

船舶操纵性

苏兴翹 编

國防工業出版社

船舶操纵性

苏兴翘 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十章。通过建立船舶运动的数学模型、确定水动力导数、分析典型的操纵性试验方法,从稳定性和机动性两方面介绍了船舶受控运动的基本规律、表征船舶操纵性的特征参数以及在船舶设计中满足操纵性要求的方法。书末附有一综合性例题。

本书可作为高等院校船舶设计与制造专业教材,也可供从事船舶设计、研究工作的技术人员参考。

船 舶 操 纵 性

苏 兴 翘 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 13⁵/₈ 314 千字

1981年8月第一版 1981年8月第一次印刷 印数: 0,001—2,200册

统一书号: 15034·2246 定价: 1.45元

前 言

本书是根据 1978 年全国高等工业院校造船专业教材会议安排的计划编写的。华南工学院、华中工学院、武汉水运工程学院、海军工程学院、镇江船舶学院、上海交通大学、天津大学、大连工学院和哈尔滨船舶工程学院等院校有关同志，共同讨论，确定了编写大纲。限于学时，本教材不能包括现代关于船舶操纵性领域的全部重要成果。只能着重介绍一些基本原理和基本方法。但鉴于目前国内还没有一本公开出版的关于船舶操纵性方面的参考书，所以本书也简要地介绍了一些教学大纲以外的内容，供学生和有关技术人员参考。这些章、节都用 * 标出，在教学和阅读本书时，可越过这些章、节，而不致影响其余部分的完整性。也由于这种原因，把某些较严格的推导和较完整的表达，列入附录中，作为基本教学内容，可以不涉及它们。

在编写过程中，承蒙许多研究、设计单位和院校的同志们大力支持和帮助。杨仁杰教授、高志希教授所收集、整理的资料对编写本书有很大帮助。吴秀恒、范尚雍教授都曾给予指导。陆惠生同志审阅了全稿并提出许多宝贵意见。本书最后由哈尔滨船舶工程学院陈厚泰同志主审定稿，他不仅是审定者，也是给编者帮助最多的指导者。借此，对所有帮助、指导编写本书的同志们一并致以深切的谢意。

虽然受益于许多有识者的指教，但由于编者水平所限，错谬之处在所难免，望广大读者批评指正。

编 者
于天津大学

目 录

绪 论 船舶操纵性概述

第一章 船舶运动方程式

§ 1-1 船舶运动的描述和运动方程式	6
§ 1-2 作用于船舶的水动力、水动力系数及动力导数	12

第二章 船舶直线运动稳定性

§ 2-1 船舶运动稳定性和扰动运动方程式	21
§ 2-2 直线运动稳定性的判别	25
* § 2-3 稳定程度和过渡过程特征	35
* § 2-4 船舶的控制稳定性	39

第三章 船舶的回转运动

§ 3-1 回转过程、回转圈及其特征	43
§ 3-2 定常回转运动	47
* § 3-3 回转运动的非线性及回转稳定性	53
§ 3-4 回转过程中的其它运动	56

第四章 船舶的操纵性试验

§ 4-1 回转试验	61
§ 4-2 螺旋、逆螺旋及回舵试验	66
§ 4-3 Z形试验及K、T分析	70
* § 4-4 非线性模拟和相平面分析	77
* § 4-5 确定频率特性的正弦操舵试验和平行移船试验	80

第五章 模型和模拟试验方法

§ 5-1 自航模型试验及相似准则	87
§ 5-2 模拟操纵器及模拟操纵试验	90

第六章 水动力导数的估算

§ 6-1 升力面的水动力导数	95
§ 6-2 裸船体的水动力导数	102

第七章 水动力导数的试验确定

§ 7-1 直线拖曳试验和回转臂试验	110
--------------------------	-----

§ 7-2 平面运动机构试验: 纯横荡和纯艏摇运动	117
* § 7-3 平面运动机构试验: 相位分离和非线性导数测定	124

第八章 控制面的设计

§ 8-1 一般考虑	134
§ 8-2 舵的水动力特性	138
§ 8-3 自由表面、船体和螺旋桨对舵水动力特性的影响	145
§ 8-4 舵参数的选择	149

第九章 特种操纵装置概述

§ 9-1 旋转导管螺旋桨和 Z 形推进器	159
§ 9-2 槽道式侧推力器和直翼推进器	164
§ 9-3 特种舵	168

第十章 关于船舶操纵性的一些特殊问题

* § 10-1 限制水域中的操纵性和两船接近时的相互作用	172
* § 10-2 被拖和倒航船的操纵性	175
* § 10-3 船舶在波浪上的操纵性和动力定位	180

附 录

附录一 描绘船舶在六个自由度内运动的非线性运动方程的推导	189
附录二 船舶在水平面内运动时所受到的水动力及其力矩的非线性表达式	192
附录三 刚体在无限流体中作空间运动时所受到的流体惯性力	194
附录四 选择不同坐标原点时水动力导数的变换	200
附录五 例题——舵面积选择及船舶操纵性计算	203
参考文献	211

绪 论 船舶操纵性概述

一、含义

在船舶航行的过程中，为了尽快到达目的地和减少燃料消耗，驾驶者总是力求使船舶以一定的速度沿直线运动。而当在预定的航线上发现障碍物或其它船舶时，为了避免碰撞，驾驶者又要使船舶及时改变航速或航向。在这两种情况下，驾驶者所采取的操作，称为对船舶的操纵；船舶对驾驶者操纵的反应能力则称为船舶的操纵性。或者说，船舶操纵性是船舶受驾驶者的操纵而保持或改变其运动状态的性能。

这里所谓“运动状态”是指由作为时间的函数的船舶线速度、角速度、线加速度及角加速度等矢量所决定的船舶运动状况。从而它们也就决定了船舶运动的轨迹。

驾驶者对船舶运动的要求总不外乎是保持一定的运动状态不随时间而变化；或者是随时间按一定规则改变运动状态两种。例如，一艘船舶的启动、加速、等速直线航行、转向、减速、停止以至倒退等，都属于上述两者之一。

一艘操纵性好的船舶，应既能按驾驶者的要求，方便、稳定地保持运动状态；又能按驾驶者的要求迅速、准确地改变运动状态。就本书所讨论的水面船舶来说，在实际使用过程中，最经常要保持的运动状态是航向[●]，最经常要改变的运动状态也是航向。对于这种船舶，在比较狭义的范围，操纵性也就成了保持和改变航向的性能。本书将主要讨论这种意义下的操纵性，只有在个别地方涉及到超出这一范围的问题。

在“船舶原理”的各学科中，操纵性是一门新近发展起来的、并且还很不完善的一个学科。关于操纵性的含义，近年来仍在讨论和发展中。1946年戴维逊^[1]首先从运动稳定性的理论出发，说明船舶操纵性应包括稳定性和机动性两个互相制约的方面，为操纵性的研究奠定了理论基础。稳定性是保持运动状态的性能，机动性是改变运动状态的性能。1970年藤井齐和野本谦作等人^[2]根据船舶的使用要求，提出船舶操纵性应包括小转舵角的航向保持性、中等转舵角的航向机动性和大舵角的紧急规避性三个方面。他们认为同时具有这三个方面的性能，船舶才能满足驾驶者的使用要求。

戴维逊的定义着重于从力学上规定操纵性的含义。藤井齐等人的定义则偏重于实际使用要求。应该指出，后者定义三个方面性能仅包括了一般的使用要求，并未能包括对船舶操纵性的全部要求。而且船舶并非都是用舵来操纵的。

二、重要性

操纵性对于船舶的使用效能和安全性都有直接关系。实际运行中的船舶无时不在受着

● “航向”一词，在不同的文献中常有不同含义。在关于航海学的文献中，它常指船首相对于地球真北的方向。在造船的文献中，它常指船上某一点的速度矢量相对地球的方向。本书中指后者。

风、浪、水流等自然环境和人为的扰动，是不可能按理想的直线航线运动的。图 0-1 表示两艘航向稳定性不同的船舶在海上的实际航迹。

其中航向稳定性较好的 A 船，经过很少的操纵即能维持航向，并且航迹也较接近于要求的直线。航向稳定性较差的 B 船则要频繁地进行操纵以纠正航向偏离，并且经过一个曲折得多的航迹。实际航迹的曲折，一方面增加了航程，另一方面由于校正航向偏差而增加了操纵机械和推进机械的功率消耗。通常由于上述原因而增加的功率消耗约占主机功率 2~3%，而对于航向稳定性较差的船甚至可高达 20%。

由此可见，操纵性对使用的经济性有重要影响。

图 0-2 表示两艘机动性不同的船舶在改变航向时的不同航迹。

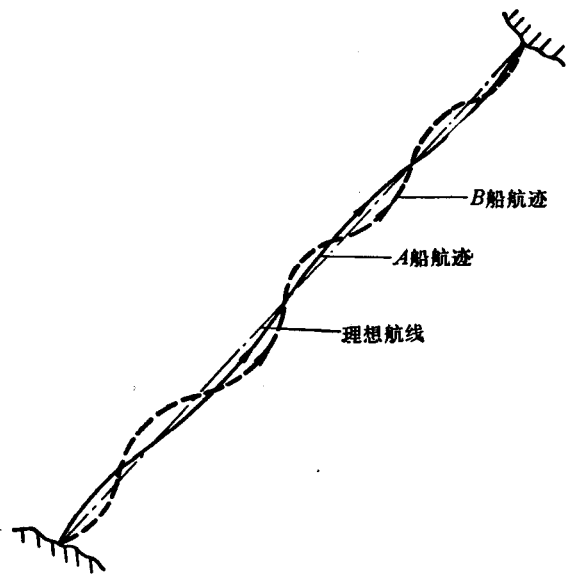


图 0-1 航向稳定性不同的船舶在海上的实际航迹

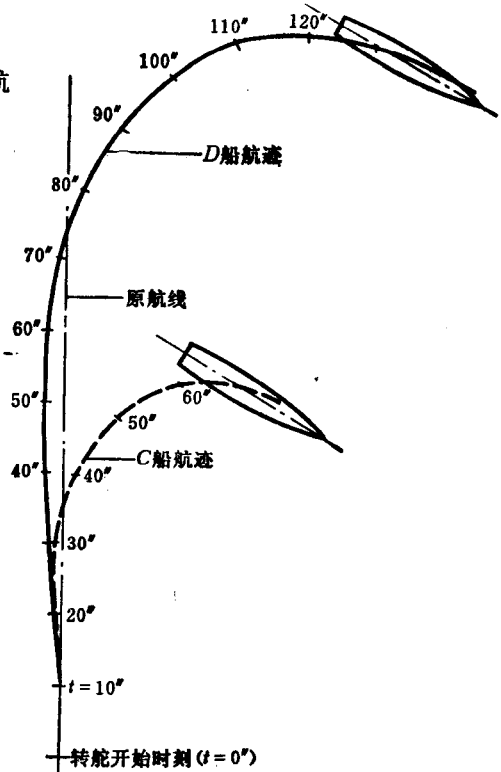


图 0-2 机动性不同的船舶改变航向时的不同航迹

机动性较好的船 C，经过较短的时间和在较小的范围内就能改变航向。而机动性较差的 D 船，则要经过较长的时间和在大得多的水域中才能完成转向。所以后者在曲折、狭窄的航道和船舶较多的水域中航行时，会增加碰撞的危险。据统计，全世界 100 吨以上排水量的船舶，每年约有 160~170 艘主要由于碰撞和搁浅等事故而沉没。每艘船一年平均要出现大小事故约 4 次之多。造成这些事故的重要原因之一，就是船舶的操纵性不好。由此可见，操纵性对船舶的使用安全是极为重要的。

作战舰艇的操纵性，对于提高武器射击的命中率、占据有利阵位和规避敌舰攻击等更有重要意义。

总之，操纵性是船舶重要的航海性能之一，近年来日益受到人们广泛的重视与研究。

三、控制回路

船舶驾驶者是利用一系列操纵设备来对船舶进行操纵的。图 0-3 表示一个典型的用舵

来操纵船舶的系统方框图。

在有人驾驶时，驾驶者从显示器得到所要求的航向（有时也包括航迹）与实际航向（或航迹）之间的差别。为了校正这一差别，需要操动舵轮，发出舵角指令。舵机按这一指令工作，转动舵，产生规定的舵角，同时也将实际舵角值传送到显示器上，供驾驶者了解。舵的转动产生作用于舵和船体上的水动力控制力，使船改变航向（或航迹），并且把它们的实际值送至显示器以与要求值相比较。这样就形成了一个闭回路。

在无人操纵时，自动驾驶仪可以代替驾驶员执行比较航向（或航迹）误差和发出舵角指令的任务。

在图 0-3 所示的操纵回路中，每一个黑框表示一个环节。每一个环节都接受一个或几个输入信号，而产生相应的输出信号。这些环节

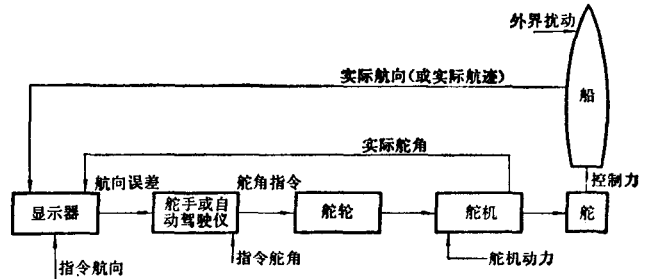


图0-3 典型的船舶操纵系统方框图

组成一个闭回路系统。各环节的特性都对整个系统性能有直接影响。而一艘船舶操纵性的好坏，取决于整个系统的性能。所以，在考虑一艘船的操纵性时，应使整个系统的性能达到最佳；不应只片面地追求个别环节的性能而不顾及其它环节。上述不同环节涉及到不同的学科领域，本课程只着重讨论图 0-3 中最后两个环节——舵（或其它操纵器）与船体的水动力特性。

四、舵-船效应

为什么转舵能对船实现操纵？这是因为在舵与船上有着一系列水动力作用的结果。

图 0-4 表示舵-船系统的水动力作用情况。

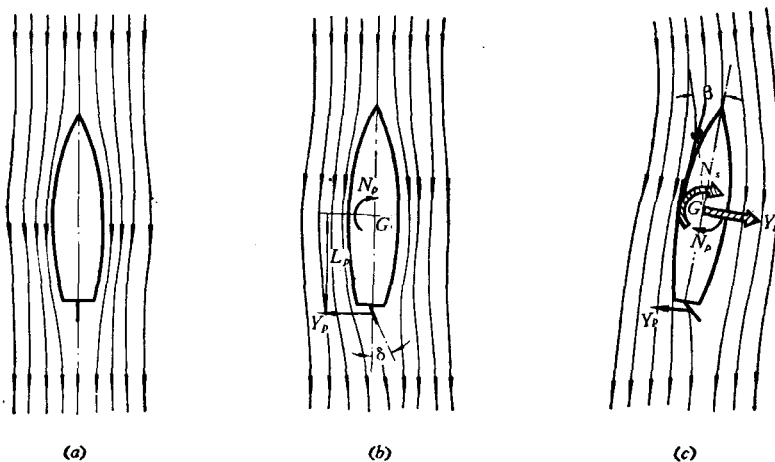


图0-4 舵-船系统的水动力作用情况

一艘左右舷形状对称的船舶，舵位于中间位置时，如果沿舢纵剖面方向直线航行，由于流动的对称性，船舶将不会受到侧向力作用（如图 0-4 (a) 所示）。当舵偏转一个 δ 角

时,则破坏了水流的对称性;首先在舵上产生一个侧向力 Y_p , Y_p 的作用点距船舶重心 G 为 L_p 时,同时也产生一个绕船舶重心的力矩 $N_p=Y_p \cdot L_p$ (见图0-4(b))。在力矩 N_p 作用下,船体相对于水流发生偏转,船体舢纵剖面与来流速度方向形成一漂角 β ,船体也产生一绕重心的角速度 r ,这就进一步破坏了水流的对称性。从而产生一个作用于船体的侧向力 Y_r 和绕重心的力矩 N_r (见图0-4(c))。 Y_r 与 N_r 都与 β 和 r 有关。因为船体的尺度比舵大得多, Y_r 和 N_r 也比 Y_p 和 N_p 大得多。此后,船舶就主要在 Y_r 和 N_r 作用下继续转向和横移运动。这就是利用转舵来改变船舶航向的一个水动力过程。

从中可见,虽然转舵是引起船舶转向的起因,但在整个转向过程中起决定作用的是船体本身所受的水动力及力矩。很明显,船舶操纵性的好坏不仅与舵的大小、形状及位置有关,而且与船体的形状等有密切关系。

五、任务与方法

从工程的角度,研究船舶操纵性的任务在于:

- (1) 通过考察船舶受控运动的规律,找到能够表征船舶操纵性的主要技术参数,以及为满足各类船舶的使用要求,这些参数所应达到的数量指标;
- (2) 建立评价现有船舶和预估新设计船的受控运动和操纵性参数的方法;
- (3) 建立在船舶设计中满足操纵性要求和改进操纵性的方法。

目前,解决上述问题的方法大致有下列两种:

其一是建立描绘船舶运动的数学模型(或称运动方程式)、用理论的或约束模型试验的方法求到作用于船舶的水动力,然后由对数学模型的分析得到各种机动下船舶的运动状态和表征操纵性的特征参数。

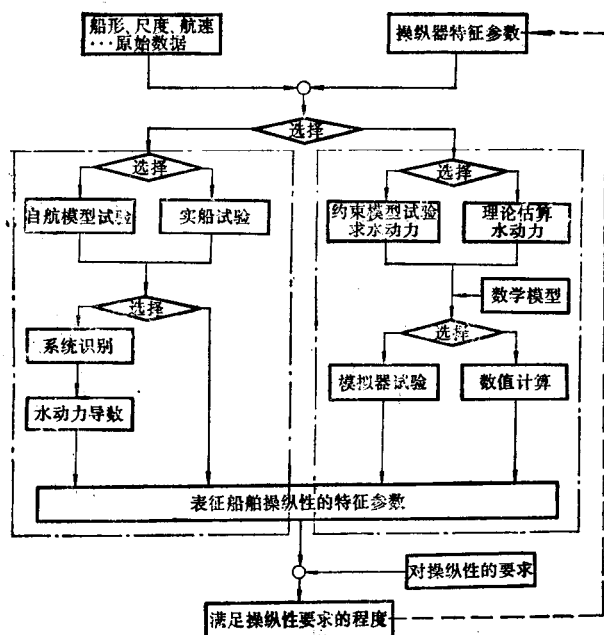


图0-5 两种研究操纵性方法的典型逻辑框图

其二是在某些规定的机动下,进行实船或其物理模型(也称船模)的自航试验,直接测量它的运动状态和表征操纵性的特征参数。或者由测量得的运动状态再借助数学模型求到表征操纵性的参数和作用于船舶的水动力[●]。

这两种方法都可以得到船型、操纵器特征与操纵性之间的关系,从而为操纵性设计和改进船舶操纵性提供依据。

图 0-5 是表示这两种研究操纵性方法的典型逻辑框图。

它只是一种有代表性的例子而已。实际问题总是千变万化的,解决它们的方法也不可能统一于一个模式。但图 0-5 包括了本书的主要内容,可以作为一个纲要。

上述两种方法基本上都是半经验的方法,它们是互为补充的。前者便于分析各个单独因素对操纵性的影响,但是在建立数学模型和确定水动力时不可避免地要引入一系列简化的假设,因而结果有一定的失真。后者更精确地包括了各种因素的综合作用,但不便于分析各个因素的单独影响。

● 后者也称系统识别(或参数估计)方法。近年来这一方法已被引用来研究船舶操纵性问题,并取得一定成果。原则上通过一组已知试验的观测结果,可以得到描绘该系统的动力学数学模型和其中各个参数的值,从而也就确定了该系统的全部动力特性。参见参考文献[36]、[37]、[38]。

第一章 船舶运动方程式

§ 1-1 船舶运动的描述和运动方程式

操纵性主要讨论的是船舶受控运动。为了便于定量地描绘这种运动，我们选用下列两种坐标系。

1.1 固定于地球的坐标轴系 $o_1x_1y_1z_1$

如图 1-1 所示， o_1 是任意选定的、固定于地球表面的坐标系原点。通常可以选择在某一时刻 $t = 0$ 时，船舶重心 G 所在的位置。 o_1x_1 轴在静水平面内，其方向是任意选定的，但一经选定后，相对于地球是固定的。通常它可选择在船舶总的运动方向。 o_1y_1 轴选择为 o_1x_1 轴在静水平面内沿顺时针旋转 90° 的方向上。 o_1z_1 轴垂直于静水表面，以指向地心为正。这样构成一组固定于地球表面的右旋直角坐标系。

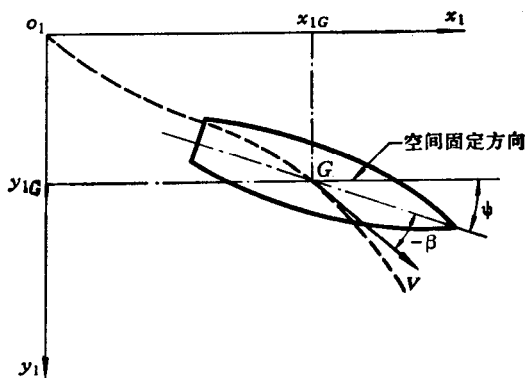


图 1-1 船舶在固定于地球的坐标系中

对于水面船舶的受控运动，暂时忽略它的垂向运动，则在任意时刻 t 船舶的运动状态可以用它的重心位置 x_{1G} 和 y_{1G} 以及船舶舢纵剖面与 o_1x_1 轴的交角 ψ 及其对时间的各阶导数来表示。其中 ψ 称为艏向角，以顺时针旋转（指由 o_1x_1 轴至舢纵剖面）为正。

在讨论船舶受控运动时，常把船舶当成刚体，即假定它的形状、尺寸、质量及质量分布都不随时间改变[●]。引用牛顿关于质心运动的动量和动量矩定理，船舶的运动可以用下列方程组来描述：

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= m\ddot{x}_{1G} \\ Y_1 &= m\ddot{y}_{1G} \\ N &= I_x\ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

其中：

X_1 ——作用于船舶的外力合力沿 o_1x_1 方向的分量；

Y_1 ——作用于船舶的外力合力沿 o_1y_1 方向的分量；

N ——作用于船舶的外力合力对通过船舶重心的铅垂轴的力矩；

m ——船舶的质量；

● 由于操纵器、推进器的运动引起的形状和质量分布的变化，另作处理。

I_x ——船舶质量对通过重心的铅垂轴的惯性矩，
 $\ddot{x}_{1G}, \ddot{y}_{1G}, \ddot{\psi}$ ——分别是 x_{1G}, y_{1G} 和 ψ 对时间的二阶导数，即船舶重心 G 点的线加速度分量和船舶绕重心点的角加速度。

式 (1-1) 虽然表面上看来很简单，并且可以直接描述船舶在空间的位置，但由于其中外力的分量 X_1, Y_1 与船舶舢纵剖面相对于坐标轴的方向有关，这就给它们的计算带来很大的困难。为了克服这种困难，我们引入另一种坐标系。

1.2 固定于船舶的坐标系 oxy

取船体上任意一点 o 为坐标原点（通常可以取在船舶重心处，或取在水线面、舢横剖面与舢纵剖面的交点处）。一经取定，它相对于船体是固定的，随船体一起运动。 ox 轴取为垂直于舢横剖面，以指向船艏为正。 oy 轴取为垂直于舢纵剖面，以指向右舷为正。 oz 轴取为垂直于水线面，以指向龙骨为正。这样构成一组右旋的直角坐标系，如图 1-2 所示。

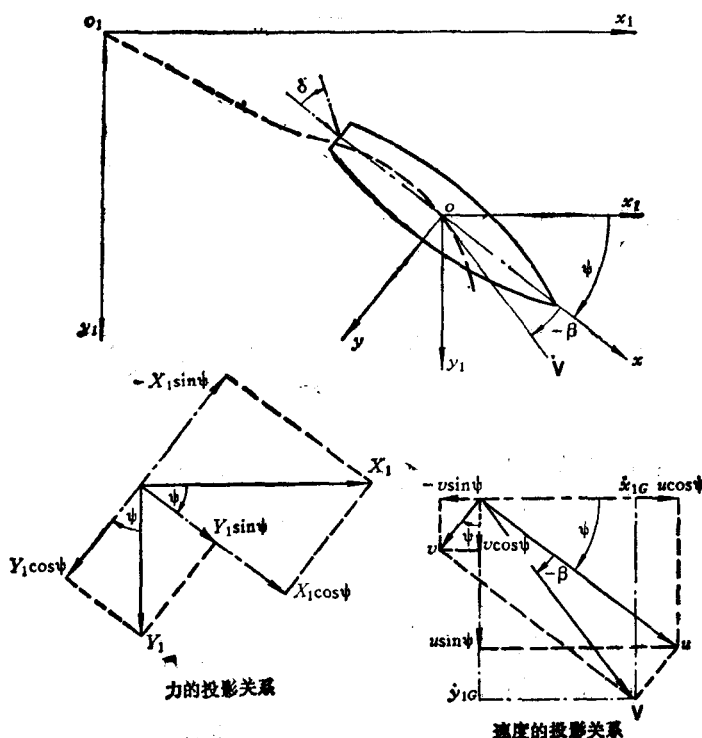


图1-2 固定于船体上的坐标轴系

在图 1-2 中，同时也画出了固定于地球的坐标轴系 $o_1x_1y_1z_1$ 。如规定运动坐标轴系原点 o 与船舶重心 G 点相重合，则图 1-2 中 V 表示船舶重心点的线速度矢量。 V 与 ox 轴正方向的交角 β 称为漂角（定义图 1-2 中所示的 β 为负值）。由图中可见，作用于船舶的外合力在两种坐标系轴上的投影有下列关系：

$$\left. \begin{aligned} X &= X_1 \cos \psi + Y_1 \sin \psi \\ Y &= Y_1 \cos \psi - X_1 \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

其中: X 和 Y 分别是作用于船舶的外力在动坐标轴 ox 和 oy 上的投影。

同样, 如图所示, 船舶重心 G 点的线速度矢量 V 在两种坐标系轴上的投影有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{1G} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{1G} &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

其中:

$\dot{x}_{1G}$ 和 $\dot{y}_{1G}$ ——船舶重心 G 点的线速度矢量 V 在 o_1x_1 和 o_1y_1 轴上的投影;

u 和 v ——运动坐标系原点 o 的线速度矢量 V 在 ox 和 oy 轴上的投影。

按定义有:

$$u = -|V| \cdot \sin \beta$$

$$v = |V| \cdot \cos \beta$$

$\dot{x}_{1G}$ 和 $\dot{y}_{1G}$ 、 u 和 v 都是时间的函数, 为了简便起见, 都不专门标出了。符号上边的“ $\cdot$ ”都表示对时间的导数。

将式 (1-3) 的等号两边分别对时间求导, 则得:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{1G} &= \dot{u} \cos \psi - \dot{v} \sin \psi - (u \sin \psi + v \cos \psi) \dot{\psi} \\ \ddot{y}_{1G} &= \dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi - v \sin \psi) \dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-1), 并引入式 (1-2) 表示的 X_1 和 Y_1 , 经适当整理可得到:

$$X = m(\dot{u} - v\dot{\psi})$$

$$Y = m(\dot{v} + u\dot{\psi})$$

在这两种坐标系中 z 轴的方向没有变化, 依据质心运动的动量矩定理, 绕 G 点的力矩方程也不改变, 仍为:

$$N = I_x \ddot{\psi}$$

于是得到原点在重心处的动坐标系中船舶的运动方程为:

$$\left. \begin{aligned} X &= m(\dot{u} - v\dot{\psi}) \\ Y &= m(\dot{v} + u\dot{\psi}) \\ N &= I_x \ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式 (1-1) 和 (1-5) 都是描绘船舶在水平面内运动的方程式。式 (1-5) 比式 (1-1) 形式上稍复杂一些, 但是由于其中的外力不再与船舶相对于固定坐标的方向有关, 可得到很大的简化。所以在分析船舶运动时, 将广泛应用动坐标系中的方程, 只有在讨论船舶在空间的轨迹时, 才使用固定坐标轴系。

1.3 坐标原点位置的选择

在许多情况下动坐标原点 o 不取在船舶重心 G 处。一方面因为在船舶使用过程中重心位置经常是变化的; 另一方面如果原点取在船体对称平面的交点上, 利用这种对称性, 会使以后的水动力表达更为简化。

当取距 G 点距离为 R_G 的 o 点为动坐标原点时, 在动坐标系中船舶重心的坐标记为 $G(x_G, y_G)$ 。 G 点的运动速度在 ox 和 oy 轴上投影记为 u_G 和 v_G , 以与坐标原点 o 的速度

在动坐标轴上的相应投影 u 、 v 相区别。

这时式 (1-3) 应写为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{1G} &= u_G \cos \psi - v_G \sin \psi \\ \dot{y}_{1G} &= v_G \cos \psi + u_G \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-3a)$$

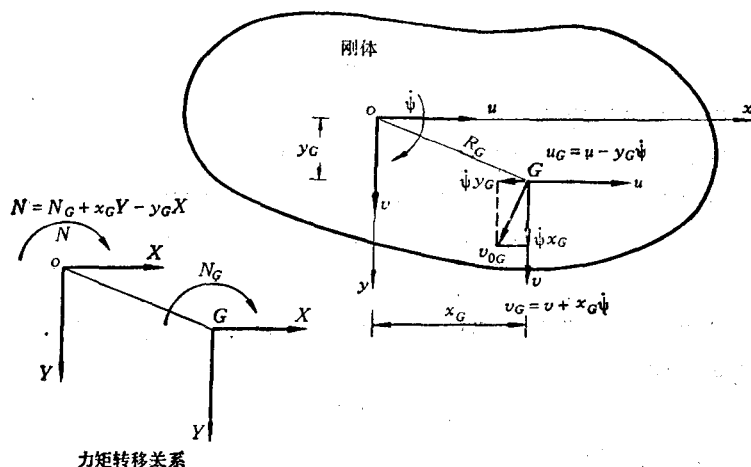


图1-3 刚体平面运动的速度投影

如图 1-3 所示, 根据刚体的平面运动原理, G 点的速度可以分解为 G 点相对于 O 点的相对速度和 O 点相对于地球的牵连速度, 即

$$\mathbf{V}_G = \mathbf{V}_O + \mathbf{V}_{OG}$$

其中: $\mathbf{V}_G$ —— G 点相对于地球的速度矢量;

$\mathbf{V}_O$ —— O 点相对于地球的速度矢量, 或称为牵连速度矢量;

$\mathbf{V}_{OG}$ —— G 点相对于 O 点的速度矢量, 或称为相对速度矢量。

它们在动坐标轴上的投影可分别写成:

$$\left. \begin{aligned} u_G &= u_o + u_{oG} \\ v_G &= v_o + v_{oG} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

在所讨论的情况下, 假定船舶为刚体, $\mathbf{V}_{OG}$ 只由于 G 点以角速度 $\dot{\psi}$ 绕 O 点旋转而产生。如图 1-3 所示:

$$\left. \begin{aligned} u_{oG} &= -y_G \dot{\psi} \\ v_{oG} &= x_G \dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

将式 (1-6) 和 (1-7) 代入式 (1-3a) 则得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{1G} &= (u - y_G \dot{\psi}) \cos \psi - (v + x_G \dot{\psi}) \sin \psi \\ \dot{y}_{1G} &= (v + x_G \dot{\psi}) \cos \psi + (u - y_G \dot{\psi}) \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 两边对时间求得:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{1G} &= (\dot{u} - y_G \ddot{\psi}) \cos \psi - (\dot{v} + x_G \ddot{\psi}) \sin \psi - [(u - y_G \dot{\psi}) \sin \psi + (v + x_G \dot{\psi}) \cos \psi] \dot{\psi} \\ \ddot{y}_{1G} &= (\dot{v} + x_G \ddot{\psi}) \cos \psi + (\dot{u} - y_G \ddot{\psi}) \sin \psi + [(u - y_G \dot{\psi}) \cos \psi - (v + x_G \dot{\psi}) \sin \psi] \dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

把式 (1-9) 代入式 (1-1) 中, 并引入式 (1-2) 表示的 X_1 和 Y_1 , 经整理则得到:

$$\left. \begin{aligned} X &= m(\ddot{u} - v\ddot{\psi} - y_G\ddot{\psi}^2 - x_G\dot{\psi}^2) \\ Y &= m(\ddot{v} + u\ddot{\psi} - y_G\dot{\psi}^2 + x_G\ddot{\psi}) \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

为了得到对 O 点的力矩方程, 同样把式 (1-5) 的第三个式子标明为是对重心 G 点的方程, 即

$$N_G = I_{xG}\ddot{\psi} \quad (1-5a)$$

其中: N_G ——作用于船舶的外力对 G 点的矩;

I_{xG} ——船舶质量绕通过 G 点的 z 轴的转动惯矩。

当原点取在距 G 点为 R_G 的 O 点时 (参见图 1-3), 依据刚体平面运动的原理, 它绕 O 点的惯性矩 I_x 等于它绕 G 点的中心惯矩 I_{xG} 与移轴惯矩 $R_G^2 \cdot m$ 之和, 即

$$I_x = I_{xG} + R_G^2 m = I_{xG} + (x_G^2 + y_G^2) m \quad (1-11)$$

同样 (也参见图 1-3), 作用于船舶的外力对 O 点的矩 N 应等于其对 G 点的力矩 N_G 与移轴力矩 N_{OG} 之和, 即

$$N = N_G + N_{OG}$$

在我们所讨论的情况下, 移轴力矩 N_{OG} 可以写成:

$$N_{OG} = x_G Y - y_G X$$

所以,

$$N = N_G + x_G Y - y_G X \quad (1-12)$$

将式 (1-5a)、(1-10)、(1-11) 代入式 (1-12), 并经适当整理可得:

$$N = I_x \ddot{\psi} + m [x_G(\ddot{v} + u\ddot{\psi}) - y_G(\ddot{u} - v\ddot{\psi})] \quad (1-13)$$

归并式 (1-10) 和 (1-13) 得:

$$\left. \begin{aligned} X &= m(\ddot{u} - v\ddot{\psi} - y_G\ddot{\psi}^2 - x_G\dot{\psi}^2) \\ Y &= m(\ddot{v} + u\ddot{\psi} - y_G\dot{\psi}^2 + x_G\ddot{\psi}) \\ N &= I_x \ddot{\psi} + m [x_G(\ddot{v} + u\ddot{\psi}) - y_G(\ddot{u} - v\ddot{\psi})] \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 是当动坐标原点在任意位置时, 船舶在水平面内运动的运动方程。

对于通常左右舷形状对称的船舶, 坐标原点总选择在舢纵剖面内, 而船舶重心也总是在此平面内, 故 $y_G = 0$, 这时式 (1-14) 可简化为:

$$\left. \begin{aligned} X &= m(\ddot{u} - v\ddot{\psi} - x_G\dot{\psi}^2) \\ Y &= m(\ddot{v} + u\ddot{\psi} + x_G\ddot{\psi}) \\ N &= I_x \ddot{\psi} + m x_G(\ddot{v} + u\ddot{\psi}) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式 (1-1)、(1-5)、(1-14) 和 (1-15) 都称为船舶在水平面内的运动方程。它们都是描绘船舶运动的一种数学模型。这些数学模型描绘了关于船舶运动的物理参数之间的数量关系。在研究船舶操纵性时将广泛地应用它们。但是, 不应忘记, 任何模型都只是对真实物理现象的近似描述, 它们不能完全准确地代表真实物理过程。在建立和今后应用这些模型时, 总要引入一定简化和假设, 也就表明了这一点。所以在应用这些方程时, 应十分注意它们的适用范围和近似程度。

*1.4 空间运动方程

由于船体形状对水平面的非对称性,严格说来,水面船舶的受控运动总是具有六个自由度的空间运动。根据刚体空间运动的原理,阿勃柯维奇^[8],针对动坐标轴选择在船体三个主惯性方向的情况,给出了较完整的六个自由度的船舶运动方程式:

$$\left. \begin{aligned} X &= m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr - \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} + ru - pw - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \\ K &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y)r q + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] \\ M &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z)r p + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pr - qu)] \\ N &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x)p q + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)] \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

更严格地讲,由于船舶形状的不完全对称和质量分布的不均匀,动坐标轴并不总能选择在三个主惯性方向。本书附录一中推导了动坐标为任意方向的,六个自由度中船舶运动的数学模型。它们具有下列更复杂的形式:

$$\left. \begin{aligned} X &= m[\dot{u} - vr + qw - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq - \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \\ K &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &\quad + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (pq - \dot{r})I_{yz} \\ &\quad + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ N &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xz} + (rq - \dot{p})I_{xy} \\ &\quad + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

式(1-16)和(1-17)中用以表示各运动参数的符号是国际上比较通用的一组标准符号^[4]。本书中除另作说明者外,所使用的符号都遵循这一标准。它们的定义是:

X 、 Y 、 Z ——作用于船舶的外力合力分别在 ox 、 oy 、 oz 轴上的投影;

u 、 v 、 w ——动坐标原点 O 处的线速矢量分别在 ox 、 oy 、 oz 轴上的投影;

p 、 q 、 r ——船舶绕 O 点转动的角速度矢量分别在 ox 、 oy 、 oz 轴上的投影;

K 、 M 、 N ——作用于船舶的外力合力对动坐标原点的矩矢量分别在 ox 、 oy 、 oz 轴上的投影;

m ——船舶的总质量;

x_G 、 y_G 、 z_G ——船舶重心 G 点在动坐标系中的坐标;

I_x 、 I_y 、 I_z ——船舶质量绕 ox 、 oy 、 oz 轴转动的惯矩;

I_{xy} 、 I_{yz} 、 I_{zx} ——船舶质量分别对 ox 、 oy 平面、 oy 、 oz 平面、 oz 、 ox 平面的惯性积。

很明显,式(1-5)、(1-14)、(1-15)和(1-16)都是式(1-17)的简化情况。在研究船舶操纵性的各种具体问题时,应该根据问题的要求和当时所具备的条件来选择合适的