

大悬挑结构动力响应分析及支撑系统设计研究

周雅冉

凉山州现代房屋建筑集成制造有限公司 四川 凉山 615000

摘要：随着现代建筑技术的发展，大悬挑结构在体育场馆、交通枢纽、文化中心等公共建筑中得到广泛应用。这类结构以其独特的造型和广阔的无柱空间满足了建筑功能与美学的双重需求，然而其结构安全性及适用性仍面临挑战。本文系统研究了大悬挑结构在风、地震及人致荷载等动力作用下的响应特性，分析了不同支撑系统的设计原理与应用效果。研究表明，大悬挑结构对动力荷载极为敏感，容易产生较大的振动响应；预应力技术和减振装置能有效控制结构变形与振动；临时支撑系统的合理设计对施工安全性与经济性具有重要影响。研究结果可为同类结构的设计与施工提供理论依据和技术参考。

关键词：大悬挑结构；动力响应；支撑系统；减振控制；风致振动

Research on Dynamic Response Analysis and Support System Design of Large Cantilever Structures

Yaran Zhou

Liangshan Prefecture Modern Building Integration and Manufacturing Co., Ltd., Liangshan, Sichuan, 615000

Abstract: With the development of modern construction technology, large cantilever structures have been widely applied in public buildings such as stadiums, transportation hubs, and cultural centers. These structures meet the dual needs of building functionality and aesthetics with their unique shapes and extensive column-free spaces; however, their structural safety and applicability still face challenges. This paper systematically studies the response characteristics of large cantilever structures under dynamic actions such as wind, earthquake, and human-induced loads, and analyzes the design principles and application effects of different support systems. The research shows that large cantilever structures are extremely sensitive to dynamic loads and tend to generate significant vibration responses; prestressing technology and vibration reduction devices can effectively control structural deformation and vibration; the reasonable design of temporary support systems has an important impact on construction safety and economy. The research results can provide a theoretical basis and technical reference for the design and construction of similar structures.

Keywords: Large Cantilever Structure; Dynamic Response; Support System; Vibration Reduction Control; Wind-Induced Vibration

引言

大悬挑结构作为现代建筑中的重要形式，通常指一端固定、另一端自由的水平结构体系，其悬挑长度往往超过常规结构尺度，形成了独特的空间效果和使用功能。这类结构广泛应用于体育场馆看台罩棚、机场航站楼、剧院休息平台等建筑中，创造了开阔的无遮挡空间，满足了人们对建筑空间灵活性和美学表现的追求。然而，大悬挑结构由于质量与刚度分布不均匀，自振频率较低，对风荷载、地震作用及人致振动等动力荷载非常敏感，容易产生较大的变形和振动。在实际工程中，如何准确分析并有效控制这些动力响应，成为结构设计与施工中的关键问题。随着计算机技术和数值模拟方法的进步，基于有限元法的动力弹塑性时程分析为研究大悬挑结构在强震作用下的破坏机制和性能目标评估提供了有效工具。同时，针对大悬挑结构在行人荷载等人致激励作用下产生的舒适度问题，国内外学者也开展了大量研究，提出了各

种减振控制措施。在支撑系统方面，传统临时支撑材料投入多、搭设效率低，而新型的装配式张弦梁钢支撑系统和对称平衡悬挑伸缩临时支撑结构则展现出明显优势^[1]。

1. 大悬挑结构动力响应分析

大悬挑结构的动力响应分析是确保结构安全性与适用性的基础。由于悬挑部位缺乏竖向支承，结构体系质量与刚度分布不均，导致其对动力荷载的响应比普通结构更为复杂。深入了解这些响应特性，对于合理制定结构设计方案和控制措施具有重要意义。

1.1 风致动力响应

风荷载是影响大悬挑结构安全的主要环境荷载之一，尤其对于屋盖类悬挑结构，风致振动效应更为显著。研究表明，悬挑屋盖的风压分布极不均匀，在来流前缘处通常会出现风压系数的峰值，这是导致结构局部破坏的主要原因。通过计算流体动力学（CFD）方法对屋盖表面进行气动优化，可有效改善风压分布，

降低风荷载效应。具体而言,通过在屋盖前缘设置“吹-吸”式气动优化装置,可以改变气流分离点的高度,减小风压系数。研究显示,采用八边形优化装置的屋盖前缘抗风性能远优于其他形状截面,能使表面的平均风压系数降低20.9%。这种气动优化方法不仅提高了结构的安全性,也为建筑造型设计提供了更多可能性。对于大跨度悬挑屋面,风振效应导致的竖向振动不容忽视。这类结构的自振频率通常较低,易与风荷载脉动成分发生共振,从而产生较大的动力响应。因此,在结构设计过程中,需通过风洞试验或数值模拟获取准确的风荷载参数,进行风振响应分析,确保结构在强风作用下的安全性与适用性^[2]。

1.2 地震动力响应

地震作用是大悬挑结构设计中必须考虑的另一种重要动力荷载。由于悬挑部位质量集中且缺乏直接传力路径,地震作用下容易产生较大的内力与变形。采用动力弹塑性时程分析方法,可以准确评估结构在强震作用下的受力性能与破坏模式。以福州某高层建筑高位大悬挑结构为例,研究人员利用SAUSACE软件进行了动力弹塑性时程分析,重点关注大震作用下悬挑结构的响应特性和构件损伤程度。分析结果显示,悬挑根部区域是抗震薄弱部位,容易出现塑性铰和混凝土受压损伤。根据分析结果,工程中采取了施加预应力的加强措施,通过预应力提供的反拱作用有效减小了悬挑端部的竖向位移,提高了结构的抗震性能。值得关注的是,大悬挑结构在地震作用下的鞭梢效应较为明显,即悬挑端部的加速度响应通常比结构底部放大数倍。这种动力放大效应可能导致悬挑部位构件破坏,进而引发整体结构倒塌。因此,在抗震设计中,除了保证足够的承载力外,还需严格控制结构变形,确保实现“大震不倒”的性能目标。

1.3 人致振动响应

表1: 大悬挑结构主要动力荷载及响应特点

荷载类型	作用特点	主要响应	控制目标
风荷载	长期性、动力特性复杂	振动加速度过大、局部风压集中	安全性、舒适度
地震作用	偶然性、破坏性大	层间位移角过大、塑性铰发展	生命安全、大震不倒
人致振动	频繁发生、作用力有规律	竖向加速度超限、共振效应	使用舒适度、疲劳寿命

对于作为人行空间的大悬挑楼板和观景平台,人致振动响应直接影响使用的舒适度甚至安全性。当行人步行频率与结构自振频率接近时,可能引起共振效应,产生过大的竖向振动。这种振动不仅会引起使用者的不适感,长期反复作用还可能导致结构疲劳损伤。以某悬挑观景平台为例,采用MidasGen软件进行的动力特性分析表明,结构在人行激励下的加速度响应超过了舒适度限值。通过对分析安装调谐质量阻尼器(TMD)前后的结构响应,证实TMD能有效降低悬挑端部的振动加速度,提高使用舒适度。

在实际工程中,人致振动舒适度控制往往成为大悬挑楼板结构设计的控制因素。对于人员密集的场合,如商场走廊、体育场馆看台等,需进行详细的人行激励分析,确保结构在正常使用条件下的振动响应在可接受范围内。当计算结果显示振动超限时,可采取调整结构布置、增加刚度或设置阻尼器等措施进行改进^[3]。

2. 大悬挑结构支撑系统设计

2.1 结构抗侧力体系设计

大悬挑结构的抗侧力体系设计关键在于有效传递悬挑端部荷载到主体结构。常用的结构形式包括斜撑系统、刚性框架和悬挂系统等。在实际工程中,需根据建筑功能、空间需求和荷载特点选择合适的结构体系,对于超大悬挑扶壁式幕墙支撑结构,通过优化节点构造和受力体系,可以有效抵抗水平和竖向荷载的共同作用。这类结构通常采用钢结构桁架作为主要受力构件,通过合理的传力路径将幕墙荷载传递至主体结构。在设计中,需特别注意支座区域的受力性能,确保荷载的平滑传递。预应力技术在大悬挑结构设计中具有独特优势。通过引入预应力,可以在悬挑根部形成与使用荷载效应相反的内力,从而减小结构变形,提高承载力。例如,在某大悬挑结构工程中,通过施加预应力加强措施,有效控制了结构在大震作用下的响应,确保了“大震不倒”性能目标的实现^[4]。

2.2 临时支撑系统创新

表2: 不同类型大悬挑结构支撑系统比较

支撑系统类型	适用跨度	主要优点	应用局限性
斜撑系统	中小跨度	传力直接、刚度大	影响建筑空间使用
刚性框架	中小跨度	空间简洁、无需额外支撑	梁柱截面较大
预应力结构	大跨度	控制变形、节约材料	施工工艺复杂
悬挂系统	超大跨度	视觉通透、跨越能力强	依赖锚固结构
临时伸缩支撑	施工阶段	搭设高效、可调节	仅用于施工阶段

大悬挑结构在施工阶段往往需要设置临时支撑系统,以保证结构在混凝土浇筑或构件安装过程中的稳定性和安全性。传统临时支撑系统材料投入多、搭设效率低,难以满足现代施工要求。为此,工程界提出了一系列创新解决方案。一种对称平衡悬挑伸缩临时支撑结构通过在主支撑柱上设置以拉索调节、对称平衡的可伸缩支撑组,实现了多角度、多点的临时支撑。这种系统在相同支撑面积条件下使用材料少、搭设效率高,特别适用于大跨度网架结构的施工。另一种装配式张弦梁钢支撑系统则采用桁架结构结合张弦梁结构,形成了刚度大、形变小、安全性高的临时支撑系统。该系统在江西、江苏、福建等地已有较多成功应用案例,并在深圳某科技大厦基坑工程中实现了首次地区性应用。装配式系统的优点在于构件标准化程度高,可重复使用,降低了资源消耗和工程成本^[5]。

2.3 节点连接构造设计

节点连接构造是大悬挑结构设计中的关键环节，直接影响结构的受力性能和安全性。合理的节点设计应保证传力直接、可靠，同时兼顾施工便利性。对于钢结构节点，常采用焊接连接、螺栓连接或混合连接方式；对于混凝土结构，则需注意钢筋锚固长度和节点区箍筋配置。在大悬挑结构与主体结构的连接区域，往往存在较大的集中力，需要特别加强构造措施。例如，在某大学土木工程学院办公楼现浇钢筋混凝土大悬挑斜屋面设计中，针对支撑模架体悬挑长度大、离地高、构件荷载大、斜屋面需多次浇筑的技术难题，基于ABAQUS模型对悬挑平台不同锚固形式的搭设方案及不同平台梁间距的受力性能进行了有限元分析。通过优化节点构造，提高了结构整体性和施工质量。对于装配式结构，节点的标准化和模块化设计尤为重要。在深圳某科技大厦项目中，装配式张弦梁钢支撑系统的成功应用得益于节点构造的改进措施。这些改进不仅提高了安装效率，也增强了节点受力性能，为类似工程提供了宝贵经验。

2.4 减振控制技术

为满足大悬挑结构的使用舒适度要求，常需采用各种减振控制技术。根据工作原理的不同，这些技术可分为被动控制、主动控制和半主动控制等类型。在实际工程中，被动控制因结构简单、可靠性高而应用最为广泛。调谐质量阻尼器(TMD)是一种典型的被动控制装置，通过质量块、弹簧和阻尼器组成的系统与结构主体频率调谐，吸收振动能量，减小结构响应。研究表明，在悬挑观景平台安装TMD后，结构在人行激励下的加速度响应显著降低，舒适度得到明显改善。

另一种创新方案是配置串联减振单元的悬挑结构，它通过多个减振单元的协同工作，扩大了减振频率范围，提高了减振效率。这种系统对大悬挑结构在复杂荷载作用下的宽频振动具有更好的控制效果。除了以上措施，还可以通过调整结构布置或改变截面尺寸来优化结构动力特性，提高自振频率，避开主要荷载频率，从而避免共振现象的发生。这种方法在结构设计初期尤为有效，可以从根本上解决振动问题。

3. 结论

大悬挑结构作为现代建筑中的重要形式，其动力响应分析和支撑系统设计关系到结构的安全性与适用性。未来研究可进一步探索大悬挑结构在极端荷载作用下的破坏机制和性能提升措施，研发更高效的新型支撑系统和减振装置，同时关注材料创新和数字化技术在结构设计与施工中的应用，推动大悬挑结构技术的持续发展。

参考文献：

- [1] 基于有限元方法的大悬挑斜屋面支撑体系搭设方案优选[J]. 建筑技术, 2024(24).
- [2] 陈海平, 孙泉水. 大跨度网架悬挑伸缩临时支撑系统设计与应用研究 [J]. 城市建筑, 2023(08).
- [3] 杨丹青等. 基于数值模拟的大跨悬挑屋盖风荷载气动优化 [J]. 湖南科技大学学报, 2025(02).
- [4] 人致激励下悬挑楼板结构的振动舒适度控制研究 [J]. 江苏建筑, 2021(01).
- [5] 杨丹青, 陈伏彬, 李毅, 舒臻孺. 基于数值模拟的大跨悬挑屋盖风荷载气动优化 [J]. 湖南科技大学学报, 2025(02).