

驾驶专业

新版

全国海船船员适任考试培训教材

# 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



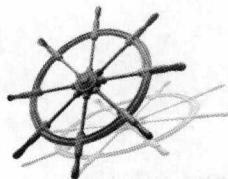
大连海事大学出版社

新版

全国海船船员适任考试培训教材

# 船舶操纵

中国海事服务中心组织编审



人民交通出版社

大连海事大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶操纵 / 中国海事服务中心组织编审. — 大连: 大连海事大学出版社, 2008.  
ISBN 978-7-114-07012-0

I. 船... II. 中... III. 船舶操纵 IV. U675

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第1144号

责任编辑: 姜永刚

封面设计: 姜永刚

版式设计: 姜永刚

出版发行: 人民交通出版社

地址: (100011)北京市东城区安定门内大街28号

网址: <http://www.chinastp.com> (中国水运图书网)

电话: (010) 6781400, 6789094

总发行: 北京人民交通出版社

经销: 北京人民交通出版社

印刷: 北京鑫正印刷有限公司

开本: 787×1092 1/16

印张: 16.75

字数: 423千字

版次: 2008年2月第1版

印次: 2008年2月第1次印刷

书号: ISBN 978-7-114-07012-0

定价: 9.00元

元

元

如有问题, 请向本社或各分社联系。

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶操纵/中国海事服务中心组织编审. —北京: 人民交通出版社; 大连: 大连海事大学出版社, 2008.3  
全国海船船员适任考试培训教材  
ISBN 978-7-114-07015-0

I. 船... II. 中... III. 船舶操纵 IV. U675.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 021975 号

书 名: 船舶操纵

著 者: 洪碧光 杲庆林 汤国杰 等

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> (中国水运图书网)

销售电话: (010)64981400, 64960094

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 人民交通出版社交实书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 16.75

字 数: 422 千

版 次: 2008 年 5 月 第 1 版

印 次: 2008 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07015-0

印 数: 0001 - 5000 册

定 价: 43.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》(简称 04 规则)已于 2004 年 8 月 1 日生效,新的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》也自 2006 年 2 月 1 日实施。为了更好地帮助、指导船员进行适任考前培训和进一步提高船员适任水平,在交通部海事局领导下,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。本教材的编写将改变长期以来船员适任培训使用本、专科教材的现状,消除由于教材版本众多所造成知识内容上存在的混淆和分歧,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,旨在培养船员在实践中应用知识的能力,并可作为工具书为船员上船工作使用。本套教材在着重于航海实践的同时,紧密结合现代船舶的特点,考虑到将来有关船舶技术的发展,教材内容涉及到最新的航海技术,与时俱进,进一步拓展船员的知识层次。

本套教材由航海学、船舶值班与避碰、航海气象与海洋学、船舶操纵、海上货物与运输、船舶结构与设备、船舶管理(驾驶)、船长业务、航海英语、轮机英语、轮机长业务、轮机工程基础、主推进动力装置、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、船舶管理(轮机)组成。

本套教材在编写、出版工作中得到中华人民共和国海事局、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  
2008 年 2 月



## 编者的话

本教材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》编写。适用于无限航区、近洋航区、沿海航区和近岸航区各个等级的海船大副、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,亦可作为船舶驾驶和引航人员以及有关其他人员的技术参考书。

本教材编写的指导思想是教材能够覆盖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操船中遇到的各种问题,以加强对船舶驾引人员在基础理论和海上操船能力的培养。

全书共分八章,第一章为船舶操纵基础知识,讲述船舶操纵的基本原理与操纵性的有关知识,第二章为船舶操纵设备及手段,介绍了船舶的车、舵、锚、缆等操纵设备及拖船等操纵手段的作用,第三章为航行环境对船舶操纵的影响,讲述包括风、流、浅水以及岸壁等航行环境因素对船舶操纵的影响,第四章为港内操船,阐述了系离泊操纵、锚泊操纵、系离浮筒操纵、进出船坞等基本方法和注意事项,第五章、第六章分别介绍了船舶在特殊水域以及大风浪中的操纵,第七章介绍了船舶在碰撞、搁浅、火灾、人员落水等紧急情况下的操船方法,第八章简单介绍了一些轮机方面的常识。此外,本书针对每一章,列出了部分练习题,供学员练习使用。

本教材由洪碧光、杲庆林、汤国杰教授主编。全书共分八章,其中第一章、第二章和第三章由洪碧光、卜仁祥、房希旺、何欣编写,第四、五、六章由杲庆林编写,第七章由席永涛编写,第八章由陈宝忠教授编写。南通航运职业技术学院的汤国杰和中国海事服务中心的朱耀辉参加了本书的主要审定工作,全书最后由洪碧光修改定稿。

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

2008年2月

# 目 录

绪 论	1
第一章 船舶操纵性基础	4
第一节 船舶的旋回性能	4
第二节 航向稳定性与保向性	12
第三节 船舶变速运动性能	16
第四节 船舶操纵性能试验及衡准	23
第二章 船舶操纵设备及其运用	29
第一节 螺旋桨的作用	29
第二节 螺旋桨的致偏效应	36
第三节 舵的作用	43
第四节 锚的应用	47
第五节 缆的应用	51
第六节 侧推器的作用	53
第七节 拖船的应用	58
第三章 外界因素对操船的影响	65
第一节 风对操船的影响	65
第二节 流对操船的影响	75
第三节 浅水对操船的影响	77
第四节 受限宽度对操船的影响	85
第五节 船间效应	90
第四章 港内操船	94
第一节 进出港操船	94
第二节 港内掉头	95
第三节 靠离泊操纵	97
第四节 系离浮筒操纵	110
第五节 其他情况下的系离泊	114
第六节 锚泊操纵	118
第七节 特种船舶的操纵	128
第五章 特殊水域的船舶操纵	135
第一节 狭水道船舶操纵	135
第二节 岛礁水域的船舶操纵	140
第三节 冰区水域的船舶操纵	143
第六章 大风浪中船舶操纵	149
第一节 大风浪中的船舶操纵	149



第二节  脱离热带气旋或台风时的船舶操纵.....	165
第七章  应急操船.....	167
第一节  碰撞前后的操船与处置.....	167
第二节  搁浅与触礁前后的操船与处置.....	169
第三节  人员救助操船和弃船.....	174
第四节  海上搜救与救助.....	177
第五节  海上拖带.....	181
第六节  火灾与爆炸后的操船与处置.....	185
第八章  轮机常识.....	187
第一节  船舶轮机术语的一般知识.....	187
第二节  船舶辅机知识.....	204
第三节  船舶动力装置的操作原则.....	216
船舶操纵模拟考题集.....	227
参考文献.....	258

06.....	.....	第二章
08.....	.....	第三章
14.....	.....	第四章
21.....	.....	第五章
23.....	.....	第六章
28.....	.....	第七章
29.....	.....	第三章
29.....	.....	第一章
32.....	.....	第二章
37.....	.....	第三章
42.....	.....	第四章
49.....	.....	第五章
54.....	.....	第四章
54.....	.....	第一章
59.....	.....	第二章
57.....	.....	第三章
110.....	.....	第四章
111.....	.....	第五章
118.....	.....	第六章
128.....	.....	第七章
132.....	.....	第五章
132.....	.....	第一章
140.....	.....	第二章
143.....	.....	第三章
149.....	.....	第六章
149.....	.....	第一章





## 绪 论

船舶在海上航行、进出港口、锚泊以及靠离泊等操纵过程中,需要操船人员根据船舶的操纵运动特性与当时外界环境条件,灵活运用车、舵、锚、缆、侧推器以及拖船等操纵设备或工具,及时高效地完成操纵任务,同时又必须保证人员、船舶、货物以及环境的安全。操纵指为了保证达到确定的目的而控制某种过程的组织方法。船舶操纵指在人、船、环境系统中,操船者利用船舶本身或其他手段(如车、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。

根据不同的操船环境和目的,船舶操纵的任务可大致分为港内靠离泊操纵、锚泊操纵、受限水域的操纵、开阔水域的操纵以及应急操纵等等,因操纵目的、可使用的手段和设备及影响操船的外界因素的不同,船舶操纵特性表现出很大的差异。为了安全、准确、及时地达到操纵目的,操船者必须掌握船舶在各种环境条件的操纵特性、操船设备的作用与局限性以及操纵的基本方法和操纵要领。

### 一、船舶操纵任务

作为操纵目的而必须保持或改变的那个量称为被控坐标,根据操纵目的的不同,被控坐标有船舶运动的船首方向、船舶运动的转首角速度、船舶运动的纵向位置、船舶运动的纵向速度、船舶运动的横向位置、船舶运动的横向速度等。船舶操纵的一般任务根据操纵目的和操纵特点可以分为保向和改向操纵、保持航迹操纵、保持或改变位置操纵等。操纵任务一般可分解成若干子任务,为了完成某一子任务,需要进行必要的观察、判断,并充分利用船舶本身或其他设备的特性和功能。

#### 1. 保持航向(course keeping or steering)

海上运输的目的是以最短的时间消耗和成本消耗完成运输任务,因此,保持距离最短的直线运动(在平面内)是最基本的要求。根据航海学知识,我们知道恒向线并不是距离最短的,但目前绝大多数运输船舶的航线都是由若干恒向线构成的,保向操纵是船舶最基本的操纵。

#### 2. 改变航向(manoeuvring or course changing)

当船舶到达转向点或需要避开障碍物或其他船舶时,需要从一个给定航向改驶到另一航向。改变航向的任务可以分解为转向操纵以及迅速稳定在新航向的操纵子任务,后者即为保持航向。

#### 3. 改变船速(speed changing)

船舶在宽阔水域航行时,通常的操纵任务不涉及船速。但如果为了避碰需要、进出港操纵、锚泊操纵或紧急情况下,需要及时改变船速以保证船舶安全或达到操纵目的。

#### 4. 保持航迹(tracking control)

为了安全或经济目的,船舶有时需要保持精确的平面运动轨迹(直线或曲线),例如狭水道航行或大洋航行,有时甚至需要精确控制船舶到达航迹上某一点的时间,例如在狭水道乘潮过浅点或接引航员。保持航迹的任务相对复杂,可分解为参考船位信息、保持航向和改变航向、控制船速等子任务。







### 5. 保持姿态(configuration stabilization)

船舶姿态包括船位、船速、航向等所有的自由度,控制或保持船舶姿态是船舶最复杂和最困难的操纵。例如,靠泊操纵任务需要将船舶从水面上的一点开往另一点,但航迹受到水域的限制,并要求船舶最终停在终点且保持船首方向。上述任务并不总是可行的,需要借助更多的操纵设备,在一定的外界条件才可以完成。

船舶姿态保持也可分解为参考船位信息、保持和航向、控制船速等基本任务。

## 二、船舶操纵原理

考察船舶操纵过程可知,通常船舶操纵人员从船上的显示器获得的航向(有时也包括航迹)与实际航向(或航迹)之间都有一个差别,为纠正这一差别,操船人员发出舵角指令,并要求操舵工操动舵轮。舵机接到舵轮指令后,转动舵,于是舵被转到某一需要的舵角,同时也将实际舵角值传送到显示器上,供操船人员了解。由于舵角存在,而引起作用在船舵系统上的水动力,从而使船改变航向(或航迹),并且把船的实际航向值送至显示器,以供进一步操纵使用。可见,船舶实际的操纵过程形成了一个闭合回路,称为闭环控制(图1)。

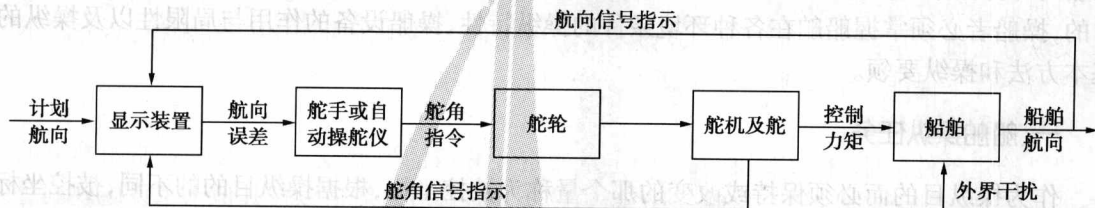


图1 船舶操纵运动(航向)控制回路

以上所述是改变航向的闭环过程。此外,还有一个改变船速的闭环过程。当船舶在海湾、内海或者进入停泊地点以及在港内系泊时,经常要相当频繁地使用主机来控制速度大小,以避免碰撞或触礁,确保航行安全。船舶实际航行过程中,操船者就是通过这两个闭环系统来改变船舶的运动状态的。同时,船舶航行自动控制也是通过这种原理来实现的。

## 三、船舶操纵设备

船舶操纵人员是通过船舶操纵设备对船舶的运动状态进行控制的,操纵任务能否完成或其难度与操纵对象和操纵设备的性质以及必要完善程度之间存在着联系。

常规的船舶操纵设备主要指推进装置和舵。前者包括主机以及推进器,俗称为车,能够控制船舶的前进速度,后者为改变船首方向的主要设备。从车、舵的运用幅度的角度出发,可以将船舶操纵分为常规操纵和应急操纵两类。常规操纵包括小舵角保向、中舵角转向以及加速、减速操纵。应急操纵包括满舵旋回操纵和全速倒车停船操纵。

在船舶速度较低尤其是倒车操纵时,操舵往往不能有效控制船首向,此时可使用的操纵设备还包括侧推器、拖船甚至锚、缆等设备。在用车不能控制船速(或不能安全控制)的情况下,也需要借助拖轮甚至锚等其他操纵设备,以保证安全。船舶在锚泊、系离浮筒、靠离泊、进出船闸的复杂的操纵过程中,仅仅利用车舵是不能完成操纵任务的,需要根据具体的目的以及当时环境条件使用各种有效的操纵设备。

任何操纵设备都有其各自的作用效果和能力极限,其效果或极限与控制设备的特性、船舶运动状态、外界环境条件的多种因素有关。例如,锚机、缆车负荷以及锚链或缆绳的强度是有



限的,舵的控制效果随船舶进速的降低和螺旋桨转速的降低而减弱,侧推器以及拖轮的控制效果则随船速的提高而降低,等等。操船人员必须充分了解这些操纵设备的特性以及影响其控制效果的其他因素,以保证操纵安全。

#### 四、船舶操纵研究

由于船舶航行环境比较复杂,对船舶运动状态影响较大,加上船舶本身尺度和惯性较大,操纵设备性能存在局限性,船舶的操纵安全需要良好的操纵技术加以保证。因此,研究船舶操纵对船舶运输的效率和安全性具有重要的意义。

##### 1. 研究任务

从安全的角度出发,船舶操纵研究的目的或任务是:

###### 1) 明确船舶操纵特性

船舶操纵特性包括船舶操纵运动中的船体受力和运动的基本规律,车、舵、锚、缆等操纵设备及其他助操设施的作用以及局限,外界因素包括:风、浪、流、浅水、岸壁效应或船间效应对船舶操纵性能的影响等。

###### 2) 研究操纵方法

操纵方法研究是针对各种常规操纵以及应急操纵任务,根据船舶操纵运动规律,研究在不同的环境条件下保证安全操纵的基本程序、方法和操纵要领。

###### 3) 操纵安全评价

建立给定条件的船舶操纵过程安全的定量或定性分析的模型或方法,以便对船舶操纵的安全性进行评价,最终制定安全措施,或为船舶设计、港口设计、航道以及其他水工设施规划等提供决策依据。

##### 2. 研究方法

目前,研究船舶操纵的方法主要包括以下几种:

###### 1) 实船试验

实船试验是对实船操纵的运动状态进行测量、记录、分析,其结果直观、可靠。但实船试验成本较高,多次反复试验的可行性小。另外,某些研究进行实船试验是不可能的,例如安全性的研究或工程设计阶段的通航问题。

###### 2) 船模实验

船模实验是根据一定比例建立物理的模型,通过物理模型的操纵以及对结果的测量、记录、分析,最后得出表征实船操纵运动规律的参数。船模实验的成本也较高,而且针对性较强,仅在一些造船及相关研究机构中采用。此外,由于存在尺度效应(船模与实船的差异),某些研究的结果尚不够理想,例如大风浪中的船舶操纵,与实际也存在一定差距。

###### 3) 数模仿真

数模仿真是建立描述船舶操纵运动的数学模型,然后通过计算机解算,模拟出实船的操纵运动过程。数模仿真的好处是运行成本较低,可以反复操作,且不涉及事故损失。随着计算机技术的发展和数学模型的研究和积累,这种方法的应用越来越广泛。但数模仿真的结果依赖于其模型的精度,而且其模型的建立也需要实船或船模实验的数据支持。

###### 4) 经验总结

船舶操纵人员的经验总结是船舶操纵研究的一种重要的方法,也可结合理论进行分析,经验丰富的引航员、船长或驾驶员的知识是非常重要的参考资料。其缺点是总结大多是定性的,很难直接用于定量研究。



# 第一章 船舶操纵性基础

船舶在水中运动过程中,无时不受到外界因素的影响,为了克服这些影响,需要对船舶进行操纵。为了保持或改变船舶的运动状态,也需要对船舶进行操纵。操船者更关心的是实施操纵后船舶对操纵的反应情况,即船舶的运动性能如何。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 (maneuverability)。船舶是否具有好的操纵性能,对于能否安全而高效率地操纵船舶具有重要的影响。

## 第一节 船舶的旋回性能

在实际操船中,对舵的使用大致可分为小舵角的保向操纵,中舵角的转向操纵及大舵角的旋回操纵三种。由于初始条件以及操舵方式的不同,船舶在操舵后船首向的响应也各不相同,目前常用初始转首性能 (initial turning ability)、偏转抑制性能 (yaw checking ability) 以及旋回性 (turning ability) 来描述船舶操舵后的改向性能。操船者最为关心的是船舶的旋回性能。

正舵直航的船舶操一舵角进入斜航和回转运动状态后,船舶运动可以看作直航运动与旋转运动叠加,由于旋转运动,船体上不同点的运动方向 (切线或矢量方向) 和大小都不相同,通常采用船体上某一特定点 (例如重心) 的运动要素来描述船舶的运动状态。除了纵向速度  $u$ 、横向速度  $v$  以及转首角速度  $r$  以外,表征船舶斜航与回转运动状态的运动要素还有转心  $P$ 、漂角  $\beta$ 。

### 1. 转心 (pivoting point)

操纵运动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而旋转的运动的叠加,这一点就是转心,通常以  $P$  代表之,如图 1-1-1 所示。从几何学上讲,转心  $P$  的位置是由船舶运动轨迹曲率中心  $O$  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。

船舶的运动状态保持不变时,转心  $P$  稳定于某一点,对于不同船舶而言,在前进中转向,该点的位置大约在离船首柱后  $1/3 \sim 1/5$  船长处,船处于后退中,转心位置则在船尾附近。

如果船舶整体横移速度较大而旋转速度较小,转心也可能不在船体上,而在首尾线延长线上的某一点,极端情况下转心  $P$  可能位于无穷远处,即船舶整体横移而旋转速度为零的情况。

### 2. 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做漂角,用  $\beta$  表示,如图 1-1-1 所示。

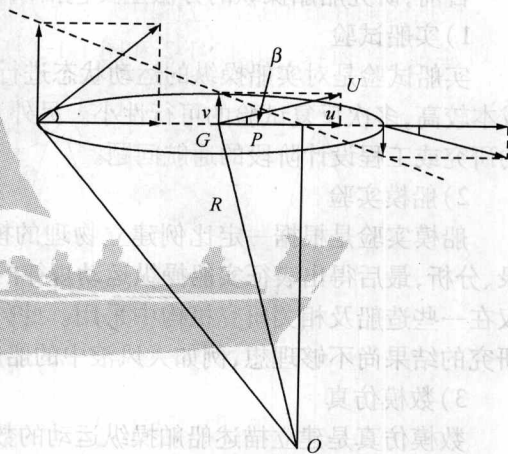


图 1-1-1 转心与漂角





如果前进中的船舶有旋转运动,则首尾线上不同点的漂角是不同的。转心前后的横向运动方向相反,因此漂角的方向也相反,但与转心距离相等的点的漂角大小相等。在船尾处,由于其离转心距离最远,横移速度最大,因此漂角也最大。

如果船舶仅有斜航运动而没有旋转运动,即  $r=0$ ,则船体上各点的线速度相同,漂角也相同。

通常所说的漂角是指船舶重心处的线速度  $U$  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。一般船舶前进中自力操纵时,重心处的最大漂角大约在  $3^\circ \sim 15^\circ$  之间。船舶在极低速下运动时,即纵向速度  $u$  接近为零(在有拖轮或侧推器助操,或在风中漂移时),漂角较大。如果船舶没有进速而原地旋转或横移,即  $u=0, v \neq 0, r \neq 0$ ,则漂角可以达到  $90^\circ$ ,且首尾线上不同点的漂角大小相等,但转心前后的漂角方向不同,如果转心不在船体上,则船舶首尾线上不同点的漂角大小和方向均相等。

## 一、船舶旋回性

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,它是船舶操纵性当中极为重要的一种性能。船舶旋回性(Turning ability)最能代表船舶的变向性能,历史上对旋回性的研究也是最多的。通过研究船舶旋回运动,可以获得多种船舶操纵运动的特征参数。船舶避碰、靠离泊以及掉头操纵等都涉及船舶旋回运动性能,故操舵者有必要对船舶旋回性进行深入了解。

### 1. 船舶旋回的运动过程

船舶以一定航速直进当中操某一舵角并保持之,船舶将进入旋回过程。旋回时间(指船舶旋回  $360^\circ$  所需的时间)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 6min,而超大型船舶的旋回时间则几乎要增加一倍。

根据船舶在旋回运动过程中所受外力特点之变化,以及运动状态之不同,可将船舶旋回过程划分为三个阶段,如图 1-1-2 和图 1-1-3 所示。

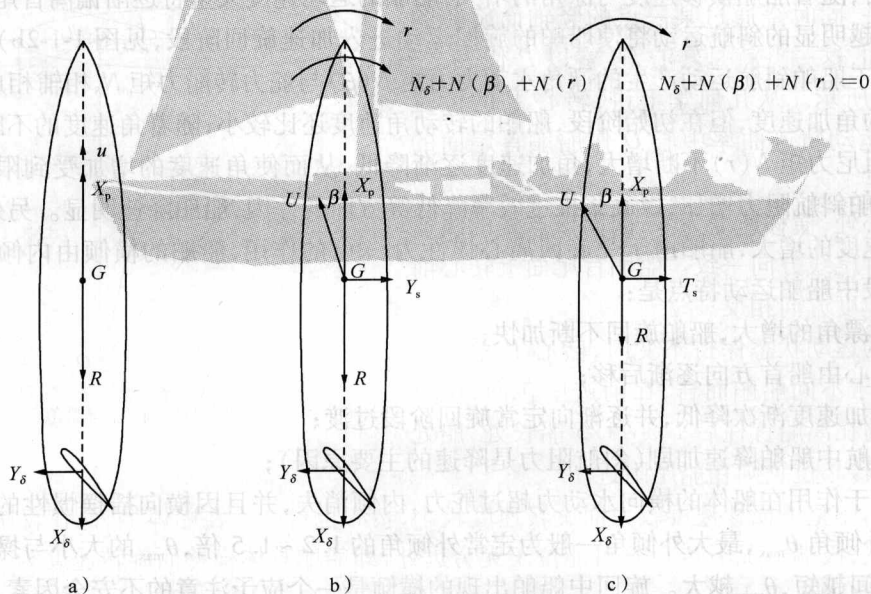


图 1-1-2 旋回运动过程



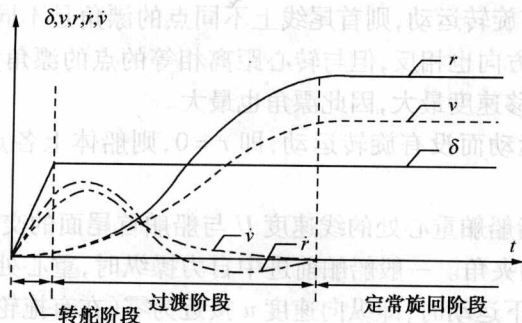


图 1-1-3 旋回过程中运动参数变化

## 1) 第一阶段

转舵阶段指从转舵开始到舵转至规定角度为止,时间很短,通常船舶不超过 15s。这一阶段的受力特点是,船舶操舵后,由舵角引起横向力和力矩,使船产生横向加速度和回转角加速度,见图 1-1-2a)。

由于船体本身的惯性很大,还来不及产生明显的横向速度和回转角速度,船舶重心  $G$  基本上沿原航向滑进并有向操舵相反一舷的小量横移,而船尾出现明显的向操舵相反一舷的横移。这一阶段也称为横移内倾阶段,运动特点是:

- (1) 船舶产生一定的漂角斜航;
- (2) 船尾出现明显外移;
- (3) 转心  $P$  在船首附近,也可能在首尾线延长线上;
- (4) 降速不明显;
- (5) 船舶还将因舵力位置较船舶重心位置低而出现少量的向操舵一舷的横倾(内倾)。内倾角大小与船舶初稳性  $GM$  值有关。

## 2) 第二阶段

操舵后,随着船舶横移速度与漂角的增大,船舶的运动速度矢量将逐渐偏离首尾面而向外转动,越来越明显的斜航运动将使船舶的旋回运动进入加速旋回阶段,见图 1-1-2b)。在这一阶段中,由于船舶斜航运动产生的漂角水动力力矩  $N(\beta)$  与舵力转船力矩  $N_\delta$  相辅相成,使船舶产生较大的角加速度,但在初始阶段,船舶的转动角速度还比较小;随着角速度的不断提高,船舶旋回的阻尼力矩  $N(r)$  不断增大,角加速度逐渐降低,从而使角速度的增加受到限制。另一方面,由船舶斜航阻力增加、螺旋桨推进效率降低等方面的原因,船舶降速明显。另外,随着船舶旋回角速度的增大,船舶由于受旋回离心惯性力(矩)的作用,船舶的横倾由内倾转变为外倾。该阶段中船舶运动特点是:

- (1) 随漂角的增大,船舶旋回不断加快;
- (2) 转心由船首方向逐渐后移;
- (3) 角加速度渐次降低,并逐渐向定常旋回阶段过渡;
- (4) 斜航中船舶降速加剧(斜航阻力是降速的主要原因);
- (5) 由于作用在船体的横向水动力超过舵力,内倾消失,并且因横向摇摆惯性的存在将产生最大的外倾角  $\theta_{\max}$ ,最大外倾角一般为定常外倾角的 1.2 ~ 1.5 倍, $\theta_{\max}$  的大小与操舵时间有关,操舵时间越短, $\theta_{\max}$  越大。旋回中船舶出现的横倾是一个应予注意的不安全因素,尤其是航速较高的船舶。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,因此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舷舵,否则会进一步增大外倾角,威胁船舶的安全。

### 3) 第三阶段

随着旋回阻尼力矩的增大,当船舶所受的舵力转船力矩  $N_\delta$ 、漂角水动力转船力矩  $N(\beta)$  和阻尼力矩  $N(r)$  相平衡时,船舶的旋回角加速度变为零,船舶的旋回角速度达到最大值并稳定于该值,船舶将进入稳定旋回阶段,因此该阶段也称为定常旋回 (steady turning) 阶段,见图 1-1-2c)。这一阶段的特点是:

(1) 船舶的旋回角加速度为零,旋回角速度恒定不变。

(2) 船舶旋回中漂角趋于稳定并保持定值,一般船舶的旋回运动中重心处的漂角大约在  $3^\circ \sim 15^\circ$  之间。漂角越大的船舶,其旋回性越好,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  $20^\circ$  左右。

(3) 转心  $P$  逐渐稳定,对于不同船舶而言,该点的位置大约在离船首柱后  $1/3 \sim 1/5$  船长处。船处于后退中,转心位置则在船尾附近。对于不同船舶而言,旋回性能越好,旋回中漂角  $\beta$  越大的船舶,其旋回时的转心  $P$  越靠近船中。

(4) 由于船舶旋回惯性离心力矩的作用,横倾达到最大外倾角后,船舶经过  $1 \sim 2$  次摇摆,最后稳定于某一定常外倾角  $\theta$  上。船舶旋回中定常外倾角  $\theta$  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  $\theta$  越大。一般货船满舵旋回时的外倾在静水中可达  $3^\circ \sim 5^\circ$  左右。然而,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  $30\text{kn}$  的高速船,定常外倾角可达  $12^\circ \sim 14^\circ$ 。

(5) 船舶的横移速度、线速度固定不变。一般从操舵开始到船首转过  $90^\circ$  左右船舶进入定常旋回后,速度不再下降。减速的幅度与旋回性的关系是,旋回性越好,减速越显著,一般船舶旋回中的降速幅度大约为旋回操舵前船舶速度的  $25\% \sim 50\%$ ,而旋回性能很好的超大型油轮在旋回中的降速幅度最大可达到原航速的  $65\%$ 。

### 2. 旋回圈及其要素

旋回圈 (turning circle) 是定速直航 (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。旋回圈几何参数是表示船舶旋回性能的重要指标,是判断船舶旋回性优劣的直接判据,在操纵船舶时有重要参考价值。一般选择具有实际意义的特征参数来描述船舶的旋回性能。

表征旋回圈大小以及形状的几何要素主要有旋回初径、旋回直径、进距、横距、滞距和反移量等,如图 1-1-4 所示。

#### 1) 旋回初径 (tactical diameter)

旋回初径也称为战术直径,是旋回运动的船舶航向角变化  $180^\circ$  时船舶重心的横向移动距离,一般用  $D_T$  表示。旋回初径是判断旋回过程中船

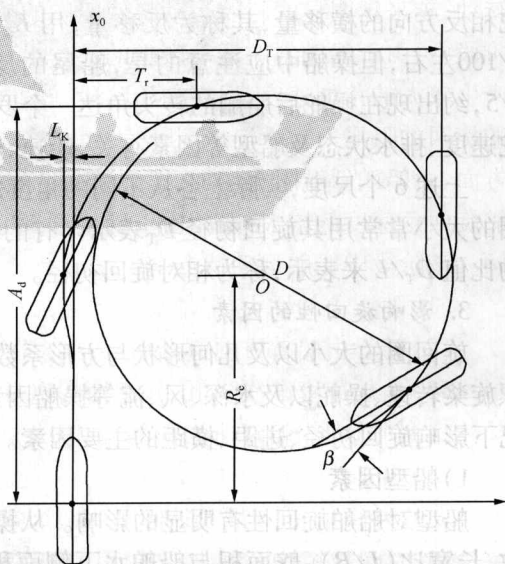


图 1-1-4 旋回圈及要素





船横向占用水域范围的依据。旋回初径越小,船舶旋回性能越好,反之,船舶旋回性能越差。据统计,一般运输船舶的相对旋回初径( $D_T/L$ )为3~6,为保证良好的航向机动性,通常应保证 $D_T/L$ 在2.8~4.2之间,最大不应超过5.0,否则旋回性能较差。

#### 2) 旋回直径 (final diameter)

旋回直径是指船舶进入定常旋回时的旋回圈直径,一般用 $D$ 表示。它是判断船舶定常旋回过程中占用水域范围的依据。对于运输船舶来说通常 $D \approx (0.9 \sim 1.2) D_T$ 。

#### 3) 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,通常将航向角变化 $90^\circ$ 时船舶重心的纵向移动距离称为进距,一般用 $A_d$ 表示。它是判断旋回过程中船舶纵向占用水域范围的依据。显然,进距是船舶初始回转性的特例,即航向角变化 $90^\circ$ 时船舶航进的距离。进距越小,表示船舶对操舵的反应越迅速,即船舶初始回转性能越好。反之,进距越大,表示船舶对操舵的反应越迟钝,即初始回转性能越差。据统计,进距大约为旋回初径的0.6~1.2倍,一般运输船舶的相对进距( $A_d/L$ )在2.8~4.0之间,最大不应超过4.5。

#### 4) 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,将航向角变化 $90^\circ$ 时船舶重心的横向移动距离称为横距,一般用 $T_t$ 表示。横距是衡量船舶航向角变化 $90^\circ$ 时横向占用水域范围的判据。横距越小,表示船舶对操舵的反应越迅速,即船舶初始回转性能越好。横距大约为旋回初径的一半。

#### 5) 滞距 (reach)

亦称心距。正常旋回时,船舶旋回轨迹曲率中心 $O$ 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,并以 $R_e$ 代表之,大约为1~2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。

#### 6) 反移量 (kick)

在旋回转舵阶段,由于船舶转动惯量很大还来不及产生较大的旋转角速度,则在舵产生的横向力的作用下,产生横向移动加速度,一定时间后产生横向移动速度,使船舶重心产生向转舵相反方向的横移量,其称为反移量,用 $L_k$ 表示。一般情况下,满舵旋回反移量约为船长的1/100左右,但操船中应注意的是,船尾的反移量却不容忽视,其最大量约为船长的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6个尺度,实际上各从不同的角度规定了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。

### 3. 影响旋回性的因素

旋回圈的大小以及几何形状与方形系数、舵面积等船型因素有关,也受到装载状态、船速、螺旋桨转速、操舵以及水深、风、流等操船因素影响。这里将仅仅讨论无风流等外力作用的情况下影响旋回初径、进距、横距的主要因素。

#### 1) 船型因素

船型对船舶旋回性有明显的影响。从操纵性角度来讲,我们关心的特征参数包括:方形系数、长宽比( $L/B$ ),舵面积与船舶水下侧面积之比、主机功率等。但各种参数的影响程度不尽相同,在此,仅就影响操纵性较大的船型参数进行概述。







### (1) 方形系数 $C_b$ (block coefficient)

由旋回运动过程的受力分析可知,船舶旋回性与航向稳定性是矛盾的,主要取决于船体斜航时水动力特性,因此与船型关系较大。一般说来,方形系数较低、长宽比较大的船舶具有较好的航向稳定性,因此旋回性较差。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,其航向总带有不稳定性,因此旋回性较好。根据实验结果,如图 1-1-5 所示,方形系数较小的瘦形高速船 ( $C_b \approx 0.6$ ) 较方形系数较大的肥形船 ( $C_b \approx 0.8$ ) 的旋回性能差得多。即船舶的方形系数越大,船舶的旋回性越好,旋回圈越小。

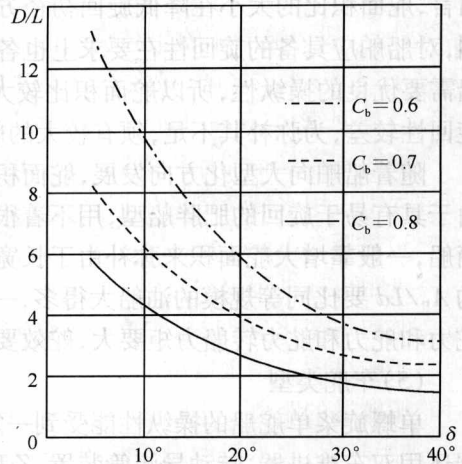


图 1-1-5 方形系数对旋回性的影响

### (2) 长宽比 $L/B$

船舶长宽比是影响船舶操纵性的重要参数之一。长宽比较大的船舶,其船体外形比较瘦长,钝度较小,纵向移动阻力较小,因此其快速性较好;但由于其船体瘦长,旋回阻尼较大,故这类船舶的旋回性较差。反之长宽比较小的船舶,其船体外形比较肥短,钝度较大,旋回阻尼较小,故这类船舶的旋回性较好,如港作拖船。

资料显示,船舶长宽比不同,定常旋回的转心位置也稍有不同,表 1-1-1 给出了不同长宽比情况下的转心位置和漂角的变化情况。

表 1-1-1

$L/B$	9	8	7	6	5
转心距船首距离( $L$ )	0.33	0.34	0.35	0.37	0.40
漂角	14	15	16	17	19

统计表明,一般运输船舶的长宽比在 5.5 ~ 8.1 之间,极特殊的船型达到 8.5。各类船型的长宽比由于对操纵性的要求不同而差异较大。对于集装箱船舶,由于要求其快速性,因此其长宽比较大,一般长宽比在 7.3 ~ 8.1 之间,且船舶越大,其长宽比有增大的趋势。而对于大型油船和散货船,由于对快速性要求不是很高,主要强调其货物的运输经济性,因此其长宽比较小,而且随着油船向大型化方向发展,其长宽比有减小的趋势。一般长宽比在 5.5 ~ 6.8 之间,特殊船型达到 7.2 以上。由此可见,仅从长宽比方面考察,大型集装箱船舶的旋回性能要比大型油船的旋回性能差一些,但其快速性要好一些。

### (3) 船体水线下侧面积形状及分布

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,水线下侧面积几何形心靠前,水动力作用中心靠近船首,航向稳定性较差,但旋回性较好,旋回圈较小;而船尾部分分布面积较大者(如船尾有钝材),或船首比较削进(cut up)的船舶,水动力作用中心靠近船尾,航向稳定性较好而旋回性较差,旋回圈较大。

### (4) 舵面积比 (rudder area ratio)

舵面积比是指舵面积与船体浸水侧面积 ( $L_{pp}d$ ) 的比值,也是影响船舶操纵性的参数之一。舵面积与船长吃水比舵面积与船长吃水比越大,表示舵面积所占船体水下侧面积的比例越大,舵力和舵力转舵力矩越大因而提高船舶的旋回性,旋回圈变小。但增加舵面积的同时又增加了旋回阻力力矩,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 $1/25 \sim 1/20$ ,渔船为 $1/40 \sim 1/30$ ;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 $1/40 \sim 1/35$ ;一般货船为 $1/60 \sim 1/45$ 。

随着船舶向大型化方向发展,舵面积占船体水下侧面积的比例也逐步在减小。大型油船由于具有易于旋回的肥胖船型,用不着很大的舵面积比,一般在 $1/65$ 以下。而对于大型集装箱船,一般靠增大舵面积来弥补由于长宽比较大而造成的旋回性差的缺点,因此大型集装箱船的 $A_R/Ld$ 要比同等规模的油船大得多,一般为 $1/55$ 以上。因此,大型集装箱船较大型油船的舵力和舵力和舵力转船力矩要大,舵效要好。

### (5) 车舵类型

单螺旋桨单舵船的操纵性能受到一定的限制。除绝大多数船所采用的舵外,常用的推进器还用双车推进器、转动导流管装置、Z型推进器、喷水推进装置等,一部分船在普通螺旋桨的基础上,为了改善性能,还利用推进设备,经过科学合理的组合后,替代了舵的功能。

装备这些特殊的推进装置往往有优越的旋回性能,尤其是在港内低速航行时更为明显。

### 2) 装载状态

给定船舶在不同的装载状态下,船舶的吃水、排水量差别较大,水下的船型也有较大的变化,对船舶旋回性影响也较大。

#### (1) 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,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。

#### (2) 吃水差

吃水差在较大程度上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带来明显的影响。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 $1\%$ ,旋回初径将可增加 $10\%$ 左右;对于 $C_b = 0.6$ 的船舶,若尾倾增大量为船长的 $1\%$ ,旋回初径将可增加 $3\%$ 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。轻载时吃水较浅,尽管此时的舵面积比有所增大,而转动惯量较小,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。所以总的看来,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。

#### (3) 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