普通高等教育“九五”国家级重点教材
全国高等学校船舶专业规划教材

鱼雷自动控制系统

(第2版)

徐德民　主编
徐德民　吴旭光
任　章　严卫生　编著

西北工业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

【内容简介】　本书是根据全国高等学校船舶类专业“九五”教材规划而编写的，是普通高等教育“九五”国家级重点教材。

本书较系统、全面地介绍鱼雷自动控制系统的基本原理与分析设计方法。全书共分10章，主要内容有：鱼雷自动控制系统的基本组成与战术技术要求、航行动力学、鱼雷弹道、敏感元件、舵机与舵回路、侧向运动的稳定与控制、纵向运动的稳定与控制、鱼雷自动控制系统的经典设计方法、现代设计方法以及非线性控制系统。为便于读者学习使用，书中提供了大量的图表、数据、实用公式、计算实例以及参考文献。

本书为高等学校探测制导与控制技术（含鱼雷、水雷工程）专业的教材，也可供有关专业师生以及从事水中兵器和水下自主航行器研制工作的科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

鱼雷自动控制系统/徐德民等编著.—2版.—西安：西北工业大学出版社，2001.2

ISBN　7-5612-1324-7

Ⅰ.鱼…　Ⅱ.徐…　Ⅲ.鱼雷-自动控制系统　Ⅳ.TJ630.3

中国版本图书馆CIP数据核字（2000）第84963号

出版发行：　西北工业大学出版社
通信地址：　西安市友谊西路127号　邮编：710072　电话：029-8493844
网　　址：　http://www.nwpup.com
印 刷 者：　西安向阳印刷厂
开　　本：　787 mm×960 mm　1/16
印　　张：　24.25
字　　数：　528千字
版　　次：　1991年6月　第1版　　2001年10月　第2版　第2次印刷
印　　数：　1001～3400册
定　　价：　30.00元

第 2 版前言

本书第 1 版于 1991 年由西北工业大学出版社出版，使用至今，受到读者欢迎。第 2 版是根据“全国高等学校船舶类专业‘九五’教材规划”而编写的，并被教育部(原国家教委)批准立项，列为普通高等教育“九五”国家级重点教材。

第 2 版力求体现面向 21 世纪教学内容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；做到突出重点，联系实际，深入浅出，注重概念和原理的阐述，避免冗长的数学推导，以利于读者全面掌握鱼雷自动控制系统的基本理论和实际应用。

本书第 2 版仍分 10 章，对第 1 版各章节的内容进行了不同程度的修改和更新，其中更改较大的有：去掉第 1 版中第十章控制系统计算机辅助设计(已出版《鱼雷控制系统计算机辅助分析、设计与仿真》一书)，新增写了鱼雷弹道(第三章)、惯性测量技术(§4－7)、惯性导航技术(§4－8)、液压舵机与舵回路(§5－4)、变结构控制系统设计(§10－6)，更新了第八章鱼雷自动控制系统设计的大部分内容。自第二章起，在每一章的后面均附有小结和一定数量的综合练习题，旨在使读者加深对基本概念和原理的理解，提高综合分析能力。

本书为高等学校探测制导与控制技术(含鱼雷、水雷工程)专业的教材，也可供有关专业师生以及从事水中兵器和水下自主航行器研制工作的科技人员参考，内容比较丰富。为了适应不同读者的需要，各章的内容尽可能做到相对独立，以便于读者根据具体要求灵活选择。

本书由徐德民教授主编，负责纲目的制定和全书的定稿，并撰写第一、二、六、七、八章。参加撰写的有吴旭光教授(第四、五章，统稿)、任章教授(第九、十章)、严卫生副教授(第三章)。博士研究生高磊、孙峻参与了修订和撰写工作。第 705 研究所杨保生研究员认真审阅了全部书稿，提出了宝贵的修改意见，在此向他表示诚挚的感谢。

由于编著者水平所限，书中的不妥之处，恳请读者和同行专家不吝指正。

编 著 者

2000 年 7 月于西北工业大学

第 1 版前言

本书是在原有讲义基础上,经过多年教学实践,并根据航空航天工业部 1988 年至 1990 年教材选题规划进一步修订而编写成的,以适应我国鱼雷自动控制专业教学的需要。

全书共分十章。绪论中介绍鱼雷自动控制系统的基本作用和原理、主要组成以及对系统的战术技术要求。第二章讲述鱼雷航行动力学,研究鱼雷(被控对象)的动态特性和数学模型。第三、四章分别介绍敏感元件、舵机和舵回路,着重研究几种常用的敏感元件和舵机的结构原理及工作特性。在第五、六、七章分别讲述鱼雷航向控制系统、横滚控制系统、深度控制系统和纵倾控制系统的工作原理、控制规律、动态特性和稳态特性分析、工程设计方法等。考虑到我国目前的实际情况,这三章仍以经典控制理论为主,以期读者在学完此书后,能掌握经典控制理论的基本方法,并能用来分析和设计单通道的鱼雷自动控制系统。第八章简要介绍现代控制理论的有关内容及其在鱼雷自动控制系统中的应用。第九章讲述鱼雷自动控制系统中常用的两种非线性控制系统——继电型控制系统和饱和型控制系统的分析方法。考虑到计算机辅助设计(CAD)已广泛应用,书中第十章对控制系统的 CAD 技术也作了简要介绍。

本书涉及的内容比较广泛,参考和引用了不少教材和文献资料,由于篇幅所限,对问题的讨论和公式推导不能一一详述,为方便读者学习,书后附有参考文献目录,以供读者参阅。

本书由徐德民主编,负责全书的统稿和部分修改,并编写第一、二、五、六、七等章。参加编写的有夏志石(第四章和第十章)、李宗科(第三章)、任章(第八章)、何银洲(第九章)。

本书由海军工程学院金纪坤教授和第 705 研究所高启云高级工程师进行了认真审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。在本书编写和出版过程中,得到许多同志的热情帮助和支持,特表谢忱。

由于编著者水平所限,书中的错误与不当之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 著 者

1990 年 8 月

目　　录

第一章　绪论 …… 1

§1－1　鱼雷及其自动控制系统的发展 …… 1
§1－2　鱼雷弹道与控制 …… 3
§1－3　鱼雷自动控制系统的基本原理与组成 …… 5
§1－4　鱼雷自动控制系统的战术技术要求 …… 7

第二章　鱼雷航行动力学 …… 11

§2－1　鱼雷空间运动的表示及其操纵机构 …… 11
§2－2　流体动力与力矩 …… 16
§2－3　流体动力系数 …… 20
§2－4　流体动力表达式 …… 24
§2－5　铰链力矩 …… 27
§2－6　鱼雷的运动方程 …… 28
§2－7　鱼雷纵向运动 …… 37
§2－8　鱼雷侧向运动 …… 49
§2－9　鱼雷横滚运动 …… 55
小结 …… 59
练习题 …… 59

第三章　鱼雷弹道 …… 61

§3－1　鱼雷全弹道设计 …… 62
§3－2　导引弹道的相对运动方程 …… 68
§3－3　尾追导引法 …… 70
§3－4　固定提前角导引法 …… 73
§3－5　自动调整提前角导引法 …… 77
§3－6　比例导引法 …… 78

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§3－7 平行接近法 …… 81
§3－8 三点法导引 …… 81
§3－9 其它导引方法 …… 85
§3－10 国外典型鱼雷弹道 …… 90
小结 …… 93
练习题 …… 94

第四章 敏感元件 …… 95

§4－1 陀螺仪概述 …… 95
§4－2 刚体运动的描述 …… 98
§4－3 陀螺动力学基本概念和动力学方程 …… 101
§4－4 双自由度陀螺仪运动特性 …… 107
§4－5 单自由度速率陀螺仪运动特性 …… 113
§4－6 加速度计 …… 116
§4－7 惯性测量技术 …… 119
§4－8 惯性导航技术 …… 133
§4－9 深度传感器 …… 140
小结 …… 147
练习题 …… 148

第五章 舵机与舵回路 …… 149

§5－1 概述 …… 149
§5－2 气动舵机与舵回路 …… 151
§5－3 电动舵机与舵回路 …… 157
§5－4 液压舵机与舵回路 …… 167
小结 …… 177
练习题 …… 177

第六章 侧向运动的稳定与控制 …… 178

§6－1 航向控制系统的基本原理 …… 178
§6－2 航向控制系统的动态特性 …… 180
§6－3 航向控制系统的稳态分析 …… 186
§6－4 横滚对鱼雷航行的影响 …… 188
§6－5 横滚控制系统的特性分析 …… 191
小结 …… 195

练习题…… 195

第七章　纵向运动的稳定与控制…… 196

§7－1　深度控制系统的构成与基本类型…… 196
§7－2　具有俯仰角信号的深控系统…… 197
§7－3　具有垂直速度和垂直加速度信号的深控系统…… 209
§7－4　深度控制系统的动态特性…… 216
§7－5　深度控制系统的稳态误差…… 228
§7－6　纵倾控制系统…… 232
小结…… 238
练习题…… 239

第八章　鱼雷自动控制系统设计…… 240

§8－1　概述…… 240
§8－2　鱼雷自动控制系统设计的一般步骤…… 240
§8－3　鱼雷自动控制系统设计的基本问题…… 242
§8－4　横滚角稳定系统设计…… 245
§8－5　航向控制系统设计…… 255
§8－6　鱼雷纵向控制系统设计…… 264
小结…… 276
练习题…… 277

第九章　鱼雷自动控制系统的现代设计方法…… 279

§9－1　现代控制理论概述…… 279
§9－2　用极点配置法设计鱼雷控制系统…… 280
§9－3　用最优控制理论设计鱼雷控制系统…… 293
§9－4　用自适应控制理论设计鱼雷控制系统…… 307
小结…… 323
练习题…… 323

第十章　鱼雷非线性控制系统…… 325

§10－1　概述 …… 325
§10－2　继电控制系统工作模式 …… 327
§10－3　继电控制系统稳定性分析 …… 331
§10－4　饱和控制系统 …… 349

§10－5 反馈控制系统不变性设计 …… 358
§10－6 变结构控制系统设计 …… 362
小结 …… 374
练习题 …… 375

参考文献 …… 376

第一章　绪　　论

§1-1　鱼雷及其自动控制系统的发展

鱼雷是一种能在水中自主推进、自动控制、自动导引的水下航行器,是用以攻击水面或水下目标的水中兵器。现代鱼雷是一种复杂的高新技术武器,具有速度快、航程远、隐蔽性好、命中率高和破坏威力大等特点,是水中的导弹。

鱼雷是英国工程师怀特海德(Whitehead .Robert)于 1866 年发明,已有 130 多年的历史,在过去的历次海战中发挥过巨大的威力。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 1 455 万吨,占被击沉总吨位的 68 .8%。1982 年英阿马岛海战中,英国“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。在未来海战中,现代鱼雷将是反潜作战的最主要武器,对隐蔽攻击水面舰船,破坏海上交通运输仍将发挥巨大的作用。世界各主要海军国家无不重视鱼雷武器的发展。

为了保证鱼雷按战术要求的弹道准确运动,提高鱼雷的命中率,自动控制系统和导引系统(统称制导系统)是现代鱼雷不可缺少的重要组成部分。本书主要介绍鱼雷自动控制系统的原理、分析与设计。

在鱼雷发展的初期阶段,就有了可控制鱼雷航行深度的定深器。1876 年鱼雷装上了横舵控制机构,大大改善了鱼雷的深度控制,但仍没有可靠的航向操纵装置。为了改善鱼雷航向偏差,进行了大量的实航试验(1881—1893 年的 13 年间共实航试验 51 404 次)。1894 年奥地利工程师奥布利(Obri)应用法国物理学家傅科(Foucault .Jean - Bernard - Leon)对陀螺仪的研究成果,经过两年多的努力,创造性地研制成鱼雷方向仪,以控制鱼雷的航向,从而大大减小了鱼雷的航向偏差。这是鱼雷技术发展上的一次重大突破。

第二次世界大战以来,随着科学技术的发展和海军作战的需要,舰艇的性能迅速提高,特别是核潜艇的出现,极大地促进了鱼雷武器的发展,相继出现了自导鱼雷、线导鱼雷及火箭助

飞鱼雷,使鱼雷的航速、航程、机动性、准确性、打击威力等战术技术性能得到很大提高。鱼雷打击的对象从反水面舰船发展到既反舰又反潜,而且重点发展的反潜鱼雷在水下作三维空间的机动航行,从而推动鱼雷自动控制系统向更高的新技术发展。

20 世纪 50 年代以前,鱼雷自动控制系统的结构以机械 - 气动式(机械式敏感元件和综合放大装置、气动式执行机构)为主,60 年代以后发展了功能完善的电气式鱼雷自动驾驶仪,如美国的 MK46 鱼雷的自动驾驶仪利用 3 个速率陀螺、2 个摆式加速度计、1 个航向陀螺和 1 个深度传感器来敏感雷体的姿态、深度和角速度,采用了晶体管综合放大电路和直流永磁电动舵机,以稳定鱼雷的俯仰、偏航和横滚,控制鱼雷按设定的深度、主航向及回旋速率航行。70 年代中期我国成功地研制了第一套电子式鱼雷深度控制系统。现代计算机技术日新月异的迅猛发展,为鱼雷自动控制系统的进一步发展开辟了新的更加广阔的前景。自 70 年代末期以来,新设计的现代鱼雷大多采用了计算机控制系统,如英国的“旗鱼(Sptarfish)”热动力、线导加声自导鱼雷,其制导系统采用大容量计算机(约 5 MB,并可扩充)来处理信息,进行决策,并采用捷联式惯导装置,以测量鱼雷在空间的姿态及其变化的有关参数。这些参数经计算机处理后能迅速正确地操舵以控制鱼雷弹道。“鲼鱼(Sting Ray)”电动力、主被动声自导鱼雷,其自动驾驶仪专用计算机是一种专门设计的军用计算机,可满足鱼雷在恶劣环境条件下工作的要求。其储存容量可包括鱼雷在各种战术态势使用时所需的软件,并且易于根据新的战术要求输入新的软件,使鱼雷保持良好的作战效能。发射前自动驾驶仪从发射平台预设定器接收到各种初始数据或信息,并存储起来以使鱼雷在航行中使用。航行中自动驾驶仪从各控制传感器(速率陀螺、加速度计、压力传感器、磁通门航向传感器等)接收鱼雷运动姿态数据,从信号处理机接收目标位置数据,经计算机综合处理后输出控制指令,使液压舵机操纵鱼雷按预定的战术弹道航行。法国“海鳝”电动力声自导鱼雷,其自导系统与控制中心采用了 7 台高速微处理器和一台计算机,其存储容量 16 位时为 0 .7 MB,计算速度为 5 000 万次/ s(50 MIPS)。控制中心的捷联式惯导系统与声自导系统一起使鱼雷控制功能更加完善,可稳定控制鱼雷空中和水下的航行姿态;大深度寻深时,可接近垂直姿态下潜。雷头下方的回声测深仪,可控制鱼雷沿起伏不平的海底航行,控制中心能正确控制末弹道并垂直命中目标。意大利 A290 电动力、线导加声自导鱼雷有 9 台微处理器和 1 台功能较强的计算机,其计算速度为 120 MIPS,为采用捷联式惯导技术提供了条件,有 4 个伺服舵机可分别操纵雷尾的上下、左右 4 个舵面,能控制鱼雷垂直命中目标的要害部位。美国 MK48ADCAP 热动力、线导加主被动声自导鱼雷采用 5 台微机对鱼雷各子系统实行集中统一的管理控制;MK50 热动力、主被动声自导反潜鱼雷采用了高性能的微机使其具有自适应和自学习功能,可引导鱼雷垂直命中潜艇的薄弱部位,据称是新一代鱼雷——“智能”鱼雷的代表之一。

现代鱼雷自动控制系统的敏感元件向高精度、小型化和高可靠性方向发展。从单一陀螺仪、组合陀螺,发展到由多台高速计算机支持的捷联式惯导系统。这种惯导系统将相互正交的 3 个加速度计和陀螺仪直接安装在鱼雷上,由计算机将雷体坐标系相对于惯性坐标系的加速度、转动角及角速度进行解算,可提供准确的航向角、姿态角和角速率信息以及瞬时速度和地

理位置信息,从而实现远航程鱼雷的精确制导,满足鱼雷末弹道可垂直命中目标要害部位对精确控制的要求。

现代鱼雷航行深度范围大,航程远,航速高,变速制,鱼雷的特征参数在很大范围内变化,并要求实现各种战术弹道,如垂直命中末弹道等,对控制精度要求特别高,传统的控制技术已不能满足,需要采用最优控制、最优估计、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制、容错控制、智能控制等现代控制理论与技术。高速度、大容量微型计算机在鱼雷上的在线运行,为应用现代控制理论分析、综合、设计复杂的鱼雷自动控制系统,实现各种复杂的控制规律提供了硬件基础,同时也为鱼雷的自导、线导、控制等各子系统之间的信息交换和处理提供了极大的方便,有利于促进鱼雷制导大系统向信息化、综合化、智能化、高精度方向发展。

§1－2　鱼雷弹道与控制

鱼雷重心运动的空间轨迹称为弹道。根据鱼雷的使命、打击对象、作战海区和主要战术技术性能等所设计的鱼雷弹道称为战术弹道或基准弹道。鱼雷控制系统和导引系统的设计就是要保证实现鱼雷研制任务书所规定的各种战术(基准)弹道。鱼雷航行的实际弹道不可能完全符合设计的战术弹道,但必须符合规定的容许偏差。

制导系统与雷体组成的闭环系统如图 1－1 所示。鱼雷制导系统对规定的战术基准弹道参数、实际弹道参数以及目标运动参数进行综合处理,给出操舵的控制信号,由舵机驱动舵面偏转以控制鱼雷的实际运动。

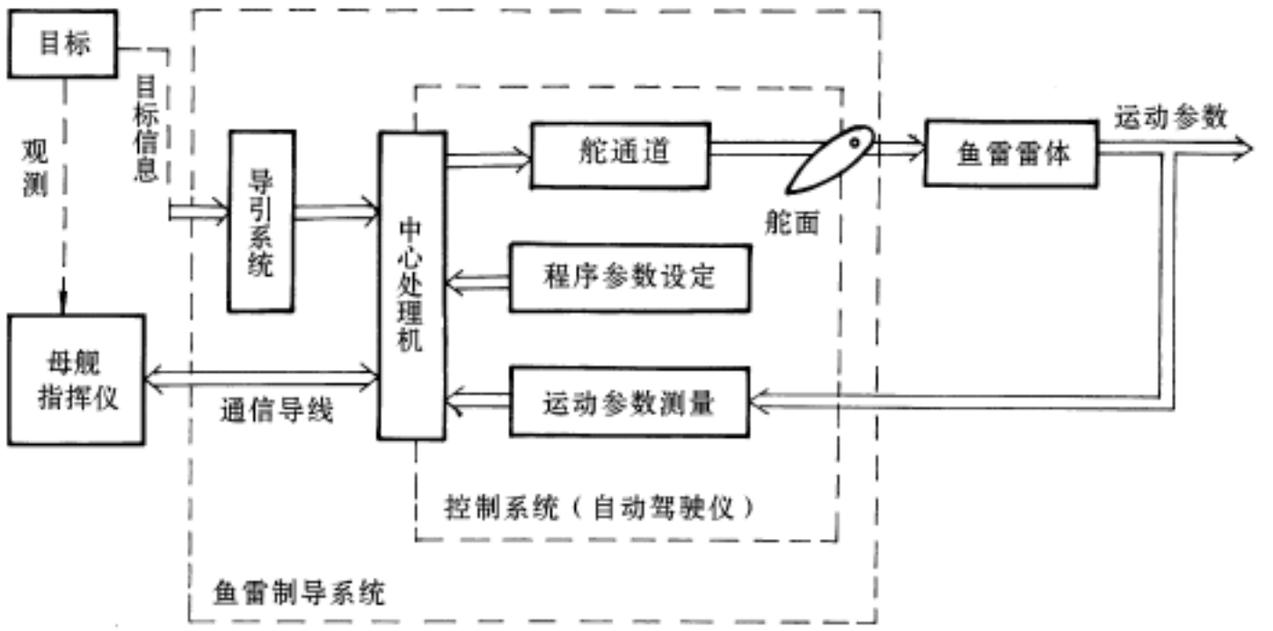


图 1－1　鱼雷制导系统原理图

鱼雷弹道的形式是多种多样的,图 1－2 给出了某型空投反潜鱼雷的弹道,全弹道可以分为 6 个阶段。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1 .空中弹道

鱼雷由固定翼飞机、直升飞机或助推火箭从空中投放到入水之前的空中飞行过程称为空中弹道。这一阶段通常不加控制,鱼雷尾部带有降落伞作落体运动,以降低鱼雷入水时的击水速度,并保证鱼雷的入水姿态和入水点位置。

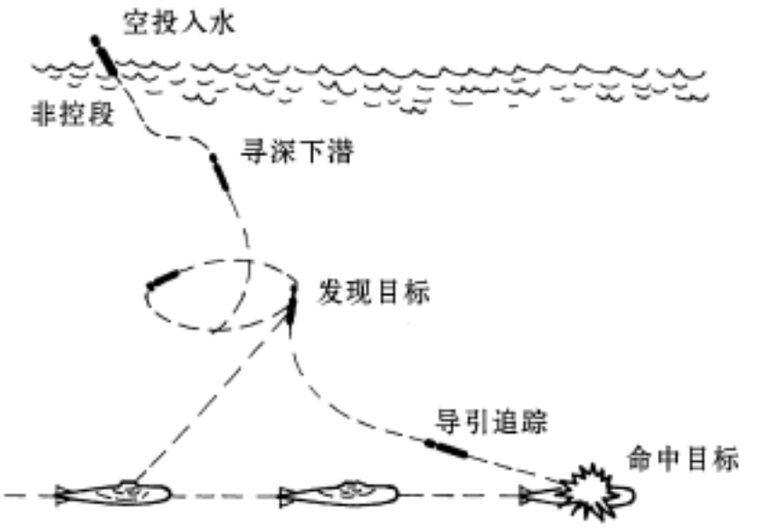


图 1－2　某型空投反潜鱼雷弹道示意图

2 .初始非控弹道

鱼雷从入水到发动机启动、全雷供电、控制系统进入正常工作状态为止,称为初始非控弹道。这一阶段,鱼雷处在非定常运动状态,运动参数变化剧烈,并且不受控制(舵角处于管制状态),初始弹道的设计应满足鱼雷在浅水使用的要求,使鱼雷能平稳地进入设定的深度和航向航行。鱼雷初始弹道取决于入水初始条件和发动机、控制系统的启动特性及过渡过程。这一阶段应尽量缩短。

3 .搜索弹道

初始非控弹道结束后,鱼雷在控制系统操纵下按给定程序下潜至设定深度,并在此深度上以给定的角速度做水平环形运动,搜索目标,直到发现目标为止。这一阶段称为搜索弹道。搜索弹道的设计应保证鱼雷捕获概率高,且航程消耗低。在这一阶段,鱼雷按预先设定的程序航行,因此,把这类弹道也称为程序弹道。搜索弹道有多种形式,除环形运动外,还有直航运动、蛇行运动、梯形运动、蜷线运动和螺旋运动,以及这些运动形式的组合。

4 .导引弹道

鱼雷自导装置接收到目标信号后,鱼雷在制导系统的操纵下,以某种确定的导引规律追踪目标。这一阶段称为导引弹道,又称追踪弹道。常用的导引规律有尾追法、固定提前角法、自动调整提前角法和比例导引法等。导引弹道的设计应保证鱼雷捕获目标的概率和导引精度高,且航程消耗低,并使弹道平滑,便于鱼雷实施机动。

5 .末攻击弹道

鱼雷追踪目标到一定距离,开始按所规定的运动方式接近目标,直到命中目标。这一阶段称为末攻击弹道。对命中目标的部位或命中角范围有特殊要求的鱼雷(如采用垂直命中目标要害部位和聚能爆破技术的小型反潜鱼雷)应设计专门的末攻击弹道。

6 .再搜索弹道

如果鱼雷在导引(追踪)或攻击过程中丢失目标信号,则转入预先规定的程序进行再搜索,这一阶段称为再搜索弹道。再搜索弹道应保证鱼雷以最大的可能重新捕获目标。搜索—导引(追踪)—攻击—再搜索……,直到命中目标或能源耗尽,整个过程是自动转换进行的。

以上 6 个弹道阶段基本上可以概括所有鱼雷的全部弹道,其中程序弹道、导引(追踪)弹道

和末攻击弹道是主要的,占全弹道的绝大部分。有些鱼雷的弹道可以少于 6 个阶段,例如,潜艇发射的鱼雷没有空中弹道;非自导鱼雷没有搜索弹道和导引弹道,其末攻击弹道也是程序弹道。对于线导鱼雷,其导引弹道可分为线导导引和自导导引两个阶段;对于惯性制导鱼雷,其导引弹道又可分为惯性制导和自导导引两个阶段。

在程序弹道、导引(追踪)弹道和末攻击弹道中,鱼雷的运动都要受到控制的作用,称为受控运动或操纵运动。控制作用是通过装在鱼雷尾部的 4 块舵面的偏转,改变作用在鱼雷上的力和力矩来实现的。4 块舵面的偏转可以给出 3 种舵角:操纵俯仰升降的横舵角;操纵航向的直舵角;稳定横滚的差动舵角。舵角按规定的控制规律给出,一般为常数或时间的函数。

不同弹道阶段的控制作用是不同的,一般有 3 种情况。

(1) 非操纵运动。空中弹道与初始弹道的运动通常不加控制,舵角为零或预先设定常值,称为非操纵运动。这种运动完全取决于初始条件,反映了鱼雷本身的开环特性。

(2) 在搜索弹道和非自导鱼雷的末攻击弹道中,鱼雷按预先给定的程序航行,舵角取决于实际弹道与战术基准弹道的偏差。战术基准弹道参数由设定装置输入,实际运动参数由测量装置反馈。控制装置(自动驾驶仪)与雷体构成闭环的自动控制系统。

(3) 在制导鱼雷的导引(追踪)弹道和末攻击弹道中,舵角取决于目标运动和鱼雷运动两种信息。目标运动信息经自导装置处理后以导引指令的形式输入控制装置(自动驾驶仪),控制和自导装置与雷体组成制导系统。线导鱼雷还加入了发射母舰对鱼雷的遥控指令,遥控信息的交换是通过导线传输的。这样,控制装置(自动驾驶仪)、导引装置、雷体与母舰指挥仪共同构成了统一的制导系统,以操纵鱼雷跟踪目标,提高命中精度。

§1－3　鱼雷自动控制系统的基本原理与组成

鱼雷空间一般运动有 6 个自由度。其中包括重心空间运动的 3 个自由度和鱼雷绕重心转动的 3 个自由度。描述鱼雷空间运动需要有 12 个独立变量,这些变量称为运动参数。它们是确定鱼雷重心运动的 6 个弹道参数:航行速度 v、弹道倾角 Θ、弹道偏角 Ψ 和运动轨迹的 3 个分量(位置) x_e, y_e, z_e;以及确定鱼雷转动的 6 个姿态参数:俯仰角 θ、偏航角 ψ、横滚角 ϕ 和这 3 个姿态角的角速度 ω_x, ω_y, ω_z。鱼雷自动控制系统的主要作用就是对运动参数的部分或全部进行自动控制,使鱼雷按战术要求的战术基准弹道航行。

鱼雷自动控制系统也像其它一切自动控制系统一样,除被控对象——鱼雷——外,就是自动控制装置(自动驾驶仪)。自动控制装置和鱼雷按照闭环负反馈原理组成鱼雷自动控制系统,如图 1－3 所示。其工作原理是:敏感元件测量鱼雷的实际运动参数,并输出相应信号同运动参数的设定值进行比较,当鱼雷偏离规定的战术基准弹道时,即产生偏差信号,经信息处理装置综合放大后,成为符合控制规律的信号,操纵伺服机构(称为舵机),使舵面产生相应偏转。由于整个系统是按负反馈原理连接的,其结果使鱼雷运动趋向按战术基准弹道航行。当鱼雷到达战术要求的航行状态时,控制信号为零,舵面回到平衡状态,鱼雷按所要求的弹道航行。

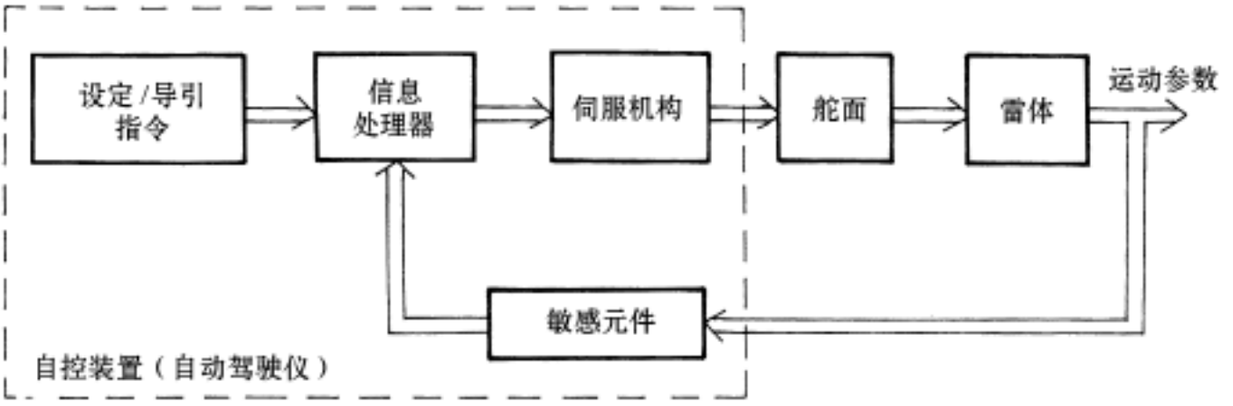


图 1－3　鱼雷自动控制系统原理框图

由此可见,鱼雷自动控制系统主要由控制部分(控制装置(自动驾驶仪))和被控对象(鱼雷)组成。控制装置的主要功能是接受设定或指令信号,以及接收鱼雷输出的反馈信号,并按照最佳控制规律对鱼雷发出相应的控制信号,使鱼雷在控制信号作用下,实现受控运动。采用什么类型的控制装置取决于所要控制的鱼雷类型和战术技术要求,从直航鱼雷到制导鱼雷、智能化鱼雷,它们的自动控制系统的复杂程度是大不相同的,但其控制装置都由以下 4 个基本部分组成。

(1) 设定和/ 或指令装置　它发出控制目的要求的主令信号,用以确定鱼雷运动参数的“目标值”。主令信号可以在发射前设定,也可以由自导装置或线导装置在鱼雷航行过程中给出,其物理特征可以是电量、非电量、模拟量、数字量等各种形式。

(2) 敏感元件　它主要由鱼雷运动参数的测量元件组成,如速率陀螺、加速度计、方向陀螺、垂直陀螺以及压力传感器等,用以测量鱼雷运动参数的“瞬时实际值”,并将运动参数转换为便于传递,便于同设定信号、指令信号进行比较的物理量。例如,在机械式定深器中,用摆锤测量纵倾角,并转换成位移信号;在电子模拟式深控装置中,用压力传感器测量鱼雷航行深度,并转换成电压信号;等等。一般来说,鱼雷控制装置所用的敏感元件是非电量的电测元件。

(3) 信息处理器　用以对设定信号和/ 或导引装置输出的指令信号,以及敏感元件输出的测量信号按控制算法进行综合处理,使其成为符合控制规律要求的控制信号。因此,信息处理器一般又称控制器。现代鱼雷所用的信息处理器可以是模拟电路和/ 或数字电路(例如:加法器、比例器、微分器、积分器、限幅器、滤波器等),也可以是微型计算机。

(4) 伺服机构　将信息处理器输出的控制信号进行功率放大,并推动舵面偏转,控制鱼雷按战术要求的弹道运动,伺服机构也称舵机。

如上所述,鱼雷自动控制系统由鱼雷和控制装置(自动驾驶仪)两大部分组成。系统的工作原理以及稳态和动态特性,与鱼雷和控制装置都有密切的关系,关于鱼雷的稳态和动态特性,是鱼雷航行动力学的研究任务。本书的主要任务是运用自动控制理论对鱼雷控制系统进行分析与综合,从而确定控制装置的稳态和动态特性。描述控制装置稳态和动态特性的数学模型叫做控制方程或控制规律,它表示控制装置的输入信号与输出信号之间的动态与稳态

关系。

§1－4　鱼雷自动控制系统的战术技术要求

一、自动控制系统的一般性能指标

在自动控制系统中,常用的一般性能指标有以下几种。

1.稳定性

系统的稳定性反映系统在 $t\to\infty$ 时的渐近性和有限时间内的收敛性,系统要能正常工作,其瞬态响应(过渡过程)必须是稳定的。一个系统如果不稳定,它的行为不受约束、受控量变化不定,使运动发散,就不能保持系统按预定的状态运动,那么这种系统是不能完成控制任务的。

2.稳态精度

稳态精度反映了控制系统的准确性,一般用稳态误差来表示。设系统输出稳态响应的期望值为 $C_d(t_f)$,而实际值为 $C(t_f)$,则系统稳态误差定义为

$$e_{ss}=C_d(t_f)-C(t_f) \tag{1.1}$$

式中,t_f 可根据具体问题的需要进行选择,一般理论上取 $t_f\to\infty$。对于高精度控制系统,如鱼雷控制系统、各种飞行器控制系统、随动系统等,都要求有较高的稳态精度。稳态精度不仅取决于测量元件(敏感元件)本身的测量精度,而且还取决于信号的形式以及控制系统的结构类型和参数选择。

3.调整时间

调整时间(过渡过程时间)是一个典型的动态性能指标,它反映了系统响应过程的快速性,一般用响应到达并保持在稳态值的±2%或±5%误差范围所需的最小时间来表示。它主要取决于正确地选择控制规律,即控制量 $u_i(t)$, $i=1,2,\cdots$ 的变化规律。

4.超调量

超调量也是系统的主要动态性能指标,表示系统响应过程的平稳性。它的大小在一定程度上反映了系统振荡的趋势。设受控量的状态坐标为 $x(t)$,其稳态值为 x_f,则超调量可定义为

$$\sigma=\frac{\max\limits_{t\to t_f}|x(t)-x_f|}{|x_f|}\%\tag{1.2}$$

式中,x_f 可根据具体问题的需要进行选择。

5.积分泛函指标

一般的动态性能指标可用某一积分泛函来表示。设系统状态的坐标为 $x_1,x_2,\cdots,x_n$,控制量为 $u_1,u_2,\cdots,u_m$,一般的积分泛函指标可定义为

$$J=\int_{t_0}^{t_f}f_0(x_1,x_2,\cdots,x_n;u_1,u_2,\cdots,u_m;t)\,\mathrm{d}t \tag{1.3}$$

式中，t_0 为系统的初始运动时刻；t_f 为受控量达到某一最终状态的时间；函数 $f_0(\cdot)$ 为某一给定的$(n+m+1)$元函数，它的具体形式由工程实际问题的要求来确定。例如，对于线性系统来说，$f_0(\cdot)$常采用正定二次型形式，即所谓二次型性能指标，其一般形式为

$$J=\int_{t_0}^{t_f}\left(\sum_{i,j}^{n}a_{ij}x_i x_j+\sum_{p,q}^{m}b_{pq}u_p u_q\right)\mathrm{d}t \tag{1.4}$$

式中，a_{ij} 和 b_{pq} 可能是已知的时间 t 的函数，也可能是常数。

二、鱼雷自动控制系统的主要战术技术指标

对鱼雷自动控制系统，除满足上述的一般性能指标外，还要根据战术使用的目的和要求，规定其具体的主要战术技术指标。这些指标一般不是用解析形式，而是用统计数据给出的。

1.航向设定及航向准确性与机动性

为了便于发射，掌握战机，鱼雷用的方向仪应有定角装置，可在一定范围内设定初始转角，以保证目标处于任何角度方位上都可以对其进行射击。

为了保证所需的命中概率，必须要求鱼雷航行有一定的准确性，航向准确性以航向偏差来衡量。航向偏差用鱼雷航行过程中其重心相对目标点的侧向偏移与航程的比值百分数来表示：直航鱼雷所容许的航向偏差不大于1%。自导鱼雷直航段的航向容许偏差应考虑在单发精确射击及其它误差确定的条件下，航向容许偏差不应使自导鱼雷的命中概率有显著降低，应通过充分论证以确定其数值，一般不大于2%；线导鱼雷一般给出航向陀螺的精度，要求其值不大于1.5°/h。

鱼雷航向的准确性，取决于鱼雷的流体动力特性、结构总体特性、横滚以及航向控制装置的性能等。

鱼雷航向的机动性一般用旋回角速度和最小旋回半径来衡量。

2.深度设定及航行深度的准确性与机动性

鱼雷的航行深度应根据鱼雷的作战使命、发射平台、制导方法、打击对象、引信种类、作战海区等，经综合论证，由研制任务书规定，并根据战斗环境和目标情况可在发射前自由设定。反舰鱼雷应设定自导搜索深度和攻击深度；反潜鱼雷除设定自导搜索深度和攻击深度外，还应设定上限深度、下限深度和最大容许下潜深度；对于线导鱼雷，还要设定线导的巡航深度。

鱼雷航行深度的准确性以航深偏差来表示，航深偏差是指鱼雷实际航行深度与所设定深度之差值。鱼雷航深容许偏差一般规定有平均深偏与深度波动两项指标。对于反舰鱼雷，规定其平均深偏不大于1 m，深度波动幅值不大于0.5 m；对于反潜鱼雷，浅水航行时其航行深度准确性要求与反舰鱼雷相同，深水航行时，规定其平均深偏不大于10 m，深度波动幅值不大于1 m。

航行深度的准确性，主要取决于深控装置的性能及可靠性，同时也与动力装置的性能、弹道形式(直航或旋回)以及鱼雷结构总体特性、平衡质量等有关。

对于反潜鱼雷，还要求其在深度平面内运动时有一定的机动性。深度平面机动性指标有：

旋回角速度、最小旋回半径和爬潜角等。

3 .对初始弹道的战术技术要求

从鱼雷发射,到鱼雷被操纵到设定深度的稳态值(在一定允许深度偏差内),这一段运动过程称为动态过渡过程或初始弹道。对初始弹道的战术技术要求:

(1) 调整距离　指鱼雷初始弹道所航行的距离,也称初期非稳定段距离。例如某型热动力鱼雷规定初期非稳定段距离不大于 400 m,一般愈短愈好。

(2) 袋形深度　指鱼雷发射后形成的袋形弹道的最大深度。水上发射时,袋形深度(简称袋深)是从水面到鱼雷最大下潜深度的距离。水下发射时,袋深是从发射中心线到鱼雷最大下潜深度的距离。例如对于某型热动力鱼雷,技术条件规定,水上发射时,定深为 2～5 m,袋深应小于13 m;定深大于 5 m 时,袋深小于设定深度加 8 m。水下发射时,当发射深度小于设定深度时,规定袋深距定深线不大于 8 m;当发射深度大于设定深度时,规定袋深距发射管中心线向下不大于 8 m。

(3) 跳水　指鱼雷发射后的航行过程中跳离水面的现象。一般是不允许鱼雷跳水的,因为跳水不仅破坏了鱼雷的隐蔽性,而且也会影响某些部件工作可靠性,例如对某型热动力鱼雷要求在水上发射时不允许跳离水面,水下发射时允许露头一次,但不出水面。

图 1－4 给出某型热动力鱼雷在各种发射条件下,初始弹道的示意图。

自导鱼雷按变深弹道航行时,变深段也属于动态过渡过程,例如对某型自导电动鱼雷,技术条件规定其变深段距离不大于 200 m,超调量不大于 2 m。

4 .鱼雷的横滚

为了保证自导、引信和控制等系统有良好的工作条件,鱼雷航行时的横滚角应愈小愈好,但不可能为零,鱼雷横滚角容许值有两项指标;平均值和波动幅值。未安装横滚控制系统的鱼雷,要求其横滚角的平均值不大于 5°,波动幅值不大于 15°。对于横滚角要求严格的鱼雷(一般为自导鱼雷),必须采用横滚控制系统,以便将横滚角限制在容许范围内,例如某型反潜自导鱼雷,要求鱼雷离开发射器 10 s 后,将其横滚角限制在 2 .5°之内。

除以上动态和稳态性能指标要求之外,还有安全可靠性,使用维护方便性,经济性以及对于环境(包括温度、湿度、盐雾、霉菌、振动、冲击等)条件的适应性要求。

上述各项指标要求,可以作为设计鱼雷控制系统的基本依据,但不是绝对不变的,而是根据鱼雷类型的不同,应有不同的要求。一般来说,上述各项性能指标的要求往往是相互制约的,例如,提高响应过程的快速性,可能会引起系统的强烈振荡;改善了系统的平稳性,响应过程可能很缓慢,甚至使稳态精度降低;提高系统的稳态精度,就要对系统结构和元部件提出严格要求,导致成本的增加等等。因此,在系统设计时,应抓住主要矛盾进行综合分析权衡,以取得系统的性能指标与经济性和使用效益的最佳匹配。

需要全本请访问 www.ertongbook.com