

高等学校教材

# 鱼雷自动控制系统

徐德民主编

30645904

西北工业大学出版社

30645904

TJ63  
01

高等学校教材

# 鱼雷自动控制系统

徐德民 主编

徐德民 夏志石 任章 编著  
何银洲 李宗科

HK38103



西北工业大学出版社

1994年6月 西安

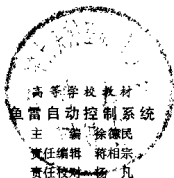


C0001613

## 内 容 简 介

本书介绍鱼雷自动控制系统的基本原理和分析设计方法。全书共十章，内容有：鱼雷自动控制系统的 basic 组成及战术技术要求、航行动力学、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、单通道鱼雷控制系统设计、现代控制理论在鱼雷上的应用、鱼雷非线性控制系统、CAD 技术简介等。为方便读者学习使用，书中提供了大量的图表、数据、实用公式、计算实例、仿真曲线以及参考文献。

本书主要对象为高等学校鱼雷自动控制专业学生，也可供鱼雷有关专业师生以及从事鱼雷研究、设计和制造的工程技术人员参考。



西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路 127 号)

陕西省新华书店发行

咸阳市印刷厂印装

ISBN 7-5612-0292-X / TJ · 10(课)

开本 787×1092 毫米 1/16    20 印张    482 千字  
1991 年 6 月第 1 版            1991 年 6 月第 1 次印刷  
印数 1—1 400 册              定价 5.20 元

# 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。绪论中介绍了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和工作特性。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的推导不能一一详述，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七〇五研究所高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 引言	1
§ 1-2 鱼雷弹道与控制	1
§ 1-3 鱼雷自动控制系统的基本原理与组成	3
§ 1-4 鱼雷自动控制系统的战术技术要求	5
第二章 鱼雷航行动力学	9
§ 2-1 鱼雷空间运动的表示及其操纵机构	9
§ 2-2 流体动力与力矩	13
§ 2-3 流体动力系数	17
§ 2-4 流体动力表达式	22
§ 2-5 铰链力矩	24
§ 2-6 鱼雷的运动方程	26
§ 2-7 鱼雷纵向运动	34
§ 2-8 鱼雷侧向运动	47
§ 2-9 鱼雷横滚运动	53
第三章 敏感元件	58
§ 3-1 陀螺仪概述	58
§ 3-2 刚体运动的描述	60
§ 3-3 刚体动力学基本概念	66
§ 3-4 万向支架陀螺仪	72
§ 3-5 双自由度陀螺仪运动过程	75
§ 3-6 航向与垂直陀螺仪	81
§ 3-7 单自由度速率陀螺仪	86
§ 3-8 加速度计	89
§ 3-9 深度传感器	93
第四章 舵机与舵回路	97
§ 4-1 概述	97
§ 4-2 气动舵机与舵回路	99
§ 4-3 电动伺服机构	105
第五章 侧向运动的稳定与控制	114

§ 5-1	航向控制系统的基本原理	114
§ 5-2	航向控制系统的动态特性	116
§ 5-3	航向控制系统的稳态分析	122
§ 5-4	横滚对鱼雷航行的影响	124
§ 5-5	横滚控制系统的特性分析	128
第六章 纵向运动的稳定与控制		132
§ 6-1	深度控制系统的构成与基本类型	132
§ 6-2	具有俯仰角信号的深控系统	133
§ 6-3	具有垂直速度和垂直加速度信号的深控系统	145
§ 6-4	深度控制系统的动态特性	152
§ 6-5	深度控制系统的稳态误差	165
§ 6-6	纵倾控制系统	169
第七章 鱼雷自动控制系统设计		176
§ 7-1	概述	176
§ 7-2	鱼雷自动控制系统设计的一般程序	176
§ 7-3	典型系统的工程设计	178
§ 7-4	典型系统设计的推广应用 ——非典型系统的典型化	186
§ 7-5	反馈校正及其参数选择	191
§ 7-6	鱼雷航向控制系统控制器的参数选择	195
§ 7-7	鱼雷深度控制系统控制器的参数选择	198
§ 7-8	双环控制系统的参数选择	203
第八章 鱼雷自动控制系统的现代设计方法		207
§ 8-1	现代控制理论概述	207
§ 8-2	用极点配置法设计鱼雷控制系统	207
§ 8-3	用最优化控制理论设计鱼雷控制系统	220
§ 8-4	用自适应控制理论设计鱼雷控制系统	234
第九章 鱼雷非线性控制系统		251
§ 9-1	概述	251
§ 9-2	继电控制系统工作模式	253
§ 9-3	继电控制系统稳定性分析	256
§ 9-4	饱和控制系统	274
§ 9-5	反馈控制系统不变性设计	283
第十章 控制系统计算机辅助设计		289
§ 10-1	CAD 概述	289

§ 10-2 稳定性检验 .....	291
§ 10-3 线性二次型最优控制规律的计算 .....	293
§ 10-4 部分状态反馈次优控制器的计算 .....	298
参考文献 .....	309

# 第一章 绪 论

## § 1-1 引 言

鱼雷是一种能在水中自行推进、自动控制和导引的航行器，是打击水面舰船和潜艇的进攻性武器。为了保证鱼雷按战术要求的特性准确运动，提高鱼雷的命中率，现代鱼雷中自动控制系统和导引系统（统称制导系统）是鱼雷必不可少的重要组成部分。本书主要研究鱼雷自动控制系统。

在 1867 年怀特海德（Whithead）的第一条鱼雷问世后的初期阶段，已有了可控制鱼雷航行深度的定深器装置。随着鱼雷航程的增加，为了提高命中概率，要求对鱼雷的航行方向也进行控制，于 1896 年，在鱼雷上采用了方向陀螺仪来操纵鱼雷的航向；随后在某些鱼雷上又使用了横滚控制系统。第二次世界大战以来，随着科学技术的发展和客观上的需要，舰艇的性能迅速提高，特别是核动力潜艇的出现，极大地促进了鱼雷武器系统的发展。继自导鱼雷出现之后，又相继发展了火箭助推鱼雷、线导鱼雷，使鱼雷航程、航速、机动性、准确性、命中率、打击威力等战术技术性能得以很大提高，从而推动了鱼雷自动控制系统的迅速发展。五十年代以前，鱼雷自动控制装置的结构以机械-气压式（机械式敏感元件和综合放大装置、气压式执行机构）为主，六十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 MK46 鱼雷自动驾驶仪，其敏感元件是电动陀螺仪，压力传感器和加速度计，采用了晶体管电路和电动舵机。1978 年我国第一套电子式鱼雷深度控制装置研制成功。由于现代控制理论和数字计算机日新月异的发展，提供了控制功能更加完善的可能性，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。微处理机已成为新型鱼雷的控制系统的重要组成部分。此外，为全面提高鱼雷的性能，目前已将鱼雷的控制系统和导引系统综合成制导系统，使它们协同工作，更好地实现战术要求。今后鱼雷制导系统将向微机化、智能化方向发展。

## § 1-2 鱼雷弹道与控制

鱼雷重心运动的空间轨迹称为弹道。根据鱼雷的使命任务、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。

鱼雷弹道的形式是多种多样的，图 1-1 给出了某型空投反潜鱼雷的弹道，全弹道可以分为六个阶段。

(1) 从鱼雷投放到入水，称为空中弹道，这一阶段，鱼雷带有降落伞做落体运动，一般不加控制。

(2) 从鱼雷入水到发动机启动、全雷供电、控制系统进入正常工作状态为止，这一阶段



称为初始弹道。初始弹道的设计应能满足鱼雷在浅水使用的条件，使鱼雷能平稳地进入设定深度和航向航行。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和过波过程。

(3) 初始弹道结束后，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、蛇线运动和螺旋运动等，以及这些运动形式的组合。

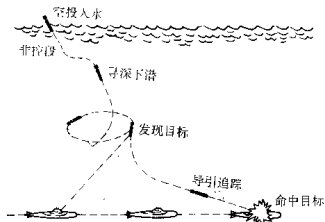


图 1-1 弹道示意图

(4) 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（追踪）弹道。导引弹道的设计应保证鱼雷命中概率和导引精度高，且航程消耗低，并使弹道平滑，便于鱼雷实施机动。

(5) 鱼雷追踪目标到一定距离，即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（如采用聚能爆炸技术的小型反潜鱼雷）应设计专门的末攻击弹道。

(6) 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；整个航行过程是自动转换进行的。

以上六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六个阶段，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。

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四块舵面的偏转，改变作用在鱼雷上的力和力矩来实现的。四块舵面的偏转可以给出三种舵角：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，一般有三种情况：

(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的常值，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。

制导系统与雷体组成的闭环系统如图 1-2 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。

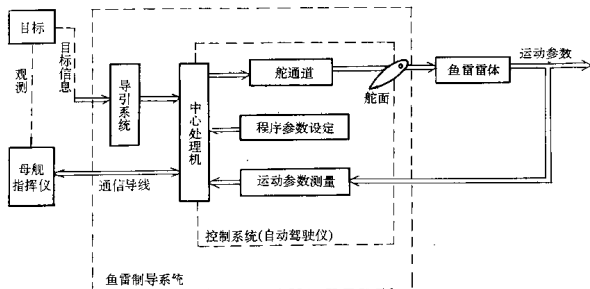


图 1-2 鱼雷制导系统原理图

### § 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六个自由度。其中包括重心空间运动的三个自由度和鱼雷体绕重心转动的三个自由度。描述鱼雷空间运动需要有十二个独立变量，这些变量称为运动参数。鱼雷自动控制系统的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。

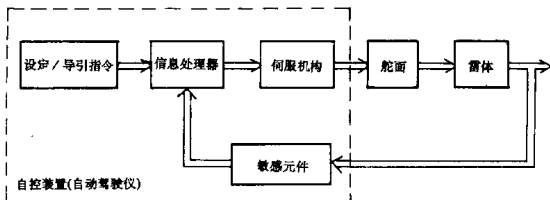


图 1-3 鱼雷自动控制系统原理框图

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四个基本部分组成：

(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，信号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—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  $t \rightarrow \infty$  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

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

式中  $t_f$  可根据具体问题的需要进行选择,一般理论上取  $t_f \rightarrow \infty$ 。对高精度控制系统,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,而且还取决于输入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  $\pm 2\%$  或  $\pm 5\%$  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  $u_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  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

$$\sigma = \frac{\max_{t \leq t_f} |x(t) - x_f|}{|x_f|} \% \quad (1.2)$$

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。设系统状态的状态坐标为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 控制量为  $u_1, u_2, \dots, u_m$ , 一般的积分泛函指标可定义为

$$J = \int_0^{t_f} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_m; t) dt \quad (1.3)$$

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刻, 函数  $f_0$  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,  $f_0$  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

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left( \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{p=1}^m b_{pq} u_p u_q \right) dt \quad (1.4)$$

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

## 二、鱼雷自动控制系统的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, 鱼雷上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的百分数来表示。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他误差确定的条件下, 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 2.5%。线导鱼雷一般给出航向陀螺的精度, 要求其值不大于  $6^\circ/h$ 。

鱼雷航向的准确性, 取决于其流体动力特性、结构总体特性、鱼雷的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使命任务、运载体、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 1m, 深度波动幅值不大于 0.5m; 对反潜鱼雷, 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 10m, 深度波动幅值不大于 5m。

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是：

(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 400m，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）是由水面量到鱼雷最大下潜深度。水下发射时，袋深是由发射中心线量到鱼雷最大下潜深度。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 2~5m，袋深应小于 13m；定深大于 5m 时，袋深小于设定深度加 8m。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 8m；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 8m。

(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的可靠性。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 200m，超调量不大于 2m。

### 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  $5^\circ$ ，波动幅值不大于  $15^\circ$ ，对于

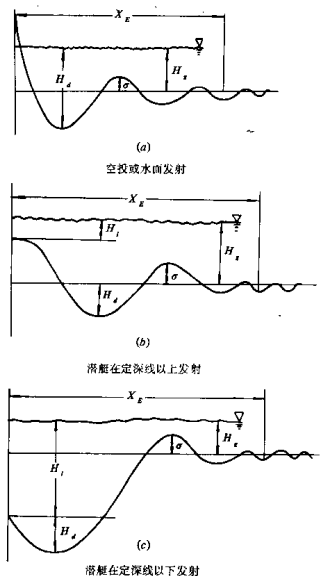


图 1-4 各种发射条件下初始非稳定弹道示意图

$X_s$ —初期非稳定段距离； $\sigma$ —最大超调量； $H_s$ —袋形深度；  
 $H_i$ —设定深度； $H_i$ —发射深度。

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 10s 钟后，将其横滚角限制在  $2.5^\circ$  之内。

除以上动态和稳态性能指标要求之外，还有安全可靠、使用维护方便、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，但不是一成不变的，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。

## 第二章 鱼雷航行动力学

### § 2-1 鱼雷空间运动的表示及其操纵机构

#### 一、坐标系

鱼雷的空间一般运动可分解为重心(质点)的空间运动及其(刚体)绕重心的定点转动。为了确切地描述鱼雷的运动状态,例如描述鱼雷在不同时间内速度的大小与方向,以及鱼雷重心在空间的位置和鱼雷在空间的姿态等,需要选取适当的坐标系作为测量的参考基准。一般选取坐标系的原则是:根据鱼雷运动的特点,并考虑分析研究时的方便。因此,在研究不同的具体运动时,经常采用不同的坐标系。在鱼雷航行动力学中,常采用的坐标系有以下几种:

##### (一)地面坐标系

确定重心运动,应选择与地球固连的坐标系,  $O_e X_e Y_e Z_e$ , 称为地面坐标系,如图 2-1 所示。

坐标原点  $O_e$  选在地面的任意适当位置(例如鱼雷发射点或入水点)。  $O_e X_e$  轴处于平面内指向某一适当方向(例如指向鱼雷发射方向),此轴的方向称为参考航向;  $O_e Y_e$  轴垂直于地面并指向上方,此轴称为铅垂轴;  $O_e Z_e$  轴也处于水平面内,垂直于  $X_e - O_e - Y_e$  平面。按右手坐标法则规定,姆指代表  $O_e X_e$  轴,食指代表  $O_e Y_e$  轴,中指的指向就是  $O_e Z_e$  轴的方向。用地面坐标系描述鱼雷的弹道最方便。任一时刻的坐标  $(X_e, Y_e, Z_e)$  确定了重心的瞬时位置,函数  $X_e(t), Y_e(t), Z_e(t)$  描述了鱼雷重心的空间运动。

##### (二)雷体坐标系

描述雷体转动可选用与雷体固连的坐标系  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ , 如图 2-1 所示。此坐标系随鱼雷一起运动,称为雷体坐标系。原点  $O$  取在鱼雷重心处(假定鱼雷重心在雷体的对称轴上)。三个坐标轴与雷体固联。  $O X_1$  轴处于雷体对称面内,与雷体几何对称轴一致,指向雷头,此轴称为雷体纵轴;  $O Y_1$  轴处于鱼雷纵对称面内,垂直于  $O X_1$  轴,指向上方,此轴称为雷体立轴;  $O Z_1$  轴垂直于  $X_1 - O - Y_1$  平面,从雷尾观察,  $O Z_1$  轴指向右方,此轴称为雷体横轴。

##### (三)速度坐标系

为确定作用在雷体上的流体动力,需要描述鱼雷重心速度向量  $\mathbf{v}$  与雷体之间的相对位置,可选用速度坐标系  $O X Y Z$  来表示(图 2-2)。速度坐标系原点  $O$  也取在

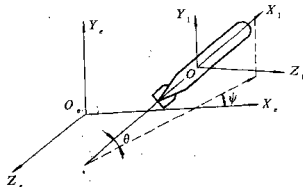


图 2-1 地面坐标系与雷体坐标系



鱼雷重心， $OX$ 轴与鱼雷重心轨迹的切线一致，其正方向为重心运动瞬时速度向量 $v$ 的方向，此轴称为速度轴。一般情况下， $v$ 不在鱼雷对称平面内， $OY$ 轴在雷体纵对称面内，且垂直于 $OX$ 轴，指向上方，称为升力轴； $OZ$ 轴垂直于 $X-O-Y$ 平面，其方向按右手坐标法则确定，从雷尾观察指向右方。 $OZ$ 轴称为侧力轴，侧力轴一般不在雷体横轴平面内。

#### (四) 平移坐标系

雷体系相对于地面系的旋转描述了鱼雷的旋转运动。但是，上述两坐标系的原点不一致，不便于研究其相对旋转。为此，再选择一种坐标系 $OX_0Y_0Z_0$ ，使其坐标原点与鱼雷重心重合，其 $X_0, Y_0, Z_0$ 各轴分别与地面系的 $X_e, Y_e, Z_e$ 各轴对应平行。此坐标系是随重心运动而平移的动坐标系，称为平移坐标系。对于旋转运动来说，此坐标系是静止的，可作为旋转运动的基准。因此，研究旋转运动时，平移系与地面系完全等价。

#### (五) 弹道坐标系

由弹道定义可知，重心速度向量 $v$ 在空间的方向决定了弹道的切线方向。描述速度向量 $v$ 空间方向的两个角度参数称为弹道角，用弹道角来确定弹道问题更为方便。

为定义弹道角而选取弹道坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ ，如图2-3所示。坐标原点仍在重心上， $OX_1$ 轴仍为速度轴，但 $OY_1$ 轴不在直轴平面之内，而是在包含速度向量 $v$ 的垂直平面之内，向上为正方向， $OZ_1$ 轴按右手坐标法则确定。

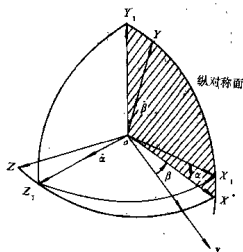


图 2-2 速度坐标系

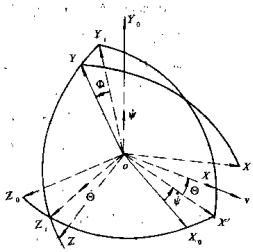


图 2-3 弹道坐标系

## 二、鱼雷的运动参数

### (一) 鱼雷的姿态角

雷体系与地面系之间的关系可用鱼雷的三个姿态角来表示。由于在描述旋转运动时，平移系与地面系完全等价，因此，鱼雷的旋转运动归结为雷体系对平移系的相对旋转。众所周知，旋转运动可用一组欧拉角来描述，先令雷体系与平移系完全重合，然后使雷体系按下列顺序绕其自身各轴旋转：先绕 $Y_1(Y_0)$ 轴转动角度 $\psi$ ，再绕旋转后的 $Z_1$ 轴转动角度 $\theta$ ，最后绕二次旋转后的 $X_1$ 轴转动角度 $\varphi$ ，这样就得到了一组欧拉角，如图2-4所示。

欧拉角 $\psi, \theta, \varphi$ 描述了鱼雷的空间姿态，在鱼雷动力学中称为姿态角，其定义如下：