

船舶操纵性能

船舶对驾引人员实施操纵的响应能力,总称为该船的船舶操纵性能(manueverability)。船舶是否具有良好的操纵性能,对于能否安全而高效率地操纵船舶具有重要的影响。一艘操纵性能良好的船舶,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两方面的性能。船舶的操纵性能主要包括船舶的变速运动性能、船舶的旋回性能以及船舶的航向稳定性和保向性等。

第一节 船舶变速运动性能

驱动静止中的船舶运动,或促使运动中的船舶停止下来,或改变船舶的运动速度,它们均有维持其原运动状态的趋势,经过一定时间的过渡,才能达到所要求的状态。这种趋势就是船舶惯性(inertia effect)。标志惯性过程长短的数据可有两种表示方式,一种是衡量完成变速运动所需路程的叫作冲程(惯性冲程);另一种是衡量完成变速运动所需时间的叫作冲时(惯性冲时)。

在实际操船中,变速和改向兼而有之,变速和改向运动中都存在惯性,只不过前者改变的是船舶运动的线速度,而后者改变的则是角速度而已。本节所讨论的船舶变速运动性能主要是指船舶的启动性能、停车性能和倒车停船性能。

一、船舶的启动性能

船舶在静止状态中开进车,使船舶达到与主机功率相应的稳定船速所需的时间和航进的距离,称为船舶的启动性能。

船舶从静止状态开进车,主机的转速需视船速的逐步提高而逐渐增加,因而存在一个逐步加速过程。一味求快,甚至立即把主机的转速增加很多,会使主机转矩突然增大,使主机超负荷工作,在实际操船中应避免。

根据理论推导,船速达到定常速度 v_0 时所需的时间 t 和航进的距离 s 的估算公式为:

$$t = 0.004 \times \frac{D \cdot v_0}{R_0} \quad (1-1-1)$$

$$s = 0.101 \times \frac{D \cdot v_0^2}{R_0} \quad (1-1-2)$$

式中, D ——船舶排水量(t);

R_0 ——船速为 v_0 时的船舶阻力(t);

v_0 ——船舶的定常速度(kn);

t ——时间(min);

s ——启动惯性距离(m)。

根据经验,从静止状态逐级动车,直至达到定常速度,满载船舶需航经 20 倍船长左右的距离,轻载时为满载时的 1/2 ~ 2/3。

二、船舶停车性能

船舶在全速或半速前进中下令停止主机,至船对水停止移动时所需的时间和滑行的距离,称为停车冲时和停车冲程。

主机停车后,推力急剧下降到零;开始时船速很高,船舶阻力也大,船速下降迅速;但随着船速的下降,船舶阻力减小,船速下降逐渐缓慢;当船速很低时,阻力很小,船速的下降极为缓慢,船舶很难完全停止下来。所以,通常以船速降低至能维持船舶舵效的速度(万吨级船舶为 2 kn 左右)为界限来计算船舶的停车冲程和冲时。

经推导,主机停车后至船速降低到能维持舵效的速度时所需的时间 t 和滑行距离 s 的估算公式为:

$$t = 0.00105 \frac{D \cdot v_0^2}{R_0} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) \quad (1-1-3)$$

$$s = 0.075 \frac{D \cdot v_0^2}{R_0} \log \left(\frac{v_0}{v} \right) \quad (1-1-4)$$

式中, D ——船舶排水量(t);

v_0 ——船舶发令停车时的初速度(kn);

v ——船舶停止时刻的速度,一般以能维持其舵效的速度计算(kn);

R_0 ——船速为 v_0 时的船舶阻力(t);

t ——停车冲时(min);

s ——停车惯性距离(m)。

高速前进中的船舶,突然下令停车,主机转速下降至完全停止要有一个过程,除特殊情况外,从有利保护主机的角度出发,一般应逐级降速至停车。

在主机逐级减速过程中, Topley 船长根据船速每下降一半的时间大致相等的规律,提出了船舶由速度 v_0 降到 v_1 时船舶所航进的距离的估算公式:

$$s = \frac{1}{60} \left[v_1 t + \frac{C(v_0 - v_1)}{0.693} (1 - 2^{-\frac{t}{C}}) \right] \quad (1-1-5)$$

式中, v_0 ——船舶采取降低主机转速时的初速度(kn);

v_1 ——船舶某一时刻的新速度(kn);

s ——从速度 v_0 降到 v_1 时航进的距离(n mile);

C ——船速减半时间常数,其值随船舶排水量之不同而不同,单位为 min,可于表 1-1-1 中查取。

此外,根据 Topley 船长总结的船舶减速规律,若船舶的初速度为 v_0 ,在停车后历经 t

(min)时的船速为 v_t , 则:

$$v_t = v_0 \cdot 2^{\frac{t}{C}} \quad (1-1-6)$$

因此, 船舶由船速 v_0 降低到 v_t 的过程中, 船舶的蹉航距离 s (n mile) 为:

$$s = \int_0^t v_t dt = 0.024C \cdot v_0 (1 - 2^{\frac{t}{C}}) \quad (1-1-7)$$

当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 船舶惯性停车冲程可按下式进行估算:

$$s = 0.024C \cdot v_0$$

表 1-1-1 船速减半时间常数

排水量(t)	C(min)	排水量(t)	C(min)	排水量(t)	C(min)
1000	1	36000	8	120000	15
3000	3	45000	9	136000	16
6000	3	55000	10	152000	17
10000	4	66000	11	171000	18
15000	5	78000	12	190000	19
21000	6	91000	13	210000	20
28000	7	105000	14		

根据经验, 船舶在常速航进中停车, 降速到能维持其舵效的速度时, 一般万吨级货船的停车冲程为船长的 8~20 倍, 超大型船舶则超过 20 倍的船长。船舶排水量越大、初始速度越大, 停车惯性越大。例如, 某 8100 TEU 大型集装箱船舶(总长 334 m, 船宽 42.8 m), 压载状态下, 初速度分别为海上全速(27.8 kn)、港内全速(18.9 kn)、港内半速(16.4 kn)和港内慢速(12.3 kn)时的停车冲程分别约为 16 倍、12 倍、10 倍和 8 倍船长; 满载状态下, 初速度分别为海上全速(26.0 kn)、港内全速(17.6 kn)、港内半速(15.2 kn)和港内慢速(11.4 kn)时的停车冲程分别约为 24 倍、16 倍、14 倍和 9 倍船长。又如, 某 30 万吨超大型船舶(总长 333 m, 船宽 60.0 m), 压载状态下, 初速度分别为海上全速(18.1 kn)、港内全速(12.8 kn)、港内半速(10.7 kn)和港内慢速(8.1 kn)时的停车冲程分别约为 17 倍、15 倍、14 倍和 12 倍船长; 满载状态下, 初速度分别为海上全速(16.8 kn)、港内全速(11.3 kn)、港内半速(9.3 kn)和港内慢速(6.7 kn)时的停车冲程分别约为 37 倍、32 倍、29 倍和 25 倍船长。

船舶驾引人员应在实践中掌握本船的停车及减速性能, 以便在进港或接近锚地时正确地采取逐级减速的措施, 保证船舶的安全。

三、倒车停船性能及影响紧急停船距离的因素

(一) 倒车停船性能

船舶在前进三中开后退三, 从发令开始到船对水停止移动所需的时间及航进的距离, 称为倒车冲时和倒车冲程。其距离又称紧急停船距离(crash stopping distance)或最短停船距离(shortest stopping distance)。另外, 在倒车停船过程中, 对于右旋固定螺距螺旋桨单车船而言, 由于螺旋桨沉深横向力和排出流横向力推尾向左的作用, 船首右偏, 使船舶向垂直于原航向的右侧偏移一定的距离, 所偏移的横距(lateral deviation or side reach)以及船首右偏

的角度也是表征船舶倒车停船性能的重要因素。

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,但一般说来还可以较快地完成。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,尽管情况甚为紧急,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,通常要等到船速降至全速的 60% ~ 70%、主机转速降至额定转速的 25% ~ 35% 时,将压缩空气通入汽缸,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种类不同而不同。一般情况下,内燃机船一般需 90 ~ 120 s,汽轮机船一般需 120 ~ 180 s,而蒸汽机船需 60 ~ 90 s。

倒车冲时和倒车冲程可用下列公式估算

$$t = 0.00089 \frac{D \cdot v_0}{R_0} \quad (1-1-9)$$

$$s = 0.0121 \frac{D \cdot v_0^2}{R_0} \quad (1-1-10)$$

式中, D ——船舶排水量(t);

R_0 ——船速为 v_0 时的船舶阻力(t);

v_0 ——船舶倒车前的速度(kn);

t ——倒车冲时(min);

s ——倒车冲程(m)。

根据统计,一般中型至万吨级货船的紧急停船距离可达 6 ~ 8 倍船长;载重量 5 万吨左右的船舶可达 8 ~ 10 倍船长;载重量 10 万吨的船舶可达 10 ~ 13 倍船长;载重量 15 ~ 20 万吨的船舶可达 13 ~ 16 倍船长。船舶的排水量越大、初始船速越大,其停车的冲程和冲时也越大。

随着船舶的大型化,有必要掌握有关超大型船舶的倒车冲程和冲时的数据。例如,某 8100 TEU 大型集装箱船舶(总长 334 m,船宽 42.8 m),压载状态下,初速度分别为海上全速(27.8 kn)、港内全速(18.9 kn)、港内半速(16.4 kn)和港内慢速(12.3 kn)时的倒车冲程分别约为 13 倍、8 倍、6 倍和 4 倍船长;满载状态下,初速度分别为海上全速(26.0 kn)、港内全速(17.6 kn)、港内半速(15.2 kn)和港内慢速(11.4 kn)时的倒车冲程分别约为 17 倍、11 倍、9 倍和 5 倍船长。又如,某 30 万吨超大型船舶(总长 333 m,船宽 60.0 m),压载状态下,初速度分别为海上全速(18.1 kn)、港内全速(12.8 kn)、港内半速(10.7 kn)和港内慢速(8.1 kn)时的倒车冲程分别约为 8 倍、5 倍、4 倍和 3 倍船长;满载状态下,初速度分别为海上全速(16.8 kn)、港内全速(11.3 kn)、港内半速(9.3 kn)和港内慢速(6.7 kn)时的倒车冲程分别约为 15 倍、9 倍、7 倍和 4 倍船长。

在倒车停船过程中,对于右旋固定螺距螺旋桨单车船而言,由于螺旋桨横向力的作用,船舶将出现边减速船首边向右偏转的现象。船舶在倒车停船过程中船舶重心在原航向上所移动的距离称为制动纵距(head reach);而在原航向垂直方向上所移动的距离称为制动横距(lateral deviation or side reach);前述的紧急停船距离实际上是船舶下令倒车后到船对水停止移动时船舶重心沿其轨迹所行进的距离。实船倒车停船试验的结果表明,如船舶在倒车

停船过程中的船首向右偏转的角度较大,制动横距也较大,而制动纵距较短。压载时,倒车停船需时较短,船首向右偏转的角度相对较小。例如,某4万吨级的船舶满载时,倒车停船需时较长,船首向右偏转的角度可达 $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 。排水量越大、初始船速越高,倒车所需的时间越长,船首右偏的角度越大。

(二)影响紧急停船距离的因素

影响紧急停船距离的因素主要有:

(1)船舶排水量。在其他条件相同的情况下,排水量越大,紧急停船距离越大。

(2)初始船速。若其他因素一定,船速越高,紧急停船距离越大。

(3)主机倒车功率、转速和换向时间。若其他条件相同,主机倒车转速越高、主机倒车功率越大,紧急停船距离越小;主机换向时间越短,紧急停船距离也越小。

(4)推进器种类。可变螺距螺旋桨(CPP)船与固定螺距螺旋桨(FPP)船相比较,由于CPP船的换向操作只需改变螺旋桨的螺距角,而无须停止主机,因此其换向时间短,其紧急停船距离也就较小。若其他条件相同,则CPP船的紧急停船距离一般为FPP船的60%~80%。

(5)船体的污底程度。船体污底越严重,船体阻力越大,紧急停船距离越小。

(6)外界条件。顺风、顺流时紧急停船距离增大;顶风、顶流时紧急停船距离减小;在浅水中由于船舶阻力增加,其紧急停船距离较深水中小。

四、船舶制动方法及其适用

(一)倒车制动法

采用紧急倒车制动的方法的优点是该方法不受水域、船速等条件的限制,即不论在港内或港外水域,也不论船速的高与低,该方法均可适用;同时在紧急避让中一旦发生碰撞,碰撞的损失也比较小。其缺点是历时较长,对于FPP船需要进行主机换向操作,同时单桨船在倒车过程中总伴有一定的偏航量和偏航角,且倒车时间越长,偏航量越大。大型船舶尤其是超大型船舶由于每载重吨所分摊到的主机功率较低,为了避免因倒车时产生的偏航量与偏航角而不利于船舶保持适当位置,因此在港内很少采用倒车制动方法,而更多地借助拖轮进行制动,以策安全。

(二)大舵角旋回制动法

采用大舵角进行急速旋回的方法进行制动的优点是操作方便,无须机舱操作,而且降速时间也相对较短,一般船舶进行大舵角旋回时可减速30%左右,而肥大型船舶可以降速达50%;其缺点是所需的水域比较宽,而且大舵角旋回后仍残留部分余速,最后要把船完全停住,仍需进行倒车制动。因而该方法多用于大型船进港需自力缩短减速所需时间的场合,以便及早进港。

因此,在紧急避让中,究竟是采取大舵角旋回避让有效还是采取全速倒车有效,必须根据各自船舶当时的速度及周围环境来判定。能使全速倒车的制动纵距恰好等于满舵旋回时的最大纵距时的船速,称为界限船速,船舶越大,界限船速越低。随着船速的增大,旋回纵距增加不大,而制动纵距则急剧增加。因此,若当时的船速低于界限船速,即船舶在低速航行中,用全速倒车能够在原航向上以最短的距离把船停住;若当时的船速高于界限船速,且有足够的水域宽度,也没有与其他船相碰撞的危险时,采用满舵旋回避让比较有利。

(三) 蛇航制动法(zig zag stop manoeuvre)

蛇航制动法是直航中的船舶通过自身操舵、换车,利用强大的船舶斜航阻力和倒车拉力将船制动的方法。蛇航制动法最早由英国造船研究协会(BSRA)提出,尤其适用于VLCC和ULCC紧急停船的情况。根据实船试验和模拟研究的结论,蛇航制动法对于方形系数较大的超大型船舶在深水域中航行速度较高时最为有效,而对普通的万吨级船舶以及在低速状态下并不适用。以先向左操舵作蛇航制动为例,其操作要领为:

- (1)左满舵,并下令备车;
- (2)向左改向角达到 20° 时,由海上速度改为港内操纵速度,即主机功率减到 $3/4$;
- (3)向左改向角达到 40° 时,操右满舵;
- (4)向左改向角达最大值时,下令前进二,主机功率减到 $1/2$;
- (5)航向复原时,再操左满舵;
- (6)向右改向达最大值时,下令前进一,主机功率减到 $1/4$;
- (7)航向再次恢复到原航向时,操右满舵并全速倒车。

该方法的优点是,开始蛇航制动时最初的操舵不但赋予了船舶明确的偏航方向(向右或向左),弥补了开出倒车时船舶偏转方向不定的不足,而且在倒车未开出之前的 $2\sim 3$ min的时间之内已充分地利用斜航阻力使船舶相应减速,这对缩短紧急停船距离和时间无疑是很有帮助的。另一个优点是,主机由进车换为倒车的过程可以分阶段、逐级平稳进行,避免了主机超负荷工作等情况的出现。

该方法的缺点是在较窄的水域或航道内不宜使用,操纵上略感复杂。

(四) 拖锚制动法

通过拖锚利用拖锚阻力,即拖锚时锚的抓力来刹减船舶余速的方法称为拖锚制动法。就目前所知,该法仅用于万吨级及其以下的船舶,而且抛锚时船舶对地的速度也仅限于 $2\sim 3$ kn以下。

(五) 拖轮制动法

通过拖轮协助或仅靠拖轮提供的推力使船制动的方法称为拖轮制动法。该法多用于大型船舶在港内低速状态时的制动。

(六) 辅助装置制动法

利用设置在船舶上的一些如阻力鳍等辅助装置使船舶减速制动的方法称为辅助装置制动法。该方法仅在船舶航速较高时使用,才会有明显的效果。

上述各类制动方法的适用范围如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 各种制动方法的适用范围

船舶制动方法	有效速度域	可使用的操纵环境
倒车制动法	全速域	全部水域,但大型船舶在港内很少使用
拖轮制动法	低速域	港内水域,多用于大型船舶
大舵角旋回制动法	高速域	宽度较大的水域
拖锚制动法	低速域	港内操船,仅适用于万吨级及以下船舶
辅助装置制动法	高速域	紧急停船,较宽水域
蛇航制动法	高速域	紧急停船,水域较宽,且仅适用于大型船高速时

第二节 船舶旋回性能

定速直航的船舶操某一大舵角后进入定常旋回的运动性能称为船舶的旋回性能,它是船舶操纵性能中极为重要的一种性能。

一、旋回圈的大小及其要素

定速直航(一般为全速)的船舶操一定舵角(一般为满舵)后,其重心所描绘的轨迹叫作旋回圈(turning circle)。旋回圈的各种数据在操纵船舶时有重要参考价值。表征船舶旋回过程的要素可以分为表征船舶旋回圈大小的几何要素以及描述船舶旋回运动状态的运动要素。

(一) 表征旋回圈大小的几何要素

表征旋回圈大小的几何要素主要有进距、横距、旋回初径、旋回直径、滞距和反移量等,如图 1-2-1 所示。

1. 进距(advance)

进距也称纵距,是指从操舵开始到船舶的航向转过任一角度时重心所移动的纵向距离。通常,旋回资料中所说的纵距,特指当航向转过 90° 时的进距,以 A_d 表示,一般为旋回初径的 $0.6 \sim 1.2$ 倍。

2. 横距(transfer)

横距是指从操舵开始到船舶的航向转过任一角度时船舶重心所移动的横向距离。通常,旋回资料中所说的横距,特指当航向转过 90° 时的横距,以 T_r 表示,约为旋回初径的一半。

3. 旋回初径(tactical diameter)

旋回初径是指从操舵开始到船舶的航向转过 180° 时重心所移动的横向距离,以 D_T 表示,一般为船长的 $3 \sim 6$ 倍。

4. 旋回直径(final diameter)

旋回直径是指船舶作定常旋回时重心轨迹圆的直径,亦称旋回终径,以 D 表示,一般为旋回初径的 $0.9 \sim 1.2$ 倍。

5. 滞距(reach)

滞距亦称心距。正常旋回时,船舶旋回直径的中心 O 总较操舵时船舶重心位置更偏于前方。滞距是该中心 O 的纵距,以 R_c 表示,一般为 $1 \sim 2$ 倍船长,它表示操舵后到船舶进入旋回的“滞后距离”,也是衡量船舶舵效的标准之一。

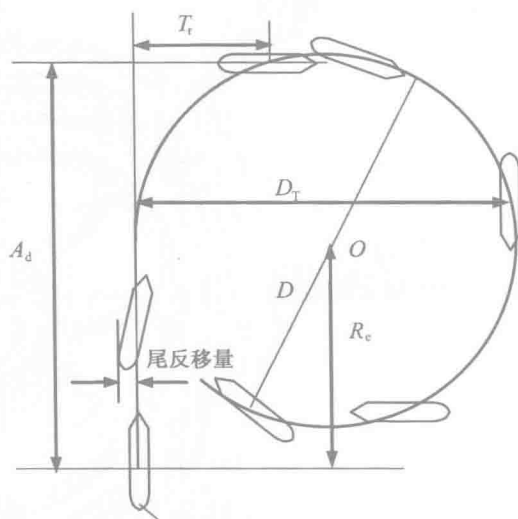


图 1-2-1 旋回圈的几何要素和名称

6. 反移量(kick)

反移量亦称偏距,是指船舶重心在旋回初始阶段向操舵相反一舷横移的距离。通常,该值极小,其最大值在满载旋回时仅为船长的1%左右。但操船中应注意的,船尾的反移量却不容忽视,其最大值为船长的1/10~1/5,约出现在操舵后船舶的转头角达一个罗经点左右的时刻。反移量的大小与船速、舵角、操舵速度、排水状态及船型等因素有关,船速、舵角越大,反移量越大。

上述六个尺度,各从不同的角度在实际上规定着旋回圈的形状及大小。在航海实践中,旋回圈的大小常常用其旋回初径 D_T 表示。有的也采用其旋回初径与其船长 L (一般为两柱间长)的比值 D_T/L 来表示,称为相对旋回初径。

(二) 描述船舶旋回运动状态的运动要素

表征船舶旋回运动状态的运动要素主要有漂角、转心及其位置、旋回中的降速和旋回中的横倾等,它们与船舶的旋回性能有着密切的关系。

1. 漂角(drift angle)

船舶首尾线上某一点的线速度与船舶首尾面的交角叫作漂角,如图1-2-2所示。船舶在首尾线上不同点的漂角是不同的。在船尾处横移速度最大,因此漂角也最大。但通常所说的漂角是指船舶重心处的线速度 v_t 与船舶首尾面的交角,也就是船首向与重心 G 点处旋回圈切线方向的夹角,用 β 表示。一般船舶满舵旋回时的漂角在 $3^\circ \sim 15^\circ$ 之间。

漂角越大的船舶,其旋回性越好,旋回直径也越小。超大型船舶较一般货船的方形系数值较高,长宽比较低,有着较好的旋回性,它在定常旋回中的漂角也较大,最大可达到 20° 左右。

2. 转心(pivoting point)及其位置

旋回中的船舶可视为一方面船舶以一定的速度前进,同时绕通过某一点的竖轴旋转的运动的叠加,这一点就是转心,通常以 P 表示。从几何学上讲,转心 P 的位置是旋回圈的曲率中心 O 作船舶首尾面的垂线的垂足。在转心处,横移速度及漂角均为零,因而该点处的线速度方向与首尾线方向一致。船舶首尾面上转心前后的横移速度方向相反。

船舶操舵旋回时,在旋回的初始阶段,转心约在重心稍前处,以后随船舶旋回不断加快,转心随着旋回中的漂角的增大而逐渐向船首方向移动;当船舶进入定常旋回阶段即船舶旋回中的漂角保持不变时,转心 P 逐渐稳定于某一点,该点的位置一般在船首柱后 $1/3 \sim 1/5$ 船长处。

对于不同船舶而言,旋回性能越好、旋回中漂角 β 越大的船舶,其旋回时的转心越靠近船首。

3. 旋回中的降速

船舶在旋回中,主要由于船体斜航(存在漂角)时阻力增加,以及舵阻力增加和推进效

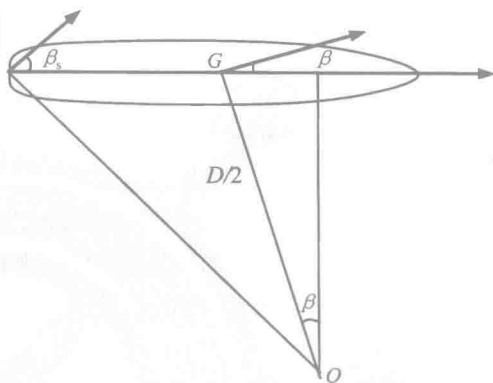


图 1-2-2 船舶首尾面上各点的漂角

率降低等原因,将会出现降速现象。一般从操舵开始到船首转过 90° 左右船舶进入定常旋回后,速度不再下降。减速的幅度与旋回初径 D_T 与船长 L 的比值有密切的关系, D_T/L 值越小,旋回性越好,减速越显著。一般船舶旋回中的降速幅度为旋回操舵前船舶速度的25%~50%,而旋回性能很好的超大型油船在旋回中的降速幅度最大可达到原航速的65%。

4. 旋回中船舶出现的横倾(list)

船舶操舵不久,将因舵力横倾力矩而出现少量内倾;接着由于船舶旋回惯性离心力矩的作用,内倾将变为外倾,并且因横向摇摆惯性的存在将产生最大的外倾角 θ_{max} ,最大外倾角一般为定常外倾角的1.2~1.5倍, θ_{max} 的大小与操舵时间有关,操舵时间越短, θ_{max} 越大。达到最大外倾角后,船舶经过1~2次摇摆,最后稳定于某一定常外倾角 θ 上。图1-2-3是旋回中船舶发生横倾的模式。从图中可以看出,船舶在旋回中的横倾模式是先内倾,后外倾,且外倾角大于内倾角。

船舶旋回中定常外倾角 θ 的大小与船速、所操的舵角、船舶的旋回性能和船舶的初稳性高度 GM 等有关,船速越高、船舶的旋回直径越小、船舶的初稳性高度越低,定常外倾角 θ 越大。一般货船满舵旋回时的外倾在静水中可达 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。恢复力矩较小的船舶高速航进中操大舵角时,将会产生较大横倾,船速大于30 kn的高速船,定常外倾角可达 $12^\circ \sim 14^\circ$ 。

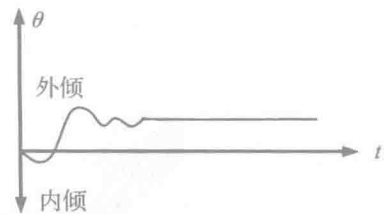


图 1-2-3 船舶旋回中的横倾模式

旋回中船舶出现的横倾是一个应予注意的不安全因素。船舶在大风浪中大角度转向或掉头时,如船舶在波浪中横摇的相位与旋回中外倾角的相位一致,则船舶将有倾覆的危险,这是操船中应予避免的一个重要问题。另外值得注意的是,由于舵力所产生的内倾力矩有利于抑制船舶的外倾角,当船舶在旋回中一旦产生较大的外倾角时,切忌急速回舵或操相反舵,否则会进一步增大外倾角,威胁船舶的安全,此时最好的措施是减速。

5. 旋回时间

旋回时间是指船舶旋回 360° 所需的时间。它与船舶的排水量有密切关系,排水量大,旋回时间增加。万吨级船舶快速满舵旋回一周约需6 min,而超大型船舶的旋回时间则几乎要增加一倍。

二、影响旋回圈大小的因素

旋回圈的大小与船型、舵面积、所操舵角、操舵时间、载态、水深、船速、船舶的纵倾和横倾、螺旋桨转速等密切相关。受风、流的影响,旋回圈的大小也有很大变化。

(一) 方形系数 C_b (block coefficient)

如图1-2-4所示,方形系数较低的瘦形高速船($C_b \approx 0.6$)较方形系数较高的肥大型船($C_b \approx 0.8$)的旋回性能差得多,即船舶的方形系

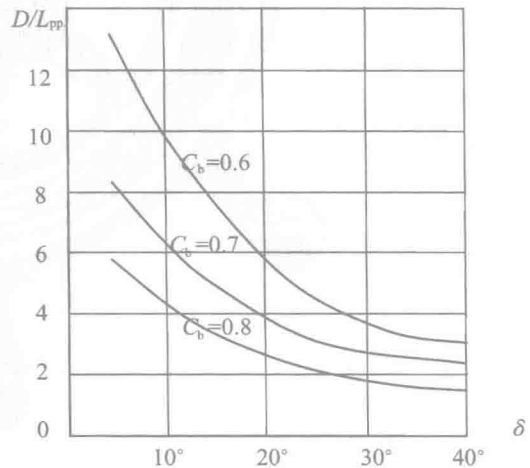


图 1-2-4 方形系数对旋回初径的影响

数越大,船舶的旋回性越好,相对旋回初径越小。

(二) 船体水线下侧面积形状及分布

就整体而言,船首部分分布面积较大,如有球鼻首者或船尾比较瘦削的船舶,旋回中的阻尼力矩小,旋回性较好,旋回圈较小,但航向稳定性较差;而船尾部分分布面积较大者如船尾有钝材或船首比较削尖(cut up)的船舶,旋回中的阻尼力矩比较大,旋回性较差,旋回圈较大,但航向稳定性较好。

(三) 舵角

在极限舵角的范围之内,操不同舵角时的旋回初径变化情况总的趋势是,随着舵角的减小,旋回初径将会急剧增加,旋回时间也将增加。

(四) 操舵时间

操舵时间主要对船舶的进距影响较大,进距随操舵时间的增加而增加,而对横距和旋回初径的影响不大,旋回直径则不受其影响。

(五) 舵面积比

舵面积比(rudder area ratio)是指舵面积与船体浸水侧面积($L_{pp} \times d$)的比值。增加舵面积将会使舵的转船力矩增大,因而提高船舶的旋回性,使旋回圈变小。但增加舵面积的同时又增加了旋回阻尼力矩,当舵面积超过一定值后,旋回性就不能提高。也就是说,就一定船型的船舶而言,舵面积比的大小在降低旋回初径方面存在一个最佳值。各类船舶因其实际使用目的不同,对船舶应具备的旋回性在要求上也各不相同,它们有各自最佳的舵面积比。

由于拖轮和渔船需要优良的操纵性,所以舵面积比较大,拖轮为 $1/20 \sim 1/25$,渔船为 $1/30 \sim 1/40$;高速货船旋回性较差,为弥补其不足,须有较大的舵面积比,为 $1/35 \sim 1/40$;大型油船由于具有易于旋回的肥大船型,用不着很大的舵面积比,一般仅为 $1/65 \sim 1/75$;一般货船为 $1/45 \sim 1/60$ 。

(六) 船速

一般说来,船速对船舶旋回所需时间的长短具有明显的影响,船速越高,旋回时间越短;但对旋回初径大小的影响却呈现较为复杂的情况。

在船舶的正常速度范围内,船速对旋回初径的影响不大。然而,当船速低至某一程度,船舶旋回初径将有逐渐增大的趋势,这是由于低速状态下舵力转船力矩明显减小、旋回性明显变差而造成的。另外主机的使用方式对船舶旋回初径的大小有着明显的影响,如图 1-2-5 所示,在加速旋回中,旋回圈变小,而在减速旋回中,旋回圈变大。

(七) 吃水

一般船舶均有舵面积比随吃水增加而降低的趋势,这将导致相应于舵力的旋回阻矩增大,

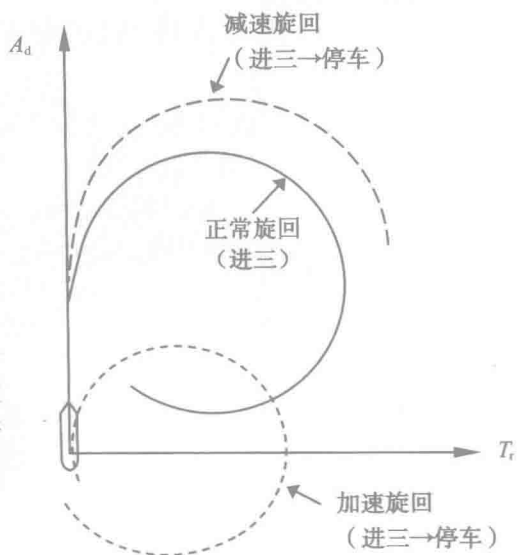


图 1-2-5 减速旋回与加速旋回

而舵力转船力矩减少。而且,随着吃水的增加,船舶通过重心 G 点竖轴的转动惯量增加,所以初始旋回大大减慢。因此,若纵倾状态相同,吃水增加时,旋回进距增大,横距和旋回初径也将有所增加。

(八)吃水差

有吃水差和平吃水相比较,相当于较大程度地改变了船舶水线下船体侧面积的分布状态,因而对船舶旋回性能造成明显的影响。尾倾增大,旋回圈也将增大;对于 $C_b = 0.8$ 的船舶,若尾倾增大量为船长的 1%,旋回初径将增加 10% 左右;对于 $C_b = 0.6$ 的船舶,若尾倾增大量为船长的 1%,旋回初径将增加 3% 左右。这也说明方形系数越大的船舶,当尾倾增加时,旋回初径增加得越多。

实际上,满载和轻载时的纵倾状态是很难相同的。通常在满载状态下尾纵倾比较小,而在轻载状态下则有相当大的尾倾。轻载时的吃水较浅,尽管此时的舵面积比有所增大,转动惯量较小,使船舶的旋回圈变小;但因为尾倾较大,所以旋回圈又有增大的趋势。总的看来,空载与满载时的旋回初径及横距相差无几,只是满载时旋回的进距较轻载时大一些。

(九)横倾

船体存在横倾时,左右浸水面积不同,两侧所受的水动压力也不相同,改变了左右舷各种作用力的对称性。由于横倾,水作用力中心向低舷侧横移一段距离,与螺旋桨推力作用线不在同一条线上,构成了阻力-推力转矩,使船首向低舷侧偏转。同时由于横倾,低舷侧的浸水面积较高舷侧丰满,因而低舷的船首兴波要比高舷侧的大,两舷的压力差产生向高舷侧的横向力转矩即首波峰压力转矩,使船首向高舷一侧偏转。

低速时,推力-阻力转矩起主要作用,推首向低舷侧偏转。此时,若操舵向低舷侧旋回则其旋回圈较小,反之如操舵向高舷侧旋回则其旋回圈较大。高速时,首波峰压力转矩起主要作用,推船首向高舷侧偏转。此时,如操舵向低舷侧旋回其旋回圈较大,反之如操舵向高舷侧旋回则其旋回圈较小。但总起来讲,横倾对旋回圈的影响并不大。

(十)螺旋桨的转动方向

由于受螺旋桨横向力的影响,船舶向左或向右旋回时的旋回圈的大小将有所不同。对于右旋固定螺距螺旋桨单车船而言,在其他条件相同的情况下,向左旋回时的旋回初径要比向右旋回时的旋回初径要小一些。但对于超大型船舶而言,这一差别很小。

(十一)浅水影响

由于浅水中横向阻力明显增大,漂角 β 明显下降,同时浅水中的舵力有所下降,舵力转船力矩下降,再加上浅水中的阻尼力矩明显增大,船舶的旋回性下降,因此,在浅水中的旋回圈明显增大。当水深吃水比小于 2 时,旋回圈有所增大(特别是对高速船而言);当水深吃水比小于 1.5 时,旋回圈明显增大;当水深吃水比小于 1.2 时,旋回圈急剧增大。

(十二)风、流、浪、污底的影响

风、流、浪、污底对旋回圈大小的影响表现得较为复杂。例如顶风、顶流、污底严重会使旋回圈进距减小,顺风、顺流会使旋回圈进距增大。当风、流、浪与船舶的初始航向有一定交角时,风、流、浪对旋回圈的影响取决于它们对船舶偏转的影响,如果外界风、流、浪的影响有利于船舶转向,则旋回圈变小,相反,旋回圈则变大。

三、旋回圈要素在实际操船中的应用

由旋回试验测定的旋回圈资料是船舶操纵性能的重要内容之一,它不仅用来评价船舶

的旋回性能,同时还可以直接用于实际操船。

(一) 旋回初径、进距、横距、滞距在实际操船中的应用

在水深足够的宽敞水域,旋回初径可以用来估算船舶用舵旋回掉头所需的水域。

旋回纵距可以用来决定在紧急避让的情况下究竟应当采用舵让还是用紧急倒车避让。若旋回纵距小于紧急倒车停船距离,则应当采用舵让;相反,若紧急倒车停船距离小于旋回纵距,则应当采用紧急倒车避让。

横距可以用来估算操舵转首后,船舶与岸或其他船舶是否有足够的间距。

滞距可以用来推算两船对遇时无法旋回避让的距离,即两船对遇时的距离小于两船的滞距之和,则用舵无法避让;而两船的进距之和则可以用来推算对遇时的最晚施舵点。

(二) 反移量在实际操船中的应用

反移量在实际操船中的应用很多,现举数例说明其利用与防止的有关问题。

例如,本船航行中发现有人落水时,应立即向落水者一舷操舵,使船尾迅速摆离落水者,以免使之卷入船尾螺旋桨流之内。

又如,在船首较近的前方发现障碍物时,为紧急避开,应立即操满舵尽量使船首让开,当估计船首已可避开时,再操相反一舷满舵以便让开船尾。

再如,当船舶前部已离出码头,拟进车离泊时,如操大舵角急欲转出,则由于尾外摆而将触碰码头。为避免发生事故应适当减速,待驶出一段距离后再使用小舵角慢慢转出。

(三) 旋回转头速率在实际操船中的应用

实际工作中,可以利用船速与船舶旋回转头速率和旋回半径的关系,估算船舶旋回过程中的旋回半径。

第三节 航向稳定性与保向性

正舵直航中的船舶,当受到风、浪或其他因素的瞬时性干扰后,船舶将不可避免地偏离原来的直航运动状态。但当干扰过去后,偏离原来直航运动的船舶能否自行恢复到原来航线上(位置稳定),能否自行恢复到原来的航向上(方向稳定),能否较快地稳定在新的航向上,做新的直线运动(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的一个重要方面,如图 1-3-1 所示。

在实际营运中,一切船舶在人-机系统控制下都具备位置稳定性,否则便难到达预定目的港。自动舵的使用,实现了船舶方向稳定的自动控制。本节标题中的航向稳定性却并非上述自动舵控制的、自行恢复原航向的方向稳定性,它指的是船舶运动的直线稳定性。

一、航向稳定性

(一) 静航向稳定性和动航向稳定性

航向稳定性,指的是船舶在受外界干扰取得转头速度 r_0 ,当干扰结束之后在船舶保持正舵的条件下,船舶受到的转头阻力矩对船体转头运动有何影响,船舶转头运动因而将如何变化的性质。一艘航向稳定性较好的船舶,直航中即使很少操舵也能较好地保向;而当操舵改向时,又能较快地应舵;转向中回正舵,又能较快地把航向稳定下来。其特点是对舵的响应运

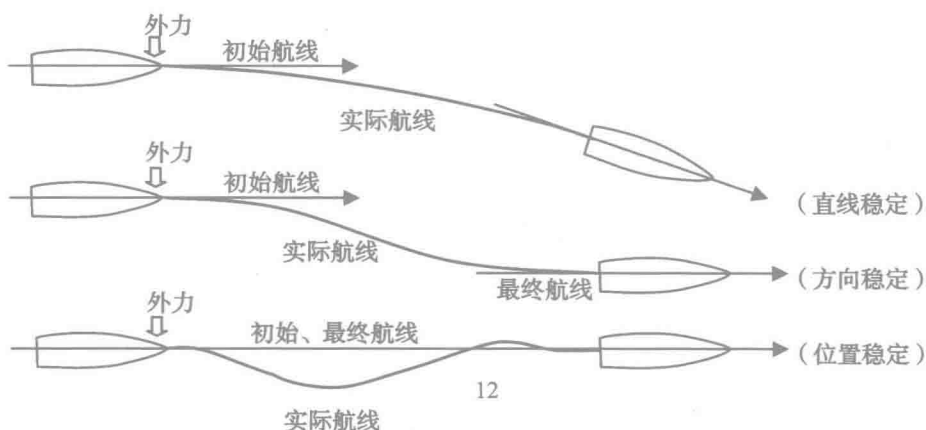


图 1-3-1 船舶的运动稳定性

动来得快,耗时短,因而舵效比较好。

1. 静航向稳定性

静航向稳定性 (statical course stability), 指的是船舶受外力作用而稍微偏离原航向, 但重心仍在原航向上斜航前进, 有关该斜航漂角将如何变化的性能。

通常的船舶在斜航中, 如图 1-3-2 所示, 因为漂角的出现将产生使漂角继续增大的转头力矩, 所以常常是静航向不稳定的。船舶越是首倾, 船体侧面积在船首分布越多, 其静航向稳定性就越差。

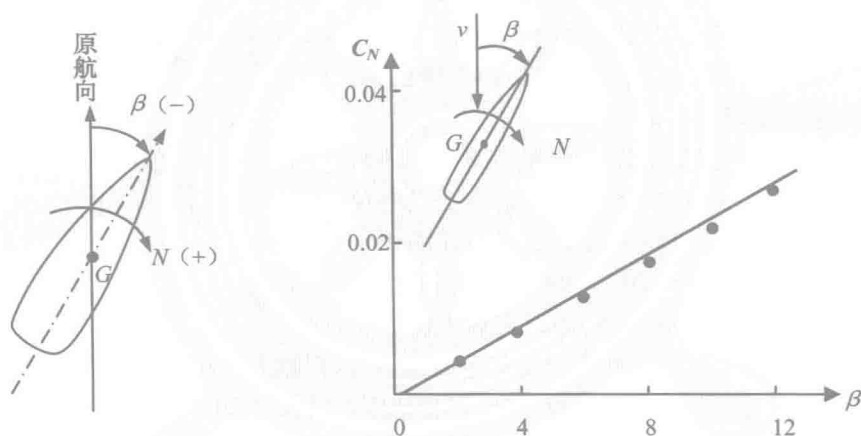


图 1-3-2 船舶斜航时转头力矩系数与漂角变化

2. 动航向稳定性

动航向稳定性 (dynamical course stability) 是指正舵直航的船舶, 在受外界干扰的影响偏离原航向后, 当外界干扰过去之后, 船舶的转头运动在不用舵纠正的情况下, 能否尽快稳定于新的航向上做新的直线运动的性能。如船舶能够稳定在新的航向上做新的直线运动, 则说明船舶具备动航向稳定性; 稳定得较快、惯性转头角较小的船, 其动航向稳定性较好; 稳定得较慢、惯性转头角较大的船舶, 其动航向稳定性较差。如船舶不能稳定在新的航向上做新的直线运动, 即船舶一直转头不停而偏转下去, 则该船舶不具备动航向稳定性。一般所说

的船舶航向稳定性指的就是动航向稳定性,即船舶直线运动稳定性。当然,航向稳定性差的船舶,甚至航向不稳定的船舶,并不是不能操纵,而只是为了保持航向,需频繁操舵,而且所用舵角也偏大。

(二) 船舶航向稳定性的判别

1. 根据船舶线型系数判别

据统计,船速和船舶长度均较接近的船舶,其航向稳定性与该船的方形系数、长宽比有密切关系。一般说来,方形系数较低、长宽比较高的船舶具有较好的航向稳定性;而方形系数较高、长宽比较低的肥大型的船舶则航向稳定性较差甚至不具备航向稳定性。类似超级油船之类的肥大型船舶,方形系数一般在 0.8 左右,其航向稳定性在小舵角范围内总带有不稳定性。因此,这种船舶在小舵角保向航行中,船首的偏摆角度往往较大,并给人以稳不住的感觉。

2. 根据船舶螺旋试验结果判别

船舶螺旋试验包括正螺旋试验(direct spiral test)和逆螺旋试验(reverse spiral test)两种,它们均是判定船舶航向稳定性好坏的实船试验方法。

正螺旋试验是指求取船舶操某一舵角时船舶所能够达到的定常旋回角速度的试验方法。其试验方法是,首先从右满舵开始求取其对应的定常旋回角速度 r ,而后少量减小其右舵角再求取其定常旋回角速度;然后顺次求出正舵、左舵直至左满舵旋回时的定常旋回角速度;最后再从左满舵向右满舵一步步过渡,依次求出各舵角所对应的定常角速度。这样可以求出每一舵角所对应的定常旋回角速度,并绘出 $r-\delta$ 曲线,如图 1-3-3 所示。

不论任何船舶,正螺旋试验得到的 $r-\delta$ 曲线不外乎两种基本类型。如属于 $aOa'Oa$ 类型的,因 $r-\delta$ 具有单值对应关系,则说明船舶具有航向稳定性;如 $r-\delta$ 曲线呈现出 $ABCD A'DEBA$ 类型,带有 $BCDE$ 这种环形范围的,因 $r-\delta$ 在环形范围内具有多值对应关系,则说明该类船舶在环形

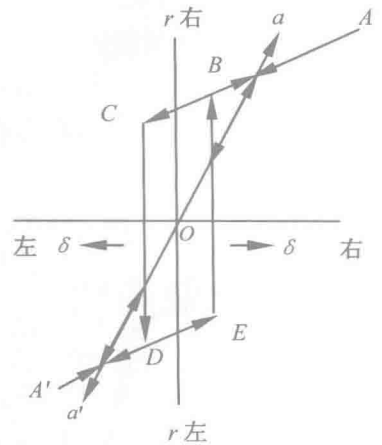


图 1-3-3 正螺旋试验的 $r-\delta$ 曲线

范围内不具备航向稳定性。该曲线的环形范围越宽、面积越大,则船舶的航向不稳定性程度越高。有关的经验表明,当大型船舶的环形的舵角范围宽度大于 20° 时,操纵就感到困难。

逆螺旋试验是指求取为使船舶达到某一旋回角速度而需操的平均舵角的试验方法。其试验方法与正螺旋试验正好相反。该试验方法比较省时、省力,但必须有测定船舶转头角速度的角速度仪(gyro rate)。试验得到的 $r-\delta$ 曲线如果成单值对应,曲线近似于一条直线,线上各点的斜率均为正,说明船舶具有良好的航向稳定性;相反如果 $r-\delta$ 曲线呈 S 形,在临界舵角范围内 $r-\delta$ 曲线成多值对应关系,则说明船舶不具备航向稳定性,且多值对应的宽度越宽,船舶的航向不稳定性越强,这与螺旋试验所求出的不稳定环的宽度所表示的含义是完全一致的。如图 1-3-4 所示。

3. 根据船舶操纵性指数 T 判别

船舶航向稳定性是零舵角下的船舶追随性,船舶追随性好的船舶可以同时判断为航向

稳定性好的船舶。因此,如果船舶通过Z形试验求取了船舶的操纵性指数,则可以利用船舶操纵性指数 T 来进行判别。若操纵性指数 $T > 0$,说明船舶具有航向稳定性,且 T 值为越小的正数,船舶的航向稳定性越好。若操纵性指数 $T < 0$,则说明船舶不具有航向稳定性。

(三) 影响船舶航向稳定性的因素

1. 船舶的长宽比和船体方形系数

据统计,船舶的长宽比越大、船体方形系数越小,即船舶越瘦长,该船的航向稳定性越好。

2. 船体水下侧面积分布

据统计,船体水下侧面积在船尾分布得越多、船首分布得越少,则船舶的航向稳定性越好。与此相关联,适当的尾倾,有助于提高船舶的航向稳定性。

3. 船速

对于同一艘船而言,随着船速的提高船舶航向稳定性将变好。

二、船舶保向性

(一) 船舶保向性(course keeping ability)的概念

顾名思义,船舶保向性是船舶保持原航向的性能,即船舶在外力作用下(如风、流、浪等)偏离了原航向,由舵工(或自动舵)通过罗经识别船舶首摇情况,通过操舵抑制或纠正首摇并使船舶驶于预定航向上的能力。通过较少的操舵使得船舶能在较短的时间内恢复到预定的航向上做直线运动,则该轮的保向性较好,反之,则保向性较差。

(二) 船舶保向性与航向稳定性的关系

船舶保向性与航向稳定性既有区别,又有联系。

船舶航向稳定性是船舶固有的运动性能,即船舶不通过操舵,在外界干扰消失后,其能否稳定在新的航向上作新的直线运动的性能;而船舶保向性是船舶在受控状态下的性能,即当船舶偏离原航向后,通过操舵使得船舶恢复到预定航向上做直线运动的性能。船舶的航向稳定性主要与船舶水线以下的几何尺度和形状、船舶的运动状态等因素有关,而与操船者、舵机的性能等因素无关;而船舶保向性的好坏不但与船舶航向稳定性的好坏有关,同时还与操舵人员的技能及熟练程度,自动舵、舵机的性能等有关。

一般而言,航向稳定性好的船舶,通过较少的操舵就能稳定在预定的航向上,即该轮的保向性也好,反之,保向性也较差。但不具备航向稳定性的船舶,仍然具备保向性,只不过需要通过频繁的操舵或者使用较大的舵角才能保持其直线运动。

(三) 影响船舶保向性的因素

1. 船型

水下船型是决定船舶转头阻矩和惯性的重要因素,水上船型是决定船舶所受风力及风力转船力矩大小的重要因素。它们对保向性均有很大影响。表现在:

(1) 方形系数较低、长宽比较高的瘦削型船舶,其保向性较好;浅吃水的宽体船保向性

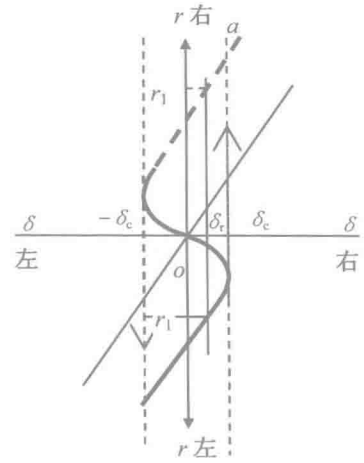


图 1-3-4 逆螺旋试验的 $r-\delta$ 曲线

较差。

(2) 船体侧面积在尾部分布较多者,如船尾有钝材,其保向性较好;船首水下侧面积分布较多者,如船首有球鼻首将降低保向性。

(3) 较高的干舷将降低船舶在风中航行时的保向性。

2. 载态

载态的改变将导致水下和水上船型的改变,因而也影响到船舶保向性。对于同一艘船而言,一般的倾向是轻载较满载时保向性好(受风时另当别论);尾倾较首倾时的保向性好。

3. 舵角

增大所操的舵角,能明显地改善船舶的保向性。超大型油船小舵角状态下有航向不稳定趋势,需用较大舵角才能保向。

4. 船速

对于同一艘船而言,随着船速的提高船舶保向性将变好。

5. 其他因素

保向性将因水深变浅而提高,船舶顺风浪或顺流航行中保向性反而降低。

第一章思考题

1. 影响紧急停船距离的主要因素有哪些?
2. 试述船舶制动方法的种类及各自的优缺点。
3. 影响旋回圈大小的因素有哪些?
4. 试述旋回初径、进距、横距、滞距在实际操船中的应用。
5. 何谓船舶的动航向稳定性?如何判别?
6. 影响船舶保向性的因素有哪些?
7. 航进中船舶受到扰动后,船舶运动的稳定性有哪几种?船舶的航向稳定性指的是什么?

船舶操纵设备及其运用

船舶操纵设备也称为船舶运动控制设备,是指船舶本身所装备的推进器、舵、锚及系泊设备和装置。船舶在不同运动状态下,所运用的操纵设备不尽相同,航行状态下最常用的操纵设备是推进器和舵。船舶在进出港和靠离泊操纵时,推进器、舵、锚和系泊设备将综合应用。为了提高船舶在受限水域的操纵性能,有些船舶还配备了侧推器以及特种推进装置等。在船舶本身的操纵设备不能有效控制船舶运动状态的情况下,还需要港作拖轮的协助。

第一节 螺旋桨的作用

将主机发出的功率转换成推动船舶前进功率的装置或机构,统称为推进器。目前船舶最常使用的是螺旋桨(螺旋推进器)。螺旋桨转动时,除产生前后方向的推力或拉力以控制船舶的前后运动外,还会产生左右不对称的横向力使船舶产生偏转。

一、船舶的阻力

船舶在水面上以一定的航速航行,必须依靠主机发出的功率,驱动推进器产生推力,从而克服船舶本身所受的各种阻力。

船舶在水面上航行时,水和空气对船体有相对运动,会产生水动力和风动力。船体在前后方向所受的水动力和风动力也被合称为船舶阻力,它是影响船舶运输效率和运动性能的主要因素之一。

(一) 船舶阻力的构成

营运中的船舶所受的阻力总量 R_T 由基本阻力 R_0 和附加阻力 ΔR 两部分构成。

船舶阻力可表示为:

$$R_T = R_0 + \Delta R \quad (2-1-1)$$

(二) 基本阻力

基本阻力是指新出坞的裸船体(不包括附属体)在平静水面行驶时所受到的阻力。由摩擦阻力、兴波阻力、涡流阻力三部分组成,即

$$R_0 = R_F + R_W + R_E \quad (2-1-2)$$

1. 摩擦阻力 R_F (frictional resistance)

摩擦阻力的大小与船舶吃水、船体水下部分的湿水面积、船体表面的粗糙度和船速等因