

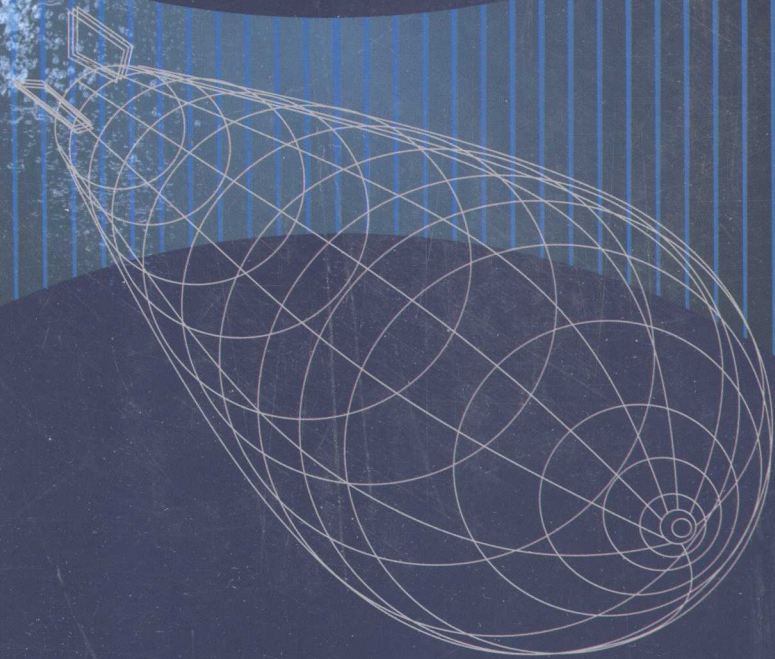
国防科工局“十二五”专业综合改革试点教材
西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

鱼雷力学

TORPEDO MECHANICS

潘光 主编

潘光 杜晓旭 宋保维 王鹏 黄桥高 编



陕西师范大学出版总社有限公司

014036619

TJ630.1
03

国防科工局“十二五”专业综合改革试点教材
西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

鱼雷力学

TORPEDO MECHANICS

潘光 主编

潘光 杜晓旭 宋保维
王 鹏 黄桥高 编



陕西师范大学出版总社有限公司



北航

C1723448

TJ630.1

03

图书代号 JC13N0010

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷力学 / 潘光主编. —西安: 陕西师范大学出版总社有限公司, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 5613 - 6906 - 7

I. ①鱼… II. ①潘… III. ①鱼雷—动力学—高等学校—教材 IV. ①TJ630.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 320442 号

鱼雷力学

主 编	潘光
责任编辑	田均利
责任校对	田均利
封面设计	安梁
出版发行	陕西师范大学出版总社有限公司 (西安市长安南路 199 号 邮编 710062)
网 址	http://www.snupg.com
印 刷	兴平市博闻印务有限公司
开 本	787mm × 960mm 1/16
印 张	25.5
字 数	470 千
版 次	2013 年 8 月第 1 版
印 次	2013 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5613 - 6906 - 7
定 价	48.00 元

读者购书、书店添货如发现印刷装订问题,请与本社高教出版社联系调换。

电话:(029)85303622(兼传真) 85307826

前

言

本书是西北工业大学专业综合改革试点教材,是在西北工业大学的优秀教材《鱼雷流体力学》、《鱼雷航行力学》的基础上编写而成的,原教材曾在机械设计制造及自动化、武器系统与发射工程、武器系统与运用工程、兵器发射理论与技术、船舶与海洋结构物设计制造等专业的本科生与研究生教学中使用多年,并被中国船舶重工集团公司第705研究所、710研究所、874厂、884厂、872厂、750试验场、海军等单位科技工作者作为参考书,社会效益显著。而本教材在统一上述两本教材坐标系的基础上,补充了鱼雷发射安全性分析、鱼雷导引弹道、鱼雷空化、作用在鱼雷上的非线性干扰力、鱼雷入水及击水力的计算等最新的研究成果,较为全面地讲述了鱼雷力学的基本概念、理论与方法及工程应用实例。

全书共13章。第一章阐述鱼雷常用坐标系与鱼雷运动参数;第二章主要论述了基于面元法的鱼雷势流流场计算方法和基于积分法的鱼雷边界层计算方法;第三章讲述了鱼雷阻力、鱼雷升力、鱼雷侧力、俯仰力矩、偏航力矩、横滚力矩等流体位置力和位置力矩的计算方法;第四章讲述了鱼雷作旋转运动时所受到的阻尼力和阻尼力矩的计算方法;第五章讲述了鱼雷作变速运动等非定常运动时所受到的惯性力和惯性力矩的计算方法;第六章论述了基于动量和动量矩定理的鱼雷运动方程组的建立及其简化;第七章论述了鱼雷纵向运动及表征运动稳定性的雷体特性;第八章论述了鱼雷侧向运动及表征运动机动性的弹道特性;第九章对鱼雷出管过程中的安全性进行了分析;第十章全面论述了古典导引方法及弹道计算;第十一章讲述了鱼雷空化现象及其对鱼雷流体动力的影响;第十二章论述了波浪、发射平台等作用在鱼雷上的非线性干扰力的计算方法;第十三章论述了空投鱼雷雷伞运动方程的建立和鱼雷入水过程中击水力的计算。本书在编写中,坚持“理论联系实际,结合工程应用”的原则,并注重反映

国内外近几年在鱼雷力学领域方面的新发展、新成果。

本书除可作为高等院校机械设计制造及自动化、武器系统与发射工程、武器系统与运用工程、船舶与海洋结构物设计制造等专业的本科生和研究生的教材外,还可作为航空、航天、船舶等领域的工程技术人员的参考书。

本书由潘光教授主编。潘光教授编写了第一、二、三、四章及附录,杜晓旭副教授编写了第五、六、七、八章,宋保维教授编写了第十一、十二章,王鹏副教授编写了第九、十章,黄桥高博士编写了第十三章。中国船舶重工集团公司705研究所杨春武总工程师主审本书,并提出许多宝贵意见,在此表示感谢;研究生杨智栋、刘欢欢、武昊、吴琳丽、钟如意、刘亚楠等在本书文字录入方面做了大量工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,希望读者批评指正。

编者

2013年3月

目 录

绪 论	0.1 鱼雷力学的研究意义	(1)
	0.2 鱼雷力学的研究内容	(6)
第一章 坐标系与鱼雷运动参数	1.1 坐标系的选择	(10)
	1.2 鱼雷的运动状态参数	(12)
	1.3 坐标转换与坐标转换矩阵	(14)
	1.4 鱼雷流体动力的主向量和力矩	(18)
	1.5 流体动力及力矩的无因次系数	(21)
第二章 鱼雷外部势流场与边界层计算	2.1 鱼雷外部三维不可压缩势流理论	(23)
	2.2 鱼雷表面压力分布计算的面元方法	(37)
	2.3 鱼雷表面压力分布的计算与应用实例	(59)
	2.4 不可压缩黏性流体绕鱼雷的流动	(61)
	2.5 轴对称边界层基本方程	(73)
	2.6 轴对称边界层的动量积分方程及其解法	(83)

第三章 鱼雷流体位置力及位置力矩

3.1 鱼雷阻力 (95)

3.2 鱼雷升力 (126)

3.3 鱼雷力矩 (147)

3.4 鱼雷流体位置力的实验测定 (162)

第四章 鱼雷流体阻尼力及阻尼力矩

4.1 基本概念 (172)

4.2 鱼雷鳍舵旋转导数无因次系数的确定 (176)

4.3 壳体旋转导数的无因次系数 (181)

4.4 确定旋转导数无因次系数的模型实验 (186)

第五章 鱼雷非定常流体动力

5.1 基本概念 (190)

5.2 流体的运动 (191)

5.3 流体的基本动力系数 (193)

5.4 附加质量的概念 (197)

5.5 理想流体作用力的确定 (199)

5.6 鱼雷附加质量的计算 (202)

5.7 附加质量的实验测定 (211)

第六章 鱼雷运动方程组

6.1 动量和动量矩定理 (216)

6.2 鱼雷运动方程组 (220)

6.3 鱼雷运动方程组的简化 (225)

第七章 纵向运动及运动的稳定性

7.1 定常水平直线运动 (228)

7.2 运动稳定性 (230)

7.3 纵向运动方程组的线性化 (234)

7.4 雷体特性 (236)

7.5 雷体特性与动态特性的关系 (244)

7.6 扰动速度对雷体特性的影响 (245)

第八章 侧向运动及运动的机动性	
8.1 过载的概念	(249)
8.2 法向过载与运动参数的关系	(250)
8.3 弹道曲率半径与法向过载的关系	(250)
8.4 鱼雷在水平面内或垂直面内运动的法向过载	(252)
8.5 需用和可用法向过载	(253)
8.6 侧向运动	(255)
8.7 侧向稳定性	(256)
8.8 回转半径	(259)
8.9 鱼雷的横滚	(260)
8.10 横滚对鱼雷运动的影响	(262)
8.11 回旋过深	(268)
第九章 鱼雷发射安全性分析	
9.1 鱼雷发射管内末弹道安全性	(270)
9.2 鱼雷在潜艇出口部运动的安全性	(275)
第十章 鱼雷导引弹道	
10.1 概述	(280)
10.2 相对运动方程	(281)
10.3 导引方法	(282)
10.4 尾追法	(283)
10.5 固定提前角导引法	(289)
10.6 平行接近法	(292)
10.7 比例接近法	(296)
10.8 三点法	(300)
10.9 逐次变提前角导引法	(305)
第十一章 鱼雷空化	
11.1 空化现象及其类型	(307)
11.2 空化的起始	(309)

11.3 空化起始条件的确定	(314)
11.4 空泡溃灭时的流场	(315)
11.5 空化对鱼雷阻力的影响	(321)
11.6 空化噪声	(325)
11.7 空化现象的实验研究	(330)

第十二章 作用在鱼雷上的非线性干扰力

12.1 海浪对鱼雷的非线性干扰力	(332)
12.2 海流对鱼雷运动的影响	(350)
12.3 发射平台对鱼雷作用的附加流体动力	(352)

第十三章 鱼雷的空投与入水

13.1 概述	(355)
13.2 雷-伞系统的运动方程	(356)
13.3 降落伞作用力	(358)
13.4 入水概念	(361)
13.5 击水问题	(367)
13.6 击水力的数值计算	(375)

附录	(386)
----------	-------

参考文献	(400)
------------	-------

绪论



0.1 鱼雷力学的研究意义

一、鱼雷力学的概念与内涵

鱼雷是一种能够自动推进并按照预定的航向和深度航行,自动导向目标且在命中目标时能自动爆炸的水中兵器。鱼雷是近代各次海战中使用最多和杀伤力最大的水中兵器,由于其具有自动跟踪与攻击目标、隐蔽性强、爆炸威力大、使用范围广等特点,始终是各国海军的主战武器。在历次海战中,鱼雷武器都起到了巨大的作用。在第一、二次世界大战中,由鱼雷击沉的舰艇及运输船在各类武器中占首位。1982年,英、阿马岛之战中,皇家海军的征服者号核潜艇只发射了两条“虎鱼”鱼雷就击沉了阿根廷海军的1.2万吨级的贝莱格朗诺将军号巡洋舰。目前,鱼雷已发展成为名副其实的水下导弹,可以预料在未来的海上战争中,鱼雷的地位和作用更是不容置疑的。

现代鱼雷可通过火箭助飞、飞机(固定翼飞机或直升机)空投、潜艇和水面舰艇发射等多种方式攻击水面和水下目标,但不管采用何种发射方式,鱼雷最后都要经过水下航行至命中目标的弹道过程,因此鱼雷在水下航行的流体动力是鱼雷力学的重点。同时,从发射开始,鱼雷就需要经受发射冲击载荷的考验。而空中弹道的力学行为又直接影响鱼雷的入水姿态。入水是一个短暂、变化激烈而又复杂的力学过程。入水瞬间不仅对雷体和雷内组件产生强烈的冲击载荷,而且对入水初期弹道带来严重影响。在入水过程中,鱼雷将经历撞水、侵水、带空泡运行、全浸湿等阶段。同时,鱼雷的水下弹道可以分为上爬或下潜、搜索、实施攻击等阶段。为了实施有效的攻击,鱼雷不仅要有可靠的动力、制导及控制系统,还必须具有良好的快速性、操纵性以及水动力噪声性能。即要求鱼雷有良好的静力特性、入水缓冲特性、流体动力特性、高效低噪声的推

进特性以及良好的弹道特性等。这些都是鱼雷力学的研究内容。

总之要保证鱼雷最终完成其战术使命,必须具备各种良好的力学性能。因此,可以说力学是鱼雷工程的一个重要的基础学科和技术支撑。鱼雷整个使用过程涉及的传统力学领域是多方面的,概括起来包括如下五个方面:

1. 鱼雷流体动力

鱼雷流体动力学是研究水与鱼雷之间相互作用力的一门学科,是进行鱼雷外形设计、弹道计算及自导与控制系统设计的必要基础。重点研究鱼雷线型优化设计(卡克斯系列线型、Granville 系列线型设计、刘钰肥型系列线型等),新型流体动力布局(十字形鳍舵、×形鳍舵、米字形鳍舵布局,附鳍、端翼等辅助布局形式等)、现代流体动力试验技术(风洞、旋臂水池、大型水槽试验技术)、流体动力数值计算技术及其水动力噪声源分析与噪声控制技术。

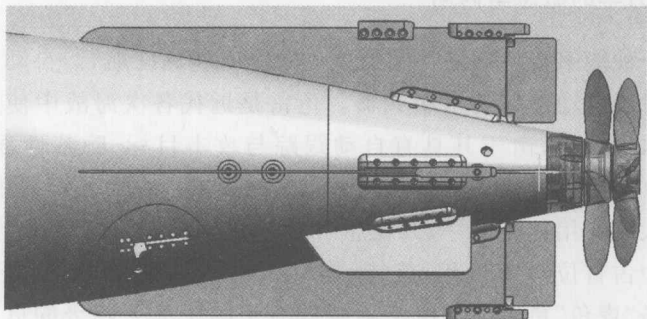


图 0-1 鱼雷流体动力布局

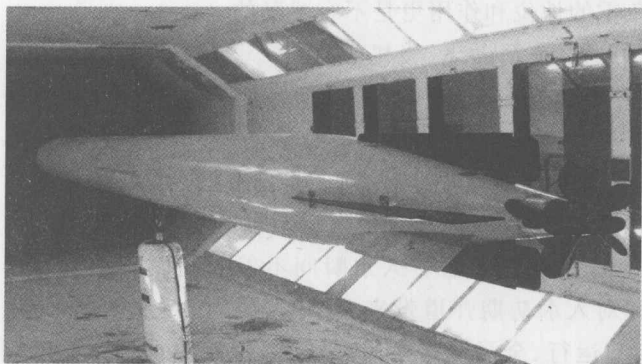


图 0-2 鱼雷风洞试验

2. 鱼雷弹道

现代鱼雷已成为具有线导遥控导引加末声自导寻的攻击的全程制导武器,

鱼雷弹道也随之向更为深广的领域发展。

鱼雷弹道研究设计的目的是根据对鱼雷的战术要求和技术实现,确定鱼雷弹道及鱼雷制导控制系统方案,使鱼雷通过线导遥控引导(或程序接近与搜索)及自导寻的攻击,最大可能地发现目标和命中目标,这是一个以鱼雷制导控制系统作为控制器,以鱼雷雷体动态特性作为受控对象,并包括目标(运动及形体)、发射艇运动特性在内的大系统问题。鱼雷弹道的研究设计成果将为各系统功能设置及分配、全雷及系统参数的优选,各系统的协同动作规程,全系统指令信息流程等提供重要依据。

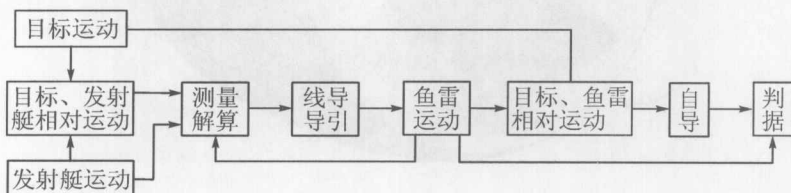


图 0-3 鱼雷弹道示意图

3. 鱼雷推进

鱼雷推进是鱼雷力学的一个重要分支,主要研究各种类型推进器的理论与设计。其目的是为鱼雷提供一种高效率低噪声的推进装置。由于推进器的特定运转环境以及它与鱼雷战术技术性能的关系,它所研究的问题又涉及空化、噪声、振动及其与雷体和发动机的匹配特性等。

近 30 年来船用螺旋桨的理论得到了飞速的发展,其数学模型已相当成熟和完善,但是,由于鱼雷推进的特殊性,这些成果尚不能直接移植到鱼雷推进装置上来。鱼雷推进学科研究设计人员的重要贡献之一就是:在船用螺旋桨理论的指导下,结合鱼雷工程的要求选择合理的鱼雷推进形式,建立适合于鱼雷推进的设计程序并提供实用的推进性能预报方法。

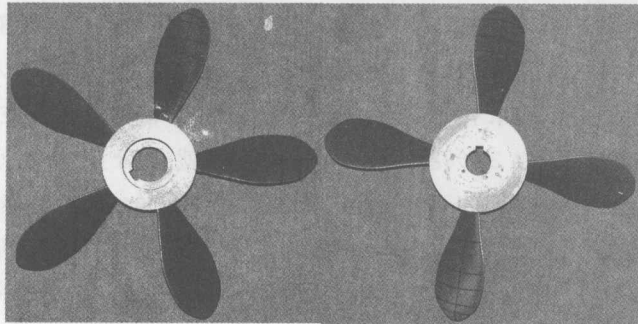


图 0-4 鱼雷对转螺旋桨

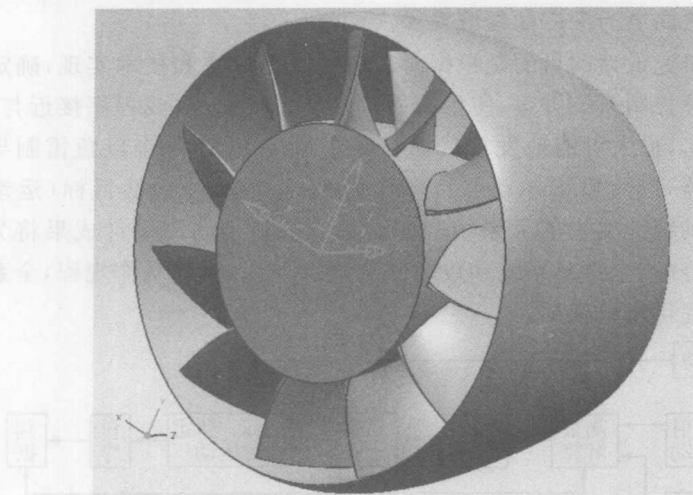


图 0-5 鱼雷泵喷推进器

4. 鱼雷入水

“入水”是鱼雷由空中进入水下必然经历的一个过程。这是一个多学科的技术领域，所涉及的问题在鱼雷工程研究中占有非常重要的地位。

鱼雷入水问题的重要性不仅在于它是鱼雷由空中到水下的第一个“接口”，更重要的是，它的行为（入水速度、入水姿态、入水载荷等）将直接影响到鱼雷水下航行（弹道）特性。因此，入水问题的研究是具有很高难度的。

鱼雷入水的若干问题主要包括入水力学现象、入水载荷、入水空泡、入水弹道、入水缓冲与卸载技术等。

入水技术是空投鱼雷的关键技术之一，一向被列为攻关项目。美国在第二次世界大战中使用的 MK-13 型空投鱼雷，限于当时对入水问题的认识和入水技术的发展水平，该雷在投放试验中曾出现过入水时撞坏壳体及其内装组件、入水弹道不稳、航行偏深和沉雷等事故，在 1000 条次的投放中，合格率仅为 20%。为此，战后美国就十分重视入水问题的研究工作，并已取得了重大的进展。我国对入水问题的研究虽然起步较晚，但由于起点高、进展快，目前已达到世界水平，部分项目甚至居世界领先地位。今后必须加强工程应用研究，尽快实现理论研究成果向在研空投鱼雷型号的转移。

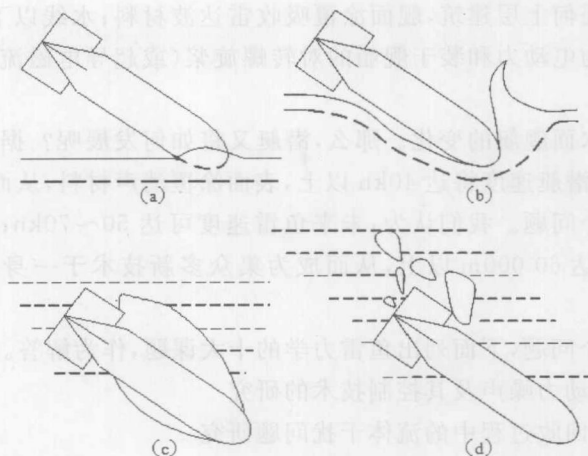


图 0-6 鱼雷入水过程示意图

5. 鱼雷结构强度

鱼雷壳体是鱼雷的主要机构,是各系统的主要承载构件。主要是根据鱼雷壳体的结构形式和承载特点,应用结构力学的基本理论和有限元方法对鱼雷壳体及其主要耐压构件的总体强度、局部强度、开孔强度及稳定性进行了理论分析和计算,并结合实例给出图谱和近似计算公式。这些公式和图谱可作为鱼雷结构设计的参考。

现代鱼雷的下潜深度已高达 600m,不久将达 1000m 以上,而静水压力是鱼雷壳体的主要危险载荷,这必然给鱼雷壳体的设计带来更大的困难。不仅如此,由于实际工程的需要,还要在鱼雷壳体上设置若干大小不等的孔穴,因此,如何选择开孔部位和形式也是壳体结构强度研究的主要内容。

二、鱼雷力学领域的发展趋势

科学技术的发展,也将促进舰艇装备及其鱼雷武器的发展。因此,未来鱼雷必然对鱼雷力学提出更高的要求。

鱼雷是攻击水面舰艇和潜艇的主要武器,也是最有效的武器。要研究鱼雷力学的发展,必须首先了解三个方面的问题:第一,未来舰艇将是什么样子的?第二,未来鱼雷又将是什么样子的?第三,为适应其变化,鱼雷力学必须研究解决的问题是什么?

关于第一个问题,我们可以参考美国正在进行的“海上革命”计划。这项革命实施后,美国海军的主要战舰将发生下列变化:战舰航速达 60kn;水线以上呈

“龟背”形且无任何上层建筑,舰面涂覆吸收雷达波材料;水线以下为双层船体,动力推进装置为电动力和装于舰艏的对转螺旋桨(或超导电磁流),以消除尾流和降低噪声。

以上只是水面舰艇的变化。那么,潜艇又将如何发展呢?据西方海军战略专家透露,未来潜艇速度将达40kn以上,表面涂覆消声材料,从而将更加隐蔽。

关于第二个问题。我们认为:未来鱼雷速度可达50~70kn;下潜深度将达1000m;航程将达60000m以上,从而成为集众多新技术于一身的名副其实的水下导弹。

关于第三个问题,下面列出鱼雷力学的十大课题,作为解答。

- (1) 鱼雷水动力噪声及其控制技术的研究
- (2) 发射与回收过程中的流体干扰问题研究
- (3) 新型鱼雷推进装置的研究设计
- (4) 减阻降噪技术的应用研究
- (5) 鱼雷尾部流场及其尾流应用的研究
- (6) 大深度鱼雷壳体研究
- (7) 入水技术的应用研究
- (8) 新型鱼雷弹道的研究设计
- (9) 水下爆炸力学研究
- (10) 鱼雷力学试验技术的研究

综上所述,我们可以得到如下认识:

- (1) 现代鱼雷是名副其实的水下导弹;
- (2) 鱼雷力学是鱼雷工程的一个主要分支,它包括流体动力、弹道、推进、入水及结构强度等诸多方面;
- (3) 在未来鱼雷的研究设计中,鱼雷力学的地位是不容忽视的。为了满足鱼雷日益发展的需要,鱼雷力学领域尚有许多新的课题需要攻克;
- (4) 如同其他学科一样,鱼雷力学也是不断发展和完善的,随着鱼雷工程的发展,不久还将有一些新的专业领域(如水下爆炸力学、仿生学等)加入到鱼雷力学领域中来。

0.2 鱼雷力学的研究内容

《鱼雷力学》一书试图比较全面地阐述鱼雷力学领域的若干最新研究成果,并尽可能地揭示该领域的发展动向与前景,希望能对鱼雷力学这一学科的发展

起到一定的推动作用。

《鱼雷力学》一书共分为十三章,现将要点介绍如下:

(1) 鱼雷流体动力

鱼雷流体动力学是研究水与鱼雷之间相互作用力的一门学科,是进行鱼雷外形设计、弹道计算及自导与控制系统设计的必要基础。

本书从求解鱼雷外部势流场与边界层入手,分别介绍了鱼雷定常流体动力、旋转导数、非定常流体动力的理论计算公式以及经验公式,并分别介绍了其试验技术。

(2) 鱼雷运动方程组

鱼雷运动方程组是研究鱼雷弹道的基础,它一般包括动力学方程和运动学方程。

本书介绍了基于刚体的动量定理和动量矩定理建立鱼雷动力学方程的过程,和基于坐标转换建立鱼雷运动学方程的过程。

(3) 鱼雷运动的稳定性和机动性

鱼雷在航行过程中,为实施对目标的有效攻击,要根据控制系统的要求,借助操舵机构改变运动方向和姿态、跟踪和追击目标,这种借助操舵机构改变或保持运动姿态、航向和深度的性能,叫做鱼雷的操纵性。

鱼雷操纵性包括两个方面的重要性能:

①运动稳定性。指鱼雷保持既定航行状态的能力,即鱼雷在某一平衡状态运动时受到某种干扰,在干扰消失后运动参数能否回到原来运动状态的能力,能回到原来运动的状态,则运动是稳定的;反之,不能回到原来运动的状态的,则运动是不稳定的。

②机动性。指鱼雷改变航行状态的能力,即鱼雷操舵后改变其航向、航深的的能力。能迅速改变航向、航深的,机动性就好,否则机动性就差。

本书介绍了鱼雷纵向运动的稳定性和侧向运动的机动性。

(4) 鱼雷导引弹道

鱼雷导引弹道是指舰艇或鱼雷发现目标后,根据选择的导引方法,遥控鱼雷或者鱼雷自导跟踪并不断接近目标,直至最后命中目标的鱼雷运动弹道。导引弹道可分为线导导引弹道与自导导引弹道两类。

本书从导引弹道的相对运动方程出发,分别介绍了自导导引弹道采用的尾追法、固定提前角导引法、平行接近法、比例接近法、逐次变提前角导引法,以及线导导引弹道采用的三点法等导引方法。

(5) 鱼雷的发射安全性

管装鱼雷在发射离艇之前,大致经历以下几个阶段:第一阶段,鱼雷在发射工质的作用下沿管轴线方向向前作直线运动,直至鱼雷圆柱中段离开管口时止;第二阶段,鱼雷除了继续向前运动外,在重力与流体动力的作用下还伴随着旋转运动,直至鱼雷完全出管;第三阶段,鱼雷后端离开发射管的前端,内弹道过程已经结束,而主机还处于启动阶段,螺旋桨产生的推力很小,鱼雷处于无动力靠惯性前进阶段,在鱼雷负(正)浮力作用下,鱼雷将边前进边下落(上浮)。

鱼雷的发射安全性分析主要考虑鱼雷发射的第二和第三阶段。鱼雷在第二阶段中的运动弹道称为管内末弹道,或过渡弹道。由于管内末弹道阶段伴随着鱼雷的旋转运动,所以管内末弹道的研究对于确定鱼雷在出管过程中是否会发生卡滞现象,能否安全出管具有重要意义。鱼雷在第三阶段中的运动弹道称为鱼雷在潜艇出口部的运动。鱼雷在潜艇出口部的运动需要使鱼雷达到一定的速度,保证鱼雷安全离艇,不致产生碰撞。同时,还要保证鱼雷由非稳定阶段过渡到稳定运动阶段的安全,即保证鱼雷最初航行阶段在深度方向上的操纵性,不致产生过大的袋深或跳水,让鱼雷可以安全航行。

本书分别介绍了鱼雷管内末弹道的计算数学模型、出口部运动的计算数学模型及其安全性分析方法。

(6) 鱼雷空化

在水温基本恒定的条件下,由于流体动力压力的下降而产生的空泡发生、发育直到溃灭的全过程称为空化现象。

鱼雷空化现象的发生,将严重地影响到鱼雷的流体动力性能(主要是鱼雷阻力和螺旋桨推力)和自导装置的正常工作(空化噪声)。

本书介绍了鱼雷空化的现象及其类型、空化的起始及其条件、空化的溃灭、空化对鱼雷阻力和噪声的影响以及空化的试验测定。

(7) 作用在鱼雷上的非线性干扰力

在鱼雷发射和弹道过程中,鱼雷处于复杂的非线性水动力环境下。主要包括有发射平台的影响、艇体扰动流场的影响、海洋波浪、海流的影响,它们对发射初弹道中的鱼雷产生了非定常的力和力矩,最终对发射弹道及安全性产生了影响。

潜艇发时鱼雷时,鱼雷要穿越发射管前面的平台区域,对于负浮力的鱼雷、出管后会向下转动,而发射管头部下方的平台对鱼雷产生一个“附加吸力”。其原理与飞机贴近地面飞行而产生的“地面效应”相同,这会引起鱼雷的附加平动和转动。鱼雷出管初弹道应避免鱼雷与平台相碰,该部分影响也需要考虑。

潜艇或舰艇的存在(它们自身相对于流场介质也可能在运动),使得鱼雷初