

Dynamic Response of Membrane Structure Under Wind Load

Li Mingyang¹, Xu Zhihong²

¹Department of Architecture and Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China

²School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China

Email address:

15651880719@163.com (Li Mingyang)

To cite this article:

Li Mingyang, Xu Zhihong. Dynamic Response of Membrane Structure Under Wind Load. *Science Discovery*.

Vol. 9, No. 6, 2021, pp. 394-400. doi: 10.11648/j.sd.20210906.30

Received: October 27, 2021; **Accepted:** November 24, 2021; **Published:** December 2, 2021

Abstract: In this paper, the dynamic response of ship-borne membrane radome under the impact of wind was investigated. Based on Computational Fluid Dynamics (Computational Fluid Dynamics), a fluid-structure coupling model was established, to simulate the membrane structure impacted by wind. The influence of the initial velocity of wind, the angle of incidence, the initial pretension of the membrane structure and the tensile shape of the membrane surface on the maximum impact deformation and maximum impact stress of the membrane surface are analyzed. According to the experimental analysis, under the same prestress, the greater the wind speed in the wind field, the more obvious the deformation of the membrane structure; Under the same impact, the greater the pretension, the stronger the impact resistance of the film structure; Under the same prestress, the greater the wind speed in the wind field, the more obvious the deformation of saddle membrane structure; Under the same impact and pretension, the saddle film surface has stronger impact resistance than the plane film surface.

Keywords: Wind Load, Computational Fluid Dynamics, Orthotropic Membrane, Smooth Particle Hydrodynamics, Simulation

膜结构在风载作用下的动力响应

李明阳¹, 徐志洪²

¹南京理工大学建筑与土木工程系, 南京, 中国

²南京理工大学理学院, 南京, 中国

邮箱

15651880719@163.com (李明阳)

摘要: 本文针对舰载膜结构雷达罩在风载作用下的动力响应问题进行研究。采用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics) 数值仿真研究方法建立了风载作用张拉膜结构的流固耦合数值计算模型, 分析了膜结构在不同风速、风速角、膜面初始预张力以及膜材张拉形状对膜面最大变形及最大冲击应力的影响规律。分析数据得到, 在施加相同的预应力情况下, 风场内风速越大薄膜结构变形更加明显; 在相同的冲击下, 预张力越大的薄膜结构抗冲击能力越强; 在施加相同的预应力情况下, 风场内风速越大马鞍形薄膜结构变形也更加明显; 在相同的冲击和预张力下, 马鞍形薄膜表面比平面薄膜表面具有更强的抗冲击性。

关键词: 风载荷, 计算流体力学, 流固耦合, 正交各项异性薄膜, 数值仿真

1. 引言

膜结构雷达罩作为雷达保护的一种新型结构,因满足减舰载远程探测雷达,对于质量轻、覆盖面大、透波效果好的需求,而广泛应用。舰船高速行驶过程中,雷达罩正面受压,在行驶速度和海风的共同作用下,雷达罩会产生过大的形变,从而破坏内部结构,影响天线工作性能,因此研究雷达罩在风载作用下的动力响应尤为重要。



图1 马鞍形雷达罩膜结构。

张拉膜结构的风荷载特性研究主要通过风洞试验、理论分析、数值模拟以及现场实测等手段实现。而风洞试验和数值模拟则是应用最广泛的方法。刘长江[1-2]等人研究了正交各向异性鞍形膜在非线性的风载作用下的流固耦合现象和稳定性,应用有限元数值模拟研究了四边固定预拉伸正交各向异性织物在动力冲击下的非线性振动。孙晓颖等[3]基于底部封闭式鞍形屋盖结构表面平均风荷载的数值模拟,系统性研究了鞍形屋面结构自身和来流特性等因素对平均风压的影响,提取了屋面分区体型系数。向阳[4]等进行了弹性模型风洞实验,模型选取张拉膜结构的伞形和马鞍形形态,实验中通过改变矢跨比、预张力、风速、风向角和边界等条件对张拉膜结构的动力特征进行了分析。Glück、Halfmann[5]运用弱耦合算法,模拟了膜结构在 10m/s 风速下的稳态变形,对流体计算域求解分析时引入了湍流模型(例如 $k-\varepsilon$ 、 $k-w$ 等),通过有限体积法求解了 $N-S$ 方程,同时通过有限元法对膜结构计算模型的运动方程进行了求解分析,只是该求解方法只能分析耦合场的拟静态响应[6]。但是前人对于张拉膜作为保护结构抵抗风荷载的流固耦合研究较少。

本文研究了张拉膜结构在风载作用下的流固耦合响应,分析了在匀速风场下不同风速、不同风速入口角度、不同膜面预张力以及在马鞍形膜面结构下的动力响应及最大形变,得到数据为舰载膜结构雷达罩提供理论依据。

2. 数值计算原理及模型描述

2.1. 计算流体力学简述

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)是以计算机为模拟工具,用一定计算技术求解流体

力学复杂分体的离散化数值解法[风雨作用]。CFD可看成是基本守恒方程控制下对流体流动过程的数值模拟分析,包括以下三个基本守恒方程:质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。以上述方程为基础进行数值模拟求解,能够求解复杂流场环境下基本物理量的变化的规律。三个基本守恒方程公式如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 (i=1,2,3) \quad (1)$$

其中 ρ 表示空气密度; $u_i (i=1,2,3)$ 表示速度在直角坐标系中 x, y, z 三个方向上的分量。此方程主要用来描述流体密度变化特征。

动量守恒方程

$$\rho \frac{du_i}{dt} + \sum_{j=1}^3 \frac{d\rho}{dx_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu \left(s_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sum_{k=1}^3 s_{kk} \right) \right] + \rho F_i \quad (2)$$

其中 F_i 为单位质量的体力; ρ 为单位体积上的表面力; s_{ij} 为流体运动的变形率张量; μ 表示流体的动力粘性系数。上述方程表述的是物体承受的合力为物体加速度与质量的积,可解释为流体承受的力等于物体动量变化率。因此,只要能得到合力,就可获得动量守恒方程。合力包括体积力和面积力。

能量守恒方程

$$\frac{d}{dt} \left(h + \frac{1}{2} u_i u_i \right) = Q + u_i F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (2m_{ij} u_i)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

其中 h 为微元体的焓; Q 是在单位时间内加给单位质量流体的热能; q_i 为在单位时间上按照坐标轴方向从微元体一侧的单位面积上流入的热量; m_{ij} 为粘性应力张量,对于不可压缩流体: $m_{ij} = 2\mu s_{ij}$ 。能量守恒方程是经典的热力学定理,流体在单位质量上的总能 E 包括内能和动能。合力所做功、热能传导、由化学反应所引发的热均能引起流体总能的改变。

2.2. 计算流体力学简述

运用CFD数值模拟方法来求解流体方程分为四步:

- (1)根据实际工程需要情况建立数值模拟计算模型。
- (2)选取较高精度的求解计算方法,选取针对结构控制方程的求解方法。
- (3)设置模型所需控制的参数并对结构的数值模拟计算进行求解分析。其中包括结构物理模型的建立、结构实际属性的赋予、流体计算模型的建立、网格划分、边界条件和初始条件的选取等。
- (4)得到模拟计算结果针对具体实验进行数据对比分析。

2.3. 双向流固耦合仿真模型

本文采用的仿真模型分为固体区域和包裹着固体区域的流体区域,其中固体区域主要是雷达罩模型,流体区域内可设置风以不同速度、角度流入。

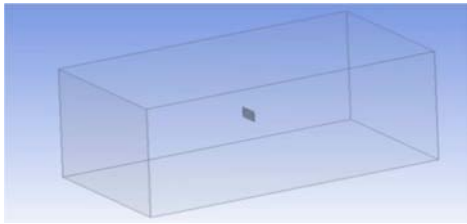


图2 流场区域与深色固体区域。

固体区域内的雷达罩为聚四氟乙烯（PTFE）建筑用膜，材料尺寸为6m×9m，厚度为1.2mm的矩形，固定在矩形框架上，并通过施加预张力加强结构强度，形成预应力张拉膜结构。

在数值仿真中，固定雷达罩结构四边，雷达罩近似为正交各项异性薄膜。雷达罩采用实体单元，使用Engineering Data编辑材料属性，如下表1：

表1 PTFE膜材参数。

名称	$E_x/(Mpa)$	$E_y/(Mpa)$	$E_z/(Mpa)$
PTFE膜材	1400	900	1150
	$G_x/(Mpa)$	$G_y/(Mpa)$	$G_z/(Mpa)$
	28	18	23
	$\rho_0/(kg/m^3)$	P	
	1700	0.3	

2.4. 几何模型及边界条件

使用上文方法建议如下图所示的几何模型。其中流场区域入口尺寸为70m×70m，通道长为100m，近似体积为 $4.7 \times 10^4 m^3$ 。平面膜采用900mm×600mm×1.2mm的实体模型，马鞍形模型为900mm×600mm×1.2mm，弧顶高度60mm（未施加预应力），最终膜材结构通过施加预应力形成。两种雷达罩模型均安置在管道距离入口处40m。

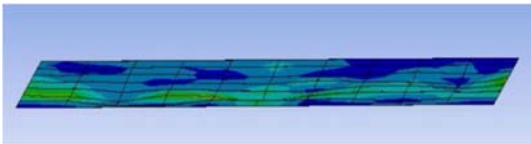


图3 0.2s时受风载作用平面膜位移云图。

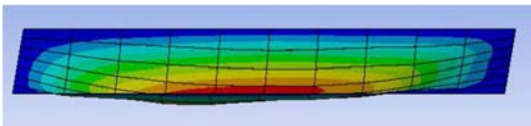


图4 受风载作用平面膜位移最大时刻位移云图。

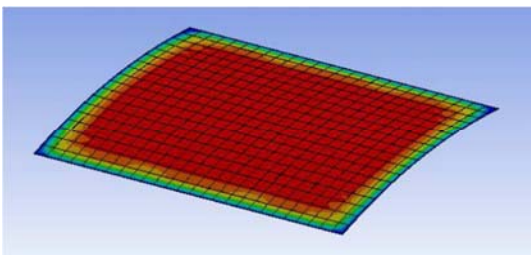


图5 马鞍型膜施加预应力0.2s位移云图。

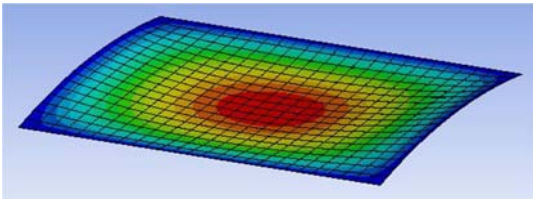


图6 马鞍型膜施加预应力稳定后位移图。

3. 仿真计算结构分析

使用Ansys Workbench进行20m/s风场下膜结构双向流固耦合分析计算后，得到膜结构的最大位移以及最大面内应力。图8、图9所示为未加出初始预应力，风速为20m/s，垂直吹向膜面时的最大位移点变形和膜面应力的时程曲线。

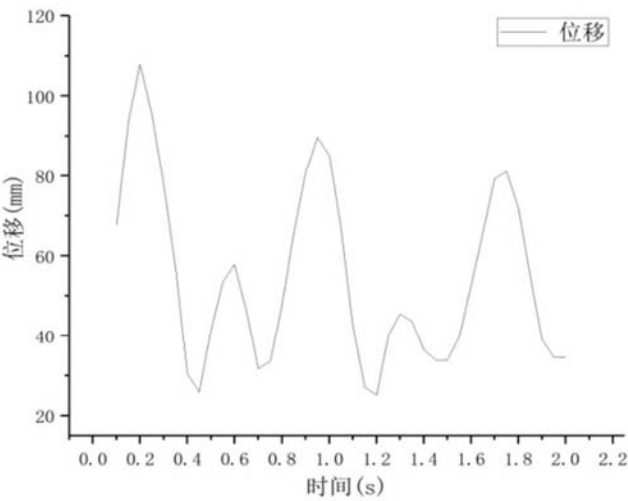


图7 无初始预应力平面膜在20m/s风速下的位移时程曲线。

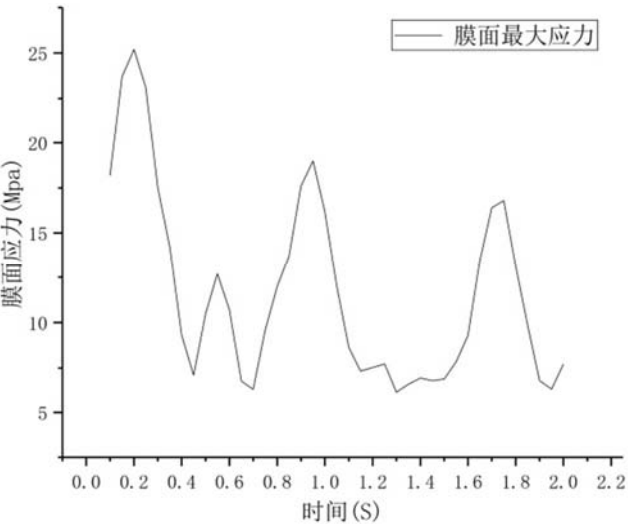


图8 无初始预应力平面膜在20m/s风速下的膜内应力时程曲线。

3.1. 风场速度对膜结构最大面内应力及最大变形的影响

设置雷达罩膜结构初始应力为10Mpa，分别设置流场区域风场速度为5m/s，7.5m/s，10m/s，12.5m/s，15m/s，

17.5m/s, 20m/s, 这七种流场速度冲击雷达罩薄膜, 得到雷达罩膜结构最大位移变形和膜面应力的时程曲线。

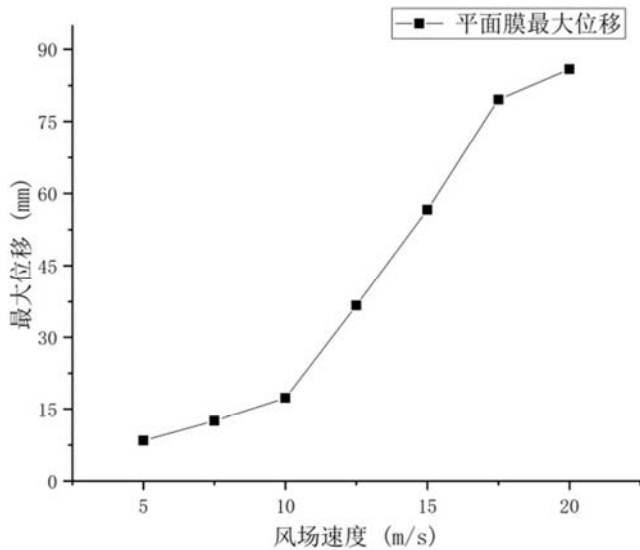


图9 平面膜结构在不同风速下的最大位移。

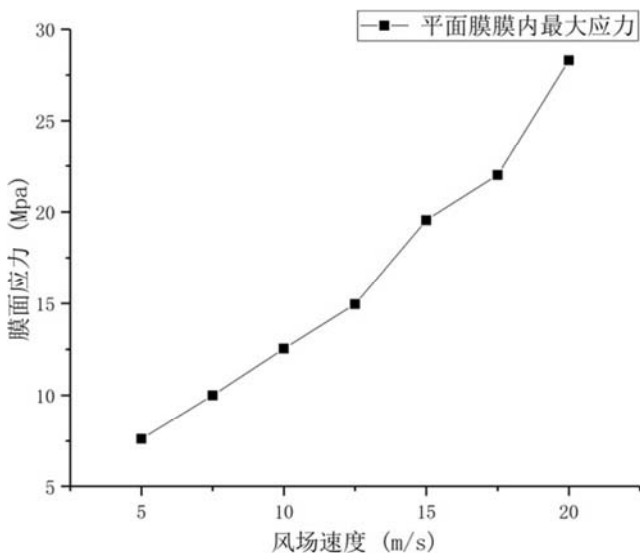


图10 平面膜结构在不同风速下的最大应力。

分析上图, 雷达罩膜结构在10Mpa预应力的作用下, 在抵抗不同风速条件的作用下, 膜结构的最大位移随着场风速的增加而增大; 膜结构的膜面最大应力随着风速的增加而增加。

3.2. 膜结构预张力对雷达罩膜结构最大变形和膜面最大应力的影响

在流畅区域风场速度恒定为20m/s的情况下, 通过改变膜材温度, 设置膜内初始预应力, 分别施加0mPA至50Mpa, 间隔为5Mpa的10组预应力, 得到雷达罩膜结构的最大位移变形和面内最大应力变化, 计算比较初始膜面应力与预应力加强情况下膜面应力的变化。

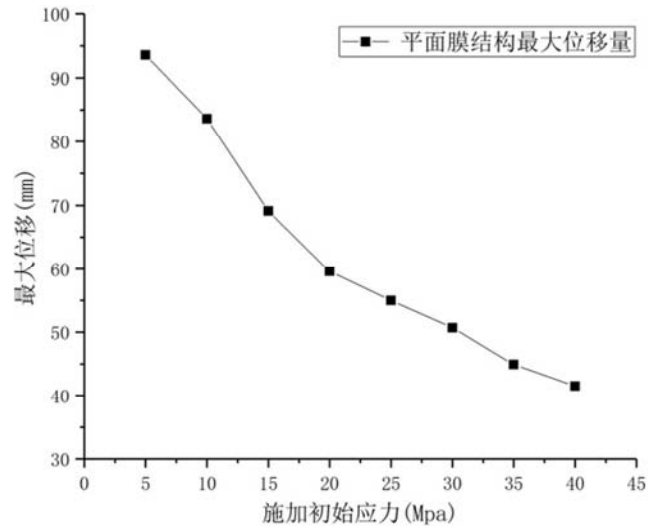


图11 平面膜结构在不同预应力下的位移图。

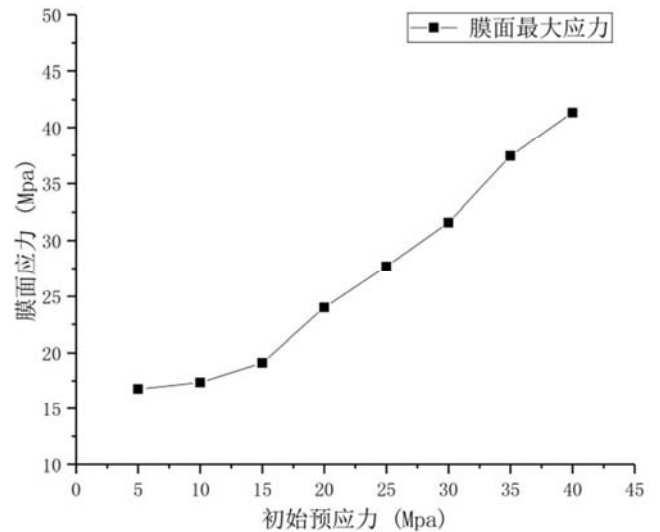


图12 平面膜结构在不同预应力下的应力图。

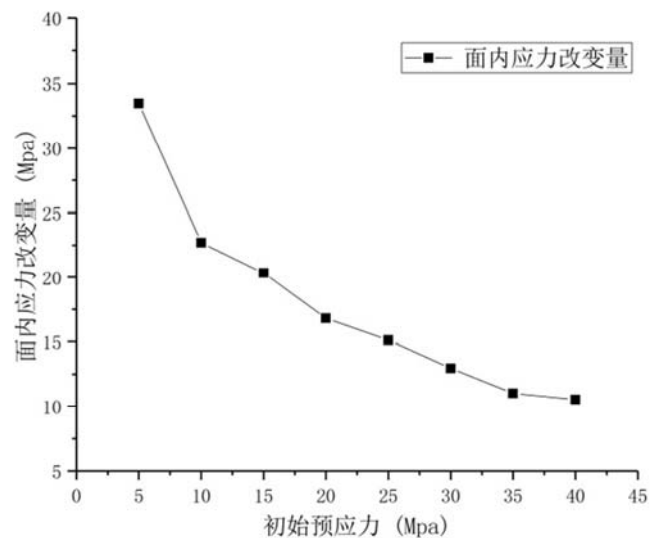


图13 平面膜结构在不同预应力下的膜面应力改变量。

在相同风速的风场作用下变化膜结构初始应力条件，随着初始预应力的增大，平面膜结构抵抗风载作用的能力得到了相应的提高，风载作用产生的最大位移逐渐减小，膜面预应力在30Mpa左右时，最大位移降低到了50mm，但同时继续增加膜结构内应力减少最大位移的效果开始减弱，反而会增加冲击后膜内的最大应力，使得雷达罩保护结构可靠度降低，可能危害雷达构件。

从膜内最大应力来看，增加膜结构初始预应力可以显著降低结构受风载作用产生的内应力，还可以限制结构的最大位移。

3.3. 风场风速角度对膜结构膜内最大应力及最大变形影响

风场风速为20m/s，风场风速角分别选取垂直膜面，与膜面法向成15度夹角，30度夹角，45度夹角四种入射角度，来分析舰艇上雷达罩抵抗不同方向角度风载冲击，得到雷达罩膜结构的最大位移变形和最大膜面应力变化曲线。



图14 通过速度坐标分量设置风速角。

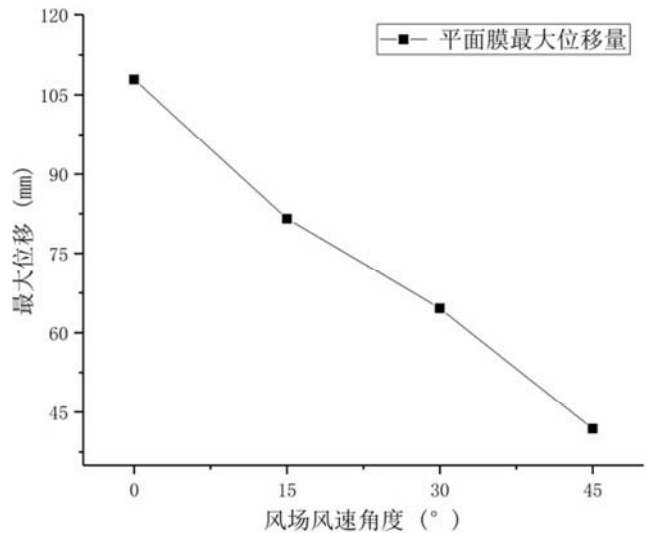


图15 平面膜结构在不同风速角下的位移变化。

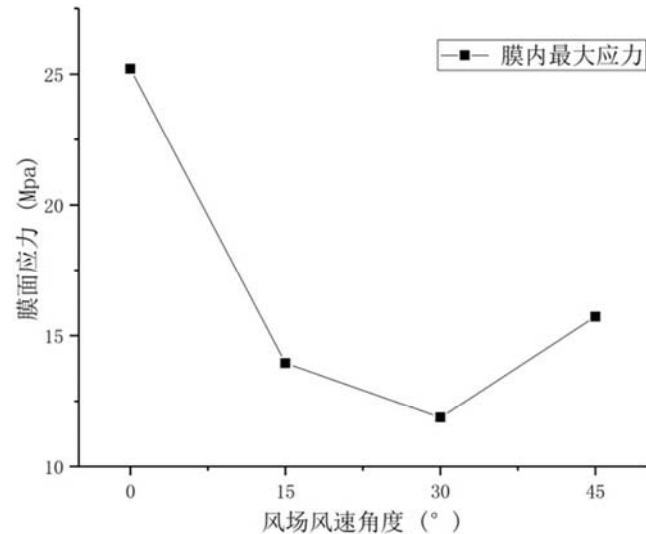


图16 平面膜结构在不同风速角下的应力变化。

在相同风场速度与膜内初始应力条件下，风场入口角度与平面膜法线之法向之间的夹角越大，产生的荷载越小，导致结构的变形和内应力也减小。

3.4. 膜面结构形式对膜结构面内最大应力及最大变形的影响

马鞍形结构的雷达罩膜是通过施加初始预应力成形，施加的初始预应力越大，马鞍形膜结构中心位置下降幅度越大，因此马鞍形膜结构受风载冲击的最大变形要消去初始变形部分，数字仿真实验中流场区域风速设定为30m/s，对平面及马鞍形膜结构在不同与张力情况下进行变量对比实验。

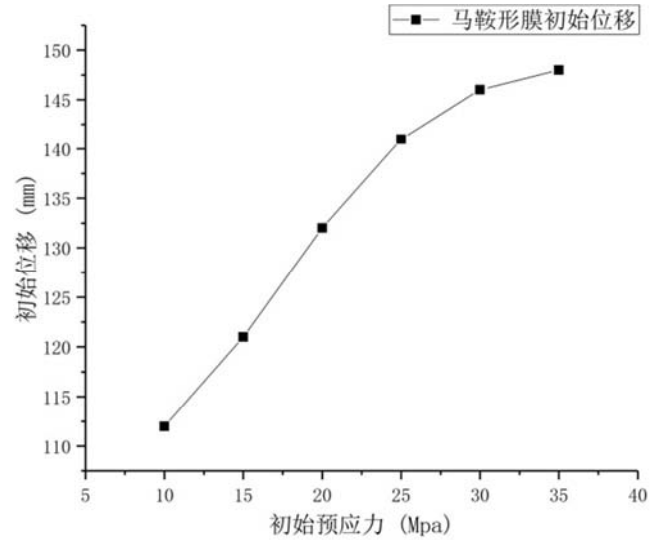


图17 马鞍型膜在不同预应力下初始位移量。

在相同风场风速作用下，改变两种膜结构的初始预应力可以看出，在施加预应力小于30Mpa的情况下平面膜的抗变形能力优于马鞍型膜，但同时发现增加膜面预应力对马鞍型膜结构的抵抗风载能力增强更加明显，在10Mpa的情况下两者的变形量相差60mm，增加预应力到30Mpa时，

两种结构抵抗风载所产生的的变形量已经相差无几。在膜面应力变化方面,鞍形膜的可以说是具有非常大的优势产生的膜内最大应力和应力变化幅度均低于平面膜。

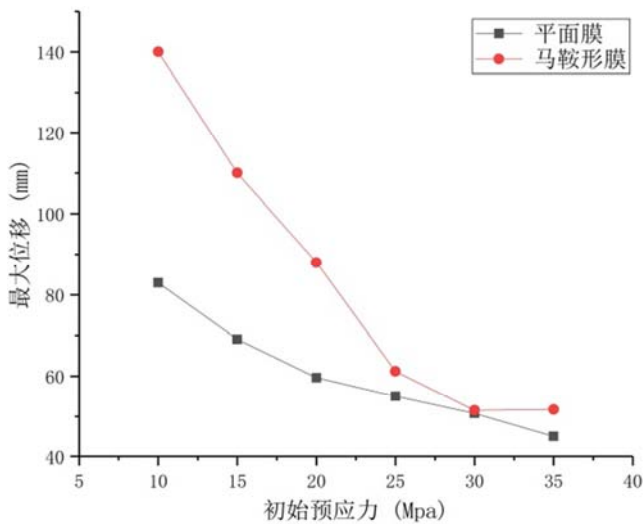


图18 不同张拉膜结构最大位移。

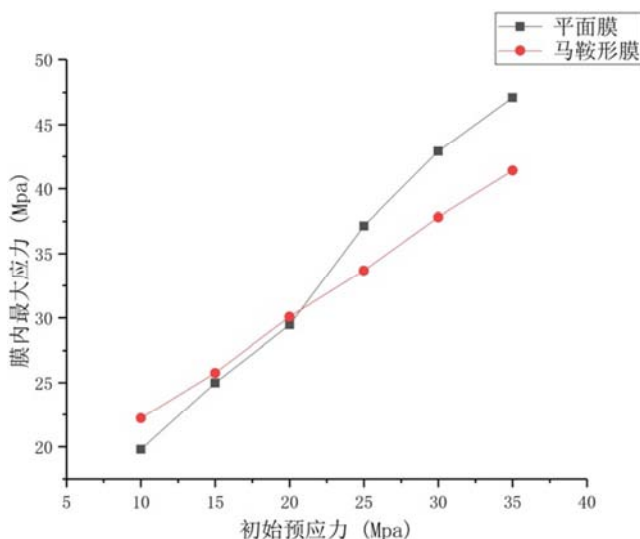


图19 不同张拉膜结构的膜内应力。

4. 结论与展望

4.1. 主要结论

采用数值模拟的方法对舰载雷达罩膜结构抗风载作用进行了数值模拟计算,利用Ansys workbench平台以及CFD数值计算方法对模型进行分析,从仿真的实验数据并结构膜结构自身材料属性得到以下几点结论:

- 1) 本文使用CFD方法对PTFE膜材进行了双向流固耦合动力学模拟和分析,提供一种新的建模思路;
- 2) 提升膜结构的初始应力可以明显增强其抵抗风载的能力,膜面内初始应力越大,越有抵抗较强变形的能力,在应对相同风载作用时,膜内应力的增加量也会减少。但由于提升膜面初始预应力会导致膜材抵抗冲击后产生的总应力增加。因此在实际应用

中,需要综合考虑PTFE膜材的破坏机械以及雷达正常工作条件下允许的最大变形来确定其初始预应力。

- 3) 张拉膜结构正面抵抗风载作用时产生的最大位移与面内应力相比其他风速角度都要大。实际使用情况更加复杂,需要充分考虑膜材多方向抗风的情况,充分考虑最不利情况。
- 4) 比较马鞍形膜结构与平面膜结构,无论是在膜结构面内应力大小,还是面内应力变化幅度方面,鞍形膜结构都表现出更强的稳定性。同时在抵抗风载抗变形方面,也展现出巨大的潜力。但由于马鞍形膜结构的制作困难,在实际应用时需要综合考虑马鞍形膜结构制作的成本,折中选形。

4.2. 未来研究展望

本文通过数值模拟的方法对正交异性矩形、马鞍形两种形状膜材在风载下的动力响应进行研究,本文研究的内容可对实际问题提供参考,但是在研究过程中任有许多问题需要进一步探讨。

采用Ansys Workbench对膜材进行数值模拟的研究中,对风场内风速设定均为恒速,可以通过软件内UFD文件编写对风场内风速进行控制,使得风场情况更加复杂,更贴近实际现实情况。此外,由于膜材在实际应用中通常同时受到浪载和风载的作用,后续可从本文研究思路出发,对风浪共同作用下的膜结构响应进行下一步研究。

参考文献

- [1] Liu Changjiang,Deng Xiaowei,Liu Jian,et al.Impact-induced nonlinear damped vibration of fabricmembrane structure: Theory, analysis, experiment and parametric study [J]. 2019.
- [2] Liu Changjiang,Deng Xiaowei, Zheng Zhoulian. Nonlinearwind-induced aerodynamic stability of orthotropic saddle membrane structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 164: 119-127.
- [3] 孙晓颖, 武岳, 沈世钊. 鞍形屋盖平均风压分布特性的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 7-14.
- [4] 向阳,沈士钊,赵臣.张拉式薄膜结构的弹性模型风洞实验研究 空间结构. 1998,4(3):31-36.
- [5] M.Glück, M. Breuer, F. Durs, A. Halfmann, E. Rank. Computation of Fluid Structure Interaction on Lightweight Structures Wind Engineering and Aerodynamics, 2001, 89 (14-15): 1351-1368.
- [6] Delapierre, Mélanie, Lohaus SH, Pellegrino S.Nonlinear vibration of transversely-loaded spinning membranes [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 427: 41-62.
- [7] Atai A, Steigmann D J. Numerical analysis of wrinkled, anisotropic, nonlinearly elastic membranes [J]. Mechanics Research Communications, 2014, 57:1-5.
- [8] 郭金星.球面网壳结构的风荷载数值模拟及主动控制研究.[D]西安建筑科技大学,2015.

- [9] E. C. C. Choi. Simulation of Wind-Driven Rain around A Building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993 (52).
- [10] Xiangwei Dong, Xiaoping Huang, Jianlin Liua. Modeling and simulation of droplet impact on elastic beams based on SPH [J]. *Europea nJournal of Mechanics/ASolids*, 75 (2019) 237-257.
- [11] 李世杰,王艾伦,刘向军等.基于SPH算法土壤水射流冲击演化数值仿真研究[J].*计算机仿真*,2019,36(03):243-247+384。
- [12] Huabin Shi, Pengfei Si, Ping Dong, Xiping Yu. A two-phase SPH model for massive sediment motion in free surface flows [J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 129.
- [13] 周楠,王金相,谢君等.两种数值算法在球形弹丸侵彻复合靶中的应用[J].*南京理工大学学报*,2014,38(02):210-215+221。
- [14] Lu Wanga, Fei Xua, Yang Yanga. SPH scheme for simulating the water entry of an elastomer [J]. *Ocean Engineering*, 178 (2019) 233-245.
- [15] 赵晓宁,何勇,张先锋等.A3钢抗高速杆弹侵彻的数值模拟与实验研究[J].*南京理工大学学报*,2011,35(02):164-167。
- [16] 金鑫.张拉膜结构流固耦合的数值模拟研究.[D].*哈尔滨工业大学*,2012。
- [17] Murakami. On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1995, 54: 191-211.