



基于航速的大型人工水道尺度设计方法

王效远

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对国内现行规范在大型人工水道尺度规定方面的不足, 采用理论分析和数值模拟分析方法, 得到大型人工水道尺度与万吨级船舶与航行性能的关联性(快速性和经济性)。基于大型人工水道与船舶性能耦合关系, 从最小底宽、最小水深、断面系数等方面对限制性航道尺度的影响进行研究。建立了以设计船型及其设计航速为引领的大型限制性航道设计方法。

关键词: 限制性航道; 极限航速; 船舶阻力

中图分类号: TP 72; U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0119-05

Design method of large-scale artificial waterway based on speed

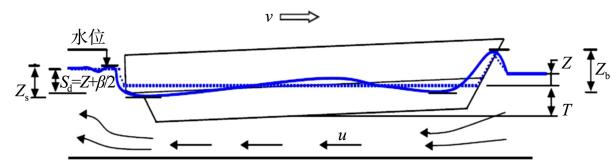
WANG Xiao-yuan

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

Abstract: Aiming at the shortcomings of the current domestic regulations on the scale of large-scale artificial waterways, theoretical analysis and numerical simulation analysis methods are used to obtain the correlation between the scale of large-scale artificial waterways and the navigation performance of 10,000-ton ships, including speed and economy. Based on the coupling relationship between large scale artificial waterway and ship performance, the influence of the limited channel scale is studied from the aspects of minimum bottom width, minimum water depth and section coefficient. A large-scale restricted channel design method led by the design ship type and speed is established.

Keywords: restricted channel; critical speed; ship resistance

船舶航行于人工开挖的较窄航道时, 由于受到航道尺寸的限制, 相比开放水域航道会有较大的差异, 主要表现在船舶阻力、船舶浮态以及兴波等方面。当船舶航行于限制性航道时, 由于水深方向受到河床的限制, 船体周围会产生回流速度, 导致船舶的摩擦阻力增加, 见图1。当航速到达临界速度时, 船体周围的流体速度受到临界速度的限制导致船体前方出现涌浪, 更有甚者出现孤立波, 此时船舶阻力值达到一个极大值而船舶浮态也处于极不稳定状态, 因此船舶航速受航道尺度制约^[1]。2019年国际航运协会对船舶岸壁效应与受航道断面系数之间的关系进行了阐述^[2]。



注: v 为船速; T 为吃水深度; B 为船宽; z 为水位下降高度;
 z_s 为船首波浪高度; z_b 为船尾波浪高度; β 为船舶的纵倾;
 S_d 为船舶下沉量; u 为水流速度。

图1 在受限水域航行的内河船舶

国内相关规范^[3-4]对限制性航道尺度给出了具体的计算公式, 不同规范之间的规定略有差异。规范对限制性航道的建设起到了积极的指导作用,

但是随着船舶大型化、运输船型多样化等发展要求，规范存在一些不足，主要表现在航道富余水深偏小、没有建立断面系数和航速之间的关系等方面。因此采用理论分析和数值模拟分析方法，研究大型人工水道尺度与船舶快速性等航行性能的关系，进而提出人工水道通航尺度设计方法是十分必要的。

1 大型人工水道定义及影响因素

根据航道的成因分类，航道可分为天然航道和人工航道，天然航道是指利用江、河、湖、海等天然水域通航条件的航道；人工航道是指为满足航行条件经过人工开挖或治理的航道。国际上对限制性航道的定义为：航道底宽小于船舶航行的影响宽度，船舶在其内航行同时受到浅水效应和岸壁效应的影响。船舶在浅水区域航行，受限水域效应出现的阈值见表 1^[5]。

表 1 受限水域效应出现的阈值

受限情况	A_e/A_b	h/T	B_e/B
受限效应开始出现	50.0	15.0	50.0~200.0
明显受限	7.0~8.0	4.0	10.0~15.0
强烈受限	4.0	1.5	4.0

注： A_e 为航道断面面积； A_b 为船舶水下横断面面积； h 为航道水深； T 为船舶吃水； B_e 为航道平均宽度(A_e/h)； B 为船舶宽度。

通过分析航道的定义及分类，考虑到 GB 50139—2014《内河通航标准》中的限制性航道只规定了 2 000 吨级及以下航道的标准，大型人工水道可以定义为：通过人工开挖或治理，可供 3 000 吨级及以上大型船舶通航，断面系数不大于 10 的内河限制性航道。大型人工水道内航行的船舶吨级较大，船舶岸壁效应受航道断面系数的影响较大。因此，大型人工水道的尺度确定受船舶吨级、航行速度、断面系数、断面形状、水流条件等因素的影响。

2 基于航速的大型人工水道设计方法

限制性航道和非限制性航道的区别在于：船舶在非限制性航道航行与在无限深水域航行相比，航行阻力、航行下沉量等没有变化；而在限制性

航道航行与在无限深水域相比，航行速度降低、航行阻力增大、航行下沉量增加。对不同类型的船舶，当航速一定时，存在一个临界断面系数(或断面系数区间)，当断面系数小于临界值(或区间)时，航行阻力随断面系数减小而增加的趋势非常明显；当断面系数大于临界值(或区间)时，航行阻力随断面系数增大而减小的趋势越来越不明显。因此，限制性航道和非限制性航道不存在明显的分界点，所谓“限制性”主要是指对船舶的航速有一定限制作用。

2.1 设计航速与极限航速

船舶静水阻力的主要组成为摩擦阻力、兴波阻力。对于航速较低的船舶，摩擦阻力占总阻力的比例较大，兴波阻力的大小主要和航速有关，航速增大时兴波阻力增加很快，兴波阻力与航速的 6 次方成比例。图 2 表示尺度为 56 m×6.7 m×2.6 m(船长×船宽×吃水)的驳船在 18 m×4 m(底宽×水深)的受限水域和开敞水域航行时，摩擦阻力、兴波阻力和总阻力的变化情况。从图 2 可以看出：船舶阻力在航速较低时增加的阻力主要是摩擦阻力，在较高航速时增加的阻力主要是兴波阻力，特别是当船速接近极限航速时，船体兴波阻力急剧增加，因此现在在一般水道中航行的船舶，其航速都受到一定限制。参照文献[2]，其临界速度计算公式如下：

$$v_{cr} = \sqrt{gH_m} \left[2 \sin \frac{\arcsin(1-m)}{3} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中： v_{cr} 为临界速度； g 为重力加速度； H_m 为等效水深(A_e/W)； m 为阻塞系数(A_b/A_e)， W 为航道水面宽度。

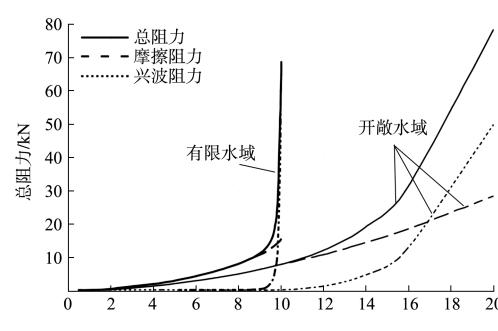


图 2 驳船在开阔水域和运河中的阻力曲线

从图 2 可以看出，船舶在受限水域中航行存在极限航速，实际中出于经济考虑，船舶的最大航速要低于这个极限速度。德国对多特蒙德埃姆斯运河的现代货船速度进行了实测，观测到的相对船速的概率分布见图 3。从图 3 可以看出，大部分船速与极限航速的比值在 0.7~0.9。

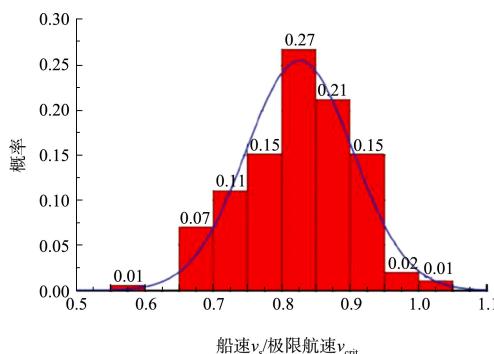


图 3 德国多特蒙德埃姆斯运河上观测到的相对船速的概率分布

2.2 极限航速与断面系数、断面形状的关系

根据式(1)，极限航速和断面系数、断面形状有关，下面以长江中游大型人工水道万吨级船型 130 m×22 m×5.5 m 为例，分析两者之间的关系。

2.2.1 断面系数和极限航速的关系

不同断面系数的极限航速见图 4，可以看出断面系数直接影响极限航速。随着断面系数的增加，极限航速增速变缓，显示出断面系数对极限航速的影响由高受限区到明显受限区再到受限效应开始出现区的变化过程。

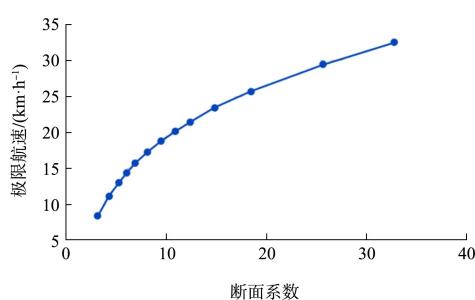


图 4 极限航速和断面系数关系

2.2.2 断面形状和极限航速的关系

在断面系数相同时，不同的断面形状船舶受到的阻力不同，其极限航速也不同。图 5 显示设

计代表船型在断面系数和水深不变的航道中，航道边坡和航道底宽不同时的极限航速变化情况。从计算结果可以看出，航道断面为矩形断面时，极限航速最大；底宽越小、边坡越大；顶宽越大时极限航速越小。这说明平均水深越小(航道断面/水面宽度)，极限航速越小。

不同边坡坡比和极限航速的关系见图 5，其中航道断面为矩形断面及边坡坡比为 1:4、1:7 时的断面见图 6。

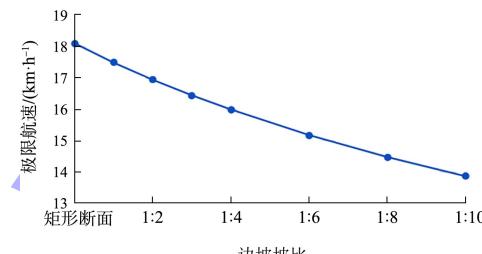


图 5 断面形状与极限航速关系

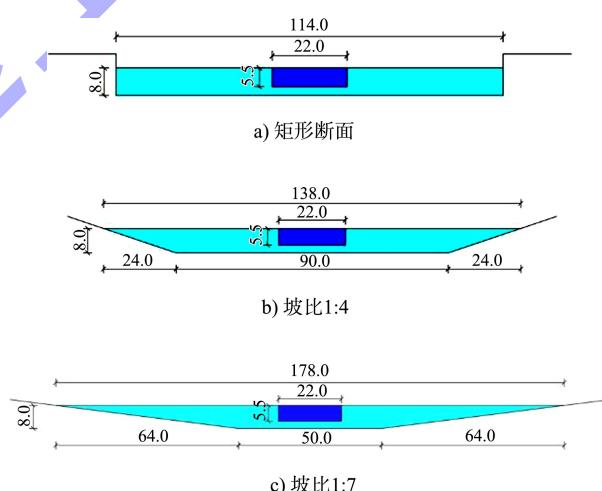


图 6 航道断面 (单位: m)

需要注意的是，边坡越缓极限航速越低是针对断面面积不变的情况。正常情况下，航道底宽和水深一定时，边坡越缓、断面系数越大则极限航速越大。

2.3 船舶阻力与断面系数、断面形状的关系

快速性是船舶最重要的性能之一，而船舶航行时的阻力性能是反映船舶快速性性能优劣的一个至关重要的指标。针对设计船型从断面系数和断面形状两方面分析其对船舶阻力的影响。

2.3.1 断面系数和船舶阻力的关系

定义船舶摩擦阻力系数为：

$$C_f = \frac{F_f}{0.5\rho u^2 L d} \quad (2)$$

压差阻力系数：

$$C_r = \frac{F_r}{0.5\rho u^2 L d} \quad (3)$$

总阻力系数：

$$C_t = \frac{F_t}{0.5\rho u^2 L d} \quad (4)$$

式中： F_f 、 F_r 、 F_t 分别代表船舶受到的摩擦力、压差阻力、总阻力； ρ 为水的密度； u 为船速； L 为船长； d 为船底宽。不同航道底宽和不同边坡的船舶阻力计算结果见图 7。从图 7 可以看出摩擦阻力系数基本保持不变，而压差阻力系数主要是随航道底宽增加而减小的，并且底宽大于 100 m 之后这种减小的趋势比较缓慢；底宽为 110 m 时船舶阻力值相等，底宽为 100 m 时相近。说明底宽达到一定值后，继续增加底宽对减少船舶阻力作用不大。

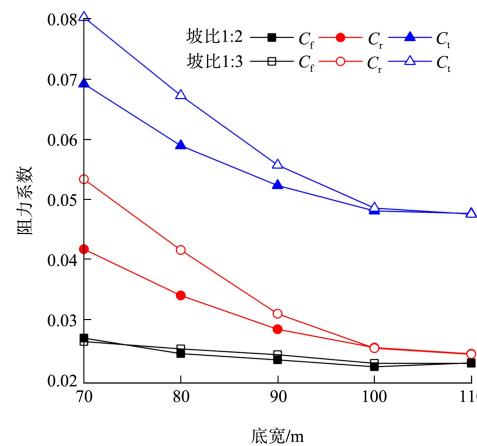


图 7 船舶阻力系数与航道底宽(断面系数)关系

2.3.2 断面形状和船舶阻力的关系

根据前述分析，断面系数越大阻力越小，但是断面形状同样影响船舶阻力。如表 2 所示，在组次 1 中，底宽 90 m 的断面系数更大，但其阻力比底宽 80 m 的大，其总阻力系数大 35%；组次 2 中，底宽 110 m 的断面系数更大，但其总阻力比底宽 90 m 的大 17%。从表 2 中可以看出，水深越深总阻力越小。

表 2 断面形状对船舶阻力影响

组次	底宽 w/m	边坡坡比	水深 h/m	断面系数 n	摩擦阻力系数 C_f	黏压阻力系数 C_r	总阻力系数 C_t
1	80	1:2	8	6.35	0.025	0.034	0.059
	90	1:3	7	6.42	0.028	0.052	0.080
2	90	1:3	9	8.70	0.023	0.018	0.041
	110	1:3	8	8.86	0.023	0.025	0.048

可以看出断面系数是影响极限航速和船舶阻力的关键因素，断面系数越大，则极限航速越大、船舶阻力越小，但其影响力随着断面系数的增加逐渐减小。断面形状是影响极限航速和船舶阻力的重要因素，平均水深与水深比值越大，则极限航速越大、船舶阻力越小。

因此在航道设计中，从极限航速、船舶阻力角度考虑，断面系数不宜过小；在断面系数一定的情况下，优先增加航道平均水深；在底宽和水深一定时，航道坡比对阻力影响很小，可根据地质及现场情况确定合适坡比。

2.4 最小水深和最小底宽

2.4.1 最小水深

最小航道水深需要满足船舶在高速航行时无

触底风险且阻力较小，因此最小航道水深一般包括船舶吃水、船舶航行下沉量和富余水深。

船舶下沉量一般计算公式为：

$$\delta = \frac{C_B m^{0.81} v_k^{2.08}}{20} \quad (5)$$

式中： δ 为船舶航行下沉量 (m)； C_B 为船舶的方形系数； v_k 为航速 (kn)； m 为阻塞系数。该计算公式的有效范围是 $0.5 \leq C_B \leq 0.9$ 、 $1.1 \leq h/T \leq 1.5$ 。

推荐船型方形系数为 0.85，在航速为 15 km/h 时，不同航道尺度内的航行下沉值见表 3，航行下沉值与船舶吃水的比值在 0.10~0.15。

计算结果表明：水深越深，则船舶下沉量越小、阻力就越小。因此在其他条件一定的情况下，水深越深越好。

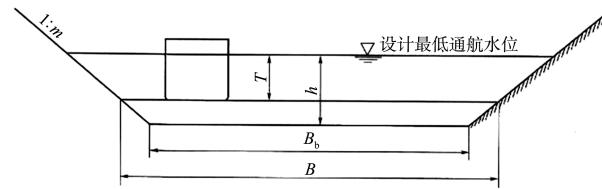
表 3 不同航道尺度内的航行下沉值

底宽 W/m	坡比	水深 h/m	断面系数 n	下沉值/m	
				模型计算值	公式计算值
90	1:3	7.00	6.42	0.82	0.73
90	1:3	8.00	7.54	0.64	0.64
90	1:3	9.00	8.70	0.53	0.57

2.4.2 航道底宽

船舶在航道内航行时，在没有风、浪、水流等外界干扰的条件下，船舶在手工控制下扫出一条超过船宽的航迹带。这是由于船舶驾驶员根据目视定位的反应速度与船舶对舵的反应速度不同。直线段人工水道有效宽度一般由航迹带宽度、船舶间富余宽度(船舶间距)和船舶与航道底边间的富余宽度(船岸间距)构成。

航道宽度可分为航道通航宽度和航道底宽两部分，在运河航道设计中，航道通航宽度见图 8。大型船舶在运河中的通航深度应考虑船舶吃水、船舶航行下沉值、龙骨下富余深度等因素。船舶在不同水深时的下沉量不同，因此在通航宽度一定时，不同水深需要的航道底宽见表 4，在水深为 8 m 时，最小航道底宽约 90 m。



注：B 为航道通航宽度；B_b为航道底宽。

图 8 运河航道设计基本尺度

表 4 不同水深需要的航道底宽

通航宽度/m	坡比	水深 h/m	船舶吃水/m	船舶下沉值/m	龙骨富余深度/m	通航水深/m	航道底宽/m
96.85	1:3	7.00	5.5	0.73	0.5	6.73	95.2
96.85	1:3	8.00	5.5	0.64	0.5	6.64	88.7
96.85	1:3	9.00	5.5	0.57	0.5	6.57	82.3
96.85	1:3	10.00	5.5	0.51	0.5	6.51	75.9

注：船舶下沉值取底宽为 90 m 时不同水深下的计算值。

2.5 大型人工水道尺度设计

对于航行于长江干线的长距离运输船舶，应从全线综合营运经济性角度考虑船舶的经济航速。人工水道作为全航线中的一个航段，在通行此航段时，船舶的经济速度主要考虑不引起阻力激增，同时兼顾与其他航段营运速度的协调。经研究，长江中游人工水道的经济航速以 13 km/h 为宜，其极限航速为 16.5 km/h；根据极限航速和断面系数的关系，航道断面面积约 910 m²。根据极限航速和断面形状的关系以及航道最小水深和底宽的要求，航道断面尺度最小为底宽 90 m、水深 8 m、坡比 1:3。水深对极限航速影响最大，因此优先增加航道水深。建议航道有条件时断面取底宽 90 m、水深 9 m、坡比 1:3。

比较粗略，仅规定了断面系数的大致范围，对限制性航道最小水深和最小宽度的估算也缺乏系统研究的支撑，不能适应大型人工水道建设的需要。

2) 船舶在限制性航道(包括大型人工水道)航行明显不同于在开敞水域的航行，主要差别在于船行阻力增加且航速降低。船舶航速受临界速度的限制，同时船舶在限制性航道中的阻力曲线也发生变化。已有研究表明，限制性航道的尺度受船舶设计航速的控制，船舶航速不仅受断面系数的影响，还与断面形状密切相关。

3) 初步建立了以设计船型及其设计航速为引领的限制性航道(包括大型人工水道)设计方法，总结已有研究成果，并与本次研究开展的模型试验和计算分析进行对比分析，提出了根据设计船型和设计航速确定限制性航道断面尺度的估算方法。

3 结论

1) 国内现行规范对限制性航道尺度的规定

(下转第 154 页)