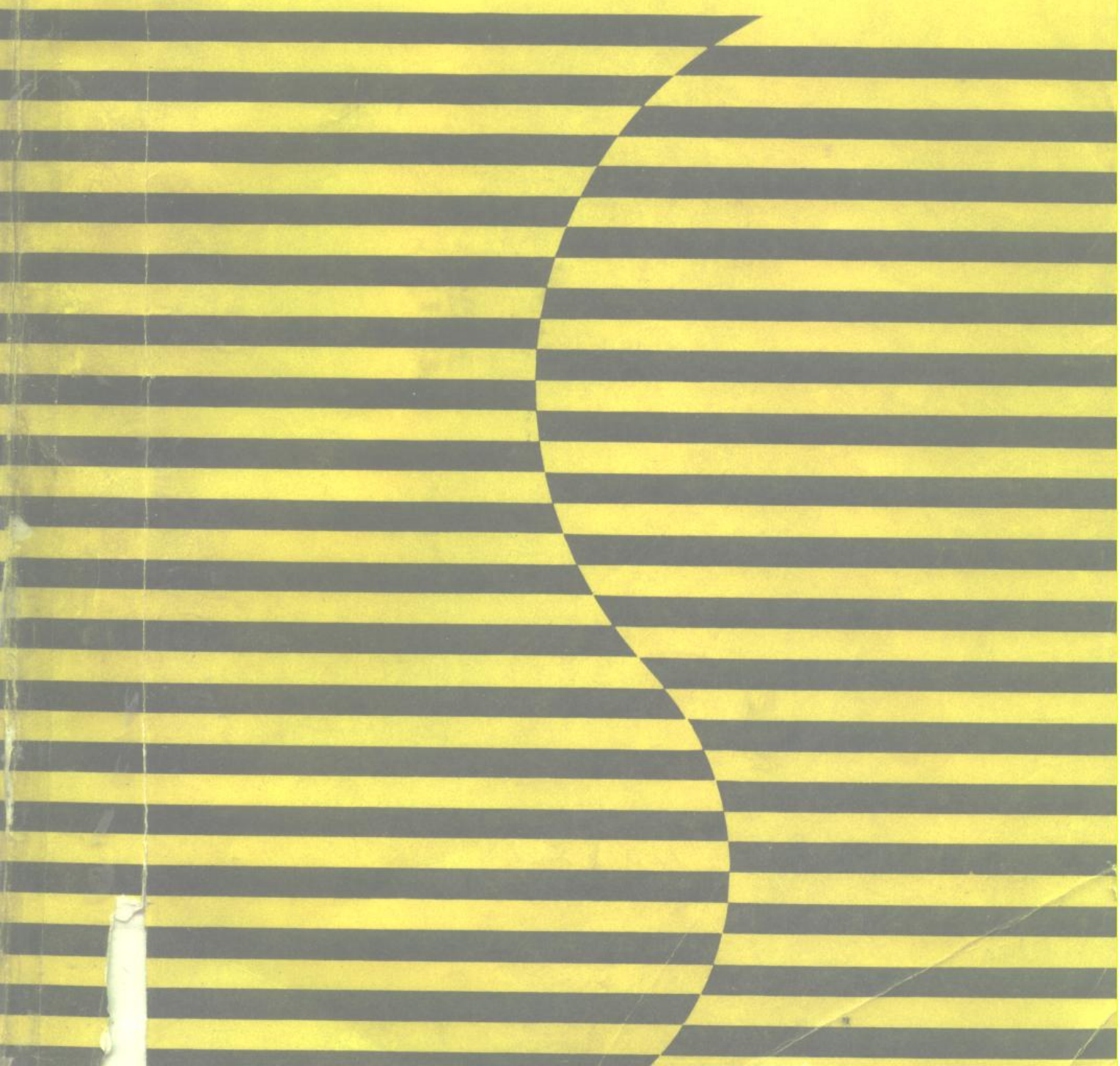


船舶原理手册

CHUANBO YUANLI SHOUCHE

鲁谦 李连有 李来成 编译

国防工业出版社



船舶原理手册

鲁 谦 李连有 李来成 编译

国防工业出版社

内 容 简 介

船舶原理手册包括船舶静力学、阻力、推进、操纵和摇摆五个部分以及一个预备篇。为便于查阅，在预备篇中介绍了船舶原理的研究方法及流体力学中的有关理论。各部分内容除了详细地阐述相应的理论和计算方法外，还提供了大量的计算公式、图表及实例。

本手册的特点是比较集中地反映了苏联造船科学工作者在船舶原理方面的工作成就。

本手册是造船工程技术人员和高等院校造船系师生在从事船舶原理研究和船舶设计时的实用参考书。

船舶原理手册

鲁 谦 李连有 李来成 编译

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刷

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张72 $\frac{1}{2}$ 1687千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数：0,001—1,080册

ISBN7-118-00163-5/U17 定价：34.40元

前 言

近年来,民船和军船的建造促进了船舶原理的研究和发展。从各方面发表的论文和专题研究报告看,由于没有给出实际应用的计算方法和计算实例,难以解决工程上的具体问题。目前已有的船舶原理书籍,因内容陈旧,满足不了船舶设计、建造的需要。为此,我们根据苏联七十年代中期到八十年代初期出版的几本具有代表性的船舶原理手册、论文集和教材编译了这本《船舶原理手册》。本手册力求解决船舶设计和建造中的实际问题以及反映当前造船科研新成就。

全书共分五篇和一个预备篇:在预备篇中介绍了与全书有关的四个内容,即船舶原理的研究方法、流体的性质、流体流动的动力相似条件和各种物体之附连质量的确定;第一篇为船舶静力学,着重介绍了船舶浮性、小倾角稳性、大倾角稳性、稳性理论在实际应用上的某些问题、抗沉性、下水、计算方法和计算数据;第二篇为船舶阻力、着重介绍了总阻力的各分量及其特性、用模型试验方法研究船舶运动时的阻力,船舶阻力的近似计算方法,船舶线型及降低阻力的方法,水翼艇阻力的计算方法;第三篇为船舶推进器,着重介绍了螺旋桨理论,螺旋桨与船体的相互作用,螺旋桨的设计和计算、螺旋桨空泡、螺旋桨-导流管系统,同轴螺旋桨、喷水推进器、部分浸水螺旋桨、明轮和直叶推进器;第四篇为船舶操纵性,着重介绍了操纵性的基本概念和操纵装置,作用在船舶上的流体动力,回转的渐近周期,定常回转,定常运动的稳定性,回转时的横倾角,舵装置的流体动力计算,实船操纵性研究;第五篇为船舶摇摆,着重介绍了船舶横摇、纵摇、减摇装置的原理,确定船舶摇摆参数的试验方法。

全书篇幅不多,却较全面地介绍了船舶静力学、船舶阻力、船舶推进器、船舶操纵和船舶摇摆的原理以及有关的计算公式、方法、表格、图谱、实例、试验方法等。文中所列举的计算公式、方法、表格没有详尽的数学推导和论证,只给出最后的结果以便应用。此外,对上述计算公式、方法、表格作了物理意义上的解释并指出了它们的应用范围。因此这本手册可以作为造船工程技术人员和高等院校造船系师生进行船舶原理各种计算时的实用参考书。

在本手册编译工作中:鲁谦拟定了全手册的编译提纲,编译了预备篇、船舶阻力、船舶推进器、船舶操纵性,校对了船舶静力学、船舶摇摆。李连有编译了船舶静力学,校对了预备篇、船舶阻力、船舶操纵性和船舶推进器。李来成编译了船舶摇摆。

武汉水运工程学院副院长吴秀恒教授、上海交通大学钱晓南副教授审阅了全部编译稿,提出了许多宝贵意见,给予了热情的帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编译者水平所限,手册中缺点一定较多,望读者批评指正。

目 录

预 备 篇

0-1 节	船舶原理的研究方法	2
0-2 节	流体的性质	2
0-3 节	流体流动的动力相似条件	6
0-4 节	各种物体附连质量的确定	10

第一篇 船舶静力学

第一章	船舶静力学的有关资料	22
1-1 节	采用的字母符号	22
1-2 节	新国际单位制 (SI) 与旧国际单位制 ($\text{m} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}$ 制) 换算表	25
1-3 节	水的比重表	25
1-4 节	定积分的近似计算法	25
1-5 节	计算变上限积分	30
1-6 节	定积分的作图计算方法和积分仪	33
1-7 节	近似计算规则	35
1-8 节	电子计算机在船舶静力学中的应用	39
1-9 节	风速、风力和风的结构	44
第二章	浮力和线型图诸参数的计算	47
1-10 节	线型图、主尺度、吃水的类别和船型系数	47
1-11 节	船舶浮性条件和排水量分类	50
1-12 节	设计水线下排水量的计算	51
1-13 节	按载重水线吃水时浮心坐标的计算	56
1-14 节	计算水线面面积的纵坐标	59
1-15 节	水线面面积的惯性矩和稳心半径的计算	60
1-16 节	横剖面面积曲线和水线面面积曲线图, 1cm 吃水的 $\text{kN}(\text{tf})$ 数曲线	61
1-17 节	容积排水量曲线和装载容积	62
1-18 节	邦戎曲线	63
1-19 节	费尔索夫曲线图	65
1-20 节	计算浮心竖坐标曲线	67
1-21 节	计算浮心横坐标曲线	68
1-22 节	综合计算表和线型图诸参数的曲线图 (流体静力学曲线)	69
1-23 节	符拉索夫积分曲线 ω 、 b 、 c	75
1-24 节	计算浮力参数和初稳性的近似公式	78
1-25 节	双体船的计算程序和船舶静力学曲线的特点	80
第三章	船舶的初稳性	85
1-26 节	基本定义	85

1-27 节	小倾角时的恢复力矩	85
1-28 节	横倾 1° 时的倾斜力矩, 纵倾 1cm 时的纵倾力矩	88
1-29 节	差动稳心	88
1-30 节	移动载荷对船舶初稳性和吃水的影响	89
1-31 节	装载或卸载对船舶初稳性和吃水的影响	90
1-32 节	液体载荷和悬挂载荷对初稳性的影响	91
1-33 节	水的盐度变化对船舶稳性和吃水的影响	92
1-34 节	船舶主尺度及其船型系数的改变对初稳性的影响	93
1-35 节	利用稳心公式可以解决的某些问题	95
1-36 节	船舶纵倾对其横向初稳性的影响	97
1-37 节	倾斜试验	98
第四章	船舶在大倾角时的稳性	115
1-38 节	基本定义和一般公式	115
1-39 节	按照 A. H. 克雷洛夫方法计算大横倾角稳性	117
1-40 节	形状稳性力臂的内插曲线	127
1-41 节	用积分曲线计算大横倾角稳性	129
1-42 节	计算大倾角船舶稳性的 H. II. 木拉法	131
1-43 节	用求积仪计算大横倾角稳性	134
1-44 节	计算上层建筑对静稳性图谱的影响	137
1-45 节	确定稳性图谱的近似公式	143
1-46 节	稳性万能图谱	147
1-47 节	改变载荷对稳性的影响	149
1-48 节	大倾角时液体载荷对船舶稳性的影响	150
1-49 节	改变船舶主尺度对其静稳性曲线的影响	153
1-50 节	计算船舶在纵向波浪上的静稳性曲线	154
1-51 节	稳性曲线的分类、性质、要求及用途	159
1-52 节	平均力矩曲线图	166
1-53 节	船舶随意航行时的稳性图谱, 其中考虑了伴随着的船舶纵倾	167
第五章	有关船舶稳性理论在实际应用上的某些问题	170
1-54 节	引起船舶横倾的外力	170
1-55 节	风载作用所造成的倾斜力矩	170
1-56 节	精确计算风的作用所造成的横倾力矩和横倾角	175
1-57 节	极限风载的计算	179
1-58 节	计算船舶回转时的横倾	182
1-59 节	移动货物和改变载荷对稳性的影响	186
1-60 节	在拖索横向猛拉力的作用下拖船的稳性	190
1-61 节	船舶稳性报告	192
第六章	船舶抗沉性	200
1-62 节	基本定义	200
1-63 节	渗透率	200
1-64 节	用稳心公式计算淹没一个隔舱时的抗沉性	202
1-65 节	淹没一组隔舱和抗沉性表	204
1-66 节	布勃诺夫的吃水改变曲线	207

1-67 节	C. H. 勃拉柯维新斯基的抗沉性近似计算法	208
1-68 节	用 Д. В. 道洛格斯达依斯基法近似计算破损吃水和计算小横倾角及纵倾角情况下的船舶稳性	212
1-69 节	当淹没由一舷伸展向另一舷的对称隔舱时, 按邦戎曲线详细计算吃水	216
1-70 节	按 B. Г. 符拉索夫方法详细计算船舶抗沉性	217
1-71 节	按 A. H. 克雷洛夫方法详细计算船舶抗沉性	223
1-72 节	按 B. B. 谢苗诺夫-张-山斯基方法计算抗沉性	232
1-73 节	破损船舶的稳性图谱	236
1-74 节	计算伴有纵倾的破损船舶的稳性图谱	243
1-75 节	1960 年国际海上人命安全公约和苏联的船舶抗沉性规范	247
第七章	下水	254
1-76 节	基本定义	254
1-77 节	下水装置的各参数	254
1-78 节	下水阶段的划分	255
1-79 节	下水时作用于船舶的力	256
1-80 节	下水开始的条件	259
1-81 节	纵向下水时决定船舶位置的参数	260
1-82 节	纵向下水的静力研究	261
1-83 节	第一个计算下水的图解分析方法。英国图谱	263
1-84 节	第二个计算下水的图解分析方法。法国图谱	266
1-85 节	B. Г. 符拉索夫的下水逐次近似计算法	269
1-86 节	下水装置各要素和下水载荷的改变对浮起和临界位置的影响	271
1-87 节	计算纵向下水的船舶运动速度	273
1-88 节	制动器的计算	277
1-89 节	横向下水第一阶段的动力计算	282
1-90 节	横向下水第二阶段的动力计算	284
1-91 节	横向下水第三阶段的动力计算	290
1-92 节	横向下水第四阶段的动力计算	292

第二篇 船舶阻力

第一章	总阻力的各分量及其特性	298
2-1 节	船舶运动的阻力分量	298
2-2 节	摩擦阻力	300
2-3 节	船体表面的曲率对摩擦阻力的影响	305
2-4 节	船体表面粗糙度对阻力的影响	307
2-5 节	船舶水下表面上的污底对其阻力的影响	314
2-6 节	形状阻力	316
2-7 节	粘性阻力	320
2-8 节	突出体阻力	322
2-9 节	船舶的空气阻力	329
2-10 节	兴波阻力	331
2-11 节	破波阻力	340
2-12 节	船舶在浅水中运动时的阻力	344

2-13 节	船舶在水道中运动时的阻力	348
2-14 节	统观各阻力分量	353
第二章	用模型试验方法研究船舶运动的阻力	356
2-15 节	试验水池	356
2-16 节	船模拖曳试验方法	357
2-17 节	船舶湿表面积的计算	358
2-18 节	阻力研究结果和拖曳功率的表示方法	359
2-19 节	将模型试验结果换算到实船的方法	362
第三章	船舶阻力的近似计算方法	369
2-20 节	船舶阻力近似计算方法的分类	369
2-21 节	近似确定拖曳功率的方法	369
2-22 节	近似确定剩余阻力的方法	374
2-23 节	从母型换算剩余阻力	431
2-24 节	根据母型用海军系数确定船舶拖曳功率	437
2-25 节	计算有限水深对阻力的影响的方法	437
2-26 节	计算在波浪上运动时的阻力	440
2-27 节	船舶以变速运动时的阻力	447
第四章	海洋船舶的线型及降低阻力的方法	450
2-28 节	船舶线型主要特性对阻力的影响	450
2-29 节	船舶有利速度和不利速度的确定	461
2-30 节	用层流化线型的方法来降低阻力	465
2-31 节	优化船体线型的计算方法	468
2-32 节	降低阻力的人工方法	476
第五章	河船阻力	485
2-33 节	自航河船的阻力	485
2-34 节	非自航河船的阻力	485
2-35 节	驳船队的阻力	489
第六章	水翼艇的阻力计算	493
2-36 节	水翼承压部件的阻力	493
2-37 节	突出体和船体的阻力	496
2-38 节	计算水翼艇在水翼航行工况时的吃水和阻力	498

第三篇 船舶推进器

第一章	船舶推进器的主要类型	505
3-1 节	船舶推进器的主要类型	505
第二章	螺旋桨一般知识	516
3-2 节	螺旋桨几何要素、结构形式和种类	516
3-3 节	螺旋桨的工作原理	521
3-4 节	制造螺旋桨的材料及其对螺旋桨几何尺寸的要求	522
3-5 节	螺旋桨的结构要素对其流体动力性能的影响	525
第三章	螺旋桨理论	527
3-6 节	理想推进器	527

3-7 节	环流理论的基本假设	530
3-8 节	无限多叶数螺旋桨叶元体上的诱导速度和力	531
3-9 节	有限叶数螺旋桨	535
3-10 节	最小诱导损失的螺旋桨	537
3-11 节	叶宽的影响	538
3-12 节	离心力的影响	542
3-13 节	粘性损失的影响	543
3-14 节	按环流理论设计计算螺旋桨	544
3-15 节	螺旋桨的验算	552
第四章	螺旋桨与船体之间的相互作用	553
3-16 节	伴流、推力减额和确定它们的理论公式	553
3-17 节	用试验方法确定螺旋桨与船体之间的相互作用系数	557
3-18 节	确定相互作用系数的经验公式	561
3-19 节	螺旋桨相对船体和突出体的布置	564
3-20 节	伴流和推力减额对螺旋桨工作的影响	565
第五章	螺旋桨的实际计算	568
3-21 节	螺旋桨的模型试验和尺度效应	568
3-22 节	螺旋桨计算曲线和图表	570
3-23 节	螺旋桨的计算程序	586
3-24 节	可调螺距螺旋桨	594
3-25 节	螺旋桨的强度计算	599
3-26 节	计算螺旋桨的例子	602
3-27 节	螺旋桨给船体的周期压力和周期力	607
第六章	螺旋桨的空泡现象	620
3-28 节	空泡现象的性质	620
3-29 节	螺旋桨模型的空泡试验和研究空泡现象的试验设备	622
3-30 节	空泡螺旋桨计算的理论基础	626
3-31 节	降低螺旋桨剥蚀和噪音强度的某些建议	628
3-32 节	计算高速船舶螺旋桨的图谱	630
3-33 节	计算高速船舶螺旋桨的例子	640
第七章	螺旋桨-导流管系统	644
3-34 节	螺旋桨-导流管系统的作用原理	644
3-35 节	计算螺旋桨-导流管系统的基本公式	645
3-36 节	实际计算螺旋桨-导流管系统	647
第八章	同轴螺旋桨	659
3-37 节	计算同轴螺旋桨的主要资料	659
3-38 节	同轴螺旋桨的计算例子	662
第九章	喷水推进器	665
3-39 节	设计喷水推进器的原始资料	665
3-40 节	高速船舶喷水推进器的计算	667
第十章	部分浸水螺旋桨	673
第十一章	直叶推进器	677

3-41 节	直叶推进器的作用原理和构造	677
3-42 节	直叶推进器的计算	681
第十二章	明轮推进器	686
3-43 节	明轮推进器的一般知识	686
3-44 节	明轮推进器的设计和计算	687
第十三章	船舶用螺旋桨换向	695

第四篇 船舶操纵性

第一章	操纵性的基本概念和操纵船舶的装置	708
4-1 节	基本定义, 船舶运动学	708
4-2 节	保证船舶操纵性的各种装置	711
4-3 节	舵装置	713
4-4 节	各种舵和导流管翼型剖面的几何参数	720
4-5 节	主动操纵装置	726
第二章	作用在船舶上的流体动力	738
4-6 节	一般概念	738
4-7 节	惯性力和力矩	739
4-8 节	确定非惯性力和力矩的试验方法	742
4-9 节	船体流体动力特性的实用计算方法	744
4-10 节	舵装置的流体动力特性	760
4-11 节	船体横向载荷和流体动力特性的理论关系	765
第三章	回转的渐近阶段	776
4-12 节	一般原理和运动微分方程	776
4-13 节	按线性化的方程计算船舶运动参数	781
4-14 节	按线性化方程计算船舶运动参数的程序和例子	787
4-15 节	计入非线性因素的船舶非定常运动参数的计算	792
4-16 节	计入非线性关系的船舶运动参数的计算程序和例题	794
第四章	定常回转	800
4-17 节	一般概念	800
4-18 节	船舶在主动操纵装置作用下的回转	800
4-19 节	带舵装置的船舶运动方程	803
4-20 节	计算定常回转参数的程序和例题	805
4-21 节	定常回转时对航速和初始航速的影响	812
4-22 节	船体形状的各单个参数和舵装置对回转性能的影响	814
第五章	船舶定常运动的稳定性	816
4-23 节	关于船舶定常运动的稳定性概念	816
4-24 节	直线定常运动的理论稳定性	817
4-25 节	曲线定常运动的理论稳定性	817
4-26 节	船舶运动的控制稳定性	818
4-27 节	备有自动舵时船舶运动的稳定性	818
第六章	备有舵装置的船舶操纵性	821
4-28 节	在静水中的船舶操纵性及操纵性图谱	821

4-29 节	按给定的操纵性设计计算船舶的几何参数	825
4-30 节	风作用下的船舶操纵性	829
4-31 节	倒车时船舶的操纵性	836
4-32 节	船舶在侧向力作用下的操纵性	841
第七章	在主动操纵装置作用下的船舶操纵性	844
4-33 节	船舶的计算机动	844
4-34 节	作用在船舶上的力和力矩	845
4-35 节	计算风作用下的船舶操纵性	849
4-36 节	估算船舶在风压作用下转弯的可能性	853
4-37 节	保持船舶无航速和无漂流的计算	855
4-38 节	计算主动操纵装置效率的例子	857
第八章	船舶回转时的横倾角	876
4-39 节	船舶回转时产生横倾的原因	876
4-40 节	计算船舶定常回转时的最大横倾角	876
4-41 节	考虑船舶在水平面内运动的参数, 计算船舶定常回转时的横倾	877
第九章	舵装置的流体动力计算	881
4-42 节	一般原理	881
4-43 节	基本定义	881
4-44 节	作用在舵或者导流管上的流体动力	884
4-45 节	孤立舵的流体动力特性	886
4-46 节	带舵承架的悬挂舵和带支架的半悬挂舵的流体动力性能	892
4-47 节	带稳定器的可旋转导流管的流体动力特性	894
4-48 节	计算船体的影响	901
4-49 节	计算螺旋桨抛出的水流对舵的影响	903
4-50 节	舵的空泡现象	908
4-51 节	计算倒车航行时舵的流体动力特性	911
4-52 节	计算程序和符号规则	912
4-53 节	计算舵的流体动力特性的例子	915
4-54 节	计算舵承架后边舵的流体动力特性的程序和实例	924
4-55 节	计算可旋转导流管的流体动力特性的程序和实例	927
第十章	实船操纵性研究	937
4-56 节	试验的准备工作	937
4-57 节	研究主动操纵装置的效率	938
4-58 节	研究装备有舵装置的船舶的回转性能	939
4-59 节	研究装备有舵装置的船舶航向稳定性和操纵性	945
4-60 节	测量回转时的横倾角	946
4-61 节	确定舵轴上的力矩	948

第五篇 船舶摇摆

第一章	海浪	954
5-1 节	规则波的特性	954
5-2 节	非规则波的特性	956

5-3 节	波谱	961
第二章	船舶摇摆的一般方程	970
5-4 节	坐标系, 一般方程	970
5-5 节	船舶质量惯性矩和自由摇摆周期的确定	978
5-6 节	附连质量和摇摆阻尼系数	981
5-7 节	横摇和垂荡时扰动力和力矩的修正系数	1012
第三章	船舶的横摇	1019
5-8 节	横浪中船舶摇摆的一般情况	1019
5-9 节	规则波上的船舶线性横摇	1023
5-10 节	不规则波上的船舶横摇	1027
5-11 节	用“МИР-1”型数字电子计算机计算船舶横摇的示例	1035
5-12 节	确定计及静稳性曲线特性的船舶自由横摇周期和表观周期	1040
5-13 节	波浪上的非线性横摇	1042
第四章	船舶纵摇	1049
5-14 节	规则波上船舶纵摇方程	1049
5-15 节	计算运输船舶纵摇的实用方法	1052
5-16 节	船舶纵摇计算实例	1054
5-17 节	不规则波上的船舶纵摇计算	1061
5-18 节	摇摆振幅的确定	1063
第五章	减摇装置	1069
5-19 节	减摇的一般情况	1069
5-20 节	被动式减摇水舱	1070
5-21 节	主动式减摇水舱	1081
5-22 节	舳龙骨	1083
5-23 节	减摇鳍	1088
5-24 节	回转稳定减摇装置	1094
第六章	确定船舶摇摆参数的试验方法	1098
5-25 节	耐波性试验水池和模拟摇摆的条件	1098
5-26 节	船模摇摆试验方法	1100
5-27 节	随机过程可见参数的静力学处理方法	1106
5-28 节	实船试验原始资料的处理和分析方法	1111
附录		1121
附录 1	描绘不规则波时所采用的某些数学公式	1121
附录 2	Γ -函数	1121
附录 3	e^{-x} 计算	1122
参考书目		1123

预 备 篇

0-1节 船舶原理的研究方法

船舶原理包括：船舶静力学、船舶阻力、船舶推进器、船舶操纵性、船舶摇摆。船舶静力学主要是研究各种情况下的船舶静力平衡及稳性和抗沉性问题；船舶阻力篇中介绍了船舶运动时所受到的各种阻力及各种阻力的计算方法，指出了降低阻力的途径；船舶推进器一篇介绍了各种船舶推进器的原理和设计方法；船舶操纵性和船舶摇摆两篇从原理到计算方法给出了设计、使用船舶所必须的知识。

船舶原理包括的五部分内容都属于流体力学的应用分支。其中采用了流体力学中大量的概念、方法、公式等。因而以流体力学为基础对船舶原理的五部分内容进行理论研究，以及在理论研究的基础上作数值计算是船舶原理的主要研究方法。

但是，由于船舶运动是一种复杂的物理过程，且船舶所在的流体介质的状况又在不断变化，目前理论上还不能解决船舶原理中的全部问题，因此在水池、风洞、水筒中的模型试验也是研究和解决船舶原理中诸问题的一个重要方法。由于模型试验受到种种条件的限制，并不能完全模拟船舶的实际运动，而必须借助实船试验来作进一步的研究工作。实船试验是检验理论研究结果和模型试验结果正确性的一种可靠方法。但是，只能在船舶建成以后才能使用。因此，目前在船舶原理这一领域里，理论研究、数值计算、模型试验、实船实验等方法都在应用。

流体力学是研究船舶原理的基础，应该在本手册中列为一篇加以介绍。但是，考虑到流体力学中的不少理论方法在船舶原理的应用计算中已间接地使用了，又考虑到船舶原理的各项日常计算并不直接使用流体力学的全部理论。因此，我们不在本手册中专门列出流体力学一篇，只是将流体力学中与船舶原理有关的一小部分内容（流体性质，流体流动的动力相似条件和各种物体的附连质量）在预备篇里作一介绍，供本手册使用者查找有关的数据。

0-2节 流体的性质

流体是一种质点易于运动的物体。

流体可分为液态流体和气态流体两种。

由于液态流体分子之间的相互作用力很大，所以液态流体（水、煤油等）的容积一定容易形成自由表面。气态流体（空气等）不形成自由表面，而是充满所在器具的全部容积。

液态流体实际上是不可压缩的。在压力改变时，气态流体改变自己的容积。

在流体力学中认为流体是连续介质，不考虑它的分子结构。与分子结构特性有关的现象由流体运动学理论来考虑。

流体在给定点的密度由下式确定

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V}, \quad (0-2.1)$$

式中 δV ——在指定点周围分出的微容积；

δm ——在上述微容积里包含的流体质量,

ρ ——密度, $\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$

假使流体中各点的密度相同, 则称这种流体为均质流体。均质流体的密度可以通过包含于单位容积中的质量来确定, 即

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (0-2.2)$$

流体单位容积内所含的物质重量叫作比重 γ , 比重的计量单位是 kgf/m^3

密度 ρ 与比重 γ 的关系式为

$$\gamma = \rho g, \quad (0-2.3)$$

式中 $g = 9.81 \text{m/s}^2$ ——重力加速度。

不可压缩流体的密度和比重取决于它们的温度及其所含的杂质。表 0-2.1 中给出了淡水比重与温度的关系。

表 0-2.1 淡水比重随温度变化值

$t, ^\circ\text{C}$	0	4	8	12	16	20	24	28	32
$\gamma, \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	999.8	1000.0	999.8	999.5	998.9	998.2	997.3	996.2	995.0

海水比重取决于溶解在其中的矿物杂质的饱和程度。其变化范围: 从内海(黑海、波罗的海)的 $1010 \sim 1015 \text{kgf}/\text{m}^3$ 到大洋的 $1023 \sim 1028 \text{kgf}/\text{m}^3$ 。表 0-2.2 给出中国沿海海水比重变化范围。

表 0-2.2 中国沿海海水比重变化范围

海 区	渤 海	黄 海	东 海	南 海	长江口附近
比重, $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	1021~1023	1023~1026	1022~1026	1021~1024	1012~1015

根据比重 γ 的平均值, 在工程计算中通常取淡水的密度 $\rho = 102 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$; 盐水的密度 $\rho = 104 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 对应于 $\gamma = 1020 \text{kgf}/\text{m}^3$ 。

气体的比重和密度取决于压力和温度。图 0-2.1 示出空气的密度 ρ 与压力 p 和温度 $t, ^\circ\text{C}$ 的关系曲线。当 $t = 15^\circ\text{C}$, 压力为 760mm 水银柱时, 空气的密度 $\rho = 0.125 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$, 比重 $\gamma = 1.226 \text{kgf}/\text{m}^3$ 。

作用在流体容积上的外力分为: 质量力和表面力。在流体中, 大小正比于质点质量的力(例如, 重力, 惯性力)叫作质量力。表面力作用于限制流体容积的表面上, 并且与这些表面面积成比例。通过计算作用在物体表面上的表面力的合力, 可以求得流体作用于物体上的流体动力和力矩。

在流体中给定点的质量力用应力向量 $\bar{F}$ 来表征并由下式定义:

$$\bar{F} = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta \bar{Q}}{\delta m}, \quad (0-2.4)$$

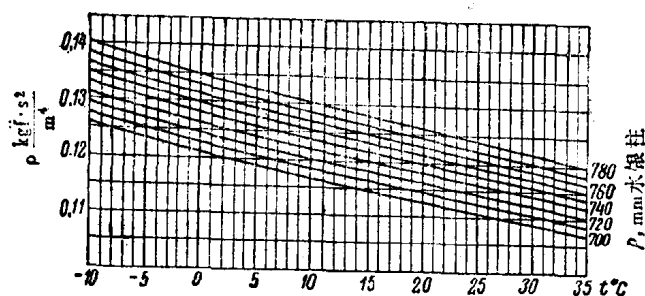


图 0-2.1 空气密度 ρ 与压力 P 和温度 t °C 的关系曲线

式中 $\delta \bar{Q}$ ——微质量力的向量，作用于质量为 δm ，容积为 δV 的流体质点上。

质量力的应力 $\bar{F}$ 的计量单位与加速度相同，即 m/s^2 。如果由重力加速度 $\bar{g}$ 表征的重力是质量力，则 $|\bar{F}| = g$ 。若是 $\bar{F} = \text{grad} U$ ，则质量力是位能力，这时 $U(x, y, z)$ ——质量力的位能。在限制流体的表面上，给定点的表面力由表面力应力向量 $\bar{p}_n$ 来表征，按下式确定 $\bar{p}_n$ 。

$$\bar{p}_n = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{\delta \bar{R}}{\delta S}, \quad (0-2.5)$$

式中 $\delta \bar{R}$ ——微元面积力向量，作用在面积 δS 的中心上。

表面应力 p_n 的计量单位是 kgf/m^2 。

在流体力学中用工程大气压作为表面力应力的测量单位。工程大气压等于 0.968 物理大气压。

工程大气压等于 $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 或 $10000 \text{ kgf}/\text{m}^2$ 的压力。在淡水柱为 10m 高或水银柱为 735.6mm 高时，可以观察到这种压力。

可以将总应力向量 $\bar{p}_n$ 沿面积 δS 的法线和切线分解为两个分量。法向分量 p 称作法向应力；切向分量 τ 称作切向应力或摩擦应力。在静止的流体中，切向应力等于零。

流体内力是流体质点之间的相互作用力。为了研究这些力，可以将它们转化成外力，即，通过流体里相应的点作一剖面，用作用在相应剖面上的表面力代替质点间的相互作用力。

在流体中运动时，不产生切向应力的假想流体称作理想（或纯粹的）流体。从理论上研究物体在流体中的运动时，常使用理想流体这一概念。物体在粘性流体中运动时，其切向应力通常不等于零。

在静止的流体中和在运动的理想流体中产生的法向应力也称作流体动压力。运动的粘性流体中的流体动压力由法向应力 p_{xx} 、 p_{yy} 和 p_{zz} 的算数平均值来决定，而 p_{xx} 、 p_{yy} 和 p_{zz} 作用在通过给定点的三个相互垂直的平面上

$$p = -\frac{p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}}{3}, \quad (0-2.6)$$

切向应力取决于流体的粘性。用动力粘性系数 μ 来表征流体的粘性， μ 的单位是 kgfs/m^2 。

除粘性系数 μ 以外，还用运动粘性系数 ν 来表征流体的粘性， ν 由以下比值确定

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (0-2.7)$$

表 0-2.3 淡水的运动粘性系数

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\nu \times 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	1.792	1.731	1.673	1.619	1.567	1.519	1.473	1.428	1.386	1.346
$t, ^\circ\text{C}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\nu \times 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	1.308	1.271	1.237	1.204	1.172	1.141	1.112	1.084	1.057	1.032
$t, ^\circ\text{C}$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$\nu \times 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	1.007	0.983	0.960	0.938	0.917	0.897	0.877	0.858	0.839	0.821
$t, ^\circ\text{C}$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$\nu \times 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	0.804	0.788	0.772	0.756	0.741	0.727	0.713	0.700	0.686	0.673

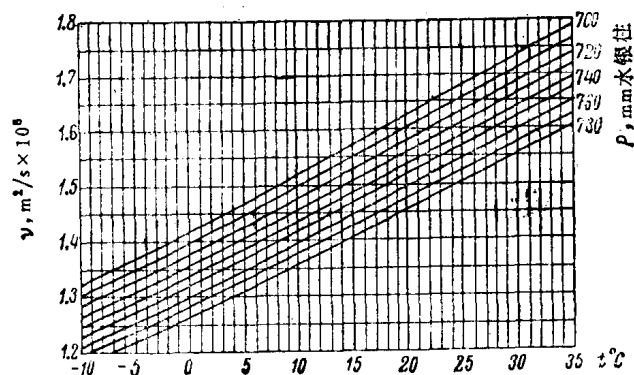
ν 的单位是 m^2/s 。淡水的运动粘性系数 ν 随温度变化的数值见表 0-2.3。表中没有列出的数值可以用线性插值法求得。

海水的粘性与淡水的粘性相差很小。表中列出了比重 $\gamma = 1028 \text{kgf}/\text{m}^3$ 海水的运动粘性系数值。

与气体不同，在实际中可以认为液体的粘性系数不取决于压力。在图 0-2.2 上示出了空气的运动粘性系数与温度和压力的关系曲线。

表 0-2.4 海水(比重为 $1028 \text{kgf}/\text{m}^3$)的运动粘性系数

$t, ^\circ\text{C}$	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
$\nu \times 10^6, \text{m}^2/\text{s}$	1.520	1.436	1.358	1.287	1.224	1.163	1.108	1.056	1.011	0.972

图 0-2.2 空气的运动粘性系数 ν 与温度和压力的关系曲线