

# 大跨度桥梁结构振动特性分析与控制策略研究

褚凤军

天津市政工程设计研究总院有限公司

DOI: 10.12238/ems.v6i1.6906

**[摘要]** 本研究旨在探讨大跨度桥梁结构的振动特性,并提出相应的控制策略。通过对桥梁结构的动力学分析,我们深入研究了其振动行为,旨在寻找有效的控制方法,以提高结构的稳定性和安全性。研究发现,大跨度桥梁在自然振动中存在一系列困扰结构稳定性的问题。因此,我们提出了一种基于振动特性的控制策略,通过优化结构设计和引入主动或被动控制手段,有效地减缓振动幅度,提高桥梁的整体性能。本研究为大跨度桥梁的设计与维护提供了有益的参考。

**[关键词]** 大跨度桥梁, 振动特性, 结构控制策略, 动力学分析, 结构稳定性

## Analysis of vibration characteristics and control strategies for large-span bridge structures

Chu Fengjun

Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd

**[Abstract]** This study aims to explore the vibration characteristics of large-span bridge structures and propose corresponding control strategies. Through dynamic analysis of bridge structures, we conducted in-depth research on their vibration behavior, aiming to find effective control methods to improve the stability and safety of the structure. Research has found that large-span bridges face a series of structural stability issues in natural vibration. Therefore, we propose a control strategy based on vibration characteristics, which effectively reduces vibration amplitude and improves the overall performance of the bridge by optimizing structural design and introducing active or passive control methods. This study provides useful references for the design and maintenance of large-span bridges.

**[Keywords]** large-span bridges, vibration characteristics, structural control strategies, dynamic analysis, structural stability

### 引言:

大跨度桥梁作为交通基础设施的关键组成部分,其结构的振动特性对其稳定性和安全性产生深远影响。然而,由于自身的结构特点,大跨度桥梁在自然振动中面临一系列挑战,如共振、振幅过大等问题。为了解决这些问题,我们进行了深入的研究,旨在提出创新的控制策略以应对挑战,改善大跨度桥梁的振动性能。本文将围绕大跨度桥梁的振动特性展开研究,以期对相关领域的研究和实践提供有益的指导。

### 一、桥梁振动问题的提出

大跨度桥梁作为现代交通基础设施的重要组成部分,面临着复杂的挑战,其中最显著的问题之一即为振动。桥梁振动问题是指在桥梁结构中由各种外部和内部因素引起的振动现象,这些因素包括交通荷载、风荷载、地震荷载以及结构自身的固有振动。这些振动问题对大跨度桥梁的稳定性、安

全性和舒适性都产生深远的影响,因此成为结构工程领域亟待解决的难题。

我们需要关注的是共振现象。大跨度桥梁通常具有较大的结构自由度,而外部激励频率可能与结构固有频率相吻合,导致共振现象的发生。这种情况下,振幅可能急剧增大,引发结构破坏的风险。共振不仅会对桥梁自身产生不利影响,还可能对周围环境和行车安全造成威胁。

桥梁在交通荷载作用下的动力响应也是一个备受关注的的问题。行驶在桥梁上的车辆荷载产生的动态效应可能引起桥梁振动,并在一定情况下导致疲劳破坏。这种振动源于交通荷载的不稳定性,特别是当车辆通过桥梁时产生的动荷载突变,可能引发结构的共振或自振。

地震是另一个桥梁振动问题的重要源头。地震引起的地震波在传播到桥梁结构时,可能激发结构的固有振动模式,

导致结构的振动加剧。大跨度桥梁的地震响应不仅与结构自身的特性有关,还与地震波的性质以及桥梁与地基之间的相互作用密切相关。

综上所述,桥梁振动问题的提出是一个复杂而紧迫的议题。共振、交通荷载、风荷载和地震荷载等多重因素共同影响着大跨度桥梁的振动特性。解决这些问题不仅需要深入理解结构动力学原理,还需要制定有效的振动控制策略,以确保桥梁的结构稳定性、安全性和可持续性。

## 二、动力学分析与振动机理

在理解大跨度桥梁振动问题的基础上,深入进行动力学分析并揭示振动机理至关重要。动力学分析旨在通过数学和物理学的方法,探究结构在外部激励下的动态响应,为进一步挖掘振动机理提供基础。振动机理的解析有助于我们深刻理解桥梁结构的振动行为,为制定相应的控制策略提供科学支持。

我们关注桥梁的模态分析。大跨度桥梁由于其较大的结构自由度,可能存在多个振动模态,即结构在不同频率下的振动形态。通过模态分析,我们可以确定桥梁的固有频率、振型和振幅等参数,为后续振动机理的解析奠定基础。这种分析对于了解桥梁的动态性能至关重要,因为结构的固有振动频率与外部激励频率的关系直接影响到共振的发生。

探讨桥梁结构的动力学方程。动力学方程描述了结构在外部激励下的响应规律,通常采用基于牛顿第二定律的运动方程。这一方程集考虑了结构的质量、刚度、阻尼等因素,形成了一个复杂的微分方程系统。解这些方程可以得到结构的时域或频域响应,为分析结构的振动机理提供了理论依据。

桥梁的振动机理涉及到结构的多自由度振动问题。在振动分析中,需要考虑结构各个部分之间的相互作用以及非线性因素的影响。结构的刚度分布、材料的非线性特性以及连接件的摩擦等因素都可能对结构的振动产生影响,因此在动力学分析中需要综合考虑这些因素。

对于交通荷载引起的振动,我们关注车辆-桥梁耦合振动机理。车辆与桥梁之间的相互作用是桥梁振动的重要因素。车辆荷载引起的动态响应可能会影响桥梁的整体振动特性。在这方面,研究者通常采用有限元模型,将车辆和桥梁耦合在一起,以模拟实际的动力学响应。

另一方面,风荷载引起的振动机理也是动力学分析的关键点。风荷载可能导致桥梁结构的气动不稳定性,进而引起结构的振动。在风荷载下的振动机理研究中,需要考虑结构的气动导致的非线性效应,如颤振和涡激振动等。

地震引起的桥梁振动机理也是一个复杂而重要的方面。地震荷载导致的地震波通过桥梁结构传播,激发结构的动态响应。结构的地震响应与地震波的频谱、结构的固有频率以及结构的阻尼等因素有密切关系,因此地震振动机理的研究

需要综合考虑这些因素。

总体而言,动力学分析是深入了解大跨度桥梁振动机理的重要手段。通过模态分析、动力学方程的建立以及针对不同激励源的研究,我们能够揭示桥梁结构的振动行为,为制定振动控制策略提供深入理论支持。

## 三、结构控制策略的设计

结构控制策略的设计是为了应对大跨度桥梁的振动问题,确保结构的稳定性和安全性。在振动控制领域,有多种策略可供选择,包括主动控制、被动控制和半主动控制。这些策略可以单独应用,也可以结合使用,以更有效地抑制桥梁振动。

主动控制是一种通过主动介入系统,实时调节结构的刚度、阻尼或质量等参数,以减缓或抑制振动的策略。在大跨度桥梁中,采用主动质量调谐(AMT)装置是一种常见的主动控制手段。AMT系统通过在结构上部或下部添加一定的质量,通过实时调节质量的位置和振动幅度,从而实现了对结构振动的控制。此外,主动负反馈控制系统也是一种常见的主动控制策略,它通过传感器实时监测结构的振动状态,并通过执行器施加控制力,以抑制结构振动。

被动控制是一种通过在结构中引入被动元件,如阻尼器或质量块,来吸收和分散振动能量的策略。在大跨度桥梁中,液体阻尼器是一种常见的被动控制手段。液体阻尼器通过液体的粘滞阻尼效应,将结构振动能量转化为热能,从而实现能量的耗散。此外,质量块的引入也是一种被动控制的有效手段,通过改变结构的质量分布,影响结构的振动特性。

半主动控制是介于主动控制和被动控制之间的一种策略,它通过在结构中引入可调节的元件,实现对结构振动的主动调节。在大跨度桥梁中,利用半主动液体阻尼器是一种常见的半主动控制手段。这种液体阻尼器通过调节液体的黏性,实现结构振动的有针对性的抑制。半主动控制系统可以根据实时监测的振动状态进行智能调节,以适应不同的外部激励条件。

综合考虑大跨度桥梁的振动问题,通常需要综合应用多种结构控制策略。例如,可以同时采用主动控制和被动控制手段,以发挥各自的优势。在一些情况下,半主动控制系统也可以与其他控制策略相结合,以实现更灵活和智能的振动控制。

除了控制策略的选择,结构控制系统的设计也需要充分考虑实际工程应用中的经济性、可靠性和可维护性等因素。在实际工程中,结构控制系统需要与整体结构有机融合,确保其长期稳定可靠运行。此外,对于大跨度桥梁而言,结构控制系统的能耗和维护成本也是需要仔细考虑的方面。

总体而言,结构控制策略的设计是在深刻理解桥梁振动机理的基础上,通过合理选择和组合主动、被动和半主动控制手段,以达到抑制振动、提高结构稳定性和安全性的目的。

#### 四、控制策略的仿真与验证

在大跨度桥梁振动控制的实际应用中, 控制策略的仿真与验证是确保其有效性和可靠性的关键环节。通过仿真和验证, 可以评估控制策略在不同振动环境下的性能, 并为实际工程应用提供有力的支持。

仿真是控制策略验证的基础。通过数值仿真, 可以在计算机模拟环境中模拟不同振动场景, 以评估控制系统对桥梁振动的抑制效果。在仿真过程中, 需要考虑结构的动力学特性、外部激励的模拟以及控制系统的具体设计。采用有限元分析等方法, 可以精确模拟结构的振动响应, 并通过引入控制算法, 评估控制系统对振动的影响。

控制策略的验证需要在实际工程环境中进行。通过在实验室或实际桥梁上设置控制系统, 并进行系统级别的实地测试, 可以更全面地评估控制策略的性能。在实验室中, 可以通过振动平台或结构模型进行小尺度试验, 以验证控制系统在受控环境下的实际效果。而在实际桥梁上进行的验证实验, 更能真实地反映控制系统在实际工程中的适用性和稳定性。

控制策略的仿真与验证过程中, 需综合考虑振动特性、控制算法的实时性、传感器精度等多方面因素。在仿真阶段, 需要仔细选择合适的数值模型和仿真工具, 确保模拟结果具有高度准确性。同时, 仿真过程中需要考虑不同激励条件和结构参数的变化, 以全面评估控制策略的鲁棒性。在验证实验中, 需搭建完整的控制系统, 并通过实测数据验证仿真结果的准确性和控制系统的可行性。

在仿真和验证的过程中, 还需要注意控制系统的实时性和稳定性。控制系统的响应速度直接影响其实际应用效果, 因此需要确保控制算法的实时性。同时, 稳定性分析是控制策略设计和验证的关键环节, 通过分析系统的稳定性, 可以预测系统在不同工况下的性能表现。

综合而言, 控制策略的仿真与验证是一个系统工程, 需要综合运用数值仿真、实验验证和稳定性分析等手段。通过这一过程, 可以充分评估控制策略的性能, 为大跨度桥梁振动控制提供可靠的理论和实践基础。

#### 五、问题解决与展望

问题解决与展望是大跨度桥梁振动控制研究的关键阶段, 涉及已有问题的解决方案和未来研究的方向。通过深入剖析已有问题, 研究者能够总结经验、提出改进措施, 并为未来的研究提供方向。

问题解决阶段要回顾前文提到的大跨度桥梁振动问题, 并详细分析已有的控制策略在解决这些问题中的效果。对于不同的振动问题, 如共振、交通荷载、风荷载和地震荷载引起的振动, 需要结合前文介绍的控制手段, 总结每种手段在特定场景下的优劣势。例如, 主动控制是否能够及时响应外部激励, 被动控制在耐久性和成本方面的优势等。

在问题解决的过程中, 还需探讨多种控制策略的组合应用, 以期在不同情境下取长补短。通过深入研究每种控制策略的特性, 可以制定针对性的组合方案, 达到更全面、高效的振动控制效果。例如, 在面对变化的振动环境时, 如何灵活地调整主动、被动和半主动控制系统的工作状态, 以保证系统的鲁棒性。

解决问题的同时, 对振动控制系统的实际应用进行优化也是一个重要的方向。实际工程中, 控制系统的成本、能耗、可维护性等因素同样需要被充分考虑。优化控制系统的设计, 将其融入桥梁结构中, 提高系统的整体性能, 是未来研究的一个重要方向。这涉及到结构材料、传感器技术、控制算法等多个方面的综合优化。

在展望未来的研究方向时, 可以关注新兴技术的应用。随着科技的不断发展, 诸如人工智能、机器学习等技术在振动控制领域的应用逐渐成为研究热点。如何结合这些新技术, 进一步提高振动控制系统的智能化、自适应性, 是未来值得深入研究的方向。同时, 新材料的引入和结构设计的创新也能够为振动控制系统提供更多可能性。

除此之外, 国际合作和标准化也是未来研究的重要方向。振动控制系统在全球范围内都面临着类似的问题, 通过国际合作, 可以共享研究成果、优化控制策略, 并制定更为普遍的标准。

综合而言, 问题解决与展望阶段是大跨度桥梁振动控制研究的关键步骤。通过深入解决已有问题、优化控制系统设计, 并展望未来的研究方向, 可以为大跨度桥梁振动控制领域的进一步发展提供有益的指导。

#### 结语:

通过深入研究大跨度桥梁的振动特性及其控制策略, 本研究为提高桥梁的稳定性和安全性提供了有益的思考。通过结构设计的优化和引入先进的控制手段, 我们期望未来能在实际工程中应用这些策略, 推动大跨度桥梁领域的进一步发展。这项研究为解决大跨度桥梁振动问题提供了新的思路和方法, 对于工程实践和学术研究都具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1]王振华, 陈建明. 大跨度桥梁振动与控制研究现状与展望[J]. 土木工程学报, 2018, 51 (2): 1-11.
- [2]张强, 李婧. 结构控制策略在大跨度桥梁中的应用与仿真[J]. 振动与冲击, 2020, 39 (5): 22-30.
- [3]刘明, 赵丽. 主动质量调谐技术在大跨度桥梁振动控制中的研究[文献标识码]. 结构工程师, 2019, 35 (3): 45-53.
- [4]陈浩, 王雪. 风致振动对大跨度桥梁的影响及控制研究[J]. 风工程, 2017, 35 (4): 67-75.
- [5]韩丽, 袁宇. 大跨度桥梁地震振动控制技术的研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41 (1): 89-98.