



工业和信息化部“十二五”规划教材
黑龙江省精品图书出版工程项目

海洋运载器 运动建模

HAIYANG YUNZAIQI YUNDONG JIANMO

付明玉 王元慧 王成龙 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材
黑龙江省精品图书出版工程项目

海洋运载器 运动建模

HAIYANG YUNZAIQI YUNDONG JIANMO

付明玉 王元慧 王成龙 编著



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书首先介绍船舶的基础概念,从船舶概论入手,使读者具有一定的船舶基础知识,从理论上讲述了海洋运载器六自由度运动方程的推导过程,从六自由度模型进一步得到水平面运动方程和垂直面运动方程,并给出海洋运载器运动的稳定性和操纵性分析,最后给出了两个海洋运载器数学模型的应用案例,模拟器用船舶六自由度运动模型、全垫升气垫船四自由度运动模型,使读者更好、更深入、更彻底地掌握海洋运载器的运动建模及应用方法。

本书是作者多年来有关海洋运载器运动建模与仿真方面的教学和科学研究经验的积累和总结,同时吸收了国内外相关的重要参考文献的精华,直接面向船舶海洋工程类、船舶运动控制类相关本科生和研究生的课堂教学,同时兼顾船舶与海洋工程相关科研人员的实际应用。

本书适用于不同的读者群,可以作为自动控制类及海洋工程专业本科生和研究生教材,也可作为船舶与海洋工程领域的科学工作者和工程技术人员的重要参考书,同时也可供对海洋运载器技术感兴趣的其他专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

海洋运载器运动建模/付明玉,王元慧,王成龙编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5661-1168-5

I. ①海… II. ①付… ②王… ③王… III. ①船舶操纵—控制系统—动力学模型 IV. ①U664.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 297852 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 18
字 数 474 千字
版 次 2017 年 1 月第 1 版
印 次 2017 年 1 月第 1 次印刷
定 价 42.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



前言

本书是作者多年来有关海洋运载器运动建模与仿真方面的教学和科学研究经验的积累和总结,同时吸收了国内外相关的重要参考文献的精华,力求反映当今该领域的新思想、新观点、新动态和新的技术及学术水平,直接面向船舶海洋工程类、船舶运动控制类相关本科生和研究生的课堂教学,同时兼顾船舶与海洋工程相关科研人员的实际应用。

本书从船舶概论入手,介绍船舶的基础概念,使读者具有一定的船舶基础知识。从理论上先推导出海洋装置六自由度运动方程,从六自由度模型进一步得到水平面运动方程和垂直面运动方程,并给出稳定性和操纵性分析,最后给出了几个海洋运载器数学模型的应用案例。模拟器用船舶六自由度运动模型、全垫升气垫船四自由度运动模型等,使读者更好、更深入、更彻底地掌握海洋运载器的运动建模及应用方法。

全书包括以下内容:第1章,船舶概论,介绍船形与尺度、浮性、稳性、操纵性、耐波性、舵桨基本概念、舵水动力性能数学模型等;第2章,运动学模型,介绍数学模型建模方法、海洋运载器建模常用的6种坐标系统、运动变量、坐标旋转变换、运动学模型的推导等;第3章,海洋运载器动力学模型,介绍惯性矩阵与惯量主轴、刚体动量和动量矩、平移三自由度动力学模型、旋转三自由度动力学模型、六自由度运动动力学模型、动力学模型的矢量表达、六自由度动力学模型的简化等;第4章,流体动力分析,介绍了作用在海洋运载器上力、静力(恢复力和力矩)、流体惯性力和流体黏性力、水动力泰勒展开、水动力的矢量描述、水动力系数的无因次等;第5章,海洋运载器运动应用数学模型,介绍了六自由度运动非线性数学模型、船舶定位下的六自由度运动线性模型、水平面三自由度运动数学模型、水平面横移和摇艏二自由度运动线性数学模型、单自由度运动数学模型、垂直面三自由度运动数学模型、横移-横摇-首摇三自由度运动模型等;第6章,介绍了螺旋推进器的水动力性能数学模型,螺旋桨的几何特性、螺旋桨的敞水工作特性、螺旋桨与船体间的相互作用、螺旋桨之间的相互作用等;第7章,水平面运动方程,介绍了水平面非线性运动方程、水平面线性运动方程、水平面水动力系数分析、水平面回转运动分析、水平面运动稳定性分析等;第8章,垂直面运动方程,介绍了垂直面非线性运动方程、垂直面线性运动方程、垂直面水动力系数分析、垂

直面定常运动、垂直面稳定性分析等;第9章,海洋环境数学模型,介绍了风模型(包括风谱、风力与风力矩、无因次风力与风力矩系数)、波浪模型(包括海浪谱、遭遇频率、波浪力和力矩)、海流模型(包括流力与流力矩、无因次流力与流力矩系数);第10章,模拟器用船舶六自由度运动数学模型,介绍了六自由度船舶运动数学模型、水动力系数的估算公式、螺旋桨推力仿真模型、舵力仿真模型、操纵性分析、船舶在风浪中运动仿真等;第11章,全垫升气垫船四自由度运动数学模型,介绍全垫升气垫船的气动力模型、螺旋桨、空气舵及空气动力模型、气垫船六自由度运动数学模型立、操纵性分析等。

全书力求做到语言精练,层次清楚,内在逻辑性强,基本概念准确,内容由浅入深,脉络清晰,结构严谨,图文并茂,实例丰富,生动地向读者展现海洋运载器建模技术的精髓,具有较强的实用性、系统性和前沿性。本书同时受到国家自然科学基金(51209056)资助出版。本书是自动控制类及海洋工程专业本科生和研究生教材,也可作为船舶与海洋工程领域的科学工作者和工程技术人员的重要参考书,同时也会使对海洋运载器技术感兴趣的其他专业人员受益。

本书在撰写和出版过程中,得到了哈尔滨工程大学自动化学院海洋装置与控制技术研究所以来与作者共同从事船舶运动仿真与控制研究的教授、教师们及研究生们的大量帮助和支持,在此一并表示感谢。同时,对本书编写过程引用的参考文献的作者们表示最崇高的敬意和感谢!

编著者

2015年7月

目录

第1章 船舶概论	1
1.1 船形与尺度	3
1.2 船舶浮性	7
1.3 船舶稳性	11
1.4 船舶六自由度运动	14
1.5 船舶操纵性	14
1.6 船舶耐波性	16
1.7 螺旋桨推进器概述	20
1.8 舵	23
第2章 海洋运载器运动学模型	28
2.1 动态系统数学模型概述	28
2.2 坐标系	32
2.3 运动变量定义	36
2.4 运动学模型	40
第3章 海洋运载器动力学模型	54
3.1 惯性矩阵与惯量主轴	54
3.2 刚体动量和动量矩	60
3.3 平移三自由度动力学模型	66
3.4 旋转三自由度动力学模型	68
3.5 海洋运载器六自由度运动动力学模型	70
3.6 海洋运载器六自由度运动动力学模型的矢量描述	72
3.7 六自由度运动动力学模型的简化	76
3.8 海洋运载器六自由度运动数学模型	78
第4章 海洋运载器流体动力分析	81
4.1 作用于海洋运载器上的力	81
4.2 静力分析	84
4.3 水动力分析	88
第5章 海洋运载器运动应用数学模型	113
5.1 六自由度运动非线性数学模型	113
5.2 船舶定位下的六自由度运动线性数学模型	115
5.3 水平面三自由度运动数学模型	118
5.4 水平面横移和摇艏二自由度运动线性模型	122
5.5 单自由度运动数学模型	124

5.6	垂直面三自由度运动模型	125
5.7	横移-横摇-摇艏三自由度运动模型	130
第6章	螺旋推进器水动力性能数学模型	134
6.1	螺旋桨的几何特征	134
6.2	螺旋桨敞水工作特性	138
6.3	螺旋桨与船体间的相互作用	141
6.4	螺旋桨之间的相互作用	147
第7章	水平面运动方程	152
7.1	水平面运动一般方程	152
7.2	水平面运动水动力函数一阶水动力系数分析	154
7.3	水平面运动二阶和三阶水动力系数分析	161
7.4	水平回转运动分析	171
7.5	运动稳定性分析	177
第8章	垂直面运动方程	183
8.1	垂直面运动一般方程	183
8.2	垂直面运动水动力函数一阶水动力系数分析	187
8.3	垂直面运动二阶和三阶水动力系数分析	198
8.4	垂直面定常运动	208
8.5	垂直面稳定性分析	216
第9章	海洋环境数学模型	220
9.1	风模型	220
9.2	波浪模型	227
9.3	海流模型	234
第10章	模拟器用船舶六自由度运动数学模型	237
10.1	六自由度船舶运动数学模型	237
10.2	水动力系数的估算公式	240
10.3	螺旋桨推力仿真模型	243
10.4	舵力仿真模型	243
10.5	操纵性分析	244
10.6	船舶在风浪中运动仿真	245
第11章	全垫升气垫船六自由度操纵运动数学模型	256
11.1	全垫升气垫船概述	256
11.2	全垫升气垫船运动学数学模型	257
11.3	全垫升气垫船动力数学模型	258
11.4	全垫升气垫船力学数学模型	259
11.5	操纵性分析	271
参考文献		279

第1章 船舶概论

船舶的定义主要有两种：

(1) 船舶指的是依靠人力、风帆、发动机等动力,能在水上移动的交通手段。

(2) 船舶是用于交通、运输、捕捞水生物、开发海底矿藏、港湾服务、运动游览、科学调查及测量、工程作业、救险、国防军事等水上、水面及水下各种运载工具的统称。

依据第一个定义,船舶必须要进行海上航行。

依据第二个定义,如将船舶在海上要完成的交通、运输、捕捞水生物、开发海底矿藏、港湾服务、运动游览、科学调查及测量、工程作业、救险、国防军事等称为作业。

船舶是完成各种作业的水上、水面及水下各种运载工具的统称,本书称为海洋运载器。在描述海洋运载器水平面运动时本书采用船舶来进行分析,在描述海洋运载器垂直面运动时本书采用潜器来进行分析。

船舶按航行区域可分为海洋船舶、港湾船舶和内河船舶三大类。海洋船舶又分为远洋船舶、近洋船舶和沿海船舶三种。航行在湖泊上的船舶一般归于内河船舶类。

船舶按运动状态可归纳为浮行船、滑行船、腾空船三类。浮行船舶是指一切水上浮行和水下潜行的船舶,例如水面船舶和水下潜艇。滑行船是指航行时,船身绝大部分露出水面滑行的船舶,例如滑行艇和水翼艇。腾空船是指船身在完全脱离水面的状态下运行的船舶,例如全垫升气垫船。

船舶按推进方式可分为原始的撑篙、拉纤、划桨、摇橹等人力推进的船舶;依靠风帆、风车、风筒等风力推进的船舶;依靠各种机械推进的明轮船、喷水船、螺旋桨船、全垫升气垫船等。

船舶按动力装置的不同可分为蒸汽机船、柴油机船、汽轮机船、燃气轮机船、电力推进船、联合动力装置推进船和核动力装置船。

船舶按造船材料可分为木船、水泥船和钢船。

船舶按用途可分为运输船舶、渔业船舶、工程船舶、工作船舶、军用船舶以及一些特种船舶。

图1-1至图1-5为几种海洋运载器示意图。



图1-1 工程船舶

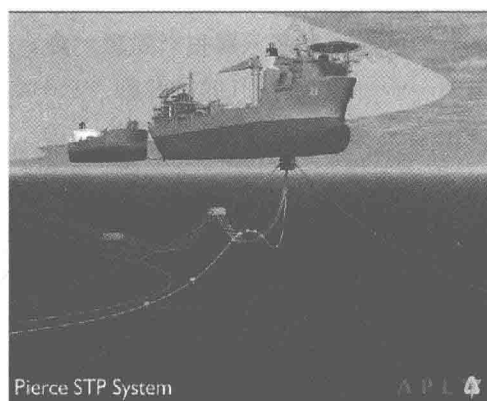


图 1-2 浮动式海上贮存装置 FPSO 和油轮

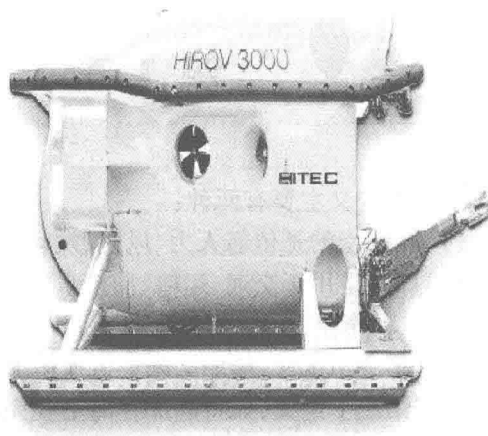


图 1-3 水下无人有缆运载器

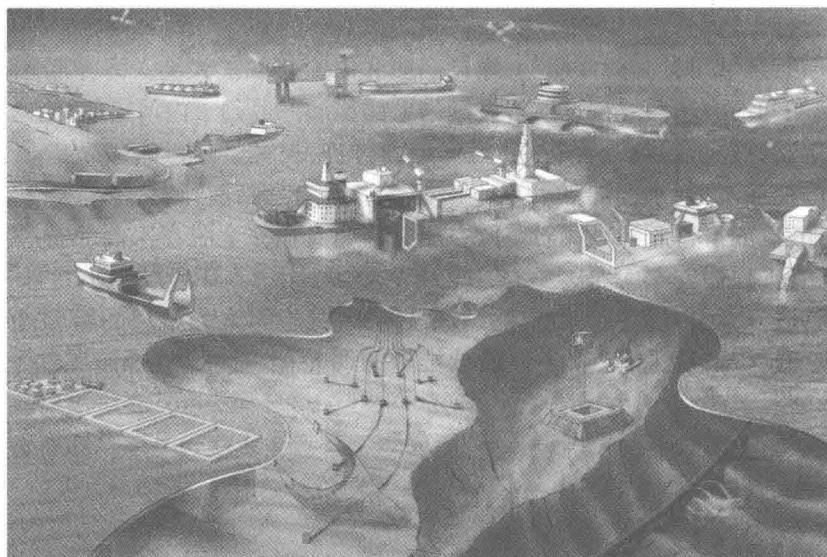


图 1-4 海上作业运载器

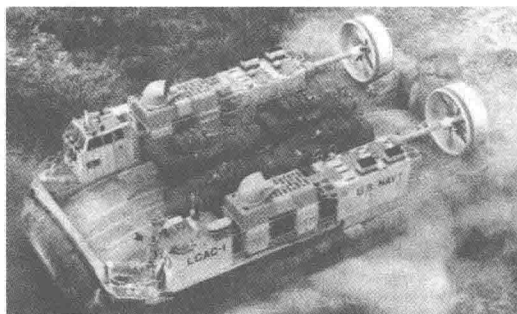


图 1-5 美国“LCAC”和俄罗斯“野牛”全垫升气垫登陆艇

1.1 船形与尺度

1.1.1 船体线型

船体形状对于船舶的性能(特别是航行性能)有很大的影响。了解船舶,首先要了解船体形状的定义和表示方法,即船体主要要素的定义及船体外形的图形表示方法。

为了使船舶航行时所受到的阻力最小,船体的表面都做成流线型的光滑曲面,两头尖瘦中间肥大,因此仅仅用长、宽、高三个尺度并不能表示出船舶的真实形状和大小,它是通过被称为船体型线图的图样来表示的。

船体外形可用投影到三个相互垂直的基本平面来表示。这三个基本投影平面称为主坐标平面,如图1-6(a)所示。它们分别是:

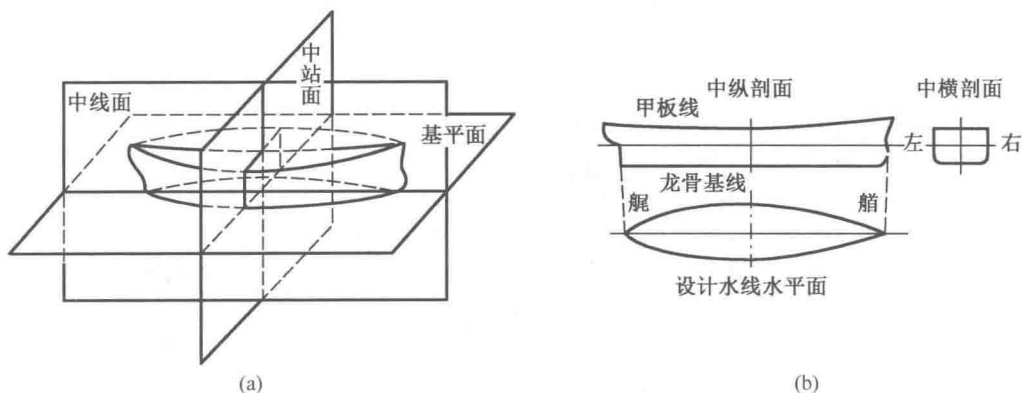


图1-6 船体外形

(1) 中线面。通过船宽中央的纵向垂直平面,处于船宽中央的纵中剖面把船体分为左右两部分,在绝大多数情况下中线面也是船体的对称面。

(2) 中站面。通过船长中点(常用 $\otimes$ 符号表示)的横向垂直平面,船体外形曲面与中线面的截面称为中站面,处于船中心点的中站面把船体分为船艏两部分。

(3) 基平面。通过中线面和中站面交线上的船底板上缘,与中线面、中站面相互垂直。基平面与中线面的交线称为基线;

位于基平面以上设计吃水处并与基平面平行的截面称为设计水线水平面。

中线面、设计水线水平面和中站面是三个互相垂直的平面,它们在船体图中的作用相当于机械图中的正投影面、水平投影面和侧投影面。

船体型线图就是用一系列平行于三个基本投影面的平面去剖切船体,将这些平面与船体型表面的交线投影到三个基本投影面上得到的。

为了表达船体各部分曲面的变化情况,需用若干同上述投影面相平行的、等距离的三组辅助平面来截切船体表面,得到三组截交线来表示船体外形的变化,如图1-7所示。

用平行于中线面的纵剖面剖切船体,得到与船体型表面的交线为纵剖线,重合于中线

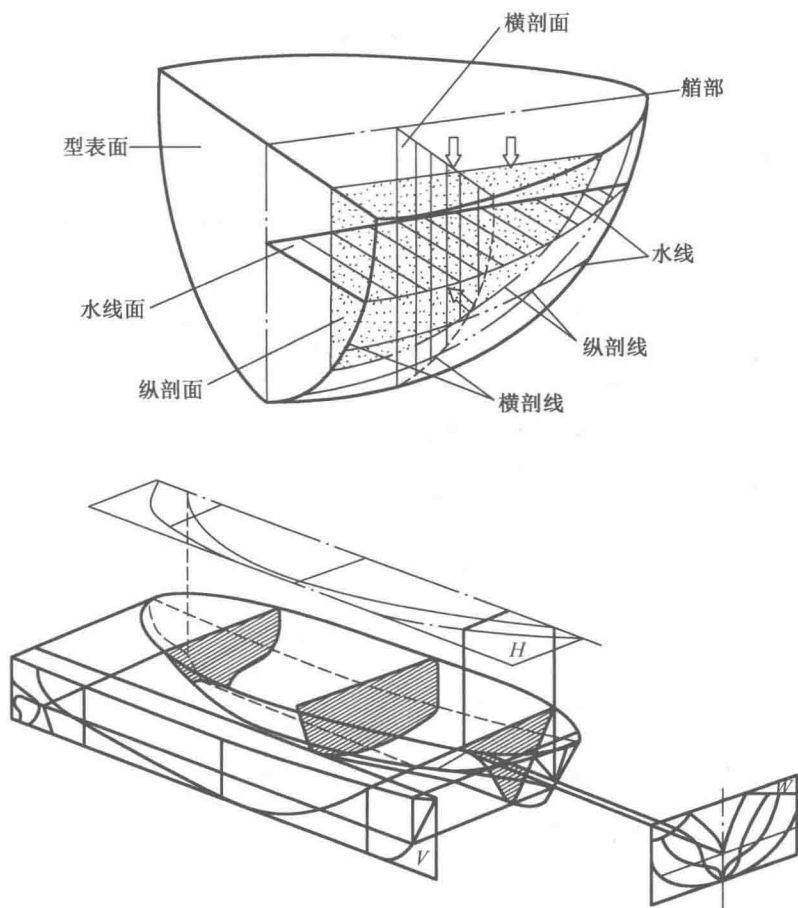


图 1-7 三个互相垂直相交得到的三组截交线图

面的中纵剖面反映出包括艏、艉部分轮廓的侧面形状。用水线水平面剖切船体,得到与船体型表面的交线为水线,通常从船底至设计吃水以相等的距离作若干根水线。用平行于中站面的横剖面剖切船体,得到与型表面的交线为横剖面,一般将船舶垂线间长作等分画出多条横剖面。

(1)纵剖面。平行中线面的多个辅助平面与船体型表面的截交线,将其绘在中线面上称为纵剖面图(V 面投影)。纵剖面为真实形状,而在另外两个投影面上为直线。

(2)横剖面。平行中站面的多个辅助平面与船体型表面的截交线,将其绘在中站面上称为横剖面图(W 面投影)。由于大多数船体表面左右对称,所以一般在横剖面图的右边绘艏横剖面,而左半部分绘艉横剖面。横剖面为真实形状,而在另外两个投影面上为直线。

(3)水线。平行设计水线水平面的多个辅助平面与船体表面的截交线,将其绘在设计水线面上称为半宽水线图(H 面投影)。因为大多数船体是左右对称的,只要画出一半就足够了。半宽水线图上的水线为真实形状,而在另外两个投影面上为直线。

1.1.2 船舶型线图

在三个投影面上画出甲板边线(甲板与外板的交线)、外板顶线和舷墙顶线的投影,就构成了完整的船体型线图。

型线图的视图是由纵剖线图、横剖线图和半宽水线图三个视图所组成。型线图能够精确地表示出船体的形状,作为计算船舶性能和实船建造时的依据。

纵剖线、水线和横剖线都是特殊位置的平面曲线,在与它平行的基本投影面投影成反映实形的曲线,在其他两个与它垂直的基本投影面上则投影成直线。这些直线分别构成各个视图的“格子”,它反映了各剖面的剖切位置,以相应的数字表示。如1 500纵剖线、2 100水线、8号横剖线等。

型线图在三个相互垂直的投影面上,以船体外型表面的截交线、投影线 and 外廓线表示船体外形的图样,如图1-8所示。

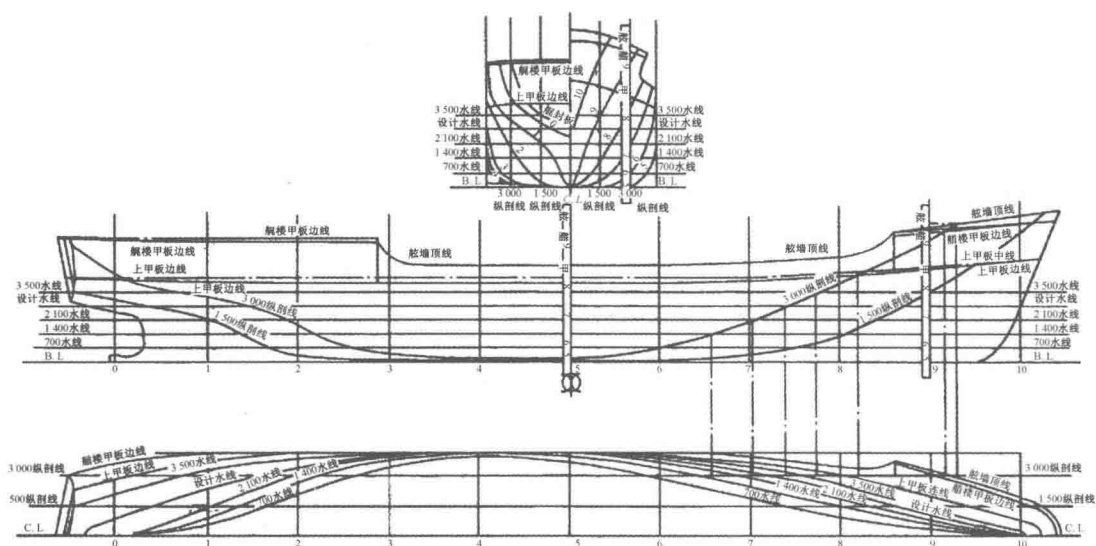


图1-8 船体型线图

由于此船舶左右对称,因此水线在水平面上只画对称的一半。在横剖线图中线的左面画船的后半段横剖线,横剖线图右面画船的前半段横剖线。

三个视图应符合投影一致性要求。纵剖线与水线交点的长度一致,与横剖线交点的高度一致,水线与横剖线的交点则须符合宽度一致的要求。

1.1.3 船体主要要素

船体主要要素有:主尺度、船型系数和尺度比。它们是表示船体大小、形状、肥瘦程度的几何参数。

1. 主尺度

船舶的大小可由船长、型宽、型深和吃水等特征尺度来度量,如图1-9所示。

(1) 船长 L 。船长定义通常有三种,即总长、垂线间长和设计水线长。

总长 L_{OA} :自船首最前端至船尾最后端的水平距离。

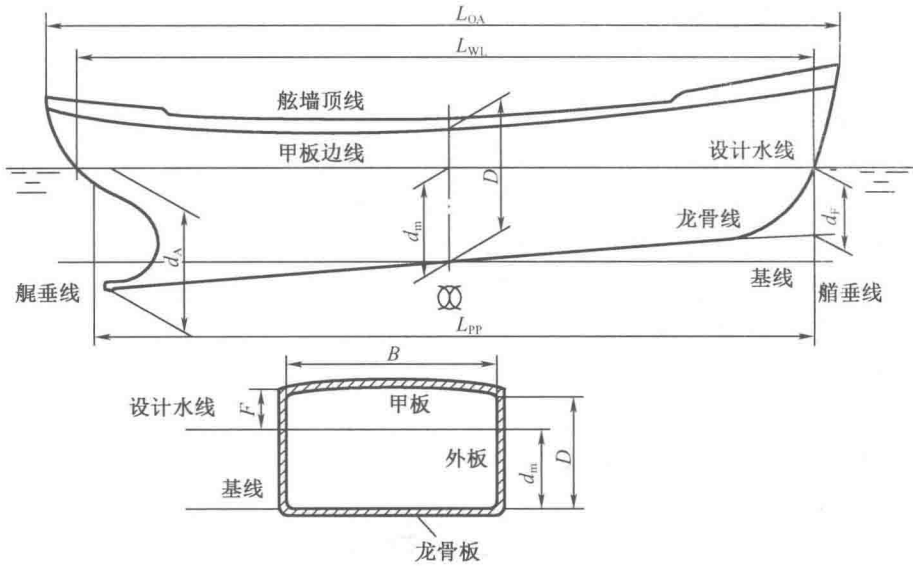


图 1-9 特征尺度定义

垂线间长 L_{PP} : 艏垂线 FP 与艉垂线 AP 之间的水平距离。艏垂线是通过设计水线与艏柱前缘的交点所作的垂线(垂直于设计水线面),或通过设计水线前端点所作的横向平面与中线面的交线。艉垂线一般在舵柱的后缘,如无舵柱,则取在舵杆的中心线上。军舰通常以通过艉轮廓和设计水线交点的垂线作为艉垂线。一般情况下,如无特别说明,习惯上所说的船长指垂线间长。

设计水线长 L_{WL} : 设计水线在艏柱前缘和艉柱后缘之间的水平距离。

(2) 型宽 B 。指船体两侧型表面(不包括船体外板厚度)之间垂直于中线面的水平距离,一般指中横剖面设计水线处的宽度。

(3) 型深 D 。在上甲板边线最低点处,自龙骨板上表面(即基线)至上甲板边线的垂直距离。通常,甲板边线的最低点在中横剖面处。

(4) 吃水 d_m 。基线至设计水线的垂直距离。有些船,设计的艏艉吃水不同,则有艏吃水 d_F (沿艏垂线自设计水线至龙骨线延长线之间的距离)、艉吃水 d_A (沿艉垂线自设计水线至龙骨线的延长线之间的距离)及平均吃水 d ,当不指明时,是指平均吃水,即 $d = (d_F + d_A)/2$ 。

2. 船型系数

船型系数是表示船体水下部分面积或体积肥瘦程度的无因次系数,这些系数对计算水动力系数、分析船型和船舶性能等有很大的用处。

(1) 水线面系数 C_{WP} 。与基平面相平行的任一水线面的面积 A_W 与由船长 L 、型宽 B 所构成的矩形面积之比(图 1-10),即 $C_{WP} = \frac{A_W}{LB}$,它的大小表示水线面的肥瘦程度。通常情况下 C_{WP} 指设计水线面系数,即设计水线面的面积与船长、型宽所构成的矩形面积之比。

(2) 中横剖面系数 C_M 。中横剖面在水线以下的面积 A_M 与由型宽 B 、吃水 d 所构成的矩形面积之比(图 1-11),即 $C_M = \frac{A_M}{Bd}$,它的大小表示水线以下的中横剖面的肥瘦程度。

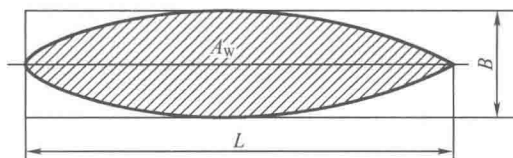


图 1-10 水线面系数图

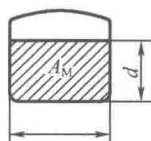


图 1-11 中横剖面系数

(3) 方形系数 C_B 。船体水线以下的型排水体积 ∇ 与由船长 L 、型宽 B 、吃水 d 所构成的长方体体积之比(图 1-12), 即 $C_B = \frac{\nabla}{LBd}$, 它的大小表示船体水下体积的肥瘦程度。

(4) 棱形系数 C_p 。船体水线以下的型排水体积 ∇ 与由相对应的中横剖面面积 A_M 、船长 L 所构成的棱柱体体积之比(图 1-13), 即 $C_p = \frac{\nabla}{A_M L} = \frac{\nabla}{C_M B d L} = \frac{C_B}{C_M}$, 它的大小表示排水体积沿船长方向的分布情况。 C_p 又称为纵向棱形系数。

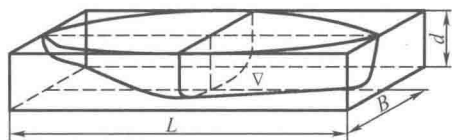


图 1-12 方形系数

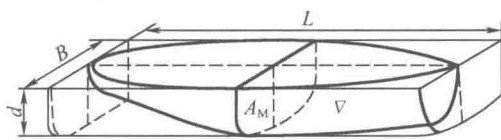


图 1-13 棱形系数

在计算不同水线处各系数时, 其船长和船宽常用垂线间长(或设计水线长)和设计水线宽, 如最大横剖面不在船中处, 则应取最大横剖面处的有关数据。吃水则取所计算水线处的吃水值。

3. 尺度比

除上述船型系数外, 还经常采用船舶各主要尺度间的比值表示船体几何特征。常用的尺度比有长宽比(L/B)、宽度吃水比(B/d)、型深吃水比(D/d)及长深比(L/D)等。

1.2 船舶浮性

浮性是船舶在一定装载情况下, 具有漂浮在水面或浸没水中一定位置保持平衡位置的能力, 它是船舶的基本性能之一。

1.2.1 船舶平衡

当船舶漂浮于水面一定位置时, 船体浸水表面的每一点都受到水的静压力, 这些静压力都是垂直于船体表面的, 其大小与浸没水中部分浸水深度成正比, 并形成一垂直向上的合力, 此合力就是支持船舶漂浮于一定位置的浮力。合力的作用点 B 称为船舶的浮心。同时船舶静止漂浮于一定位置时还受到作用于重心 G 点并垂直向下的重力 W 。

船舶所受到的浮力在数值上就等于船舶所排开的水的重力, 通常称为排水量

$$\Delta = \rho \nabla \quad (1.1)$$

式中 Δ ——船舶排水量, tf;

∇ ——船舶排水体积, m^3 ;

ρ ——水的重力密度, tf/m^3 , 淡水的 $\rho = 1 \text{ tf}/\text{m}^3$, 海水的 $\rho = 1.025 \text{ tf}/\text{m}^3$, $\rho \nabla$ 为浮力 (tf, 但习惯上都用质量单位 t 代替)。

浮心 B 也就是船舶排水体积 ∇ 的形心。

船舶处于平衡状态时, 重力与浮力的大小相等而方向相反, 重心 G 和浮心 B 在同一铅垂线上。

1.2.2 船舶浮态

船舶浮于静水的平衡状态称为浮态, 如图 1-14 所示, 通常可分为:

正浮: 是船舶中纵剖面和中横剖面均垂直于静止水面时的浮态, 如图 1-14(b) 所示。

横倾: 是船舶中横剖面垂直于静止水面, 但中纵剖面与铅垂平面成一横倾角 φ 时的浮态, 横倾角 φ 通常以向右舷倾斜 (右倾) 为正, 向左舷倾斜 (左倾) 为负, 如图 1-14(c) 所示。

纵倾: 是船舶中纵剖面垂直于静止水面, 但中横剖面与铅垂平面成一纵倾角 θ 时的浮态, 纵倾角 θ 通常以向艏部倾斜 (艏倾) 为正, 向艉部倾斜 (艉倾) 为负, 如图 1-14(d) 所示。

任意浮态: 是船舶既有横倾又有纵倾时的浮态, 即船舶的中纵剖面与铅垂平面有一横倾角 φ , 同时中横剖面与铅垂平面也有一纵倾角 θ , 如图 1-14(a) 所示。

船舶的正浮、横倾、纵倾三种浮态是任意浮态的特例。

当船舶从一个密度的水域 (例如海水) 驶入另一个密度的水域 (例如淡水) 时, 船的重力及重心位置没有变化, 但船的吃水和浮心位置都将发生变化, 亦即船舶的浮态发生变化。

在各种浮态的平衡方程中, 重心和浮心高度之间的关系通常是: 重心 G 在浮心 B 之上, 即 $z_G > z_B$ 。

船舶的浮态可以用吃水 d 、横倾角 φ 和纵倾角 θ 三个参数表示。船舶的纵倾角 θ 有时可用艏艉吃水差表示。此时船舶的浮态可以用艏吃水 d_F 、艉吃水 d_A 和横倾角 φ 表示。

$$\text{平均吃水: } d = \frac{d_A + d_F}{2}$$

$$\text{纵倾值: } t = d_F - d_A$$

$$\text{纵倾角: } \theta = \arctan\left(\frac{d_F - d_A}{L}\right)$$

1.2.3 船舶质量和重心

船舶总质量是船上各项质量的总和。若已知各项的质量 W_i , 则船舶总质量 W 可按下式求得:

$$W = W_1 + W_2 + \cdots + W_n = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1.2)$$

式中, n 为组成船舶总质量的各质量项的数目。

若已知各项质量 W_i 的重心位置 (坐标值为 x_i, y_i, z_i), 则船舶的重心位置 (x_G, y_G, z_G) 可按下式求得:

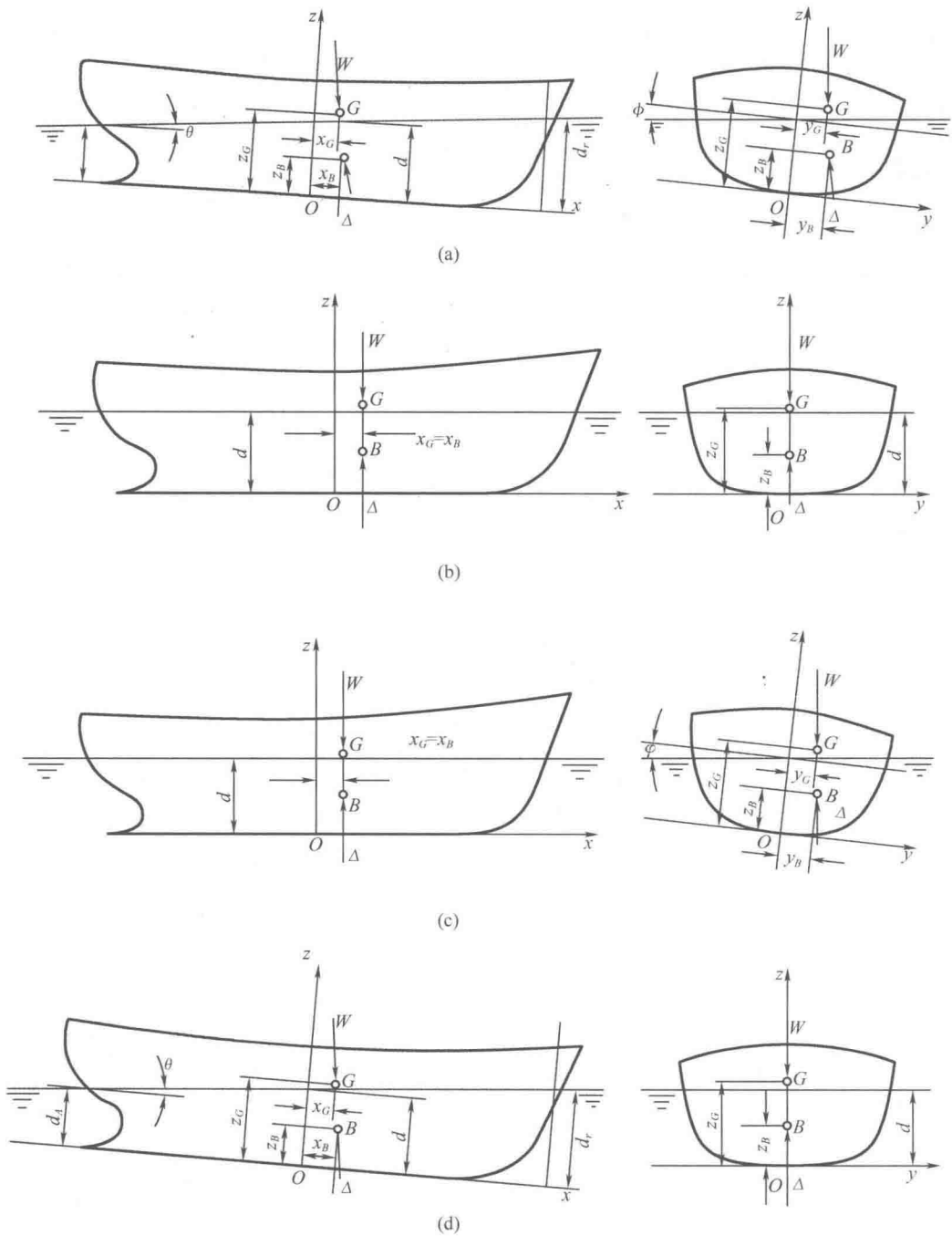


图 1-14 船舶的浮态

 (a) 静水中的船任意状态; (b) $\phi=0, \theta=0$ 时船正浮状态; (c) $\theta=0, \phi \neq 0$ 时船横倾状态; (d) $\phi=0, \theta \neq 0$ 时船纵倾状态

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^n W_i x_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, y_G = \frac{\sum_{i=1}^n W_i y_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, z_G = \frac{\sum_{i=1}^n W_i z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1.3)$$

为了避免船舶处于横倾状态,在建造和使用过程中,总是设法使其重心位于中纵剖面上,即 $y_G = 0$ 。

1.2.4 船舶排水量和浮心

1. 船舶排水量

船舶的排水量是空船质量与载重量之和。由于船舶在实际使用中载重量总是变化的,因此其排水量也随装载情况而变化。

(1) 对于民用船舶来说,在两种典型装载情况下,其相应的排水量有:

①空载排水量。系指船舶在全部建成后交船时的排水量,即空船质量。此时,动力装置系统内有可供动车用的油和水,但不包括航行所需的燃料、润滑油和锅炉水储备以及其他载重量。

②满载排水量。系指在船上装载设计规定的载重量(即按照设计任务书要求的货物、旅客和船员及其行李、粮食、淡水、燃料、润滑油、锅炉用水的储备以及备品、供应品等均装载满额的质量)的排水量。

(2) 对于军用舰艇来说,规定了五种典型的装载情况,其相应的排水量有:

①空载排水量。是指建造全部完工后军舰的排水量。舰上装有机、武器和其他规定的战斗装备,但不包括人员和行李、粮食、供应品、弹药、燃料、润滑油、锅炉水及饮用水等。

②标准排水量。是指人员配备齐全,必需的供应品备足,做好出海作战准备时的排水量。其中包括弹药、给养和其他规定的作战用品,也包括机器、锅炉和管系内的淡水、海水和润滑油,亦即包括准备开动机器装置的各项质量,但不包括燃料、润滑油和锅炉用水的储备量。

③正常排水量。是指正式试航时的排水量,相当于标准排水量加上保证 50% 航程所需的燃料、润滑油和锅炉用水的质量。

④满载排水量。是指标准排水量加上保证全航程所需的燃料、润滑油和锅炉用水的质量。

⑤最大排水量。是指满载排水量再加上附加的作战储备(包括弹药、水雷等)和附加的燃料、润滑油、锅炉用水(直至储存这些物品的舱柜装满为止)的质量。

2. 船舶排水量和浮心位置的计算

船舶在正浮状态下排水量和浮心位置的计算,可根据型线图及型值表来进行。通常有垂向沿吃水方向计算和纵向沿船长方向计算两种。在实际计算中,可根据需要采用其中一种或同时应用两种方法进行计算,以便相互校核。一般说来,如要求取船舶在正浮状态下随吃水变化的排水体积和浮心坐标,可采用第一种方法进行计算。在船舶使用过程中,由于载荷变化、舱室破损进水以及可浸长度、下水计算等,涉及船舶在纵倾状态下的排水体积和浮心坐标等值,或者计算船体强度时需要绘制浮力曲线图等,常采用第二种方法进行计算。在应用计算机进行计算时,基本上都用第二种方法。

详细计算方法可见参考文献[5]。