

驾驶专业

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

# 船舶操纵与避碰

(船舶操纵)

 中国海事服务中心组织编审



人民交通出版社  
China Communications Press



大连海事大学出版社

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

# 船舶操纵与避碰

(船舶操纵)

Ⓜ 中国海事服务中心组织编审



人民交通出版社  
China Communications Press



大连海事大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶操纵与避碰. 船舶操纵 / 中国海事服务中心组织编写. -- 北京: 人民交通出版社; 大连: 大连海事大学出版社, 2012. 5

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材  
ISBN 978-7-114-09754-6

I. ①船… II. ①中… III. ①船舶操纵-资格考试-教材 IV. ①U675.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第072319号

中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

书 名: 船舶操纵与避碰(船舶操纵)

著 者: 薛满福 杲庆林

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.chinasybook.com.cn>

销售电话: (010) 64981400, 59757915

总 经 销: 北京交实文化发展有限公司

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.75

字 数: 427千

版 次: 2012年5月 第1版

印 次: 2012年5月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09754-6

印 数: 0001-5000册

定 价: 55.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

## 编委会成员

编委会主任 陈爱平

编委会常务副主任 郑和平

编委会副主任 郭洁平 李恩洪 侯景华

编委 韩杰祥 朱可欣 梁天才 王玉洋

陈国忠 梁军 郑乃龙 王长青

韩光显 葛同林 黄燕品 刘克坚

温宇钦



## 前 言

《中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则》(简称 11 规则)已于 2012 年 3 月 1 日起生效,新的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》也将于 2012 年 7 月 1 日开始实施。为了更好地指导帮助船员进行适任考试前的培训,进一步提高船员适任水平,在交通运输部海事局领导下,中国海事服务中心组织全国有丰富教学、培训经验和航海实际经验的专家共同编写了与《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》相适应的培训教材。本教材编写依据 STCW 公约马尼拉修正案,采用图文并茂的形式,改变了长期以来以文字为主的教材编写方式。本教材的创新模式对今后的船员适任培训具有重要的指导意义。

本套教材知识点紧扣考试大纲,具有权威、准确、系统、实用的特点,重点突出船员适任考前培训和航海实践需掌握的知识,旨在培养船员具备在实践中应用知识的能力,并可作为工具书帮助船员上船工作使用。

本套教材由航海英语、船舶操纵与避碰、航海学、船舶结构与货运、船舶管理(驾驶)、(高级)值班水手业务、高级值班水手英语,轮机英语、船舶动力装置、主推进动力装置、船舶辅机、船舶电气与自动化、船舶管理(轮机)、(高级)值班机工业务、高级值班机工英语,电子电气员英语、船舶电气、船舶机舱自动化、信息技术与通信导航系统、船舶管理(电子电气员)、电子技工业务、电子技工英语组成。

本套教材在编写、出版工作中,得到了各直属海事局、各航海院校、海员培训机构、航运企业、人民交通出版社、大连海事大学出版社等单位的关心和大力支持,特致谢意。

中国海事服务中心

2012 年 3 月



## 编者的话

本教材是根据中华人民共和国海事局制定的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》和《STCW 公约》马尼拉修正案编写的。适用于无限航区和沿海航区各个等级的海船船长、大副、二/三副适任证书考试培训使用。本教材也可作为航海院校师生的教学参考书。

本教材编写的指导思想是教材能够覆盖《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》的全部内容,帮助学员顺利地通过适任证书的考试,并尽可能考虑了海上实际船舶操纵过程中遇到的各种问题,以加强对船舶驾引人员海上实际操纵能力的培养。

本教材共分八章,第一章介绍船舶操纵性能;第二章介绍船舶的操纵设备及在操船中的运用;第三章介绍了包括风、流、受限水域等外界因素对船舶操纵的影响;第四章介绍了船舶港内操船的要领和锚泊操纵要领;第五章介绍了特殊水域的操船方法;第六章介绍了恶劣天气下的船舶操纵;第七章为应急操船;第八章为轮机概论,主要介绍船舶动力装置的基本操作原则。

本教材由薛满福、杲庆林主编,张秋荣主审。本教材共分八章,其中第一章由上海海事大学杲庆林编写,第二、四、六、七章由大连海事大学薛满福、房希旺编写,第三章由上海海事大学关克平编写,第五章由上海引航站胡建国编写,第八章由上海海事大学郭军武编写。全书最后由薛满福修改定稿。在教材的编写过程中得到了洪碧光教授的大力支持和指导,在此向其表示衷心感谢。中国海事服务中心的尹金岗参与了教材的主要审定工作。

为了便于读者的学习,在本书的编写过程中力求概念清楚、理论正确、重点突出、条理清晰、文字通顺、理论结合实际,并运用了相关的操船实例和碰撞案例。但由于编者水平有限,时间仓促,不足之处和差错在所难免,竭诚希望前辈、同行和读者批评指正。

编者

2012年3月

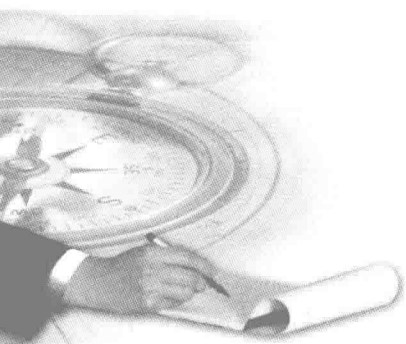


# 目 录

第一章 船舶操纵性能	1
第一节 船舶变速运动性能	1
第二节 船舶的旋回性能	6
第三节 航向稳定性和保向性	11
第四节 船舶操纵性指数	14
第五节 船舶操纵性能试验	18
第六节 IMO 船舶操纵性衡准的基本内容	23
思考题	24
第二章 操纵设备及助操设施	25
第一节 螺旋桨的作用	25
第二节 舵设备及其应用	43
第三节 锚设备及其应用	66
第四节 系泊设备	87
第五节 拖船的运用	104
思考题	118
第三章 外界因素对船舶操纵的影响	119
第一节 风对操船的影响	119
第二节 流对操船的影响	130
第三节 受限水域对操船的影响	132
第四节 船间效应	142
思考题	145
第四章 港内操船	147
第一节 进出港时操船	147
第二节 港内掉头	155
第三节 靠、离泊操纵	159
第四节 锚泊操纵	174
第五节 大型船舶操纵	186
思考题	188
第五章 特殊水域的船舶操纵	189
第一节 狭水道中的船舶操纵	189
第二节 桥区水域的船舶操纵	195

第三节	岛礁水域的船舶操纵·····	197
第四节	分道通航制和船舶交通管制区域及其附近水域的船舶操纵·····	201
第五节	冰区水域的船舶操纵·····	203
	思考题·····	208
<b>第六章</b>	<b>恶劣天气下的船舶操纵·····</b>	<b>209</b>
第一节	大风浪中的船舶操纵·····	209
第二节	避开热带气旋的船舶操纵·····	223
	思考题·····	225
<b>第七章</b>	<b>应急船舶操纵·····</b>	<b>226</b>
第一节	船舶碰撞前后的处置·····	226
第二节	船舶搁浅前后的措施·····	229
第三节	船舶发生火灾时的应急处置·····	233
第四节	救生与弃船·····	234
第五节	海上拖带·····	245
	思考题·····	248
<b>第八章</b>	<b>轮机概论·····</b>	<b>249</b>
第一节	常用轮机术语·····	249
第二节	船舶辅机常识·····	259
第三节	船舶动力装置的基本操作原则·····	264
	思考题·····	272
<b>参考文献</b>	·····	<b>273</b>





# 第一章 船舶操纵性能

船舶操纵性能

## 第一节 船舶变速运动性能

船舶通过改变主机转速从而改变螺旋桨的转速和方向(CPP螺旋桨通过改变螺距角),进行启动、变速、停车、倒车操纵时,船舶都具有维持其原来运动状态的特性(船舶惯性)。由于船舶惯性的作用,船舶从一种运动状态转变到另一种稳定运动状态的过程中需要经过一段时间的延续,在这段时间内船舶要航行一定的时间与距离。船舶运动惯性通常有两个指标来衡量:一是船舶完成变速过程中所航进的距离,称为冲程;另一是完成这段过程所需的时间,称为冲时。

### 一、船舶的启动性能

船舶由静止状态中开进车,使船舶达到与主机功率相对应的稳定速度所需的时间和航进距离,称启动惯性。为保护主机,由静止状态开进车时,转速应视船速的逐步提高而逐渐增加,用车时先开低转速,在船速达到与转速相对应的船速时再逐级加大转速。在船舶启动进车时,促使船舶产生加速运动的惯性力是推力  $T$  与阻力  $R$  之差。在启动之初,由于  $T > R$ ,船舶作加速运动,当经过时间  $t_0$  后,推力  $T_0$  和阻力  $R_0$  达到平衡,在此期间,船舶航进的距离也是随速度一起增大,当经过时间  $t_0$  时船舶航行距离为  $S_0$ ,并以  $v_0$  作匀速运动。此时,可用  $t_0$  和  $S_0$  表示启动性能的优劣。

若船体前进方向的附加质量  $m_x$  近似取为船体质量  $m$  的  $1/5$ ,则船舶启动后达到定常速度  $v_0$  所需的时间  $t_0$  以及航进的距离  $S_0$ ,可用下列近似式表示

$$t_0 = 0.004 \frac{\Delta v_0}{R_0} \quad (1-1-1)$$

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





式中:  $t_0$  单位为 min;  $S_0$  单位为 m; 排水量  $\Delta$  单位为 t;  $v_0$  单位为 kn;  $R_0$  为船舶达到定常速度前进时的阻力, 单位为 t。

由此可见, 船舶由静止状态进车, 达到相应稳定船速的前进距离  $S_0$  与  $\Delta v_0^2$  成正比,  $S_0$  与  $R_0$  或  $T$  成反比。

根据经验, 满载船舶由静止逐级加车, 速度达到海上速度时, 所航进的距离  $S_0$  约为 20 倍船长, 轻载时约为满载时的 1/2 ~ 2/3 (即 10 ~ 13 倍船长)。

## 二、船舶的减速、停车惯性

以某一速度航进中的船舶, 从下令停车到船舶对水停止移动所需的时间和船舶滑行的距离, 称为停车惯性。实船试验时, 由于船舶对水停止移动不易观察, 一般以船舶维持舵效最小速度为标准来计算, 万吨级船可取为 2kn, 大型船舶可取为 3.2kn。主机停车后, 刚开始时, 由于船速较高, 阻力也大, 速度下降率很高; 随着船速下降, 速度下降率变小, 终速为零。

### (一) 停车冲程的理论估算法

前进中的船舶减速以及停车时, 船舶直线运动方程式为

$$(m + m_x) dv/dt = T_1 - R \quad (1-1-3)$$

式中:  $T_1$  为与减速后的主机转速相对应的前进推力, 停车时  $T_1$  为 0。

英国 Topley 船长推导出减速停车时船舶运动的下列近似表达式。主机转速降低, 船舶减速时, 船舶从初速  $v_0$  减至与降低后的主机转速相对应的定常速度的过程中, 某一时刻的船速以及在此期间船舶前进的距离  $S$  为

$$v = v_1 + (v_0 - v_1) \times 2^{-t/c} \quad (1-1-4)$$

$$S = v_1 t + \frac{C(v_0 - v_1)(1 - 2^{-t/c})}{0.693 \times 60} \quad (1-1-5)$$

式中:  $C$  为减速时间常数(船舶停车后船速每递减 1/2 所需的时间), 单位为 min。  $C$  值随船舶排水量的不同而不同。  $C$  越小, 减速越快, 可由表 1-1-1 查出。  $v_0, v_1$  单位为 kn;  $t$  单位为 min;  $S$  单位为 n mile。

减速时间常数表

表 1-1-1

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		

### (二) 停车冲程经验估算式

主机停车操作( $v_1 = 0$  时), 从操作时起至船舶停止的过程中, 某一时刻  $t$  的船速  $v$  及其在此期间船舶滑行的距离  $S$ , 以及停止距离  $S_0$  为

$$v = v_0 \cdot 2^{-t/c} \quad (1-1-6)$$





$$S = 0.024C \cdot v_0(1 - 2^{-v/c}) \quad (1-1-7)$$

$$S_0 = 0.024C \cdot v_0 \quad (1-1-8)$$

式中:  $S_0$  为停车冲程(n mile);  $v_0$  为船舶停车时初速(kn);  $C$  为减速时间常数(min)。

### (三) 停车冲程实船经验数据

以常速航进中的一般船舶, 主机停车后船速达到 2kn 时, 其停车冲程约为船长的 8 ~ 20 倍, 而 VLCC 满载时, 从海上常速中停车达到余速 3kn 时, 停车冲程约为船长的 23 倍。

## 三、船舶倒车停船性能及其影响因素

船舶紧急停船的距离是衡量主机制动能力的重要参数。船舶主机从全速前进下令全速后退, 从发令起到船舶对水停止移动所需时间及船舶前冲的距离, 称为倒车惯性。这一距离即通常所称的倒车冲程, 亦称为最短停船距离(Shortest stopping distance)或紧急停船距离(Crash stopping distance)。

全速前进中的船舶进行紧急制动时, 为了不使主机产生过大应力而导致主机损坏, 通常应在主机转速降低后才能进行倒车启动。主机类型不同, 制动方法与操作所需时间也不同。柴油机在紧急制动时, 在发出倒车令后, 主机停止供油, 在主机转速降至额定转速的 25% ~ 35%, 航速降至全速的 60% ~ 70% 时, 方可将压缩空气通入气缸强迫主机停转, 然后再用压缩空气进行倒车启动。当船速较低时, 可立即进行制动, 马上完成倒车启动。一般柴油机从前进三到后退三换向时间约需 90 ~ 120s。汽轮机的换向时间较长约需 120 ~ 180s。而蒸汽机的换向时间最短约为 60 ~ 90s。

### (一) 倒车停船时间和冲程的估算

#### 1. Lovett 式估算法

假定主机倒转的同时就给出与倒车功率成比例的倒车拉力, 并且设船体阻力与速度平方成正比变化, 船舶的附加质量为船体质量的 1/5, 倒车拉力为正车推力的 90%, 可得出下列关系式

$$t \approx 0.00089 \Delta v_0 / R_0 \quad (1-1-9)$$

$$S \approx 0.0121 \Delta v_0^2 / R_0 \quad (1-1-10)$$

式中:  $S$ ——最短停船距离(m);

$t$ ——冲时(min);

$\Delta$ ——船舶排水量(t);

$v_0$ ——主机倒车时的船速(kn);

$R_0$ ——船速为  $v_0$  时的阻力。

#### 2. 倒车冲程的经验估算法

倒车冲程也可应用经验估算法计算。主机倒车后船速随时间变化关系可近似认为是一匀减速过程, 如图 1-1-1 所示。倒车冲程的大小就是速度曲线与时间轴围成的面积。即

$$S = \int_0^{t_s} v \cdot dt = C v_k \cdot t_s \quad (1-1-11)$$

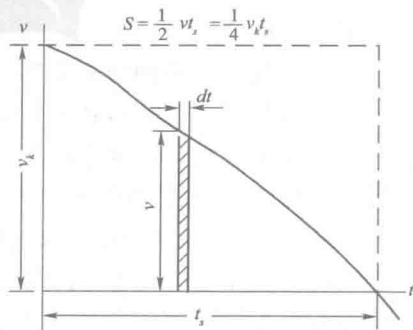


图 1-1-1 主机倒车后船速随时间的变化





式中:  $v_k$  为倒车时船舶初速(kn);  $t_s$  为倒车停船时间(s);  $C$  为系数,一般货船  $C$  取为 0.25 ~ 0.27,大型油轮取 0.27 ~ 0.29,  $S$  为紧急停船距离(m)。

大型油轮如停船时间单位用 min,则紧急停船距离的近似式可写成

$$S = 16v_k \cdot t_m \quad (1-1-12)$$

使用以上两个公式时,可不必考虑船舶主机种类和装载状态。

### 3. 力学估算法

假定主机倒转的同时就给出与倒车功率成比例的倒车拉力,而且主要依靠倒车拉力拉停船舶,并不考虑船体所受的阻力。因此本法仅适用于船舶低速航行时估算最短停船距离。要使以初速度为  $v_0$  的船舶停止前进,其动能损失量等于倒车拉力做功,即

$$(m + m_x)v_0^2/2 = S \cdot T_p$$

$$S = \frac{\Delta k_x v_0^2}{2gT_p} \quad (1-1-13)$$

停船过程中,船舶动量变化等于冲量,即

$$(m + m_x)v_0 = T_p \cdot t_s$$

$$t_s = \frac{\Delta k_x v_0}{gT_p} \quad (1-1-14)$$

式中:  $\Delta$ ——船舶排水量(t);

$m$ ——船舶质量;

$m_x$ ——船舶前进方向的附加质量;

$g$ ——重力加速度(9.8m/s<sup>2</sup>);

$k_x$ ——船舶前进方向的虚质量系数;

$T_p$ ——倒车拉力(t),估算时取主机倒车功率(马力)的1%;

$v_0$ ——船舶倒车时的船速(m/s)。

### (二) 实船试验数据

除采用上述公式计算船舶倒车惯性之外,实际中应尽可能取得在不同状态下实船试验数据。

据统计一般万吨级船舶倒车冲程约在 6 ~ 8 倍船长;5 万吨级货轮(内燃机),倒车冲程约为 8 ~ 10 倍船长;10 万吨级油轮(汽轮机),倒车冲程约为 10 ~ 13 倍船长;15 ~ 20 万吨级油轮(汽轮机),倒车冲程约为 13 ~ 16 倍船长。现代大型船舶船速快,倒车冲程明显增大,操船时应特别引起重视。

### (三) 船舶紧急停船性能及其影响因素

对于通常的右旋式 FPP 单车船,倒车制动时,船舶在减速停船的过程中船首不断向右偏转。在其他条件相同时,在倒车的开始阶段,空载船较满载船右偏角大,但满载大型船舶,停船时间长,最终首向偏转也较明显。

实船倒车制动试验时的运动轨迹是一曲线,如图 1-1-2 所示。试验时实际所测得的最短停船距离是船舶运动轨迹的长度,即图中曲线的长度,称为制动行程  $R_t$ (Track reach)。船舶重心沿原航向方向所滑行的距离,称为制动纵距  $R_h$ (Head reach)。船舶重心偏离原航向的横向距离称为制动横距  $R_s$ (Side reach)或称偏航量。倒车制动时,船首向偏离原航向的角度称为首



偏角或偏航角。

船舶压载时偏航角和偏航量通常较小,满载时,停船时间长,偏航量和偏航角大。

船舶紧急停船性能是指在冲程试验条件下,以海上船速行驶的船舶,进行倒车制动后,在允许的偏航量和偏航角范围内,能否迅速停船的性能。影响紧急停船距离的因素主要有:

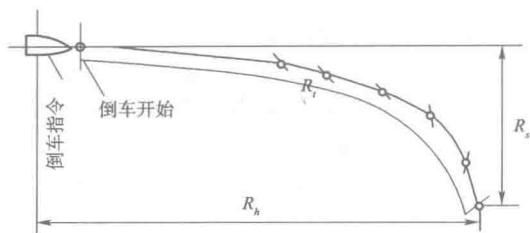


图 1-1-2 船舶倒车制动时的运动轨迹

#### 1. 主机倒车功率、换向时间

吨位、载荷状态等相近的船舶,主机倒车功率越大,紧急停船距离越小。大型船舶倒车功率虽比小型船舶大,但每吨排水量所占主机功率小,而且大型船舶(18 万 DWT 以上)大多配备的是汽轮机,由于其换向时间长,倒车功率占常用功率比例低,所以大型船舶紧急停船距离明显增大。

#### 2. 推进器种类

CPP 船“换向”操作时间短,通过调整螺距角和螺距大小即可在较短时间内产生最大的拉力。在其他条件相同时, CPP 船舶的最短停船距离一般约为 FPP 船的 60% ~ 80%。

#### 3. 排水量

船速和倒车拉力相同时,排水量越大,紧急停船距离越长。压载时的倒车冲程为满载时的 40% ~ 50% 左右。应注意压载时的停车冲程约为满载时的 80%。

#### 4. 船速

若其他条件相同,船速越大,冲程越大。

#### 5. 其他因素

顺风、流时冲程增大,顶风、流时冲程减小。浅水中船舶阻力增加,冲程减小。船体污底严重,阻力增加,紧急停船距离相应减小。

## 四、船舶制动方法及其适用

### (一) 倒车制动法

通过倒车产生强大的拉力进行制动。不论船型、船速如何,也不论在港内或港外水域,均可采用该法。应注意的是,重载大型船舶在狭窄航道或港内倒车时,由于出现较大的偏航量和偏航角,易发生事故,故应谨慎使用。

### (二) Z 形操纵制动法 (Zig zag maneuver)

直航中的船舶通过左右来回操舵,同时减速、倒车,利用倒车拉力和旋回中速度下降的特点,将船尽快停住的方法。该方法的优点在于能保证船舶较少偏离原航向,而且由于采用分阶段降速的方法有利于维护主机。该方法对于大型船舶、方形系数较大的船舶,或在深水域中初速度较高时尤为有效。而在较窄水域或航道中不宜使用。方法如下:

- (1) 左满舵( $\delta = 40^\circ$ ),备车;
- (2) 当船舶向左改向  $20^\circ$  时,前进三;
- (3) 当船舶向左改向  $40^\circ$  时,右满舵;
- (4) 当船舶向左改向达最大时,前进二;



- (5) 当船舶回到原航向时,左满舵;
- (6) 当船舶向右改向达最大时,前进一;
- (7) 当航向再次回到原航向时,右满舵,后退三。

### (三) 满舵旋回制动法

利用船舶满舵旋回中,船速下降明显的特点,降低船速的方法。该方法对于大型船舶,方型系数大、船速较高时较为合适,但要求当时有足够的操船水域。

航行中的船舶需紧急避让时,选择车让还是舵让,除考虑当时有无他船影响和足够的操船水域外,主要根据船舶当时的速度来决定避让行动。如当时船速条件下满舵旋回时的最大进距小于倒车制动纵距,应考虑采用舵让。反之,如满舵旋回的最大进距大于倒车制动纵距,则应车让。由于船舶旋回圈大小随船速提高影响并不明显,但倒车制动纵距则急剧增大。因此在当时操船水域允许时,一般低速时采用车让,高速时采取舵让。

### (四) 拖锚制动法

拖锚制动法一般只适用吨位较小的船舶,而且抛锚时船速仅限于低速(2~3 kn)。大型船舶由于锚机的刹车力不足,不宜采用这种方法。

### (五) 拖船协助制动法

一般船舶当船速低于5~6kn时,可根据船舶当时吃水情况配备相应数量的拖船,利用拖船的作用可有效控制船舶进行制动。

### (六) 辅助装置制动法

作为研究开发项目,通过一些辅助装置如:在水中拖曳类似海锚的物件;在舷两侧增设展开的阻力鳍(Flap);英国船舶技术研究所提出的在船首开设一通道(Duct),阻止流入的水以产生水阻力等。船舶在需要时可以运用这些辅助装置以增加运动阻力,尽快减低船速。这种方法在船舶以较高速度航进时才能发挥良好的效果。

上述六种方法能有效利用的速度和水域范围如表 1-1-2 所示。

制动方法适用范围综合表

表 1-1-2

船舶制动方法	有效速度范围	通用的环境
倒车制动法	高、低速均可	全部水域(大型船港内船速较大时不用)
Z形操纵制定法	高速	较宽水域
满舵旋回制定法	高速	较宽水域
拖锚制定法	低速	港内水域
拖船协助制定法	低速	港内水域
辅助装置制定法	高速	较宽水域或港内

## 第二节 船舶的旋回性能

船舶旋回性是船舶最基本的重要操纵性能之一,通常采用满舵时旋回初径  $D_T$  与船长  $L$  之比  $D_T/L$ ,即相对旋回初径来衡量。



## 一、船舶旋回运动的过程及其特征

船舶作舵旋回时根据其旋回过程中运动特征的不同,可将旋回运动分为三个阶段。

### (一) 转舵阶段

从开始转舵到舵转至指定舵角止为转舵阶段。在这个阶段,由于时间较短,船舶因运动惯性仍保持直线前进,随后船首出现向转舵一侧回转的趋势,船体开始出现向操舵相反一侧横移(反向横移),并会产生向转舵一侧少量横倾(内倾),船速也略有下降。

### (二) 过渡阶段

随着船舶斜航运动的出现,同时船首回转不断发展,漂角增大。在这个阶段,船舶一方面加速旋回,一方面由原来的反向横移逐渐转化为向操舵一侧的横移(正向横移),并且船体由原来的内倾转变成向操舵相反一侧横倾(外倾)。此外,随着旋回的发展船速明显下降。

### (三) 定常旋回阶段

在过渡阶段作用于船体的回转力矩和水阻尼力矩不断变化,最终达到平衡,船舶进入定常旋回阶段。在这个阶段,作用于船体的合力矩为零,转头角加速度为零,角速度达到最大值,船舶降速达到最大,船舶向外横倾角也趋于稳定,这时船舶围绕一固定的回转中心作匀速圆周运动。

## 二、旋回圈要素及影响旋回圈大小的因素

### (一) 旋回圈要素

定速直航(一般是全速)中的船舶操一舵角(一般是满舵)并保持此舵角,船舶将作旋回运动。旋回运动时船舶重心的轨迹,称为旋回圈。旋回圈及其要素如图 1-2-1 所示。

#### 1. 反移量 $L_k$

船舶在旋回的初始阶段向操舵相反一侧产生横移。船舶重心偏离原航向线,向操舵相反一侧横移的距离称为反移量(Kick)。通常,船舶全速满舵旋回,当船舶回转达到 1 个罗经点左右(约  $11.25^\circ$ )时,反移量达最大值,约为船长的 1%。但在实际操船时,更应注意船尾部向操舵相反一侧的船尾反移量,船尾反移量最大值约为船长的  $1/10 \sim 1/5$ ,比重心处反移量要大得多。船速快、舵角大,反移量则大。反移量的大小与舵角、船速、操舵速度、载重状态、船型等有关。

#### 2. 旋回初径 $D_T$

旋回初径(Tactical diameter)是指自初始航向改变  $180^\circ$ 时,船舶重心所移动的横向距离。

#### 3. 进距 $A_d$

进距(Advance)是指自初始航向转过任一角度时船舶重心所移动的纵向距离。初始航向改变  $90^\circ$ 稍后的进距称为最大进距。在船舶旋回资料中给出的进距是航向改变  $90^\circ$ 时的进距,也称为纵距,约为旋回初径的  $0.6 \sim 1.2$  倍。

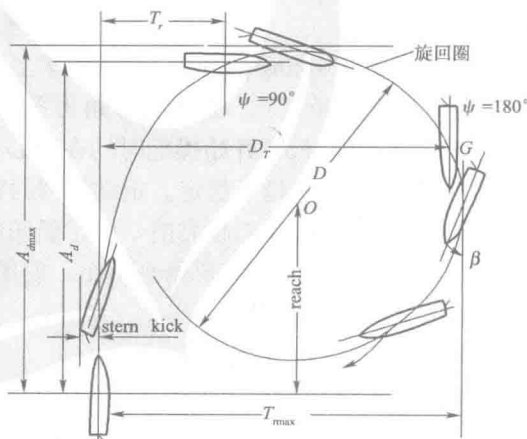


图 1-2-1 旋回圈及其要素

4. 横距  $T_r$ 

横距(Transfer)是指自初始航向转过任一角度时船舶重心所移动的横向距离。在初始航向改变  $180^\circ$  稍后,船舶偏离初始航向的横向距离达到最大,称为最大横距。通常,在船舶旋回资料中给出的横距是航向改变  $90^\circ$  时的横距,约为旋回初径的一半。

5. 定常旋回直径  $D$ (Final diameter)

船舶作定常旋回运动时,重心轨迹圆的直径即为定常旋回直径,约为旋回初径的  $0.9 \sim 1.2$  倍。

6. 滞距  $R_e$ 

从发令位置起,船舶重心至定常旋回曲率中心的纵向距离,称为滞距(Reach),也称心距。

7. 漂角  $\beta$ 

船舶旋回时,船舶首尾线与首尾线上任何一点的旋回切线速度  $v_i$  方向之间的夹角,称为该点的漂角(Drift angle),如图 1-2-2 所示。一般是指重心  $G$  处漂角  $\beta_G$ ,满舵旋回时,定常阶段的  $\beta_G$  约为  $3^\circ \sim 15^\circ$ 。

船舶首尾线上各点处的漂角值不相等。船尾部漂角  $\beta_s$  最大。漂角越大,旋回性能越好,旋回直径越小,降速越多,横倾角越大,转心也前移。船舶在浅水中旋回性比深水中差,所以浅水中漂角较深水中小。

8. 转心  $P$ 

船舶转舵后绕旋回曲率中心  $O$  的旋回运动,可以看成是两个方面的合成:一是船舶以切线速度  $v_i$  前进,另一则是船舶绕自身某一点为中心作自转,这一点就是转心  $P$ (Pivoting point)。

从几何学上讲,转心的位置是旋回中某瞬间的旋回中心至船舶首尾线的垂线的垂足点。 $P$  点处漂角为零,横移速度为零。

转心  $P$  的位置,在开始操舵时约在重心稍前处,随船舶旋回不断加快,转心  $P$  位置向前移动,在定常旋回阶段趋于稳定。定常旋回时转心约在船首柱后  $1/5 \sim 1/3$  船长附近处,漂角大、旋回性能好的船舶,转心越靠前。由于船舶前进中旋回时转心在重心之前,因此在旋回时船首向内偏移量比船尾向外偏移量来得小。船舶在后退中回转时,转心位于重心之后,大约与前进中回转时转心位置相对称。

## 9. 旋回中船速

船舶旋回过程中船速不断下降,主要是由于船舶斜航阻力的增大,此外,舵阻力、惯性离心力的纵向分力的增加,推进器效率的下降等原因都将引起船速下降。定常旋回阶段船速下降达最大并趋于稳定,一般可降速  $1/4 \sim 1/2$ 。定常旋回时的船速  $v_i$  与旋回初始船速  $v_0$  的比值  $v_i/v_0$  称为速降系数。图 1-2-3 所示为 Davidson 的试验结果。由图可知,旋回中船速下降与相对旋回初径  $D_r/L$  密切相关, $D_r/L$  越小旋回性能越好时,速降越明显,速降系数越小。因此,肥大型船舶旋回中速度下降比瘦削型船舶大。

## 10. 旋回时间

船舶旋回  $360^\circ$  所需的时间即为旋回时间。它与旋回初始船速、船舶排水量有密切关系。

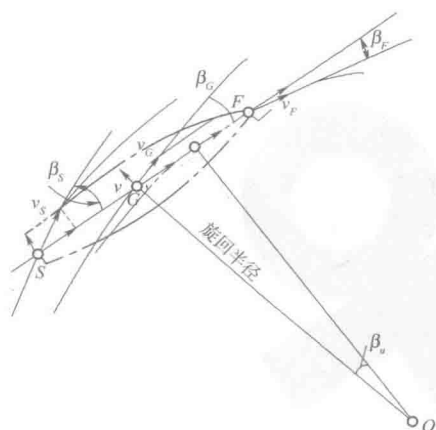
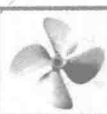


图 1-2-2 船舶首尾线上各点的漂角





船速越低、排水量越大,旋回所需时间越长。大型船舶比普通万吨级船舶旋回时间明显增加。此外,不同船型,不同舵角旋回时间也不相同。一般万吨船快速满舵旋回时间约为 6min,而大型船舶旋回时间几乎要增加 1 倍。

### 11. 旋回中横倾

船舶操舵后,船舶开始出现少量内倾,随后船舶由内倾变为外倾。在由内倾向外倾的过渡过程中,由于船舶横向摇摆惯性的原因,会出现最大外倾角  $\theta_m$ ,这是旋回的过渡阶段尤其应注意的危险现象。进入定常旋回阶段,船舶将稳定在一定常外倾角  $\theta_c$ 。

定常旋回时定常外倾角  $\theta_c$  可由下式计算

$$\tan\theta_c \approx \frac{v_t^2 \cdot GB}{gR \cdot GM} \approx \frac{v_t r \cdot GB}{g \cdot GM} \quad (1-2-1)$$

式中:  $GM$ ——初稳性高度(m);

$GB$ ——重心浮心间距(m);

$v_t$ ——定常旋回时切线速度(m/s);

$R$ ——定常旋回半径(m);

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ )。

所以,定常旋回外倾角  $\theta_c$  的大小与船舶定常旋回切线速度( $v_t$ )、角速度( $r$ )、重心浮心间距  $GB$  成正比,与船舶初稳性高度、重力加速度成反比。船的旋回直径越小,初稳性高度越低,航速越快,外倾角就越大。最大外倾角  $\theta_m$  的大小除与影响定常外倾角的因素有关外,还与操舵速度有关。操舵速度快,  $\theta_m$  则大。瞬时最大外倾角  $\theta_m$  约为定常外倾角  $\theta_c$  的 1~2 倍。

船舶在风浪中操舵转向,应选择使操舵引起的横倾与外力导致的横倾时机错开。如果在操舵旋回时出现较大的外倾角,应避免急速回舵或操相反舷舵,而应逐渐降速,同时逐渐减小所用舵角。

## (二) 影响旋回圈大小的因素

### 1. 舵角

在极限舵角范围内,舵角大小与旋回初径之间的关系是:舵角增大,旋回初径变小。在所操舵角为  $15^\circ$  以下时,舵角越大,旋回初径明显减小。所操舵角大于  $15^\circ$  时,随着舵角增加,旋回初径减小的幅度减小。这种影响从图 1-2-4 所示的试验结果中可以看出。

### 2. 操舵时间

操舵时间按 SOLAS 公约要求从一舷  $35^\circ$  至另一舷  $30^\circ$  不应超过 28s。一般船舶从正舵至一舷满舵大约需要 15s。操舵时间越长,心距、进距越大。

### 3. 船速

除船速很低或高速船高速航行中旋回之外,在一般商船速度范围内,船速对旋回圈大小影响很小。船速增加,旋回初径将稍微变大。但船速对旋回时间影响明显,船速快,旋回时间大大缩短。

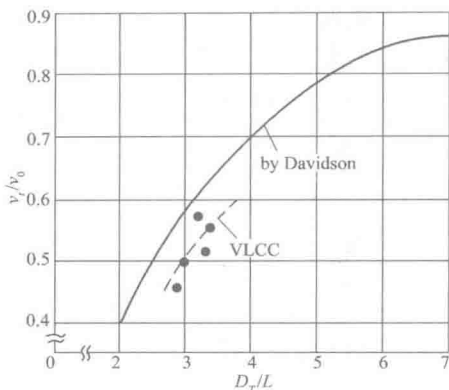


图 1-2-3 船舶旋回中的速降