

· 施 工 ·



# 深中通道长距离沉管快速浮运 纵倾姿态研究\*

寇晓强<sup>1,2,3</sup>, 吕迎雪<sup>3</sup>, 房宇航<sup>3</sup>, 李丹勋<sup>1</sup>

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

**摘要:** 大型沉管长距离浮运一直是困扰沉管隧道工程建设的一大难题。以深中通道工程为例, 沉管浮运距离长达 50 km, 需要经历多次航道转换, 面临巨大的施工风险。采用物理模型试验对高速工况下沉管的浮运姿态进行系统研究, 并对深中通道沉管实际施工过程的姿态变化进行现场观测。结果表明, 浮运航速 5.12 kn 时, 物理模型在无浪流影响情况下沉管的纵倾角最大可达 0.27°, 而顺浪情况下纵倾角最大为 0.16°, 沉管顶部出现明显上水现象。航速 4.25 kn 时, 实测沉管的最大纵倾角为 0.19°, 实测结果与物理模型试验结果趋势基本吻合。

**关键词:** 沉管隧道; 快速浮运; 模型试验; 实测; 纵倾姿态

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0149-07

## Trim attitude of long-distance fast floating transportation immersed tubes in Shenzhen-Zhongshan Link

KOU Xiaoqiang<sup>1,2,3</sup>, LYU Yingxue<sup>3</sup>, FANG Yuhang<sup>3</sup>, LI Danxun<sup>1</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

3. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The long-distance flotation of large-scale immersed tubes has consistently posed a substantial challenge in the construction of immersed tube tunnel projects. The Shenzhen-Zhongshan Link's immersed tube, for instance, necessitates a flotation distance of 50 km, which involves multiple channel transitions and faces huge construction risks. Physical model tests are carried out to examine the floating posture of the immersed tube under high-speed conditions. The in-situ measurement of immersed tubes' trim attitude is carried out in the construction of Shenzhen-Zhongshan Link. The results show that the maximum pitch angle of immersed tube can reach 0.27° at a floating speed of 5.12 kn in physical model tests. When following waves, the maximum pitch angle at the same floating speed decreases to 0.16°, and a notable water uplift phenomenon occurs at the top of the immersed tube during this phase. The actual measurement data align generally with the trends observed in the physical model tests. At an actual ship speed of 4.25 kn on-site, the measured maximum pitch angle of the immersed tube is 0.19°, affirming the conclusions derived from physical model tests.

**Keywords:** immersed tunnel; fast floating transportation; model test; in-situ measurement; trim attitude

收稿日期: 2024-07-10

\*基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B111105002)

作者简介: 寇晓强(1982—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 从事沉管隧道及跨海通道人工岛工程相关技术研究。

通信作者: 李丹勋(1970—), 男, 博士, 教授, 从事泥沙动力学和沉管隧道相关技术研究。

E-mail: lidx@tsinghua.edu.cn

沉管隧道建设过程一般经历预制、浮运、沉放、回填、隧道内路面施工以及附属设施安装等环节。外海大型沉管的水上浮运环节全过程水上作业,受外海风浪流、航道受限、社会船舶通航等因素影响,施工风险大,是制约沉管隧道建设的关键因素<sup>[1]</sup>。

传统的沉管浮运方式多采用拖轮吊拖方式进行,过程中由数个拖轮吊拖在沉管的四周,外围由海事警戒船舶进行护航,形成拖航船队。该方法准备周期长、航道要求高、作业窗口短、浮运航速低,平均航速仅1~2 kn,整体作业效率较低<sup>[2-3]</sup>。

在国内外海上大型沉管建设案例中,多数的沉管建设受浮运方式的影响,不得不尽可能缩短浮运距离,这给沉管预制厂址的选择带来相当大的困难,大幅制约了跨海隧道方案选型<sup>[4-5]</sup>。

选用必要的手段改进沉管浮运作业方式,结合智能化船舶技术的进步,尽可能降低风险,提高效率,实现沉管施工工艺的更新迭代,是需要深入思考的问题。

近年我国设计研发了沉管运输安装一体船,船体采用双体船设计,配备2台9 280 kW的主推进系统,8台2 600~3 000 kW的侧推系统。与沉管形成可靠连接后,可拖带管节进行平均4~5 kn的相对高速浮运航行,从而一举解决了传统吊拖作业方式效率低下及通航风险的问题。

相对高速的浮运航行,船体与管节的浮运安全性在船体设计论证过程中备受关注。船体与管节是各自质量达数十万吨的浮体,尤其是沉管作为超低干舷(干舷高度仅30~45 cm)超大型浮体,在高速浮运过程中的姿态稳定性直接影响船、管安全,是工程成败的关键。在相对高速浮运工况下的沉管的姿态响应情况,需要认真论证分析。

相关沉管高速浮运问题国内外鲜有针对性的研究,已有的研究成果主要针对传统拖航工艺的航行阻力<sup>[6-7]</sup>、拖航方式<sup>[8]</sup>、缆力控制<sup>[9-10]</sup>、波浪阻力<sup>[11]</sup>、沉管压载水<sup>[12]</sup>、浮运策略<sup>[13-14]</sup>等展开。外海复杂条件下大型沉管高速浮运,所带来的一系列问题需要进行必要的前瞻性研究和结合实践的验证性工作。

## 1 超大型沉管快速浮运的实现

### 1.1 运输安装一体船体性能

沉管运输安装一体船(简称“一体船”)是将沉管浮运、定位、沉放和安装综合作业于一体的专业沉管施工船舶。船体采用双体船型设计,船体总长190.4 m、型宽75 m,两片体内侧跨距56.8 m,型深14.7 m,浮运沉管状态吃水7.1 m,船质量2.32万t,沉管与船体跨梁下部的支墩、拉索等结构连接,形成相对稳固的船管连接形式,见图1。

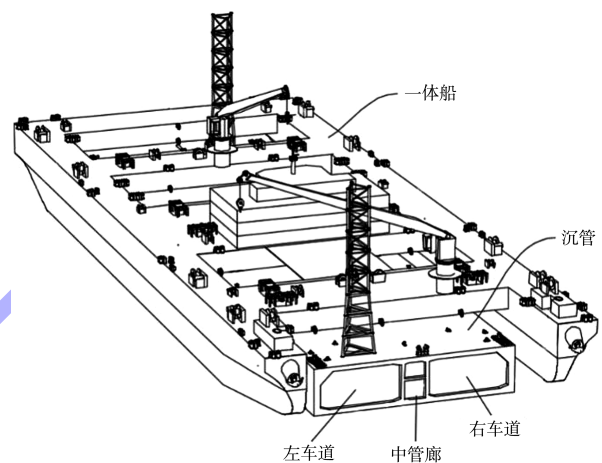


图1 沉管与运输安装一体船连接后状态  
Fig.1 Integrated ship for transportation and installation connected with immersed tube

### 1.2 沉管浮运作业参数

以深中通道管节为例,标准管节长165 m、宽46 m、高10.6 m,其几何尺寸见图2。沉管采用钢壳混凝土预制,钢壳混凝土综合密度为2 603 kg/m<sup>3</sup>,单个标准管节总质量7.677万t。在浮运沉放工况下,管节两侧设置钢封门进行封堵以达到管节内部止水起浮的作用。

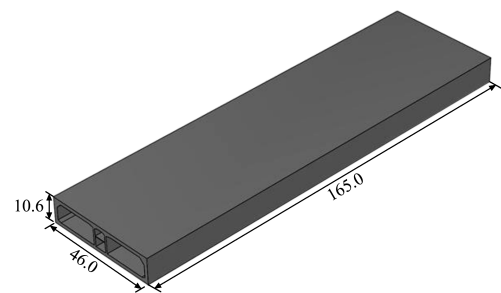


图2 深中通道标准管节的几何尺寸(单位:m)  
Fig.2 Geometric dimensions of standard immersed tube of Shenzhen-Zhongshan Link (unit: m)

沉管作为一个超低干舷的超大型浮体, 其浮运状态下的受力工况显著有别于一般高干舷船舶或其他浮体。沉管以一定航速漂浮前进, 可以理解为一个超大排水量(10万吨级)的规则矩形浮体在低速推进。

沉管在静水漂浮状态下干舷高度在30~45 cm, 在以一定航速浮运情况下, 沉管的航行阻力主要有沉管艏端面的兴波阻力、艉部端面的涡旋分离阻力和管节湿表面摩阻力等, 见图3。

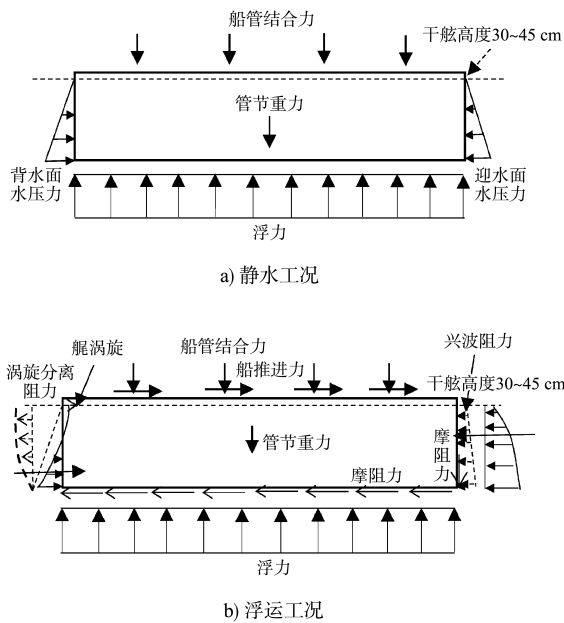


图3 沉管静水与浮运受力工况

Fig. 3 Load cases of immersed tube during hydrostatic state and floating

深中通道采用一体船浮运沉管时, 进行计算分析<sup>[15]</sup>得到的沉管浮运航行总阻力与动力配置对应见表1。经计算认为一体船总推进功率18 560 kW状态下在伶仃航道可达到5 kn左右航速。

表1 深中通道一体船浮运沉管阻力推算  
Tab. 1 Calculation of resistance of integrated ship floating immersed tube in Shenzhen-Zhongshan Link

浮运工况	航速/ kn	实船 阻力/kN	总阻力 系数	主推 功率/kW
	3	840.6	0.346	4 324
伶仃航道(水深17 m, 总吃水10.6 m)	4	1 603.4	0.371	10 997
	5	2 396.2	0.355	20 543
	6	3 613.0	0.372	37 170
新建浮运航道(水深 13 m,总吃水10.6 m)	2	603.1	0.559	2 068
	3	1 286.9	0.530	6 620
	4	3 120.7	0.723	21 404

## 2 沉管快速浮运模型试验

### 2.1 模型试验基本设计

模型按JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》<sup>[16]</sup>的有关规定进行模拟。对于一体船船管模型所受波浪作用, 采用重力相似律进行相似模拟; 对于船管连接内力即连接件受力, 采用弹性相似律进行相似模拟。根据一体船船、管外形尺寸及质量、水深、波浪等诸要素, 并考虑水槽和造波机性能指标, 确定试验采用正态模型, 几何比尺 $\lambda_L$ 为1:40。其他物理量比尺为: 周期比尺 $\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$ , 质量比尺 $\lambda_m = \lambda_L^3$ , 力比尺 $\lambda_F = \lambda_L^3$ 。

模型见图4, 模型各物理量原型值及模型值见表2。



图4 一体船与管节物理模型

Fig. 4 Physical model of integrated ship and immersed tube

表2 原型值与模型值

Tab. 2 Test model values and full-scale values

项目	船长/ m	船型宽/ m	船型深/ m	浮运 吃水/m	船总 质量/t	有效 波高/m	谱峰 周期/s	沉管长/ m	沉管 型宽/m	沉管 型深/m	浮运 吃水/m	沉管 总质量/t	水深/ m
原型值	190.4	75	14.7	7.1	22 850	0.8	6	165	46	10.6	10.4	80 260.9	13
模型值	4.76	1.875	0.368	0.178	0.357	0.02	0.949	4.125	1.15	0.265	0.26	1.254	0.325

试验根据主推功率适配航速，分别选择 1、2、3、4、5 kn 等沉管浮运航速进行试验。为更加清晰分析航速与船体姿态响应状态，不考虑风速和水流的影响。波浪取与不规则波(有效波高 0.8 m、谱峰周期 6 s)对应的规则波，波高 1.34 m(对应于不规则波  $H_{1/100}$ )。波浪方向取纵向浪  $0^\circ$ (顺浪)进行试验。采用相对于大地参考系下的绝对航速进行评估，水深考虑 13 m，沉管干舷高度 20 cm。船管连接方式和初始受力采用实船设计指标，即浮运前通过一体船压载水控制一体船对沉管压力为 12 000 kN，船管连接方式为支墩+L 缆+拉索，L 缆预紧力为 3 000 kN，拉索预紧力为 750 kN。

### 2.2 试验方法

采用“强迫自航”试验方法对船体携带管节浮运工况进行模拟，见图 5。试验水槽宽 4 m，水槽可供模型船航行的有效距离为 35 m，水槽上方有可调速试验台车，用于拖带模型以一定航速航行。一体船模型(长 4.76 m、宽 1.87 m)由槽首至槽尾布置，通过设计拖航牵引装置，用于连接拖航台车和一体船模型。

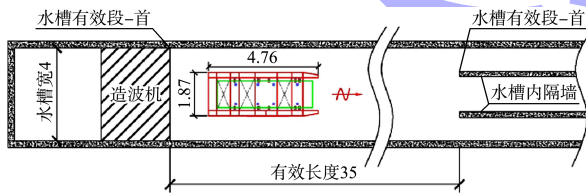


图 5 强迫自航模型试验 (单位: m)

Fig. 5 Forced self-propulsion model test (unit: m)

### 2.3 物理模型试验结果

不同航速持续匀速航行下，顺浪波高 1.34 m，沉管与船体姿态的纵倾角变化历程见图 6。可以发现，在浮运航速为 1 kn 时，沉管姿态变化并不明显；当航速达到 3 kn 时，沉管出现艏部向下的纵倾，最大纵倾量为  $-0.15^\circ$ (负值代表艏部向下)；航速达到 5 kn 时，沉管出现更为明显的艏部下倾，最大纵倾角达到了  $-0.27^\circ$ 。

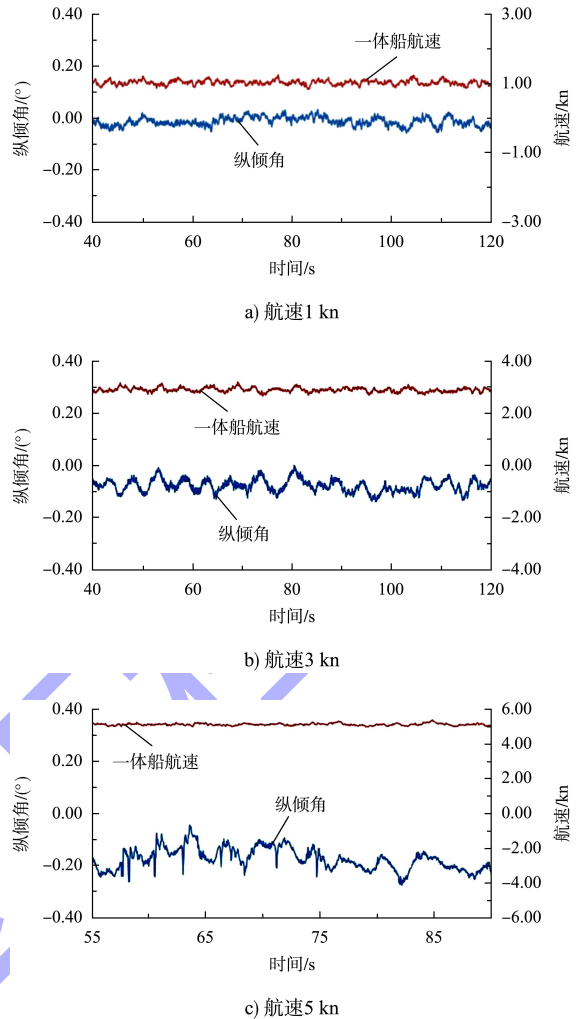
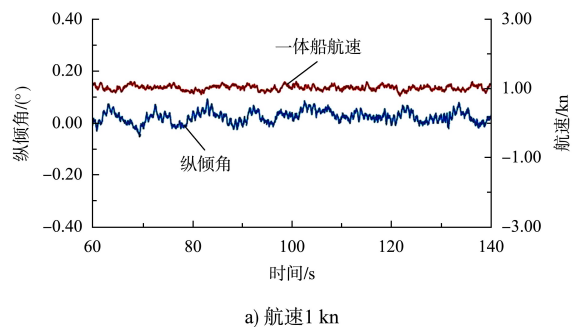


图 6 无波浪时不同航速模型试验沉管纵倾变化历程  
Fig. 6 Variation process of longitudinal trim of immersed tubes in model tests at different speeds with no waves

顺浪波高 1.34 m 时船体与管节姿态变化历程见图 7。在航速为 1 kn 时，管节姿态艏部有轻微上扬，最大纵倾角为  $0.091^\circ$ (正值为艏部上扬)；航速达到 3 kn 时，艏部出现波动式下倾，最大纵倾角为  $-0.095^\circ$ ；航速达到 5 kn 时，沉管艏部出现较明显的向下纵倾，最大纵倾角为  $-0.16^\circ$ 。



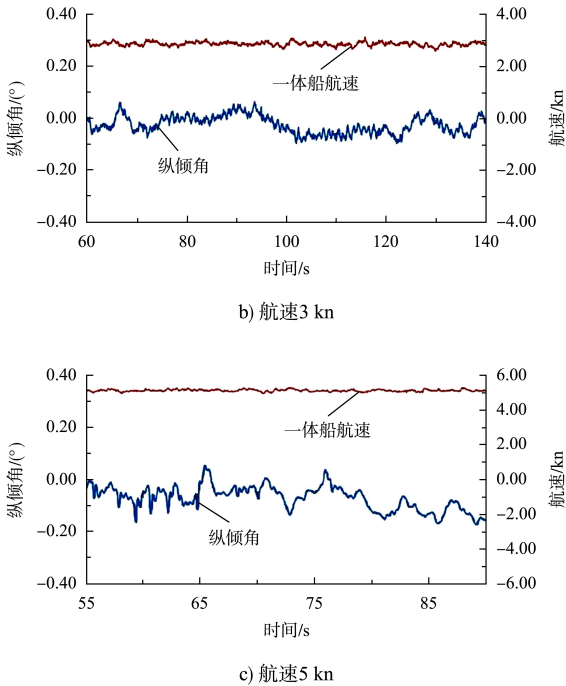


图7 顺浪波高 1.34 m 时不同航速模型试验沉管纵倾变化历程

Fig. 7 Variation process of longitudinal trim of immersed tubes in model tests at different speeds with significant wave height 1.34 m

无浪时不同航速与沉管最大纵倾角对应关系见图 8。模型试验揭示随着航速的增大, 一体船与沉管姿态呈现较明显的艏部下倾的姿态变化, 纵倾角与航速基本呈线性增长关系。

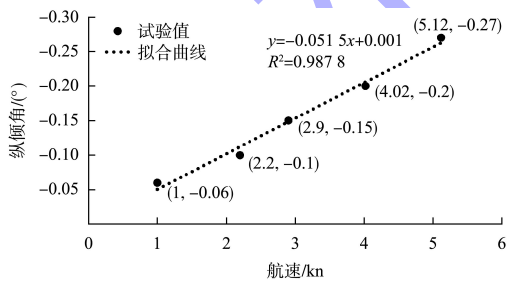


图8 无浪时模型试验航速与沉管纵倾角关系  
Fig. 8 Relationship between speed and longitudinal trim angle of immersed tube

顺浪情况下, 在单纵向波高 1.34 m 时, 不同航速与沉管最大纵倾角对应关系见图 9。模型试验结果显示在低航速(小于 1 kn)时, 一体船与沉管纵倾呈艏部下倾特点。随着航速的增大, 一体船与沉管姿态逐步出现艏部下倾的姿态变化。

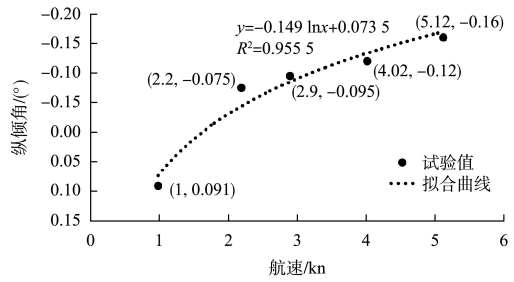


图9 纵向顺浪波高 1.34 m 时不同航速与沉管纵倾关系  
Fig. 9 Relationship between different speeds and trim of immersed tube under following seas which significant wave height is 1.34 m

### 3 沉管浮运原型实测结果

深中通道采用一体船进行沉管浮运, 浮运沉管从珠海桂山预制厂至深圳机场隧址区域, 浮运距离 47 km, 见图 10。浮运距离较长, 且经历多次航道转换, 过程中专项研发了沉管浮运动态监测技术, 并对一体船和沉管浮运全过程姿态变化进行了观测。



图10 深中通道沉管浮运路线  
Fig. 10 Immersed tube floating transportation route of Shenzhen-Zhongshan Link

监测主要就沉管与一体船的六自由度运动状态进行, 其中重点考察高速浮运下沉管纵倾状态。采用姿态仪+倾角仪结合动态采集系统实现沉管多自由度运动姿态的实时观测, 见图 11、12。

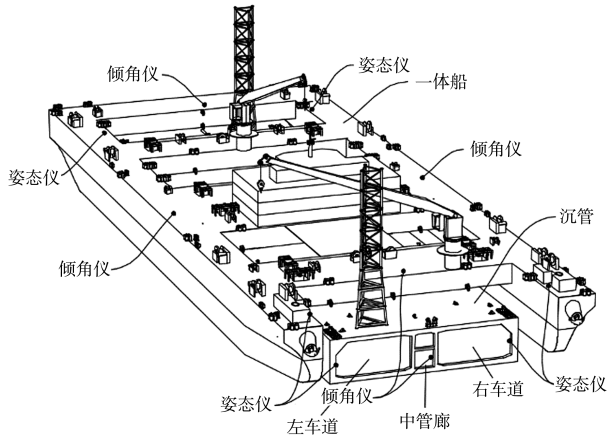


图 11 一体船浮运沉管姿态监测

Fig. 11 Integrated vessel floating transportation and immersed tunnel element attitude monitoring

态。表现为沉管顶部上水严重，现场观测沉管顶部接近 2/3 范围已浸没入水，从受力来看沉管的浮稳性或已接近临界状态。一体船的总质量为 2.285 万 t，相比较沉管总质量为 7.677 万 t，在沉管接近失稳的情况下，船体的浮稳性也面临较大挑战。

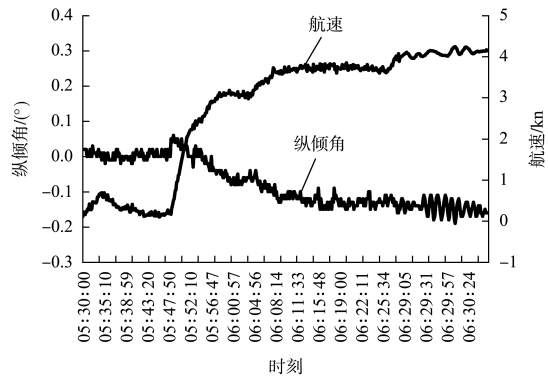


图 13 实测 E7 管节纵倾与航速随时间历程

Fig. 13 In-situ measured values of E7 immersed tube longitudinal trim angle and ship speed over time

将管节实测纵倾值与航速对应关系进行统计，结果见图 14。纵倾角与航速基本呈二阶增长关系，沉管纵倾在加速初始阶段出现纵倾角为正，反映在沉管姿态出现短暂的船仰，航速持续增大超过 2 kn 后沉管转向船埋(纵倾)，并随航速增长纵倾角度持续增长，最大纵倾出现在最大航速 4.25 kn 时。

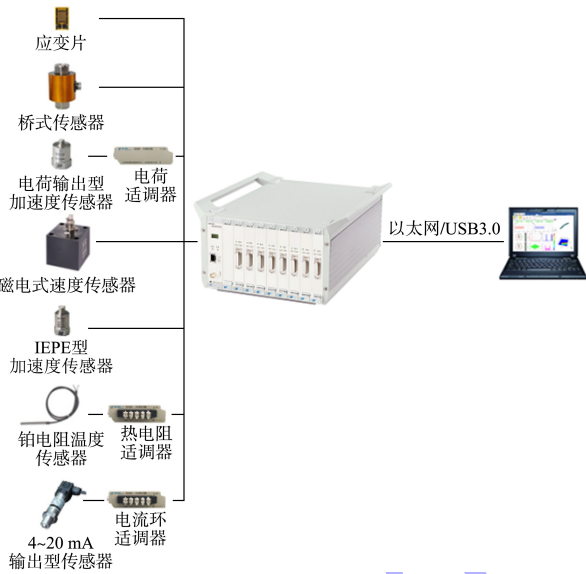


图 12 高频动态采集系统架构

Fig. 12 High-frequency dynamic acquisition system architecture

通过现场实测发现，一体船拖带管节浮运在深中通道 E7 管节浮运时最大绝对航速为 4.25 kn，与原设计计算预测结果基本一致。现场实测数据见图 13。可以看出，在一体船初始加速时，沉管出现短暂的船扬；随着浮运航速的增大，在速度超过 2 kn 以后沉管与一体船同步出现较明显的纵倾，最大纵倾(船部向下)幅度出现在航速最大时，此时纵倾角达到了 -0.19°。在航速稳定在一定速度时，沉管呈稳定的纵倾姿态向前航行。

对于沉管这种超低干舷浮体(干舷高度普遍 30~45 cm)，高速浮运过程出现较明显的纵倾姿

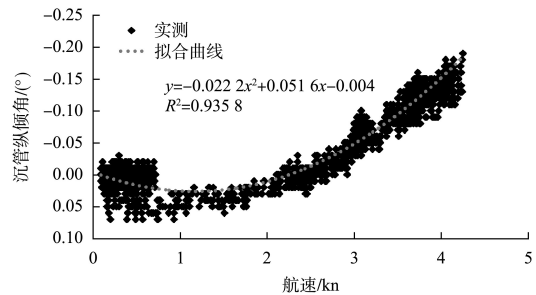


图 14 实测 E7 管节纵倾与航速关系

Fig. 14 Relationship between measured E7 immersed tube longitudinal trim angle and ship speed

需要说明的是，模型试验无浪工况下低航速未出现明显的船仰现象，应与模型试验的方法为强迫自航有关，每次试验仅能实现 1 种航速效果，无法模拟船体螺旋桨一次加速至高速的实际效果，且在启动试验过程中低速下模型试验误差较大，数据较不规律。

模型及实测结果皆印证了大型沉管高速浮运

工况下艏部纵倾是其特有现象,在浮运作业过程中需特别注意过大纵倾带来的浮体失稳风险。

#### 4 结论

1) 沉管在相对高速浮运工况下,出现较为明显的艏部下倾的纵倾现象是其特有现象,需要特别注意过大纵倾带来的浮体失稳风险。

2) 一体船拖带大型管节浮运时纵倾角与航速呈二阶增长关系,现场实测最大航速4.25 kn 情况下纵倾角最大可达 $0.19^\circ$ 。

3) 在顺浪情况下,浮运过程沉管纵倾情况有一定程度改善。

#### 参考文献:

- [1] 宿发强. 超大型沉管浮运的风险管控[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(7): 1-3, 73.  
SU F Q. Risk management on floating of ultra-large immersed tube [J]. China harbour engineering, 2015, 35(7): 1-3, 73.
- [2] 陈韶章, 陈越, 张弥. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
CHEN S Z, CHEN Y, ZHANG M. Design and construction of immersed tube tunnels [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [3] DE WIT JERÔME, VAN WESTENDORP P. North/South Metro Line, Amsterdam, the Netherlands technical challenges in immersed tunnelling [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2022, 121: 104314.
- [4] 林鸣, 林巍, 刘晓东, 等. 日本交通沉管隧道的发展与经验[J]. 水道港口, 2017, 38(1): 1-7.  
LIN M, LIN W, LIU X D, et al. Development and experience of immersed tunnel in Japan [J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(1): 1-7.
- [5] OLSEN T, KASPER T, DE WIT T. Immersed tunnels in soft soil conditions experience from the last 20 years [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2022, 121: 104315.
- [6] 冯海暴. 沉管浮运阻力系数的影响因子与取值分析研究[J]. 船舶力学, 2019, 23(7): 763-772.  
FENG H B. Research on influence factors of resistance coefficient and parameter of ITT element [J]. Journal of ship mechanics, 2019, 23(7): 763-772.
- [7] 胡勇前, 吴刚, 杨海涛. 复杂工况下沉管管节浮运阻力的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S1): 1620-1625.  
HU Y Q, WU G, YANG H T. Modeltest research on resistance characteristics of immersed tunnel element during floating transportation under complex conditions [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2013, 9(S1): 1620-1625.
- [8] 张晓兔, 张乐文, 刘祖源. 沉管管节的拖航操纵运动模拟[J]. 武汉交通科技大学学报, 1999, 23(5): 533-536.  
ZHANG X T, ZHANG L W, LIU Z Y. Towing maneuvering simulation of immersed tunnel cube [J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1999, 23(5): 533-536.
- [9] WU H, RHEEM C K, CHEN W, et al. Experimental study on the tension of cables and motion of tunnel element for an immersed tunnel element under wind, current and wave [J]. International journal of naval architecture and ocean engineering, 2021(13): 889-901.
- [10] 高卫平. 沉管隧道浮运与沉放阶段受力性态研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
GAO W P. Research on the mechanical behavior of immersed tunnel elements during floating and immersion stages [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [11] 吕卫清, 应宗权, 苏林王, 等. 沉管管节浮运过程中波浪附加阻力的水动力学分析[J]. 水运工程, 2011(11): 1-5.  
LYU W Q, YING Z Q, SU L W, et al. Hydrodynamic analysis of added resistance in waves of immersed tunnel elements during floating transportation [J]. Port & waterway engineering, 2011(11): 1-5.
- [12] WANG S, XU T J, DONG G H, et al. Numerical simulation of damping effect of ballast water system on motion response of immersed tunnel element [J]. Ocean engineering, 2023, 281: 114795.
- [13] HAKKAART C J A. Transport of tunnel elements from Baltimore to Boston, over the Atlantic Ocean [J]. Tunnelling and underground space technology, 1996, 11(4): 479-483.