

张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性研究

袁晓明

北京建工集团有限责任公司 北京 100055

摘要：文章研究了张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性。通过分析环境因素、结构因素及施工与运营因素对稳定性的影响，提出了针对性的稳定性提升策略。采用结构设计优化、材料与技术创新以及加强施工与运营管理等多方面措施，有效提高了结构的承载能力和抗震性能。研究表明，这些策略能够显著提升张弦拱桁架结构在复杂环境下的稳定性，为工程实践提供了有益参考。

关键词：张弦拱桁架结构；复杂环境；稳定性研究

1 张弦拱桁架结构体系概述

1.1 结构组成与工作原理

张弦拱桁架结构体系，作为一种创新的大跨度预应力空间结构体系，其结构组成精妙而复杂。上部刚性拱桁架，通常由抗弯刚度较大的构件如梁、拱或桁架等组合而成，它主要负责承受结构中的压力和弯矩，保证结构的整体稳定性和承载能力。下部柔性拉索，则充分利用了高强索的抗拉性能，通过拉索的紧绷状态，有效地承受并传递拉力，为结构提供必要的弹性支撑。而撑杆作为连接上下两部分的桥梁，不仅将刚性拱桁架与柔性拉索紧密地结合在一起，还通过其独特的几何形态和力学性能，使整个结构体系形成自平衡的受力状态。其工作原理在于，通过对柔性拉索施加适当的预应力，使得刚性拱桁架在受力时能够得到拉索的弹性支撑，从而大大减少拱桁架所承受的弯矩，提高整体结构的承载能力和刚度，使结构更加稳定、安全。

1.2 结构优势

张弦拱桁架结构体系凭借其独特的结构组成和工作原理，展现出了显著的结构优势。首先，该结构体系自重较轻，相比于传统的重型结构，它能够更轻松地跨越很大的空间，满足大跨度建筑的需求，为建筑设计提供了更多的可能性。其次，张弦拱桁架结构体系综合应用刚性构件抗弯刚度高的和柔性构件抗拉强度高的双重优点，使得整个结构体系在受力时更加合理，整体刚度和形状稳定性也得到显著的提升^[1]。张弦拱桁架结构还具有造型轻盈、美观大方的特点，其独特的线条和形态不仅满足现代建筑对美学的追求，还完美地融合功能性，使得建筑既实用又美观。该结构体系的施工相对简单，制造和运输也十分方便，大大降低施工难度和工程成本，提高施工效率，为建筑行业的快速发展提供有力的支持。

1.3 结构稳定性理论基础

张弦拱桁架结构体系的稳定性理论基础深厚且复杂，涉及多个力学和数学领域的交叉融合，该结构体系通过施加预应力，使柔性拉索与刚性拱桁架之间形成一种自平衡的受力状态，这种受力状态不仅提高了整体结构的稳定性，还使得结构在受力时能够更加均匀地分布应力，避免了局部应力过大的情况。结构稳定性的分析需要深入考虑几何形态和索预应力分布之间的相互影响，这是一个高度几何非线性过程。在结构负工作阶段，由于拉索的弹性变形和拱桁架的刚性支撑相互作用，使得整个结构的力学行为体现出较高的非线性特性。因此在结构设计和分析中，需要采用非线性有限元理论等先进方法，对结构进行静力性能、整体稳定性、动力响应等方面的深入研究，以确保结构的安全性和可靠性。另外，还需要充分考虑施工过程中的各种因素，如施工方案的选择、施工过程的控制、预应力施加的方式和大小等，以确保结构在施工和使用过程中的稳定性和安全性，为建筑的长期使用提供有力的保障。

2 张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性分析方法

2.1 静力稳定性分析

静力稳定性分析主要关注结构在静态荷载作用下的稳定性能，包括结构承受持久荷载（如自重、恒载等）以及可能遇到的偶然荷载（如风荷载、雪荷载等）时的稳定状态。在进行静力稳定性分析时，首先需要建立准确的力学模型。这包括对张弦拱桁架结构体系的几何构形、材料属性、连接方式进行详细描述，并通过数学语言将其转化为可计算的模型。接着，利用结构力学的基本原理，如力平衡方程、变形协调条件等，对结构在静态荷载作用下的内力分布、变形情况进行求解。在求解过程中，特别需要注意结构中的关键部位，如拱桁架的

节点、拉索的锚固点等,这些部位往往是应力集中、易发生破坏的地方。因此需要对这些部位进行重点分析,确保其应力水平在允许范围内,变形量也在可控范围之内。静力稳定性分析还需要考虑结构的整体稳定性,张弦拱桁架结构体系作为一个整体,其各部分之间相互依存、相互影响。在分析时需要将结构作为一个系统来考虑,评估其在静态荷载作用下的整体稳定性能。这包括结构的抗侧移能力、抗倾覆能力等,确保结构在复杂环境下能够保持稳定的状态。

2.2 动力稳定性分析

与静力稳定性分析不同,张弦拱桁架结构体系的动力稳定性分析主要关注结构在动态荷载作用下的稳定性能。动力稳定性分析需要确定结构的自振特性,包括自振频率、振型等。这些特性是结构固有的动力学属性,对于评估结构在动态荷载作用下的响应具有重要意义。通过模态分析等方法,可以求解出结构的自振特性,为后续的动力稳定性分析提供基础。要考虑结构在动态荷载作用下的响应,这包括结构在地震作用下的加速度、位移响应,在风振作用下的振动幅值、频率响应等。通过时程分析、频域分析等方法,可以评估结构在动态荷载作用下的稳定性能,判断其是否会发生过大的振动或破坏^[2]。动力稳定性分析还需要考虑结构的阻尼特性,阻尼是结构在振动过程中能量耗散的主要机制,对于减小结构振动幅值、提高结构稳定性具有重要作用。因此在分析时需要准确评估结构的阻尼特性,并考虑其对结构动力稳定性的影响。

2.3 非线性稳定性分析

张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性分析还必须考虑非线性因素的影响。非线性稳定性分析是静力和动力稳定性分析的深化和拓展,它更加真实地反映了结构在实际工作状态下的力学行为。非线性稳定性分析需要考虑结构的几何非线性、材料非线性和接触非线性等多方面因素。几何非线性主要指的是结构在大变形情况下的非线性响应,如拱桁架的弯曲、拉索的松弛等。材料非线性则涉及材料的本构关系、强度极限、塑性变形等特性。接触非线性则主要关注结构各部分之间的接触状态、摩擦效应等。在进行非线性稳定性分析时,需要采用先进的数值分析方法,如有限元法、差分法等。这些方法能够处理复杂的几何形状、边界条件和荷载情况,为非线性稳定性分析提供有力的工具。通过非线性稳定性分析,可以更加准确地评估张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性能,为结构的设计和施工提供科学依据。

3 复杂环境下的稳定性影响因素

3.1 环境因素

在复杂环境下,张弦拱桁架结构体系的稳定性受到多种环境因素的深刻影响。气候条件是一个不可忽视的重要因素,极端天气现象,如强风、暴雨、暴雪等,会对结构施加巨大的动态荷载,可能导致结构振动加剧,甚至引发局部或整体失稳。特别是在风荷载作用下,张弦拱桁架结构因其轻柔和大跨度的特点,更易受到风振的影响,需要特别关注风振系数和风振响应的计算与分析。温度变化也是影响结构稳定性的关键因素。随着环境温度的升降,结构材料会发生热胀冷缩,导致结构内力重分布,进而可能影响结构的整体稳定性。特别是在温差较大的地区,温度应力可能成为结构设计的关键因素。地质条件如地基的承载力、均匀性以及地震活性等,也对结构的稳定性构成重要影响。地基的不均匀沉降或地震作用都可能导致结构产生附加应力和变形,严重时可能危及结构的安全。

3.2 结构因素

结构因素同样是影响张弦拱桁架结构体系在复杂环境下稳定性的重要方面。结构的几何构形对其稳定性有着直接影响。合理的几何构形能够确保结构在受力时内力分布均匀,避免应力集中现象的发生。相反,不合理的几何构形可能导致结构在特定荷载作用下产生过大的应力或变形,从而降低结构的稳定性。结构的材料选择也至关重要。材料的强度、刚度、韧性以及耐久性等性能都会直接影响结构的承载能力和稳定性。特别是对于张弦拱桁架结构中的拉索部分,其材料的高强度和耐腐蚀性更是保证结构长期稳定运行的关键。结构的连接方式也是影响稳定性的重要因素。连接节点的设计应确保传力明确、构造可靠,避免因连接失效而导致结构整体失稳。

3.3 施工与运营因素

施工与运营过程中的诸多因素也对张弦拱桁架结构体系的稳定性产生着重要影响。在施工过程中,施工方案的合理性、施工质量的控制以及施工过程的监测都至关重要。不合理的施工方案可能导致结构在施工过程中产生过大的应力或变形,甚至引发施工事故。施工质量的控制则是确保结构按照设计要求建造的关键,任何施工缺陷都可能成为结构稳定性的隐患。施工过程的监测则能够及时发现并处理施工过程中的问题,确保结构的施工安全和质量^[3]。而在运营阶段,结构的维护与管理同样重要。定期的检查和维护能够及时发现并处理结构可能出现的损伤或老化问题,延长结构的使用寿命。合理

的运营管理策略也能够确保结构在承受各种荷载时保持稳定的运行状态。因此施工与运营因素对于张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性具有不可忽视的影响。

4 张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性提升策略

4.1 结构设计优化

在张弦拱桁架结构体系面对复杂环境的挑战时,结构设计优化是提升其稳定性的关键策略之一。首先,需要对结构的几何构形进行精细化设计,通过调整拱桁架的弧度、拉索的布置以及撑杆的连接方式,可以使结构在受力时更加均匀,避免应力集中和过大变形。优化结构的传力路径,确保荷载能够顺畅地传递到基础,减少结构内部的次生应力,提高整体的稳定性。除了几何构形的优化,还需要对结构的构件尺寸和截面形式进行合理选择。根据结构的受力特点和荷载情况,确定拱桁架、拉索和撑杆的截面尺寸,使其在满足承载能力的同时,尽量减轻自重,提高结构的轻盈度和跨越能力。通过采用变截面设计或空心截面等形式,可以进一步提高结构的经济性和稳定性。在结构设计优化过程中,还需要充分考虑结构的动力特性,通过调整结构的自振频率和振型,使其远离外部激励的频率范围,避免共振现象的发生。加强结构的阻尼设计,提高结构在动态荷载作用下的耗能能力,减小振动幅值,保证结构的动力稳定性。

4.2 材料与技术创新

材料与技术的创新对于提升张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性具有至关重要的作用。要选用高性能的材料来制造结构的各个构件,对于拱桁架部分,可以采用高强度、高韧性的钢材,以提高其承载能力和抗震性能。对于拉索部分,则可以选择具有高强度、耐腐蚀性的纤维材料,如芳纶或超高分子量聚乙烯纤维,以确保拉索在长期使用过程中保持稳定的性能。除了材料的创新,还需要关注新技术的应用。利用智能监测技术,可以实时监测结构的应力、变形和振动等情况,及时发现并处理潜在的安全隐患。还可以探索新型的连接技术和构造措施,提高结构节点的可靠性和耐久性,确保结构在复杂环境下的长期稳定运行。

4.3 施工与运营管理

施工与运营管理是提升张弦拱桁架结构体系在复杂

环境下稳定性的重要环节。在施工过程中,需要制定合理的施工方案,确保施工过程的顺利进行。同时加强施工质量的控制,严格按照设计要求进行施工,避免施工缺陷和误差的产生。另外,还需要对施工过程进行全程监测,及时发现并处理施工过程中的问题,确保结构的安全和质量^[4]。在运营阶段,要建立良好的维护管理体系,对结构进行定期的检查和维护。通过检查结构的外观、连接节点、拉索的张力等情况,及时发现并处理结构可能出现的损伤或老化问题。同时加强结构的监测和评估工作,利用先进的监测技术和评估方法,对结构的稳定性进行实时评估,确保结构在复杂环境下的安全运行。要加强运营人员的培训和管理,提高他们的专业素养和责任意识。通过定期的培训和考核,确保运营人员能够熟练掌握结构的维护管理知识和技能,及时发现并处理潜在的安全隐患。同时建立完善的应急管理机制,制定应急预案和处置措施,确保在突发事件发生时能够迅速、有效地进行应对和处理。

结束语

本文通过对张弦拱桁架结构体系在复杂环境下的稳定性进行深入研究,提出了一系列有效的提升策略。这些策略不仅为结构设计提供了新思路,也为施工与运营管理提供有力支持。未来,将继续探索更多创新方法,进一步完善张弦拱桁架结构的稳定性理论体系,为工程实践贡献更多力量。

参考文献

- [1]曾滨,周臻,许庆,等.张弦拱桁架结构基于模态参数的损伤识别试验[J].钢结构,2020(1):70-84.DOI:10.13206/j.gigSE19112603.
- [2]黄坤涛,刘辉,班庆荣,等.张弦拱桁架结构在多维地震作用下的抗震性能[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2023,33(3).DOI:10.3969/j.issn.1674-5043.2023.03.006.
- [3]黄坤涛,刘辉,班庆荣,等.张弦拱桁架结构在多维地震作用下的抗震性能[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2023,33(3):26-33,70.DOI:10.3969/j.issn.1674-5043.2023.03.006.
- [4]曾滨,周臻,许庆,等.张弦拱桁架结构基于模态参数的损伤识别试验[J].钢结构,2020,(1).DOI:10.13206/j.gigSE19112603.