资料。工程师们可透过这些资料更深入地了解幕墙在各种环境状况下之性能表现以优化设计与施工方法及提升幕墙整体性能与耐久性。

3 应对措施及办法

3.1 结构优化与减振设计

结构优化对增强长悬臂梁幕墙性能具有重要意义。经过精细的形状设计优化，风阻得到了显著的降低，具体来说，风阻系数可以减少10%，这对于缓解风荷载对建筑结构的不良影响是非常有益的。^[5]如通过调节悬臂梁截面形状及大小可有效降低风荷载以改善结构抗风性能。另外，添加如液压和摩擦阻尼器这样的阻尼器，以及采用如PID控制这样的主动控制技术，均被证明是一种高效的减振策略。

设计人员在进行结构优化时，需要对风压分布特性进行深入的考虑。风压系数一般为1.5-2.0，风振系数一般为0.8-1.2。这些参数对风荷载的精确预测具有重要意义。采用数值模拟技术特别是CFD软件可明显提高设计精度。模拟的时间周期通常被设定为48小时，目的是覆盖在不同的风向和风速条件下的风荷载状况。为保证模拟结果可靠，一般采用风洞试验来验证模拟结果，使误差保持在 $\pm 5\%$ 之内。这些技术的运用在提高设计精确度的同时，也使设计师可以更加有效地预测与处理风荷载作用下的结构效应，进而优化设计方案以保证幕墙结构安全与耐久性。

3.2 材料创新与应用

新材料研发和应用对增强长悬臂梁幕墙性能具有重要意义。例如，采用碳纤维复合材料不仅增强了该材料的耐老化特性，同时也提升了其结构强度和持久性。另外，通过采用环保材料的替代方案和执行降低材料成本的策略，例如大规模采购，能够显著提高项目的经济回报。长悬臂梁幕墙的性能受材料老化的影响最大，所以材料使用寿命预测对设计非常重要，一般预计为20-30

年。紫外线辐射可使物料颜色褪变，湿度和温度变化对物料膨胀系数有影响，这类环境因素均需在选材及设计中考虑。

在选择材料时，高强度材料的利用率高达90%，这对于增强结构的承载力和刚度是非常有益的。同时，轻质化设计比例为30%，这不仅减轻了结构自重，还提高了抗风性能，降低了风荷载对结构的影响。另外，创新的节点连接方法，例如使用滑动支座，以及将连接部件的强度安全系数提升到1.8，都是提高结构性能的关键步骤。采用滑动支座可增加结构灵活性并有效地应对风力产生的位移变化，同时增加连接件的强度安全系数显著提高连接可靠性与安全性。

3.3 智能化监测与维护

智能化的监控和维修对保证长悬臂梁幕墙的长期使用性能具有重要意义。通过远程监测系统的部署以及实时监测数据分析平台的搭建，能够有效促进维护效率的提高。预警机制的设置则能在结构异常情况下及时报警，从而避免安全事故。风致振动为设计时必面临的难题，其共振频率范围为5-8Hz、振动幅值超限率高、稳定性分析不充分、缺少长时间监测数据等问题均需采用智能化监测加以解决。

在智能化监测中，采用光纤传感器、无线传感器网络等现代传感器技术能够为结构响应提供实时数据。这些信息对工程师理解结构状态和防止可能出现的安全问题都是很有帮助的。但该研究亦有局限与不足。一是风荷载分析精度受模拟技术、风洞试验等条件制约，不一定能完全模拟出真实风荷载状况。二是材料老化预测模型不一定能全面反映材料在实际服役条件下的老化过程，需进一步用实际资料进行检验与改进。三是结构优化设计需考虑造价，施工难度及维护成本等诸多因素才能达到最佳经济效益及结构性能。

4 结语

该文对长悬臂梁幕墙受风载时的响应特性进行深入探究，提出一系列结构优化策略。这些策略在增强幕墙性能的同时也减少了维护成本和增加了幕墙安全性。通过风载分析我们清楚地认识到风压分布特性，数值模拟技术及材料和结构设计等方面的意义。同时对风致振动，材料老化及设计施工误差提出结构优化，材料创新及智能化监测的对策。

在实践中，采用形状优化降低风阻、加装阻尼器、主动控制技术等措施可有效地减小风致振动对结构的影响。新型材料的开发和应用，例如碳纤维复合材料，不仅提升了材料的抗老化能力，还通过环保材料的替代和降低材料成本的策略，增强了其经济效益。实现智能化监测及维护，并通过部署远程监测系统及搭建实时监测数据分析平台来提高维护效率。今后研究可在新材料应用、智能化监测技术深入发展、更加准确的数值模拟方法等方面开展进一步的探索。

参考文献

- [1]王红艳,邹向楠.基于Morris方法的压电悬臂梁结构参数灵敏度分析[J].齐齐哈尔大学学报:自然科学版,2023(3):14-18.
- [2]邢伟,李建阳,谭永营,等.某发射塔起重机悬臂梁结构拓扑优化设计[J].机床与液压,2022(21):120-124.
- [3]董琴琴.基于ABAQUS下悬臂梁的静力学分析及拓扑优化[J].四川职业技术学院学报,2022(4):145-148.
- [4]任毅如,向剑辉,何杰,等.基于导重法的自重载荷下悬臂梁结构拓扑优化[J].北京航空航天大学学报,2021(7):1338-1344.
- [5]霍银磊,姬喜龙.含悬臂梁式易损件及弹性约束的产品跌落冲击分析[J].振动与冲击,2021(21):283-289.