西北工业大学专著出版基金资助项目

水下热动力推进系统自动控制

罗　凯　党建军　王育才　著

西北工业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook

【内容简介】 本书针对使用开式循环、泵供式、活塞发动机和涡轮发动机的鱼雷热动力推进系统的控制问题，介绍了开环与闭环两种控制系统的分析、设计及实现方法。全书论述了鱼雷热动力推进系统的工作机理和数学模型，基于压强调节阀和流量调节阀的转速开环控制方法、转速闭环的线性和非线性控制方法，转速闭环控制的多种实现形式、转速控制器的单片机实现、开式循环热动力鱼雷的工况范围、涡轮发动机系统的自动控制等内容。其内容自成体系，理论性、可读性强。

本书可作为高等院校水中兵器热动力学科本科生和研究生教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水下热动力推进系统自动控制/罗凯，党建军，王育才著.
—西安：西北工业大学出版社，2005.6
西北工业大学专著出版基金资助项目
ISBN 7-5612-1886-9

Ⅰ. **水…** Ⅱ. ①**罗…** ②**党…** ③**王…** Ⅲ. **热动力鱼雷—推进系统—自动控制—研究** Ⅳ. TJ630.3

中国版本图书馆 CIP **数据核字**(2005)**第** 003889 **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：029－88493844　88491757
网　　址：www.nwpup.com
印 刷 者：**陕西向阳印务有限公司**
开　　本：850 mm×1 168 mm　1/32
印　　张：8.625　**插页** 6
字　　数：221 **千字**
版　　次：2005 **年** 6 **月第** 1 **版**　2005 **年** 6 **月第** 1 **次印刷**
定　　价：18.00 **元**

前　言

本书针对使用开式循环、泵供式、活塞发动机和涡轮发动机的鱼雷热动力推进系统的控制问题展开讨论，介绍了开环与闭环两种控制系统的分析、设计及实现方法。

书中内容涉及知识面较宽，有较强的多学科交叉的性质。一般要求读者拥有鱼雷武器概论、鱼雷活塞发动机、鱼雷涡轮发动机、鱼雷能源与供应系统、液压系统与液压元件、自动控制原理、单片机原理等方面的基础知识。

全书论述了鱼雷热动力推进系统的工作机理和数学模型、基于压强调节阀的转速开环控制系统、基于流量调节阀的转速开环控制系统、基于变排量泵的转速闭环控制系统、转速闭环的线性化(PID)控制方法、转速闭环的非线性(变结构)控制方法、转速闭环控制的多种实现形式、转速控制器的单片机实现、开式循环热动力鱼雷的工况范围、涡轮发动机系统的自动控制等内容。全书的内容自成体系。为了增强可读性，还简要介绍了相关的液压阀、线性控制理论基础、非线性控制理论基础等方面的内容。

本书可作为鱼雷热动力学科本科生和研究生的教材，也可供本领域及其他相关专业的工程技术人员参考。

本书由中国船舶重工业集团公司第七〇五研究所史小锋研究员主审，成书过程中得到了诸多同事的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中缺点和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

著　者

2004 年 7 月 18 日

目　录

第 1 章　绪论…… 1

1.1　**鱼雷动力推进系统简介** …… 1
1.2　**几种典型的鱼雷热动力推进系统** …… 7
1.3　**闭环控制问题的引出**…… 12
1.4　**本书的内容安排和目的**…… 17

第 2 章　开式循环鱼雷热动力推进系统工作机理和数学模型 … 19

2.1　**辅机的机理模型**…… 20
2.2　**燃烧室的机理模型**…… 26
2.3　**主机的机理模型**…… 28
2.4　**推进器的机理模型**…… 34
2.5　**鱼雷运动方程**…… 39
2.6　**热动力推进系统机理模型**…… 41
2.7　**机理模型的系统参数整定**…… 45

第 3 章　热动力推进系统的压强调节阀控制 …… 47

3.1　**压强调节阀控制的动力推进系统的模型简化**…… 47
3.2　**压强调节机理**…… 50
3.3　**压强调节的实现**…… 57
3.4　**压强调节阀性能分析及系统匹配**…… 64
3.5　**压强调节阀的变速控制**…… 69

第 4 章 热动力推进系统的流量调节阀控制 …… 77

4.1 流量调节阀控制的动力推进系统的模型简化…… 77
4.2 流量调节机理…… 79
4.3 流量调节的实现…… 86
4.4 流量调节阀性能分析及系统匹配 …… 102
4.5 液压阀受力分析简介 …… 107

第 5 章 变量泵闭环控制的热动力推进系统开环特性…… 114

5.1 转速闭环控制的热动力推进系统的传递函数 …… 114
5.2 转速闭环控制系统的开环特性 …… 122

第 6 章 转速闭环的线性化(PID)控制方法 …… 127

6.1 线性控制系统分析方法简介 …… 127
6.2 转速闭环控制的 PID 方法 …… 137
6.3 PID 控制系统性能估计 …… 143
6.4 仿真分析 …… 147
6.5 PID 控制器的实现和修正 …… 149

第 7 章 转速闭环的非线性(变结构)控制方法…… 154

7.1 李雅普诺夫理论基础 …… 154
7.2 被控对象的非线性模型 …… 160
7.3 针对二阶非线性系统的变结构控制律的综合 …… 162
7.4 针对一阶非线性系统的变结构控制律的综合 …… 166

第 8 章 闭环控制的几种实现形式…… 169

8.1 闭环控制的多种实现形式 …… 170

需要全本请访问 www.ertongbook

8.2 控制失效时系统的安全特性分析 …… 180

第 9 章 转速控制器的单片机实现…… 190

9.1 一般设计要求 …… 190
9.2 软件系统构成 …… 191
9.3 硬件系统构成 …… 195
9.4 抗干扰措施 …… 202

第 10 章 开式循环热动力鱼雷变速范围分析 …… 206

10.1 鱼雷螺旋桨横向力分析…… 207
10.2 鱼雷变推力运动方程…… 213
10.3 热动力鱼雷航速范围分析…… 219

第 11 章 开式循环涡轮机动力推进系统的控制 …… 224

11.1 主机的机理模型…… 224
11.2 热动力推进系统机理模型…… 230
11.3 控制策略的讨论…… 233
11.4 仿真算例和控制策略的确定…… 236
11.5 超大航深下系统的变速控制…… 246

符号说明…… 253

参考文献…… 265

第1章 绪 论

1.1 鱼雷动力推进系统简介

自1866年Whitehead发明的第一条鱼雷出现至今已经130多年了。自它出现起就一直是、而且将来也仍然是海军的重要武器,它在现代海战中占据着重要的地位。由于鱼雷攻击舰艇的水下部分,所以它较之于攻击舰艇水上部分的其他武器威力更强大。大力发展鱼雷武器,是增强我国海军力量、保卫祖国海疆的需要。

鱼雷武器系统非常复杂,鱼雷本体就涉及自导、引信、控制、流体、燃料、动力、推进等多方面的技术,其中许多技术是鱼雷所特有的,如果再考虑作战平台和火控系统,其技术及其实现就更加复杂和困难了。目前世界上能够研制、生产鱼雷武器的国家只有15个。

从该武器作战对象的角度来区分,鱼雷可分为反舰型、反潜型、反舰反潜通用型等类型。从本身尺寸的角度来区分,鱼雷可分为轻型鱼雷和重型鱼雷。目前各国通用的鱼雷口径,轻型鱼雷为324 mm,重型鱼雷为533 mm。但是瑞典的轻型鱼雷口径为400 mm,俄罗斯为了提高鱼雷的航速和航程,其重型鱼雷也采用650 mm口径的标准。从鱼雷的能源储备和动力类型的角度来区分,又可分为电动力鱼雷和热动力鱼雷。

无论从重量还是从体积的角度来看,动力推进系统都占据了全雷最大的比例,鱼雷的发展是伴随着动力推进系统的发展而发展的。鱼雷动力推进系统一般由能源储备与供应系统、发动机、推进器等构成,电动力和热动力鱼雷都使用对转螺旋桨或泵喷射推

进器。火箭发动机是热动力系统中的特殊类型,它无须推进器。

为了有效地追踪和命中目标,鱼雷的最大航速应超过目标航速的 1.5 倍,鉴于目前水面舰艇、潜艇的航速发展状况,目前鱼雷最大航速的发展目标应超过 60kn。为了提高发射舰艇的隐蔽性和生存概率,应尽量增大鱼雷的航程,目前鱼雷航程发展的目标应是轻型鱼雷超过 20 km、重型鱼雷超过 50 km。为了有效打击在深水中航行的潜艇,目前鱼雷航深发展的目标应是超过 1 000 m,将来甚至达到 1 500 m。为了不暴露自身的航行轨迹,要求鱼雷的航迹要小,也就是其排放物的可溶性、可凝性要好。同时为了自导系统更好地工作、为了加强攻击的突然性,鱼雷应尽量降低航行自噪声。所以,全雷对动力推进系统提出的要求是大功率、远航程、大深度、隐蔽性好,鱼雷动力推进系统就是为了不断满足以上要求而不断发展的。

相比较而言,电动力推进系统拥有低噪声、无航迹、性能几乎不受航深影响、结构简单、成本低廉、使用维护方便等优点,但是受制于其能源储备——动力电池的能源储存量——及释放功率的限制,电动力鱼雷的航速和航程难以达到很高的技术指标,就目前看来还不能取代热动力系统的地位。

鱼雷用电动力系统的发展主要在于两个方面:推进电机和动力电池。电机从直流对转串激电机发展到对转永磁电机和高速永磁电机,其发展方向依然是高速永磁电机。而制约鱼雷电动力系统性能的核心、瓶颈是动力电池,电池的发展从铅酸电池、镉镍电池到银锌电池、镁/氯化银电池,再发展到镁/氯化亚铜电池和铝/氧化银电池,目前锂离子电池和锂/亚硫酰氯电池也正在研制当中。当前电动力轻型鱼雷的航速已经突破了 50 kn。

热动力推进系统具有结构复杂、高速航行时自噪声大、开式循环工作时有航迹、性能受到航深影响等特点,但是它最重要的优点是其推进剂的能源储备大、发动机输出功率大,可以满足现代鱼雷

高速、远程的要求。就目前和可预见的将来看，热动力推进系统的地位，尤其在重型鱼雷上的统治地位是不可动摇的。

鱼雷用热动力系统的发展体现在四个方面：热力循环、推进剂、能源供应和发动机。

鱼雷热动力系统按热力循环可分为开式、半闭式和闭式循环。在开式循环系统中发动机直接向雷外海水排气，其排气压强必须大于当地海水背压；在半闭式循环中发动机排出乏气的不可溶、不可凝的部分被增压后排出雷外，可以有效降低发动机的排气压强；在闭式循环系统中燃料反应后的生成物密度大于燃料本身的密度，它无须向雷外排出燃烧产物，其性能不受背压影响。但是总体而言动力系统性能的提高是以系统复杂性的增加为代价的。

为适应反潜鱼雷航深变化范围日益增大的要求，开式循环系统基本上是沿着提高发动机进气压强(加大推进剂供应量)并对其进行调节的途径发展的，国外反潜鱼雷的航深已达 1 000 m 左右，所用开式循环系统的发动机(活塞式)进气压力高达 34～42 MPa。开式循环技术发展至今已接近极限，进一步的发展需要在原材料技术等方面有所突破，各鱼雷生产大国均已开始发展半闭式和闭式循环系统技术，并已成功地投入现役使用。例如，瑞典的 TP2000S 使用了配装凸轮发动机的半闭式循环系统；而闭式循环系统代表了鱼雷热动力系统发展的先进水平，是未来发展的方向，美国继成功地将该系统应用于 MK—50 轻型鱼雷后，又提出了用于重型鱼雷的闭式循环热动力系统。

推进剂是决定鱼雷热动力推进系统性能高低的另一主要因素，一种新型推进剂的成功使用，往往会给鱼雷热动力技术带来一场革命。鱼雷用推进剂不仅要求能量密度高、成气性大，还要求燃烧生成物尽可能溶于水，推进剂的储存及使用安全性好。从目前的发展趋势看，不论是适于轻型鱼雷的单组元燃料，还是适于重型鱼雷的多组元燃料，均沿着寻求提高能量密度、降低全寿命周期费

用、安全和环境适应性好的方向发展。从煤油/空气、酒精/空气、萘烷/过氧化氢到酒精/过氧化氢、奥托—Ⅱ、奥托/HAP 以及锂/六氟化硫,目前更出现了能量密度极大的金属/水反应燃料。金属燃料、金属/水反应燃料由于其具有很高的能量密度,可望成为未来鱼雷最有前途的推进剂。

能源供应方面,目前的发展水平是采用定排量或变排量柱塞泵式供应系统、开环或闭环调节控制方法,可实现多速制及适应大深度工况条件。旋转燃烧室技术已成功地应用于进气压力较高的活塞式发动机,并已规划开发基于海水的金属/水反应燃烧室。

发动机是鱼雷热动力系统的核心,其输出功率的大小、经济性的好坏对于鱼雷航速和航程起着决定性作用。热机从卧式往复活塞机、星型活塞机发展到了筒型活塞机(凸轮机、斜盘机)和涡轮机(燃气轮机、蒸汽轮机),其间对于火箭发动机的研制也未中断过。目前热动力鱼雷的航速早已突破了 60 kn。值得一提的是使用金属/海水反应燃料火箭发动机的俄罗斯"SHKVAL"超空泡鱼雷,其航速达到 200 kn,航程 10 km,代表了目前鱼雷热动力系统发展的最高水平。

表 1.1 和表 1.2 列举了目前世界各主要海军国家装备的最新型鱼雷的主要技术指标。

表 1.1 新型轻型鱼雷一览表

国家	名称(或型号)	推进方式	航程/km	航速/kn	导引方式
美国	MK46—5	OTTO+凸轮机	11	45	主/被动声自导
美国	MK—50	SCEPS+汽轮机	20	55	主/被动声自导
联合国	STINGRAY	Mg/AgCl	8.3	45	线导+主/被动声自导
法国	SEASTURGEON	Al/AgO	14/9.8	38/53	主动声自导
意大利	A290	Al/AgO		30/50	主/被动声自导

续表

国家	名称(或型号)	推进方式	航程 km	航速 kn	导引方式
法、意、德	MU—90	Al/AgO	15	50	主/被动声自导
瑞典	TP430	Ag/ZnO			线导+主/被动声自导
印度	SHYENA	Mg/AgCl	9	40	主/被动声自导

注:SCEPS为Stored Chemical Energy Power System的缩写,为闭式循环涡轮机系统,燃料为锂/六氟化硫(Li/SF_6)。

表1.2 新型重型鱼雷一览表

国家	名称(或型号)	推进方式	航程 km	航速 kn	导引方式
美国	MK48ADCAP	OTTO+HAP+斜盘机	46/18	30/55	线导+主/被动声自导
联合国	SPEARFISH	OTTO+HAP+涡轮机	40	≈70	线导+主/被动声自导
法国	F17—2	Ag/Zn	18	40	线导+主/被动声自导
意大利	A194	Ag/Zn	25/15	25/37	线导+主/被动声自导
瑞典	TP2000	柴油+过氧化氢+半闭式凸轮机	45	50	线导+主/被动声自导
日本	G—RX2	酒精+过氧化氢+摆盘机	20	55	
印度	TYPE—53	电动力	25	50	尾流自导
朝鲜	WHITE SHAKE	电动力	30	40	主/被动声自导
俄罗斯	SET—65	煤油+过氧化氢+涡轮机	45	50	尾流、声自导
俄罗斯	VA-111 SHKVAL	金属+海水+火箭发动机	10	200	线导

需要全本请访问 www.ertongbook

应指出的是，轻型鱼雷和重型鱼雷的作战对象、使用方式不同，轻型鱼雷的作战对象是潜艇，发射平台是空投、舰射或火箭助飞；而重型鱼雷的作战对象是水面舰艇和潜艇，发射平台主要是潜射。作战对象、使用方式的不同决定了两种鱼雷对于各自动力系统的要求也相应地有所差别。轻型鱼雷对于航速、航程的要求没有对重型鱼雷的要求那么苛刻；重型鱼雷为了有效地打击作战目标、提高发射舰艇的隐蔽性和生存概率，应尽量增大鱼雷的航程和航速。从表 1.1 和表 1.2 可以看出，电动力系统在反潜的轻型鱼雷中使用较为广泛，而热动力系统则在反舰兼反潜的通用重型鱼雷上占据了主导地位。

从鱼雷动力系统发展的历史来看，热动力和电动力系统的技术进步是交替领先的，这种竞争的态势是两种动力系统技术进步发展的内在动力。作为鱼雷武器的研究者和工程技术人员，有义务、有责任紧密跟踪科学技术发展的最新成果，并试图将其应用于自身的研究领域之中，因为武器的发展是依赖于新材料、新技术等基础领域学科的发展的。

应该注意到，世界各国海军发展鱼雷武器都是从其本身的作战对象和本国的武器发展传统、技术水平、经济实力等要素综合考虑出发的。欧洲大陆诸国(法、德、意等)主要发展成本相对低廉的电动力鱼雷，而美、俄、英等传统海军大国则更加注重考虑鱼雷的作战性能，更多地关注于热动力鱼雷。我国是正在崛起的海军大国，但同时也是一个发展中国家，特殊的地缘政治和战略对象决定了我国必须遵循热、电并举的鱼雷武器发展方针，必须走自主开发和技术引进相结合的发展道路。

我国鱼雷武器的研制模式基本上是在从研究仿制到自行研制的过程中反复修改的，所达到的技术水平还不高。目前研制的模式和工作布局主要还是围绕着在研型号进行的，采用的是设计→加工样机→试验→修改设计→再加工制造→再试验的传统模式。

设计主要依靠传统的 CAD 绘图方法，加工试制仍采用编制工艺规程、加工制造、装配调试的传统方式；试验也主要是针对加工试制后的物理样机从组件、系统到全雷，从地面台架试验到湖、海实航试验展开的。在科学技术飞速发展的今天，这种模式无疑是落后而低效率的，且使产品研制周期和研制成本增加，造成资源的极大浪费。随着技术的发展，未来鱼雷武器的发展将根据应用方针为基础的研究途径来实现。设计方面，采用虚拟技术在计算机构成的虚拟环境中得出三维模型存入数据库，并随着设计的改变而演变，根据性能、效率、开发、生产以及支撑全寿命的详细费用模型为基础，对设计进行逐次迭代和逼近。未来的目标是，以有效费用/性能设计数据库为基础达到对武器子系统的半自动化优化设计。试验方面，在模拟水下条件的可控环境中，采用陆上仿真装置，代替真实的水下环境对鱼雷进行评估和鉴定。显然，这种途径为鱼雷武器新功能的开发以及节省大量开发与支持经费提供了一种可靠的工程方法。

1.2 几种典型的鱼雷热动力推进系统

本节简要介绍几种典型的鱼雷热动力推进系统，目的是对鱼雷热动力系统有整体的了解，为从系统的角度认识和分析该研究对象奠定初步的基础。内容安排上强调系统的工作机理，对于各个组件不进行详细的论述。

1.2.1 53—39 鱼雷热动力推进系统

53—39 鱼雷是前苏联开发的使用挤代式能源供应系统的代表产品。该鱼雷是直航反舰重型鱼雷，拥有两个速制，速制选择在发射前完成，鱼雷运行过程中不再变速。燃料为压缩空气、煤油和淡水，能源供应方式为压缩空气挤代式，发动机为卧式双缸双作用

活塞发动机，开式循环系统。

压缩空气储存于高压气舱中，压缩空气作为燃烧反应的氧化剂和液体燃料及淡水的挤代气，通过减压机构供入燃烧室，同时将作为燃烧剂的煤油和作为反应冷却剂的淡水挤入燃烧室，三者在燃烧室内燃烧生成高温高压的燃气和水蒸气，通过滑阀配气机构供入卧式双作用活塞发动机的 4 个气缸做功；再通过十字轴分速后带动对转螺旋桨转动；乏气通过推进器内轴排出雷外。该型鱼雷动力系统构成简单，无须燃料泵等辅机。

由于该鱼雷是反舰型鱼雷，其航深变化很小，发动机排气压强变化也很小，系统无须对航深进行补偿，只要来自减压机构的压缩空气的压强维持恒定，供入燃烧室的燃烧剂——煤油、氧化剂——和空气以及冷却剂——淡水——的流量就会维持恒定，从而也就维持了发动机输出功率的恒定。

这种热动力系统简单，但其压缩空气的利用率很低，整雷的燃料储存量很有限，全雷的性能指标也比较低。

1.2.2 MK—46 鱼雷热动力推进系统

MK—46 鱼雷是美国开发的轻型反潜鱼雷，共有 5 个型号。该鱼雷的燃料是 OTTO—Ⅱ（成分为 1.2 丙二醇二硝酸脂、邻硝基二笨胺和癸二酸二丁脂）单组元燃料，能源供应方式为二氧化碳气体挤代 + 定量燃料泵 + 压强调节式，单速制或双速制，发动机为对转凸轮活塞发动机，开式循环系统。

OTTO—Ⅱ燃料储存于燃料舱中，液态二氧化碳储存于挤代高压气瓶中，液态二氧化碳气化后形成的带压气体——二氧化碳——作为挤代气，通过减压阀将 OTTO—Ⅱ单组元燃料挤压至燃料泵前。燃料泵为定排量泵，泵后的高压燃料通过压强调节阀，一路溢流回泵前，另一路供入燃烧室。OTTO—Ⅱ在燃烧室内燃烧生成高温高压燃气，通过转阀配气机构供入对转凸轮活塞发动

机的5个气缸做功,带动推进器和辅机转动,乏气通过推进器内轴与冷却海水混合后排出雷外。

由于该雷是反潜型鱼雷,其航深变化很大,发动机排气压强变化也很大,系统必须对航深进行补偿。这一任务由位于燃料泵和燃烧室之间的压强调节阀来完成。该阀感知雷外海水的压强,通过改变溢流量使得供入燃烧室的推进剂流量、燃烧室压强与雷外海水压强维持一定的关系,从而维持了发动机输出功率的恒定。

几种早期型号的热动力系统无变速功能,结构简洁、紧凑,发动机比功率很大,能够基本满足鱼雷大范围内变化航深的要求。但是泵后的部分高压燃料通过压强调节阀溢流回泵前造成了功率的浪费,减小了系统的有效输出功率。

由于OTTO—Ⅱ燃料为贫氧燃料,其燃烧反应并不充分,能量利用率偏低,同时反应产物溶于水、凝于水的成分不多,造成鱼雷的航迹明显。

1.2.3 MK—50鱼雷热动力推进系统

MK—50鱼雷是美国开发的轻型反潜鱼雷,用于替代MK—46鱼雷。该鱼雷的动力系统是SCEPS(Stored Chemical Energy Power System的缩写,意为储存化学能动力系统),燃料为锂/六氟化硫,发动机为蒸汽涡轮机,闭式循环系统。

作为氧化剂的六氟化硫储存于氧化剂舱中,通过调节器进入锅炉反应器,在锅炉反应器中与作为还原剂的熔融态金属锂反应,生成氟化锂和硫化锂,同时放出大量的热能。热交换器安装于锅炉反应器中,液态水于此被加热为过热蒸汽,进入蒸汽涡轮机输出轴功,带动推进器和辅机转动。乏气经过冷凝器恢复液态,由水泵供入热交换器形成循环。由于反应生成物氟化锂和硫化锂的密度大于金属锂,所以系统无须向外界排放反应产物,该系统运行几乎不受航行深度的影响。

由于该雷是可变速型鱼雷，对动力系统的控制反映在系统变速和姿态补偿上，这一任务主要由控制氧化剂——六氟化硫——流量的调节器来完成。

这种热动力系统具备变速功能，结构复杂，能够很好地满足鱼雷大范围内变化航深和航速的要求。同时由于系统与外界之间不进行物质排放，没有航迹。该系统是现代鱼雷闭式循环热动力系统的代表作。

1.2.4 某重型鱼雷热动力推进系统

某重型鱼雷是反舰、反潜通用鱼雷。该鱼雷的燃料是OTTO—Ⅱ单组元燃料；能源供应方式为定量燃料泵 + 流量调节阀式；双速制；发动机为单转摆盘活塞发动机，开式循环系统。

雷外海水经海水泵加压、经过海水减压器后挤代储存于燃料舱中的OTTO—Ⅱ燃料至燃料泵前，燃料泵为定排量泵，经泵加压后燃料通过流量调节阀，一路溢流回泵前，另一路供入燃烧室。OTTO—Ⅱ在旋转燃烧室内燃烧生成高温高压燃气，通过转阀配气机构供入单转摆盘活塞发动机的6个气缸做功，带动推进器和辅机转动，乏气通过推进器内轴与冷却海水混合后排出雷外。

由于该雷是反舰、反潜通用型鱼雷，其航深变化很大，所以系统必须对航深进行补偿；同时该鱼雷还具有两个速制，系统还必须拥有换速功能，这一任务由位于燃料泵和燃烧室之间的流量调节阀来完成，该阀感知雷外海水的压强，通过改变溢流量使得供入燃烧室的推进剂流量与雷外海水压强维持一定的关系，从而维持了发动机输出功率的恒定。流量调节阀有两个工作状态，通过在这两个状态之间的转换，完成发动机的输出功率转换，从而使得鱼雷具备稳速、变速的功能。

这种热动力系统能够基本满足鱼雷大范围内变化航深和航速的要求。但是，泵后的部分高压燃料通过流量调节阀溢流回泵前，

造成了功率的浪费,减小了系统的有效输出功率。

与 MK—46 轻型鱼雷一样,由于 OTTO—Ⅱ燃料为贫氧燃料,其燃烧反应并不充分,能量利用率偏低,同时反应产物溶于水、凝于水的成分不多,造成鱼雷的航迹明显。

1.2.5 SPEARFISH 鱼雷热动力推进系统

SPEARFISH 鱼雷是英国开发的重型反舰、反潜通用鱼雷。该鱼雷的燃料是 OTTO—Ⅱ+HAP(成分为过氯酸羟胺)水溶液 + 海水三组元燃料,能源供应方式为变量燃料泵供式,发动机为燃气涡轮机,开式循环系统。

作为燃烧剂的 OTTO—Ⅱ和作为氧化剂的 HAP 分别储存于各自的燃料舱中,由雷外海水直接挤代进入三组元比例控制器中,同时作为冷却剂的雷外海水也进入三组元比例控制器中。三路组元在此被精确配比为一定比例的混合燃料,经充分混合后供应至燃料泵前。燃料泵为变排量泵,泵后的高压燃料供入燃烧室,生成高温高压燃气,供入燃气涡轮发动机做功,带动推进器和辅机转动,乏气通过推进器内轴与冷却海水混合后排出雷外。

由于该雷是反舰、反潜通用型鱼雷,其航深变化很大,发动机排气压强变化也很大,而且涡轮机对于背压变化较之于活塞机更为敏感,所以系统必须对航深进行补偿;同时该鱼雷还具有多个速制,系统还必须拥有换速功能,这一任务主要由变排量燃料泵来完成。转速控制器控制变排量燃料泵的排量,从而控制了供入燃烧室的推进剂流量,调节发动机的输出功率,使得鱼雷具备稳速、变速功能。

这种热动力系统结构复杂,能够很好地满足鱼雷大范围内变化航深和航速的要求,泵后的燃料无须溢流回泵前,消除了额外的功率消耗。

由于使用了三组元燃料,燃烧反应得以充分进行,能量利用

需要全本请访问 www.ertongbook