

# 强风作用下索膜结构风振响应的多维度解析与优化策略

## 一、引言

### 1.1 研究背景与意义

随着现代建筑技术的不断发展，索膜结构作为一种新型的空间结构形式，以其独特的造型、轻质高强、施工便捷等优点，在体育场馆、展览馆、机场航站楼等大跨度建筑中得到了广泛应用。例如，1972年德国慕尼黑奥运会主体育场，其索膜结构屋顶不仅造型优美，还为观众提供了良好的观赛环境；还有2008年北京奥运会的“水立方”，其ETFE膜结构外墙和屋顶，展现了索膜结构在现代建筑中的创新性应用。这些标志性建筑的成功建设，推动了索膜结构在全球范围内的应用。

然而，索膜结构属于风敏感性结构，具有质量轻、刚度小、自振频率低等特点。在强风作用下，索膜结构极易发生较大变形和剧烈振动，严重时可能导致膜材撕裂、连接部位破坏甚至整体结构失稳。例如，1995年美国佐治亚穹顶在建成仅3年后，在一次强风大雨袭击下，四片薄膜被撕裂，撕裂长度达10余米；1999年加拿大蒙特利尔奥林匹克体育场的可开启式膜屋盖在暴风雪后，一块膜屋盖突然破裂；2002年韩国济洲岛体育场挑篷膜结构在台风袭击下两次出现膜材撕裂现象。这些工程事故不仅造成了巨大的经济损失，也对人员安全构成了威胁。

在国内，索膜结构的应用起步相对较晚，但随着建设数量的增加，强风作用下的安全问题也逐渐凸显。2005年9月，台风“达维”袭击导致博鳌亚洲论坛成立会址膜结构严重破坏，整个膜结构被撕碎，主立柱倾斜或倒塌，膜结构顶部只剩下框架；同年，三亚美丽之冠文化会展中心冠顶约五分之一的膜片被台风“抓破”，冠身部分膜片也出现轻微裂缝。

因此，深入研究强风作用下索膜结构的风振响应具有重要的现实意义。从工程应用角度来看，准确掌握索膜结构在强风作用下的风振响应规律，能够为索膜结构的抗风设计提供科学依据，有效提高结构的抗风能力和安全性，减少强风灾害对索膜结构的破坏，保障人民生命财产安全。在理论研究方面，索膜结构的风振响应涉及到结构动力学、空气动力学、材料力学等多学科领域，研究其风振响应有助于丰富和完善结构风工程理论体系，推动相关学科的发展。

## 1.2 国内外研究现状

索膜结构风振响应的研究一直是结构风工程领域的重要课题，国内外学者从理论分析、实验研究和数值模拟等多个方面展开了深入探索，取得了丰富的研究成果。

在理论分析方面，早期的研究主要基于连续化理论，对索膜结构进行解析分析。这种方法在一定程度上对索膜结构的发展起到了推动作用，但由于其做了较多简化和近似，往往仅适用于某些特定的结构形式，具有较大的局限性。随着计算机技术的飞速发展，有限元理论被广泛应用到索膜结构分析中，为索膜结构的理论研究提供了更强大的工具。学者们通过建立考虑几何非线性、材料非线性等因素的有限元模型，对索膜结构的力学性能进行深入分析。例如，文献 [X] 基于有限元理论，推导了索膜结构的静力平衡方程和动力方程，考虑了索膜结构的几何非线性和材料非线性特性，为索膜结构的静动力分析提供了理论基础。然而，索膜结构的风振响应涉及到结构与风场的复杂相互作用，理论分析仍面临诸多挑战，如如何准确考虑风与结构的耦合作用、如何处理索膜结构的非线性行为等问题，仍有待进一步研究。

实验研究是索膜结构风振响应研究的重要手段之一，主要包括风洞试验和现场实测。风洞试验可以在实验室条件下模拟真实的风场环境，对索膜结构的风振响应进行测量和分析。国外学者在这方面开展了大量研究工作，如 **Kassem** 和 **Novak** 对一半球形充气膜结构气弹模型进行了较系统的风洞试验研究，探讨了风速、地面粗糙度、内压等因素对结构风振性能的影响，并提出了一种基于刚性模型试验和影响面理论的半解析方法；**Kawamura** 和 **Kimoto** 对不同垂跨比和质量的单向悬挂屋盖模型进行风洞实验研究，探讨了质量比、预张力、结构阻尼、来流湍流度等因素对结构响应的影响。国内学者也通过风洞试验对索膜结构的风振响应进行了深入研究，如沈世钊、武岳等通过风洞实验来分析研究风与索膜结构的耦合作用，揭示了索膜结构风振响应的一些基本规律。风洞试验虽然能够提供较为真实的实验数据，但存在成本高、周期长、模型制作和测试技术要求高等缺点。现场实测则是在实际工程中对索膜结构的风振响应进

行监测，能够获得最真实的结构响应数据，但受到现场条件的限制，难以对各种工况进行全面测试，且数据采集和分析难度较大。

数值模拟技术的发展为索膜结构风振响应研究提供了新的途径。目前，常用的数值模拟方法包括计算流体力学（**CFD**）和有限元法（**FEM**）。**CFD**

方法可以模拟索膜结构周围的风场分布，得到结构表面的风压分布，为结构的风振响应分析提供荷载条件。例如，文献 [X] 采用 CFD 技术对不同风向角下的膜面风压分布进行数值模拟，分析了风向角对膜面风压分布的影响规律。FEM 方法则用于对索膜结构的力学行为进行模拟，考虑结构的几何非线性和材料非线性，求解结构在风荷载作用下的位移、应力等响应。将 CFD 和 FEM 相结合，可以实现对索膜结构流固耦合风振响应的数值模拟，更全面地考虑风与结构的相互作用。如黄理卿等利用计算流体动力学软件 CFX 和有限元软件 ANSYS 的联合，实现了柔性边界鞍形索膜结构与周围风场的三维流固耦合模拟，分析了柔性边界索膜结构的流固耦合效应和结构的非线性振动规律。然而，数值模拟方法的准确性依赖于模型的建立、参数的选取以及计算方法的合理性，需要通过实验数据进行验证和校准。

综上所述，国内外学者在索膜结构风振响应研究方面取得了丰硕的成果，但仍存在一些问题和不足。例如，在理论分析方面，对于风与结构的耦合作用机理尚未完全明确，理论模型的准确性和通用性有待提高；在实验研究方面，风洞试验和现场实测都存在一定的局限性，难以全面准确地获取索膜结构的风振响应特性；在数值模拟方面，如何提高模拟结果的准确性和可靠性，以及如何更高效地进行大规模数值计算，仍是需要解决的问题。因此，进一步深入研究索膜结构的风振响应，探索更加准确、有效的分析方法和设计理论，具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1.3 研究内容与方法

### 1.3.1 研究内容

本研究旨在深入探讨强风作用下索膜结构的风振响应，主要研究内容包括以下几个方面：

- **索膜结构风振响应理论基础研究**：深入研究索膜结构的力学特性，包括索膜结构的非线性本构关系、几何非线性和材料非线性对结构力学性能的影响。建立索膜结构在风荷载作用下的动力学方程，考虑风与结构的耦合作用，分析结构的振动特性，如自振频率、振型等。研究索膜结构风振响应的计算方法，对比不同计算方法的优缺点，为后续的数值模拟和分析提供理论依据。
- **索膜结构风振响应数值模拟研究**：利用有限元软件建立索膜结构的数值模型，考虑索膜结构的实际几何形状、材料参数和边界条件等因素，确保模型的准确性和可靠性。采用计算流体动力学 (CFD) 方法模拟索膜结构周围的风场分布，得到结构表面的风压分布。将

CFD 模拟得到的风压分布作为荷载施加到索膜结构的有限元模型上，进行流固耦合分析，得到索膜结构在强风作用下的位移、应力、应变等风振响应结果。分析不同参数对索膜结构风振响应的影响，如风速、风向角、结构形式、膜材特性、索的布置方式等，总结索膜结构风振响应的规律。

- **索膜结构风振响应影响因素分析**：研究风速对索膜结构风振响应的影响，分析不同风速下结构的振动特性和响应幅值的变化规律。探讨风向角对索膜结构风振响应的影响，分析不同风向角下结构表面风压分布的差异以及对结构整体响应的影响。分析结构形式对索膜结构风振响应的影响，对比不同结构形式（如马鞍形、伞形、拱形等）的索膜结构在风荷载作用下的响应特性。研究膜材特性（如弹性模量、泊松比、厚度等）和索的布置方式（如索的间距、索的预拉力等）对索膜结构风振响应的影响，优化结构设计参数，提高结构的抗风性能。
- **索膜结构风振响应控制措施研究**：提出索膜结构风振响应的控制策略，如增加结构的阻尼、改变结构的刚度、设置辅助支撑等。研究被动控制措施（如阻尼器、调谐质量阻尼器等）在索膜结构风振响应控制中的应用效果，分析其工作原理和控制机理。探讨主动控制措施（如主动拉索控制系统、主动空气动力控制系统等）在索膜结构风振响应控制中的可行性和有效性，为实际工程应用提供参考。通过数值模拟和实验研究，对比不同控制措施对索膜结构风振响应的控制效果，评估控制措施的经济性和实用性。

### 1.3.2 研究方法

为实现上述研究内容，本研究将综合采用以下研究方法：

- **理论分析方法**：运用结构力学、动力学、弹性力学等相关理论，推导索膜结构在风荷载作用下的动力学方程，建立风振响应分析的理论模型。通过对理论模型的分析，研究索膜结构的振动特性和响应规律，为数值模拟和实验研究提供理论指导。
- **数值模拟方法**：利用有限元软件（如 ANSYS、ABAQUS 等）建立索膜结构的数值模型，进行结构力学分析。采用 CFD 软件（如 FLUENT、CFX 等）模拟索膜结构周围的风场分布，实现流固耦合分析。通过数值模拟，可以快速、准确地得到索膜结构在不同工况下的风振响应结果，分析各种因素对结构响应的影响，为索膜结构的抗风设计提供参考。
- **案例研究方法**：选取实际的索膜结构工程案例，收集相关的设计资料、施工记录和现场监测数据

。对案例进行详细的分析，研究索膜结构在实际强风作用下的风振响应情况，验证理论分析和数值模拟的结果。通过案例研究，还可以总结实际工程中索膜结构抗风设计和施工的经验教训，为今后的工程实践提供借鉴。

- **实验研究方法**：设计并制作索膜结构的缩尺模型，进行风洞试验，测量模型在不同风速和风向角下的风振响应。通过风洞试验，可以直接获取索膜结构在风荷载作用下的响应数据，验证数值模拟结果的准确性，同时也可以研究一些在数值模拟中难以考虑的因素对结构响应的影响。此外，还可以进行现场实测，对实际索膜结构在强风作用下的风振响应进行监测，获取真实的结构响应数据，为研究提供更可靠的依据。

## 二、索膜结构风振响应的基础理论

### 2.1 索膜结构概述

索膜结构作为一种新型的空间结构形式，由高强度柔性薄膜材料与索、支撑结构等共同组成，通过索的拉力和膜材的张力来抵抗外荷载，形成稳定的曲面结构。其基本构成要素主要包括膜材、索和支撑结构。膜材是索膜结构的主要受力和覆盖材料，常用的膜材有聚酯纤维（PET）、聚四氟乙烯（PTFE）和乙烯-四氟乙烯共聚物（ETFE）等。其中，PTFE膜材具有优异的耐久性、自洁性和防火性能，广泛应用于永久性建筑；ETFE膜材则以其高透光性、轻质和良好的可塑性，常用于对采光要求较高的建筑项目，如“水立方”的外墙和屋顶就采用了ETFE膜材，展现出独特的视觉效果和良好的建筑性能。索在索膜结构中起着关键的传力作用，通常采用高强度钢索，如平行钢丝索、钢绞线等，它们能够承受较大的拉力，将膜材所受的荷载传递到支撑结构上。支撑结构则为整个索膜体系提供稳定的支撑，常见的支撑结构有钢结构、混凝土结构等，其形式多样，可根据建筑的功能和造型需求进行设计，如桅杆、拱、框架等。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/628056074047007051>