

船舶转向过程中速度下降问题的研究*

大连海事大学 李宗波 张显库 贾云

内容提要:随着大型船舶的数量不断增长,船舶转向过程中的速降问题已引起人们的重视。戴维逊、Schoenherr 等学者绘制了速降系数曲线图或给出了速降估算公式,但只能用于估算定常回转阶段速度 V 与转向前速度 V_0 之比,对于船舶进入定常回转之前的过渡阶段的速度下降情况无法估算。本文把船舶的速降系数表征为船舶旋回性指数 K' 、船舶施加的舵角 δ 以及航向改变量 $\Delta\psi$ 的函数关系,实现了对转向全过程的速降估算。以超大型油轮 OPALIA 号为例进行了速降的预报,取得了理想的效果,预报误差最大为 14.6%,最小为 0.3%。这表明,用多元回归分析的方法实现对船舶整个转向过程中速降的预报具有一定的可行性。

关键词:船舶 速降系数 操纵性指数 回转试验 多元回归分析

中图分类号:U661.33 **文献标识码:**A

0 引言

1979 年美国数家主管海事交通的部门举办的 278 000DWT 巨型油轮 ESSO OSAKA 号的操纵性海试有一个重要目的,是系统参数辨识技术用于船舶运动模型化的研究。为此船上设置各种专用仪器和设备,并对海试数据进行了广泛深入的统计研究。其中有一项 35°舵角的旋回试验表明,在不改变主机转速、功率的情况下船舶前进航速由转向前的 12 kn 下降为定常旋回时的 3 kn,降幅达 75%,这一巨大速降所代表的非线性已不能用非线性数学模型里的 $X(u, v, r, \delta)$ 关于 Δu 的三阶项所描述^[1]。为此,整体型船舶运动数学模型的代表人物 Abkowitz 在 1980 年对他本人早年提出的非线性数学模型做了很大改进。

原则上讲,船舶回转速降需用非线性解析方法来确定,但由于非线性运动方程较为复杂,计算量较大,实践中通常采用近似方法来估算之^[2]。

1 戴维逊、Schoenherr 等学者的研究情况

通常以定常回转阶段船舶的航速 V 与回转开始时船舶直线航速 V_0 之比来表征回转速降特征,称 V/V_0 为回转速降系数。20 世纪 40 年代至 80 年代,欧美、前苏联及日本学者做了很多速降的研究,大致可分两类:

第一类是速降预报图表。戴维逊^[3]通过大量实船和船模实验结果绘出了表征回转速降系数与相对回转直径的关系的图表;志波^[4]把速降系数表示为相对回转直径和方形系数的函数,也绘制了类似的图表。费加耶夫斯基^[5]根据戴维逊的结果,给出了速降公式,但该式不方便计算,他又绘制了速降系数曲线。相对定常回转直径可以通过实船回转试验获得,也可以参考估算公式。赫夫加特给出船舶定常回转直径的估算公式

$$D_0 = \frac{2k_1 \nabla}{C_N A_R \cos \delta} \quad (1)$$

式中: ∇ 为船舶的排水体积; δ 为舵角; A_R 为舵面积; C_N 为舵的法向力系数,可采用乔赛尔公式估算:

$$C_N = \frac{0.311 \sin \delta}{0.195 + 0.305 \sin \delta} \quad (2)$$

k_1 为随排水体积 ∇ 、船长 L 和水线下纵中剖面面积 S 而变化的经验系数。桑海等人在式(1)基础上提出修正公式

$$D_0 = 2 \frac{k_1 \nabla}{k_2 A_R} \quad (3)$$

k_2 为随 δ 而变化的经验系数。

第二类是速降估算公式。Schoenherr 给出了方便简单的估算公式^[6]

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \frac{\delta}{K_S} \cdot \frac{A_R}{Ld} \quad (4)$$

式中:舵角 δ 以度为单位, $A_R/(Ld)$ 为舵面积比, K_S 为由船型确定的系数,可由 $C_b/(L/B)$ 为引数查表 1 得到。其中 C_b 为方形系数, L/B 为长宽比。

表 1 K_S 系数表

$C_b/(L/B)$	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
K_S	4.25	3.77	3.33	2.97	2.68	2.45	2.27	2.13	2.02	1.94	1.88	1.83

此外, Lyster、费尔索夫、泽姆辽诺夫斯基等学者也给出了不同的速降估算公式。

以上学者虽然是通过实船试验或船模试验得到的图表或估算公式,但存在一定的局限性。从戴维逊、志波先后绘制的“回转速降系数与相对回转直径的关系”曲线图来看,随着相对回转直径的增大,速降系数呈现出近似二次曲线形式的逐渐增加。对于不同类型的船舶来说,肥大型船舶(如大型油轮)较之于消瘦型船舶(如滚装船)拥有小的相对回转直径,因而速降系数较小,表现为回转过程速降较为明显,这一点可以通过曲线图得到解释。但是,对于同一艘船而言,有两种现象却无法解释:第一,船舶由半载到满载过程中,随着吃水的增加,旋回时进距加大,横距、旋回初径也将有所增加,相对回转直径变大,按照曲线图来看,满载时速降系数应该比半载时大,但实践中有相当一部分船舶,

满载时速降程度比半载时更为剧烈,即满载时的速降系数比半载时要小。第二,根据船舶操纵理论,对同一船舶空船时,吃水较浅舵面积比增大,但往往尾倾较大,尤其尾机型船;与此相反,满载时舵面积比减小,但尾倾常较小,总体而言,空船和满载时旋回圈大小相差不大^[7]。因此,从曲线图来推断可以得出速降系数近似不变的结论。但事实上,这两种载况下的速降系数相差很大,空船(或少量压载时)具有 K 小、 T 小的特点,即追随性好、旋回性差,旋回速降不明显;当船舶满载时 K 、 T 都会有所增加,旋回性变好、追随性变差,船舶转向过程中速降较为明显。另外,这些预报图表或公式只能用于估算定常回转阶段速度,并且假定了船舶定常回转阶段速度近似不变。根据文献[8]关于船舶回转过程的论述,船首转过 $100^\circ\sim 120^\circ$ 后船进入定常回转运动,而从笔者查阅的实船回转试验资料来看,船首转过 120° 以后,船舶仍然存在着速降现象,只是速降程度较之过渡阶段有所减缓。

2 关于速降系数的研究

以往人们习惯于用回转直径、最大横距、纵距等旋回圈要素来表征船舶的操纵性,但仅凭这些并不能确切地表达出全部的操纵性。例如,是否在施舵的同时立即开始转首;从施舵起到船舶转至预期航向所需的时间等人们希望能掌握的性能,与旋回直径的大小之间却毫无关系,而从纵距上也不能清楚的表达出来^[9]。对不同的船舶而言,旋回性好的回转过程速降明显;同一艘船不同载况下,吃水的变化影响了方形系数、舵面积比,从而影响了 K 指数,这可以解释由于船舶满载时比压载时的 K 指数更大,因而旋回速降更加显著。因此,用 K 指数来衡量速降情况比用相对定常回转直径更有优越性。为了便于不同船舶间的比较,取 K 指数的无量纲化形式 K' 。

速降系数除了与旋回性指数密切相关外,与舵角也存在相关性。不同大小的舵角形成不同的舵力,从而影响船舶回转性能,随着舵角的增加,船舶旋回的漂角明显增大,从而导致舵力并不是随着舵角增大而呈现出线性增加,因此,舵角对速降系数的影响可用无量纲化的舵的法向力系数 C_N 来衡量,并采用比较简单的乔赛尔公式即式(2)进行估算。

航向改变量 $\Delta\psi$ 对回转速降也有很大影响,当 $\Delta\psi$ 较小时速降近似不变,随着 $\Delta\psi$ 的增加,速度下降逐渐明显。

综上所述,对速降系数的影响因素可以取三个代表性的因素来衡量,分别为旋回性指数 K' ,舵的法向力系数 C_N 以及航向改变量 $\Delta\psi$ 。

在文献[10]中 43 艘船舶的基础上,笔者又在文献

[9]中搜集了 4 艘超大型船的 K 、 T 指数资料,如表 2 所示。利用 47 艘样本船的资料回归分析得到修订的 K' 、 T' 估算公式

$$K' = 1.715 + 0.964 \frac{L}{B} - 0.158 \frac{Ld}{A_R} - 1.702 C_b \frac{L}{B} + 0.262 C_b \frac{Ld}{A_R} \quad (5)$$

$$T' = 4.664 + 0.716 \frac{L}{B} - 14.491 C_b - 0.033 \frac{L}{B} \cdot \frac{Ld}{A_R} + 0.396 C_b \frac{Ld}{A_R} \quad (6)$$

修订后的 K' 、 T' 估算公式的拟合优度指标即复相关系数 R 略有增加,分别达到了 0.792 和 0.851。

表 2 船舶 K 、 T 指数统计资料

序号	船型	$\Delta(t)$	$L(m)$	$B(m)$	$d(m)$	$V(kn)$	C_b	Ld/A_R	K'	T'
44	超大型船	262 000	310	54	19	16	0.803 65	60	2.6	4.97
45	超大型船	161 900	265	44.2	16.5	16.5	0.817 28	65	2.47	7.4
46	超大型船	126 100	251	40.8	14.6	15	0.822 81	66.7	3.25	7.53
47	超大型船	250 300	313	48.2	19.3	16	0.838 66	66.7	3.8	10.39

由于各种原因,详细记录船舶在不同舵角时旋回过程速度下降等数据的回转试验资料并不多见,大部分船舶的回转试验只记录了旋回圈要素而缺乏详细的速度资料。笔者搜集了有详细速度记录的 6 艘万吨级以上船舶的全速回转试验资料,船的类型有油船、散货船、多用途船、汽车船等,载况包括满载、半载和压载的情况,方型系数 C_b 介于 0.535~0.830,舵面积比 $A_R/(Ld)$ 介于 1/71.2~1/38.4。

采用文献[10]的办法,构建一个三元二阶多项式回归模型,通过统计软件 SPSS,利用逐步回归法得到速降系数估算公式

$$\frac{V}{V_0} = -8.697 + 6.361 K' + 7.960 C_N - 5.295 K' \cdot C_N - 0.226 C_N \cdot \left(\frac{\Delta\psi}{57.3} + 0.067 (K')^2 + 0.028 \left(\frac{\Delta\psi}{57.3} \right)^2 \right) \quad (7)$$

式中: $\Delta\psi$ 以度($^\circ$)为单位。

3 对 OPALIA 轮旋回速降的预报以及与国外研究成果的对比

以 30 万吨级的超大型油轮 OPALIA 轮为例,进行了压载状态下全速满舵($\delta=35^\circ$)旋回的速降预报。该轮主尺度为:两柱间长 $L=320$ m,船宽 $B=60$ m,试验时,平均吃水 $d=10.660$ m,方形系数 $C_b=0.7434$,舵面积比 $A_R/(Ld)=1/35.04$ 。经式(5)计算得到 $K'=1.3966$; 35° 舵角时由式(2)计算得舵的法向力系数 $C_N=1.2574$ 。以线性内插的办法查表 1 得系数 $K_s=1.8836$,代入式(4)得到 Schoenherr 公式的速降估算结果为 $V/V_0=0.4697$ 。由赫夫加特-桑海估算公式即式(3),并结合文献[1]查取相关的系数后得到定常回转直径 $D_0=1244$ m,由戴维逊曲线查得 $V/V_0 \approx 0.7$,由费加耶夫斯基曲线得 $V/V_0 \approx 0.75$ 。

表 3 列出了速降系数预报值与实船试验观测值的

表3 OPALIA 轮全速满舵旋回时速降系数预报值与试验观测值的对比

航向改变量 $\Delta\psi(^{\circ})$	压载	回转中的速度 $V(\text{kn})$	回转前的速度 $V_0(\text{kn})$	V/V_0 观测值	V/V_0 预报值	本文模型预报误差	Schoenherr 公式估算误差	戴维逊曲线估算误差
5	左旋	16.2	16.4	0.988	1.003	0.016		
15	左旋	15.8	16.4	0.963	0.955	-0.008		
30	左旋	14.5	16.4	0.884	0.887	0.003		
60	左旋	11.8	16.4	0.720	0.761	0.058		
90	左旋	9.8	16.4	0.598	0.651	0.089		
120	左旋	8.3	16.4	0.506	0.556	0.098	-0.049	0.417
150	左旋	7	16.4	0.427	0.476	0.115	0.111	0.656
180	左旋	6	16.4	0.366	0.412	0.125	0.253	0.867
210	左旋	5.4	16.4	0.329	0.363	0.101	0.384	1.063
240	左旋	5.1	16.4	0.311	0.329	0.058	0.489	1.219
270	左旋	4.9	16.4	0.299	0.311	0.039	0.547	1.306
300	左旋	4.8	16.4	0.293	0.308	0.051	0.578	1.352
330	左旋	4.9	16.4	0.299	0.320	0.071	0.578	1.352
360	左旋	5	16.4	0.305	0.348	0.141	0.547	1.306
5	右旋	16.6	16.8	0.988	1.003	0.015		
15	右旋	16.1	16.8	0.958	0.955	-0.003		
30	右旋	14.7	16.8	0.875	0.887	0.013		
60	右旋	12	16.8	0.714	0.761	0.065		
90	右旋	9.8	16.8	0.583	0.651	0.115		
120	右旋	8.3	16.8	0.494	0.556	0.125	-0.072	0.383
150	右旋	7.1	16.8	0.423	0.476	0.126	0.100	0.640
180	右旋	6.3	16.8	0.375	0.412	0.097	0.284	0.913
210	右旋	5.7	16.8	0.339	0.363	0.068	0.426	1.126
240	右旋	5.3	16.8	0.315	0.329	0.042	0.510	1.251
270	右旋	5.1	16.8	0.304	0.311	0.023	0.572	1.343
300	右旋	5	16.8	0.298	0.308	0.034	0.605	1.392
330	右旋	5	16.8	0.298	0.320	0.075	0.572	1.343
360	右旋	5.1	16.8	0.304	0.348	0.146	0.541	1.296

对比情况。由于以上所述的预报图或估算公式只能估算定常回转阶段的速度,根据文献[8]对船舶回转过程的描述,只列出了航向改变量 120° 以后的误差情况。通过表3可知,本文速降模型对整个回转过程中速度的预报误差:压载左旋时,最小为 0.3%,最大为 14.1%,压载右旋时最小为 0.3%,最大为 14.6%;Schoenherr 公式对定常回转阶段速度估算结果:左旋时误差最小为 4.9%,最大为 57.8%,右旋时误差最小为 7.2%,最大为 60.5%;戴维逊曲线图估算误差:左旋最小为 41.7%,最大为 135.2%,右旋时最小为 38.3%,最大为 139.2%。显然,就此例而言,本文速降模型的预报效果比 Schoenherr 公式、戴维逊曲线图和费加耶夫斯基曲线图更加理想。

4 结论

本文从船舶操纵性指数 K, T 入手,用多项式回归的办法对 47 艘船舶的 K, T 指数统计资料进行分析,

得出了具有一定精度的 K, T 指数估算公式。然后,以此为基础对多艘船的回转试验速降资料进行回归分析,把船舶的速降系数表征为船舶旋回性指数 K' 、船舶施加的舵角 δ 以及航向改变量 $\Delta\psi$ 的函数关系。

由于样本数量比较有限,还不能涵盖船型系数的变化范围,为简便考虑,本文的船舶回转速降模型并未考虑船舶的追随性指数 T' 。一般来说,样本数量保证在自变量个数的 5~10 倍或以上(以本文速降模型为例,所选用的三元二阶多项式含有 9 个未知参数,即要求样本数达到 45~90 个),并且模型适当,会取得理想的效果。

综上所述,在有限的船舶回转试验资料的情况下,本文的速降模型实现了船舶回转全过程的速降预报。这表明,采用多元非线性回归的方法实现对船舶整个转向过

程中速降情况的预报具有一定的可行性。

* 作者:李宗波. 大连海事大学 硕士生 lzba2008@sina.com

张显库. 大连海事大学 教授 博导 zhangxk@dlmu.edu.cn

参考文献

- 1 贾欣乐,杨盐生.船舶运动数学模型-机理建模与辨识建模[M].大连海事大学出版社,1999.
- 2 吴秀恒.船舶操纵性与耐波性[M].北京:人民交通出版社,1999.
- 3 Davidson K.S.M. On the turning and steering of ship[J].Trans. os SNAME, 1944.
- 4 Shiba H. Model experiments about the maneuverability and turning of ships[J].DTMB Report 1461,1960.
- 5 鲁谦,李连有,李来成.船舶原理手册[M].北京:国防工业出版社,1988.
- 6 古文贤.船舶操纵[M].大连:大连海运学院出版社,1993.
- 7 陆志材.船舶操纵[M].大连海事大学出版社,1999.
- 8 徐文耀.航海手册[M].北京:人民交通出版社,1998.
- 9 VLCC 研究会.超大型船操纵要点[M].周沂译.人民交通出版社,1982.
- 10 李宗波,张显库,张杨.基于 SPSS 技术的船舶操纵性指数 K, T 预报[J].航海技术,2007,29(5).