

船舶及海洋工程装备

销轴滑动磨损条件下的极限承载力研究

豆东阳¹, 贺文选², 李豹¹, 张崎^{2*}

(1.中国船舶集团第七一五研究所, 杭州 310023; 2.大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 针对销轴在海洋环境下由于轴向滑动磨损造成的极限承载力变化进行数值模拟研究, 得到销轴的极限承载力演变规律, 为水下磨损结构的安全评估提供理论依据。**方法** 首先, 运用 ANSYS 有限元分析软件, 建立“柱-瓦”模型进行磨损计算, 对滑动磨损方法进行验证。然后, 建立实际销轴与锚链横档局部有限元模型, 进行磨损分析, 得到不同轴向滑动频率下的磨损数据。最后, 计算销轴在失效准则下不同磨损深度等级 (0、1、2、3 mm) 的极限承载力, 并根据磨损速度-磨损深度-破断力的映射关系得到其许用极限承载力和累计使用时间随磨损深度的变化曲线。**结果** 在典型工况 (滑动频率为 3 Hz) 条件下, 销轴连续工作约 3 298 h, 磨损深度可达 3 mm, 许用极限承载力下降 14 180 N。**结论** 随着销轴轴向滑动频率的增加, 销轴的最大磨损深度、总磨损体积、磨损速度均近似呈线性增长变化。在典型工况下, 销轴许用极限承载力随着服役时间增长近似呈线性下降, 且随着时间增加许用极限承载力下降趋势变缓。

关键词: 数值模拟; 柱-瓦; 销轴; 滑动; 磨损; 极限承载力

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0072-09

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.11.010

Ultimate Load Carrying Capacity under Sliding Wear Conditions of Pins

DOU Dong-yang¹, HE Wen-xuan², LI Bao¹, ZHANG Qi^{2*}

(1. Hangzhou Institute of Applied Acoustics, Hangzhou 310023, China; 2. School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct a numerical simulation study to investigate the change of ultimate load carrying capacity of the pin due to axial sliding wear in the marine environment, and to obtain the evolution of the ultimate load carrying capacity of the pin, so as to provide a theoretical basis for the safety assessment of the underwater wear structure. Firstly, ANSYS finite element analysis software was used to establish a "column-tile" model for wear calculation to verify the sliding wear method; Then, a local finite element model of the actual pin and the anchor chain cross-file was established for wear analysis to obtain wear data under different axial sliding frequencies; Finally, the ultimate load carrying capacity of the pin under different wear depth (0/1/2/3 mm) was calculated, and its permissible ultimate load carrying capacity and the variation curve of cumulative use time with wear depth were obtained according to the mapping relationship of wear speed-wear depth-breakage force. Under typical operating conditions (sliding frequency of 3 Hz), the wear depth of the pin was up to 3 mm for about 3 298 h, and

收稿日期: 2023-06-16; 修订日期: 2023-08-13

Received: 2023-06-16; Revised: 2023-08-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC0310502)

Fund: National Key Program of Research and Development Funded Project (2018YFC0310502)

引文格式: 豆东阳, 贺文选, 李豹, 等. 销轴滑动磨损条件下的极限承载力研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 72-80.

DOU Dong-yang, HE Wen-xuan, LI Bao, et al. Ultimate Load Carrying Capacity under Sliding Wear Conditions of Pins[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 72-80.

*通信作者 (Corresponding author)

the allowable ultimate load carrying capacity decreased by 14 180 N. With the increase of the axial sliding frequency of the pin, the maximum wear depth, the total wear volume and the wear speed of the pin increase approximately linearly. Under typical operating conditions, the allowable ultimate load carrying capacity of the pin decreases linearly with the increase of service time, and the decreasing trend of the allowable ultimate load carrying capacity becomes slower with the increase of time.

KEY WORDS: numerical simulation; column-tilt; pin; sliding; wear; ultimate load carrying capacity

在船舶与海洋工程领域中,一些工程设备往往需要通过水下悬挂链来悬挂仪器进行科学研究和生物探测等,而销轴就是连接悬挂链和挂载设备的主要受力构件,具有导向和支承的作用,对整体结构的精度及可靠性保持起着关键作用,并且销轴的极限强度也是悬挂链承受工作载荷能力的关键。同时,随着装备制造业的快速发展,钛合金销轴由于具有低密度、高的比强度和好的耐蚀性等众多优点而在航空、航天、航海等工程领域得到了广泛应用^[1-5]。然而,钛合金也被认为具有较差的耐磨性,其在摩擦工况下长时间使用时,将会降低结构物的极限承载力,在极端条件下甚至可能会造成灾难性后果。因此,通过对钛合金销轴在滑动磨损条件下的极限承载力进行数值模拟研究,实现对销轴的在线寿命预测,并提前预防破坏,具有非常重要的工程意义。

乔奇光等^[6]在经验的基础上对 TC4 合金的磨削性能做了探索,研究表明,在专业的钛合金磨削中采用人造金刚石 JR 和陶瓷立方氮化硼 CBN 砂轮将会得到更好效果。吴小梅等^[7]通过试验探究了 ZrN 涂层对钛合金耐磨性与抗冲蚀性的影响,结果证明,ZrN 涂层不影响 TC11 基体的耐蚀性和抗疲劳性能。郑超等^[8]选用 TA2 工业纯钛和 TC4 钛合金材料,对钛金属材料干摩擦磨损特性进行了研究,发现在低频低载状态下,TC4 的磨损机制主要为磨粒磨损和氧化磨损,随着载荷和频率的升高,在瞬时闪现温度和载荷的作用下,其磨损机制主要为黏着磨损和剥层磨损。李新星等^[9]通过实验对 TC4 合金在空气、纯水和模拟海水环境下与 GCr15 轴承钢对磨时的磨损行为和磨损机制进行研究,得到了 3 种不同环境介质对 TC4 合金耐磨性的影响。李奕贤等^[10]研究发现,滑动速度和载荷对 TC11 钛合金的磨损行为具有明显影响。陈康敏等^[11]研究发现,对于 TC11 合金/GCr15 钢摩擦副,在常温时,TC11 合金具有极高的磨损率,并随着载荷增大快速增加,而 GCr15 钢的磨损率随载荷增大略有增加,且处于较低值。Rigney 等^[12]认为,金属在大气干滑动磨损中不可避免地会形成摩擦层,其磨损是通过磨屑的产生、材料转移、化学反应和机械混合而形成的。Pauschitz 等^[13]进一步认为,摩擦层是影响金属磨损行为和机制的关键因素,尤其是不同类型的摩擦层对磨损的影响是不同的。基于此,现在多数学者均是从材料本身角度出发,对复杂环境下影响磨损的因素进行试验探究,证明了磨损的复杂性与重

要性,但缺乏对销轴这一重要结构滑动磨损的具体研究。

宿月文等^[14]应用有限元理论和数值模拟方法,建立了滑动磨损过程预测模型,并采用 ANSYS 软件对某起吊设备的销连接副接触磨损进行了分析与预测,其误差约 12%。李华杰等^[15]利用曲面接触原理,建立了一种依据接触宽度变化计算的曲率半径外推法磨损仿真模型,并对销轴磨损前后的动力学特性进行了比较。在数值模拟方面,现在多数学者是从磨损数学模型改进方面或只是应用数值模拟方法对销轴的接触磨损特性进行了分析^[16-18],很少有学者在考虑钛合金销轴滑动磨损条件下,对其极限承载力进行数值模拟研究。

销轴作为机械结构设计中常用的连接紧固件,其破坏形式主要包括剪切破坏、弯曲破坏、承压破坏等^[19-20]。目前国内对销轴的设计尚无统一的标准^[21],虽然在有关销轴的《钢结构设计规范》^[22]中加入了销轴节点的设计内容,但是其提供的抗拉、抗剪强度计算公式仅适用于耳板铰接形式的圆柱销轴。文中横档中心孔销轴不同于常见的耳板铰接式插销,其连接装置结构的极限强度问题尚未有统一规范可供参考。李伟等^[23]对比了静剪力设计和有限元分析 2 种方法对连接销轴极限强度的计算结果,结果表明,2 种方法计算得到的应力水平差异较小。因此,可通过有限元方法对横档中心孔销轴滑动磨损条件下的极限承载力进行数值模拟研究。

本文通过建立“销轴-横档”的局部接触有限元模型,取一定大小的梯度载荷作为计算载荷,按销轴实际受力形式进行加载,充分考虑邻近区域结构对销轴受载的影响,让载荷在构件间通过接触设置自由传递^[24]。以材料屈服强度作为销轴极限强度计算的失效准则,分析结构受力情况,最终实现销轴的极限承载力计算,为销轴的剩余破断强度和剩余寿命进行在线评估。具体流程如图 1 所示。

1 “柱-瓦”滑动磨损方法验证

为验证 ANSYS 数值模拟销轴磨损计算的准确性,需要先建立简单“柱-瓦”弹性接触模型,计算得到相同工况条件下的磨损质量,并与实际结果进行对比。当二者表面间发生相对滑动时,会产生磨损,从微观角度分析是由于接触表面并非完全光滑而是

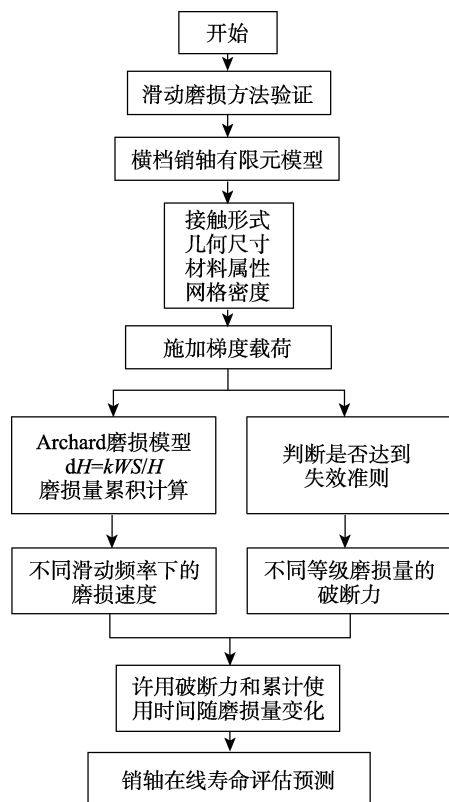


图 1 研究流程
Fig.1 Research flow chart

存在凹凸形尖点。在经历多次滑动后，表面磨损形貌发生变化，磨损深度也会随之发生变化。应用有限元方法，可较为准确地得到二者接触点上的应力值，并用于磨损深度计算。

1.1 “柱-瓦”磨损模型

按照实际柱-瓦试件在 ANSYS 中进行 1:1 三维磨损实体模型的建立，其中上部分为柱模型，材料为 TC4 合金，下部分为瓦模型，材料为 CM690 高强度钢，具体材料参数见表 1。通过 ANSYS 模拟上部分柱沿着下部分瓦做往复滑动，该模型假设二者均为弹性材料，且具有各向同性的摩擦系数，此处参考试验测值取为 0.25。其中有限元模型如图 2 所示。

对有限元模型进行加载和边界条件设置，如图 3 所示。主要分为 3 步：

第一步，在上试件柱的上半圆柱面施加轴承载荷，按照投影面的方法将法向力按照投影面积分布逐渐施加在压缩边上，以模拟真实试验中所受载荷方式，进而更加准确地计算柱-瓦间的磨损情况。对于

表 1 柱瓦试样的主要力学性能

Tab.1 Main mechanical properties of column-tile specimens

材料	屈服强度 σ_s/MPa	极限强度 σ_b/MPa	断面伸长率 $\delta/\%$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
TC4	≥ 825	≥ 895	≥ 10	110	0.34
CM690	≥ 410	≥ 690	≥ 17	207	0.3

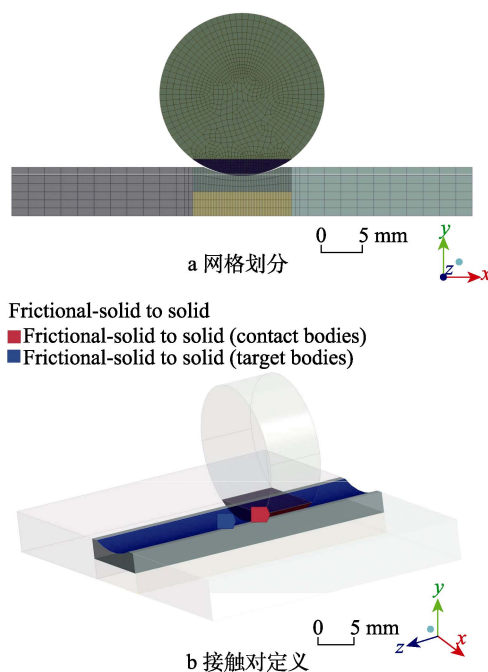


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model: a) grid division; b) definition of contact pairs

整个时程，随着海况、航速、拖缆下放长度等工况的变化，其振动频率的波动变化会直接影响滑动销轴在单位时间的磨损深度与磨损质量，现在只计算周期为 2 s、振动频率为 2 Hz 的磨损深度与磨损质量进行统计。假定销轴受力为均值载荷 100 N，总磨损质量是对典型载荷不同振动频率磨损质量的周期性累积。

第二步，对下试件瓦底面施加固定约束 ($U_x=U_y=U_z=U_{R_x}=U_{R_y}=U_{R_z}=0$)，模拟真实试验中下试件与工作台面座的配合关系。

第三步，上试件柱初始位置距下试件端部初始距离为 10 mm，在此基础上，对柱的侧面分 2 个载荷步施加沿轴向的循环位移约束，滑动距离单程为 20 mm，并对上试件柱移动时的侧面位移进行限制，以利于计算过程中的收敛。

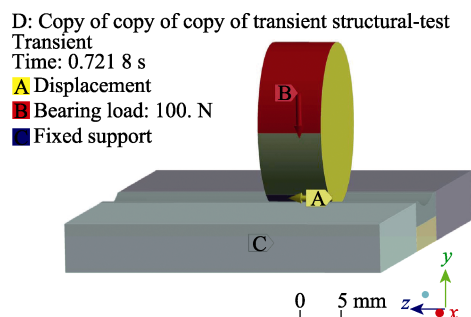


图 3 柱-瓦磨损三维有限元模型边界条件及约束
Fig.3 Boundary conditions and constraints of 3D finite element model of column-tile wear

柱-瓦往复滑动的位移曲线如图 4 所示，本文计算了 2 s 内 1 个载荷步的 2 个循环周次，即滑动频率为 2 Hz。

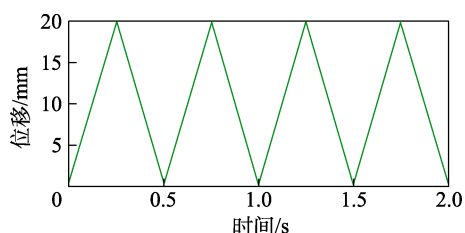


图 4 柱滑动位移-时间

Fig.4 Diagram of column sliding displacement as a function of time

1.2 “柱-瓦”磨损仿真结果分析

1.2.1 接触表面不同方向法向应力

由于接触节点移动到新位置, 接触变量 (例如接触压力) 会发生变化, 接触面下的连续单元也会经历材料 (体积) 的损失, 从而模拟磨损。当节点移动到一个新的位置后, 平衡可能不再满足, 程序将继续迭代直到达到平衡。因此, 需要对接触表面法向应力进行分析。

1) 接触表面滑动方向上单元受力分析。选取接触表面沿 Z 方向运动等间隔 3 个单元随时间变化的法向应力, 如图 5 所示。在同一 Z 轴线上的单元, 其对应上方柱试件和下方瓦试件在实际接触过程中的相应时刻所受的应力值相差较小, 即同一 Z 轴线上单元的磨损程度相差不大。因此, 可以把平行于 Z 轴线, 即柱试件在沿瓦试件运动方向同一轴线上的磨损过程看作是均匀磨损。

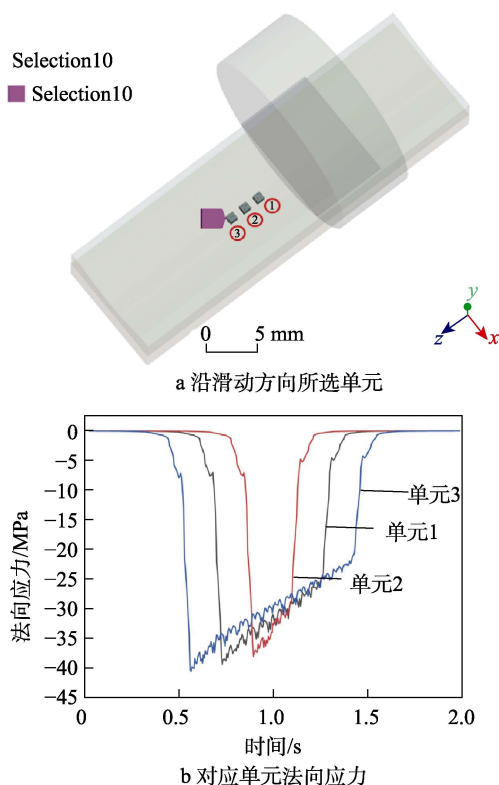


图 5 滑动方向上单元受力分析

Fig.5 Force analysis of the unit in the sliding direction: a) unit selected along the sliding direction; b) corresponding cell normal stress

2) 接触表面垂直滑动方向上单元受力分析。选取接触表面上沿 X 方向等间隔沿中轴线对称的 4 个单元随时间变化的法向应力, 如图 6 所示。在接触表面, 同一 XY 截面上的节点关于中间轴线对称, 两侧单元所受应力大小几乎相等。单元所受的应力值大小关于轴向对称面分别对称分布, 即相对应的对称单元所受的法向应力值的大小相等。因此, 可以把关于中间轴线对称的接触面看作对称磨损。

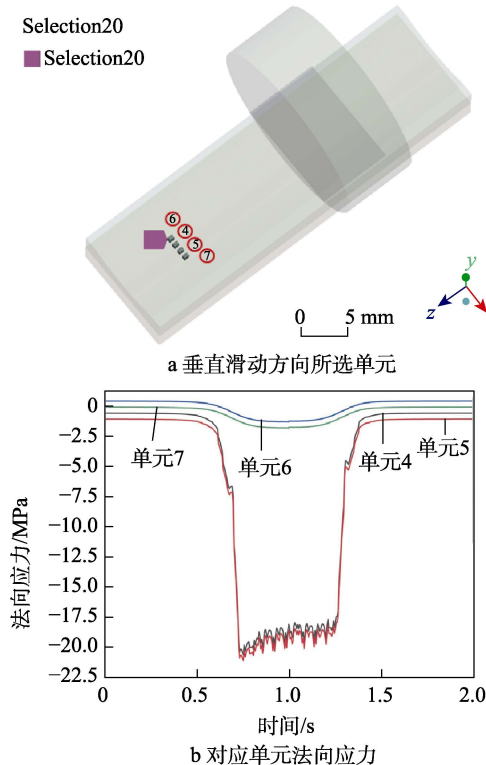


图 6 垂直滑动方向上单元受力分析

Fig.6 Force analysis of unit in the vertical sliding direction: a) unit selected in the vertical sliding direction; b) corresponding cell normal stress

1.2.2 Y 向磨损深度与磨损体积

在 Ansys workbench 后处理中通过输出项 “Expression=NMISC177” 和 “Expression=NMISC189” 提取接触面 I 节点的 Y 向磨损深度和单元的磨损体积云图, 以及它们随时间变化的曲线, 如图 7 和图 8 所示。

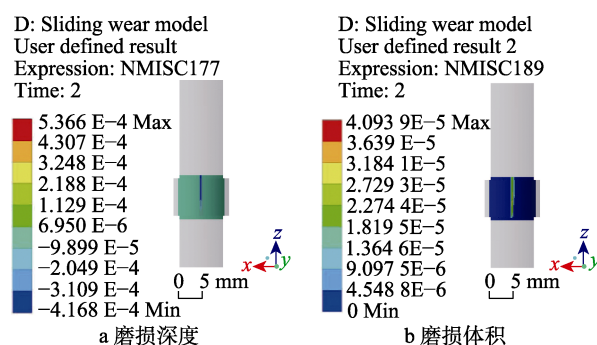


图 7 磨损后处理结果

Fig.7 Results of post-wear treatment: a) wear depth; b) wear volume

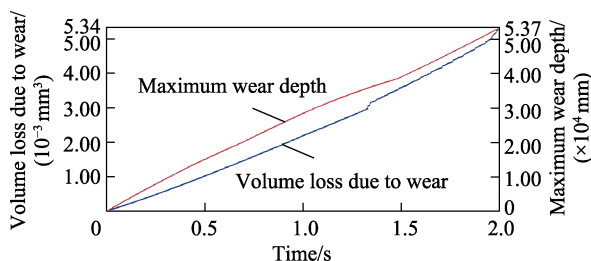


图8 磨损深度与磨损体积随时间的变化曲线

Fig.8 Depth of wear and volume of wear as a function of time

由实际试验结果可知,在试验力为 100 N、滑动频率为 4 Hz、干摩擦环境下 1 h 的磨损质量为 0.077 9 g。由图 8 可知,在法向载荷为 100 N、滑动频率为 2 Hz 的柱-瓦仿真磨损过程中,磨损深度与磨损体积随时间近似呈线性增长。2 s 时,上试件柱的累积磨损体积为 $5.34 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,而 TC4 合金的密度为 4.62 g/cm^3 ,由此可近似得出其 1 h 的累积磨损质量为 0.044 4 g,进而近似得出在法向载荷为 100 N、滑动频率为 4 Hz 下,1 h 的累积磨损质量为 0.088 8 g。仿真结果与试验结果相对比,二者相对误差约为 10.4%。可知 ANSYS 仿真结果所得磨损质量计算在可接受范围内,故验证了这种磨损仿真方法的可靠性。

2 销轴磨损分析

2.1 销轴相关参数

本文以有档锚链横档中心孔销轴(如图 9 所示)为研究对象,其中销轴直径为 $\phi=16 \text{ mm}$,与其配合的横档中心孔为 $\phi=17 \text{ mm}$,二者轴向间隙为 10 mm,相互之间有一定的旋转自由度。横档材料为 CM690 锚链钢,销轴材料为 TC4 合金,具体材料参数见表 1。对于屈服强度 σ_s 、极限强度 σ_b 、断面伸长率 δ ,选取最小值计算。考虑材料非线性,本构关系选取双线性随动硬化材料模型(BKIN)。

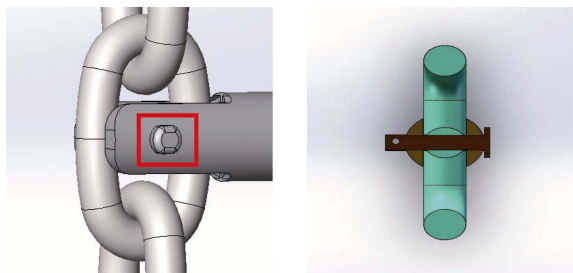


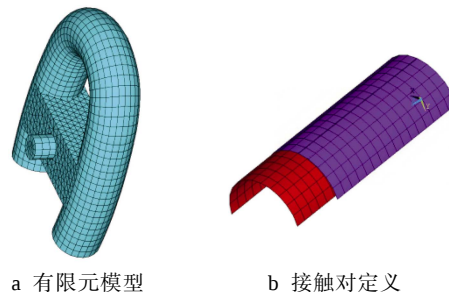
图9 有档锚链与其配合销轴

Fig.9 Staged anchor chain with its mating pin

2.2 建立有限元模型

参考实际模型,进行有限元建模,如图 10 所示。销轴和横档采用实体单元 SOLID186 (3D 20 节点) 进行模拟,二者接触配合关系通过接触对模拟,分别

选用面接触单元 CONTA174 (3D 8 节点) 和 3D 目标单元 TARGE170。各个部分均采用扫掠的方式,布置形状规则的六面体单元网格。接触算法采用扩增拉格朗日法,需要关闭接触对间隙来减小渗透。



a 有限元模型

b 接触对定义

图 10 有档锚链与其配合销轴

Fig.10 Staged anchor chain with its mating pin: a) finite element model; b) definition of contact pairs

2.3 接触刚度因子收敛性验证

在磨损有限元分析中,需要考虑接触刚度的影响。接触刚度主要影响两者间的接触状态,对等效应力的影响不大。通常,为了保证接触渗透尽量小,就需要选取尽量大的接触刚度,但为了避免引起总刚度矩阵的病态问题,进而保证其收敛性,还应该让接触刚度尽量小^[25]。因此,需要对接触刚度因子进行收敛性验证,如图 11 所示。经过验证,取 FKN 值为 8。

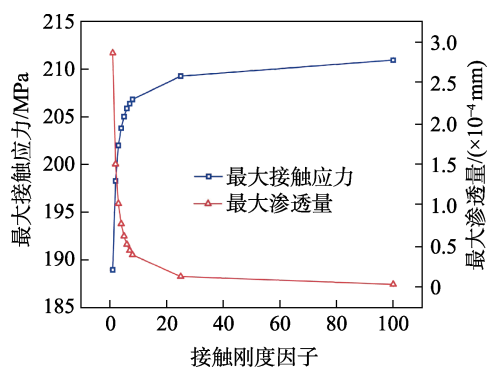


图 11 不同接触刚度因子结果对比

Fig.11 Comparison of results of different contact stiffness factors

2.4 网格收敛性验证

在销轴磨损有限元分析中,网格密度始终会影响有限元的计算精度和计算结果。一般而言,随着网格的细化,有限元模型更加逼近实际情况,数值模拟的效果也更好,但这也会带来计算成本的增加,并且过大的网格尺寸可能会对计算收敛造成困难。因此,为平衡计算精度和时间成本,需对接触区域附近的网格尺寸进行收敛性验证。

利用 5 种有限元模型分别对承载载荷下的销轴进行分析。随着网格尺寸减小,最大等效应力、最大

接触应力逐渐趋于稳定, 0.25 mm 网格尺寸的计算结果足够精确, 如图 12 所示。其中最大等效应力收敛可以保证极限强度计算的准确性, 最大接触应力收敛可以保证磨损计算的准确性。

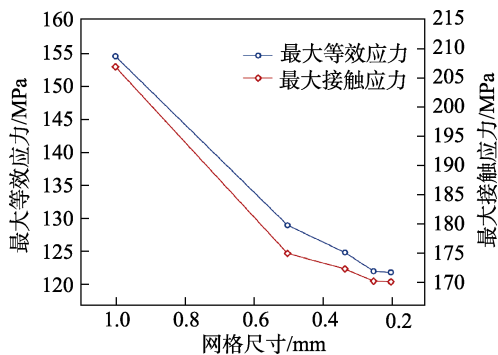


图 12 不同网格尺寸结果对比
Fig.12 Comparison of results for varisized grids

2.5 施加典型载荷

本文选取某船体悬挂链在 3 节航速、3 级海况、下放缆长 60 m 工况下, 60 s 内关键位置销轴张力时程曲线, 如图 13 所示。可见, 在低频和高频时, 销轴张力的波动幅值基本稳定在一定范围内, 其均值稳定在所承受结构自重左右。此处取销轴承载载荷为 4 kN。

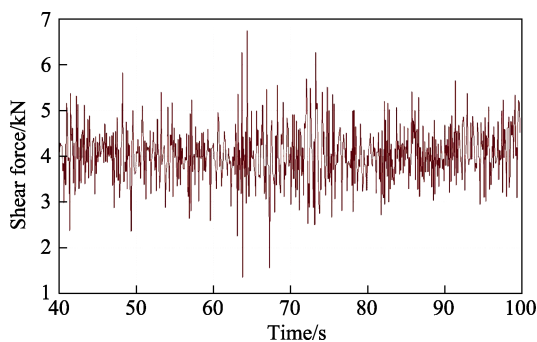


图 13 60 s 内张力时程曲线
Fig.13 Tension time course curve in 60 s

对于整个时程而言, 随着工况的变化, 销轴相对横档中心孔轴向滑动频率的波动变化会直接影响滑动销轴在单位时间的磨损结果。本文计算周期为 5 s, 对销轴在不同滑动频率的磨损结果进行计算。假定销轴受力为均值载荷, 总磨损结果是对典型载荷情况下, 不同滑动频率磨损结果的周期性累积。为了模拟销轴的真实受力情况, 采取以下措施: 根据销轴实际受力状态, 对其两端部受力上表面施加梯度载荷; 采用渐变方式加载, 模拟销轴张力连续性变化。

2.6 磨损计算结果

如图 14 所示, 销轴所定义的接触面已经能完全覆盖实际的接触面积。在沿滑动方向接触面最前端部分压应力较大, 滑移距离较小; 远离接触面前端部分压应力较小, 滑移距离较大, 属于滑动接触状态。当

水下设备受到冲击或振动时, 销轴沿横档中心孔发生轴向滑动, 导致磨损发生。

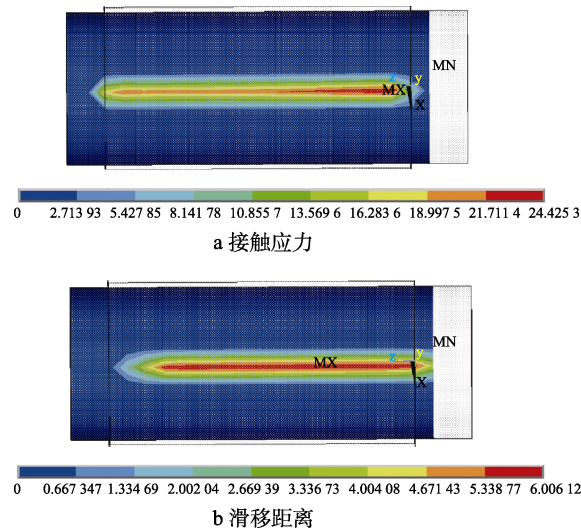


图 14 销轴磨损结果
Fig.14 Pin wear results: a) contact stress; b) sliding distance

受磨损形貌影响, 销轴和横档中心孔间接触区域的形貌和受力状态会发生变化, 从而引起磨损速度变化。本文主要考虑滑动对磨损的影响, 在上述典型载荷条件下, 经过计算, 累积 1 个周期内不同滑动频率下接触面的磨损结果, 得到实际接触单元的平均磨损深度, 最大磨损深度, 磨损体积以及 1 h 的磨损深度, 见表 2。

表 2 销轴 5 s 内不同滑动频率下磨损结果 Tab.2 Wear results of pin at different sliding frequency within 5 s				
频率 /Hz	平均磨损深度 / (10^{-8} mm)	最大磨损深度 / (10^{-6} mm)	总磨损体积 / (10^{-4} mm^3)	磨损速度 / $(10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1})$
2	2.19	1.26	1.46	0.91
3	2.17	1.88	2.18	1.35
4	2.20	2.53	2.94	1.82
5	2.19	3.15	3.66	2.27
6	2.21	3.80	4.43	2.74

通过对销轴磨损进行数值模拟计算, 得到了销轴不同滑动频率下的平均磨损深度、最大磨损深度、总磨损体积和磨损速度, 为后续极限强度分析提供了一定依据。由所得数据分析可知, 随着销轴滑动频率的增加, 销轴的平均磨损深度基本相同, 而最大磨损深度、总磨损体积、磨损速度均近似呈线性增长变化。

3 销轴磨损条件下的极限强度计算

3.1 磨损后销轴的有限元模型

销轴与横档的局部接触有限元模型和磨损后体积变化及其磨损形貌如图 15 所示。其中, 按实际情

况,在销轴两端施加垂向梯度载荷,并与横档设置接触,销轴两端自由,横档两端约束所有自由度。本文以 4 级磨损量,即最大磨损深度分别为 0、1、2、3 mm 进行极限强度计算。

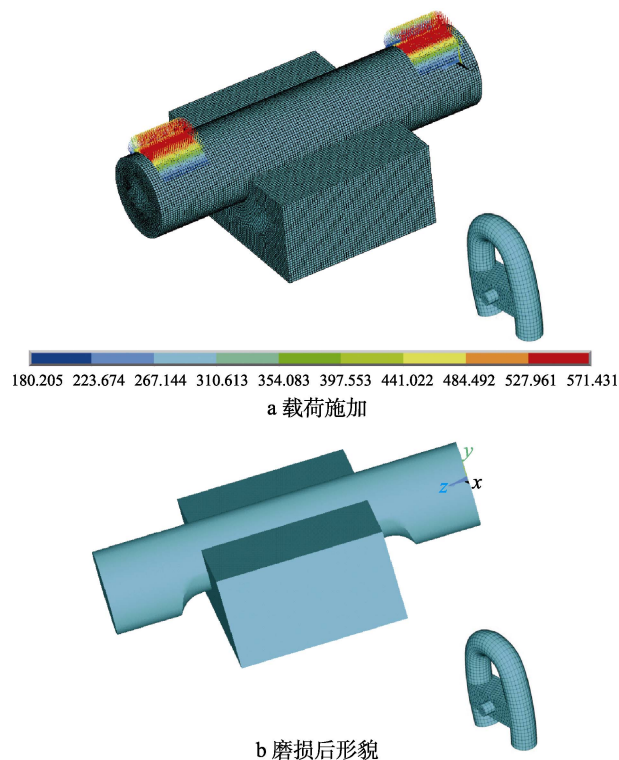


图 15 销轴与横档有限元模型
Fig.15 Finite element model of pin and transverse gear:
a) load application; b) post-wear appearance

3.2 销轴极限强度计算结果

在与横档接触条件下,销轴的极限强度分析属于弹塑性接触问题,需要考虑几何非线性与材料非线性。分析中采用与非对称矩阵一起使用的完全 Newton-Raphson 法,开启自适应下降以提高收敛能力。在销轴实际受力区域进行渐变加载,当销轴最大等效应力达到材料屈服强度时,计算完成,提取销轴达到材料屈服强度时的等效应力云图,如图 16 所示。

分析结果可知,在销轴的极限强度计算中,由于销轴始终处于自由状态。在与横档设置接触后,会造成收敛性困难。但是,在载荷逐渐加载的过程中,施加载荷大小和最大等效应力呈线性关系,故可以用线性插值方法得到销轴在不同磨损深度条件下的破断力。从应力云图可以看出,最大等效应力出现在销轴中部弯矩较大处,与理论分析一致。

3.2 不同磨损深度下销轴破断力计算

本文对于销轴设定最大磨损深度为 3 mm,以 1 mm 为间隔,对设定 4 种不同的磨损深度等级模型进行有限元计算,结果见表 3。

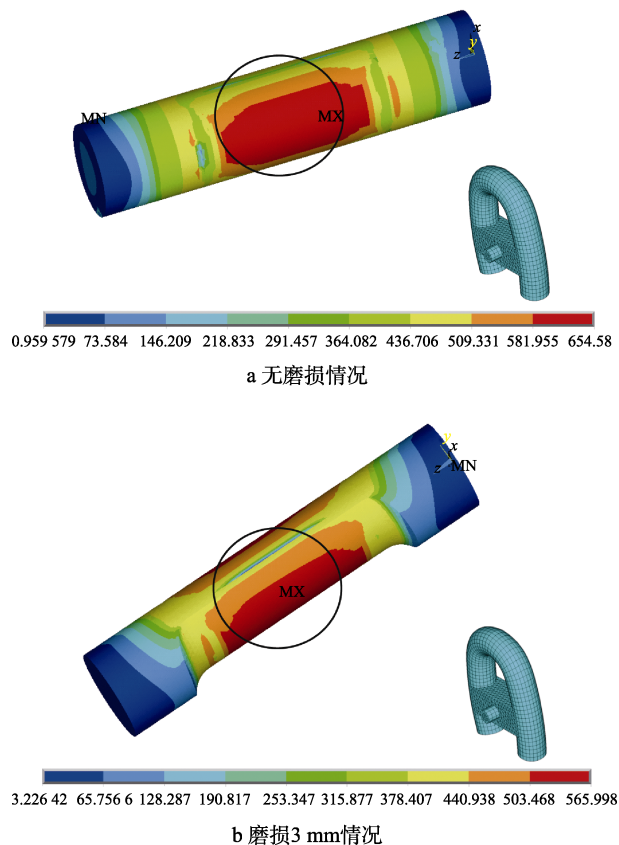


图 16 销轴等效应力分布
Fig.16 Equivalent stress distribution of pin: a) no wear;
b) wear of 3 mm

表 3 销轴在不同磨损深度等级下的破断力
Tab.3 Breaking force of pin at different wear depth

磨损深度/mm	0	1	2	3
破断力/kN	79.5	71.0	55.6	51.2

由数值模拟结果可知,销轴破断力随磨损深度的增加而下降,近似呈线性关系。因此,可以通过线性插值得到不同磨损深度下的破断力。对销轴实时受力进行安全校核,如式(1)所示。

$$T \leq \frac{T_b}{S} \quad (1)$$

式中: T 为实时张力; T_b 为当前磨损深度条件下的破断力; S 为安全系数,许用破断力为 T_b/S 。现行相关规范和文献中并没有对销轴强度安全系数进行明确规定,本文参考 API 规范^[26]对锚链强度安全系数的规定,此处安全系数取 $S=2$ 。

为了进一步建立磨损深度与时间的关系,需要建立各工况下磨损速度数据库(见表 4)以得到实时破断力变化曲线。现以滑动频率为 3 Hz 作为典型工况,将每 1 mm 磨损内的磨损速度取均值,建立最大磨损深度与时间的映射关系,得到本工况下许用破断力和累计使用时间与磨损深度的关系,如图 17 所示。

表 4 销轴 5 s 内不同滑动频率下磨损速度
Tab.4 Wear rate of the pin at different sliding frequency in 5 s

频率/Hz	磨损速度/(10 ⁻³ mm·h ⁻¹)
2	0.910
3	1.35
4	1.82
5	2.27
6	2.74

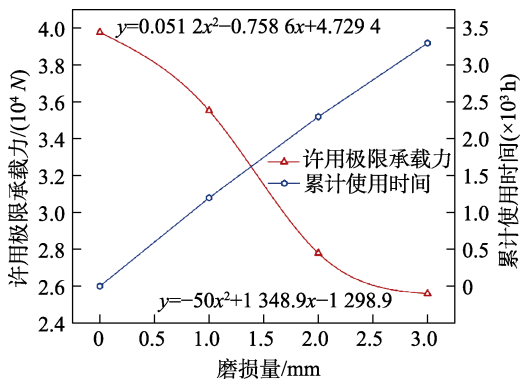


图 17 销轴许用破断力和累计使用时间随磨损量
(深度)变化曲线

Fig.17 Variation curve of allowable breaking force and
accumulated use time of pin with wear amount (depth)

4 结论

通过对销轴的弹塑性接触分析, 计算了销轴 1 个周期 (5 s) 内在不同轴向滑动频率下的磨损深度以及不同磨损深度等级条件下的极限承载力, 可得出如下主要结论:

- 1) 随着销轴轴向滑动频率的增加, 销轴的最大磨损深度、总磨损体积、磨损速度均近似呈线性增长变化。
- 2) 在相同环境下, 销轴许用极限承载力随着服役时间增加近似呈线性下降, 且随着时间增加许用极限承载力下降趋势变缓。
- 3) 在典型工况 (滑动频率为 3 Hz) 条件下, 销轴连续工作约 3 298 h 的磨损深度可达 3 mm, 许用破断力下降 14 180 N。

以此有限元方法为基础, 可以通过改变销轴不同材料性能输入参数, 对实际不同工况下销轴的磨损和极限承载力进行数值模拟, 为实际工程中提前预防销轴破断提供依据。

参考文献:

[1] 朱康平, 祝建雯, 曲恒磊. 国外生物医用钛合金的发展现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 2058-2063.
ZHU Kang-ping, ZHU Jian-wen, QU Heng-lei. Development and Application of Biomedical Ti Alloys Abroad[J].

Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(11): 2058-2063.

[2] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
JIN He-xi, WEI Ke-xiang, LI Jian-ming, et al. Research Development of Titanium Alloy in Aerospace Industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292.

[3] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.
HUANG Zhang-hong, QU Heng-lei, DENG Chao, et al. Development and Application of Aerial Titanium and Its Alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107.

[4] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 538-544.
YANG Ying-li, LUO Yuan-yuan, ZHAO Heng-zhang, et al. Research and Application Status of Titanium Alloys for Warships in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 538-544.

[5] 李志龙, 高怡斐, 马亚鑫, 等. 钛合金疲劳试样加工残余应力的表征及其对低周疲劳寿命的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(3): 133-140.
LI Zhi-long, GAO Yi-fei, MA Ya-xin, et al. Characterization of Residual Stress during Machining and Its Effect on Low Cycle Fatigue Life of Titanium Alloy Specimens[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 133-140.

[6] 乔奇光, 乔正阳, 李时威, 等. 某产品钛合金性能及台阶轴磨削[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 108-109.
QIAO Qi-guang, QIAO Zheng-yang, LI Shi-wei, et al. Performance and Stepped Shaft Grinding of Titanium Alloy of Guided Product[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 108-109.

[7] 吴小梅, 李伟光. 钛合金 ZrN 耐磨抗冲蚀防护涂层[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 41-44.
WU Xiao-mei, LI Wei-guang. ZrN Coated Titanium Alloy for Erosion Resistance[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(6): 41-44.

[8] 郑超, 魏世丞, 梁义, 等. 钛金属材料干摩擦磨损特性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 44-50.
ZHENG Chao, WEI Shi-cheng, LIANG Yi, et al. Dry Friction Wearing Characteristics of Titanium Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 44-50.

[9] 李新星, 李奕贤, 王树奇. TC4 合金在不同环境介质中的磨损行为及磨损机制研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(9): 793-798.
LI Xin-xing, LI Yi-xian, WANG Shu-qi. Wear Behavior and Mechanism of TC4 Alloy in Different Environmental Media[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(9): 793-798.

[10] 李奕贤, 王树奇, 李新星, 等. 速度和载荷对 TC11 合金干滑动磨损行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12): 3238-3242.

- LI Yi-xian, WANG Shu-qi, LI Xin-xing, et al. Effect of Velocity and Load on the Dry Sliding Wear Behavior of TC11 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(12): 3238-3242.
- [11] 陈康敏, 张秋阳, 李新星, 等. TC11 合金/GCr15 钢摩擦副的干滑动磨损行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(6): 1531-1535.
- CHEN Kang-min, ZHANG Qiu-yang, LI Xin-xing, et al. Dry Sliding Wear Behavior of TC11 Alloy/GCr15 Steel Tribo-Pair[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(6): 1531-1535.
- [12] KIM H J, EMGE A, KARTHIKEYAN S, et al. Effects of Tribooxidation on Sliding Behavior of Aluminum[J]. Wear, 2005, 259(1/2/3/4/5/6): 501-505.
- [13] PAUSCHITZ A, ROY M, FRANEK F. Mechanisms of Sliding Wear of Metals and Alloys at Elevated Temperatures[J]. Tribology International, 2008, 41(7): 584-602.
- [14] 宿月文, 陈渭, 朱爱斌, 等. 滑动磨损过程有限元分析及销磨损预测[J]. 中国机械工程, 2009, 20(13): 1573-1576.
- SU Yue-wen, CHEN Wei, ZHU Ai-bin, et al. Simulation of Sliding Wear Based on Finite Element Method and Its Application to Wear Prediction of Link Pivot Joint[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(13): 1573-1576.
- [15] 李华杰, 刘宏昭. 含间隙多体系统销轴磨损动力学仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(7): 1011-1015.
- LI Hua-jie, LIU Hong-zhao. Dynamics Simulation of Wear in Revolute Clearance Joints of Multibody Systems[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(7): 1011-1015.
- [16] 王快社, 马宏刚, 王文, 等. TA2 工业纯钛表面搅拌摩擦加工组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1530-1533.
- WANG Kuai-she, MA Hong-gang, WANG Wen, et al. Microstructure and Properties of TA2 Commercially Pure Titanium Surface by Friction Stir Processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9): 1530-1533.
- [17] 林翠, 赵立才. TC4 钛合金表面化学镀 Ni-P 合金耐磨层研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 507-512.
- LIN Cui, ZHAO Li-cai. Electroless Ni-P Wear-Resistant Coating on TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 507-512.
- [18] 冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 66-71.
- FENG Shu-rong, ZHANG Shu-quan, WANG Hua-ming. Wear Resistance of Laser Clad Hard Particles Reinforced Intermetallic Composite Coating on TA15 Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 66-71.
- [19] 丁大益, 潘斌, 王元清, 等. 钢结构工程中销轴连接的应用与研究[C]// 庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: [出版者不详], 2011.
- DING Da-yi, PAN Bin, WANG Yuan-qing, et al. Application and Research of Pin Connection in Steel Structure Engineering[C]// Celebrating the 60th Anniversary of Prof. Liu Xiliang's Teaching and the 11th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: [s. n.], 2011.
- [20] 姜晋庆, 张铎. 结构弹塑性有限元分析法[M]. 北京: 宇航出版社, 1990: 328-337.
- JIANG Jin-qing, ZHANG Duo. Elastic-Plastic Finite Element Analysis Method of Structure[M]. Beijing: Aerospace Press, 1990: 328-337.
- [21] 徐进永, 阎树岭. 工程机械铰接销轴结构设计[J]. 建筑机械, 1997(5): 18-19.
- XU Jin-yong, YAN Shu-ling. Structural Design of Hinged Pin Shaft of Construction Machinery[J]. Construction Machinery, 1997(5): 18-19.
- [22] 钢结构设计规范国家标准管理组. 《钢结构设计规范》修订详解(下)[J]. 建设科技, 2004(13): 36.
- Steel Structure Design Code National Standard Management Group. Detailed Explanation of the Revision of Code for Design of Steel Structures (II) [J]. Construction Science and Technology, 2004(13): 36.
- [23] 李伟, 杨索贤, 郑伟, 等. 模块化海洋平台连接销轴强度计算研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(S1): 1-4.
- LI Wei, YANG Suo-xian, ZHENG Wei, et al. Research on Strength Calculation of Modularized Platform Pinned Connection[J]. Ship Engineering, 2016, 38(S1): 1-4.
- [24] 吴帅, 张津, 殷明, 等. 一种海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备的研制[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 70-74.
- WU Shuai, ZHANG Jin, YIN Ming, et al. Development of a Marine Climate- Friction Load Coupling Test Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 70-74.
- [25] 张捷, 蓝国阳, 邓梦东, 等. 接触法分析组块在滑道上的滑移运动[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 大连: [出版者不详], 2013.
- ZHANG Jie, LAN Guo-yang, DENG Meng-dong, et al. Contact Method to Analyze the Slip Motion of a Group Block on a Slipway[C]// 16th Chinese Symposium on Marine (Shore) Engineering. Dalian: [s. n.], 2013.
- [26] API-RP-2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures[S].

责任编辑: 刘世忠