



基于数值仿真的拖轮拖带沉管浮运航道宽度设计

于志安

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对拖轮拖带沉管浮运航道宽度的既有设计方法具有局限性的问题, 基于数值仿真进行了浮运航道宽度设计的研究。采用数值仿真模拟结果计算的深中通道沉管浮运航道宽度随拖轮就位时间增加而增加、随纠偏力增大而变小, 较参考《海港总体设计规范》计算数值小约 17 m。基于数值仿真的浮运航道宽度设计方法考虑了拖轮协同操纵因素, 丰富了拖轮拖带沉管浮运航道宽度设计的方法, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 深中通道; 拖轮拖带; 浮运航道; 航迹带宽度; 纠偏

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0125-04

Channel width design for immersed tube floating by tug towing based on numerical simulation

YU Zhi-an

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The existing design method for the channel width of immersed tube floating by tug towing has limitations. In response to this problem, a study is carried out on the floating channel width design based on numerical simulation. The floating channel width of the Shenzhen-Zhongshan Bridge gained from numerical simulation results grows with the time of tugs being in place, while decreases as the rectifying force increases. It is about 17 m smaller than the value calculated depending on the *Design Code of General Layout for Sea Port*. The design method of floating channel width based on numerical simulation takes into account the cooperative maneuver of tugs, enriches the width design method for immersed tube floating, and can provide a reference for similar projects.

Keywords: the Shenzhen-Zhongshan Bridge; tug towing; floating channel; track width; deviation rectification

深中通道工程横亘珠江两岸, 东起深圳机荷高速, 西止中山横门互通, 全长约 24 km。海中隧道全长 6 845 m, 其中沉管段长度 5 035 m, 共有预制沉管 32 个, 采用双钢板-混凝土组合结构, 其中 10 个管节(E23~E32)在龙穴造船基地完成混凝土浇筑并采用拖轮拖带的方式出运, 浮运航道由龙穴造船基地至广州港航道后横穿珠江至深圳机场码头以南, 航道长度约 22 km。航道横穿珠江段

和机场码头附近段水域, 天然水深小, 开挖土层厚度约 9 m。合理设计航道宽度可以有效减少疏浚量、降低对施工水域的环境污染、减小疏浚物处理的压力, 有利于水上施工的顺利开展。

1 设计方法现状

1.1 设计方法

沉管法隧道是国内水下隧道的重要工法之一,

收稿日期: 2021-03-30

作者简介: 于志安(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 咨询工程师(投资), 从事港口、航道、海岸工程咨询与设计。

大型跨海沉管隧道工程因管节预制数量多、预制场地需求高，难以实现管节就地预制，一般需要远距离水上浮运。拖轮拖带浮运沉管方式是采用拖轮拖带、顶推等方式控制管节姿态、浮运速度和转向以实现管节水上运输，是沉管浮运的重要方法。

关于沉管拖轮拖带浮运航道宽度的确定，国内尚无成熟的规范标准可以依据，一般参考船舶航道设计方法，将沉管拖轮拖带浮运航迹带宽度及沉管与航道两侧底边线间富余宽度的和作为浮运航道宽度。

确定拖轮拖带过程中的沉管航迹带宽度是浮运航道宽度设计的关键，但目前国内见诸于公开资料的沉管拖轮拖带浮运的航迹带宽度设计实践很少，仅在港珠澳大桥项目中有所应用^[1-2]，其沉管拖轮拖带浮运航道设计参考《海港总体设计规范》设计方法，沉管航迹带宽度 A 计算考虑风、流压偏角 γ 和船舶漂移倍数 n ，计算公式^[3]为：

$$A = n(B + L \sin \gamma) \quad (1)$$

式中： L 为沉管长度； B 为沉管宽度。

1.2 设计方法的局限性

船舶航迹带宽度与船舶类型及尺寸、船舶操纵性能、航速、船舶操纵人员的经验和水平有关，同时与航行水域的风、水流、波浪、航道水深等因素有关。《海港总体设计规范》推荐的航迹带宽度计算方法基本适合航速为 8~12 kn 的情况，船舶低速航行时的操纵状况又与设计时速迥然不同。

沉管浮运与船舶航行不同，沉管近似为长方体形状，水上拖航速度慢，一般不超过 2 kn，沉管本身并无动力系统，而是依托多艘拖轮提供外力，控制水上行进路线。沉管航迹带宽度主要取决于拖轮所能提供的拖力情况和各拖轮间配合的协调性。通过套用自带动力和舵效、单船操控、快速行驶的船舶航迹带宽度计算公式确定沉管拖轮拖带浮运航迹带宽度具有一定局限性。

自航式一体船浮运沉管航道宽度的设计，国内已经有基于船舶操纵模拟试验研究案例^[4]，但针对拖轮拖带沉管浮运航道尚未见基于模拟试验的相关设计。

2 航道宽度设计

2.1 管节尺度及拖轮配置

深中通道的 E23~E32 管节在龙穴造船基地完成混凝土浇筑，采用拖轮拖带的方式出运，管节尺寸见表 1。

表 1 管节尺寸

管节编号	长/m	宽/m	高/m
标准管节 E23~E27	165.0	46.0	10.6
非标准管节 E28~E32	123.8	46.2~55.6	10.6

为控制浮运风险，管节浮运横流流速不大于 0.6 m/s、有效波高不大于 0.8 m、波浪平均周期不大于 6 s、风速不大于 6 级。根据管节尺寸和施工组织安排，沉放驳置于沉管顶部固定，两侧设突出沉管两侧的旁施工装架。沉管拖带浮运配置 2 艘前拖轮、2 艘尾拖轮，中间配置 4 艘（标准管节）或 2 艘（标准管节）旁拖轮，配置 2 艘应急拖轮，沉管纠偏主要依托旁拖轮，其拖力为 650 kN/艘。

2.2 沉管航迹带宽度

沉管航迹带宽度的确定可供参考的实际工程经验很少，为更合理地确定浮运航道宽度，对参考《海港总体设计规范》计算所得的航迹带宽度与数值仿真试验结果进行对比分析。

2.2.1 参考《海港总体设计规范》计算

参考《海港总体设计规范》，按照式(1)计算横流速度 0.6 m/s 时沉管航迹带宽度见表 2。

表 2 参考《海港总体设计规范》计算沉管航迹带宽度

沉管编号	L/m	B/m	n	$\gamma/(^\circ)$	A/m
E23~E27	165.0	46.0	1.59	10	118.7
E28~E32	123.8	55.6	1.59	10	122.6

注： L 为沉管长度； B 为沉管宽度； n 为漂移倍数； γ 为风、流压偏角； A 为沉管航迹带宽度。

2.2.2 数值仿真试验

鉴于以往项目沉管航迹带宽度确定参考《海港总体设计规范》船舶航道计算方法具有局限性，深中通道项目开展了沉管拖轮拖带浮运航迹带宽度的水动力数值仿真试验。数值仿真试验模拟沉管纠偏过程，包括发现偏航警戒、拖轮就位调整、拖轮启动加力、纠偏等 4 个阶段。设定条件如下^[5]：1) 考虑拖轮作业需克服自身阻力，试验设定单条拖轮纠偏作业时为克服自身所受阻力发挥

80%的效力，即单轮最大纠偏力 $F = 650 \text{ kN} \times 0.8 = 520 \text{ kN}$ ；2)根据相关工程经验，设定拖轮就位后拖力达到设定纠偏力的时间为 30 s；3)考虑拖带浮运施工配置精准定位系统，偏航警戒值设为 5 m。

试验以旁拖轮就位时间和纠偏力为变量，计算允许流速下沉管最大偏移量。试验结果显示，横流、横浪条件下标准管节和非标准管节偏航开始后分别在 56 s 和 59 s 达偏航警戒值，警戒发出后拖轮开始响应，拖轮就位时间与沉管最大偏移量的关系见表 3。

表 3 拖轮就位时间与沉管最大偏移量的关系

管节	拖轮就位时间/s	纠偏力 /% 最大纠偏力	最大偏移量/m	达到最大偏移时间/s
标准管节	100	50	49.982	566
		60	42.221	352
		70	36.931	335
	80	40	-	持续增加
		50	43.254	554
		60	36.421	335
	50	40	-	持续增加
		50	34.291	334
		60	27.441	311
非标准管节	40	40	-	持续增加
		50	31.210	323
		60	-	持续增加
		80	39.386	329
		100	33.133	295
	70	60	-	持续增加
		80	36.561	312
		100	30.354	289
		60	-	持续增加
		50	31.312	294
	100	24.972	272	

表 4 不同的拖轮响应下浮运航道宽度

管节	沉管最大偏航/m	沉管航迹带宽度/m	沉管与航道底边线间富余宽度/m	航道宽度/m	纠偏力 /% 最大纠偏力	拖轮就位时间/s
标准管节	49.982	145.964	34.5	215.0	50	
	42.221	130.442		199.4	60	100
	36.931	119.862		188.9	70	
	43.254	132.508		201.5	50	
	36.421	118.842		187.8	60	80
	34.291	114.582		183.6	50	
	27.441	100.882		169.9	60	50
	31.21	108.42		177.4	50	40

数值仿真试验结果显示，在设定的参数下标准管节和非标准管节的最大偏移量分别为 27.441~49.982 m 和 24.970~39.386 m、沉管航迹带宽度分别为 100.882~145.964 m 和 105.544~134.372 m。

可见，在特定流速下，数值仿真试验考虑了拖轮纠偏响应因素，沉管的航迹带宽度具有一定变化幅度，偏移量随拖轮就位时间增加而增加，随纠偏力增大而变小，而参考《海港总体设计规范》计算所得为单一数值。

2.3 沉管与航道底边线间富余宽度

受水深限制，沉管拖带浮运航道通过开挖形成，沉管偏离航线时将在两侧产生非对称流场，两侧压力分布不均，沉管偏航将进一步加大。沉管断面为矩形，岸吸效应更接近散货船，参考《海港总体设计规范》，沉管与航道底边线间单侧富余宽度取 0.75 倍沉管宽度。

2.4 浮运航道宽度取值

沉管浮运航道宽度为航迹带宽度与沉管与航道底边线间两侧富余宽度的和，不同的拖轮响应下浮运航道的宽度见表 4。

沉管浮运配套设置定位系统具有地形和拖轮实时定位、沉管航速、沉管实时定位、偏航显示及报警功能，沉管和所有拖船均可接收到其他作业船舶的位置、航向等信息，该系统可以帮助拖轮之间协调作业。根据施工组织安排和相关经验，沉管偏移量达到预警值后，旁拖轮可在 50 s 以内就位。

续表4

管节	沉管最大偏航/m	沉管航迹带宽度/m	沉管与航道底边线间富余宽度/m	航道宽度/m	纠偏力 最大纠偏力/%	拖轮就位时间/s
非标准管节	39.386	134.372	41.7	217.8	80	80
	33.133	121.866		205.3	100	
	36.561	128.722		212.1	80	70
	30.354	116.308		199.7	100	
	31.312	118.224		201.6	80	50
	24.972	105.544		188.9	100	

数值仿真实验中拖轮最大纠偏力是在考虑了拖轮克服自身阻力之后所能发挥的效力，因此非标准管节航道宽度取最大纠偏力下的计算数值 188.9 m 为合适，沉管航迹带宽度较参考《海港总体设计规范》计算数值小 17 m；标准管节在纠偏力发挥 60% 时即可完成纠偏，航道宽度计算值为 169.9 m，沉管航迹带宽度较参考《海港总体设计规范》计算数值小 17.8 m，根据试验结果分析，如果纠偏力全部发挥，将进一步减小沉管偏移量，浮运航道宽度亦可相应减小。

综上，深中通道沉管拖轮拖带浮运航道宽度由非标准管节控制，计算数值为 188.9 m。在实际设计中考虑为拖轮作业预留一定富余时间，航道宽度取值 200 m，为最大沉管宽度的 3.6 倍。

3 结论

1) 深中通道项目基于数值试验模拟沉管在不同的拖轮就位时间组合、不同的纠偏力的情况下沉管的最大偏移量，进而计算了沉管拖轮拖带浮运航道宽度。试验结果显示：沉管偏移量随拖轮就位时间增加而增加，随纠偏力增大而变小，计算所得沉管的航迹带宽度具有一定的变化幅度。沉管航迹带宽度模拟数值较参考《海港总体设计规范》计算数值小约 17 m。

2) 深中通道沉管拖带浮运航道宽度计算值由非标准管节控制，非标准管节航道宽度计算值取 188.9 m；标准管节在纠偏力发挥 60% 时即可完成纠偏，航道宽度计算值为 169.9 m，如果纠偏力全

部发挥，将进一步减小沉管偏移量，浮运航道宽度亦可相应减小。在实际设计中考虑为拖轮作业预留一定富余时间，航道宽度取值 200 m，为最大沉管宽度的 3.6 倍。

3) 基于数值仿真的深中通道沉管拖轮拖带浮运航道宽度设计，考虑了拖轮操纵和协作因素，丰富了拖轮拖带沉管浮运航道宽度设计的方法，可为类似工程提供参考。同时，沉管航迹带数值试验分析结合经验对拖轮就位后拖力达到设定纠偏力的时间、偏航警戒值进行设定，根据工程经验选择了拖轮就位时间。这些因素是影响沉管航迹带宽度的关键因素，不同的拖轮配置、环境条件都将影响上述参数取值，工程实施前需要针对确定的拖轮配置方案开展现场试验验证参数取值。

参考文献：

- [1] 毛剑峰, 梁桁, 孙英广. 港珠澳大桥沉管出运航道设计要点[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(9): 97-99, 102.
- [2] 冯海暴, 苏长玺. 沉管受限水域浮运航道设计[J]. 水运工程, 2018(1): 200-204.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [4] 岳远征, 周伟. 基于模拟试验的超大型沉管浮运航道宽度研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(9): 31-34.
- [5] 陈明胜, 王凡, 邹梅艳, 等. 深圳至中山跨江通道主体工程施工(S08)沉管管节拖航阻力及纠偏运动响应研究》[R]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.