

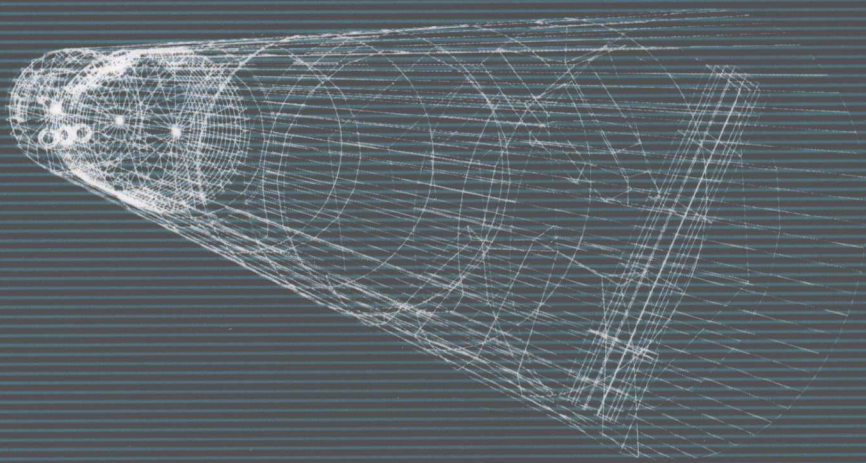
兵器科学与技术



国防科工委「十五」
规划
教材

鱼雷航行力学

● 严卫生 主编



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·兵器科学与技术

鱼雷航行力学

严卫生 主编

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是根据国防科学技术工业委员会“十五”规划教材的要求编写的。

书中较系统、全面地介绍了鱼雷航行力学的基本知识与分析方法。全书共分八章,内容有鱼雷动力学和运动学模型、鱼雷建模中一些特殊问题的考虑、鱼雷空间运动方程组分组、鱼雷纵向运动的操纵性、鱼雷侧向运动的操纵性、鱼雷导引弹道、鱼雷水下目标跟踪、鱼雷制导系统仿真。为方便读者学习使用,书末提供了多套实用的仿真源程序。

本书为高等学校武器系统与发射工程和自动化两个专业的专业教科书,还可供有关专业的师生及从事水中兵器和水下自主航行器研制工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷航行力学/严卫生主编. —西安:西北工业大学出版社,2005.7

国防科工委“十五”规划教材. 兵器科学与技术

ISBN 7-5612-1885-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 003887 号

鱼雷航行力学

严卫生 主编

责任编辑 王 璐

责任校对 季苏平

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号

发行部电话:029-88493844

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:17.5 字数:371 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1885-0 定价:25.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新



世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,



对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

《鱼雷航行力学》是为武器系统与发射工程和自动化两个专业所编写的教材。该书是根据国防科学技术工业委员会“十五”规划教材的要求而编写的,并被国防科学技术工业委员会批准立项,列为“十五”重点教材。

本教材是根据编者多年的教学经验,结合自己的科研工作,并广泛综合与总结了近年来国、内外鱼雷科研成果编写而成的。其内容力求体现面向 21 世纪教学与课程体系改革的要求,反映现代鱼雷技术发展的先进水平和最新研究成果。

本书共分八章。第一章介绍了坐标系、鱼雷运动学参数、四元数等基本概念,分析了作用在鱼雷上的理想流体作用力和流体动力,并根据动量和动量矩定理建立了鱼雷的动力学和运动学模型;第二章是在第一章的基础上,研究了鱼雷建模中的一些特殊问题,给出了适合远程鱼雷应用的导航与控制一体化模型,波浪扰动力模型,海流动力学模型及鱼雷在半速度坐标系下的动力学和运动学模型;第三章对鱼雷的动力学和运动学模型进行了分组;第四章和第五章分别分析了鱼雷纵向运动和侧向运动的操纵性;第六章讨论了导引弹道,包括线导导引弹道、声自导导引弹道及尾流自导导引弹道,其目的是对各种导引弹道进行战术评估;第七章介绍机动目标模型及目标运动参量估计,主要讨论卡尔曼滤波技术及其在水下目标跟踪中的应用,这部分内容对提高鱼雷制导系统的精度具有很好的应用前景;第八章讨论鱼雷制导系统的仿真。在每章后面都有思考题。附录中还提供了多套仿真用的源程序,以帮助读者加深学习。综观全书内容,除重视基础知识和基本方法外,还注重像制导系统仿真这种实用性很强的内容,以培养学生研究分析实际工程问题的基本技能;同时本书还适当地介绍了像适合远程鱼雷应用的导航与控制一体化模型、波浪和海



流动力学模型、混合自主线导导引、垂直命中导引、尾流导引、水下目标跟踪等新技术,从而拓宽了读者的知识面。本书可作为高等院校鱼雷专业本科生和研究生教材,我们也希望此书的出版能够对从事鱼雷研究的专业技术人员给予切实的帮助。

西北工业大学严卫生教授担任本书主编,并负责纲目的制定和全书的统稿、定稿,以及绪论、第一、五、七章的编写。参加本书编写工作的还有:西北工业大学潘光副教授(第二、三章)、李俊副教授(第四章)、李治典副教授(第六章)、张福斌博士(第八章)。在本书的编写和出版过程中得到许多同志的热情帮助和支持,深表谢忱。特别感谢中国船舶重工集团公司七五〇试验场的苗在田研究员和705所的杨保生研究员这两位鱼雷界的老前辈,他们对本书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见。

由于编者水平所限,再加上时间紧迫,书中错误与不当之处在所难免,恳请读者和同行专家不吝指正。

编者
2004年9月

目 录

绪论

第一章 鱼雷动力学和运动学模型

1.1 坐标系的选择与鱼雷运动学参数	3
1.2 四元数及其在航行力学中的应用	13
1.3 理想流体作用力	24
1.4 作用在鱼雷上的流体动力	28
1.5 鱼雷运动数学模型	39
1.6 小结	46
思考题	47

第二章 鱼雷建模中一些特殊问题的考虑

2.1 概述	48
2.2 适合远程鱼雷应用的导航与控制一体化模型	48
2.3 波浪扰动力数学模型	57
2.4 海流动力学模型	64
2.5 半速度坐标系下的鱼雷动力学和运动学模型	66
2.6 小结	68
思考题	68

第三章 鱼雷空间运动方程组分组

3.1 概述	70
3.2 雷体坐标系下的鱼雷运动方程组分组	71
3.3 半速度坐标系下的鱼雷运动方程组分组	75
3.4 小结	77
思考题	77

第四章 鱼雷纵向运动的操纵性

4.1 平衡攻角和平衡舵角	78
4.2 纵向运动的稳定性	80
4.3 纵向扰动方程及拉氏变换	83
4.4 纵向运动参数的传递函数与过渡函数	88
4.5 纵向运动参数的频率特性	92



4.6 纵向运动参数的状态空间表达式	94
4.7 纵向操纵性计算	95
4.8 小结	96
思考题	97
第五章 鱼雷侧向运动的操纵性	
5.1 水平面定常运动	98
5.2 侧向运动的扰动方程及拉氏变换	100
5.3 侧向运动参数的传递函数	103
5.4 侧向运动参数的过渡函数	106
5.5 侧向运动参数的频率特性	111
5.6 侧向运动参数的状态空间表达式	112
5.7 侧向操纵性计算	114
5.8 机动性	115
5.9 鱼雷的横滚及其对鱼雷运动的影响	119
5.10 回旋过深	123
5.11 小结	124
思考题	124
第六章 鱼雷导引弹道	
6.1 概述	125
6.2 线导导引弹道	125
6.3 声自导导引弹道	138
6.4 尾流自导弹道	172
6.5 小结	181
思考题	182
第七章 鱼雷水下目标跟踪	
7.1 概述	183
7.2 水下机动目标模型的描述	186
7.3 跟踪滤波与预测方法	189
7.4 鱼雷自导在主动工作方式下的水下目标跟踪方法	196
7.5 鱼雷自导在被动工作方式下的水下目标跟踪方法	200
7.6 小结	206
思考题	206
第八章 鱼雷制导系统仿真	
8.1 系统仿真的作用和分类	207
8.2 鱼雷制导系统仿真	209



8.3 制导系统的数学仿真	213
8.4 制导系统的半实物仿真	227
8.5 小结	236
思考题	236
附录	
I 某 324 口径热动力鱼雷数据汇总	238
II 某 533 口径电动力鱼雷数据汇总	239
III 鱼雷纵向和侧向操纵性计算 MATLAB 程序	241
IV 鱼雷自导在被动工作方式下的目标跟踪 SIMULINK 仿真源程序	245
V 自动调整提前角导引法导引弹道的数学仿真 FORTRAN 源程序	254
VI 通用的 MATLAB 鱼雷仿真模型	259
参考文献	264

绪 论

鱼雷是一种能在水中自主推进、控制和导引的水下航行器,是用以攻击水面或水下目标的水中兵器。鱼雷是英国工程师怀特海德(Whitehead Robert)于1866年发明的,至今已有130多年的历史,在过去的历次海战中鱼雷发挥过巨大的作用。在第二次世界大战期间,被鱼雷击沉的航空母舰有19艘,占被击沉航空母舰总数的45%;被鱼雷与炸弹共同击沉的航空母舰有12艘,占被击沉航空母舰总数的29%;被鱼雷击沉的巡洋舰有45艘,占被击沉巡洋舰总数的36%;被鱼雷与炸弹共同击沉的巡洋舰有23艘,占被击沉巡洋舰总数的19%;被鱼雷击沉的各国运输舰总吨位达1455万吨,占被击沉总吨位的68.8%。1982年英阿马岛海战中,英国的“无敌号”(Conqueror)核潜艇发射两条鱼雷,击沉了阿根廷的万吨级巡洋舰“贝尔格拉诺将军”号,再次显示了鱼雷武器的强大威力。

鱼雷自从诞生以来,在国、内外已经定型了多种型号的鱼雷。如果按鱼雷打击的对象来划分,则可分为反舰鱼雷、反潜鱼雷和既能反舰又能反潜鱼雷;如果按鱼雷所采用的动力推进系统来划分,则可分为电动力鱼雷和热动力鱼雷;如果按鱼雷外径来划分,则可分为重型鱼雷和轻型鱼雷;如果按鱼雷的发射方式来划分,则可分为管装发射鱼雷、空投鱼雷和火箭助飞鱼雷;如果按鱼雷控制指令的来源来划分,则可分为自主式制导鱼雷(直航鱼雷、惯性制导鱼雷)、自导鱼雷、线导鱼雷和复合制导鱼雷。

随着现代科学技术的发展,各国正在积极发展高性能的潜艇和水面舰艇,特别是在航速、机动性和隐身性方面得到了极大的提高,这就促使鱼雷武器也必须适应这些技术发展的需要,来满足未来作战的需要。从鱼雷武器未来的发展方向来看,将向高速、大深度、远航程、低噪声、精确制导的方向发展,且能垂直命中目标,并能命中目标的关键部位。

鱼雷航行力学作为研究鱼雷航行运动规律的一门学科,从分类上说,它是一般力学的一个分支。作为鱼雷航行的理论基础,鱼雷航行力学是随着人类探索鱼雷水下航行实践活动的不断开拓而逐渐形成和发展起来的,特别是人们对高性能鱼雷武器发展的需要,极大地推动了鱼雷航行力学的发展。

鱼雷航行力学作为鱼雷工程的基础科学,不局限于研究具体某种型号鱼雷的性能,而是研究各种类型鱼雷运动规律的共同属性,现代鱼雷的各项性能(如航速、机动性、稳定性等)的提高都直接取决于鱼雷航行力学的研究成果。其内容可分为两类主要问题。一类是研究鱼雷可能的或在某种意义上最佳的运动轨迹。此时,把鱼雷看做是一个可控的质点,着眼于控制结果产生的弹道、航行速度、深度等等参数的变化规律,而不在于控制的过程如何。另一类为研究沿某条弹道运动的操纵性和运动的稳定性,即鱼雷保持和改变航行状态的能力。此时,把鱼雷



看做是一个可控的刚体。解的结果应回答鱼雷按第一类问题所确定的某条弹道来航行是否可能,以及其在航行过程中的品质如何,等等。

就学科性质而言,鱼雷航行力学是一门理工结合的学科。它以应用数学、理论力学、流体力学、控制理论和计算机技术作为主要的理论基础和研究手段。对于从事鱼雷设计和鱼雷控制系统设计专业工作的科技人员来说,鱼雷航行力学是一门重要的专业基础课。

本学科的研究方法分理论研究和试验研究两个方面。本教材主要限于理论研究方面。全书共分为五大部分。第一部分由第一、第二和第三章组成。这部分内容是鱼雷航行力学的基础,主要论述了鱼雷运动的数学模型及鱼雷运动方程组的分组。第二部分由第四和第五章组成,主要论述鱼雷纵向运动和侧向运动的操纵性、稳定性和机动性。第三部分即第六章,主要论述了鱼雷的导引弹道,包括线导导引弹道、声自导导引弹道及尾流自导导引弹道。第四部分即第七章,主要论述了鱼雷对水下目标的弹道跟踪方法。第五部分即第八章,主要论述了鱼雷制导系统的仿真。此外,在附录中还给出了大量的仿真源程序,以帮助读者掌握所学的内容。

第一章 鱼雷动力学和运动学模型

随着鱼雷航行速度的增加和机动性的提高,鱼雷的运动不再是单纯的平面运动,而是一个具有六个自由度的空间运动。本章把鱼雷作为刚体,将流体动力和其他作用力作为外力,根据坐标系及转换矩阵推导出运动学关系式;根据动量定理和动量矩定理推导出动力学方程;最后给出鱼雷动力学和运动学模型的一般表达式和简化式。

1.1 坐标系的选择与鱼雷运动学参数

1.1.1 坐标系的选择

为了研究鱼雷的运动,应选用一些坐标系。一般说来,坐标系的选择是任意的,但是,如果坐标系选取得当,会给讨论问题带来方便。本章中常用到的坐标系有地面坐标系、雷体坐标系、平移坐标系、速度坐标系和半速度坐标系。

一、地面坐标系 $O_0x_0y_0z_0$

该坐标系各轴与地球固连(相对于地面静止不动),这些轴简称地轴。地面系的原点 O_0 选在地面某处,例如,选发射点为原点, O_0y_0 轴铅直向上, O_0x_0 轴在水平面内指向任意方向,例如选发射方向, O_0z_0 轴则垂直于 O_0x_0 和 O_0y_0 轴,其方向使该坐标系成为右手坐标系,如图 1.1 所示。鱼雷相对这一坐标系的运动就是鱼雷相对地面的运动。

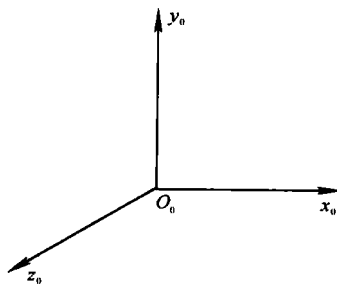


图 1.1 地面坐标系

二、雷体坐标系 $Oxyz$

雷体坐标系也称固连系,该坐标系各轴与鱼雷固连,也就是相对鱼雷静止不动的坐标系,这一坐标系的各轴称为固连轴。

雷体坐标系的原点 O 通常选在鱼雷的浮心或质心,本书采用浮心为坐标原点。 Ox 轴沿鱼雷纵轴并指向前方, Oy 轴垂直于 Ox 轴并指向上方(当鱼雷在地面上正常放置时); Oz 轴垂直于 Ox 和 Oy 轴,其方向使坐标系成为右手系(从雷尾向前看 Oz 轴指向右侧),如图 1.2 所示。

Ox 轴即鱼雷的纵轴, Oy 轴在垂直鳍所在的平面内,称为立轴, Oz 轴在水平鳍所在的平面内,称为横轴。 xOy 平面称为鱼雷的纵对称面, xOz 平面称为鱼雷的横平面。通常雷体坐标系的三个轴接近于鱼雷的主中心惯性轴。

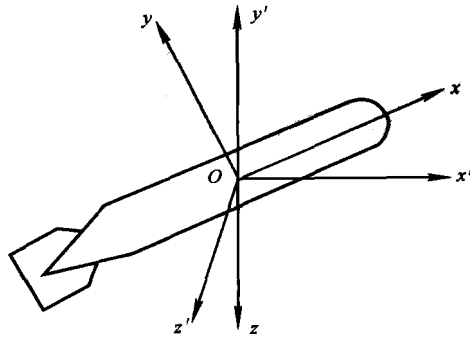


图 1.2 雷体坐标系与平移坐标系

三、平移坐标系 $Ox'y'z'$

平移坐标系随鱼雷一起运动,其坐标原点始终与雷体坐标系原点重合(见图 1.2),各坐标轴 Ox', Oy', Oz' 在鱼雷运动过程中与地面坐标系对应的坐标轴 O_0x_0, O_0y_0, O_0z_0 保持平行,且指向相同。

四、速度坐标系 $Ox_1y_1z_1$

速度坐标系的原点与雷体坐标系的原点重合, Ox_1 轴与原点处鱼雷的速度矢量重合, Oy_1 轴位于鱼雷的纵对称面内,与 Ox_1 轴垂直并指向上方, Oz_1 轴垂直于 x_1Oy_1 平面,指向按右手坐标系确定,如图 1.3 所示。

五、半速度坐标系 $Ox_2y_2z_2$

半速度坐标系的原点与 Ox_2 轴分别与速度坐标系的原点及 Ox_1 轴重合, Oy_2 轴位于铅垂面内,垂直于 Ox_2 轴,并指向上方, Oz_2 轴位于水平面内,垂直于 x_2Oy_2 平面,指向按右手坐标系确定。

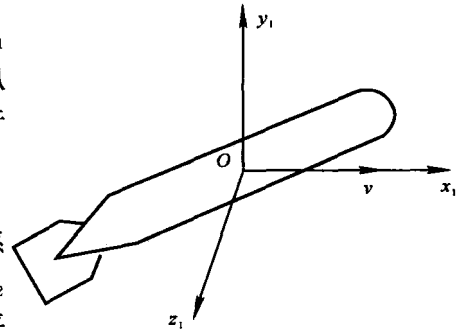


图 1.3 速度坐标系

1.1.2 运动学参数

一、位置坐标 x_0, y_0, z_0

x_0, y_0, z_0 表示鱼雷运动过程中其浮心在地面坐标系中的三个坐标。 x_0, y_0, z_0 三个参数惟一地确定了任时刻鱼雷在空间的位置。 x_0, y_0, z_0 也分别称为鱼雷的水平位移、航行深度及侧向位移。

鱼雷在空间中的运动轨迹,即鱼雷的空间弹道曲线可由下式确定:



$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_0(t) \\ y_0 &= y_0(t) \\ z_0 &= z_0(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

鱼雷的空间弹道曲线常用平面弹道曲线来表示,即

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_0(t) \\ y_0 &= y_0(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_0(t) \\ z_0 &= z_0(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式(1.2)与式(1.3)分别为铅垂面弹道曲线与水平面弹道曲线。

二、速度 v, v_0

v 表示鱼雷的运动速度矢量,本书中鱼雷的运动速度通常是指鱼雷质心或浮心处的运动速度,因此 v 实际上是鱼雷质心或浮心处的速度矢量。当研究鱼雷上不同点处的速度时,一般也以 v 表示鱼雷上任一点处的速度矢量,在这种情况下,基点处(通常也选在质心或浮心处)的速度矢量以 v_0 表示。

v_x, v_y, v_z 及 $v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}$ 则分别表示 v 在雷体坐标系及地面坐标系中的三个分量。任一时刻鱼雷在空间的位置坐标 x_0, y_0, z_0 与鱼雷运动速度之间的关系为

$$\frac{dx_0}{dt} = v_{x_0}, \quad \frac{dy_0}{dt} = v_{y_0}, \quad \frac{dz_0}{dt} = v_{z_0} \quad (1.4)$$

三、姿态角 θ, ψ, φ

研究鱼雷运动,就是研究鱼雷相对于地面坐标系的运动,也就是研究雷体坐标系相对于地面坐标系的运动。

鱼雷作为一个刚体有六个自由度,雷体坐标系相对于地面坐标系的位置就由六个坐标来确定,即雷体坐标系的原点在地面坐标系中的坐标 x_0, y_0, z_0 和雷体坐标系与地面坐标系之间的三个角度 θ, ψ, φ 。三个角度分别表示鱼雷的俯仰角 θ (或称为纵倾角)、偏航角 ψ (或称为航向角)、横滚角 φ (或称为横倾角)。俯仰角 θ 是雷体坐标系的 Ox 轴与地面坐标系的 $x_0O_0z_0$ 平面之间的夹角,当鱼雷头部偏向 $x_0O_0z_0$ 平面之上时, θ 为正。偏航角 ψ 是雷体坐标系的 Ox 轴在地面坐标系 $x_0O_0z_0$ 平面上的投影与地面坐标系的 O_0x_0 轴之间的夹角(见图 1.4),当鱼雷头部偏向 O_0x_0 轴左侧时, ψ 为正。横滚角 φ 是雷体坐标系的 Oy 轴与通过 Ox 轴且垂直于地面坐标系 $x_0O_0z_0$ 平面的铅垂面之间的夹角,从雷尾向雷头方

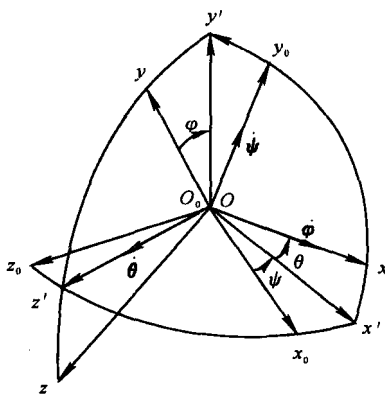


图 1.4 雷体坐标系与地面坐标系的相对位置