

建筑结构振动检测与动力学特性分析

郑林恒

浙江天禾建筑设计研究院有限公司 浙江 舟山 316000

摘要：建筑结构振动检测与动力学特性分析是确保建筑安全、评估结构性能的重要手段。本文综述了建筑结构振动检测的基本原理与方法，以及动力学特性的分析方法，并探讨了这些技术在建筑结构健康监测、抗震性能评估及优化设计中的应用。通过深入研究和实例分析，本文旨在为建筑结构的安全评估与维护提供科学依据和技术支持。

关键词：建筑结构；振动检测；动力学特性；健康监测；抗震性能

引言：随着城市化进程的加速，建筑结构的稳定性和安全性成为社会关注的焦点。振动检测与动力学特性分析作为评估建筑结构性能的关键技术，对于识别结构潜在损伤、评估抗震性能及优化结构设计具有重要意义。本文旨在系统阐述建筑结构振动检测与动力学特性分析的目的、原理、方法及其应用，以期对相关领域的研究和实践提供参考。

1 建筑结构振动检测与动力学特性分析的目的

1.1 识别结构中的潜在损伤

建筑结构在使用过程中，由于环境因素（如风化、腐蚀）、荷载作用（如重力、风力、地震）以及材料老化等原因，可能会产生裂纹、变形等潜在损伤。这些损伤如果不及时发现和处理，可能会逐渐累积，最终导致结构失稳或倒塌。振动检测作为一种非破坏性检测技术，能够通过对结构施加激励并测量其响应，来识别结构中的潜在损伤。通过对比结构在不同状态下的振动特性（如频率、阻尼、模态形状等）的变化，可以判断结构是否存在损伤，以及损伤的位置和程度。这对于及早发现和处理结构问题，防止事故发生具有重要意义。

1.2 评估结构的整体稳定性

建筑结构的整体稳定性是其安全性的重要体现。振动检测与动力学特性分析通过对结构在动态荷载下的响应进行分析，可以获取结构在自然频率、阻尼比等动力学参数上的表现。这些参数能够反映结构的刚度、阻尼等力学特性，从而评估结构的整体稳定性。例如，自然频率的降低可能意味着结构刚度的下降，而阻尼比的增加可能表明结构存在能量耗散的问题。通过对这些参数的监测和分析，可以及时发现结构稳定性的变化趋势，为结构的维护和管理提供依据。

1.3 评估结构的抗震性能

地震是建筑结构面临的主要自然灾害之一。振动检测与动力学特性分析在评估结构的抗震性能方面发挥着

重要作用。通过对结构在模拟地震荷载下的振动响应进行分析，可以了解结构在地震作用下的动力行为，包括结构的变形模式、加速度响应、能量耗散等。这些数据对于评估结构的抗震能力、识别抗震薄弱环节以及制定抗震加固措施至关重要。此外，通过振动检测还可以对结构的隔震、减震装置进行性能评估，确保其在地震发生时能够有效发挥作用。

1.4 为结构维护计划提供依据

建筑结构振动检测与动力学特性分析的结果不仅为结构的安全评估提供了重要依据，还为结构的维护计划制定提供了指导。通过对结构振动特性的长期监测和分析，可以建立结构健康状况的数据库，为结构的预防性维护提供数据支持。同时根据振动检测的结果，可以制定针对性的维护措施，如加固、修复或更换受损部件，以确保结构的长期安全运行。此外，振动检测还可以为结构的优化设计提供反馈，指导结构在设计阶段就考虑其动力学特性，以提高结构的整体性能和安全性。

2 建筑结构振动检测原理与方法

2.1 振动检测原理

振动检测的基本原理涉及振动信号的产生、传播、接收以及振动参数的测量。当结构受到外部激励（如风力、地震波、机械振动等）时，会产生振动响应^[1]。这些振动响应以波的形式在结构中传播，携带了关于结构状态的重要信息。振动参数主要包括位移、速度和加速度。位移是结构相对于其静止位置的移动量，速度表示结构振动的快慢，而加速度则反映了结构振动加速度的大小和方向。这些参数可以通过不同类型的传感器进行测量。例如，位移传感器通常利用光学、电容或电感原理来测量结构的微小移动；速度传感器则可能基于压电效应或电磁感应原理工作；加速度传感器则广泛采用压电式或MEMS（微机电系统）技术。在振动检测中，传感器被布置在结构上的关键位置，以捕捉结构的振动响

应。这些响应信号经过放大、滤波和数字化处理后，被输入到数据分析系统中，用于进一步的分析和评估。

2.2 常用检测方法

建筑结构振动检测有多种常用方法，每种方法都有其独特的优缺点和适用范围。（1）人工激振法：通过施加可控的外部激励（如冲击力、正弦波振动等）来激发结构振动，并测量其响应。这种方法适用于需要精确控制激励条件的研究或测试场景，但可能对结构造成一定的损伤或干扰。（2）环境随机振动法：利用自然环境中的随机振动源（如风、交通等）来激发结构振动，并测量其响应。这种方法无需人工施加激励，对结构无损伤，但振动信号可能较为复杂，需要高级的信号处理技术来提取有用信息。（3）振动台试验：将结构或结构模型放置在大型振动台上，通过模拟地震、风荷载等极端条件来激发振动，并测量其响应。这种方法能够模拟真实的动力荷载条件，但成本较高且受试验台尺寸和能力的限制。

2.3 高精度传感器应用

高精度振动传感器在建筑结构振动检测中发挥着至关重要的作用。这些传感器不仅具有高精度和高灵敏度，还能够在恶劣环境下稳定工作。常见的振动传感器类型包括（1）压电式传感器利用压电效应将机械振动转换为电信号；（2）电阻应变式传感器则通过测量应变片的电阻变化来反映结构的变形；（3）电容式传感器利用电容的变化来测量位移；（4）而激光位移传感器则利用激光束来精确测量结构的微小移动。在布置传感器时，需要考虑结构的几何形状、振动模态以及预期测量的参数。通常，传感器应布置在结构的关键位置，如节点、支撑点或潜在损伤区域，以确保能够捕捉到结构的整体振动特性。数据采集与处理流程包括信号的采集、预处理、特征提取和分析。采集到的振动信号可能包含噪声和干扰成分，因此需要进行滤波和去噪处理。特征提取阶段旨在从振动信号中提取有用的信息，如频率、振幅、相位等。最后，通过对这些特征的分析 and 比较，可以评估结构的健康状况和动力学性能。

3 建筑结构动力学特性分析

建筑结构动力学特性分析是结构工程领域的重要组成部分，它关注于结构在动态荷载作用下的响应和行为。通过对这些特性的深入理解，工程师可以评估结构的抗震性能、稳定性以及整体健康状态。

3.1 动力学特性概述

建筑结构动力学特性主要包括（1）自然频率：结构在无阻尼自由振动时的固有频率，是结构刚度和质量的

函数。自然频率越高，结构对高频荷载的响应越敏感。

（2）阻尼比：衡量结构振动能量耗散能力的指标^[2]。阻尼比越大，结构振动衰减越快，有利于减少结构在动态荷载下的振动幅度。（3）振型：结构在特定频率下的振动形态，反映了结构在振动时各部分的相对位移和变形。这些动力学特性不仅影响结构的振动响应，还与结构的整体稳定性、抗震性能以及疲劳寿命密切相关。因此，准确评估这些特性对于确保结构安全至关重要。

3.2 分析方法

建筑结构动力学特性的分析方法主要包括模态分析和有限元分析（FEA）。（1）模态分析：通过测量结构在自由振动或受迫振动下的响应，识别结构的自然频率、阻尼比和振型。模态分析具有实验成本低、操作简便的优点，适用于结构健康监测和故障诊断。然而，它依赖于实验数据的准确性，且可能受到环境噪声和测量误差的影响。（2）有限元分析（FEA）：通过建立结构的数值模型，模拟结构在动态荷载下的响应。FEA能够考虑结构的几何非线性、材料非线性和边界条件等因素，提供详细的应力、应变和位移分布。然而，FEA模型的准确性和计算效率受到网格划分、材料参数和边界条件等因素的制约。在实际应用中，工程师应根据具体需求选择合适的分析方法。例如，在结构健康监测中，模态分析可能更为适用；而在结构设计和优化中，有限元分析则更具优势。

3.3 实例分析

以某高层办公楼为例，展示建筑结构动力学特性分析的过程和结果。（1）模型建立：首先利用CAD软件建立结构的几何模型，并导入有限元分析软件中。然后，根据结构材料特性（如弹性模量、密度等）和边界条件（如支座约束、荷载作用等），建立有限元模型。（2）参数设置：在有限元模型中，设置动态分析参数，包括荷载类型（如地震波）、分析步长和时间等。同时根据模态分析的需求，设置自由振动分析参数。（3）结果解读：通过有限元分析，得到结构的自然频率、阻尼比和振型等动力学特性。结果显示，该办公楼的前几阶自然频率较高，表明结构对高频荷载的响应较为敏感。并且通过模态振型分析，发现结构在地震荷载下存在明显的层间位移和扭转效应。基于这些分析结果，工程师可以对结构进行进一步优化设计，以提高其抗震性能和稳定性。例如，通过调整结构布置、增加阻尼器等措施，降低结构的层间位移和扭转效应，提高结构的整体性能。

4 建筑结构振动检测与动力学特性应用

4.1 结构健康监测

结构健康监测是确保建筑结构安全、延长使用寿命的重要手段。建筑结构振动检测与动力学特性分析在此领域的应用主要体现在(1)损伤识别:通过振动检测,可以捕捉到结构在动态荷载下的响应特征,如自然频率、阻尼比和振型等。当结构发生损伤时,这些动力学特性会发生显著变化。例如,损伤会导致结构刚度降低,进而引起自然频率下降;损伤还可能增加结构的阻尼,导致振动响应更快衰减^[3]。通过对比结构在不同状态下的动力学特性,可以识别出潜在的损伤位置和程度,为及时修复和维护提供指导。(2)疲劳寿命评估:建筑结构在长期承受动态荷载作用下,可能会因疲劳而逐渐累积损伤,最终导致结构失效。振动检测与动力学特性分析能够评估结构的疲劳寿命。通过分析结构在不同荷载水平下的振动响应,可以建立结构疲劳损伤与振动特性之间的关系模型。结合疲劳损伤累积理论,可以预测结构在未来一段时间内的疲劳寿命,为结构的安全使用和维护提供科学依据。

4.2 抗震性能评估

抗震性能评估是确保建筑结构在地震等极端荷载作用下安全稳定的关键。建筑结构振动检测与动力学特性分析在抗震性能评估中具有重要作用。(1)模拟地震荷载下的振动响应:通过振动检测,可以获取结构在模拟地震荷载下的振动响应数据,包括加速度、位移和速度等。这些数据能够反映结构在地震作用下的动力行为,如振动形态、能量耗散等。通过分析这些数据,可以评估结构在地震荷载下的安全性和稳定性。(2)评估结构抗震能力:基于振动检测与动力学特性分析的结果,可以建立结构的动力学模型,进一步评估结构的抗震能力。通过模拟不同烈度的地震荷载,分析结构在地震作用下的响应特征,可以评估结构的抗震性能,包括结构的刚度、阻尼、耗能能力等。这些评估结果能够为结构的抗震加固和优化设计提供重要依据。

4.3 优化设计

建筑结构振动检测与动力学特性分析的结果还可以指导结构设计优化,提高结构的稳定性和安全性。(1)优化结构布置:通过分析结构的振动特性和动力响应,可以发现结构中的薄弱环节和潜在风险。基于这些分析结果,可以对结构布置进行优化,如调整结构刚度分布、增加支撑或减震装置等,以提高结构的整体稳定性和抗震性能。(2)提高材料利用率:振动检测与动力学特性分析能够揭示结构在动态荷载下的应力分布和变形模式。通过优化结构设计,可以更加合理地利用材料,避免过度设计或材料浪费,同时确保结构的安全性和稳定性。(3)增强结构可维护性:振动检测与动力学特性分析的结果还可以为结构的维护和管理提供指导。通过定期检测和分析,可以及时发现结构中的潜在问题,制定针对性的维护计划,延长结构的使用寿命。

结语

建筑结构振动检测与动力学特性分析是确保建筑安全、评估结构性能的重要手段。本文综述了建筑结构振动检测的基本原理与方法,以及动力学特性的分析方法,并探讨了这些技术在建筑结构健康监测、抗震性能评估及优化设计中的应用。未来,随着传感器技术、数据处理技术和计算方法的不断进步,建筑结构振动检测与动力学特性分析将更加精准、高效,为建筑结构的评估与维护提供更加有力的支持。

参考文献

- [1]樊圆,卢文胜,虞终军,等.多次地震作用下高层建筑结构动力特性识别和响应分析[J].建筑结构学报,2023,44(01):225-234.
- [2]何晴光,张释佺,朱前坤,等.模块化建筑阵列多调谐质量阻尼系统的实现与减震研究[J].振动与冲击,2024,43(06):262-272.
- [3]何辉,赵帅.建筑结构隔震、减震及振动控制[J].建筑技术开发,2020,47(23):1-3.