

# 大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性分析与控制

徐华

新旅建设集团有限公司, 江西南昌, 330000;

**摘要:** 本文聚焦大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性问题。首先阐述了大跨度钢结构的特点及复杂荷载的构成, 深入分析了复杂荷载对大跨度钢结构稳定性的影响机制。接着介绍了常用的稳定性分析方法, 包括线性屈曲分析和非线性屈曲分析, 并通过实际工程案例对比了两种方法的应用效果。针对影响稳定性的关键因素, 提出了相应的控制策略, 涵盖结构优化设计、施工过程控制以及使用阶段的监测与维护等方面。结果表明, 合理运用稳定性分析方法和控制策略, 可有效提高大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性, 保障结构安全。

**关键词:** 大跨度钢结构; 复杂荷载; 稳定性分析; 控制策略

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.01.010

## 引言

随着建筑技术的不断进步, 大跨度钢结构因其独特的优势, 如自重轻、强度高、跨越能力强等, 在大型体育场馆、机场航站楼、会展中心等公共建筑以及桥梁工程中得到了广泛应用。然而, 大跨度钢结构在复杂荷载作用下, 其稳定性问题日益凸显。复杂荷载不仅包括传统的恒荷载、活荷载, 还涵盖了风荷载、地震荷载、温度荷载以及施工过程中的临时荷载等。这些荷载的组合作用使得大跨度钢结构的受力状态变得极为复杂, 极易引发结构失稳, 进而威胁到结构的安全性和可靠性。因此, 深入研究大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性分析与控制具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 大跨度钢结构特点与复杂荷载构成

在当代建筑工程领域, 大跨度钢结构凭借独特优势, 广泛应用于大型体育场馆、机场航站楼、会展中心及桥梁工程等诸多场景。其显著特点在于跨度大, 常跨越数十米甚至上百米, 极大拓展了建筑内部空间, 满足多样化功能需求; 结构形式丰富多样, 涵盖网架、网壳、悬索、拱以及组合结构等。网架与网壳结构空间受力性能优良、刚度大; 悬索结构造型优美、受力高效; 拱结构能将荷载转化为轴向压力, 充分发挥材料性能; 组合结构则整合多种结构优势, 提升整体性能<sup>[1]</sup>。不过, 这些复杂结构形式也使大跨度钢结构在复杂荷载作用下, 稳定性面临严峻挑战。

复杂荷载是大跨度钢结构稳定性关键影响因素, 主要包含风荷载、地震荷载、温度荷载与施工荷载。风

荷载作为主要侧向荷载, 具有随机性、动力性与空间相关性。其大小和方向随时间变化, 在大跨度结构中易引发振动, 当结构自振频率与风荷载卓越频率接近, 会激发共振, 使振幅急剧增大, 降低稳定性; 脉动成分还会造成随机振动, 增加疲劳损伤, 影响长期稳定性<sup>[2]</sup>。

施工荷载在大跨度钢结构施工阶段影响显著。施工过程中的临时荷载, 如施工设备、材料堆放荷载等, 其作用位置和大小随施工进度变化。随机性和不确定性使结构局部应力集中, 若应力超过材料屈服强度, 局部发生塑性变形, 影响整体稳定性; 荷载作用位置和大小改变还会改变结构传力路径, 使结构处于不利受力状态。

大跨度钢结构的这些特点与复杂荷载的共同作用, 使其稳定性分析变得复杂且关键。准确把握其特点与荷载构成, 是进行稳定性分析、制定有效控制策略, 保障结构安全可靠的基础, 对推动大跨度钢结构在工程领域的进一步发展具有重要意义<sup>[3]</sup>。

## 2 复杂荷载对大跨度钢结构稳定性的影响机制

在建筑工程里, 大跨度钢结构广泛应用, 然而复杂荷载对其稳定性的影响不容小觑, 深入理解其影响机制是保障结构安全的关键。风荷载是大跨度钢结构面临的主要侧向荷载之一, 其影响机制颇为复杂。风具有随机性, 不同时刻风速和风向变化不定, 这使得作用在结构上的风荷载大小和方向也时刻改变。风的动力性表现为风对结构会产生动力作用, 引发结构振动。当风速达到一定值, 结构会在风荷载激励下产生振动响应。若结构自振频率与风荷载的卓越频率接近, 就会引发共振现象<sup>[4]</sup>。共振时, 结构振幅急剧增大, 如同被不断“放大”的

振动，这会显著降低结构的稳定性，严重时甚至导致结构破坏。而且，风荷载的脉动成分会使结构产生随机振动，这种随机性增加了结构疲劳损伤的可能性。长期处于随机振动下，结构内部微小缺陷会逐渐扩展，累积到一定程度就会影响结构的长期稳定性。

施工荷载在大跨度钢结构施工阶段对稳定性影响显著。施工过程中的临时荷载，如施工设备、材料堆放等，其作用位置和大小随施工进度不断变化。这种随机性和不确定性会使结构局部应力集中，当局部应力超过材料屈服强度，就会产生塑性变形，影响结构整体稳定性。而且，施工荷载改变结构传力路径，使结构处于不利受力状态，增加结构失稳风险<sup>[5]</sup>。

## 3 大跨度钢结构稳定性分析方法

### 3.1 线性屈曲分析

线性屈曲分析作为评估大跨度钢结构稳定性的主要方法，在工程领域有着广泛应用，它基于小变形理论，假定结构在屈曲前后均处于线弹性状态，通过求解特征值问题来确定结构的临界屈曲荷载与屈曲模态。

从原理上看，线性屈曲分析将结构的平衡方程线性化。在荷载作用下，结构处于平衡状态，当荷载逐渐增加到某一临界值时，结构会突然发生屈曲，失去原有的平衡状态。此时，结构的刚度矩阵会出现奇异，通过求解刚度矩阵的特征值，就能得到临界屈曲荷载因子，将其乘以施加在结构上的参考荷载，即可得到临界屈曲荷载。而对应的特征向量则描述了结构的屈曲模态，即结构屈曲时的变形形状。

线性屈曲分析具有计算简便、效率高的优点。对于规则、简单的结构，它能够快速给出结构的临界屈曲荷载和大致的屈曲模态，为工程设计提供初步的参考依据。例如在初步设计阶段，工程师可以利用线性屈曲分析快速判断结构是否会发生整体失稳，从而对结构尺寸、形式等进行初步调整。

然而，线性屈曲分析也存在明显的局限性。它忽略了结构的大变形效应和材料非线性行为。在实际工程中，大跨度钢结构在屈曲前往往已经产生了较大的变形，而且钢材在受力过程中会进入塑性阶段，表现出非线性特性。这些因素都会显著影响结构的屈曲性能，导致线性屈曲分析得到的结果偏于不安全。此外，线性屈曲分析只能考虑单一荷载工况，对于复杂荷载组合下的结构稳定性分析无能为力。

### 3.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是针对大跨度钢结构稳定性评估更为精准且贴合实际的一种分析方法，它突破了线性屈曲分析的诸多限制，全面考虑了多种非线性因素对结构屈曲性能的影响。在实际工程中，大跨度钢结构在承受荷载时，几何变形往往不可忽视。非线性屈曲分析充分考量了几何非线性效应，即结构在荷载作用下产生较大变形后，其刚度会随着变形而改变。这种刚度的变化会进一步影响结构的受力状态和变形情况，使得结构的屈曲过程变得更加复杂。

材料非线性也是非线性屈曲分析重点考虑的因素之一。钢材在受力过程中，当应力达到一定值后会进入塑性阶段，此时材料的应力 - 应变关系不再呈线性变化。非线性屈曲分析能够准确模拟钢材的塑性行为，考虑材料屈服后强度和刚度的降低对结构稳定性的影响。这对于评估大跨度钢结构在极限状态下的安全性至关重要，因为在实际地震、强风等极端荷载作用下，结构部分区域很可能进入塑性工作状态。

### 3.3 实际工程案例分析

在大型体育场馆的建设中，大跨度钢结构的应用极为广泛，其稳定性直接关系到场馆的安全与使用功能。以某城市的大型体育馆为例，该体育馆采用了大跨度的空间桁架结构，其跨度达到了上百米，在设计和施工阶段，对结构稳定性的分析至关重要。

在初步设计时，工程师们首先运用线性屈曲分析方法对体育馆的钢结构进行评估。通过建立简化的结构模型，施加设计荷载，计算得出结构的临界屈曲荷载。然而，线性屈曲分析忽略了结构的几何非线性和材料非线性，其结果偏于理想化。实际结构在荷载作用下会产生较大的变形，钢材也会逐渐进入塑性阶段，这些因素都会显著降低结构的屈曲承载力。

为了更准确地评估结构的稳定性，工程师们进一步开展了非线性屈曲分析。在分析中，充分考虑了结构的几何大变形效应，当结构变形较大时，其刚度会发生变化，进而影响结构的受力性能。同时，还考虑了钢材的塑性行为，当应力超过钢材的屈服强度后，材料进入塑性阶段，强度和刚度都会降低。

通过非线性屈曲分析，发现结构在某些荷载工况下的临界屈曲荷载比线性屈曲分析结果低很多。基于这一结果，工程师们对结构进行了优化设计，增加了部分关

键构件的截面尺寸，提高了结构的整体刚度和稳定性。在施工过程中，严格按照设计要求控制构件的加工精度和安装质量，减少初始缺陷的影响。最终，该体育馆的钢结构顺利通过验收，投入使用后表现良好，在多次大型活动中都经受住了考验，充分证明了结合线性与非线性屈曲分析进行结构稳定性评估的必要性和有效性。

#### 4 大跨度钢结构稳定性控制策略

大跨度钢结构凭借其独特的空间优势和力学性能，在大型体育场馆、机场航站楼、会展中心等建筑中广泛应用。然而，复杂荷载作用下其稳定性问题突出，为保障结构安全，需采取全面有效的稳定性控制策略。

设计阶段是保障大跨度钢结构稳定性的首要环节。合理选型至关重要，应根据建筑功能、跨度、荷载等条件，选择适宜的结构形式。例如，对于大跨度屋盖，网架、网壳结构空间受力性能好、刚度大；悬索结构造型优美、受力高效，能充分发挥材料性能。同时，精确计算结构内力与变形，采用先进的有限元分析软件，考虑几何非线性、材料非线性以及各种复杂荷载组合，准确评估结构稳定性。

施工阶段对大跨度钢结构稳定性影响巨大。严格控制构件加工质量是基础，确保构件尺寸精度、焊接质量等符合设计要求，避免因构件缺陷引发局部应力集中，降低结构稳定性。在吊装与安装过程中，制定科学合理的施工方案，选择合适的吊装设备和吊点位置，控制吊装速度和顺序，防止结构在吊装过程中发生过大变形或失稳。对于大型复杂结构，可采用分阶段安装、临时支撑等措施，保证施工过程结构安全。同时，加强施工监测，实时监测结构变形、应力等参数，与设计值对比分析，一旦发现异常及时调整施工方案，确保结构稳定。

使用阶段需做好维护管理。定期对结构进行检查，重点检查连接节点、支撑部位、受腐蚀区域等，及时发现并处理锈蚀、松动、变形等问题，防止问题扩大影响结构稳定性。对于遭受地震、台风等自然灾害或意外撞击的结构，要进行全面检测评估，根据评估结果进行加固或修复。

#### 5 结论

本文对大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性分析与控制进行了深入研究。通过分析复杂荷载的构成及其对大跨度钢结构稳定性的影响机制，明确了风荷载、地震荷载、温度荷载和施工荷载等因素是导致大跨度钢结构失稳的主要原因。介绍了线性屈曲分析和非线性屈曲分析两种常用的稳定性分析方法，并通过实际工程案例对比了两种方法的应用效果，结果表明非线性屈曲分析能够更准确地反映结构在复杂荷载作用下的实际承载能力和失稳模式。针对影响大跨度钢结构稳定性的关键因素，提出了结构优化设计、施工过程控制以及使用阶段监测与维护等控制策略，这些策略能够有效提高大跨度钢结构在复杂荷载作用下的稳定性，保障结构的安全性和可靠性。未来研究可深入探讨复杂荷载耦合作用下大跨度钢结构的非线性稳定问题，以及基于智能监测技术的大跨度钢结构稳定性实时评估与预警方法。

#### 参考文献

- [1]瞿中华,王东利,刘满,等.大跨度钢连廊多次提升施工技术[J].安装,2025,(12):115-119.
- [2]陈宁.大跨度钢结构网架局部单元吊装与高空散装综合施工技术研究[J].福建建设科技,2025,(06):90-92+102.
- [3]李君,张成,刘国彬,等.大跨度钢结构管桁架加工制作技术探讨[J].建筑科技,2025,9(11):79-81.
- [4]汤海忠,龚健华,周凌波,等.复杂荷载作用下农光互补项目中光伏阵列的整体力学分析[J].太阳能,2025,(06):98-106.
- [5]王晓航.复杂荷载下纵连式无砟轨道层间离缝注胶修复对传力机制的影响研究[D].石家庄铁道大学,2024.

作者简介：徐华，1978年09月10号，性别：男，民族：汉族，籍贯（省、市）：江西省九江市，职称：中级，学历：中专，主要研究方向：结构工程。