

王逢辰 古文贤 郑经略 编

船舶操纵与避碰

上册

人民交通出版社

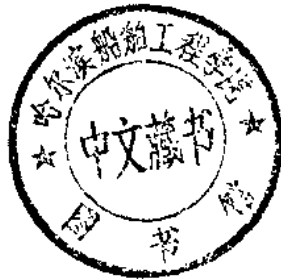
18

船舶操纵与避碰

Chuanbo Caozong Yu Bipeng

上册

王逢辰 古文贤 郑经略 编



人民交通出版社

1

(京)新登字091号

内 容 提 要

船舶操纵与避碰，分为上、下两册。

上册为船舶操纵部分，共分五章。第一章为船舶操纵基础，讲述船舶的操纵性能和车、舵、锚、缆及拖轮对操船的影响。第二章为外界因素对操船的影响，即风、流和受限水域对操船的影响。第三章为系泊操纵，讲述锚泊、掉头、靠离码头、系离浮筒的基本方法。第四章为特殊情况下的船舶操纵，讲述大风浪、受限水域和冰区的操船理论与实践。第五章为海难时的应急操纵，介绍船舶碰撞、搁浅、触礁、拖带和海难救助的处置方法，并从理论上作了分析。

本书可供船舶驾驶、管理人员学习、参考，也可作为海运大专院校船舶驾驶专业的教科书。

DW35/29

船舶操纵与避碰 (上)

王逢辰 古文贤 郑经略 编

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京密云卫新印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：10.6 字数：259千

1992年8月第1版

1992年8月第1版第1次印刷

印数：0001—2000册 定价：9.30元

ISBN 7-114-01448-0

U·01006

前 言

本书是由大连海运学院、上海海运学院、集美航海专科学校和青岛远洋船员学院共同编写的，分上、下册出版。上册为船舶操纵，下册为避碰。

本书由王逢辰主编，胡玉琦主审，古文贤负责编写第一章（船舶操纵基础）、第二章（外界因素的影响）和第三章（系泊操纵），王逢辰负责编写第四章（特殊情况下的船舶操纵），郑经略负责编写第五章（海难时的应急操船）。

我们在编写过程中虽力求概念清楚，理论正确，文字通顺；但由于水平有限，不足和错误之处在所难免，请读者批评指正。

目 录

第一章 船舶操纵基础	(1)
第一节 船速与冲程	(1)
第二节 船舶操纵运动方程	(9)
第三节 航向稳定性与旋回性	(10)
第四节 锚的运用	(27)
第五节 缆的运用	(33)
第六节 拖轮的运用	(36)
第二章 外界因素的影响	(45)
第一节 风和流的影响	(45)
第二节 受限水域的影响	(56)
第三章 系泊操纵	(70)
第一节 锚泊操纵	(70)
第二节 港内掉头	(77)
第三节 靠离码头	(79)
第四节 系离浮筒	(90)
第五节 其他情况下系离泊	(96)
第六节 超大型船舶的系泊特点	(100)
第四章 特殊情况下的船舶操纵	(112)
第一节 大风浪中的船舶操纵	(112)
第二节 受限水域中的操船	(124)
第三节 冰区船舶操纵	(129)
第五章 海难时的应急操船	(134)
第一节 碰撞后的处置	(134)
第二节 搁浅和触礁后的处置	(138)
第三节 海上拖带	(144)
第四节 海上搜寻与救助	(148)
第五节 人员落水救助	(160)

第一章 船舶操纵基础

船舶在营运过程中,在一定外界条件如风、流、浅水等影响下,通过某些操纵手段如推进器、舵、锚、缆、拖轮等,以保持或改变船舶运动状态为目的而进行的必要观察、判断、指挥、实施等,总称为船舶操纵(shiphandling ship manoeuvring)。

船舶对驾驶人员操纵的响应能力,总称为该船的船舶操纵性(manoeuvrability)。船舶操纵性是新近发展起来的一门年轻学科,其体系及内容尚不很完善。

一艘操纵性良好的船舶,应兼具方便稳定地保持运动状态和迅速准确地改变运动状态这两方面的性能。

船舶驾驶人员必须较好地掌握船舶操纵知识,了解本船操纵性能以及各种外界条件对本船操纵性能的影响,才能正确操纵船舶,准确地控制船舶的运动。同时,不断总结自己经验,进一步验证并完善船舶操纵和船舶操纵性的理论内容。

第一节 船速与冲程

一、船速与阻力、推力的关系

船舶以一定航速驶于水面,必须克服船舶本身所受到的各种阻力。船舶依靠主机发出动力,驱动推进器产生推力,当推力与阻力平衡时,船舶将定速航行,否则,将作变速运动。

1. 阻力(resistance)

船舶航行时受到的阻力 R ,包括基本阻力 R_0 与附加阻力 ΔR 两个部分。即

$$R = R_0 + \Delta R \quad (1-1)$$

对于给定的船舶,基本阻力的大小与吃水、航速有关。设计新船时,可通过计算或模型实验换算出满载或其他状态不同航速时的基本阻力。表1-1为某轮在吃水8.2及9.2m时的基本阻力值(kN)。附加阻力的大小则随风浪大小、船体污底轻重以及航道浅窄情况而定。

表1-1

吃水(m)	航速(kn)				
	0	4	8	12	16
8.2	0	56.88	122.58	215.75	387.38
9.2	0	63.74	137.29	245.17	426.58

注:上述基本阻力中包括三级风以下的空气阻力。

根据表1-1数据也可绘成图1-1中所示的阻力曲线。从中不难看出：吃水越深，阻力越大；在航速较低时，基本阻力变化近似于线性变化，而航速较高时，基本阻力变化率明显地加快。

2. 推力与功率

船舶常用的推进器是螺旋桨(screw propeller)。在船舶主机驱动下，转动的螺旋桨推水向后，水对螺旋桨的反作用力在船首方向的分量就是推船前进的推力(thrust)；倒车时，则产生指向船尾的拉力。流向螺旋桨一面的流称为吸入流(suction current)，离开螺旋桨一面的流称为排出流(discharge current)。吸入流的特点是流速较慢，范围较大，流线几乎相互平行。排出流的特点是流速较快，范围较小，水流旋转激烈，如图1-2所示。

对于给定的螺旋桨，它所产生推力 T 的大小与其转速 n 、航速 v ，以及螺旋桨轴在水下沉深的大小有关，表1-2为前述某轮螺旋桨的正车推力。

表1-2

转速(r/min)	航速(kn)				
	0	4	8	12	16
80	612.91	554.08	441.30	304.01	147.10
100	951.25	862.99	735.45	573.69	392.27

注：倒车拉力由于螺旋桨和主机结构方面的原因，一般只有正车推力的60~70%，大型船舶就更小，只有30~40%。

同样，根据表1-2也可绘出图1-1中所示的推力曲线。

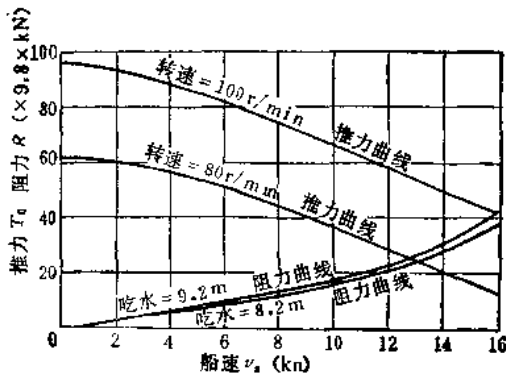


图 1-1

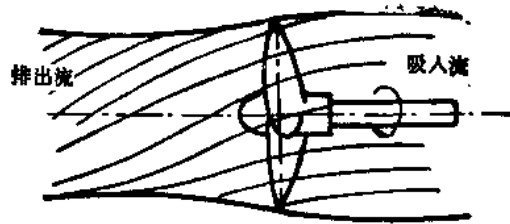


图 1-2

不难看出，当船速相同时，转速越高推力越大；当转速相同时，随着船速的提高，推力却下降；当船速为零时，(相当于系泊或靠离码头的情况)推力为最大。

值得注意的是，操纵船舶时，在具有前进或后退的船速条件下，螺旋桨使用正车或倒车，其工作状况会出现很大变化。图1-3为某轮在各种工况时螺旋桨的综合推(拉)力特性曲线；驾驶人员彻底搞清所在船舶的螺旋桨在各种工况时推、拉力变化规律，做到心中有数，在船舶操纵中是非常必要的。

另外,从功率传递情况来看,主机(main engine)所发出的功率除了驱动螺旋桨、产生推力,为船舶作前进运动提供有效功率EHP(effective horse power)之外,还必须提供驱动螺旋桨产生相应转矩所需要的功率以及克服主机和传动轴系摩擦所需要的功率。

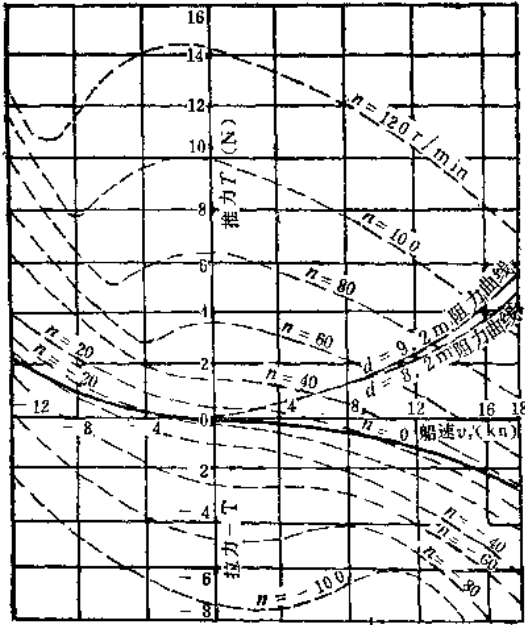


图1-3 综合推力特性曲线

主机发出的功率称为机器功率MHP (machinary horse power), 柴油机为制动功率BHP; 汽轮机为轴功率SHP; 蒸汽机为指示功率IHP。主机传至尾轴套筒后面的功率, 称为(螺旋桨)收到功率DHP, 它与机器功率之比称为传送效率 η_c , 即

$$\eta_c = DHP / MHP \quad (1-2)$$

该值通常为0.95~0.98。有效功率与收到功率之比为推进器效率 η_p , 即

$$\eta_p = EHP / DHP \quad (1-3)$$

其值约为0.60~0.75。而有效功率与机器功率之比称为推进系数 C_r (propulsion coefficient), 即

$$C_r = EHP / MHP \quad (1-4)$$

螺旋桨的推进系数约为0.5~0.7。这就是说, 主机发出功率变为船舶推进功率后损失将近一半。

3. 滑失(slip)

推进器相对于水的实际速度 v_p 与理论上应能前进的速度之差称为滑失(船舶制造中称为滑脱), 滑失与理论上应能前进的速度之比称为滑失比, 用 S_p 来代表可写成

$$S_p = \frac{np - v_p}{np} \quad (1-5)$$

式中: n ——推进器转速;

p ——推进器螺距;

v_p ——推进器对水的前进速度。

如用船速 v_s 代替 v_p 时, 则分别称为虚滑失和虚滑失比。根据滑失定义可知, 船体污损越重, 海面状况越坏, 同样转速下船速越低, 滑失则越大; 发出的推力, 乃至主机所受负载也就越大。在操纵中可借助提高滑失以增加舵效。

二、船速分类

在一定范围内, 对于给定船舶而言, 船速是随着螺旋桨转速的提高而增加的。但若从保护主机不使其超负荷运行、方便操纵和保证安全上来说, 就不能不对船速(或转速)作出相应的规定。

1. 额定船速

根据国家标准验收后的主机, 可供海上长期使用的最大功率即为该主机的额定功率 N_R , 额定功率下的转速称为额定转速 n_R , 在该条件下, 主机发出的转矩称为额定转矩。 N_R 及 n_R 值均记于主机的铭牌上。

在可以忽略水深影响的深水中, 在额定功率与额定转速条件下, 船舶所能达到的静水中航速, 即为该船的额定船速。额定船速在新船试航时, 可以通过测速测得。但随着投入营运时间之延长, 由于主机的磨损以及船体的老旧, 特别是在修船之后, 额定船速就会降低。额定船速是船舶在深水中可供使用的最高航速。

2. 海上船速(sea speed)

海上由于气候多变, 为确保长期安全航行, 需留有适当的主机功率储备, 因而主机的海上常用功率较其额定功率为低, 通常为额定功率的90%; 相应的海上常用转速 n_0 则为额定转速的96~97%。深水航行, 主机以海上常用功率和海上常用转速运行时, 所得到的静水船速, 即为海上船速。

3. 港内船速(harbor speed)

港内船舶密集, 水深较浅, 弯道较多, 用舵频繁。为保护主机和便于操纵与避让, 港内航行最高船速应较海上为低, 该船速通常由船长同轮机长商定, 共同遵守执行。一般港内最高转速定为海上常用转速的70~80%。

港内船速与海上船速一样, 除按主机发出功率的比例划分为“前进三”、“前进二”、“前进一”之外, 尚有“微速前进”一档, 微速前进时的功率与转速, 是主机能发出的最低功率、最低转速。

如同前进一样, 倒车也分为“后退三”、“后退二”、“后退一”三级, 但多无微速后退。通常港内“后退三”时的转速约为海上常用转速的60~70%。

应当指出, 在港内, 甚至在某些内海航区, 为保证航行安全, 根据经验与统计, 特别规定有最高限速。对于一些高速船而言, 如本船所用港内船速高于该限速时, 应遵照各港内或航区的有关规定执行。

三、测速(speed trial)

在水深足够的水域, 当风、流、浪的影响很小时, 根据一定的装载状况(包括平均吃水和吃水差), 保持一定的螺旋桨转速, 并经过一段逐渐稳定的过程, 可使船获得一个稳定的船速。驾驶人员应对本船在不同载况下主机转速与船速之间的关系了如指掌, 以便据此处理一些候潮、过滩、到港时间的计算或者判断是否符合特定水域限速规定等问题。为此应通过实测列出对比表格或画出曲线, 以备查考。

测速应在专用测速水域进行。某些港口设有测速立标以供使用, 如大连港小平岛测速标, 上海港小九段测速标等。国外港口可查阅航路指南。

通常需测定在满载、合理压载等常用的吃水差条件下的前进一、前进二、前进三转速时相应的船速。

测速时, 沿与测速标方位相垂直的航向, 以欲测的稳定转速航行。在进入第一组测速标方位线之前船舶必须具备稳定的船速。而后记录进入各对测标串视的时间, 按各对测标间的距离(一般为1~2n mile)换算得速度。在无风流影响时, 测两次(一个往返)求其平均值

即可；有流水影响时，如属均匀流速时要测三次，流速不均匀时则测四次，以减少其误差。根据实地情况，用不同方法观测后，分别用下列公式求出。

1. 求单次观测的速度值 v_1 (kn)

$$v_1 = \frac{S_1 \times 3600}{t_1}$$

式中： S_1 —— 两对测标间距 (n mile)；

t_1 —— 经过两对测标方位线所用的时间 (s)。

2. 求二次或二次以上观测后的平均速度 v_s

(1) 测二次

$$v_s = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

(2) 测三次

$$v_s = \frac{v_1 + 2v_2 + v_3}{4}$$

(3) 测四次

$$v_s = \frac{v_1 + 3v_2 + 3v_3 + v_4}{8}$$

式中， v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 分别为各单次观测按次序算出的速度。

四、加减速与冲程

船舶在机动操纵中，变向与变速或兼而有之的情况是经常出现的。船舶变速航行时，从启动、加速到减速、停车、甚而倒车，都要根据本船主机功率、每排水吨平均主机功率数以及换车性能，综合地加以考虑。

随着船舶逐渐大型化，每排水吨位所分摊到的功率数也越来越小，任何种类的变速措施采取之后，达到新的稳定船速所需的时间与距离也相应延长，确实存在着船越大，变速的自力控制越加困难的倾向。因而在港内、甚至港内锚地，不得不更多地借助一艘乃至数艘拖轮协助才行。

1. 启动

船舶由静止状态开进车，转速需视船速的逐步提高而逐渐增加，因而存在着一个逐步加速的过程。一味求快，甚至立即把转速增加很多，则会使主机转矩突然增大，甚至超过额定转矩，使主机超负荷工作，对此应尽力防止。

根据理论推导，船速达到定常速度 v_0 时所需时间

$$t_0 \approx 0.004 \frac{\Delta \cdot v_0}{R_0} \quad (1-6)$$

主机进车后，达到定常速度 v_0 时的航进距离

$$S_0 \approx 0.101 \frac{\Delta \cdot v_0^2}{R_0} \quad (1-7)$$

式中： t_0 —— 时间 (min)；

S_0 —— 距离 (m)；

Δ —— 排水量 (t)；

v_0 ——速度(kn);

R_0 ——阻力(9.8kN)。

另外,根据经验,从静止状态起动主机前进直至达到常速,满载船的航进距离约为船长的20倍左右,轻载时约为满载时的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 。

2. 减速

高速航进中的船舶,如果需要减速,从保护主机出发,一般情况下,仍然应当采用逐级减速的办法,对主机更为有益。

一般来说,从速度 v_0 减速至 v_1 时,各瞬时的速度变化与速度差 $(v_0 - v_1)$ 成指数函数关系;减速后,经过时间 t ,船舶冲进距离可近似为:

$$S = v_1 t + \frac{C(v_0 - v_1)}{0.693} (1 - 2^{-t/C}) / 60 \quad (1-8)$$

式中各量所用单位与1-7式完全相同, C 为减速常数,单位为min。 C 值随船舶排水量的不同而不同,可由表1-3中查出。

减速常数表

表1-3

排水量(t)	C(min)	排水量(t)	C(min)	排水量(t)	C(min)
1 000	1	~36 000	8	~120 000	15
~3 000	2	~45 000	9	~136 000	16
~6 000	3	~55 000	10	~152 000	17
~10 000	4	~66 000	11	~171 000	18
~15 000	5	~78 000	12	~190 000	19
~21 000	6	~91 000	13	~210 000	20
~28 000	7	~105 000	14		

3. 停车

高速运动中的船舶,突然发令停车时,主机的转速下降直到主机完全停住要有一个过程。除特殊情况外,一般情况下,仍以逐级减速至停车,对主机维护较为有利。

图1-4表示停车后船速的降低和冲程的变化情况。当主机刚刚停下时,由于船速较高,



图 1-4

所受阻力也大,因此速度下降率也很高;而后当速度变低时,阻力也将更大幅度降低,所以,速度下降率逐渐变缓,甚至一时很难停止下来。而停车冲程(stopping distance),实际上就是船速由 v_0 至零的区间内,对时间的积分 S_0 。从图中可以看出,冲程在开始阶段增加很快,而后急剧变慢,最后将以极慢的速度向值趋近。该值的极限,即为最后的停车冲程。在实际操纵中,能保持舵效的最低船速约为2kn,所以特取余速降至2kn时的航进距离 S_2 和所需时间 t_2 来代表之。

停车后达到速度 v 时所需时间,可由下式计算:

$$t = 0.00105 \frac{\Delta v_0^2}{R_0} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) \quad (1-9)$$

速度为 v 时在停车后船冲进的距离

$$S=0.075\frac{\Delta v_0^{\frac{1}{2}}}{R_0}\log\left(\frac{v_0}{v}\right) \quad (1-10)$$

4. 倒车

紧急停船时，单靠停车措施很难在短时间内停住，因而需要使用倒车。前进中的船舶由进车改为倒车，通称主机换向。由低速进车变为低速倒车，虽然中间也经过停车，但一般说来还可较快地完成。而在高速航进中，由前进三或前进二突然改为倒车，甚至高速倒车的话，尽管情况至为紧急，但对于主机却是办不到的。为不致造成主机转动部分出现过大力或损伤，在关闭油门后，通常要等船速降至全速的60~70%、转速降至额定转速的25~35%时，将压缩空气通入气缸，迫使主机停转后，再进行倒车启动。启动后倒车转速的加快，也应逐步增大；突然增加到高速，对主机也有损害。驾驶人员应当了解所在船舶的主机换向性能，以便合理地使用主机。从前进三到后退三所需时间的长短随主机不同而不同。一般情况下，内燃机船约需90~120s；汽轮机船约需120~180s；而蒸汽机船约需60~90s。

倒车冲程亦称最短停船距离(crash stopping distance)，这是为紧急避开他船和前方碍航物时操船的一个估算标准，驾驶员均需牢记本船的这一技术数据，以策安全。倒车冲程和所用时间可用下式估算(Lovett估算式)：

$$t_s=0.00089\frac{\Delta v_0}{R_0} \quad (1-11)$$

$$S_s=0.0121\frac{\Delta v_0^{\frac{1}{2}}}{R_0} \quad (1-12)$$

式中： t_s ——所需时间(min)；

S_s ——冲程(m)；

Δ ——排水量(t)；

v_0 ——倒车前的船速(kn)；

R_0 —— v_0 时的阻力(t)。

根据统计，一般货船的倒车冲程可达8~8倍船长，载重量5万吨左右的船舶达8~10倍船长，10万吨的船可达10~13倍船长，15~20万吨左右的船可达13~16倍船长。

五、冲程测定

船舶的冲程数据应实际测定。测定时应选无风、流影响，水深不低于 $3\sqrt{Bd}$ (B 为船宽， d 为吃水)条件下进行。应分别测定出空载和满载时，主机转速为前进一、二、三时使用停车和倒车后的冲程以及所用时间。

测定方法，通常采用掷木块法。

船以稳定的航向、转速作直线航进，两观测组分别立于船首及船尾固定处。当驾驶台发令停车(或倒车)时，船首观测组即掷出(沿垂直于首尾线方向)第一号木块，并启动秒表；随船前行，该第一块木块通过船尾观测组时，立即发信号通知船首观测组，抛出第二号木块，循环往复，直至船完全停止前进为止，按停秒表。秒表所记录的时间即为船航经该冲程所需时间，冲程测定值可由下式得出：

$$D_s = nL - l_2$$

式中： D_s ——冲程(m)；

n ——掷下木块总数；

L ——首、尾两观测组间的距离(m)；

l_2 ——最后木块停船时距尾观测组的距离。

测试情况如图1-5所示。

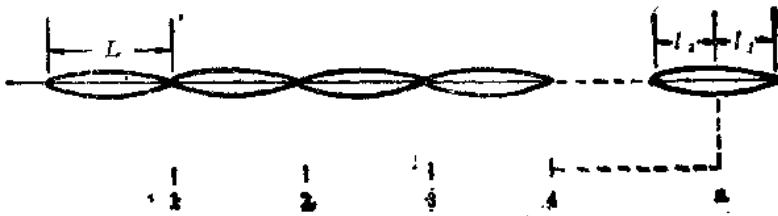


图 1-5

应当注意的是，当测定倒车冲程时，所测冲程虽确系船舶在下令倒车后航经的距离，但由于种种原因，却并非船舶沿原航向直进的距离，因而测定值较沿原航向直进距离为大。如图1-6所示。

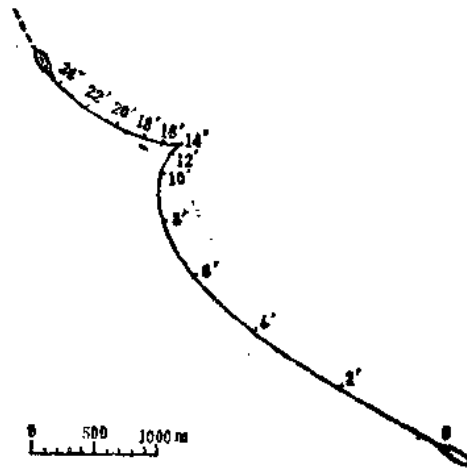


图 1-6

六、影响冲程的因素

从实际测定以及推算公式两个方面对比，并根据航行经验不难判断，冲程和以下因素有关：

1. 排水量越大，冲程越大。
2. 排水量一定，船速越大，冲程更大。
3. 主机倒车功率越小，换向时间越长，冲程越大。
4. 浅水中冲程将减小。
5. 船体污底严重，冲程减小。
6. 顺风流时冲程增大，反之则减小。

目前，主要还是从定性上说明而已，要从定量上准确给出其规律，尚待今后不断努力，并在实践中注意积累经验。

第二节 船舶操纵运动方程

船舶操纵中，船舶的运动，除了风浪中操纵以及潜水艇上浮下潜等特殊情况下，可以认为是船舶在水平面内的受控运动。

如图1-7所示，当用舵来进行保向或旋回操纵时，若所取坐标为通过船体重心 G ，并设 Gx 为船首方向， Gy 为右舷正横方向， Gz 为指向地心方向，那么正浮时船舶在水平面内的运动可以看成是由沿 x 、 y 轴的平移运动和绕 z 轴的转头运动所组成的复合运动，其运动方程可表示为

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X \\ m(\dot{v} + ur) = Y \\ I_{Gz} \dot{r} = N \end{cases} \quad (1-13)$$

式中： m ——船的质量；

u —— x 轴方向的速度分量；

v —— y 轴方向的速度分量；

r ——转头角速度(绕 z 轴的角速度，某些书中也用 $\dot{\phi}$ 表示，意义相同)； \dot{r} 为转头角加速度；

I_{Gz} ——绕 z 轴的转动惯量；

X ——作用于全船(包括舵)的流体动力沿 x 轴方向的分量；

Y ——作用于全船(包括舵)的流体动力沿 y 轴方向的分量；

N ——作用于全船(包括舵)的绕 z 轴的流体动力合力矩。

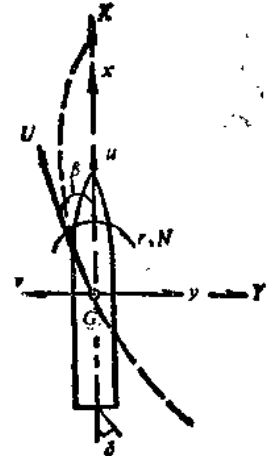


图 1-7

对于一般左右两舷形状对称，船舶重心在船中纵剖面内(正浮)，坐标原点并未取在重心处的情况，运动方程则应为

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \\ I_{Gz} \dot{r} + m x_G (\dot{\phi} + ur) = N \end{cases} \quad (1-14)$$

此外，当重心偏离船中纵剖面时，或者考虑到水面船舶的受控运动总是具备六个自由度的空间运动时，则根据空间运动原理，船舶运动方程将呈现更为复杂的形式。但不管哪一种形式，它们都称为船舶运动方程，而式(1-13)、(1-14)则称为船舶在水平面内的运动方程。作为描绘船舶运动的一种数学模型，它们均在一定条件范围内给出了船舶运动时各物理量之间的数量关系，具有其相应的表征精度，即近似程度。

从运动方程式(1-13)中可知，作用于船舶流体动力和流体动力力矩 X 、 Y 、 N 各项，因与旋回轨迹的曲率、所用舵角(rudder angle)、漂角(drift angle)密切相关，因而分别又是船舶的速度和加速度，转头角速度和转头角加速度，操舵舵角和操舵速度的函数。

如果用这样的函数表示式(1-13)中的 X 、 Y 、 N 各项，并考虑到船舶首尾方向的速度变化与其他运动的复合作用较弱，因而在式(1-13)中排除第一式，将第二第三式联立，按台劳公式进行展开，且只取其一次项，即线性化后，消去量纲，则可得到船舶操纵运动式

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = k\delta + K T_2 \dot{\delta} \quad (1-15)$$

式中： T_1 、 T_2 、 T_3 ——表示船舶追随性的操纵性指数；
 K ——表示船舶旋回性的操纵性指数；
 r ——旋回角速度；
 \dot{r} ——旋回角加速度；
 \ddot{r} ——旋回角加速度变化率；
 δ ——所用舵角；
 $\dot{\delta}$ ——转舵角速度。

式(1-15)说明，船舶的操纵运动取决于和舵角相适应的操纵性指数。根据解析分析与实验， T_1 、 T_2 、 T_3 并不同等重要， T_2 、 T_3 是可以包含在 T_1 中的，因而该式可简化为

$$T\dot{r} + r = K\delta \quad (1-16)$$

式中， $T = T_1 + T_2 - T_3$ ， T 是一个综合表示船舶追随性的指数。该式即野本谦作做出的一阶近似操纵运动方程。

第三节 航向稳定性与旋回性

在野本谦作的一阶操纵运动方程中。

$$T\dot{r} + r = K\delta$$

已经指出过船舶操纵性指数的概念，进一步分析该方程的解，对于我们深入理解和掌握航向稳定性以及旋回性能，有重要意义。

一、船舶操纵性指数 (manoeuvrability coefficient, manoeuvring indices)

船舶直航中用舵，并设初始条件 $t=0$ 时，转头角速度 $r=0$ ，解操纵运动一阶近似方程，可求出操舵后转头角速度 r 为

$$r = K\delta(1 - e^{-t/T}) \quad (1-17)$$

r 随时间变化情况如图 1-8 所示。由图中 r 曲线变化可知，当 $T > 0$ 时， $e^{-t/T}$ 将随时间的延长而衰减下去，转头角速度将渐渐稳定于定值 $K\delta$ 。而当 $t=T$ 时，转头角速度

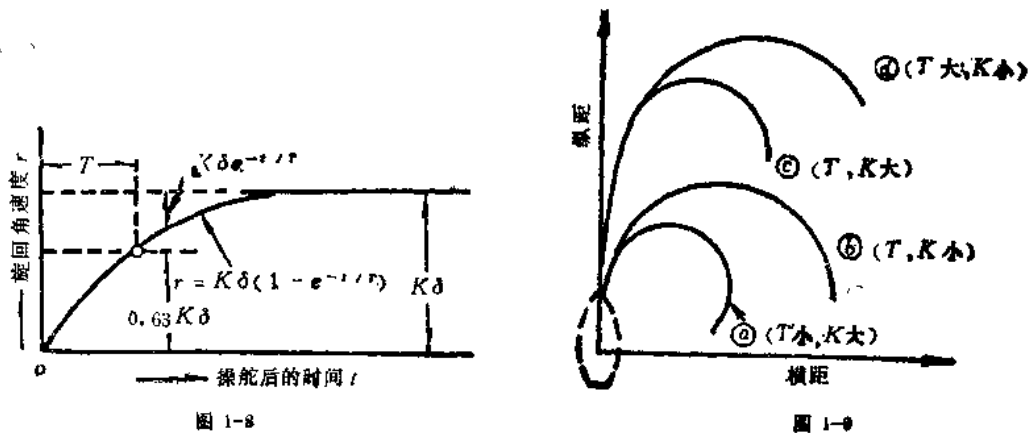


图 1-8

图 1-9

$$r = K\delta(1 - e^{-1}) = 0.63K\delta$$

那么，反过来又可以说，用舵后的船舶转头角速度达到 $0.63K\delta$ 值所需的时间，在数值上就等于 T 。式(1-17)说明， T 、 K 值之大小将决定船舶用舵后旋回角速度的大小，因而，把 T 、 K 就称作船舶操纵性指数。

1. 操纵性指数的意义

由式(1-17)知道， T 是支配操舵后达到最高旋回角速度所需时间的主要因素。 T 值小， $K\delta e^{-\frac{t}{T}}$ 将很快衰减，转头角速度 r 将很快稳定于 $K\delta$ 值，因而 T 表明船舶对舵的追随性的优劣，又叫船舶追随性指数。 T 值越小，船应舵越快，舵效则越好。反之， T 越大，应舵慢而舵效差。

由式(1-17)还可以知道， K 是表示操舵后会产生多大转头角速度的要素，特别是决定最高转头角速度的要素。 K 值大，则转头角速度越大，船舶旋回性就越好， K 值实质上就是每单位舵角所能给出的平均转头角速度值，因而 K 表明船舶旋回性的优劣，又叫船舶旋回性指数。 K 值越大，船的旋回性越好，舵效也就越好。

按照 T 、 K 值对船舶操纵性进行的分类，如图 1-9 所示。现将四种旋回轨迹模式加以比较如下。

- ① T 小 K 大：追随性和旋回性都好的船；
- ② T 小 K 小：追随性好而旋回性差的船；
- ③ T 大 K 大：追随性差而旋回性好的船；
- ④ T 大 K 小：追随性和旋回性都差的船。

2. 操纵性指数的值

船舶操纵性指数 T 、 K 的值，因船舶排水量、船型、载荷状态、船速、舵角以及水深等不同而有所不同。它们可从操纵性实验中，通过实测，计算而求得。

在船模试验及船舶设计中，常将 K 、 T 无量纲化，即采用 $K' = K(L/v)$ 、 $T' = T(v/L)$ (式中 L 为船长，m； v 为船速，m/s；并取舵角 δ 为 10°)，在 Z 字操纵试验中求得的 K' 、 T' 如处于下列数值范围之内，则可具备一般的操纵性能。

满载货船 ($L=100\sim 160\text{m}$)： $K'=1.5\sim 2.0$ ， $T'=1.5\sim 2.5$ 。

满载油船 ($L=150\sim 250\text{m}$)： $K'=1.7\sim 3.0$ ， $T'=3.0\sim 6.0$ 。

表 1-4 中列出了实船试验结果，其中还列出了少量的舵角为 15° 、 20° 、 35° 的实验结果。

特别应当指出的是，不论是根据实验、实测，甚至理论计算，对于同一条船，其他一切条件相同而仅所用舵角不同时，不论 K' 值，还是 T' 值都是不一样的。图 1-10 即为这种比较的示例。

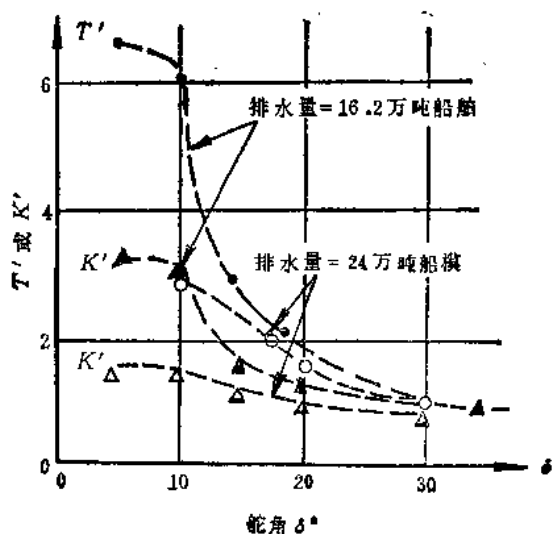


图 1-10

部分货船与油船的操纵性指数实测数据

表1-4

船型	载况	L×B×d			v_s (kn)	K'	T'	Z形试验
货船	压载	114	16.4	3.27	15.7	0.76	0.49	15°
	压载	152	20.6	4.02	17.2	0.74	0.64	15°
	压半满	150	20.5	4.89	19.0	0.92	0.72	10°
				7.05	18.5	1.00	1.22	10°
				9.23	18	1.25	1.55	10°
	满载	157	19.6	8.25	19	1.29	1.48	10°
	满载	140	19.0	8.35	15	1.70	1.93	10°
	满载	130	18.6	8.10	14.5	1.69	2.77	10°
	满载	112	16.2	7.42	11.5	2.25	2.53	10°
满载	86	12.5	5.66	8.5	2.07	2.06	10°	
油船	压载	216	30.6	4.89	18	0.79	0.51	15°
	压载	192	26.8	4.14	16	0.89	0.42	10°
	满满满	276	43.0	16.5	16.5	3.2	6.2	5°
						3.2	6.2	10°
						1.6	2.8	15°
						1.3	1.9	20°
	满满	245	32.9	13.3	17.8	1.0	1.0	35°
	1.67					3.54	10°	
	满载	210	30.5	11.5	17	3.0	6.1	10°
满载	192	26.5	10.4	16	1.70	3.44	10°	
满载	185	25.2	10.3	15.5	1.73	2.96	10°	
满载	154	22.0	9.02	12	2.26	2.96	10°	

另外，实测表明，方型系数较高，长宽比 L/B 较小的肥大丰满的船具有 T' 大，追随性差的特点，相反瘦削的船具有 K' 小，旋回性差的倾向。

二、航向稳定性与舵效

正舵直进中的船舶，在受到风、浪或其他因素的瞬时性干扰时，船舶将不可避免地要偏离原来的直进运动状态。但当干扰过去后，船舶能否恢复到原来的运动状态(位置稳定)，能否恢复到原来的航向(方向稳定)，能否在偏离原运动状态之后，迅速衰减这种偏离，而较快地稳定在新的航向上，进行新的直线运动(直线稳定)，这就是船舶运动稳定性所讨论的问题，它是船舶操纵性研究中的一个重要方面。如图1-11所示，在实际使用中，一切船舶在人——机系统控制下都应具备位置稳定性。自动舵的使用实现了船舶方向稳定的自动控制。而这里所说的航向稳定性却并非上述自动舵所控船舶自行恢复原航向的方向稳定性，它指的是船舶直线稳定性，也就是说，在干扰过去之后，转头力矩对船体作用如何，转头的程度将如何