

自展浮体泛水展开临界状态动力学分析

徐磊^{1*}, 吴春明², 郝浩千¹, 钱立新²

¹中国人民解放军63983部队, 江苏 无锡

²无锡红旗船厂有限公司, 江苏 无锡

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年6月24日

摘要

自展浮体是一种依靠自身扭力杆实现泛水展开的可折叠浮体结构, 但在研制设计过程中, 扭力杆所需提供扭矩大小缺乏理论计算方法。本文对自展浮体的中箱和边箱分别采用运动学和动力学进行分析, 根据运动学基本原理和力矩平衡原理, 分别推导出了中箱和边箱的物理模型运动功和受力解析表达式, 对比了边箱的展开扭矩和扭力杆扭矩的变化趋势, 从而对边箱展开的临界状态进行动力学分析, 对自展浮体的设计计算, 特别是扭力杆的选型, 提供一定的理论依据。

关键词

浮体, 扭力杆, 临界状态, 动力学

Dynamic Analysis of the Critical State of Self-Expanding Floating Body When Water Overflows

Lei Xu^{1*}, Chunming Wu², Haoqian Bing¹, Lixin Qian²

¹Unit 63983 of the Chinese People's Liberation Army, Wuxi Jiangsu

²Wuxi Hongqi Boatyard Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

Received: May 22, 2026; accepted: June 11, 2026; published: June 24, 2026

Abstract

The self-deploying floating body is a foldable floating body structure that can be deployed by flooding through its own torsion bars. However, during the research and design process, there is a lack of

*通讯作者。

文章引用: 徐磊, 吴春明, 郝浩千, 钱立新. 自展浮体泛水展开临界状态动力学分析[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(3): 229-237. DOI: 10.12677/dsc.2026.153024

theoretical calculation methods for the torque required by the torsion bars. In this paper, kinematics and dynamics are respectively applied to analyze the middle box and side boxes of the self-deploying floating body. Based on the basic principles of kinematics and the principle of moment balance, analytical expressions for the motion and force of the physical models of the middle box and side boxes are derived respectively. The changing trends of the deployment torque of the side boxes and the torque of the torsion bars are compared, so as to conduct a dynamic analysis of the critical state of the side box deployment. This provides a certain theoretical basis for the design and calculation of the self-deploying floating body, especially for the selection of torsion bars.

Keywords

Floating Body, Torsion Bar, Critical State, Dynamics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自展浮体是一种可折叠浮体结构，可通过自身的扭力杆机构在水中自动展开，该类型浮体结构在国内外军用渡河装备[1]、应急救援装备[2]等各领域均有广泛应用，如俄罗斯 IIII-2015 舟桥纵列、德国 FFB-2000 带式舟桥、美国 IRB 改进型带式舟桥和法国 PFM F1 型摩托化浮桥等[3]。自展浮体通常采用横向折叠的结构型式，折叠后可大大缩小装载空间，且泛水后可自动展开。以常见的典型四折式(四箱三折式)结构，浮体单元结构如图 1 所示。

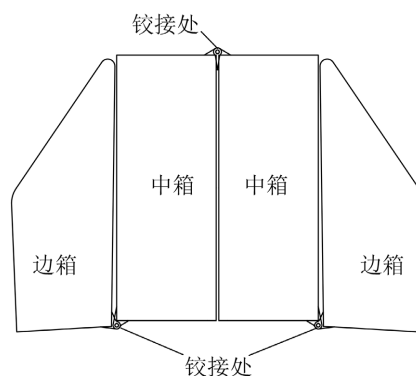


Figure 1. Schematic diagram of the four-fold floating unit

图 1. 四折式浮体单元示意图

国外对自展浮体的研制和使用已有大量的研究[4]-[6]。国内研究方面，孙永岗等[7]提出了一种基于玻璃钢/钢材复合结构的结构方案；孙文俊等[8]系统阐述了水上浮体的技术原理，详细介绍了处理相关技术问题的理念、思路和方法；马帅等[9]对浮体单双耳接头的裂纹形状比和倾角对裂尖应力强度因子的影响。姜鹏宇等[10]针对浮体结构，建立了移动载荷、浮体和水流之间的耦合数学方程，结合有限元软件编制应用程序，进行了浮体的动力响应分析；陈启飞等[11]提出了一种基于玻璃钢/钢材复合结构方案；并进行了试验研究。以上均未涉及浮体自展过程扭力杆扭矩的分析研究，唯一涉及的，为丁勇等[12]根据力的平衡原理，采用静力学方法，利用平衡原理对浮体展开过程扭力杆的受力建立了计算模型，但采用

静力学方法研究分析浮体展开的实际运动过程，忽略了中箱展开的运动过程对于边箱底部铰链处产生的推力作用，这一作用将对边箱的展开产生阻力作用，因此静力学方法还有很大误差。

2. 泛水展开过程分析

2.1. 泛水展开作业

常见的泛水方法可分为强制卸载、自动下滑卸载、倒车急刹车卸载和陡岸卸载 4 种方式[10]，装备完成卸载泛水后，通常依靠自身结构和水的浮力作用等可在水中自行展开，中箱主要依靠自重和浮力产生的弯矩共同作用完成展开，而边箱主要依靠与中箱铰接处的扭力杆产生的扭矩作用实现展开。如图 2 所示。

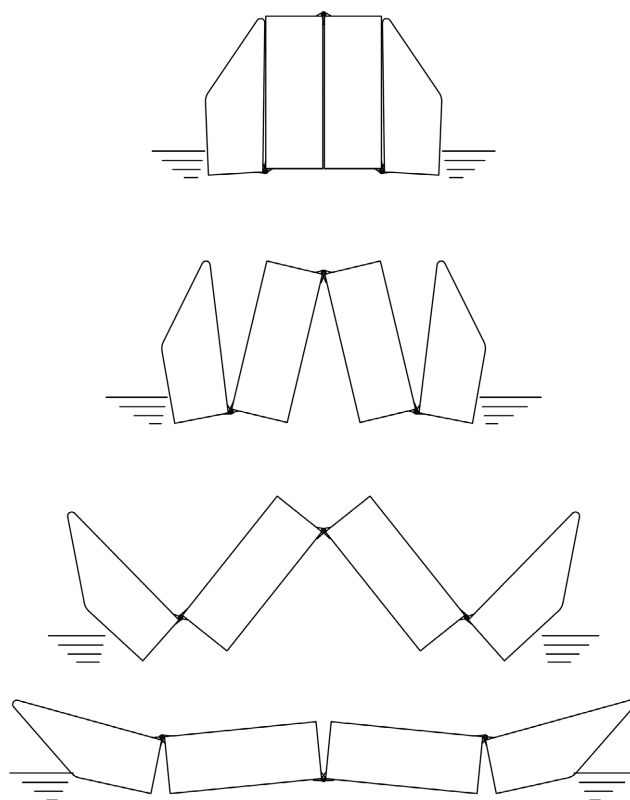


Figure 2. Schematic diagram of the self-deploying buoy's deployment process in water

图 2. 自展浮体水中展开过程示意图

扭力杆需要具备足够的扭矩，才能够使边箱在展开过程中克服浮力、自重、冲击等对展开过程产生的阻力作用，降低失败概率。若边箱展开时受到外界环境等因素影响展开速度较慢，而随着中箱持续加速展开，边箱与中箱夹角随之增大，扭力杆扭矩逐步释放，之后过程可能发生扭矩不足现象，最终导致边箱展开失败而倒伏在已展开的中箱上，如图 3 所示，此时，只能借助外力将边箱吊起，辅助其完成展开，或整体撤收后重新进行泛水展开作业，将大大拖延作业进程。

2.2. 临界状态分析

从自展浮体单元实装泛水展开作业过程分析得出，边箱展开失败时，往往是没能突破某一临界状态，处于该临界状态时，边箱重心位于铰接点正上方附近，绕铰接点旋转角速度接近零，展开力矩与阻力力矩

几乎持平。若后续展开力矩大于阻力力矩，则边箱能够展开，反之将倒向中箱。这一临界状态如图 4 所示。

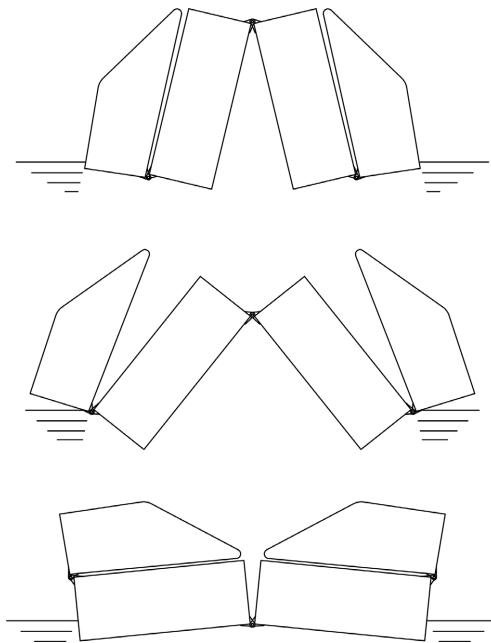


Figure 3. Schematic diagram of the failure of the self-extracting floating body side box to deploy
图 3. 自展浮体边箱展开失败示意图

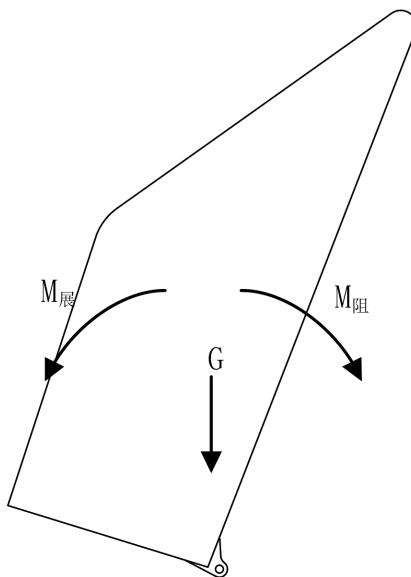


Figure 4. Schematic diagram of the critical state of side box deployment.
图 4. 边箱展开临界状态示意图

3. 模型建立

3.1. 中箱的运动学分析

经观察分析我军某型自展浮体单元泛水展开过程，发现中箱在缓慢展开一定角度 β_1 后，开始做角加速运动，在展开至一定角度 β_2 后，角速度达到最大，并在拍击水面后，因水阻力突然增大，瞬间减速为

零, 如图 5 所示。

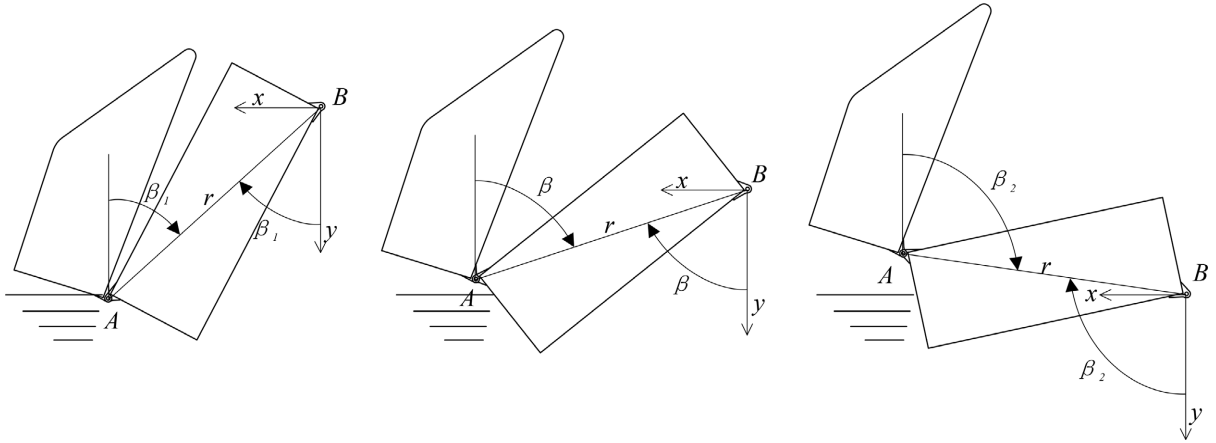


Figure 5. Schematic diagram of the unfolded middle box
图 5. 中箱展开示意图

假设中箱展开角度在 β_1 至 β_2 之间为匀角加速运动, 在该时间段 Δt 内中箱的展开角度可表示为:

$$\beta = \beta_1 + \frac{2\Delta\beta}{\Delta t^2} t \quad (1)$$

其中 $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$, 为中箱匀角加速运动展开角度。

由于浮体单元左右对称, 中箱间铰接点 B 做垂向直线运动, 以 B 点为参考系基点, A 点的水平运动表达式为:

$$x_A = r \sin \beta \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)并对时间 t 两次求导即可得到 A 点水平运动的加速度:

$$x_A'' = -r \left(\frac{2\Delta\beta}{\Delta t^2} \right)^2 \sin \left(\beta_1 + \frac{2\Delta\beta}{\Delta t^2} t \right) \quad (3)$$

3.2. 边箱的动力学分析

如图 6(a)所示, 边箱展开临界状态受力主要包括重力 G , 浮力 $F_{\text{浮}}$, 中箱推力 $F_{\text{中}}$ 和所需扭力杆的扭矩 T , 为简化计算, 将 $F_{\text{中}}$ 正交分解为 $F_{\text{中}x}$ 和 $F_{\text{中}y}$, 若以边箱重心为基点, 分析边箱的旋转运动, $F_{\text{中}y}$ 、重力 G 对重心均无力矩, 可忽略, 造成边箱旋转的力如图 6(b)所示。

观察单元泛水展开过程, 在中箱展开角度 β_1 状态时, 边箱已基本脱离水面, 因此在中箱展开角度 β_1 至 β_2 之间, 浮力 $F_{\text{浮}}$ 可视为零, 此时, 边箱的等效受力如图 7(a)所示。

根据力的平移定理, 将力 $F_{\text{中}x}$ 平移至重心位置, 并增加一个附加力偶 $M_{\text{中}x}$, 如图 7(b)所示。在临界状态下, 边箱做平移运动, 即 $M_{\text{中}x}$ 与所需扭力杆的扭矩 T 相等。若没有扭力杆的扭矩 T 作用, 边箱的运动可分解为平移运动和绕重心的旋转运动, 在该假设条件下对边箱进行动力学分析:

边箱的平移运动对其展开无影响, 只需要考虑旋转运动, 附加力偶 $M_{\text{中}x}$ 可表示为:

$$M_{\text{中}x} = J_G \cdot \alpha \quad (4)$$

其中 J_G 为边箱绕重心轴(垂直于截面方向)的转动惯量, α 为角加速度, 可表示为:

$$\alpha = \frac{x_A''}{L_G} \quad (5)$$

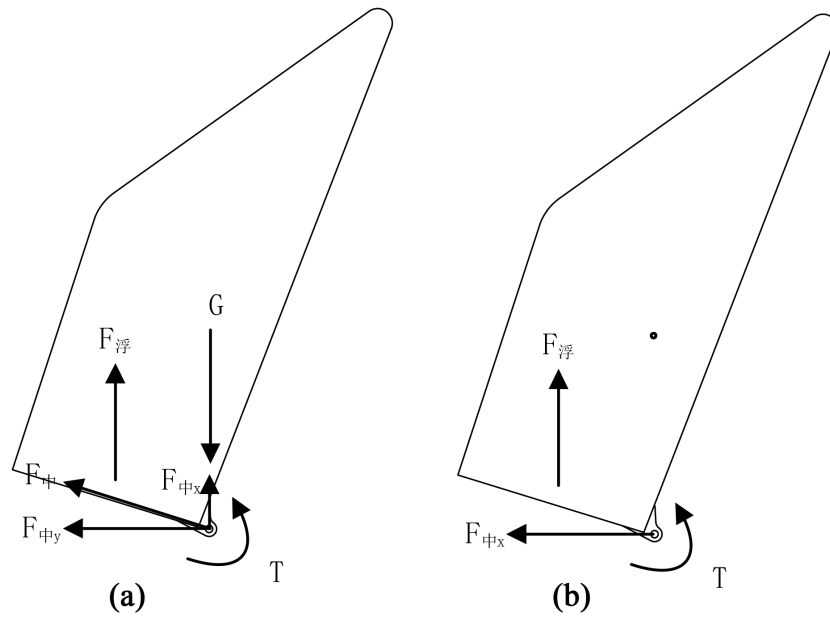


Figure 6. Schematic diagram of the forces acting on the side box at the critical state of deployment
图 6. 边箱展开临界状态受力示意图

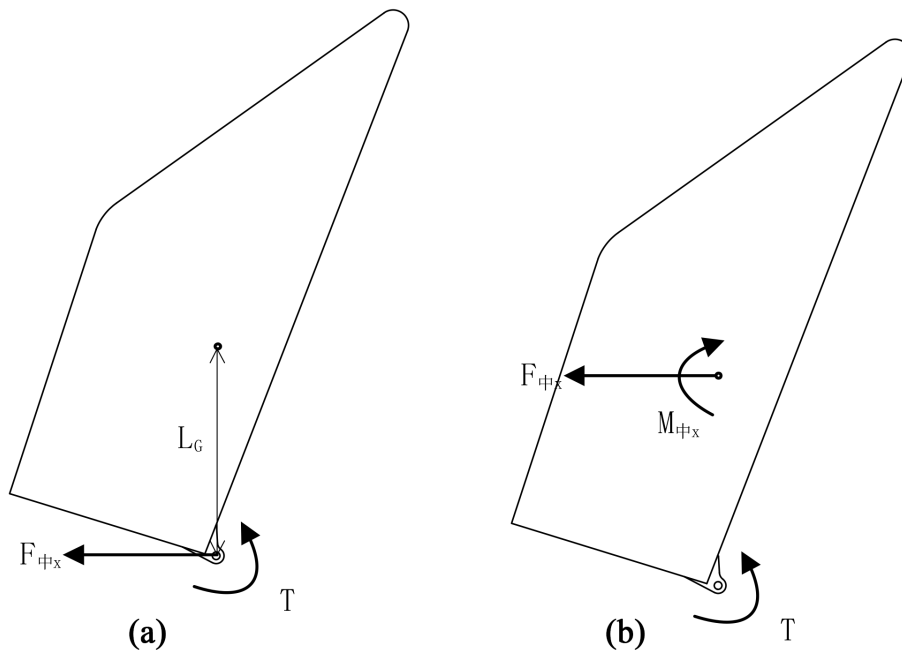


Figure 7. Schematic diagram of the equivalent forces acting on the side box at the critical state of deployment.
图 7. 边箱展开临界状态等效受力示意图

3.3. 扭力杆的扭矩

边箱相对中箱的展开角度 θ 如图 8 所示。

边箱相对中箱的展开角度 θ 表达式为：

$$\theta = \beta - \gamma_1 - \gamma_2 \tag{6}$$

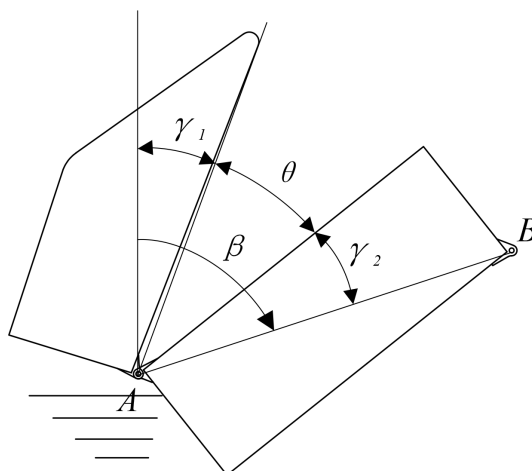


Figure 8. Schematic diagram of torsion angle of torsion bar
图 8. 扭力杆扭转角度示意图

其中 γ_1 、 γ_2 如图 8 所示，与装备本身属性有关，角度数据可直接获得。

单元扭力杆的扭矩 $T_{\text{扭}}$ 表达式为：

$$T_{\text{扭}} = K \cdot (\theta_{\text{实}} - \theta) \quad (7)$$

其中， K 为扭力杆的扭转刚度， $\theta_{\text{实}}$ 为扭力杆实际扭角。

4. 模型求解

模型求解步骤如下：

(1) 求解 A 点水平运动加速度 x_A'' 解析表达式，需要获得中箱加速展开过程的初始角度 β_1 、最终角度 β_2 和加速时间 Δt ，以及中箱横截面对角线长度 r ，代入式(3)即可得到。

(2) 计算或测量边箱的重心与铰接点的距离(图 7(a)所示截面所示平面距离) L_G ，以及绕重心轴(图 7(a)所示垂直于截面方向)的转动惯量。

(3) 上述步骤得到的结果代入式(4)即可得到中箱运动对边箱产生的附加力偶 $M_{\text{中x}}$ 的解析解，再获得 γ_1 、 γ_2 、 $\theta_{\text{实}}$ 和 K ，代入式(7)即可得到扭力杆的扭力 $T_{\text{扭}}$ 的解析解，通过绘制 $M_{\text{中x}}$ 和 $T_{\text{扭}}$ 曲线，即可对比得到扭力杆扭矩大小情况，从而判断边箱在临界状态时能否顺利展开。

5. 算例验证

为验证以上计算模型的有效性，以我军某装备为算例，表 1 为相关参数。

Table 1. Relevant parameters of a certain equipment of our army

表 1. 我军某装备相关参数

符号	取值	符号	取值
β_1	15°	J_G	890.43 kg·m ²
β_2	65°	K	68.64 kN·m
Δt	1 s	$\theta_{\text{实}}$	88°
r	2.20 m	γ_1	25°
L_G	0.90 m	γ_2	20°

如图9所示,对比边箱展开所需扭矩 T 与扭力杆实际扭矩 $T_{\text{扭}}$ 曲线变化可以看出,该型装备边箱展开临界状态为角度 θ 处于 $29^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 之间,角度 θ 在临界状态之前,边箱展开所需扭矩 T 小于扭力杆实际扭矩 $T_{\text{扭}}$,此角度范围内若无其他阻力因素干扰,边箱完全可以顺利展开;角度 θ 在临界状态之后,边箱展开所需扭矩 T 大于扭力杆实际扭矩 $T_{\text{扭}}$,此角度范围内边箱容易展开失败。

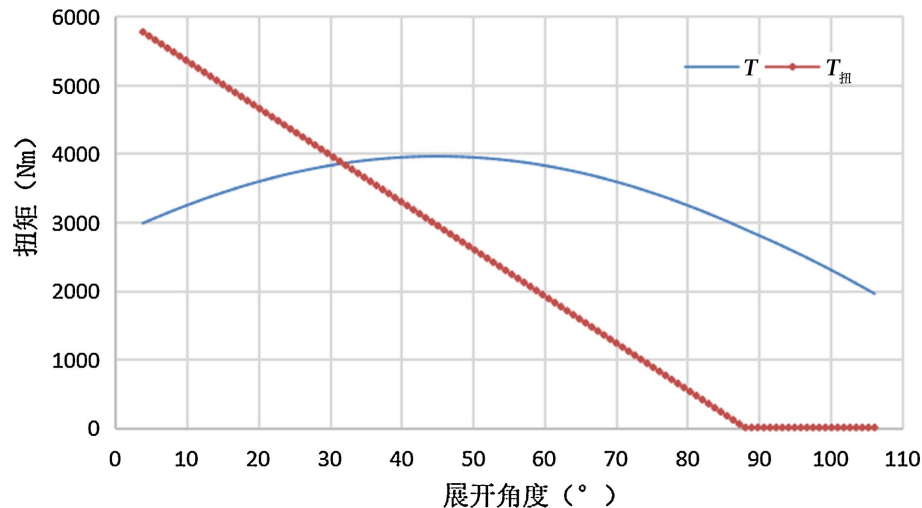


Figure 9. Twist lines between the required torque T for side box deployment and the actual torque T of the torsion bar
图9. 边箱展开所需扭矩 T 与扭力杆实际扭矩 $T_{\text{扭}}$ 曲线

6. 结论

本文针对可折叠浮体边箱扭力杆受力计算缺乏动力学理论计算方法现状,采用理论推导的方法,建立了泛水展开过程中中箱和边箱的运动学和动力学的理论计算模型,分别推导出了中箱和边箱的物理模型运动和受力解析表达式。通过我军某装备数据,对比了边箱的展开扭矩和扭力杆扭矩的变化趋势,验证了理论计算模型的有效性,并对边箱展开的临界状态进行动力学分析,进一步补充完善了自展浮体,特别是扭力杆的设计计算理论方法。

建议在相关装备的扭力杆设计计算中,重点校核扭力杆临界状态下(扭转角度 $29^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 区间内)设计扭矩,并考虑10%~20%安全余量,以进一步提高浮体展开成功率。

参考文献

- [1] 吴培德,刘建成,林铸明,等. 带式舟桥[M]. 北京:国防工业出版社,2005:40-45.
- [2] 江增涛,王亚兰,陈石昌. 浅谈动力舟桥在抢险救援中的应用[J]. 红水河,2023,42(4):133-136.
- [3] Russell, B.R. and Thrall, A.P. (2013) Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments. *Journal of Bridge Engineering*, **18**, 1074-1085. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000454](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000454)
- [4] Robinson, M.J. and Kosmatka, J.B. (2008) Development of a Short-Span Fiber-Reinforced Composite Bridge for Emergency Response and Military Applications. *Journal of Bridge Engineering*, **13**, 388-397. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2008\)13:4\(388\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2008)13:4(388))
- [5] Palo, P. (2005) Mobile Offshore Base: Hydrodynamic Advancements and Remaining Challenges. *Marine Structures*, **18**, 133-147. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2005.07.007>
- [6] Russell, B.R., Thrall, A.P., Padula, J.A. and Fowler, J.E. (2014) Reconceptualization and Optimization of a Rapidly Deployable Floating Causeway. *Journal of Bridge Engineering*, **19**, 1040-1053. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000539](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000539)
- [7] 孙永岗. 波浪作用下带式浮桥动力响应特性研究[D]:[硕士学位论文]. 上海:上海交通大学,2016.

-
- [8] 孙文俊. 渡河桥梁装备研究方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [9] 马帅, 程建生, 段金辉, 王儒, 陈鹏辉. 舟桥单双耳接头裂纹应力强度因子研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(4): 115-118, 126.
- [10] 姜鹏宇, 林铸明, 孙建群. 移动载荷作用下浮桥流固耦合分析[C]//中国钢结构协会海洋结构分会, 中国造船工程学会船舶力学学术委员会结构强度学组, 中国造船工程学会船舶力学学术委员会载荷和响应学组. 中国钢结构协会海洋结构分会学术论文集. 无锡: 《船舶力学》编辑部, 2015: 306-311.
- [11] 陈启飞, 黄亚新, 王建平, 程建生. 玻璃钢/钢材符合结构带式舟桥方舟的研制[J]. 纤维符合材料, 2002(1): 27-29.
- [12] 丁勇, 林铸明, 李欢, 蔡正宇. 带式舟桥泛水展开过程中扭力杆受力计算模型[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(2): 53-59.