

动水域进行静水航速试验的测算方法

许光祥, 陈 希

(重庆交通大学 重庆 400074)

摘要: 受条件限制,某些河道的静水航速实船测试不得不在动水域进行. 由于动水域水面坡降的存在,船舶推力需克服坡降阻力而不能全部为航行提供动力,对水航速代替静水航速会造成一定偏差. 通过在澜沧江动水域进行的静水航速实船测试试验,提出了阻力平衡法和阻力同比法以修正静水航速,两种修正方法结果差异不大,而阻力同比法更为简略. 理论和实例分析表明,对水航速是否能代替静水航速取决于坡降阻力所占船舶推力比例的大小.

关键词: 动水域; 实船试验; 对水航速; 静水航速; 坡降阻力; 阻力平衡法; 阻力同比法

中图分类号: TV135.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0014-06

静水航速作为反映船舶快速性的重要指标,是船舶制造、船闸设计、明渠通航、航道整治等工程依据的关键指标^[1],其研究受到国内外高度重视. 从20世纪60年代开始,美、英、日等国考虑风、浪、浅水对船舶航速测试的影响,先后提出了航速的修正标准^[2-3]. 后来,我国也制定了相关标准和方法^[4]. 静水航速通常通过实船试验获取相关资料,再依据一定方法换算和修正获得^[5]. 丁举应用实船试验的GPS测量,提出了实际航速平均法、起点终点法、逐点法、逐段法等航速具体计算方法^[6]. 顾溟宇等在大量试验数据基础上开发了一套自动化的实船航速试验及分析方法,实现整个过程的自动化^[7].

静水航速实船测试通常在水库、湖泊等静水水域进行,如长江三峡有关通航方面的研究,其实船试验常在洞庭湖进行. 然而,在国内许多河流中难以找到满足要求的静水水域,为了工程设计和研究的需要,工程技术人员不得不选择在相对适宜的动水域内进行实船测试,再通过流速相对换算获取船舶的静水航速. 如澜沧江,在景洪枢纽建成以前(目前通航设施仍未正常使用),虽然有大朝山、漫湾电站等水库,但无过坝通航设施,其下游船舶无法驶入水库进行试验,同时又无与澜沧江直接相通的湖泊,而通过湄公河出海到长江等适宜水域进行试验很不现实,从而迫使某些船舶的静水航速测量不得不在动水域进行.

由于动水域存在水流速度和水面坡降,船舶实际对岸航速并不是静水航速,需要对其进行换算. 通常首先考虑的计算方法是上下水对岸航速平均法,该方法认为船舶上、下行的流速以及坡降阻力相互抵消,但是实际试验中上、下水很难做到在同一航线上航行,而不同航线流速分布不一样,同时上水坡降阻力和下水坡降动力是否能相互抵消,目前还没有成熟的研究. 其次考虑的是采用对水航速法,该方法认为船舶对岸航速与水流流速的相对速度,即对水的速度即为静水航速,但动水域存在水面坡降,其船舶需要一部分推力去克服坡降阻力,对水航速代替静水航速应偏小.

本文针对动水域因水面坡降的存在使得实际航速偏小的问题,依据澜沧江实船试验结果,对在动水域进行静水航速测试的修正方法进行了研究.

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 云南省科技攻关项目(2006GG21)

作者简介: 许光祥(1966-),男,重庆人,教授,博士,主要从事水力学及动力学、航道工程等方面研究.

E-mail: xsggxx626@163.com. 通信作者: 陈 希(greening117@163.com)

1 实船试验

1.1 代表船型

本文研究的代表船型为澜沧江纵流艏 U 型双艉、300 t 级机驳船“华平号”。船型基本参数为:总长 46.2 m;型宽 7.6 m;型深 2.35 m;设计吃水 1.75 m;标准及满载排水量 405 t;空载排水量 125 t;额定功率 2×255 kW;设计航速 22 km/h;方形系数 0.724;中剖面积 12.7 m^2 。

1.2 试验水域的选择

为保证试验的可靠性和可操作性,应选择适宜的水域,如:(1)江面宽阔、水深富裕的河段,以减小浅水、狭窄等因素引起的阻力,一般要求水深不小于 6 倍试验船舶的吃水深度,水域的长度和宽度应不妨碍试验船舶进行正常的航速试验;(2)水流相对平缓且流速比降沿程变化不大的河段,可保证沿程水流、坡降阻力基本稳定;(3)水流流向易与航线基本保持一致的河段,流迹线为直线最佳,以最大限度减小横、斜流对试验精度的影响。

澜沧江实船试验时,选择了橄榄坝水域。中水期该水域水面宽阔,可达 170 ~ 250 m;流速较小且沿程变化不大,一般保持在 $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$;水面平缓且沿程稳定,纵向坡降约 0.4‰;航行顺直,流向改变不大,基本能做到航线与流迹线一致。

1.3 航线初定

为了尽可能使航线与流迹线一致,减少斜流引起的误差,试验前专门实测了浮标流速流向,为选择航线提供资料。从图 1 可见,航迹线与流迹线方向基本一致,横流引起的误差基本可忽略。如果航向与流向差异较大,在计算航速时则需要进行方向修正。为了保证试验的可靠性,航线与流迹线的夹角不宜大于 10° 。

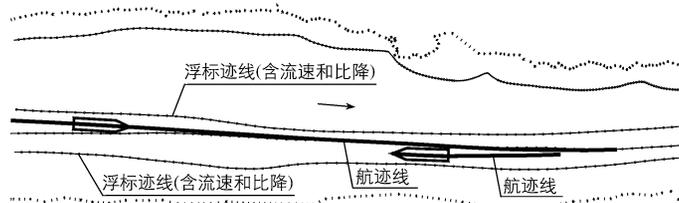


图 1 静水航速试验的航线与流迹线关系

Fig. 1 The relationship between sailing course and streamlines in still-water navigation speed tests

1.4 测试方法和内容

航迹线测试:于船舶中轴线艏艉各布设 1 台 GPS,每隔 5 s 采集其船舶所在位置坐标,连续观测即获得航迹线。在地面基站的辅助下,精度可达到试验要求。

航线流速测试:将声学多普勒流速剖面仪(ADCP)安装在船侧。ADCP 是利用声学多普勒效应原理进行测验的流速仪,属走航型测速系统,安装在船上随船可施测水深、各水深点流速以及断面流量。ADCP 的最大测深为 21 ~ 75 m;测量精度为 $0.25\% V + 2.5 \text{ mm/s}$ (V 为实测流速);测量范围为 $0 \sim 5 \text{ m/s}$,采样时间间隔为 5 s。由于 ADCP 是随船走测,测得的流速便为航线流速,其最上层流速可视为表面流速。

有效功率观测:由于存在传动损耗等因素,主机功率传到螺旋桨时,转换为船舶推力的为有效功率,并非主机发出的全部功率。有效功率主要施测主机输出扭矩和输出轴或螺旋桨的转速,其中主机扭力采用美国 Binsfeld 公司 TT9000 型数字应变扭力仪测量,螺旋桨转速采用磁电传感器测量,并且同时对左、右机进行了施测。采用下式计算有效功率^[8]:

$$P = CMn \quad (1)$$

式中: P 为输出的有效功率(kW); M 为主机输出扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$); n 为输出轴或螺旋桨的转速(r/min); C 为与单位及输出轴特性有关的常数,对于澜沧江“华平号” $C = 1/9\ 550$ 。

岸边水位和比降观测:于预定的试验航线起点、中点、终点左右两岸各布置1把水尺,试验始末各记录1次水位,由此计算出航段比降.由于选择的试验水域平缓,航段比降均匀,各段比降计算值十分接近,平均为0.4‰.

对岸航速计算:航迹线获得后,对岸航速通过相邻航迹线测点及其间隔时间逐段计算获得.

1.5 试验过程和工况

以上水试验为主,下水试验主要用于校核.船舶首先始于预定起点,按既定航线,固定船舵、航向和车档,做到整个试验过程中直线航行和功率相同.静水航速试验进行了3种载重、4种功率等多种工况,以确定航速与载重、功率之间的关系,备其他研究用.

1.6 对水航速计算

取航行参数趋于稳定的中间航段(稳定航段)进行分析计算.逐段计算对岸航速 V_a 和水流表面流速 V ,根据相对速度原理得到对水航速 $V_s = V_a \pm V$ (“+”对应上水,“-”对应下水).表1和图2是航速实船试验的成果汇总.经分析,对水航速与转速遵循很好的线性关系,与有效功率遵循很好的幂指数关系.

表1 对水航速试验结果

Tab.1 A summary of test results of navigation speed in flowing waters

载重 G/t	排水量 W/m^3	平均吃水 T/cm	螺旋桨转速 $N/(r \cdot \min^{-1})$	有效功率 P/kW	对岸航速 $V_a/(m \cdot s^{-1})$	表面流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	对水航速 $V_s/(m \cdot s^{-1})$
157	282	125.5	250.36	63.00	1.55	2.16	3.71
			373.40	216.91	2.73	2.42	5.15
			453.69	388.46	4.01	2.17	6.18
			483.52	469.91	4.25	2.31	6.56
265	390	170.3	250.36	63.00	0.83	2.01	2.84
			373.40	216.91	1.70	2.51	4.21
			453.69	388.46	2.95	2.17	5.12
			483.52	469.91	2.92	2.49	5.41
320	445	175.0	250.36	63.00	0.48	2.36	2.84
			373.40	216.91	2.03	2.05	4.08
			453.69	388.46	2.52	2.47	4.99
			483.52	469.91	3.15	2.08	5.23

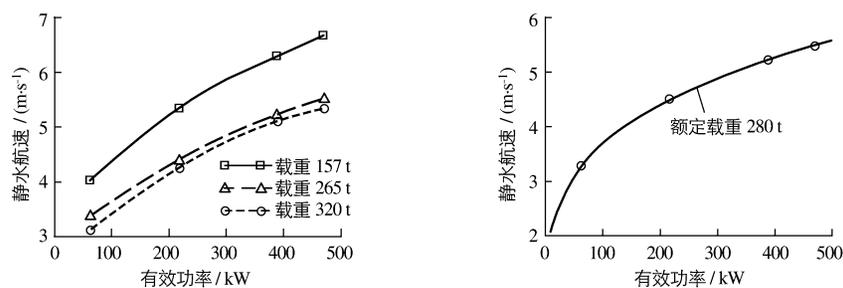


图2 静水航速与有效功率的关系

Fig.2 The relationship between still-water navigation speed and effective power

2 静水航速修正

前面已述,在动水域进行的航速试验,由于存在水面坡降,其船舶需要一部分推力去克服坡降阻力,对水航速代替静水航速偏小,应该进行修正.本文提出两种修正方法,即阻力平衡法和阻力同比法.

2.1 阻力平衡法

船舶航行阻力总体上包含水流阻力和坡降阻力,在匀速航行过程中应与船舶推力保持平衡.设船舶在有效推力 T 作用下航行于静水中,达到的静水航速为 V_0 ,其相应的航行水流阻力为 $R_V(V_0)$,坡降阻力 $R_J(J)=0$,则此时有效推力 T 应与水流阻力平衡,即 $T = R_V(V_0)$.

船舶用同样推力 T 在动水中上水航行时,其航行阻力由对水航速 V_s 对应的水流阻力 $R_V(V_s)$ 及比降为 J 的坡降阻力 $R_J(J)$ 组成,则有:

$$T = R_V(V_s) + R_J(J) \tag{2}$$

由此便可得到: $R_V(V_0) = R_V(V_s) + R_J(J)$ (3)

文献[9]对长江等船舶航行坡降阻力和兹万科夫水流阻力计算式进行了详细介绍,文献[10]根据澜沧江实船试验成果,详细说明了澜沧江代表船型的兹万科夫水流阻力修正式和坡降阻力的计算方法.根据这些研究成果,便可按式(3)由已知的对岸航速 V_s ,坡降 J 及船型参数等推算出静水航速 V_0 .

2.2 阻力同比法

虽然采用阻力平衡法修正静水航速概念明确,理论完整,但由于水流阻力计算涉及到船舶浸水面积、水线长度、方形系数等船型参数和流速等水流条件,需要的已知条件较多,计算也较为复杂,应用不方便.下面介绍另外一种较为简单的修正方法.

设排水量为 W 的船舶在动水中上行,考虑附加比降的情况下其坡降阻力 $R_J = \alpha WJ$ (α 为坡降修正系数^[9],常取 1.1 ~ 1.2),则用于克服水流阻力的推力应为 $T - \alpha WJ$.由于水流阻力与流速平方成正比,即 $T \propto V_s^2$, $(T - \alpha WJ) \propto V_0^2$ 可得到如下比例关系

$$V_s^2 : V_0^2 = (T - \alpha WJ) : T \tag{4}$$

即 $V_0 = V_s \sqrt{\frac{T}{T - \alpha WJ}}$ (5)

式(5)不需要知道复杂的船型参数,但需要知道有效推力,文献[9]和 [10]介绍了简化的和综合的船舶推力计算方法.推力算出后,便可按式(5)由已知的对岸航速 V_s ,坡降 J 推算出静水航速 V_0 .

2.3 静水航速修正实例

根据澜沧江“华平号”实船试验成果(表1),按照文献[10]的澜沧江代表船型的船舶推力、坡降阻力和水流阻力的计算方法,采用推力平衡法和阻力同比法进行静水航速的修正结果见表2.

表2 静水航速修正结果

Tab.2 The modified results of still-water navigation speed

载重	排水量	有效功率	船舶推力	坡降阻力	对水航速	静水航速	静水航速	$C_{0s}/$	$C_{01}/$	$C_J/$	$C_0/$
G/t	W/m ³	P/kW	T/kN	R _J /kN	V _s /(m·s ⁻¹)	V ₀ /(m·s ⁻¹)	V ₀₁ /(m·s ⁻¹)	%	%	%	%
157	282	63.00	6.32	1.27	3.71	4.02	4.15	7.71	10.60	20.09	3.23
		216.91	16.63	1.27	5.15	5.34	5.36	3.56	3.92	7.64	0.37
		388.46	25.11	1.27	6.18	6.30	6.34	1.90	2.52	5.06	0.63
		469.91	28.87	1.27	6.56	6.67	6.71	1.65	2.24	4.40	0.60
265	390	63.00	10.06	1.76	2.84	3.36	3.13	15.48	9.27	17.50	-6.85
		216.91	22.44	1.76	4.21	4.38	4.39	3.88	4.10	7.84	0.23
		388.46	33.12	1.76	5.12	5.23	5.26	2.10	2.66	5.31	0.57
		469.91	37.99	1.76	5.41	5.51	5.54	1.81	2.35	4.63	0.54
320	445	63.00	10.06	2.01	2.84	3.11	3.17	8.68	10.41	19.98	1.93
		216.91	23.11	2.01	4.08	4.25	4.27	4.00	4.45	8.70	0.47
		388.46	33.89	2.01	4.99	5.10	5.14	2.16	2.92	5.93	0.78
		469.91	38.96	2.01	5.23	5.33	5.37	1.88	2.61	5.16	0.75

注: V_0 为按阻力平衡法式(3)修正的静水航速; V_{01} 为按阻力同比法式(5)修正的静水航速; C_{0s} 为 V_0 与对水航速 V_s 之间的偏差,即 $C_{0s} = (V_0 - V_s)/V_0$; C_{01} 为 V_{01} 与对水航速 V_s 之间的偏差,即 $C_{01} = (V_{01} - V_s)/V_{01}$; C_J 为坡降阻力占有有效推力的比例,即 $C_J = R_J/T$; C_0 为 V_0 与 V_{01} 之间的偏差,即 $C_0 = (V_0 - V_{01})/V_0$; 坡降修正系数 α 取 1.15.

根据静水航速修正结果,可得到如下认识:

(1) 静水航速与有效功率呈幂指数关系,符合一般规律(见图2).对于“华平号”,其额定载重为280 t,排水量为405 t,内插可得额定载重情况下静水航速与有效功率的关系为

$$V_0 = 1.145P^{0.254} \quad (6)$$

则主机额定功率510 kW时的 $V_0 = 5.58$ m/s,即20.1 km/h,较设计时速22 km/h稍小,这与该船运行了多年有关.

(2) 对比阻力平衡法和阻力同比法修正的静水航速,二者的差异非常微小(表2中的 C_0 ,除1个点偏大以外),说明采用这两种方法均可达到目的,而阻力同比法更为简便.

(3) 静水航速与对水航速的偏差取决于坡降阻力占船舶推力的比例大小,对比表2中的 C_{0s} , C_{0t} , C_f 便可看出.当坡降阻力占船舶推力的比例不大时,对水航速与静水航速的偏差约为坡降阻力占船舶推力比例的一半.也就是说,当坡降阻力占船舶推力的比例不超过10%时,用对水航速代替静水航速的误差不到5%.

3 结 语

(1) 在没有合适的静水水域供静水航速实船试验时,应选择适宜的动水水域.宜选择江面宽阔、水深富裕的河段以减小浅水、狭窄阻力;宜选择水流相对平缓且流速比降沿程变化不大的河段,以保证水流参数测试的稳定性;宜选择水流流向易与航线基本保持一致的河段,尽量减小横、斜流对试验精度的影响.

(2) 在动水域进行的航速试验,由于存在水面坡降,其船舶需要一部分推力去克服坡降阻力,对水航速代替静水航速偏小,应修正.本文依据静水域船舶推力全部用于克服水流阻力,而动水域需要同时克服坡降阻力和水流阻力的思路,提出了阻力平衡法和阻力同比法两种静水航速修正方法.阻力平衡法的思路是动水域坡降阻力和水流阻力之和与静水域的水流阻力平衡,阻力同比法的思路是仅为航速提供的推力与航速的平方成正比.

(3) 对水航速代替静水航速的偏差取决于坡降阻力所占船舶推力的比例,当水面坡降较小,坡降阻力占船舶推力的比例不超过10%时,用对水航速代替静水航速的误差不到5%.

参 考 文 献:

- [1] 邵世明, 赵连恩, 朱念昌. 船舶阻力[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (SHAO Shi-ming, ZHAO Lian-en, ZHU Nian-chang. Ship resistance[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1995. (in Chinese))
- [2] TANIGUCHI T. On a new method of correction for wind resistance relative to the analysis of speed trail results[C]//Proceedings of 11th ITTC, 1966.
- [3] THOMSON G R. BSRA standard method of speed trail analysis[R]. BSRA Report NS 466, 1978.
- [4] CB/T 3970-2005, 船舶航速和操纵性的DGPS测试方法[S]. (CB/T 3970-2005, Measurement methods for ship speed and maneuverability with DGPS[S]. (in Chinese))
- [5] 夏利清, 范余明. 实船测试航速修正方法评述[J]. 船舶工程, 2005, 27(6): 49-51. (XIA Li-qing, FAN She-ming. Comment on correction methods of ship speed trial results[J]. Ship Engineering, 2005, 27(6): 49-51. (in Chinese))
- [6] 丁举. 利用GPS测试船舶航速的算法研究[J]. 船舶工程, 2005, 27(5): 5-8. (DING Ju. Study of algorithm for ship speed measurement using GPS[J]. Ship Engineering, 2005, 27(5): 5-8. (in Chinese))
- [7] 顾溟宇, 王言英, 张佳宁. 实船航速试验方法及数据分析计算机自动化[J]. 中国造船, 2009, 50(3): 135-145. (GU Ming-yu, WANG Yan-ying, ZHANG Jia-ning. Method of speed trial and automatic data processing and analysis with computer for transport ship with full-scale[J]. Ship Building of China, 2009, 50(3): 135-145. (in Chinese))
- [8] 邓明文. 多桨船舶轴功率实时测量仪研制与使用[J]. 中国水运, 2009, 9(4): 39-40. (DENG Ming-wen. The development and use of real-time measuring instrument of shaft power for multiple screw ship[J]. China Water Transport, 2009, 9(4): 39-40. (in Chinese))

- [9] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004. (Yangtze River Waterway Bureau. Navigation project handbook[M]. Beijing: The People Communication Press, 2004. (in Chinese))
- [10] 童思陈,许光祥,邓明文. 澜沧江船舶航行阻力及通航水力指标研究[J]. 人民长江,2010,42(2):67-72. (TONG Si-chen, XU Guang-xiang, DENG Ming-wen. Calculation of sailing resistance and navigable hydraulic parameters for inland ships [J]. Yangtze River, 2010, 42(2): 67-72. (in Chinese))

Estimating methods for still-water navigation speed in flowing water

XU Guang-xiang, CHEN Xi

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to achieve the ship still-water navigation speed, some prototype tests have to be implemented in flowing waters due to certain restrictions. The ship navigation speed in flowing waters is different from that in still water because the propulsive force can't be completely transformed to be the driving force owing to the water gradient. Based on a series of vessel prototype tests for still-water navigation speed conducted in a flowing reach of the Lancang River, this paper presents two methods for correcting still-water navigation speed, the drag balance method and the resistance comparison method. Both methods lead to close results, and the drag balance method is simpler. Theoretical analyses and case studies indicate that whether navigation speed in flowing waters is able to replace still-water navigation speed may depend on the ratio of the resistance due to hydraulic gradient to ship's propulsion.

Key words: flowing water; prototype tests; navigation speed in flowing waters; still-water navigation speed; gradient resistance; drag balance method; resistance comparison method

科技部科研院所技术开发研究专项资金项目 “小型水库除险成套实用技术开发研究”通过验收

2012年4月11日,我院承担的科技部科研院所技术开发研究专项资金项目“小型水库除险成套实用技术开发研究”验收会在南京召开,戴济群副院长出席会议.由江苏省水利厅、水利部大坝安全管理中心、南京市水利局、南京大学、河海大学、江西省水利科学研究院等单位专家组成的验收专家组听取了项目组的工作汇报和成果介绍,审阅了有关技术资料,经认真讨论与质疑,认为项目提交的验收资料齐全,经费使用符合有关规定,研究内容丰富,完成了项目任务书的要求,技术开发研究成果简便、实用,具有广阔的工程推广应用价值,验收专家一致同意该项目成果通过验收,综合评价为A(优秀).

本项目取得的主要创新研究成果包括:提出了细粒土击实参数与土体流塑限关系曲线和经验公式,开发了坝体填土压实度现场快速检测设备和技木;开发了基于现场检测、检查和专家经验的小型水库大坝病险诊断专家系统;提出了小型水库除险排序决策技术;提出了小型水库溃坝参数的预测方法,并开发了相关软件;提出了以专家为评价主体的小型水库安全评价模式.

摘自南京水利科学研究院网站