



# 超大型舾装集装箱船抗台风 系泊响应特性分析\*

高誉溶, 王斌弘, 马小舟

(大连理工大学, 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 针对台风天气下超大型舾装集装箱船系泊安全面临的挑战, 特别是单靠式码头在潮位变化时易导致系缆断裂、船舶碰撞等问题, 开展趸船式码头系泊系统的优化研究。通过建立 24 000 TEU 集装箱船与双趸船、三趸船码头耦合的六自由度动力学模型, 基于三维势流理论, 采用 AQWA 水动力分析软件, 对 12 级台风下  $0^\circ \sim 315^\circ$  浪向角的系泊系统动态响应进行数值模拟。研究表明, 趸船式码头具有缓冲作用, 有效抑制了集装箱船的运动响应, 可以防止船身撞击码头等危险。三趸船较双趸船布置稳定性更强, 缆绳张力与护舷受力更小, 且降低了船舶艏摇运动, 有效抑制了船舶偏转; 因艏摇运动, 护舷受力具有中间护舷压力小、两端护舷压力大的规律。研究提出的多趸船协同系泊方案可为超大型船舶防台风系泊设计提供理论依据和技术参考。

**关键词:** 台风; 舾装船舶; 趸船码头; 缆绳张力; 护舷压力

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0045-11

## Characterization of typhoon mooring response of ultra-large outfitted container ship

GAO Yurong, WANG Binhong, MA Xiaozhou

(The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Aiming at the challenges of mooring safety for ultra-large outfitted container ships under typhoon weather, especially the problems of bollard breakage and ship collision that are easily caused by the change of tidal level of the single dock, we carry out the optimization research of the barge-type wharf mooring system. By establishing a six-degree-of-freedom dynamic model of 24,000 TEU container ship coupled with a double-barge and triple-barge wharf, and based on the three-dimensional potential flow theory, AQWA hydrodynamic analysis software is used to numerically simulate the dynamic response of the mooring system for a wave angle of  $0^\circ \sim 315^\circ$  under a class 12 typhoon. The research results show that the barge-type wharf has a buffering effect, effectively suppresses the motion response of the container ship, and can prevent the ship's hull from hitting the wharf and other dangers. The three barges are more stable than the two barges arrangement, the cable tension and fender force are smaller, and the bow rocking motion of the ship is reduced, which effectively inhibits the ship's yawing; the fender force has the law that the fender pressure in the middle position is small, and the fender pressure at the two ends is large due to the bow rocking motion. The multi-barge cooperative mooring scheme proposed in this study can provide a theoretical basis and technical reference for the design of anti-typhoon mooring for very large ships.

**Keywords:** typhoon; outfitted ship; pontoon wharf; mooring force; fender pressure

收稿日期: 2025-06-04 录用日期: 2025-07-14

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(W2411038)

作者简介: 高誉溶(2001—), 女, 硕士研究生, 从事港口工程及系泊船水动力响应研究。

通信作者: 马小舟(1977—), 男, 博士, 教授, 从事近岸波浪非线性变形的研究。E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

我国东南沿海地区台风灾害频发, 极端气象条件下码头系泊船舶的动态响应直接影响口作业安全<sup>[11]</sup>, 尤其是大型船舶可能会对船身和码头造成很大破坏<sup>[12]</sup>。舾装船舶因其特殊的作业状态(如缺乏自航能力、空载吃水较浅)且受风面积显著增大, 在强风浪作用下更易承受异常横向荷载, 进而引发系泊缆绳断裂、船舶漂移甚至碰撞码头等重大安全事故。因此, 深入研究大型舾装船舶在台风天气下的系泊动力响应特性以及采用新型趸船式系泊对系泊系统进行优化, 对于保障恶劣海况下的港口作业安全具有重要的工程实践价值。

目前, 国内外学者们主要采用物模试验和数值模拟开展船舶在台风下的系泊安全研究。李琳等<sup>[13]</sup>介绍了台风预报的因素及船舶防抗台风应注意的问题; 李小军等<sup>[4]</sup>对 15 000 TEU 集装箱船进行模型试验发现: 波浪对系泊系统的影响大于风和水流; 加强系缆可均衡缆力分布, 降低断缆风险; 舾装船舶的横荡和纵荡主要由低频波浪激励引起, 其他运动则取决于波谱峰值周期。沈雨生等<sup>[5]</sup>利用 10 万吨级散货轮模型试验分析了不同波浪和不同装载状态下系泊船舶横摇运动的影响; 李剑等<sup>[6]</sup>采用 MOSES 软件进行数值计算, 对某船码头防台系泊带缆受力进行分析预报, 提出增加船首及船尾横向受力的缆绳, 用于抵抗船舶受到的台风侧向力。卫欣等<sup>[7]</sup>从材料选择、系泊方式、系泊布置等方面, 设计了海洋工程船 (platform supply vessel, PSV) 临时停靠在码头的防台防汛处置方案。詹广才等<sup>[8]</sup>利用 AQWA 软件计算模拟了 14 000 TEU 集装箱船系泊运动状态, 通过分析振幅响应算子, 得到该船型横摇周期与港池内中长期波浪周期不同, 不易发生共振的结论。杨春慧等<sup>[9]</sup>通过频域时域分析, 对比 LNG (liquefied natural gas, 液化天然气) 船舶系泊方案, 发现预张力缆绳较传统缆绳能更有效抑制船舶多自由度运动, 显著提升系泊稳定性。Fang<sup>[10]</sup>和 Walree 等<sup>[11]</sup>采用时域边界元法对系泊船舶进行数值模拟, 通过试验验证, 表明该方法具有较高的计算精度。

在码头系泊问题的数值仿真研究中, 有关大

型船舶的抗台研究及多浮体系泊研究较少<sup>[12-13]</sup>。本文以某船厂的 24 000 TEU 超大型集装箱船为研究对象, 分析码头以及周围环境参数, 进行相关水动力分析计算, 提出系泊方案。当潮差大于 3 m 时, 一般采用趸船将船只推离码头, 且趸船具有缓冲作用, 能够降低码头结构负荷, 维持船舶与码头间的稳定连接, 例如宁波舟山港潮位差在 4~5 m, 矿石码头通过趸船缓冲, 实现 30 万吨级船舶全天候装卸。因此, 本文基于三维势流理论, 利用多体水动力学软件 AQWA, 选取利用趸船将大型船只推离的靠泊方案, 由于单趸船不符合规范尺寸要求, 从经济效益出发且考虑到抗台要求, 本文采用双趸船-集装箱船和三趸船-集装箱船的靠泊方案, 分析不同环境荷载下船体运动响应、系缆绳张力和护舷受力的规律, 选取更合理的靠泊方案, 为实际工程提供参考。

## 1 计算方法及原理

### 1.1 三维势流理论

采用水动力学软件 AQWA, 考虑水动力相互作用, 对码头系泊系统进行数值计算分析。基于三维势流理论, 在无旋场中, 速度势拉普拉斯方程表示为:

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z, t) = 0, \mathbf{V} = \nabla \Phi \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为一阶波浪力的速度势;  $x, y, z$  为直角坐标系;  $t$  为时间;  $\mathbf{V}$  为速度势。

船体表面压力分布由拉格朗日方程求出:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 + gz = f(t) \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为守恒方程的通用变量;  $p$  为表面静压;  $\rho$  为液体密度;  $v$  为物体速度。

一阶波浪力的速度势为:

$$\Phi = \varphi e^{-i\omega t} = [(\varphi_i + \varphi_d) + \sum_{j=1}^6 \varphi_j x_j] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为规则波频率;  $\varphi_i$  为入射波速度势;  $\varphi_d$  为绕射波速度势;  $\varphi_j$  为幅射势, 是第  $i$  个结构的单位第  $j$  次运动, 而其他结构保持静止;  $x_j$  为振幅的运动。

$$\varphi_i e^{-i\omega t} = \frac{-ig\zeta \operatorname{ch}[k(d+z)] \exp[ik(x\cos\theta+y\sin\theta)] e^{-i\omega t}}{\omega \operatorname{ch}(kd)} \quad (4)$$

式中:  $k$  为波数, 由  $\omega^2 = gk \tanh(kd)$  求得;  $d$  为水深;  $\zeta$  为入射波幅。

解得一阶波浪力速度势后, 水压力分布可由伯努利方程求得:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (5)$$

然后沿湿表面面积积分得到一阶波浪力  $F_j$ :

$$F_j = - \int_s P n_j ds = - \int_s i\omega \rho (\varphi_i + \varphi_d) n_j ds \quad (6)$$

式中:  $s$  为离散单元面积;  $n_j$  为表面法向量;  $P$  为压强。

在采用 AQWA 进行计算时, 将系统所受波浪力分为两部分: 入射力  $F_{mj}$  和绕射力  $F_{nj}$ , 且均是简谐的。

入射力:

$$F_{mj} = - \int_s i\omega \rho \varphi_i n_j ds \quad (7)$$

绕射力:

$$F_{nj} = - \int_s i\omega \rho \varphi_d n_j ds \quad (8)$$

根据牛顿定律, 考虑浮式基础的附加质量、线性波浪阻尼、静水回复力、系泊力和波浪激励力, 可以建立浮式结构在规则波下的一阶频域运动方程:

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ -\omega^2 [\mathbf{M}_{kj} + \mathbf{A}_{kj}(\omega)] + i\omega \mathbf{B}_{kj}(\omega) + \mathbf{C}_{kj} \right\} \cdot \xi_j(\omega) = F_{jd}(\omega) \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{M}_{kj}$  为结构质量矩阵;  $\mathbf{A}_{kj}$  为结构的附加质量矩阵;  $\mathbf{B}_{kj}$  为辐射阻尼矩阵;  $\mathbf{C}_{kj}$  为静水恢复矩阵;  $F_{jd}$  为波浪激励荷载。

## 1.2 环境荷载理论

风和流是直接作用在系泊船舶上的主要环境荷载, 并且在系泊分析中是十分必要的。AQWA 中需用户自行定义风、流力系数, 对于作用船体的风力和流力的计算, 最精确的方法是在风洞和水池中进行相应模型试验, 但考虑到试验中人力物力的消耗, 目前多采用经验公式对风、流力进行计算。本文采用 JTS 144-1—2010《港口工程荷

载规范》所推荐的经验公式计算风、流力。

1) 风力计算公式为:

$$\begin{cases} F_{w,x} = 73.6 \times 10^{-5} A_{w,x} V_x^2 \xi_1 \xi_2 \\ F_{w,y} = 49 \times 10^{-5} A_{w,y} V_y^2 \xi_1 \xi_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $F_{w,x}$ 、 $F_{w,y}$  分别为横向和纵向分力;  $A_{w,x}$ 、 $A_{w,y}$  分别为横向和纵向受风面积;  $V_x$ 、 $V_y$  分别为设计风速在横向和纵向上的分量;  $\xi_1$  为风压不均匀折减系数;  $\xi_2$  为风压高度变化修正系数。

风压不均匀折减系数见表 1, 风压高度变化修正系数见表 2。

表 1 风压不均匀折减系数

Tab. 1 Reduction coefficients of non-uniformity of wind pressure

船舶水面以上最大轮廓尺寸/m	≤50	100	200	≥250
$\xi_1$	1.00	0.90	0.70	0.60

表 2 风压高度变化修正系数

Tab. 2 Correction coefficients of height variation of wind pressure

船舶水面以上高度/m	≤5	10	15	20	30
$\xi_2$	1.00	1.18	1.30	1.39	1.54

2) 流力计算公式。根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》, 流力计算公式如下:

$$F_{c,x} = F_{lcp} + F_{lcf} \quad (11)$$

其中:

$$F_{lcp} = \frac{1}{2} C_{lcp} \rho V_c^2 B D \cos\beta \quad (12)$$

$$F_{lcf} = \frac{1}{2} C_{lcf} \rho V_c^2 S \cos\beta \quad (13)$$

$$S = 1.7 L_{wl} D + C_b L_{wl} B \quad (14)$$

$$C_b = \frac{\Delta}{L_{wl} B D} \quad (15)$$

$$C_{lcf} = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2} + \Delta C_{lcf} \quad (16)$$

$$Re = \frac{V_c L_{wl} |\cos\beta|}{\nu} \quad (17)$$

式中:  $F_{lcp}$  为形状阻力;  $F_{lcf}$  为摩擦阻力;  $C_{lcp}$  为形状阻力系数, 系靠船结构前沿水深与船舶吃水之比小于或等于 1.5 时取 0.27, 大于 1.5 时取 0.17;  $\rho$  为海水密度, 取  $1.025 \text{ t/m}^3$ ;  $V_c$  为流速;  $B$  为船宽;  $D$  为船舶吃水;  $\beta$  为水流方向与船舶纵轴之间

的夹角;  $C_{lcf}$  为船体摩擦阻力系数;  $S$  为船舶吃水线以下的表面积;  $C_b$  为船舶方形系数;  $\Delta$  为船舶排水体积;  $Re$  为水流对船舶作用的雷诺数;  $L_{wl}$  为船舶吃水线长;  $\nu$  为水的运动黏滞系数, 见表 3;  $\Delta C_{lcf}$  为船体粗糙度修正系数, 取  $0.4 \times 10^{-3}$ 。

表 3 水的运动黏滞系数

Tab. 3 Kinematic viscosity coefficients of water

水温/°C	$\nu/(10^{-6}m^2 \cdot s^{-1})$	
	淡水	海水
0	1.79	1.83
5	1.52	1.56
10	1.31	1.35
15	1.14	1.19
20	1.00	1.05
25	0.89	0.94
30	0.80	0.85
40	0.66	0.71

## 2 数值计算模型

根据 JTS 166—2020《河港总体设计规范》第 4.2.19 条确定趸船数量, 且趸船的主尺度应满足船舶系靠泊安全和工艺使用要求, 见表 4。

根据表 4 主尺度要求, 不推荐使用单趸船, 考虑到经济效益, 本文选取 2 个趸船和 3 个趸船两种靠泊方案, 并对比两者对船体运动响应、系缆绳张力和护舷受力各自的规律。

表 4 趸船主尺度要求

Tab. 4 Requirements for barge main scale

趸船长度	钢制趸船主尺度	
	$L_d/D_d$	$B_d/D_d$
$(0.70 \sim 0.90)L$	$\leq 35$	$\leq 7$

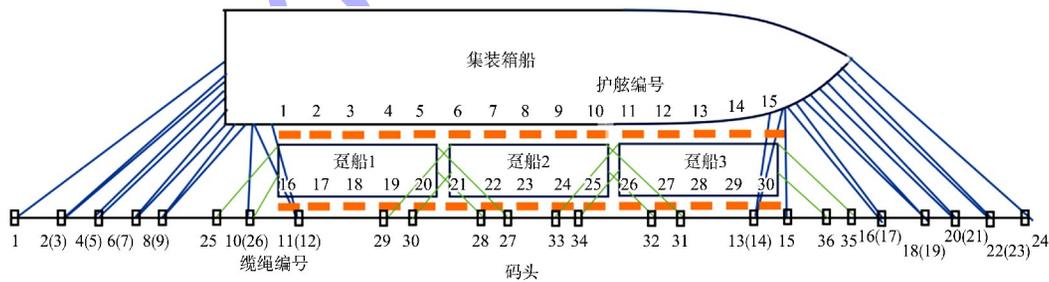
注:  $L$  为设计船型长度,  $B_d$  为趸船宽度,  $D_d$  为趸船型深,  $L_d$  为趸船长度。

利用 AQWA 软件进行水动力计算分析, 船舶主尺度参数见表 5。计算时选取某舾装码头高潮位水深 14 m。舾装码头为透水结构高桩码头, 对船体和趸船的水动力影响较小, 模型中未添加码头结构。集装箱船布置 24 条 PA66 型缆绳, 趸船各布置 4 条 PA66 型缆绳, 破断荷载为 1 100 kN。在每个趸船上分别布置 5 个护舷, 趸船对应的码头上也各布置 5 个护舷。本文采用的防撞护舷为 SCK2500H 标准反力型一鼓一板, 其吸能量和压缩产生 52.5% 变形时的反作用力分别为 3 391 kJ 和 3 300 kN。趸船、集装箱船系泊系统布置见图 1。

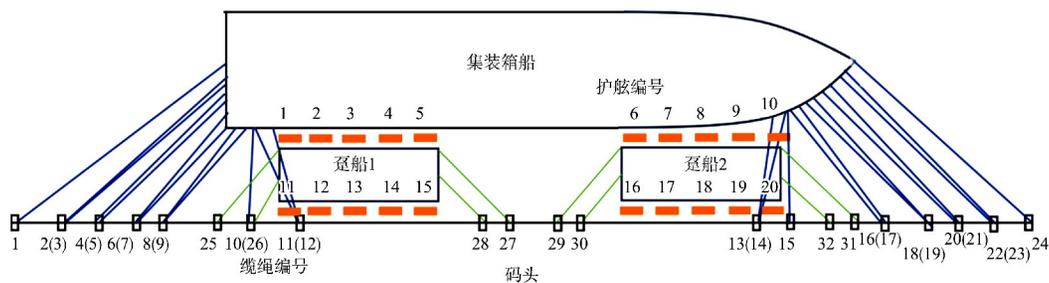
表 5 船舶主尺度参数

Tab. 5 Vessel main scale parameters

类别	总长/ m	型宽/ m	设计船型 在泊吃水/m	设计吃水条件 下的排水量/t
24 000 TEU 集装箱船	399.99	61.3	8	67 428
趸船	90	30	3	7 563



a) 集装箱船和三趸船



b) 集装箱船和双趸船

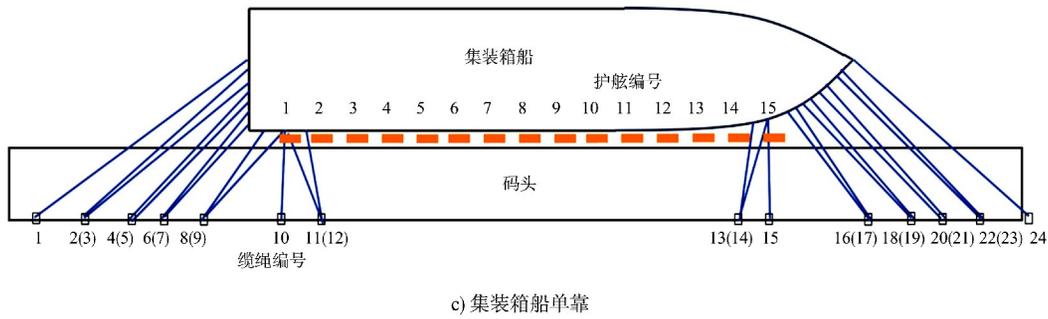


图 1 集装箱船系泊系统布置

Fig. 1 Arrangement of container ship mooring system

舾装码头位于某入海口处, 为顺岸码头, 故选取流荷载方向为  $180^\circ$  (顶流), 流速为  $1.6 \text{ m/s}$ ; 风速采用台风期间的较大风速, 取  $36.9 \text{ m/s}$ , 即 12 级风的极限风速。台风的方向设为  $0^\circ \sim 315^\circ$ , 风浪同向, 每隔  $45^\circ$  进行一次计算。波浪采用基于 JONSWAP 谱的不规则波。风和流采用定常风和定常流。考虑趸船低于码头面, 且码头后为岸线土方, 即风不可从高桩码头下方穿过作用于趸船, 因此风荷载仅对集装箱船生效。模拟共考虑 1 000 个波周期, 即计算时长为  $6\,000 \text{ s}$  (步长  $0.1 \text{ s}$ , 共  $60\,000$  步)。建立坐标系及环境荷载方向, 见图 2。

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 单靠式系泊在大型船舶系泊中的局限性分析

为分析单靠式系泊针对大型船舶靠泊在台风期间的局限性, 对单靠式系泊靠泊方案进行数值计算, 选取  $270^\circ$  横浪的典型工况, 集装箱船的运动响应幅值见表 6, 护舷压力极值见表 7。

表 6 集装箱船运动响应幅值

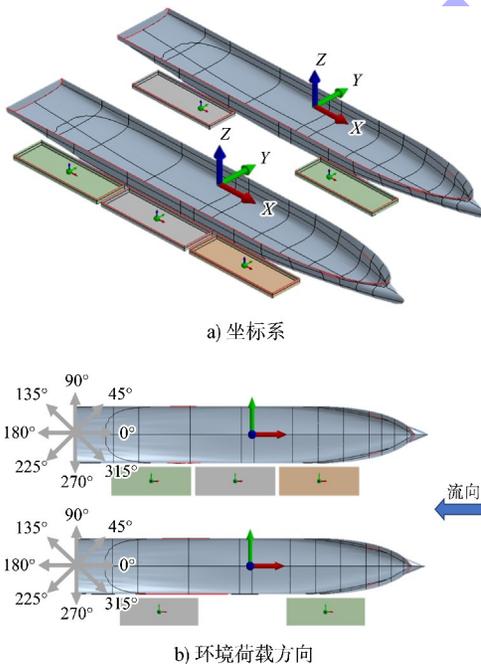
Tab. 6 Motion response amplitude of container ships

类别	纵荡	横荡	垂荡	横摇	纵摇	艏摇
运动响应幅值	2.88 m	2.2 m	1.13 m	$1.62^\circ$	$0.83^\circ$	$0.65^\circ$

表 7 集装箱船护舷压力极值

Tab. 7 Fender pressure extremes of container ships

护舷压力最大值	码头护舷/kN	护舷压力最大值	码头护舷/kN
1	3 783.12	9	3 892.11
2	3 812.15	10	3 802.17
3	3 592.85	11	4 215.6
4	3 718.95	12	3 762.15
5	3 816.54	13	3 712.19
6	3 612.95	14	3 642.12
7	3 637.15	15	3 414.56
8	3 735.66		



注: 浪向角  $0^\circ$  表示环境荷载来自艏部;  $90^\circ$  表示环境荷载来自右舷;  $180^\circ$  表示环境条件来自艉部;  $270^\circ$  表示环境荷载来自左舷。

图 2 坐标系及环境荷载方向

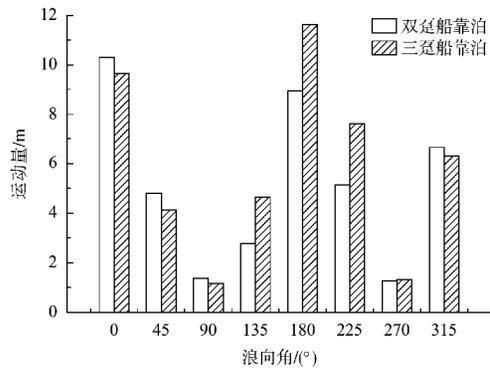
Fig. 2 Coordinate system and direction of environmental loads

在传统单靠式码头靠泊方案中, 本文的数值仿真模型设定船舶与码头间距为  $3 \text{ m}$ , 并采用  $1.5 \text{ m}$  护舷作为缓冲结构。然而, 计算结果表明该方案存在严重问题, 集装箱船横荡运动量过大, 并且该系泊方案的护舷数量较少, 均摊到每个护舷上的受力更大, 护舷压力值超出最大设计承载能力, 护舷发生压溃失效, 并且大型船舶靠近码头, 其冲击力会破坏码头结构, 因此单靠式系泊具有局限性。

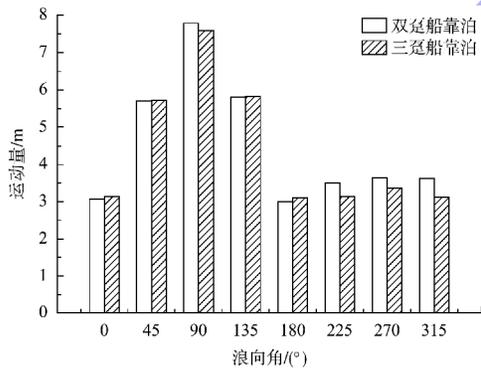
### 3.2 多趸船系泊分析

#### 3.2.1 船体运动响应幅值

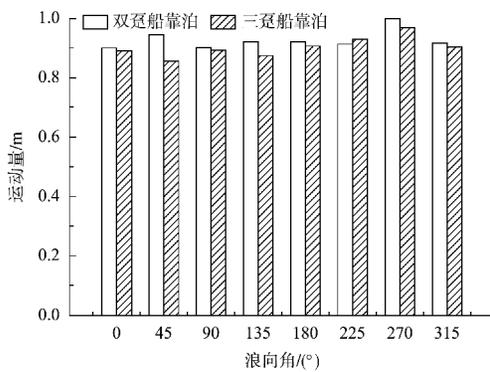
针对不同方向环境荷载作用下的趸船集装箱船多体系泊系统动力学响应问题,研究通过三维势流理论与时域耦合分析方法建立了数值仿真模型。其中,集装箱船在风、浪、流联合作用下的六自由度运动响应特性见图3,其幅值变化呈现显著的浪向角依赖性。



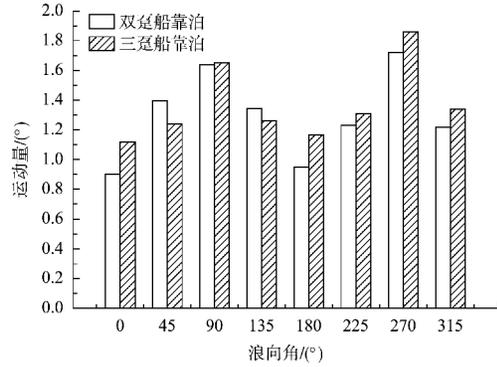
a) 纵荡



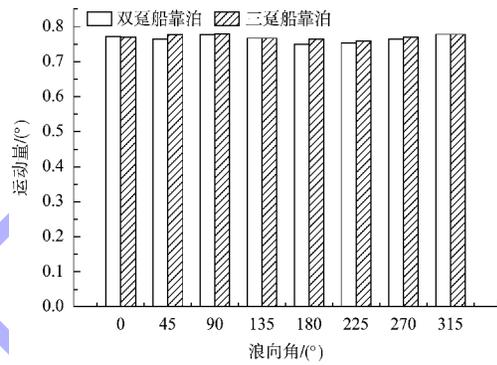
b) 横荡



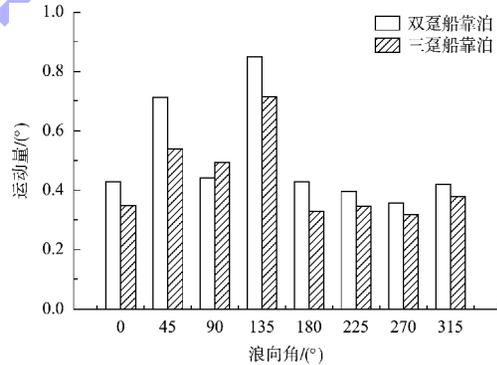
c) 垂荡



d) 横摇



e) 纵摇



f) 艏摇

图3 不同浪向角下船舶运动响应

Fig. 3 Ship motion response under different wave angles

在船舶趸船系泊系统中,六自由度上运动情况最为激烈的就是横荡、纵荡、横摇。通过对比三趸船、双趸船两种靠泊方案在六自由度上的运动响应可以看出,两种靠泊方式六自由度上的运动响应随浪向角度的变化趋势较为一致。

纵荡运动在  $0^\circ$  (艏迎浪) 和  $180^\circ$  (艉迎浪) 工况下最为显著。这是由于船舶纵轴方向与波浪传播方向完全一致时, 纵向波浪激励力最大, 导致船舶沿船长方向的往复运动加剧。横荡运动在  $90^\circ$  (离岸风) 工况达到峰值, 但由于三趸船布置整体结构更稳定, 趸船的缓冲作用更大, 使得集装箱船实际承受的环境荷载减小, 因此尽管处于最不利浪向角, 其运动幅值仍被部分抑制。横摇运动的极值出现在  $270^\circ$  (向岸风) 工况, 这是因为垂直于船体的风力将船舶压向码头, 导致系泊缆绳张力松弛; 护舷接触产生的反力形成额外横摇力矩; 三趸船方案因布置更多护舷, 其力矩放大作用较双趸船方案更显著, 最终导致横摇响应更大。垂荡、纵摇与艏摇运动整体变化幅度较小, 垂荡运动受波浪垂向激励影响, 幅值始终维持在较窄区间; 纵摇运动因船舶纵向稳性较强, 变化范围不足  $0.1^\circ$ ; 艏摇运动在斜浪工况 ( $45^\circ/135^\circ$ ) 出现轻微增大, 这与离岸风作用下系泊系统的横向约束减弱有关, 但最大偏移量仍控制在  $1^\circ$  以内。

### 3.2.2 系泊缆绳张力

对不同方向环境荷载作用下的集装箱船系泊系统进行仿真, 在计算时长 6 000 s 内, 各工况下集装箱船艏缆、艉缆及趸船缆绳的最大张力值随浪向角度变化情况见图 4~6。

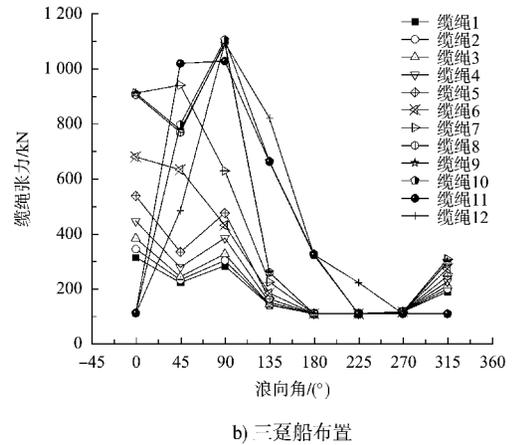
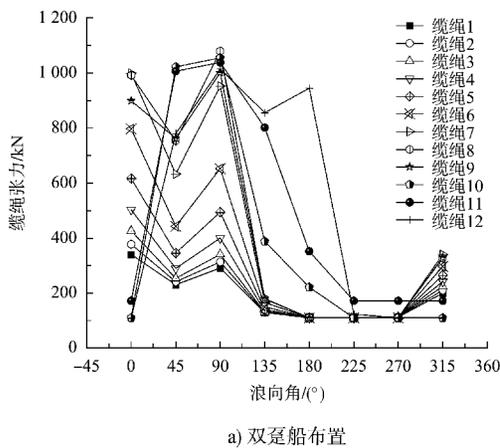


图 4 不同浪向角下艉缆张力变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of stern range tension under different wave direction angles

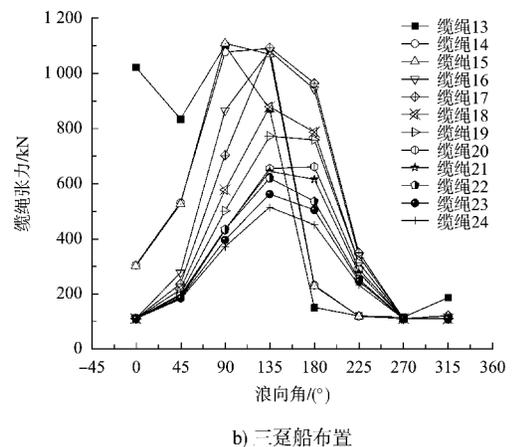
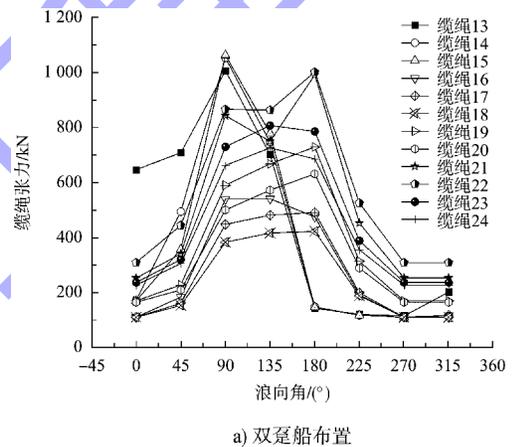
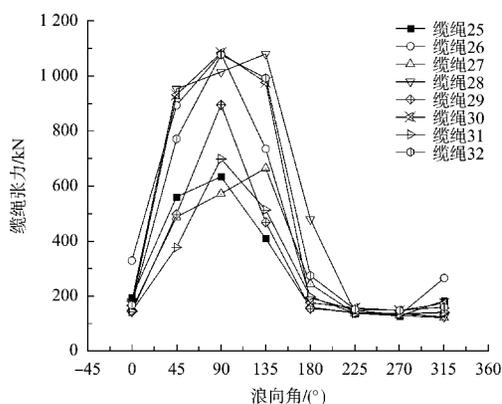
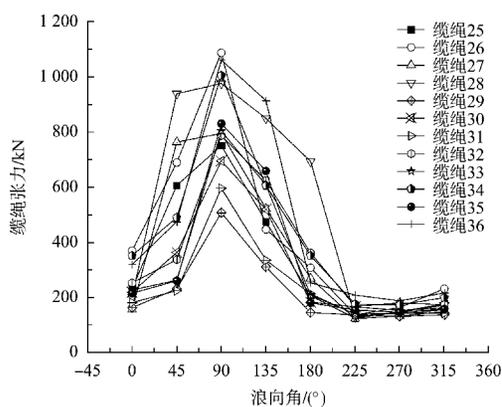


图 5 不同浪向角下艏缆张力变化曲线  
Fig. 5 Variation curves of bow tension under different wave directions



a) 双趸船布置



b) 三趸船布置

图6 不同浪向角下趸船缆绳张力变化曲线

Fig. 6 Variation curves of barge cable tension under different wave angles

整体上看, 缆绳张力均在中间区域达到峰值。其中, 缆绳张力值在离岸风工况下大于向岸风工况下的缆绳张力值, 分析其原因, 主要是当环境荷载为离岸风浪时, 船舶受风浪推动远离码头, 护舷脱离接触, 无法提供反力, 导致环境荷载(风、浪、流)几乎全部由系泊缆绳独立承担。当风向为向岸风时, 由于码头和趸船的存在, 船舶被压向码头, 护舷压缩变形, 通过接触反力直接抵消部分环境荷载, 显著降低缆绳负担, 且趸船的运动也抵消部分环境荷载。

对集装箱艃缆张力值进行分析, 8~12号艃缆横缆、艃倒缆在开风工况下达到极值, 主要承担船舶的横向动力响应。此时, 船舶受横浪作用产生大幅横荡, 短缆因与风向重合成为主要荷载传递

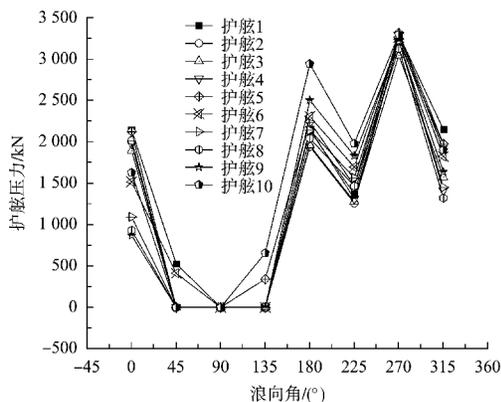
路径。1~7号艃缆在0°浪向角时即艃迎浪工况下达到极值, 波浪激励力沿船长方向作用, 推动艃远离码头, 此时艃缆需抵抗船舶的纵荡与纵摇耦合运动, 艃缆承担大部分的运动荷载。短缆的张力极值普遍高于长缆, 其极值趋于1100 kN的缆绳破断力, 存在断缆的风险, 需加强缆绳的配置。双趸船、三趸船布置下的缆绳张力值变化曲线趋势大体一致。

对集装箱艃缆张力值进行分析, 13~15号艃缆横缆、艃倒缆在开风工况下达到极值, 承担大部分的运动荷载; 16~24号艃缆极值出现在135°和180°浪向角工况下, 这是因为在135°斜浪工况下艃摇运动量达到极值, 产生艃摇力矩使艃有逆时针旋转趋势, 为抵抗船舶偏转, 一部分艃缆绳在135°斜浪工况下达到极值。在艃迎浪工况下, 艃有离泊趋势, 因此一部分艃缆绳在此工况下达到极值。

对趸船缆绳张力值进行分析, 三趸船的12根缆绳极值均出现在开风工况下; 双趸船的8根缆绳极值大部分出现在开风工况下, 27、28号缆绳出现在135°斜浪工况下。三趸船紧密排布使得多体刚度更高, 整体较为稳定, 有效抑制了船舶的偏转, 因此缆绳张力分布均匀。

### 3.2.3 系泊护舷压力极值

对不同方向环境荷载作用下的集装箱船系泊系统进行仿真, 护舷压力极值随浪向角的变化曲线见图7、8。



a) 双趸船布置

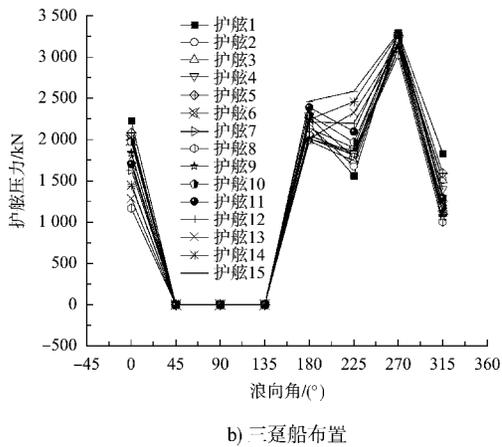


图 7 不同浪向角下趸船护舷压力极值

Fig. 7 Extreme values of barge fender pressure at different wave angles

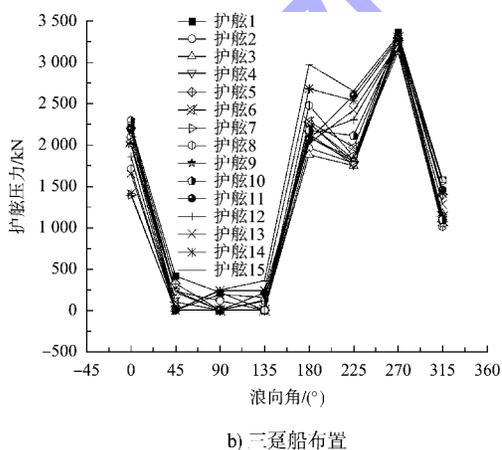
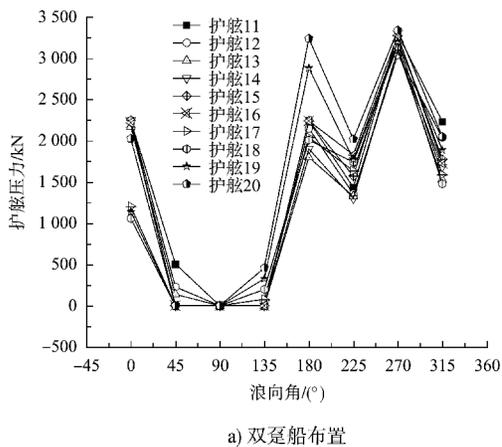


图 8 不同浪向角下码头护舷压力极值

Fig. 8 Extreme values of dock fender pressure at different wave angles

整体上看, 双趸船、三趸船布置下护舷压力极值的变化曲线趋势大体一致。对趸船和码头的护舷压力极值按照风向分成向岸风、离岸风、纵

向风 3 类进行分析。

对于向岸风工况, 此时船舶被推向码头, 护舷受压较大, 从而其压力值较大。护舷压力极值均出现在风向 270° 的拢风工况下, 此时环境荷载方向与码头法向一致, 趸船和码头两端的护舷压力存在超过护舷最大支反力 3 300 kN 的情况, 由于集装箱船与趸船的艏摇运动, 与船艏相比, 船艉与护舷碰撞更频繁且幅度更大, 因此每一个护舷力的分布特征表现为两端护舷压力较大、中间较小。

对于离岸风工况, 离岸风将集装箱船推离趸船和码头, 缆绳张力主要承担船舶动力响应, 集装箱船与趸船护舷之间的碰撞减少, 导致趸船护舷的受力相对较小。除此之外, 由于船舶艏摇运动出现了迎风侧护舷压力值更大的现象。在开风工况下趸船护舷压力值为 0 kN, 说明由于集装箱船的横荡运动量过大, 使得其并未与趸船护舷接触, 此工况下, 码头护舷压力值也达到最小。

对于纵向风工况, 即当风向为 0° 和 180° 时, 风沿船长方向推动集装箱船, 迎风一侧的缆绳长度增加, 张力增大, 在抵抗风力的同时也提供了较大的艏摇力矩和朝向码头的横荡力, 使得集装箱船的迎风侧靠向码头, 与护舷发生碰撞。因此当风向为 0° 时, 艉一侧的趸船护舷压力值较大, 而当风向为 180° 时, 艏一侧的趸船护舷压力值较大。

### 3.2.4 双趸船与三趸船对比分析

总体上来看, 三趸船延伸平台布置整体优于双趸船延伸平台布置, 三趸船布置通过多体协同效应, 在运动控制、荷载分布和能量耗散方面均展现出显著优势。

基于多体动力学理论, 三趸船布置由于排布紧密形成空间刚架效应, 整体刚度大于双趸船布置, 发挥的缓冲作用更大, 使得集装箱船实际承受的环境荷载减小, 集装箱船横荡、艏摇运动幅度会被部分抑制, 有效抑制船舶偏转; 护舷分布

更均匀,在最不利工况下,能很好地发挥出缓冲作用,防止集装箱船冲击力破坏码头和自身船体结构;缆绳张力分布较均匀,不会出现明显的“张力跃迁”现象,缆绳疲劳损伤指数低于双趸船布置。

#### 4 结语

1) 三趸船和双趸船系泊布置下,集装箱船的运动趋势相似,横荡、纵荡和横摇对环境方向敏感。三趸船结构更稳,缓冲作用更强,减小了环境荷载,使横荡和艏摇幅值低于双趸船布置。

2) 开风工况下缆绳张力最大,因船体远离码头,护舷失效,荷载全由缆绳承担。纵向风下,缆绳为抵抗船体纵向离泊,使船体产生艏摇运动和朝向码头的横荡运动,迎风侧缆绳张力更高。短缆因刚度大,相同位移下张力增量更显著。

3) 双趸船和三趸船布置下护舷压力趋势一致,拢风工况达到最大。艏艉因艏摇运动碰撞护舷更频繁,两端护舷压力高于中间。迎风侧缆绳张力增大,使船体靠向码头,导致该侧护舷压力更大。

4) 尽管三趸船延伸平台布置造价较高,但其在极端条件下的可靠性显著优于双趸船。三趸船布置通过多体协同效应,在运动控制、荷载分布和能量耗散方面均展现出显著优势。

#### 参考文献:

- [1] 李东轩. 舾装码头系泊安全研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- LI D X. Study on the safety of mooring of fitting-out quay[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [2] 马海涛. 我国沿海船舶防抗台风工作探讨[J]. 中国水运(下半月), 2008(10): 19, 21.
- MA H T. Discussion on typhoon prevention and resistance of coastal ships in China [J]. China water transport (the second half of the month), 2008(10): 19, 21.
- [3] 李琳, 杜林海. 大型船舶抗台的措施[C]//中国航海学会. 2010年全国气象海洋环境与船舶航行安全学术研讨会论文集. 天津: 中远散货运输(集团)有限公司, 2010: 131-134.
- LI L, DU L H. Measures for large ships to resist typhoon [C]//China Institute of Navigation. Proceedings of the 2010 National Academic Symposium on Meteorological and Marine Environment and Ship Navigation Safety. Tianjin: China COSCO Bulk Shipping (Group) Co., Ltd., 2010: 131-134.
- [4] 李小军, 闻鸣, 诸云鹏, 等. 超大型船舶码头舾装作业台系泊模型试验研究[J]. 海洋工程, 2025, 43(4): 89-99.
- LI X J, WEN M, ZHU Y P, et al. Experimental study on anti-typhoon mooring of outfitting operations in ultra-large ship terminals [J]. The ocean engineering, 2025, 43(4): 89-99.
- [5] 沈雨生, 周益人. 不同波浪和装载条件下系泊船舶横摇运动试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2018, 33(3): 364-369.
- SHEN Y S, ZHOU Y R. Experimental study on roll motion of a moored ship under different wave and loading conditions [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2018, 33(3): 364-369.
- [6] 李剑, 柯泰勇, 许妙树, 等. 大型双体船码头防台系泊带缆受力计算预报研究[J]. 广东造船, 2024, 43(6): 86-90.
- LI J, KE T Y, XU M S, et al. Research on the calculation and prediction of the mooring force of a large catamaran in dock against typhoon [J]. Guangdong shipbuilding, 2024, 43(6): 86-90.
- [7] 卫欣, 吴恭兴, 史旦达, 等. 海洋工程船舶码头防台系泊方案设计及其计算分析[J]. 船舶标准化工程师, 2017, 50(6): 42-47.
- WEI X, WU G X, SHI D D, et al. Design and calculation analysis of anti-typhoon mooring plan for offshore ships [J]. Ship standardization engineer, 2017, 50(6): 42-47.
- [8] 詹广才, 耿颖, 朱峰, 等. 港池内中长期波浪作用下船

- 船系缆动力响应[J]. 水运工程, 2019(9): 108-112.
- ZHAN G C, GENG Y, ZHU F, et al. Dynamic response of mooring ship under medium and long period wave in harbor basin[J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 108-112.
- [9] 杨春慧, 胡楠, 韩荣鑫, 等. 基于 AQWA 的 LNG 船舶预张力系泊分析[J]. 海岸工程, 2025, 44(3): 253-264.
- YANG C H, HU N, HAN R X, et al. Analysis of pre-tension mooring of LNG ship based on AQWA [J]. Coastal engineering, 2025, 44(3): 253-264.
- [10] FANG S. Field measurement of very large crude carrier (VLCC) mooring loads[C]//Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. New York: Association for Computing Machinery, 1979: 110337452.
- [11] WALREE F V, BOOM H V D. Wind, wave, and current loads on semisubmersibles [C]//Offshore Technology Conference. [S.l. : s. n. ], 1991.
- [12] 信书. 码头前系泊船舶运动响应的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- XIN S. Numerical simulation on hydrodynamic response of berthing ships [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [13] 吴小鹏. 深海半潜式钻井平台码头系泊数值计算与模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- WU X P. Numerical calculation and model test study on a quay mooring deep water semi-submersible drilling platform[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- (本文编辑 王传瑜)
- 
- (上接第 28 页)
- [10] KARNIADAKIS G E, KEVREKIDIS I G, LU L, et al. Physics-informed machine learning [J]. Nature reviews physics, 2021, 3(6): 422-440.
- [11] CAI S Z, MAO Z P, WANG Z C, et al. Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: a review [J]. Acta mechanica Sinica, 2021, 37(12): 1727-1738.
- [12] OHARA Y, MOTEKI D, MURAMATSU S, et al. Physics-informed neural networks for inversion of river flow and geometry with shallow water model [J]. Physics of fluids, 2024, 36(10): 106633.
- [13] GUO J, LIU Y, ZOU Q, et al. Study on optimization and combination strategy of multiple daily runoff prediction models coupled with physical mechanism and LSTM[J]. Journal of hydrology, 2023, 624: 129969.
- [14] LAI Y G. A two-dimensional depth-averaged sediment transport mobile-bed model with polygonal meshes [J]. Water, 2020, 12(4): 1-21.
- [15] CHAUDHRY M H. Open-channel flow [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2007: 463-523.
- [16] 何锦华, 刘洋, 朱誉, 等. 融合物理信息的 TPA-LSTM 网络应用于台风条件下海上风电场风速多步预测[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4152-4160.
- HE J H, LIU Y, ZHU Y, et al. Physics-informed TPA-LSTM network applied to multi-step wind speed prediction of offshore wind farms under typhoon conditions[J]. Power system technology, 2023, 47(10): 4152-4160.
- [17] JIAO Y L, LAI Y M, LI D W, et al. A rate of convergence of physics informed neural networks for the linear second order elliptic PDEs [PP/OL]. arXiv (2021-09-04)[2025-04-28]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.01780>.
- (本文编辑 王璵)