

文章编号: 1007-7294(2026)04-0613-14

冰区新型导管架平台锥体结构抗冰性能研究

沈中祥¹, 雍允豪¹, 蒋 印^{1,2}, 宁肸贤¹, 张 健¹, 刘仁伟¹

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100; 2. 深海技术科学太湖实验室连云港中心, 江苏 连云港 222006)

摘要: 针对传统导管架平台锥体结构强度冗余大、碎冰堆积严重且冰激振动强烈等问题, 为降低导管架平台碎冰堆积、冰激振动造成的结构损伤, 本文设计了一种新型导管架平台锥体结构。以 JZ20-2NW 单桩腿平台为研究对象, 基于 LS-DYNA 软件, 采用 DEM-FEM 耦合方法, 模拟了海冰与传统及新型锥体结构的相互作用过程, 对比分析了海冰破坏模式、冰载荷及冰激振动和结构响应。结果显示, 新型锥体结构能够有效抑制冰块攀爬后的堆积, 提升碎冰滑移效率, 有效降低冰载荷, 减小平台结构冰激振动, 提高锥体结构安全性能。研究表明, 新型锥体结构对导管架平台抗冰性能提升效果显著, 可为冰区平台锥体结构设计提供理论依据。

关键词: DEM-FEM 耦合; 导管架平台; 冰激振动; 冰载荷

中图分类号: O32 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.04.010

Research on ice-resistant performance of a new jacket platform cone structure in ice regions

SHEN Zhong-xiang¹, YONG Yun-hao¹, JIANG Yin^{1,2}, NING Xi-xian¹, ZHANG Jian¹, LIU Ren-wei¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science Lian Yun Gang Center, Lianyungang 222006, China)

Abstract: To address the issues of excessive structural redundancy, severe ice debris accumulation, and strong ice-induced vibrations of traditional jacket platform cone structures, a novel jacket platform cone structure design is proposed. This design aims to reduce structural damage to jacket platforms caused by ice accumulation and ice-induced vibrations. Using the JZ20-2NW single-pile leg platform as the research object, the DEM-FEM coupling method based on LS-DYNA software was employed to simulate the interaction between sea ice and both traditional and novel cone structures. A comparative analysis was conducted on ice failure modes, ice loads, and the platform's ice-induced vibration responses and structural responses. The results indicate that the novel cone structure can effectively inhibit ice debris accumulation after climbing, improve ice removal efficiency, decrease ice loads, reduce the ice-induced vibrations of the platform, and improve the safety performance of the cone structure. The study shows that the innovative cone structure demonstrates significant advantages in improving the ice-resistant performance of jacket platforms, providing a theoretical basis for optimizing platform structures in ice regions.

收稿日期: 2025-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52201323)

作者简介: 沈中祥(1985-), 男, 博士, 副教授;

刘仁伟(1992-), 男, 博士, 讲师, 通讯作者, E-mail: rwliu2000@163.com。

Key words: DEM-FEM coupling; jacket platform; ice-induced vibration; ice load

0 引言

随着人类对海洋能源的不断开发,开采范围日益向高纬度海域转移。海冰逐渐成为威胁海洋结构物安全的主要因素,冰区海洋结构物的设计也面临着越来越多需要考虑的实际工程问题。这对冰区海工结构的防护设计及破冰性能提出了更高的要求。我国渤海海域进行资源开发利用的过程中,在油气开采平台的桩腿上加装抗冰锥体结构能够有效地降低冰载荷幅值^[1-2],避免因海冰持续的撞击所引起的强烈的冰激振动现象。

现有典型抗冰锥体结构主要有四桩腿平台 JZ20-2MUQ、JZ9-3 GCP 等,单桩腿平台 JZ20-2NW、JZ9-3 WHPE 等。在进行海洋平台抗冰锥结构设计安装时不仅要考虑结构的抗冰性能^[3]和对平台的减振性能,还需考虑抗冰锥体的安装成本。抗冰锥体大部分采用正、倒锥组合体,锥体结构采用 CCS EH36 级高强度船用钢板,结构自重约占导管架附属结构自重的 40%~50%^[4]。在锥体结构冰激振动特性的研究中,锥体结构强度均能满足各种冰况的撞击,锥壳板的屈服强度远大于海冰撞击所产生的最大应力^[5],这导致锥体结构自身重量较大,成本过高,结构强度的冗余度过大等问题^[6]。不仅如此,经过国内外学者长期现场观测发现,海冰与抗冰锥体相互作用的过程中仍然存在着显著的动力问题^[7-8],满足极值静冰荷载要求的冰区海上风电基础在动冰力下仍有疲劳失效风险^[9]。海冰与锥体作用发生破碎时,海冰始终与锥壳板接触,锥壳板的设计形式从根本上决定了锥体结构对冰载荷以及导管架冰激振动的削减效果^[10],因此结合现有抗冰锥体的不足之处,对锥体结构锥壳板形式的研究具有非常重要的现实意义。

近年来,离散元法 DEM(Distinct Element Method)作为一种适用于分析非连续介质力学行为的数值模拟方法,由于其具有模拟脆性材料破碎的独特优势被广泛应用于海冰工程领域^[11]。随着计算效率以及精度的不断提高,为分析海洋结构物冰激振动特性,海冰采用 DEM,海洋结构物采用 FEM 计算的 DEM-FEM 耦合方法得到了不断发展^[12]。DEM-FEM 耦合方法可用于脆性连续体的断裂、散体颗粒变形与破碎过程的模拟^[13-14]。王帅霖等^[5]采用基于 GPU 并行的 DEM-FEM 耦合方法,通过结构冰载荷、振动响应及冰压力和应力分布对耦合模型进行验证分析。Kanatani 等^[15]采用 DEM-FEM 耦合分析方法,研究人工岛屿沉箱式海堤在地震作用下沉箱底部砂质海床冲刷变形和沉箱位移情况,并通过离心振动台试验结果验证 DEM-FEM 耦合分析方法对于沉箱式海堤冲刷变形分析的适用性。杨冬宝等^[16]基于 DEM-FEM 耦合模型,采用具有粘结破碎的球形离散单元构造海冰,采用梁单元和三角形板壳单元构造海上单桩式风机结构,模拟风机与平整冰相互作用过程,研究了不同冰速、冰厚工况下,风机结构冰载荷特点和结构振动响应能力和行为。综合分析国内外研究可以发现,导管架锥体结构形式固定,对新型结构研究不足。

本文针对冰区传统导管架锥体结构存在的结构强度冗余大、碎冰堆积严重且冰激振动强烈等问题,以 JZ20-2NW 导管架平台作为研究对象,提出新型导管架锥体结构设计方案,基于 LS-DYNA 软件,采用 DEM-FEM 耦合方法,模拟海冰与锥体结构相互作用,对比分析传统锥体结构与新型锥体结构的抗冰性能,研究不同冰-锥体接触处切面角度、水线面锥体直径等结构参数对抗冰性能的影响,为冰区平台锥体结构设计提供理论依据。

1 计算模型

1.1 海冰离散元模型

牛顿第二定律是离散元法的理论基础^[17-18],将连续结构离散为不连续结构,通过一系列满足牛顿第二定律的颗粒单元实现结构内部和结构之间运动以及力的传递作用,求解每个颗粒单元的受力和运动

状况,进而得出能够准确表征整体结构的受力和运动规律。海冰离散元颗粒单元之间的接触可看作弹簧阻尼系统,由弹簧、阻尼器、滑动摩擦器在切向方向连接,如图 1 所示。

本文采用粘结颗粒模型 BPM(Bonded-Particle Model),通过六方堆积的方法,将球体颗粒单元规则排列,从而构建海冰模型,如图 2 所示,在相邻颗粒单元之间设置粘结模型,并采用粘结键拉剪分区断裂准则对单元的粘结失效过程进行判断,从而计算连续体材料向散体的转化,实现对材料破坏过程的模拟^[19]。

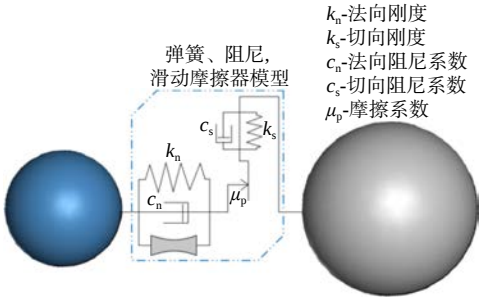


图 1 离散元颗粒单元接触模型

Fig.1 Contact model of spherical element

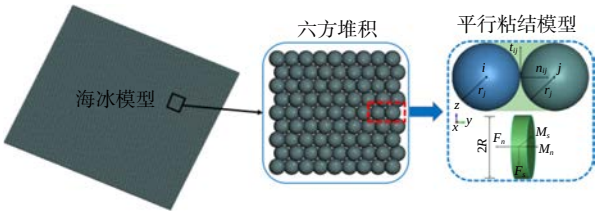


图 2 六方堆积平整冰模型

Fig.2 Leveling ice model of hexagonal accumulation

平行粘结模型既可以传递力,也可以传递力矩。当作用过程中的力超过单元间的粘结强度时,粘结关系失效,在之后接触的粒子将通过 Hertz 接触模型进行计算。平行粘结模型中根据梁的力学计算理论,单元间作用在粘结圆盘上的最大正应力与剪应力可表示为

$$\sigma_{\max} = \frac{|F_n|}{A} + \frac{|M_s|}{I}R \tag{1}$$

$$\tau_{\max} = \frac{|F_s|}{A} + \frac{|M_n|}{I}R \tag{2}$$

式中: F_n 和 F_s 分别为单元粘结面上的法向和切向作用力; M_n 和 M_s 分别为粘结面的扭矩和力矩; R 、 A 、 J 和 I 分别为颗粒接触的粘结面积、粘结面半径、极惯性矩和惯性矩^[20],其表达式如下

$$R = \frac{2r_i r_j}{r_i + r_j}, \quad A = \pi R^2, \quad J = \frac{1}{2}\pi R^4, \quad I = \frac{1}{2}\pi R^4 \tag{3}$$

海冰离散元主要计算参数见表 1。

表 1 海冰离散元计算主要参数

Tab.1 Main calculation parameters of sea ice discrete element

参数名称	符号/单位	取值	参数名称	符号/单位	取值
海冰厚度	h/m	0.3	法向粘结强度	PBN_S/MPa	0.519
海冰尺寸	$l \times b/\text{m}$	25×25	切向粘结强度	PBS_S/MPa	1.221
弹性模量	E/GPa	1.2	与结构摩擦系数	μ_w	0.15
颗粒直径	D/mm	100	粒子间摩擦系数	μ_p	0.1
粘结模量	PBN/MPa	759.1	法向阻尼系数	C_n	0.7
粘结刚度比	PBS	0.574	切向阻尼系数	C_s	0.4

1.2 结构模型

本文以渤海 JZ20-2NW 为研究对象,原型结构如图 3 所示。该平台主要由上部设备、导管架、3 个群桩以及锥体结构组成。上部结构截面为边长 12 m×12 m 的正方形,质量为 250 t,通过导管架支撑固定。单桩腿直径为 3.5 m,总长度为 29.5 m,其中水线以下长 13.5 m,水线以上为 16 m。三个群桩固定于海床内,通过 6~8 倍桩基直径与海床固定。锥体结构设置于水线面处,为正、倒锥组合结构,锥角均为 60°,最大直径为 6 m。本文的研究以正、倒锥连接处作为 0 m 水线位置。

根据 JZ20-2NW 平台结构进行有限元建模,锥体以及导管架主体均采用四边形壳单元进行建模。导管架钢材密度为 7850 kg/m^3 , 杨氏模量为 210 GPa , 泊松比为 0.3 。锥体结构采用 CCS EH36 高强度船用钢板, 许用应力为 284 MPa , 屈服强度为 355 MPa 。JZ20-2NW 平台原型结构有限元模型如图 4 所示。

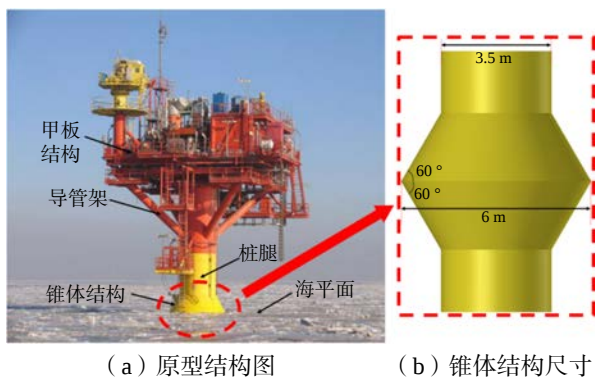


图 3 JZ20-2NW 平台原型结构

Fig.3 Prototype of JZ20-2NW platform

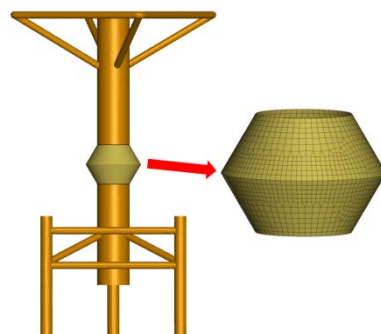


图 4 JZ20-2NW 平台原型结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of JZ20-2NW platform

2 传统导管架平台锥体结构与冰相互作用研究

针对传统锥体结构与海冰的相互作用进行数值模拟。模拟冰况为: 冰速为 0.3 m/s , 冰厚为 0.3 m , 水位为 0.5 m , 正方形冰层截面边长为 25 m , 简化桩腿与海床之间的非线性作用, 将桩腿的边界条件采用等效桩径来表示, 将固定在海床以下的桩基深度设为桩径的 $6\sim 8$ 倍^[21], 对桩基进行刚性固定限制其各个方向的自由度。导管架平台与锥体结构均采用壳单元, 锥体与桩腿连接处采用共节点连接, 其中桩腿以及锥体结构均采用四边形壳单元来构造。平台上质量均匀设置于相应质量点上, 整体模型计算中忽略水和空气的附加质量^[22]。离散元海冰与有限元平台耦合模型如图 5 所示。

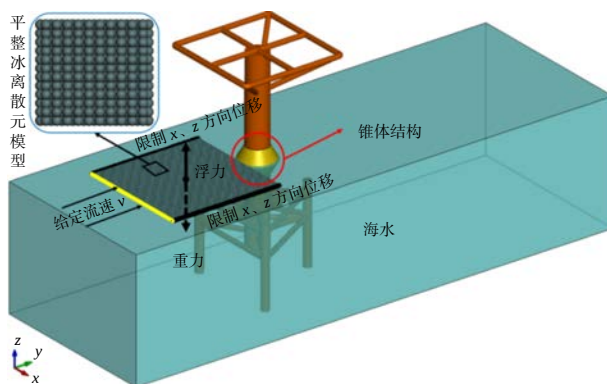
图 5 离散元海冰与有限元 JZ20-2NW 平台传统锥体结构耦合模型^[23]

Fig.5 Coupling model of discrete element sea ice with finite element JZ20-2NW platform cone structure

从海冰与导管架平台锥体结构相互作用过程、破坏模式、冰载荷特性、导管架平台冰激振动、锥体结构响应等角度分析锥体结构抗冰性能。

离散元海冰与传统锥体结构作用后的破碎状况同现场实测结果^[22] 的对比如图 6 所示, 图中深绿色粒子代表粘结键断裂的单元, 沿离散元海冰模型裂纹边缘布置, 可直接观察海冰的破碎状态, 这与实际测量结果一致。海冰与锥体结构作用时发生弯曲破坏, 碎冰在冰层推动下向锥体表面不断攀爬、堆积、滑移、二次断裂循环破碎, 呈现周期性特征。

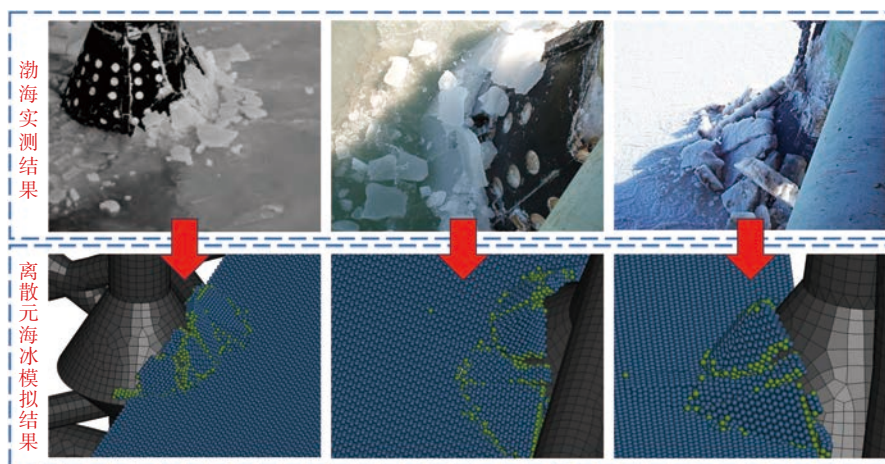


图6 离散元海冰破坏模式与实测结果对比

Fig.6 Comparison between discrete element sea ice failure mode and field measurements

传统锥体结构冰载荷时程曲线如图7所示。冰排与结构接触时冰载荷开始增大,随着冰排沿锥面发生弯曲破坏,冰载荷达到第一次峰值,冰排破碎后冰载荷迅速减小,直至冰排与锥体结构再次作用时增大至第二次峰值,随着冰排发生二次破碎,碎冰沿锥面向上攀爬,作用力小幅降低,直至碎冰堆积最严重时冰载荷达到第三次峰值,随后碎冰滑移随海流飘走,冰载荷减小,呈现周期性特征,与现场实测以及实验结果相吻合^[24]。

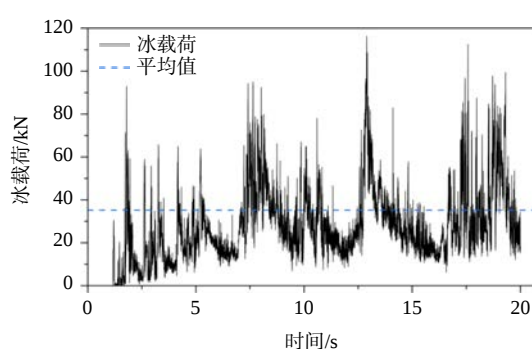


图7 传统锥体冰力曲线

Fig.7 Curve of traditional cone ice force

导管架平台冰激振动响应如图8所示。振动加速度模拟结果在 $-0.3 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 之间变化,且加速度曲线呈对称分布,与实测结果^[24]相一致。如图8(b)所示,振动位移起初变化较小,随着冰层连续挤压位移逐渐增大,上下移动区间在 $-2 \sim 4 \text{ mm}$ 之间,振动区间最大值为 5.2 mm 。

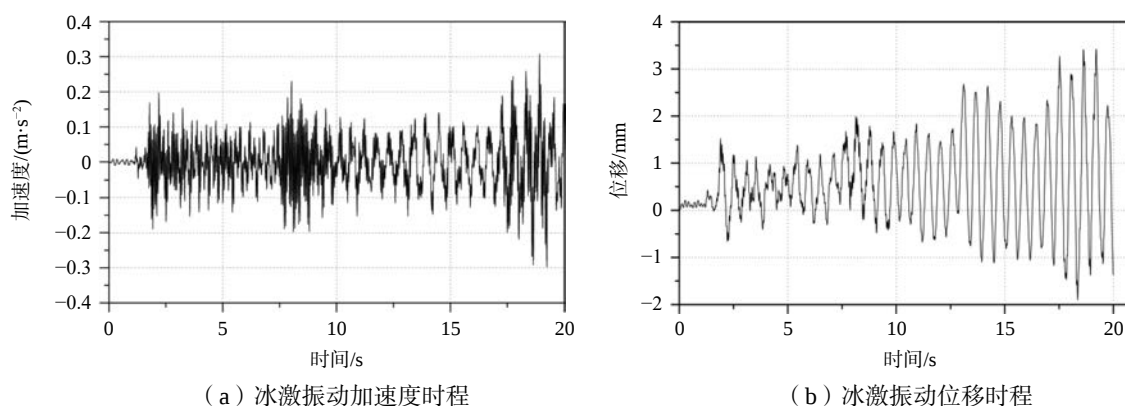


图8 传统锥体结构冰激振动响应

Fig.8 Ice-induced vibration response of traditional cone structure

传统锥体结构锥壳板应力时程曲线以及应力云图如图9所示。海冰撞击锥壳板产生的应力表现出周期性,与冰载荷变化周期相似。海冰与锥壳板作用时,锥壳板表面海冰接触处压力开始逐渐增大,

随着海冰的移动,海冰发生弯曲破坏并发生断裂,此时锥壳板压力达到最大值,随之开始下降。断裂后的冰块在后续冰排的作用下沿锥壳表面向上攀爬、滑移,锥壳板压力降到最低。

由传统导管架平台锥体结构与冰相互作用计算结果可见,上锥面碎冰堆积严重,导管架平台冰激振动加速度幅值达到了 60 cm/s^2 ,位移区间达到 5.2 mm ,平台存在管线泄漏、法兰松退的风险。而海冰撞击锥体结构产生的最大应力为 131.1 MPa ,远小于锥体结构所用钢的许用应力 284 MPa ,传统锥体结构壳板的结构强度冗余大,存在改进的空间。

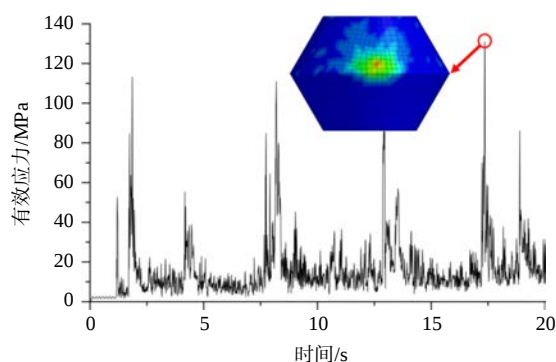


图9 传统锥体应力变化情况

Fig.9 Stress variation of traditional cone

3 新型导管架平台锥体结构与冰相互作用研究

3.1 新型导管架平台锥体结构设计

针对传统导管架平台锥体结构自重、碎冰堆积严重及冰激振动强烈问题,本文对锥体结构的锥壳板形式进行优化设计。由于海冰与锥体相互作用以及发生破碎后的碎冰堆积过程中,海冰始终与锥壳板接触并挤压,因此对锥壳板的抗压强度要求较高。以降低结构自重、抑制碎冰堆积及降低平台结构冰激振动为目的,将锥壳板设计为抗压强度更高的带有弧度的锥面结构,且正倒锥体对称布置,如图10所示。

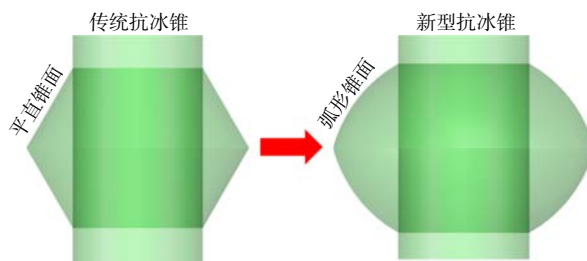


图10 JZ20-2NW 锥壳板形式设计

Fig.10 Design of JZ20-2NW conical shell plate forms

海冰的破坏模式与锥体结构的锥角有关:当锥角小于 70° 时,海冰的破坏模式为弯曲破坏,冰载荷变化缓慢;当锥角增大到 $70^\circ \sim 85^\circ$ 之间时,海冰的破坏模式为挤压破坏,冰载荷显著增大^[25]。由于新型弧面锥壳板表面带有向外扩展的弧度,海冰与锥壳板作用处切角明显会比传统锥体锥壳板作用处锥角大 ($\alpha < \beta$),将导致海冰的破坏模式变为挤压破坏,导致冰载荷大幅提高,如图11所示。

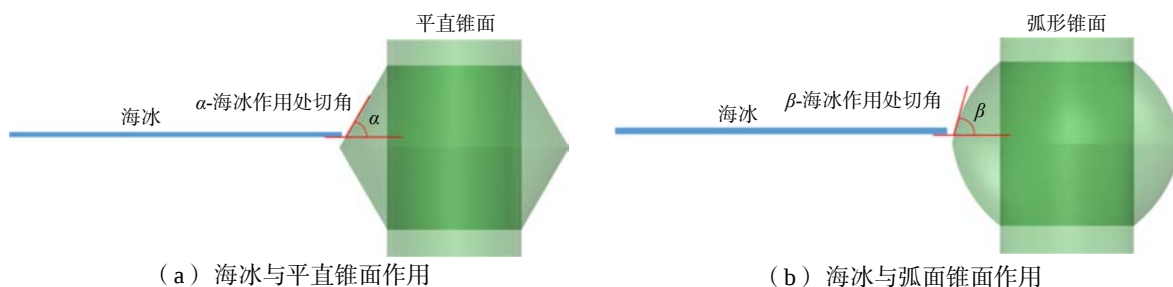


图11 海冰作用处锥角

Fig.11 Tangent angle of sea ice

为了降低锥角变大导致冰载荷增大而带来的影响,结合冰载荷随锥体尺寸以及锥角变化的关系,使新型锥体结构达到更好的破冰效果,需将锥壳板弧面任意位置处的切线角度控制在 $30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$,如图12所示。为了满足海冰与锥壳板作用处切线角度的变化范围,需适当增大锥体最大直径,最大直径

设为 7 m, 锥体高度与原高度相同。在保证锥体强度足够抵抗冰载荷的情况下可适当降低锥壳板厚度, 以达到降低锥体自重的目的。

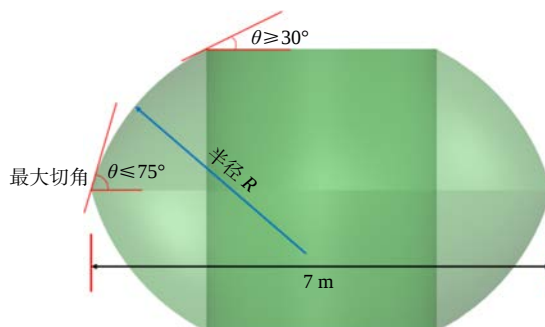


图 12 锥壳板切线角度及弧度半径示意图

Fig.12 Schematic diagram of tangent angle and radius of conical shell plate

3.2 新型导管架平台锥体结构抗冰性能研究

为研究新型导管架平台锥体结构抗冰性能, 通过数值方法对锥壳板厚度、弧度半径、弧面切角等参数进行敏感性分析, 离散元海冰与有限元平台新型锥体结构耦合模型如图 13 所示。从锥体冰载荷、锥壳板应力、导管架冰激振动等角度与传统锥体结构进行对比分析。

模拟冰况取冰速为 0.3 m/s、冰厚为 0.3 m 的冰层, 对海冰与传统锥体以及不同尺寸下新型锥体的相互作用进行数值模拟。从海冰与导管架平台锥体结构相互作用过程、破坏模式、冰载荷特性、导管架平台冰激振动、锥体结构强度等角度进行分析, 研究新型锥体结构抗冰性能。新型锥体结构尺寸见表 2。

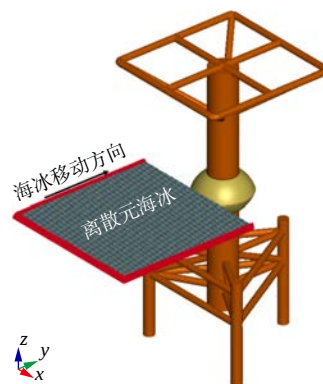


图 13 离散元海冰与有限元 JZ20-2NW 平台新型锥体结构耦合模型

Fig.13 Coupling model of discrete element sea ice with finite element JZ20-2NW platform novel cone structure

表 2 新型锥体锥壳板主要尺寸

Tab.2 Main dimensions of new conical shell plate

最大作用切角	板厚/mm	锥壳板弧度半径/mm	结构重量减轻/t
66°	12	5396	2.66
69°	12	4517	2.56
72°	12	3875	2.44
75°	12	3429	2.32

3.3 抗冰性能对比分析

3.3.1 海冰破坏模式

海冰与传统锥体结构及锥壳板弧度半径为 4517 mm 的新型锥体结构相互作用后的破碎状况如图 14 所示。新型锥体结构的弧面锥壳板能有效抑制碎冰攀爬后的堆积, 当海冰破碎沿弧形表面向上攀爬时, 弧形表面减小海冰的接触面积, 使海冰无法贴附于锥壳板表面, 更有利于碎冰的滑移。

海冰与传统锥体结构作用过程如图 15(a)所示, 海冰呈现出断裂、攀爬、滑移、二次断裂循环破碎的过程, 此类特征是由于海冰与锥体作用时均发生弯曲破坏。当冰排与结构接触时冰载荷开始变大, 随着冰排的移动, 冰排沿锥面发生弯曲破坏, 冰载荷达到最大值, 冰排破碎后作用力迅速减小, 直到冰排再次作用, 随后碎冰沿锥面向上攀爬, 滑移后随海流飘走, 呈现周期性特征, 与现场实测以及实验结果相吻

合^[18]。海冰与新型锥体结构作用过程如图 15(b)所示,随着海冰与锥壳板接触发生弯曲破坏,首先产生径向裂纹,随后产生环向裂纹,随着海冰不断向前移动,海冰破碎沿锥体表面向上攀爬,当锥体表面块状冰堆积到一定程度时,部分冰块开始滑移,呈现断裂、攀爬、堆积、滑移的周期性过程,并因此产生周期性交变冰力,与传统锥体海冰破坏模式几乎一致。由图 14(b)、图 15(b)可见,弧面锥壳板对碎冰的滑移效果较为明显。

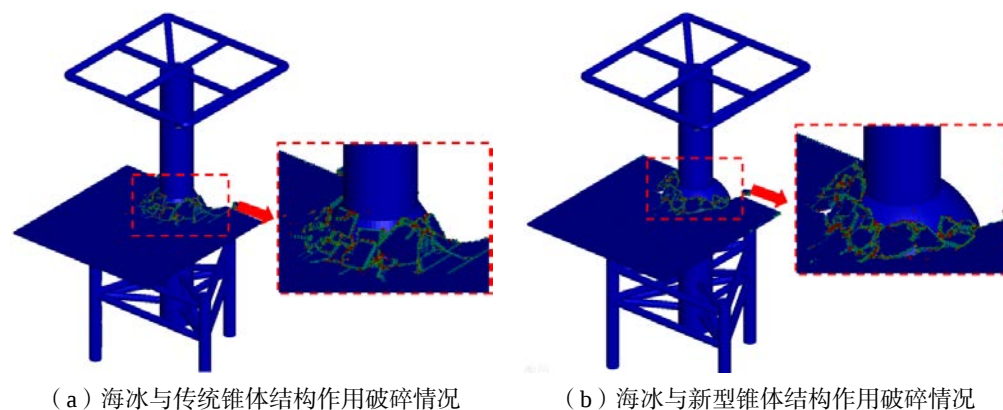


图 14 海冰与平台作用破碎状况

Fig.14 Broken state of sea ice interaction with platform

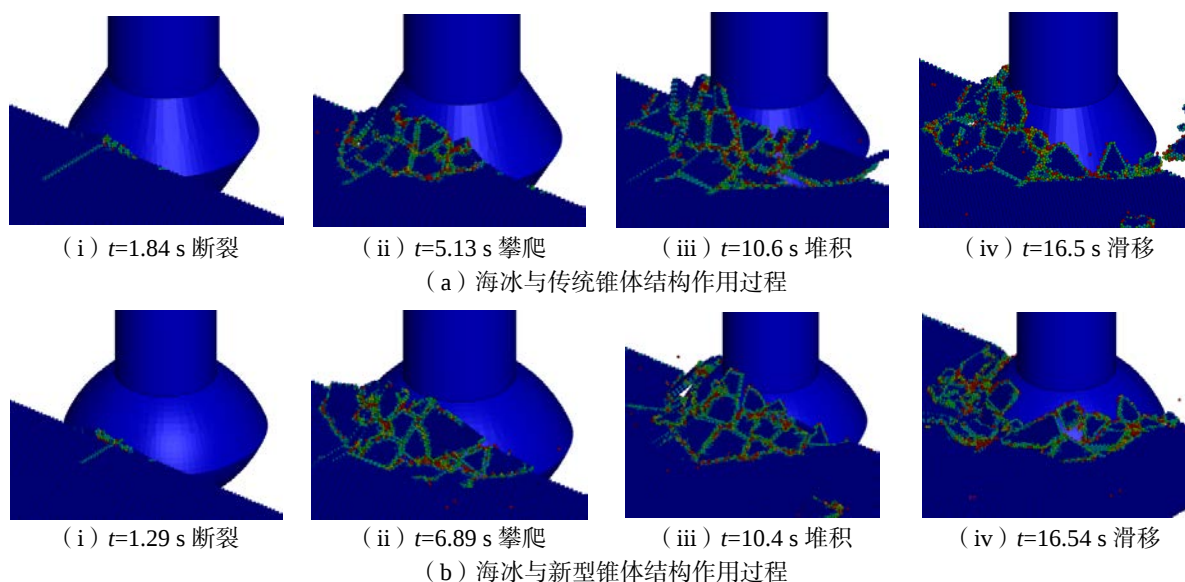


图 15 海冰与锥体结构作用过程

Fig.15 Interaction between sea ice and cone structure

3.3.2 冰载荷

通过对冰载荷峰值以及平均值进行统计,不同锥壳板弧度半径下的冰载荷时程曲线如图 16 所示。对比图 7 可见,海冰作用下新型及传统的导管架平台锥体结构冰载荷曲线趋势相同,峰值相近,且表现出强周期性。

冰载荷峰值及平均值随锥壳板弧度半径的变化如图 17 所示。对于新型锥体结构,锥壳板弧度半径减小引起水线处锥径增大,海冰与锥体结构的接触面积随之增大,最终导致冰载荷峰值及平均值均随锥壳板弧度半径的减小而增大,但增幅较小^[26]。

3.3.3 冰激振动

基于 DEM-FEM 耦合方法,对海冰作用下导管架平台冰激振动特性进行研究,模拟得到的海冰与

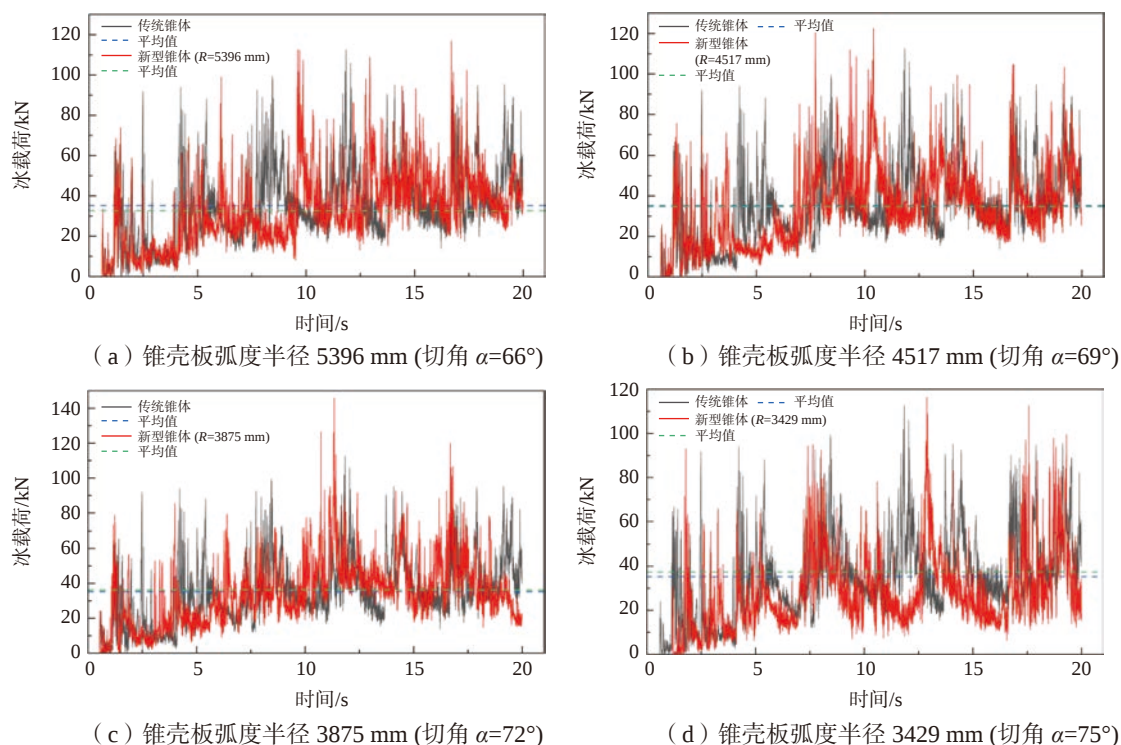


图 16 不同锥壳板弧度半径下的新型锥体冰力曲线

Fig.16 Novel cone ice force curve under different radii of the conical shell plate

新型锥体结构作用时导管架平台冰激振动加速度曲线如图 18 所示,对比图 8(a)可见,振动加速度时程曲线呈现周期性,且幅值均小于传统锥体结构。新型锥体结构对导管架平台冰激振动加速度响应的削减效果显著,锥壳板最大切角为 66° 的新型锥体导管架平台冰激振动加速度变化范围最大,为 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m/s}^2$,振动加速度响应削减近 33%;振动加速度变化范围最小可达 $-0.1 \sim 0.1 \text{ m/s}^2$,削减近 66%,此时锥壳板最大切角为 69° 。

冰激振动位移时程曲线如图 19 所示,与图 8(b)对比可见,新型锥体对平台冰激振动位移响应的削减效果显著,振动位移幅值基本保持在 $-1 \sim 3 \text{ mm}$ 之间。锥壳板最大切角为 75° 的新型锥体导管架平台冰激振动位移区间最大值为 3.9 mm ,振动位移响应削减近 26%;冰激振动位移区间最小值为 3.25 mm ,振动位移响应削减近 38%,此时锥壳板最大切角为 66° 。

冰激振动数据对比见表 3,新型锥体结构对振动加速度的削减效果最大可提高 67.4%。对振动位移的削减效果最大可提高 28.3%。新型锥体结构对导管架平台的冰激振动响应的削减效果优于传统平直锥面,并且在切角为 69° 时,冰激振动的削减效果最为显著。

3.3.4 结构响应

通过 DEM-FEM 耦合方法,模拟海冰与锥体结构的相互作用,分析锥壳板结构应力。计算时长为 20 s,涵盖海冰断裂、攀爬、堆积、滑移的整个周期。新型锥体结构应力时程曲线及应力云图如图 20 所示。锥体结构与海冰作用时,接触处应力逐渐增大,海冰发生断裂时锥壳板应力达到峰值,断裂后的碎

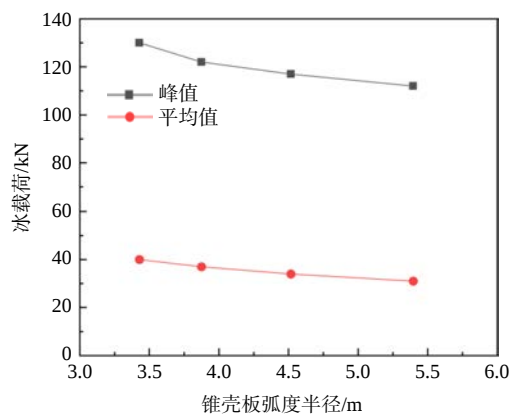


图 17 不同锥壳板弧度半径下的冰载荷

Fig.17 Ice loads under different radii of conical shell plate

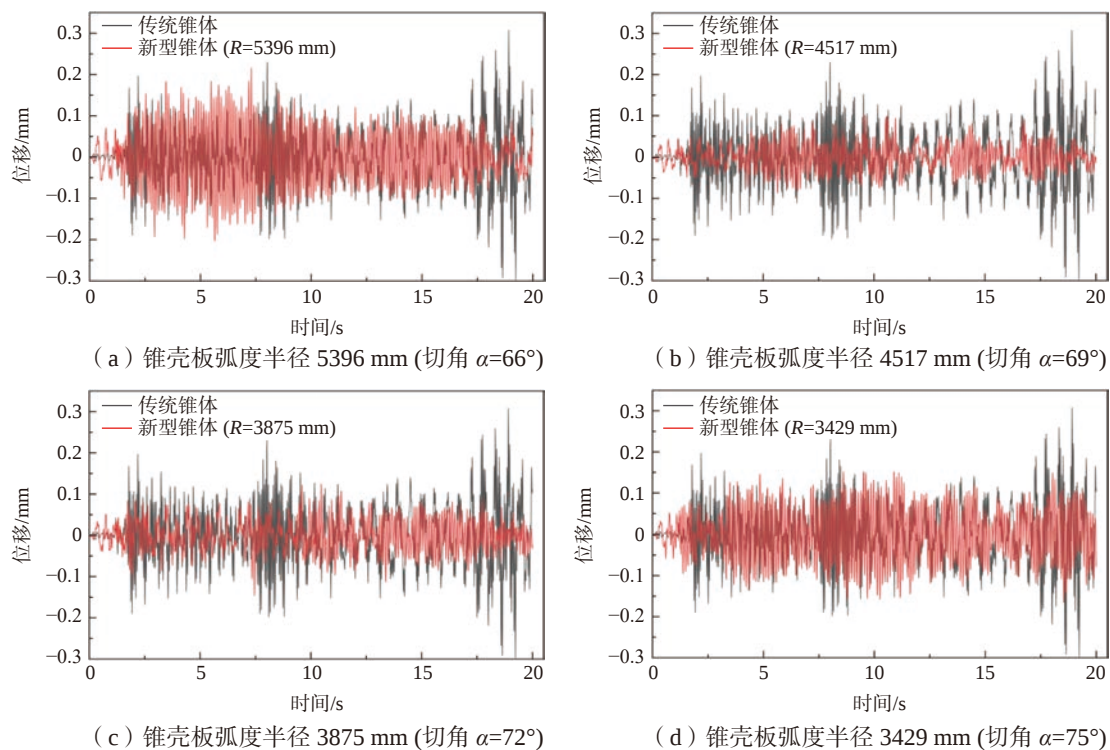


图 18 新型锥体结构冰激振动加速度时程曲线

Fig.18 Acceleration time history curves of ice-induced vibration of the novel cone structure

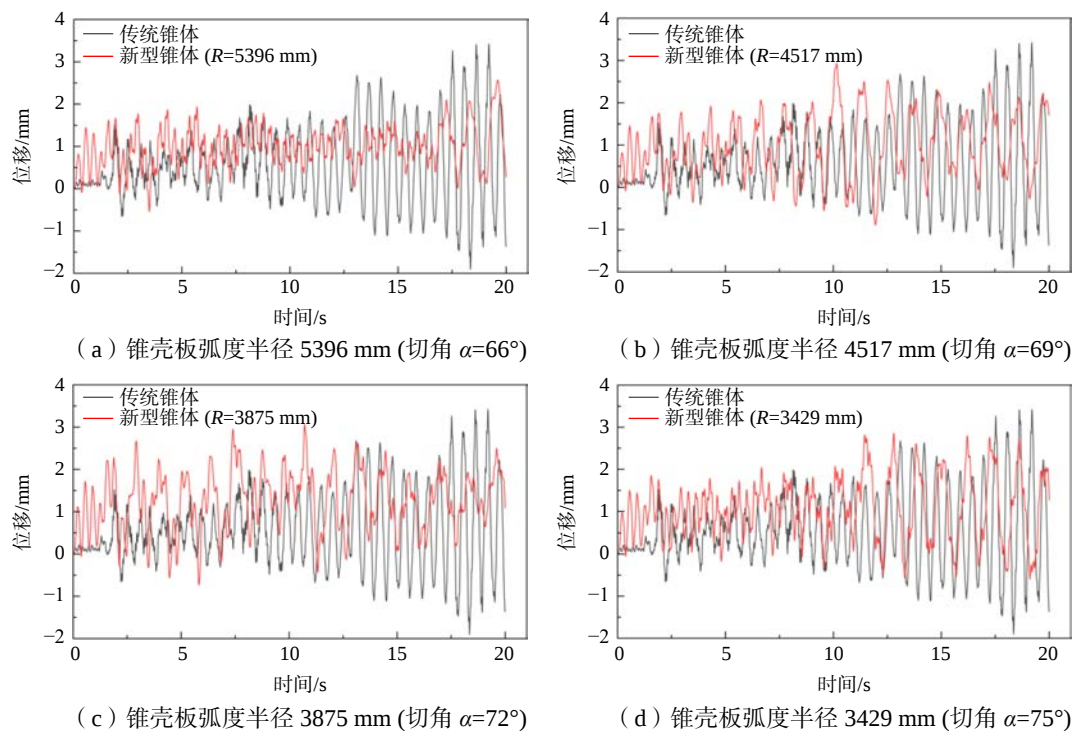


图 19 新型锥体结构冰激振动位移时程曲线

Fig.19 Displacement time history curves of ice-induced vibration of the novel cone structure

冰在冰排的推动下沿锥体结构攀爬, 应力开始下降, 直至碎冰堆积最严重时锥壳板应力再次达到峰值, 随后碎冰滑移, 锥壳板应力降到最低, 新型锥体结构应力变化呈现与冰载荷相似的周期脉冲性。新型锥体结构在不同锥壳板弧度半径下的最大应力分别为 125.6 MPa、130.4 MPa、117.6 MPa 和 121.6 MPa,

均满足应力衡准,同时小于传统锥体结构最大应力 131.1 MPa(见图 9),新型锥体结构抗冰强度提升 4.7%。

表 3 与传统导管架冰激振动数据对比
Tab.3 Comparison of ice-induced vibration with traditional jacket

锥体类型	加速度峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	对比	位移区间/mm	对比
传统	0.30	—	5.2	—
切角 66°	0.21	↓ 31.6%	3.81	↓ 27.2%
切角 69°	0.10	↓ 67.4%	3.75	↓ 28.3%
切角 72°	0.12	↓ 60.9%	3.75	↓ 28.3%
切角 75°	0.15	↓ 51.1%	3.93	↓ 24.9%

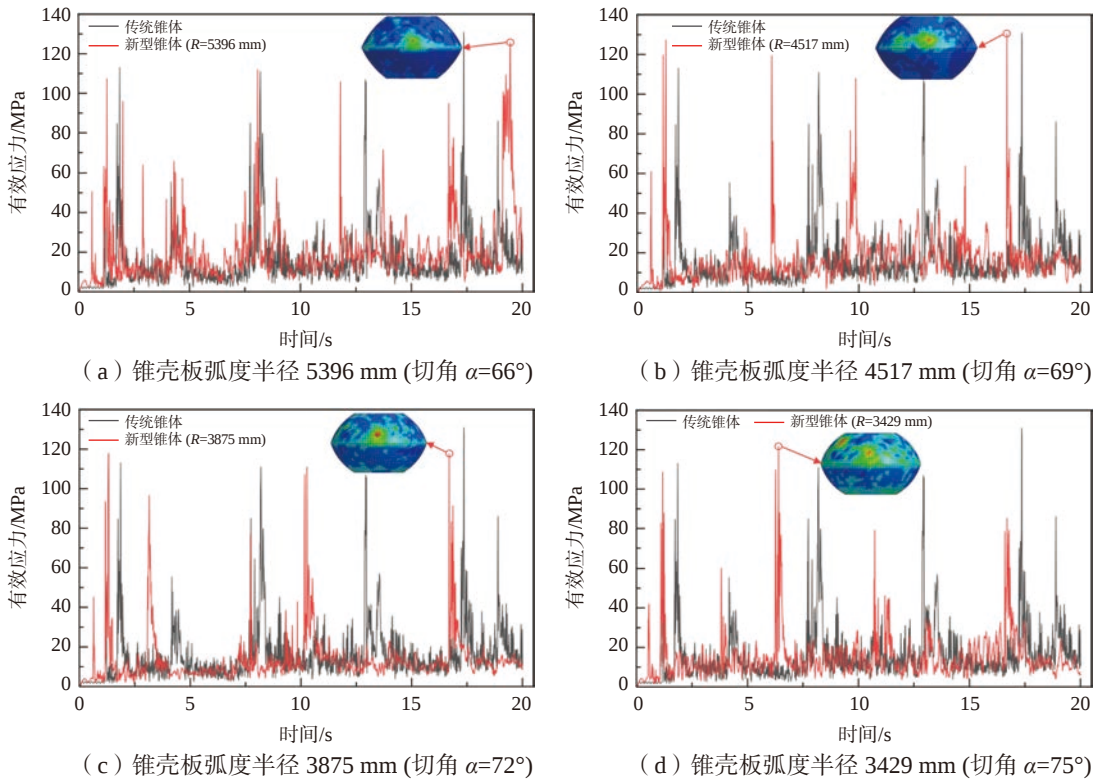


图 20 新型锥体结构应力变化情况

Fig.20 Stress variation of the novel cone structure

3.4 不同工况下抗冰性能分析

针对新型抗冰锥体在不同水位海冰作用下的抗冰性能进行研究,对 0 m 水位及 1 m 水位的海冰与锥体相互作用过程进行模拟,并通过性能优化系数来对比抗冰性能数据,性能优化系数表示为

性能优化系数 = $\frac{\text{新型锥体抗冰性能}}{\text{传统锥体抗冰性能}}$

对冰载荷、结构应力、振动位移及振动加速度进行分析,性能优化系数如图 21 所示。如图 21(a)、(b)所示,在结构强度方面,1 m 水位海冰与锥体结构作用时的冰载荷峰值降低了 20% 左右,对应结构应力峰值降低了 20% 以上,减少了应力集中,0 m 水位海冰的冰载荷均值增大了 30%,峰值增大了 20%,在结构应力峰值上反应出 20% 的增幅,而结构应力均值最大降低 23.5%;如图 21(c)、(d)所示,在振动响应方面,弧度半径大于 4517 mm、角度小于 69°的锥体结构对振动位移及振动加速度的削减效果明显,最大削减 56.3% 振动位移,而弧度半径小于 4517 mm、角度大于 69°的锥体结构仅在削减振动加速度幅值上有效。

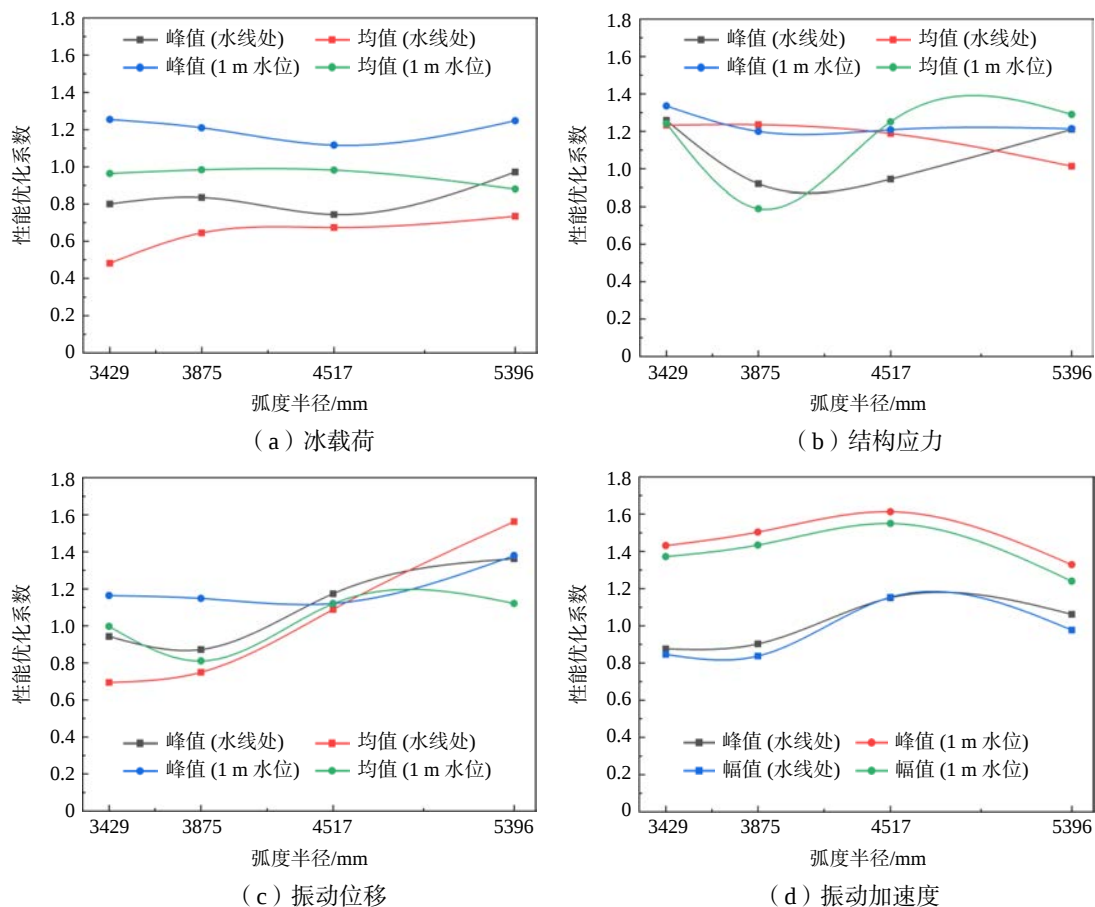


图 21 抗冰性能优化系数

Fig.21 Optimization coefficient of ice-resistant performance

通过对比分析可得,冰-锥作用角度较大时,海冰破坏模式为挤压破坏,碎冰密集,海冰堆积效果不明显,冰力呈高频脉冲载荷,振动响应削减效果差;冰-锥作用角度较小时,海冰破坏模式为弯曲破坏,碎冰体积大,海冰堆积效果明显,冰力呈低频持续载荷,振动响应削减效果较好。因此,锥壳板弧度半径为 4517 mm、切角为 69°的新型锥体抗冰性能综合提升最显著,与 0.5 m 水位海冰与锥体结构相互作用研究中的结果相一致。

4 结 论

本文针对冰区导管架平台,设计了一种新型抗冰锥体结构,采用 DEM-FEM 耦合方法,模拟分析了不同水位海冰与传统及新型锥体结构的互相作用过程,从海冰破坏模式、冰载荷特性、冰激振动响应及结构响应等进行对比研究,主要结论如下:

(1) 新型导管架平台锥体结构的弧面设计能够有效抑制碎冰在锥体表面的攀爬、堆积,防止海冰贴附至锥壳板表面,从而提升碎冰滑落效率;

(2) 新型导管架平台锥体结构切角较大时,海冰为挤压破坏,碎冰密集,碎冰滑落效率高,冰力呈高频脉冲载荷;而切角较小时,海冰为弯曲破坏,碎冰体积大,海冰堆积效果明显,冰力呈低频持续载荷,为兼顾碎冰滑落效率与冰载荷,锥体结构设计需选择合理的弧面半径;

(3) 新型导管架平台锥体结构在削弱平台冰激振动效果显著,振动加速度削减达 67.4%,振动位移削减达 56.3%;

(4)新型导管架平台锥体结构通过优化设计减轻结构自重,较之于传统锥体结构,在降低 21.8% 结构自重条件下,新型锥体结构抗冰强度仍提升 23.5%。

参 考 文 献:

- [1] 徐田甜,张 晓,崔 航.我国海上导管架平台抗冰锥体的设计实践[J].船舶工程,2010,32(2): 73–77.
Xu T T, Zhang X, Cui H. Design practices of anti-ice structure on offshore jacket platform of our country[J]. Ship Engineering, 2010, 32(2): 73–77. (in Chinese)
- [2] 岳前进,许 宁,崔 航,等.导管架平台安装锥体降低冰振效果研究[J].海洋工程,2011,29(2): 18–24.
Que Q J, Xu N, Cui H, et al. Effect of adding cone to mitigate ice-induced vibration[J]. Ocean Engineering, 2011, 29(2): 18–24. (in Chinese)
- [3] 闾振菊,李春郑,宋 础,等.导管架式一体化风机在冰载荷作用下的耦合响应研究[J].船舶力学,2021,25(8): 1095–1105.
Chuang Z J, Li C Z, Song C, et al. Coupling response of jacket-support offshore wind turbine under ice load[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(8): 1095–1105. (in Chinese)
- [4] 徐田甜,王 宁.渤海导管架平台的破冰锥体设计[J].船舶,2007,6(6): 34–42.
Xu T T, Wang N. Design of icebreaking cone for jacket platform in Bohai[J]. Ship and Boat, 2007, 6(6): 34–42. (in Chinese)
- [5] 王帅霖,刘社文,季顺迎.基于 GPU 并行的锥体导管架平台结构冰激振动 DEM-FEM 耦合分析[J].工程力学,2019,36(10): 28–39.
Wang S L, Liu S W, Ji S Y. Coupled discrete-finite element analysis for ice-induced vibration of conical jacket platform based on GPU-Based parallel algorithm[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 28–39. (in Chinese)
- [6] 关 湃,黄 焱,万 军,等.基于模型试验的导管架平台抗冰锥体优化设计[J].中国海洋平台,2017,32(4): 7–13.
Guan P, Huang Y, Wan J, et al. Optimal design of Jacket platforms' anti-icing conical structures based on model tests[J]. China Offshore Platform, 2017, 32(4): 7–13. (in Chinese)
- [7] Yue Q, Zhang L, Zhang W, et al. Mitigating ice-induced jacket platform vibrations utilizing a TMD system[J]. Cold Regions Science & Technology, 2009, 56(2/3): 84–89.
- [8] 岳前进,刘 圆,屈 衍,等.抗冰平台的冰振疲劳分析[J].工程力学,2007,24(6): 159–164.
Que Q J, Liu Y, Qu Y, et al. Fatigue-life analysis of ice-resistant platforms[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6): 159–164. (in Chinese)
- [9] 张大勇,王国军,王帅飞,等.冰区海上风电基础的抗冰性能分析[J].船舶力学,2018,22(5): 615–627.
Zhang D Y, Wang G J, Wang S F, et al. Ice-resistant performance analysis of offshore wind turbine foundation in ice zone[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(5): 615–627. (in Chinese)
- [10] 屈 衍,黄子威,邹 科,等.冰激结构频率锁定振动的发生机理及简单分析方法[J].力学学报,2021,53(3): 728–739.
Qu Y, Huang Z W, Zou K, et al. Mechanism and simple analysis method of ice induced frequency lock-in vibration of offshore structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(3): 728–739. (in Chinese)
- [11] 刘红兵,蒋 哲,李 辉,等.离散元方法及其在海洋工程中的应用综述[J].中国海洋平台,2023,38(1): 83–89.
Liu H B, Jiang Z, Li H, et al. Review on applications of distinct element method in ocean engineering[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(1): 83–89. (in Chinese)
- [12] Munjiza A, Lei Z, Divic V, et al. Fracture and fragmentation of thin shells using the combined finite-discrete element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2013, 95(6): 478–498.
- [13] Shen Z X, Wang W Q, Xu C Y, et al. An innovative coupled common-node discrete element method-smoothed particle hydrodynamics model developed with LS-DYNA and its applications[J]. China Ocean Engineering, 2024, 38(3): 467–482.
- [14] Shen Z X, Wang W Q, Xu C Y, et al. Numerical simulation of sea ice and structure interaction using common node DEM-SPH model[J]. China Ocean Engineering, 2023, 37(6): 897–911.
- [15] Kanatani M, Kawai T, Tochigi H. Prediction method on deformation behavior of caisson-type seawalls covered with

- armored embankment on man-made islands during earthquakes[J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(6): 79–96.
- [16] 杨冬宝, 高俊松, 刘建平, 等. 基于 DEM-FEM 耦合方法的海上风机结构冰激振动分析[J]. *力学学报*, 2021, 53(3): 682–692.
- Yang D B, Gao J S, Liu J P, et al. Analysis of ice-induced structure vibration of offshore wind turbines based on DEM-FEM coupled method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(3): 682–692. (in Chinese)
- [17] 邱长林, 王 菁, 闫澍旺, 等. 碎石保护结构防拖锚效果的 DEM 分析[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(4): 367–376.
- Qiu C L, Wang J, Yan P W, et al. DEM analysis of protection effect of rock armor berm against drag anchors[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(4): 367–376. (in Chinese)
- [18] 李修波, 刘可安, 王华昆, 等. 后挖沟深度对深海海底管道屈曲影响数值分析[J]. *海洋工程*, 2020, 38(3): 152–160.
- Li X B, Liu K A, Wang H K, et al. Numerical analysis of the influence of post-trench depth on buckling of deep sea submarine pipeline[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 38(3): 152–160. (in Chinese)
- [19] Potyondy D, Cundall P. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329–1364.
- [20] Ji S, Di S, Long X. DEM simulation of uniaxial compressive and flexural strength of sea ice: Parametric study[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2016, 143(1): C4016010.
- [21] Wang S, Yue Q, Zhang D. Ice-induced non-structure vibration reduction of jacket platforms with isolation cone system[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 70: 118–123.
- [22] 王帅霖. 基于离散元—有限元耦合方法的海洋平台结构冰激振动分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Wang S L. A coupled discrete-finite element method for the ice-induced vibration of the offshore platform structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] Bai X, Jiang Y, Shen Z, et al. Numerical simulation of ice and structure interaction using common-node DEM in LS DYNA[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(11): 1999.
- [24] HaKun J, MooHyun K. Dynamic ice force estimation on a conical structure by discrete element method[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, 13: 136–146.
- [25] 龙 雪, 宋 础, 季顺迎, 等. 锥角对锥体结构抗冰性能影响的离散元分析[J]. *海洋工程*, 2018, 36(6): 92–100.
- Long X, Song C, Ji S Y, et al. Influence of cone angle on anti-icing performance of conical structure with numerical simulations of discrete element method[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 36(6): 92–100. (in Chinese)
- [26] 龙 雪, 刘社文, 季顺迎. 水位变化对正倒锥体冰载荷影响的离散元分析[J]. *力学学报*, 2019, 51(1): 74–84.
- Long X, Liu S W, Ji S Y. Influence of water level on ice load on upward-downward conical structure based on DEM analysis[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 74–84. (in Chinese)