·施　工·

深中通道一体船浮运沉管支墩偏压受力分析*

岳长喜[1,2,3]，寇晓强[1,2,3]，于长一[1,2,3]
（1. 中交天津港湾工程研究院有限公司，天津 300222；2. 中交第一航务工程局有限公司，天津 300461；
3. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室，天津 300461）

摘要：针对深中通道一体船浮运沉管过程中，因船体变形导致支墩底部荷载分布不均匀、传统基于均匀荷载假定的压力监测方法误差较大（约 30%）的问题，开展了支墩在偏压荷载作用下的受力特性研究。通过建立考虑荷载沿船体首尾方向线性分布的支墩受力模型，引入荷载偏压系数 k，揭示不同压力与偏压条件下支墩应力分布规律，并得到可反映实际偏压的支墩压力计算公式，其相关系数超过 99.5%。研究结果表明：当偏压系数 $k \leqslant 7$ 时，支墩应力对偏压变化较为敏感；采用所提方法对 3 种典型工况进行反演分析，支墩压力合力的计算误差均小于 5%；根据沉管浮运期间支墩压力监测分析，建议船管连接时船首支墩压力控制在 3 000~6 000 kN，船尾支墩压力不超过 5 000 kN，船中支墩压力介于 2 000~4 000 kN 之间，为船-管连接体系的安全控制提供了参考依据。

关键词：一体船；偏压荷载；受力分析方法；归一化
中图法分类号：U615　　文献标志码：A　　文章编号：1002-4972(2026)09-0242-06

Force analysis of eccentric load on buttress during immersed tube towing by integrated vessel of Shenzhen−Zhongshan Link

YUE Changxi[1,2,3], KOU Xiaoqiang[1,2,3], YU Changyi[1,2,3]
(1. CCCC Tianjin Port Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;
2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Underwater Tunnel Construction, Operation and Maintenance Technology Enterprise, Tianjin 300461, China)

Abstract: A study is conducted on the mechanical characteristics of buttresses under eccentric load to address the problem of uneven load distribution at the buttress bottom caused by hull deformation during immersed tube towing by the integrated vessel of the Shenzhen−Zhongshan Link, where traditional pressure monitoring methods based on a uniform-load assumption exhibit large errors (approximately 30%). By establishing a mechanical model of the buttress that considers linear load distribution along the vessel's longitudinal direction and introducing the eccentric load coefficient k, the stress distribution patterns of the buttress under different pressure levels and eccentric conditions are revealed, and a calculation formula for buttress pressure that reflects actual eccentric loading is derived, with a correlation coefficient exceeding 99.5%. The results show that when the eccentric load coefficient $k \leqslant 7$, the buttress stress is sensitive to variations in eccentricity. The proposed method is applied to back-analyze three typical working conditions, with all calculation errors of the resultant buttress pressure below 5%. Based on monitoring analysis of buttress pressures during immersed-tube floating transportation, it is recommended that the pressure of the bow buttress be controlled within 3,000−6,000 kN, the stern buttress pressure not exceed 5,000 kN, and the midship buttress pressure be maintained between 2,000−4,000 kN during ship-tube connection, providing a reference for the safety control of the ship-tube connection system.

Keywords: integrated vessel; eccentric load; force analysis method; normalization

收稿日期：2026-01-07　　**录用日期：**2026-02-13
***基金项目：**中交一航局科技研发基金项目(202365)

作者简介：岳长喜(1990—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为软土地基加固和跨海通道建设。

水运工程

跨海隧道是现代交通基础设施的重要组成部分，沉管法因其施工便捷、结构可靠等优点，已成为水下隧道建设的主流方法之一。该方法最早可追溯至 1910 年美国修建的底特律河隧道，此后在全球范围内得到广泛应用与发展。目前，世界范围内已建成多条具有代表性的沉管隧道，如厄勒海峡隧道、釜山巨济隧道、博斯普鲁斯隧道以及我国港珠澳大桥沉管隧道等[1-4]。这些工程的成功实践，不仅推动了沉管隧道设计与施工技术的进步，也为后续类似工程提供了宝贵经验。

在沉管浮运与安装过程中，船-管连接结构的安全性与稳定性是决定施工成败的关键环节之一。深中通道工程作为粤港澳大湾区的重要跨海通道，其 E1～E23 管节采用自主研发的自航式水下隧道沉管运载安装一体船(简称一体船)进行浮运安装[5-7]。深中通道浮运距离长达约 50 km，航道环境复杂，控制难度大，对沉管航运轨道以及沉管浮运过程中的测控系统与姿态控制提出了极高的要求。于志安[8]基于数值仿真分析了影响沉管航迹宽度的关键因素，为浮运航道宽度设计提供了参考。同时，大量学者就船管运动姿态特性以及监测技术开展了大量的研究，提升了沉管浮运过程的安全性与施工效率[9-12]。

在沉管浮运过程中，船体与管节之间的相互作用易引起结构局部应力集中。目前，相关监测研究多集中于船体结构的疲劳评估，而对船体与沉管连接体系的受力特性关注较少[13-14]。一体船构造复杂，船体与沉管通过 L 缆、支墩及拉索等多种连接方式协同工作，形成整体浮运体系，其受力状态直接影响施工安全。尤其在船体变形、波浪作用等外部因素影响下，支墩底部荷载分布不均匀现象尤为显著，导致基于均匀荷载假定的传统压力监测方法存在较大误差，难以真实反映船-管连接的实际力学状态。

针对上述问题，本文就深中通道一体船浮运沉管分析支墩在偏压荷载作用下的受力特性，提出一种更为精确的支墩压力计算方法，并结合现场实测数据，提出保障船-管连接安全的支墩压力控制建议值，旨在为类似工程提供参考。

1　工程概况

深中通道工程浮运沉管时，船体与沉管通过 4 条 L 缆、8 个支墩和 32 条拉索连接。通过该连接方式将船体与沉管组成大型浮体组合结构，两者具有良好的运动同步性，极大地降低了沉管浮运时船管连接结构内力水平。船管连接受力包括支墩压力、L 缆拉力和拉索拉力，其中支墩压力是连接受力中的核心环节。船管连接时，需满足单个支墩压力不超过 10 000 kN。

Yu 等[15]提出了一种基于结构应力监测的支墩压力反演方法。该方法在支墩迎水面与背水面两侧的底部和上部特征点位置分别布置应变计，监测实物见图 1。通过测量支墩结构应力，间接确定其所受外荷载。

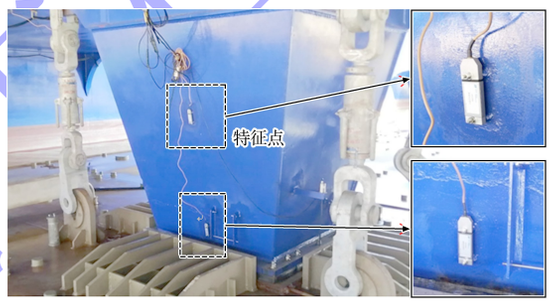


图 1　支墩监测实物

Fig. 1　Buttress monitoring photograph

支墩压力的具体计算基于式(1)和(2)，两者分别用于求解支墩竖向受力，最终取其平均值作为支墩所受压力。

$$\begin{cases} -0.007\,110\,66F_{\mathrm{l}} - 0.007\,21F_{\mathrm{v}} = \sigma_{\mathrm{bb}} \\ 0.006\,965\,3F_{\mathrm{l}} - 0.007\,13F_{\mathrm{v}} = \sigma_{\mathrm{bf}} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} -0.011\,565F_{\mathrm{l}} - 0.006\,15F_{\mathrm{v}} = \sigma_{\mathrm{tb}} \\ 0.011\,823\,6F_{\mathrm{l}} - 0.006\,15F_{\mathrm{v}} = \sigma_{\mathrm{tf}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：F_{l} 为支墩水平受力，kN；F_{v} 为支墩竖向受力，kN；σ_{bb} 为支墩底部背水面应力，MPa；σ_{bf} 为支墩底部迎水面应力，MPa；σ_{tb} 为支墩顶部背水面应力，MPa；σ_{tf} 为支墩顶部迎水面应力，MPa。

采用上述方法计算以下 3 种工况，支墩接触压力。工况 1：L 缆预紧力为 12 170 kN；工况 2：沉管浮力为 12 000 kN，L 缆预紧力为 8 970 kN，拉

索总拉力为 0 kN；工况 3：沉管浮力为 12 000 kN，L 缆预紧力为 10 000 kN，拉索总拉力为 2 220 kN。各工况支墩压力汇总见表 1。监测分析表明，各工况下支墩压力合力的监测值与其实值之间的偏差约为 30%。

表 1　支墩压力汇总

Tab. 1　Summary of buttress pressures

支墩编号	支墩压力/kN			
	工况 1	工况 2	工况 3	
			10:00:00	14:30:00
1#	3 390	4 450	5 400	2 660
2#	2 090	2 740	3 660	1 860
3#	60	930	990	1 080
4#	1 680	4 550	4 690	1 170
5#	660	2 430	2 580	1 780
6#	990	2 550	2 660	1 700
7#	3 520	4 390	5 490	3 080
8#	4 230	4 940	5 890	4 150
合力(监测值)	16 620	26 980	31 360	17 480
合力(真实值)	12 170	20 970	24 220	24 220
偏差(合力)	36.6%	28.7%	29.5%	−27.8%

在船管连接过程中，需先施加船体艏艉两端的 L 缆预紧力，使艏艉支墩与沉管接触；随后向船体压载水舱注水，使所有支墩均与沉管接触。该过程中船体发生变形，导致支墩底部与沉管之间接触不均匀：船尾一侧橡胶压缩量较大，船首一侧压缩量较小，该现象与支墩两侧监测点位的应力分布一致，应力时程曲线见图 2。由于支墩压力计算基于支墩底部均匀受力的理想模型，未考虑上述接触不均匀性，因此计算结果与实际监测值之间出现较大偏差。

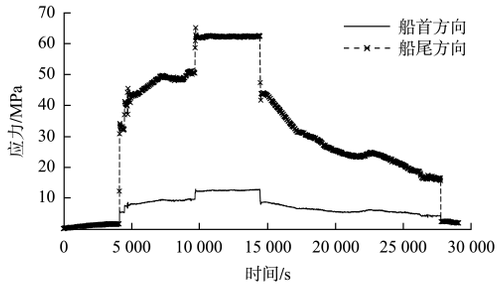


图 2　支墩两侧应力时程曲线

Fig. 2　Stress time-history curve on both sides of buttress

2　支墩受力计算

2.1　受力模型

为准确得到支墩压力，分析模型应考虑底部偏压受力的情况：支墩底部橡胶块沿船体艏艉方向压缩量不一致，沿船体左右方向压缩量较为均匀。

为建立支墩受力模型，提出以下假设：1) 支墩所受荷载沿船体艏艉呈线性分布，沿船体左右呈均匀分布；2) 支墩底部橡胶为均质材料，即支墩受力与橡胶板压缩量成正比。支墩底部实际受力与等效均布受力见图 3。

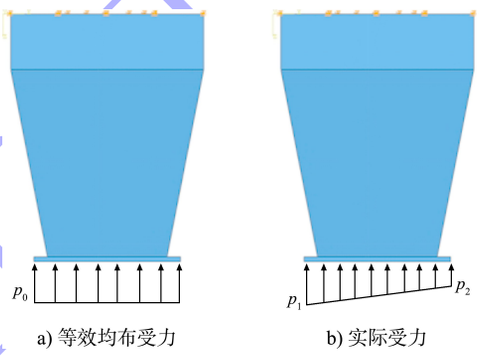


图 3　支墩底部荷载分布

Fig. 3　Load distribution at the bottom of buttress

支墩压力计算满足下式：

$$\iint f(p)\,\mathrm{d}p\mathrm{d}s = p_0 s_0 \tag{3}$$

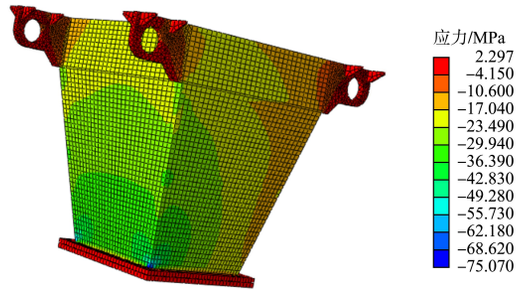
式中：p 为支墩底部荷载，kPa；s 为支墩底部橡胶板面积，m^2；p_0 为支墩底部等效均布荷载，kPa；s_0 为支墩底部橡胶板等效面积，m^2。

支墩底部荷载 $f(p)$ 与首尾方向荷载有关，且为线性关系，为确定模型计算时支墩底部荷载，引入荷载偏压系数 k，满足下式：

$$k = \frac{p_1}{p_2} = \frac{l_1}{l_2} \tag{4}$$

式中：k 为荷载偏压系数；p_1 船尾方向支墩底部橡胶板边界荷载，kPa；p_2 船首方向支墩底部橡胶板边界荷载，kPa；l_1 为支墩船尾方向橡胶板压缩量，m；l_2 为支墩船首方向橡胶板压缩量，m。

在支墩压力为 4 000 kN，$k=3$ 时，支墩受力云图见图 4，支墩船尾一侧中轴线应力分布较为均匀。



应力为支墩轴向方向应力。

图 4　支墩应力云图

Fig. 4　Stress nephogram of the buttress

支墩压力为 4 000 kN 时，分别分析 k 为 0、1/7、1/3、3/5、1、5/3、3、7、10、20、+∞，支墩(船尾一侧)中轴线应力分布，见图 5。在距离底部 1.0 m，其应力较大，且均匀。因此应力特征点(监测点)位置可在船尾方向背水面支墩中轴线，并且距离底部 1.0 m 位置处。

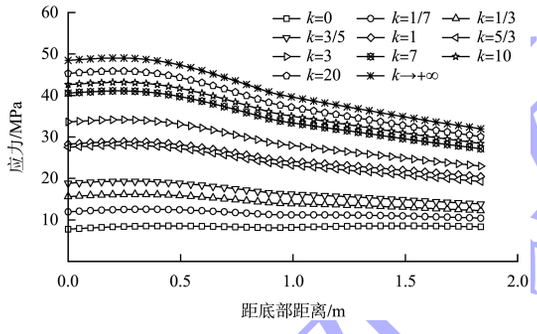


图 5　支墩船首一侧中轴线应力分布曲线

Fig. 5　Stress distribution curve along the central axis on the bow side of the buttress

2.2　支墩压力归一化分析

分别对支墩压力 F=2 000、4 000、6 000、8 000、10 000、12 000 kN，荷载偏压系数 k=0、1/7、1/3、3/5、1、5/3、3、7、10、20，分析支墩应力分布。上述压力条件下，特征点应力与荷载偏压系数关系曲线见图 6。相同支墩压力条件下，特征点位置的应力随荷载偏压系数的增大而逐渐增加，并且增长速率随荷载偏压系数的增大而逐渐减小。当 $k \leqslant 7$ 时，随 k 的增大，特征点位置应力增加较为明显；当 $k>7$ 时，荷载偏压系数对特征点位置应力影响较小。

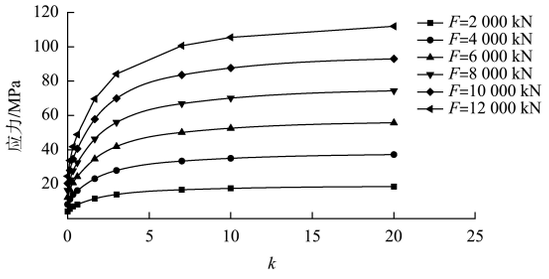


图 6　不同支墩压力下，应力与偏压系数的关系曲线

Fig. 6　Relationship curves between stress and eccentric load coefficient under different buttress pressures

对支墩特征点位置应力进行归一化处理，绘制归一化应力与荷载偏压系数关系曲线见图 7，并对归一化应力 σ/σ_0 与荷载偏压系数 k 拟合，拟合公式见式(5)，其拟合优度 R^2=99.6%。

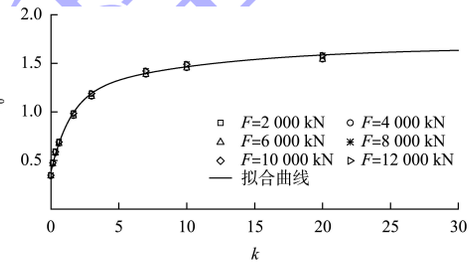


图 7　归一化应力与偏压系数关系曲线

Fig. 7　Relation curve between normalized stress and eccentric load coefficient

$$\sigma/\sigma_0 = 0.378 + 0.786(1 - e^{-0.706k}) + 0.502(1 - e^{-0.092k}) \tag{5}$$

式中：σ 为支墩特征点位置应力，MPa；σ_0 为支墩受等效荷载 p_0 作用下特征点位置的应力，MPa；e 为自然常数。

支墩在 2 000、4 000、6 000、8 000、10 000、12 000 kN 均布荷载作用下，支墩底部等效荷载以及支墩特征点位置应力汇总见表 2。

表 2　支墩底部等效荷载与支墩特征点位置应力对应关系

Tab. 2　Correlation between equivalent load at buttress bottom and stresses at characteristic points of the buttress

支墩压力/kN	等效荷载/(kN·m^{-2})	特征点应力/MPa
2 000	1 388.9	11.8
4 000	2 777.8	24.1
6 000	4 166.7	36.2
8 000	5 555.6	47.0
10 000	6 944.4	58.8
12 000	8 333.3	70.7

由表 2 得到等效荷载拟合公式(6)，

$$p_0 = 118.66\sigma_0 - 54.93 \tag{6}$$

由于支墩压力与等效荷载存在以下关系：

$$F = p_0 s_0 \tag{7}$$

将式(5)、式(6)代入式(7)中得到支墩压力计算式：

$$F = \left[\frac{118.66\sigma}{0.378 + 0.786(1 - e^{-0.706k}) + 0.502(1 - e^{-0.092k})} - 54.93\right] s_0 \tag{8}$$

采用式(8)计算第 1 节中的 3 种工况，根据该方法计算各支墩压力，见表 3。各工况下的支墩压力合力监测误差均小于 5%，满足工程使用要求。

表 3　基于该方法计算的支墩压力

Tab. 3　Buttress pressure calculated based on the method

支墩编号	支墩压力/kN			
	工况 1	工况 2	工况 3	
			10:00:00	14:30:00
1#	2 160	2 780	3 380	2 960
2#	1 520	2 050	2 760	2 460
3#	50	840	920	1 056
4#	1 650	4 000	4 090	3 470
5#	380	1 470	1 560	2 180
6#	1 030	2 630	2 750	2 800
7#	2 430	3 030	3 790	3 980
8#	3 390	4 420	5 230	4 650
合力(本文方法)	12 610	21 200	24 480	23 556
合力(真实值)	12 170	20 970	24 220	24 220
偏差(合力)	3.6%	1.1%	1.1%	−2.7%

在应用本文支墩压力计算方法时，需在船管连接后测量支墩底部橡胶板压缩量，根据压缩量确定支墩底部荷载偏压系数 k。当 $k \leqslant 7$ 时，不均系数对支墩压力测量值影响较大，需谨慎确定。

3　沉管浮运时支墩压力分析

浮运沉管时，船舶起航后，各支墩压力时程曲线见图 8。由 0 kn 加速至 4.5 kn，船体中前部 5#~8#支墩压力减小，其中，船首 7#和 8#支墩压力减小较大，分别减小了 686 和 7 99 kN；船体中后部 1#~4#支墩压力增大，其中 2#支墩压力增长较大，达 180 kN；整体上，支墩压力合力呈减小的趋势(减小了 1 534 kN)，即船管加速过程，船管连接呈脱离的趋势；船体航速相对稳定后，各支墩压力也相对稳定。

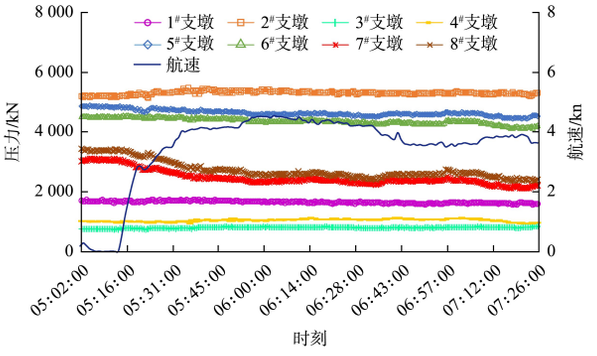


图 8　支墩压力时程曲线

Fig. 8　Time history curves of buttress pressure

船体船浮运沉管期间，支墩合力整体变化量小于 4 000 kN，支墩压力变化量以起航阶段最为明显；船体航速在 3.0~4.0 kn 航行时，支墩合力整体上随速度减小而逐渐减小；船体采用 DP 系统低速航行时，支墩压力相对平稳。

船体起航时，支墩压力变化较大，尤其以首尾支墩变化明显，其中，船首支墩压力大幅减小(变化量不超过 1 000 kN)，船尾支墩压力增大(变化量约为 200 kN)。因此，为了确保沉管浮运期间船管连接的安全性，以及每只支墩均发挥承载作用，建议船管连接时控制支墩压力初始值。船首支墩压力介于 3 000~6 000 kN，船尾支墩压力不超过 5 000 kN，船中支墩压力介于 2 000~4 000 kN 为宜。

4　结论

1）同级支墩压力下，当 $k \leqslant 7$ 时，支墩底部荷载不均匀性对支墩结构应力分布影响较大；当 $k > 7$ 时，支墩结构应力分布较为稳定。

2）本文提出的支墩压力计算模型考虑支墩底部偏压受力的实际情况，通过归一化得到的拟合公式用于计算支墩压力，误差在 5%以内，支墩压力监测技术简单有效，可应用于工程监测。

3）船管连接后，船体起航阶段支墩压力变化较为明显；船体匀速航行时，支墩压力相对稳定。

4）船体浮运沉管航速低于 4.5 kn 时，为保障船管连接受力安全以及充分发挥各支墩承载作用，建议船管连接时，船首支墩压力在 3 000~6 000 kN 之间，船尾支墩压力不超过 5 000 kN，船中支墩压力介于 2 000~4 000 kN 为宜。

参考文献：

[1] MARSHALL C. The Øresund Tunnel: making a success of design and build [J]. Tunnelling and underground space technology, 1999, 14(3): 355-365.

[2] JANSSEN W P S, LYKKE S. The fixed link across the Øresund: tunnel section under the Drogden [J]. Tunnelling and underground space technology, 1997, 12(1): 5-14.

[3] JANSSEN W, DE HAAS P, YOON Y H. Busan-Geoje Link: immersed tunnel opening new horizons[J]. Tunnelling and underground space technology, 2006, 21(3/4): 332.

[4] INGERSLEV L C F. Considerations and strategies behind the design and construction requirements of the Istanbul Strait immersed tunnel [J]. Tunnelling and underground space technology, 2005, 20(6): 604-608.

[5] WANG Y. ZHAO L X. Discussion on safety management of immersed tunnel in Hong Kong – Zhuhai – Macao bridge[J]. Engineering and applied sciences, 2019, 4(1): 16-20.

[6] 金文良, 李宏钧, 彭英俊, 等. 深中通道岛隧工程绿色建造技术探索[J]. 公路, 2023, 68(10): 256-263.
JIN W L, LI H J, PENG Y J, et al. Explorations on green construction technology of the island and tunnel project of the Shenzhen – Zhongshan link [J]. Highway, 2023, 68(10): 256-263.

[7] 潘伟. 一体船主推及侧推尾流对基槽和边坡影响分析[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(1): 83-87.
PAN W. Analysis on the influence of the main thrust and side thrust wake on the foundation trench and slope of the integrated ship[J]. China harbour engineering, 2023, 43(1): 83-87.

[8] 于志安. 基于数值仿真的拖轮拖带沉管浮运航道宽度设计[J]. 水运工程, 2022(2): 125-128.
YU Z A. Channel width design for immersed tube floating by tug towing based on numerical simulation [J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 125-128.

[9] 锁旭宏, 王明, 宁进进. 基于运安一体船的钢壳沉管浮运测控系统研发与应用[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(7): 11-16, 70.
SUO X H, WANG M, NING J J. Development and application of floating measurement and control system of steel shell immersed tube based on the integrated barge for transportation and installation [J]. China harbour engineering, 2024, 44(7): 11-16, 70.

[10] 成益品, 刘兆权, 锁旭宏, 等. 自航式沉管运安一体船施工数字化测控系统设计与实现[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(5): 1-5.
CHENG Y P, LIU Z Q, SUO X H, et al. Design and implementation of construction digital measurement and control system for self-propelled barge for immersed tube section transportation and installation [J]. China harbour engineering, 2023, 43(5): 1-5.

[11] 寇晓强, 吕迎雪, 房宇航, 等. 深中通道长距离沉管快速浮运纵倾姿态研究[J]. 水运工程, 2025(5): 149-155, 168.
KOU X Q, LYU Y X, FANG Y H, et al. Trim attitude of long-distance fast floating transportation immersed tubes in Shenzhen–Zhongshan Link[J]. Port & waterway engineering, 2025(5): 149-155, 168.

[12] 寇晓强, 宁进进, 邓小华, 等. 大型沉管快速浮运姿态响应研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(7): 1291-1298.
KOU X Q, NING J J, DENG X H, et al. Posture response study of large submerged tubes in fast floating transportation [J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2025, 65(7): 1291-1298.

[13] 李卿汉, 袁宇波. 基于应力测量和响应技术的船舶结构可靠性监测[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 61-64.
LI Q H, YUAN Y B. Reliability monitoring of ship structure based on stress measurement and response technology [J]. Ship science and technology, 2022, 44(18): 61-64.

[14] 张超群, 经博翔, 郭力, 等. 基于船体结构应力反演的疲劳评估技术研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(19): 42-47.
ZHANG C Q, JING B X, GUO L, et al. Research on fatigue evaluation technology based on stress inversion of hull structure[J]. Ship science and technology, 2025, 47(19): 42-47.

[15] YU C Y, PAN W, LI Y Y, et al. Study on force characteristics of catamaran buttress during floating[J]. Ships and offshore structures, 2021, 16(S2): 85-91.

(本文编辑　赵娟)