

# 大跨异形钢结构空中连廊抗风安全分析

曹云锋 陈明明 王正平 白耀省 韩 卫  
中国葛洲坝集团第一工程有限公司 湖北 宜昌 443000

**摘要：**大跨异形钢结构空中连廊以其独特的建筑造型和空间功能，在现代城市建设中日益受到青睐。然而，由于其结构形式复杂、跨度大且质量轻，在风荷载作用下易产生复杂的动力响应，抗风安全问题成为设计与建设中的关键考量。本文深入剖析大跨异形钢结构空中连廊在风场中的力学行为，通过理论分析、数值模拟与实际案例研究相结合的方式，对其抗风设计方法、风振响应特性及抗风安全评估进行系统研究，旨在为该类结构的抗风设计与安全保障提供理论依据与技术支持，提升大跨异形钢结构空中连廊在强风环境下的可靠性与稳定性。

**关键词：**大跨异形钢结构；空中连廊；风荷载；抗风安全；风振响应

**引言：**随着建筑技术的不断进步与建筑艺术追求的提升，大跨异形钢结构空中连廊作为一种极具创新性与标志性的建筑结构形式，广泛应用于城市综合体、商业中心、交通枢纽等大型地标性建筑项目中。例如，重庆来福士广场的空中连廊长约300米，横跨四座250米高的塔楼顶部，集观景、娱乐等多功能于一体，成为城市地标。此类连廊突破传统建筑结构形式，以独特的造型和大跨度空间满足了现代建筑在功能与美学上的双重需求<sup>[1]</sup>。

## 1 大跨异形钢结构空中连廊结构特点、风荷载特性及抗风设计关键内容

大跨异形钢结构空中连廊结构复杂，跨度常达数十米至上百米，如拉斐尔云廊部分跨度超60米。其构件异形、空间布置不规则，传力路径复杂，且质量轻、刚度不均，在风荷载下易产生大位移与振动响应。连廊与主体建筑连接方式多样，刚接增强整体但内力大，滑动连接减少主体变形影响却削弱抗侧移能力。

风荷载包含平均风与脉动风。平均风荷载与风速、空气密度、迎风面积相关，通过基本风压和体型系数计算；脉动风因风的紊流产生，引发结构不规则振动。风荷载具有方向性，异形结构在不同风向角下体型系数与受力状态变化大，易产生扭转力矩。台风等强风风速大、脉动强，严重威胁连廊抗风安全。

抗风设计理论中，基本风压依据10m高度处50年一遇10min平均最大风速确定，需结合地形修正。体型系数通过风洞试验或CFD数值模拟获取，风振系数则综合考虑脉动增大、脉动影响与振型系数，其准确计算对评估动力响应关键。抗风设计方法上，基于荷载设计将风荷载等效为静力，用有限元软件计算内力，依规范验算构件强度与稳定性；基于性能设计以不同风灾水平性能目标为导向，通过时程分析等非线性动力方法，确保结构在

风灾下满足位移、加速度、构件损伤等性能要求。

风振响应类型有顺风向、横风向与扭转风振。顺风向由平均风与脉动风顺向分量引发，自振周期与脉动风卓越周期接近时共振；横风向源于旋涡脱落、气动弹性力，共振时横向位移内力大；扭转风振因风压不均与扭转刚度不足，易与顺、横向振动耦合。结构自振频率、阻尼比、质量分布，风场风速、风向、紊流强度，以及结构外形与体型系数，均显著影响风振响应，可通过优化设计、设置阻尼装置、改进外形等降低响应<sup>[2]</sup>。

## 2 大跨异形钢结构空中连廊抗风安全评估

### 2.1 评估指标体系构建

构建科学合理的抗风安全评估指标体系是准确评估大跨异形钢结构空中连廊抗风性能的基础。该体系涵盖结构响应指标、构件性能指标和整体安全指标。结构响应指标包括结构在风荷载作用下的位移、加速度、速度等，这些指标直接反映结构的振动状态。例如，结构的最大位移超过设计允许值，可能导致结构与周边物体碰撞或影响结构的正常使用；过大的加速度会使使用者产生不舒适感，甚至影响结构的连接部位。构件性能指标主要关注构件的内力（轴力、弯矩、剪力）、应力以及变形等。通过验算构件的强度、稳定性和疲劳性能，判断构件在风荷载长期作用下是否安全<sup>[3]</sup>。

### 2.2 评估方法与流程

#### 2.2.1 基于监测数据的评估方法

基于监测数据的评估方法通过在大跨异形钢结构空中连廊上布置传感器，实时监测结构在风荷载作用下的响应数据，如加速度、位移等。利用这些监测数据，结合结构动力学理论和信号处理技术，对结构的健康状态和抗风性能进行评估。第一，对监测数据进行预处理，去除噪声干扰，提取有效信号。然后，通过模态识别方

法,根据监测数据识别结构的自振频率、阻尼比等动力特性参数。将识别得到的参数与结构初始设计参数进行对比,若参数发生明显变化,可能意味着结构出现损伤或性能退化<sup>[4]</sup>。

### 2.2.2 数值模拟与理论分析相结合的评估流程

数值模拟与理论分析相结合的评估流程首先根据大跨异形钢结构空中连廊的设计图纸和相关资料,建立精确的结构有限元模型。在模型中合理考虑结构的材料特性、几何非线性、连接方式等因素。利用风荷载计算理论,确定作用于结构模型上的风荷载。通过数值模拟方法,如时程分析法、随机振动分析法等,计算结构在风荷载作用下的响应。在时程分析中,选择合适的风荷载时程曲线,将其施加于结构模型,计算结构在不同时刻的位移、内力等响应。随机振动分析则基于随机振动理论,考虑风荷载的随机性,计算结构响应的统计特征值。将数值模拟结果与理论分析结果进行对比验证,确保模拟结果的准确性。根据模拟和分析结果,依据抗风安全评估指标体系,对结构的抗风性能进行评估。

## 3 工程案例分析

### 3.1 案例项目概况

海南文昌国际航天城航天科创基地,主要由科研楼、办公楼及地下建筑组成。两栋单体8层屋顶的空中连廊采用梯形框架结构,全长108米,净跨89m,宽度为23.4米,高度为5.6米,最大安装标高为40.2米,总重量为386吨。桁架形式为空间三角形圆管桁架,整体呈圆弧形,外形独特,为满足建筑造型需求,桁架杆件布置不规则,结构质量轻、刚度分布不均匀。连廊与主体建筑通过钢板球型铰接滑动支座连接,以减少主体结构变形对连廊的影响。项目位于沿海地区,每年受台风影响频繁,基本风压为0.85kN/m<sup>2</sup>,地面粗糙度类别为A类。鉴于连廊结构的复杂性和所处地区的强风环境,其抗风安全问题至关重要<sup>[5]</sup>。

### 3.1.1 抗风设计措施实施

在抗风设计阶段,针对该连廊的特点,采取了一系列针对性措施。第一,通过风洞试验精确测定连廊在不同风向角下的体型系数。风洞试验模型按照1:200的比例制作,模拟了项目所在地的大气边界层风场,详细测量了连廊表面各测点的风压分布。试验结果显示,在某些风向角下,连廊的迎风面和背风面出现较大的风压差,体型系数最大值达到2.5。基于风洞试验结果,对连廊的风荷载取值进行了优化。

在结构设计方面,采用了空间钢桁架结构体系,并对桁架杆件进行合理布置,以增强结构的整体刚度和抗

扭性能。通过有限元分析软件ANSYS建立连廊的精细结构模型,考虑结构的几何非线性和材料非线性,对结构在风荷载作用下的力学性能进行模拟分析。模拟结果表明,在设计风荷载作用下,连廊结构的最大位移出现在跨中位置,位移值为80mm,满足《钢结构设计标准》(GB 50017)中规定的挠度限值要求。同时,通过优化结构布置,使结构的扭转中心与风荷载合力作用点尽量重合,有效降低了结构的扭转效应。

为进一步提高连廊的抗风性能,可根据项目实际,在连廊与主体建筑的连接部位增设黏滞阻尼器。黏滞阻尼器能够在风振发生时,通过消耗能量来减小结构的振动响应。根据结构动力特性和预期的减震效果,选用了合适规格的黏滞阻尼器,并通过参数优化确定了阻尼器的安装位置和数量。在ANSYS模型中对设置黏滞阻尼器后的结构进行时程分析,结果显示,与未设置阻尼器的结构相比,设置阻尼器后连廊结构的最大加速度响应降低了30%,位移响应降低了25%,有效提高了结构在风荷载下的舒适度和安全性。

### 3.2 风振响应监测与评估

在连廊建成并投入使用后,为了能够实时且精准地掌握其在风荷载作用下的工作状态,一套科学且精密的结构健康监测系统应运而生。风荷载作为连廊在日常运营中面临的重要外力之一,其不确定性和复杂性对连廊的结构安全构成潜在威胁,因此对风振响应进行长期监测具有至关重要的意义。

该监测系统在连廊的关键部位精心布置了多种传感器,力求全面捕捉结构在风荷载作用下的各种响应数据。其中,加速度传感器被安装在连廊的多个位置,如连廊的端部、跨中以及与主体建筑连接的节点处。这些加速度传感器犹如敏锐的感知触角,能够精准捕捉连廊在风激励下产生的加速度变化。通过对加速度数据的分析,可以了解连廊振动的剧烈程度,进而评估风荷载对连廊结构的动力作用。

位移传感器也发挥着不可或缺的作用。它们被巧妙地设置在连廊可能发生较大位移的部位,像连廊与主体结构的连接处,此处由于主体结构与连廊在风荷载下的变形差异,容易产生相对位移。位移传感器通过测量连廊在水平和垂直方向上的位移量,为判断连廊是否超出设计允许的变形范围提供依据。一旦位移数据超出阈值,就意味着连廊结构可能面临潜在风险,需要及时采取相应措施。

通过对监测数据的分析,发现连廊在强风作用下的风振响应较为复杂。在一次风速达到20m/s的强风过程

中, 监测数据显示连廊跨中位置的顺风向最大加速度为  $0.15\text{m/s}^2$ , 横风向最大加速度为  $0.20\text{m/s}^2$ , 扭转角度最大达到  $0.05^\circ$ 。将监测得到的风振响应数据与设计值进行对比, 结果表明, 各项响应指标均在设计允许范围内。但通过对长期监测数据的统计分析, 发现连廊在某些特定风向角和风速条件下, 会出现响应增大的情况, 需要持续关注。

基于监测数据, 采用基于性能的评估方法对连廊的抗风性能进行评估。第一, 根据结构在不同风振响应水平下的性能表现, 将结构的性能状态划分为正常使用、可接受损伤和不可接受损伤三个等级。然后, 通过建立结构响应与性能状态之间的量化关系, 结合监测数据, 评估连廊在实际风荷载作用下所处的性能等级。评估结果表明, 在目前的风环境条件下, 连廊结构整体处于正常使用性能等级, 能够满足设计要求的安全性和适用性。

#### 4 结束语

大跨异形钢结构空中连廊因其独特的结构特点和复杂的风荷载作用, 抗风安全问题成为设计与运营中的核心关注点。通过对其结构特点、风荷载特性、抗风设计理论与方法、风振响应分析及抗风安全评估等方面深入研究, 得出以下主要结论:

大跨异形钢结构空中连廊具有跨度大、外形不规则、质量轻、刚度分布不均匀等结构特点, 这些特点使其在风荷载作用下易产生复杂的振动响应。风荷载的随机性、脉动性和方向性对连廊结构的受力状态影响显著, 不同风向角下, 结构的体型系数和受力特性变化较大。

风荷载计算理论是抗风设计的基础, 通过准确确定基本风压、体型系数和风振系数, 能够合理计算作用于连廊结构上的风荷载。基于荷载的设计方法和基于性能的设计方法为连廊的抗风设计提供了有效途径, 前者将风荷载视为等效静力荷载进行结构设计, 后者以结构在

不同风灾水平下的性能目标为导向, 采用非线性动力分析方法进行设计, 两者各有特点, 可根据工程实际情况选用。

大跨异形钢结构空中连廊的风振响应包括顺风向、横风向和扭转风振响应, 这些响应相互耦合, 加剧了结构的受力复杂性。结构自身参数(如自振频率、阻尼比、质量分布)、风场特性(风速、风向、紊流强度)以及结构外形与体型系数等因素对风振响应有重要影响。通过合理优化结构设计、增大结构阻尼比、改善结构外形等措施, 可以有效降低风振响应。

构建科学的抗风安全评估指标体系, 采用基于监测数据的评估方法和数值模拟与理论分析相结合的评估流程, 能够全面、准确地评估大跨异形钢结构空中连廊的抗风性能。通过对工程案例的分析, 验证了抗风设计措施的有效性和抗风安全评估方法的可行性, 同时也表明在实际工程中, 需要根据结构特点和环境条件, 综合运用多种手段保障连廊结构的抗风安全。

#### 参考文献

- [1] 冯春鹏,岳军.某40米大跨度连廊结构设计与分析[J].建筑结构,2021,51(S1):508-511.
- [2] 张连冰.高空大跨钢结构连廊深化设计与整体提升技术研究[J].铁道建筑技术,2022,No.348(03):91-94+159.
- [3] 李瑞德,张海燕,陈第东等.多层大跨度钢结构连廊施工技术[J].砖瓦,2021,No.407(11):168-169.DOI:10.16001/j.cnki.1001-6945.2021.11.070.
- [4] 周春雨,徐斌,张爱红等.大跨度钢结构连廊施工技术[J].施工技术(中英文),2022,51(04):82-87.
- [5] 郑杰.大跨度空间桁架式钢结构空中连廊施工技术[J].建筑施工,2022,44(01):50-52.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2022.01.016.