



高等学校教材

Textbook for Higher Education

鱼雷 涡轮机 原理

★ 赵寅生 主编

★ 西北工业大学出版社

鱼雷涡轮机原理

主编 赵寅生

编者 赵寅生 钱志博

西北工业大学出版社

【内容简介】 鱼雷涡轮机是一种理想焓降大、质量流量小的涡轮机，其结构类型为轴流式部分进气短叶片超音速冲动式涡轮机。本书系统地论述了鱼雷涡轮机的基本结构、工作原理、主要参数的选择、分析计算和设计方法。

本书主要作为高等学校鱼雷热动力专业本科生教材，也可作为鱼雷热动力专业硕士研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

鱼雷涡轮机原理/赵寅生主编；赵寅生，钱志博编. —西安：
西北工业大学出版社，2001.12
ISBN 7-5612-1397-2

I. 鱼… II. ①赵… ②赵… III. 鱼雷涡轮发动机 IV.
TJ630.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 062458 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：陕西友盛印务有限责任公司印装

开 本：850 mm×1 168mm 1/32

印 张：7.625

字 数：190 千字

版 次：2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印 数：1~2 000 册

定 价：12.00 元

出版说明

根据国务院发(1978)23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为做好教材编审组织工作，中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组，聘请了有关院校的教授、专家50余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织，主要任务是协助船舶总公司做好高等学校船舶类专业教材的编审工作，为教材质量审查把关。

经过前四轮教材建设，共出版教材300余种，建立了较完善的规章制度，扩大了出版渠道，在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了有成效的改革，这些为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据国家教委对“九五”期间高校教材建设要“抓好重点教材，全面提高质量，继续增加品种，整体优化配套，深化管理体制和运行机制的改革，加强组织领导”的要求，中国船舶工业总公司于1996年又制定了“全国高等学校船舶类专业教材“九五”选题规划”。列入规划的选题共133种，其中部委级重点选题49种，一般选题84种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划。为适应社会主义市场经济外部环境，“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指

前 言

鱼雷是现代战争中重要的水中兵器，主要用于攻击潜艇和打击水面舰船。鱼雷动力装置用来驱动鱼雷航行，给鱼雷提供高航速、大航深和远的航程。鱼雷涡轮机是驱动鱼雷航行的一种动力装置。在鱼雷涡轮机中，工质首先以低速进入喷嘴，在喷嘴中工质膨胀将热能转化为动能，然后进入叶轮驱动叶轮旋转，将其动能转化为机械能。鱼雷涡轮机工质的理想焓降大、质量流量小。因此其类型为轴流式部分进气短叶片超音速冲动式涡轮机。同活塞发动机相比较，涡轮机的功率潜力大，在功率大于某一数值后，涡轮机的效率优于活塞发动机，而且运转平稳，机械振动和噪声均较小。

全书共分九章，主要论述了鱼雷涡轮机的基本概念、基本原理和基本的分析、计算与设计方法。第一章对国外先进的鱼雷热动力系统及涡轮机的应用进行了介绍。第二章和第三章讲述了鱼雷涡轮机的基本原理和结构。第四章和第五章论述了气体工质在涡轮级内的流动基本方程及在喷嘴和涡轮中的能量转换过程。第六章和第七章讲述了叶栅的特性及涡轮级的效率。第八章介绍了复速级涡轮机的基本结构原理和参数计算。第九章介绍了鱼雷涡轮机非设计工况计算方法。

本书可作为高等学校鱼雷热动力专业本科生教材，也可作为鱼雷热动力专业硕士研究生的参考书。

本书由西北工业大学航海学院赵寅生、钱志博编写。赵寅生任主编，并编写第一章及第四、五、六、七、八、九章，钱志博编写第二、三章。郭淑霞负责全书的计算机图像信息处理工作。

本书呈武警工程学院吴琦教授审阅了全稿，并提出许多宝贵意见，我们表示衷心感谢。在编写过程中，参考了有关著作，也向各位作者表示谢意。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2000年12月

目 录

第一章 鱼雷涡轮机概述	1
第一节 国外鱼雷热动力系统.....	1
第二节 鱼雷热力发动机综述.....	6
第三节 鱼雷涡轮动力装置热力循环系统	15
第二章 鱼雷涡轮发动机热力过程分析	20
第一节 燃气涡轮热力循环	20
第二节 鱼雷蒸汽涡轮机动力装置	25
第三章 鱼雷涡轮机原理	32
第一节 涡轮机工作原理	32
第二节 涡轮机的分类	36
第三节 涡轮级	46
第四节 鱼雷涡轮机的特点和基本类型	53
第五节 鱼雷涡轮机的发展和对鱼雷涡轮机的要求	57
第六节 鱼雷涡轮机结构简介	59
第四章 鱼雷涡轮级中气体流动基本方程	63
第一节 连续方程	63
第二节 动量方程	65
第三节 微分形式的动量方程	67
第四节 能量方程	71

第五章 鱼雷涡轮级的工作过程	79
第一节 气体在喷嘴中的能量转变过程	79
第二节 气体在喷嘴斜切口内的膨胀	82
第三节 喷嘴结构及喷嘴、喷嘴环的计算	90
第四节 气体在工作叶片气道中的能量转换	97
第五节 涡轮级工作轮园周上的气体功	100
第六章 涡轮叶栅	106
第一节 涡轮叶栅的几何特性和气动特性	106
第二节 叶栅中的损失	116
第三节 工作叶片设计	122
第七章 涡轮级的效率	128
第一节 涡轮级的各种损失	128
第二节 涡轮级的效率	139
第三节 鱼雷涡轮机参数选择	156
第四节 鱼雷单级冲动式涡轮机的热力计算	159
第八章 鱼雷复速级涡轮机	165
第一节 复速级涡轮机的工作过程	165
第二节 复速级的轮周功、轮周效率、内功率和内效率	174
第三节 轴流式部分进气复速级涡轮机的热力计算	183
第四节 轮盘反向旋转式复速级	185
第九章 鱼雷涡轮机非设计工况	191
第一节 概述	191

第二节	缩放喷嘴的非设计工况·····	193
第三节	涡轮级的非设计工况·····	199
第四节	鱼雷涡轮机转速改变时的非设计工况·····	202
第五节	鱼雷涡轮机背压变化时的非设计工况·····	210
第六节	鱼雷涡轮机初压 p_0^* 变化时的非设计工况·····	212
第七节	鱼雷涡轮机调节方案简述·····	214
附录·····		218
附录一	常见燃烧产物的焓温表·····	218
附录二	某些燃烧产物在一个物理大气压下的熵 S_i^0 ·····	228
参考文献·····		234

第一章 鱼雷涡轮机概述

第一节 国外鱼雷热动力系统

作为海军专用的反潜、反舰武器的鱼雷,在各次海战中以其优异战绩受到各国海军的重视,随着大型水面舰艇编队和潜艇性能的提高,对鱼雷的战术技术指标提出了更高的要求。而作为鱼雷武器心脏的动力系统对鱼雷的战术技术指标的高低起着重要的作用,所以世界上各主要鱼雷生产国均投入大量的人力和物力对鱼雷用动力系统进行研究。

从鱼雷总体考虑,要求其动力系统体积小、比功率大、噪声低、工作时间长、能在水下 5~1 000 m 深度范围内多级变速工作,发动机功率在 400 kW 以上,有的甚至高达 900 kW 或更高,这样可使鱼雷速度达 55 kn 以上,有的甚至达 70 kn 或更高,鱼雷的航程达 50 km 以上,要达到以上这些指标(尤其是航速和航程),相比之下,热动力系统是实现这些要求的首选方案。

经过几十年的发展,鱼雷的动力系统至今已形成热动力系统和电动力系统两大推进体系。其各有特点,主要区别在于:电动力系统航程短、速度低、噪声小;热动力系统速度高、航程远、噪声大。由于各国的技术基础不同和对攻击目标的评估不一样,所以在热动力系统和电动力系统的研究方面有不同的侧重点。

由于热动力系统在航速、航程方面有其他动力系统不可比拟的优势,使它成为当今世界上鱼雷动力系统发展的主流。所以各国均投入巨资进行研究,并已取得了丰硕的成果,其战术技术指标

已达到相当高的水平。下面就几个主要鱼雷生产国在这些方面的研制情况介绍如下：

美国以其坚实的资金和技术为后盾，在热动力系统研究方面独树一帜，美国研制的已经服役的几种型号鱼雷所采用的动力系统的技术指标均在世界前列，服役的型号多，向世界其他国家出口的比例大。是世界上热动力鱼雷的最大研制生产国。20世纪60~80年代，小型鱼雷以MK46—1~5型鱼雷为主，采用OTTO燃料和凸轮机。MK46型鱼雷热动力系统是首先采用OTTO—II ($C_{2.745} H_{5.248} O_{3.045} N_{0.929}$)单组元推进剂的热动力系统。该推进剂能量较高，使用较方便，加上凸轮机热动力系统重量轻，结构紧凑简单，安全可靠，适应工作环境能力强，启动快速，性能高强度化，振动噪声小，从而使小型鱼雷热动力系统的水平得到一次飞跃，尤其是MK46—5型鱼雷热动力系统在原MK46—2型的基础上由单速制改为双速制后，航程增加，振动噪声减小，自导性能改善，使作战性能更进一步提高。现以MK46—5型全面取代其他MK46型鱼雷。其双速制航速达45 kn和36 kn，航程为11 km和16 km。20世纪90年代服役的MK50鱼雷是继MK46系列鱼雷后开发出的新一代的小型鱼雷。该鱼雷采用Li和 SF_6 为燃料以及闭式循环涡轮机系统，使鱼雷在工作期间不向外排放任何工质，工作状态不受海水背压的影响，航程不随航深而变化，没有航迹和排气噪声。同时在动力系统的结构上布局更合理，采用了很多新技术、新工艺和新材料，使鱼雷热动力系统的水平又上了一个新台阶。据报道，MK50的航速最高可达55 kn，双速制航程约为20 km，航深大于1 000 m，这是目前世界上服役的最先进的小型鱼雷。

大型鱼雷热动力系统的研制与小型鱼雷基本上是同步进行的，以MK48系列为主，先后研制了从MK48—0型~MK48ADCAP6型鱼雷和相应的热动力系统，经过比较、筛选，目

前大部分服役的为 MK48—3 型和 MK48ADCAP 型,且逐渐把原有的 MK48 型改为 MK48ADCAP 型。由于 MK46 型所采用的凸轮机不适于重型鱼雷的热动力系统。美国在 MK48 型系列重型鱼雷上成功地研制了摆盘机动力系统,使鱼雷动力系统性能又一次大幅度提高。该系统仍然采用 OTTO—II 型单组元推进剂, MK48ADCAP 型为三速制,最高航速 55 kn,最远航程 46 km(混合速制),航深 900 m。目前,美国正在研制能对抗高速舰船目标的价格低廉的大型鱼雷用热动力系统。

俄罗斯是研制鱼雷热动力系统的主要国家,其水平与美国相当。从 20 世纪 30 年代起前苏联就开始其研制工作,每一时期产品的性能都可与美国的相比。它先后研制了 53—39,53—56,53—57,53—65K,以及 65 型鱼雷热动力系统和一些情况不详的热动力系统。

目前已装备部队的 65 型热动力鱼雷是其代表作。该型号鱼雷口径 650 mm,长 12 m,是真正的超大型鱼雷。其航速为三速制,最高速度达 50 kn,最远航程达 100 km,采用煤油、HTP (H_2O_2)海水三组元推进剂和开式循环涡轮机动力系统,是反航母的专用鱼雷,也是目前世界上威力最大的鱼雷。

除舰装鱼雷外,俄罗斯的 A3 空投鱼雷和 A4 鱼雷采用固体燃料和水反应燃料及涡轮泵喷水发动机,使鱼雷速度达 65 kn 和 80 kn,航程达 3.5 km 和 5 km。

据报道,俄罗斯已研制成功航速达 200 kn 的重型高速鱼雷。鱼雷上装有两台发动机,第一台为固体火箭发动机,第二台为铝镁加海水的喷气发动机,俄罗斯也曾对闭式循环热动力系统进行过充分的研究,采用的燃料为水反应燃料。

英国在研制大型热动力系统鱼雷方面可以说是独辟蹊径,经过 10 多年的努力,研制成功了当前世界上最先进的用于旗鱼

(Spearfish)鱼雷的热动力系统。目前该鱼雷已装备部队。

该鱼雷在浅深度时最高航速可达 70 kn, 最远航程 40 km 以上, 最大航深达 900 m, 双速制, 采用 OTTO、HAP(高氯酸羟胺 $\text{NH}_3\text{OH} \cdot \text{HClO}_4$)、海水三组元推进剂和开式循环燃气轮机动力系统, 据估计, 其主机功率可达 900 kW 以上。一般情况下开式循环的燃气轮机动力系统抗背压能力较差, 即对背压的变化较为敏感, 这给控制和调节带来较大难度, 但“旗鱼”的工作深度可达 900 m 以上, 说明它已很好地解决了这一难题, 从而使大型鱼雷动力系统在大幅度的深度变化情况下能可靠正常工作, 为开式循环燃气轮机动力系统的应用打开了一个广阔的应用前景。

英国也曾研究过闭式循环动力系统。

瑞典以其独特的技术特点一直在研制鱼雷用热动力系统, 并已有几型装备部队和出口。最具代表性的产品是正在研制的重型鱼雷 TP2000‘S’型鱼雷动力系统。采用柴油和 HTP(H_2O_2)为推进剂和半闭式循环凸轮机, 其航速达 50 kn, 最大航程达 50 km, 航深达 500 m, 性能较优越。

从几个国家的典型产品可看出, 热动力系统的类型是多种多样的, 采用的循环形式也不相同, 有开式循环动力系统、半闭式循环动力系统和闭式循环动力系统。采用的发动机有凸轮式活塞发动机、摆盘式活塞发动机、蒸汽轮机、燃气轮机。采用的燃料种类也不同。有 OTTO—II 单组元燃料、HAP、海水、煤油、HTP、柴油、酒精、水反应燃料、固体火药等。说明热动力系统的研究有多条路可走, 但最终的目的都要使鱼雷获得高速度、远航程、大深度、低噪声、价廉、易维护的性能。

综上所述, 国外鱼雷用热动力系统的现状有以下几个特点:

(1) 虽然国外的研究部门还在不断地研究鱼雷的新燃料, 但仍未取得较大进展。要研制一种供鱼雷发动机用的推进剂并非易

事,热动力鱼雷所采用的推进剂基本上是几十年来所使用的成熟产品和几种成熟产品的优化组合。例如:OTTO—II单组元推进剂是20世纪60年代就开始使用的燃料,其独特的优势是能量较高,使用安全和动力系统简单等,所以成为美国热动力鱼雷的主要燃料。估计这种燃料还将使用下去,其他燃料如Li, SF_6 、煤油、酒精、过氧化氢、HAP(高氢酸羟胺 $\text{NH}_3\text{OH} \cdot \text{HCO}_4$)和水反应燃料等均是成熟的燃料,只是在使用时用不同的组合使其各显优势并得到充分的发挥。例如:OTTO—II单组元推进剂虽有不少优点,但其不足之处是,本身的含氧量较少,使其可燃成分得不到完全燃烧而能量不能充分发挥。据此加入一定量的HAP和海水,形成三组元推进剂,这样不仅使OTTO—II的可燃成分完全燃烧,还可使燃气的绝大部分可溶于水,使其能量密度提高40%~60%。当然,这样也就增加了系统的复杂性和维护保养的难度。Li作为一种人们所熟知的水反应燃料,它和 SF_6 反应生成高热并且无气体产生使它们成为闭式循环动力系统的理想能源。所以在今后一段时间内,作为鱼雷热动力系统所用的燃料还会是这些成熟的产品以及它们的不同组合。

(2)鱼雷热动力系统所用的发动机主要是活塞机和涡轮机。这两种机型均可用于重型鱼雷及轻型鱼雷的动力系统。从理论分析看,它们在不同的要求下有各自的优点。

活塞机有较好的速度和深度特性,控制和调节比较简单,对深度的变化不敏感,在容积受限制的情况下适用于中、低功率的动力系统。而涡轮机的功率潜力比活塞机大,在大功率时涡轮机的效率优于活塞机,且运转平稳,机械振动和噪声较小,与活塞机相比,它具有结构简单、便于加工、装拆和维修等优点。但涡轮机对工况变动特别是背压的变化很敏感,控制调节比较复杂。

今后一段时间内,在鱼雷内部这个特定的空间内,活塞式发动

机和涡轮发动机还是热动力系统的主要机型。一般来说鱼雷航速小于 55 kn,即发动机的输出功率小于 400 kW 时,使用活塞机和涡轮机均可以,且活塞机还有一定的优越性。但要使鱼雷的航速超过 55 kn,即发动机的输出功率大于 400 kW,使用涡轮机就比较合理了。

(3)鱼雷噪声是现代鱼雷重要的战术指标之一,现代鱼雷要求其自身噪声低、辐射噪声小,这样才能有效地发现目标和提高自身的隐蔽性。鱼雷动力系统所产生的振动和发出的噪声是鱼雷噪声的最主要来源。它的发动机、各种辅机、齿轮和各种轴承是主要的噪声源。所以对热力系统的噪声治理是今后动力系统研究的任务之一,要在结构设计、材料选择、加工工艺和减振隔振等方面采取有效措施,力争使热力系统的噪声水平达到电动力系统的水平。

第二节 鱼雷热力发动机综述

热力发动机是热动力鱼雷的推进主机,从鱼雷兵器发展史来看,鱼雷热力发动机的类型有:活塞发动机、涡轮发动机、液体和固体火箭发动机。以及喷水发动机。其中,活塞和涡轮两类发动机得到广泛的应用,无论重型或轻型鱼雷,也无论反舰还是反潜鱼雷或反潜兼顾反舰的通用鱼雷,国内外众多热动力鱼雷大都采用活塞发动机或涡轮发动机。液体和固体火箭发动机及喷水发动机主要用于水下航程短而航速高的鱼雷上。第二次世界大战后期法西斯德国及战后原苏联与意大利曾有少数鱼雷型号采用此类发动机,它们的共同特点是喷射式推进、结构简单、航速高,但因航行效率低而航程短,且不很适宜于深水特别是变航深使用。采用上述几种发动机并具有代表性的鱼雷型号及其性能列于表 1-1,表中 HTP 为过氧化氢,HAP 为高氯酸羟胺。

表 1-1 采用不同发动机且具代表性的热动力鱼雷及其有关性能指标

国别	年代	型号	用途	直径×长度	质量	航速/航程	潜深	能源	机型
				mm×m		kg			
德国	40年代	LT-1500	空—舰	533×7.0	1 500	40/1.7		苯烷、HTP	液体火箭发动机
意大利	1955年	U-6	—潜	515×7.5	1 000			水反应推进剂	喷水发动机
原苏联 / 俄罗斯	1956年	53-56	舰潜—舰	533×7.74	2 000	50/8, 40/13		煤油、氧气、淡水	卧式活塞机
	1965年	53-65K	舰—舰	533×7.95	2 100	45/19		煤油、氮气 海水	涡轮机
	80年代	APR-2E	空—潜	350×3.7	575	65/1.8	600	固体火药	固体火箭发动机
美 国	80年代	DIIT-1	舰潜—舰潜	650×12	4 500	50/50, 30/100	400	煤油, HTP, 海水	涡轮机
	90年代	A3	空—潜	350×3.3		~65/3.5		固体火药	喷水发动机
	1965年	MK46-0	空箭舰—潜	324×2.59	261	45/5		固体火药	涡轮机
	1966年	MK46-1	空箭舰—潜	324×2.59	232	45/10	457	OTTO-II	凸轮式活塞机
美 国	1971年	MK48-1	舰潜—舰潜	533×5.85	1588	50/45*	914	OTTO-II	摆盘式活塞机
	80年代	MK48A/CAP	舰潜—舰潜	533×5.85	1582	60/46*		OTTO-I HAP 海水	摆盘式活塞机
	1992年	MK50	空箭舰—潜	324×2.9	362	55/20	>1 100	锂, 六氟化硫	闭环涡轮机
英国	90年代	Spearfish	舰潜—舰潜	533×6.0	1850	70/40*	>900	OTTO-II, HAP 海水	涡轮机
瑞 典	1968	TP61	舰潜—舰	533×7.02	1765	45/20		酒精, HTP	星型活塞机
	90年代	TP2000S	潜—舰潜	533×5.75	1314	<50/<50	500	柴油, HTP	半闭凸轮式活塞机

表中带“*”号的数据为最大航速和最大航程。

转子发动机和斯特林发动机(热气机)在鱼雷上的应用问题,国外也曾经和正在进行探索研究,但迄今尚未获得实际应用。鱼雷用转子发动机需要妥善解决使用高压高温工质时转子与缸体、端盖间的密封及发动机的润滑和冷却问题。而斯特林发动机目前的结构还比较复杂,比功率也较低,难于满足鱼雷对推进主机的要求。

根据对下一代轻型和重型热动力鱼雷推进性能指标的预测,结合今后发展潜用反航母鱼雷的需要,热动力推进主机较为现实且比较适宜的是选用活塞发动机和涡轮发动机。所以,下面对它们的特点、性能和适用性进行综合分析和评价。

活塞发动机是鱼雷热力发动机中最早使用的一种传统机种。世界上第一条鱼雷——罗伯特·怀特黑德鱼雷即使用 V 型双缸活塞式冷气机,其工质是压缩空气,鱼雷活塞发动机基本上均为外燃机,其构造型式主要有三类:卧式发动机、星型发动机、筒型发动机,前两类的功率传动机构是平面曲柄连杆机构,后一类则属于空间机构。如凸轮式活塞发动机的功率传动机构为圆柱凸轮滚轮机构,而周转斜盘发动机的功率传动机构为空间连杆机构。

第二次世界大战以后,鱼雷兵器的战斗使命由单纯反舰转向以反潜为主并兼顾反舰,因此要求鱼雷潜深不断增大。尽管开式循环推进主机牺牲效率而将进、排气压强比由反舰鱼雷常用的 30 降低到 3~10,但为保证所需功率,发动机进气压强绝对值还是迅速增大,再加上卧式和星型发动机结构比较笨重和复杂,比功率较低,振动和噪声较大,因此它们已不能适应现代鱼雷对推进主机的要求。一般说来,卧式和星型发动机仅适用于反舰鱼雷,如原苏联的 53~56 鱼雷及其改进型,发动机为卧式双缸双作用活塞发动机,有效功率约 340 kW。瑞典的 TP61 系列鱼雷,发动机为星型双排 12 缸活塞发动机,有效功率约 240 kW。