

航深对水下航行体动力性能的影响及改善方法

丰少伟,杨云生,刘 佳

(海军工程大学,武汉 430033)

摘要:水下航行体的动力系统由于直接向外界海水环境排出尾气致使其动力性能受到航行深度的制约,随着航深的增大,发动机效率降低并且燃料消耗量增加。在现有动力系统的基础上提出了半闭式循环结构,使发动机排气背压不直接受制于外界环境,从而改善了航深对动力性能的影响,提高了发动机的功率。

关键词:航深;发动机效率;燃料消耗量;半闭式循环;功率

本文引用格式:丰少伟,杨云生,刘佳.航深对水下航行体动力性能的影响及改善方法[J].四川兵工学报,2015(6):7-10.

Citation format:FENG Shao-wei, YANG Yun-sheng, LIU Jia. Research on Influence of Sailing Depth on Power of Underwater Body and Improving Method[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2015(6):7-10.

中图分类号:U661.1;TJ7

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)06-0007-04

Research on Influence of Sailing Depth on Power of Underwater Body and Improving Method

FENG Shao-wei, YANG Yun-sheng, LIU Jia

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The power performance of the power system in one type of underwater body is tied to its sailing depth because of exhausting its tail gas to the water environment around it directly. The engine efficiency decreases and fuel consumption increases along with the sailing depth increasing. The thesis put forward semi closed cycle structure based on the existing power system in order to make the engine exhaust back-pressure not be affected directly by the environment and so as to improve the influence of sailing depth on power and the engine power.

Key words: sailing depth; engine efficiency; fuel consumption; semi closed cycle; power

水下航行体能够在水中自动航行,并且具有速度快、航程远、航深大等特点,其航行能力依赖于动力系统的推进作用。动力系统占据了水下航行体体积和质量的大部分,对于航行体的航程、航速、航深、可靠性、安静性等多种性能具有重大影响^[1]。水下航行体的动力系统分为电动力系统和热动力系统两种,其中热动力系统采用燃气或蒸汽技术,利用燃料的化学反应产生的热能推动发动机工作,热动力系统因为具有较高的能量储备而往往功率强大,所以航行体的航速高、航速远,机动性很强。在目前乃至将来很长一段时期,热动力系统依然具有不可替代的优势^[2]。

出于当前迫切的实际需求,航行深度成为水下航行体性

能的一个重量级指标,而航行体能够达到的航深与动力系统的抗背压能力十分相关。背压是指发动机排气出口处的气体压力。目前很多国家很多型号的水下航行体都采用将发动机做功后产生的尾气直接排放到外界海水环境的动力系统^[3]。这种动力系统可以称为开式循环系统,其排气路径如图1所示。

开式循环动力系统的缺陷在于,当水下航行体的航行深度增大时,体外的海水压强随之增大,为使尾气顺利排出,发动机的排气背压也必然随之上升。为保持必要的航速,就要使发动机保持一定的输出功率,那么当排气背压增大时就需要使发动机的进气压强相应的提高,这就会使进入燃烧室的

燃料消耗量增加。在水下航行体可携带的燃料一定的情况,这势必减小了水下航行体的航程,并且航深越大,航程的损失也越大。而如果要在航深增大时使航行体保持必要的航程,那么航速就会很难达到要求。综合上述分析,为保持动力性能,航深不可能太大。所以当前许多国家生产的热动力水下航行体所能达到的航深一直徘徊不前,无法很好地满足现实需要。

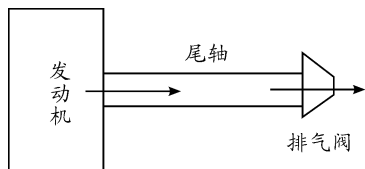


图1 开式循环的排气路径

如果能够改善动力系统的排气背压,让排气背压不受航深的影响,使背压保持在较低的水平,那么上述问题就可以很好地解决。较低的排气背压可以使发动机在保持当前进气压强的情况下提高输出功率,进而提高水下航行体的航速;也可以在保持当前输出功率的情况下降低进气压强,从而减少燃料消耗量,提高水下航行体的航程。总而言之,对于同样一台发动机,如果能设法使其在较低的排气背压下工作,就可以表现出更好的动力性能,水下航行体的航行能力就会大为改善。

1 航深对动力性能的影响

1.1 航深对发动机效率的影响

发动机效率将直接受到水下航行体所处海水深度的影响。可通过发动机气缸的示功图来计算这种关联。

发动机的实际循环过程要比其理想循环过程复杂,在分析气体工质各热力参数对发动机效率的影响上,使用理想循环更加简便直接。理想状况下发动机气缸的示功如图2所示^[4]。

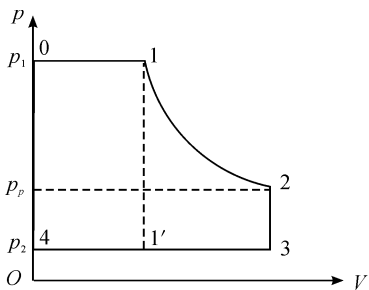


图2 理想循环的示功图

发动机缸内的循环过程分为等压进气过程(0-1)、绝热等熵膨胀过程(1-2)、等压排气过程(2-3)、定容压缩过程(3-0)4个部分。工质以压强 p_1 等压进入气缸,之后在膨胀过程中压强不断下降,等活塞移动到后止点时工质压强恰好等于排气的海水背压。进入排气过程后工质以压强 p_2 等压

的从气缸内排出,直到活塞到达前止点,这时候新一轮的工质从配气阀进入气缸,缸内压强瞬间增大到 p_1 。

理想循环中工质做的功 W_i 即等于示功图中各个过程代表的线段所围成的图形的面积,经过积分计算,可得

$$W = \frac{k}{k-1}(p_1 V_1 - p_2 V_2) \quad (6)$$

其中 k 为定熵指数。工质的热焓 $I = \frac{k}{k-1} p_1 V_1$,并且在绝热等熵过程中有 $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$ ^[5],故理想循环的效率 η 为

$$\eta = \frac{W}{I} = 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (7)$$

作出 η 随 $\frac{p_2}{p_1}$ 变化的曲线(取 $k=1.28$)如图3所示。

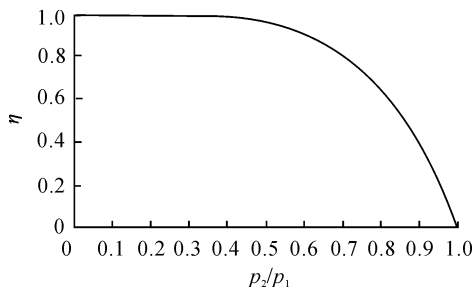


图3 压强比对发动机效率的影响

当水下航行体航深增大时,因外界环境压强的提高与保证输出功率的需要,排气压强 p_2 和进气压强 p_1 将同时增大,故 p_2/p_1 增大,结合图3,可知发动机效率将下降。反之,在较小的航深下, p_2/p_1 较小,发动机的效率是较高的。

1.2 航深对发动机燃料消耗量的影响

再从燃料消耗角度来看开式循环动力系统的弊端。发动机的效率如果从功的角度计算,就如式(7)的计算方法;如果从功率角度计算,效率就等于发动机的功率与每秒所消耗的燃料所具有的热能之比^[6],如下

$$\eta = \frac{P}{m_p Q_0} \quad (8)$$

式中: m_p 为燃料秒耗量; Q_0 为单位质量的燃料燃烧所释放的热能。在发动机功率 P 稳定的情况下, m_p 与 η 呈明显的反比例关系。所以,根据图3,可知在航深增大时, m_p 必然在增加。

现在对航深对 m_p 的影响进行定量的计算。在海水环境中,发动机正常工作所需要的排气压强 p_2 满足

$$p_2 = p_b + \Delta p \quad (9)$$

Δp 为排气阀阀阻压强,取 $\Delta p = 0.50$ MPa,从气缸排出的尾气在内轴腔中的沿程损耗极小,可以忽略。 p_b 为外界海水压强,计算式为

$$p_b = (0.1013 + 0.01H) \cdot 10^6 \quad (10)$$

可以得到 p_2 随着航深 H 的变化规律如图4所示。

假设水下航行体的基准航深为200 m,由图4可得在基准航深下发动机排气压强 $p_2 = 2.50$ MPa。

动力系统的比功率决定了水下航行体的航速。为确保

稳定的航速,应使发动机的功率 P 基本保持不变,所以任何一组进气压强 p_1 和排气压强 p_2 的数值都需要满足式(11)

$$P = \eta_m n_0 n i \eta_\alpha V_c (\alpha p_1 - \beta p_2) \quad (11)$$

式中: η_m 为机械效率,可取 0.9; η_α 为丰满系数,可取为 0.8; α 、 β 为发动机常数,取 $\alpha = 0.8515$ 、 $\beta = 1.0087$;在 200 m 航深下,假设进气压强 $p_1 = 18.40$ MPa,相应的进气温度 $T_1 = 1500$ K,背压 $p_2 = 2.50$ MPa。代入式(11),可求得稳定的发动机功率。再将稳定的功率回代到(11),即可得到 p_1 和 p_2 的确切关系,进而得到不同的 p_2 所对应的 p_1 的值。

联立方程(9)、式(10)、式(11),可以得到气缸内工质消耗量 m_p 随航深 H 的变化规律如图 5 所示。

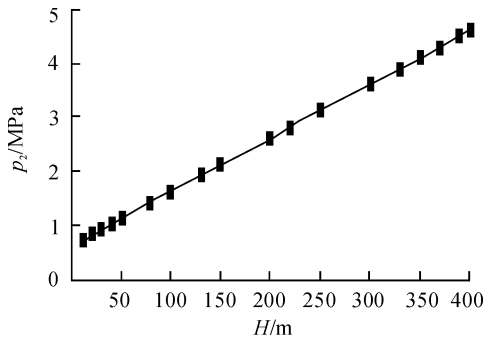


图 4 排气压强随航深的变化

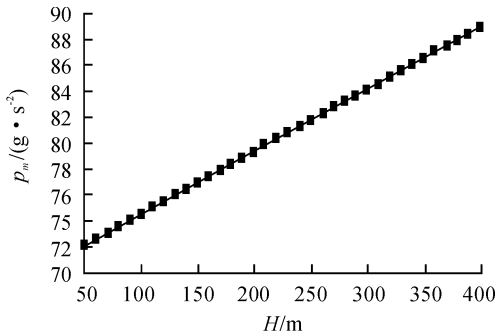


图 5 工质消耗量随航深的变化

在水下航行体携带燃料总量不变的情况下, m_p 的增加必将降低发动机的做功时间,减少了航程。文献[7]中关于有效燃料消耗率的数据也说明了这一点,相关数据如表 1 所示。

表 1 不同排气背压下的有效燃料消耗率

背压值/MPa	0.4	2.1	4.1
有效燃料消耗率/(10^{-7} kg/J)	9.094	9.867	11.059

由表 1 中数据可知,在水下航行体航深增加、发动机排气背压增大的时候,有效燃料消耗率变大,即在放出相同的能量的情况下,在大航深下需要消耗更多的燃料。

综合本节的内容,可知航深增加将使发动机效率下降、燃料消耗量增加,动力系统的开式循环方式直接制约着水下航行体航行性能的提升。

2 改善方法研究

为改善航深对水下航行体动力性能的影响,本文提出半闭式循环动力系统的设计方法。半闭式循环是在开式循环的基础上演变而来的。开式循环动力系统中,工质进入发动机气缸做功后形成的废气直接排向外界的海水环境;而在半闭式循环系统中,在水下航行体后段相应的空间内搭建了冷却结构,废气从发动机出来后进入该冷却结构,以壳体为导热介质被环境海水所冷却,温度的降低将使废气形成部分液态成分,其余气态组分经冷却后体积也大为减小,之后将经冷却后的气液产物用相应的泵排到外界。被冷却后的气液组分相比不经冷却的尾气,更能满足泵的工作条件;并且由于尾气被冷却后密度变大,提高了泵的吸入效率,降低了泵的功率消耗。

在半闭式循环中,发动机的排气背压等于泵的入口压力与尾气在冷却腔中的压力降之和,在水下航行体的航深较大时,该和值要远远小于外界的海水压力;同时,将泵的功率消耗控制在一定范围内,就可以有效减弱航深对动力系统功率和效率的负面影响,可以让动力系统原本用于抵消航深影响的能力直接转化为输出有效功率的能力,从而在相同的航深下增大了水下航行体的航速和航程。

瑞典某型先进的高速远程水下航行体即采用了半闭式循环动力系统。该型水下航行体采用凸轮发动机,以柴油和过氧化氢作为燃料,航深最大到 500 m,具有较为优越的航行性能^[8]。该型水下航行体的动力系统主要由燃料箱、氧化剂/水箱、控制系统、气体发生器、发动机、压缩机、冷凝器等组成。做功后的废气流入冷凝器,形成的液态水被重复利用,二氧化碳气体经压缩机的两级压缩后被排入海水环境中。该系统降低了发动机排气背压,动力性能受航深的影响相比开式循环要小很多。该系统结构和工作原理如图 6 所示。

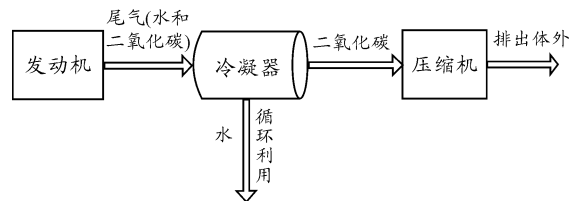


图 6 瑞典某水下航行体的半闭式循环系统

当尾气在不同的排气压强下进入冷却冷凝结构后,产生的压力降也会有所差异,需要针对每种排气压强分别分析和计算尾气的温度降和压力降。可以确定的是,该冷却冷凝机构能够使尾气产生较为明显的温度降和一定的压力降。这样,就为下一步用泵将冷却冷凝后的气液混合组分吸入泵中并排出体外提供了良好的工作条件。冷却冷凝后的气体更适合泵吸入,并且对于提高泵的效率、减小泵对发动机的功率消耗大有裨益。

如果设半闭式循环系统中发动机的排气背压为 p'_2 ,发

动机的输出功率为 P' , 如果使发动机进气压强维持在当前的水平, 机械效率 η_m 和丰满系数 η_α 在加入泵之后应稍作修正, 现在先不予考虑。则 P' 随 p'_2 的变化规律如图 7 所示。

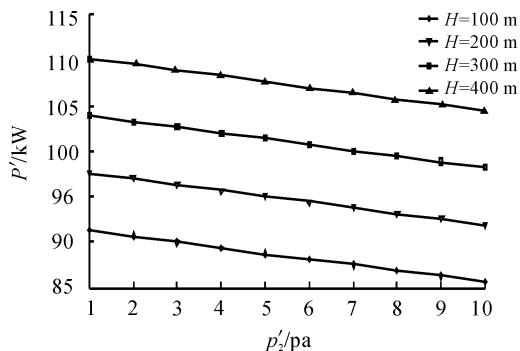


图 7 不同航深下输出功率随排气背压的变化

可知, 保持水下航行体发动机当前的进气压强不变, 在暂时不计泵的功率消耗的情况下, 经过半闭式循环改造的动力系统的输出功率相比现有的输出功率, 是有较为明显的提高的。相比目前的开式循环动力系统的输出功率, 半闭式循环动力系统的输出功率所提高的百分比 φ 如图 8 所示。

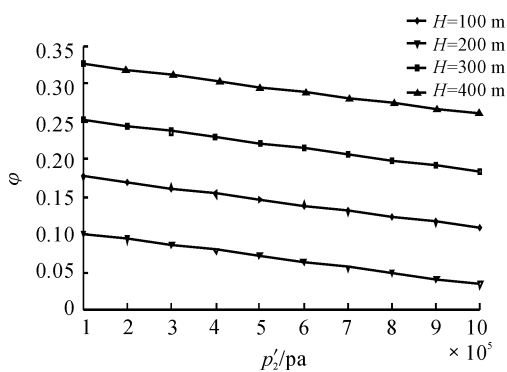


图 8 不同航深下输出功率提高的百分比随排气背压的变化

可见, 越大航深, 半闭式循环动力系统具有的动力优势越是明显。而且, 随着排气背压的增大, 发动机的输出功率是在不断降低的。即使计入泵的消耗功率, 只要使其保持在一定限度内, 发动机的功率依然能够获得一定提高的空间。

所以在今后泵的设计和选型中, 要注意使其入口压力尽可能小, 但是还要保证泵的功率消耗量不能超过排气背压降低给发动机带来的功率提升量, 所以泵的入口压力应该存在一个局部较优值, 该值的正确计算十分重要。

3 结束语

本研究定性和定量研究了航深对水下航行体动力性能的制约, 指出航深越大, 发动机效率越低并且燃料消耗量越大, 并且针对此问题提出可以改善航深带来影响的半闭式循环动力系统; 进行了半闭式循环动力系统的结构设计并在理论上对发动机功率的改善进行了计算。

本研究着力推动开式循环向半闭式循环的过渡, 为进一步完善半闭式循环系统的理论研究和工程应用提供了借鉴, 为改善水下航行体的航行性能开辟了一个前进方向。

参考文献:

- [1] 马春燕. 鱼雷武器[J]. 现代军事, 1995(11): 51-52.
- [2] 查志武, 史小锋, 钱志博. 鱼雷热动力技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] 石秀华, 王晓娟. 水中兵器概论(鱼雷分册)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [4] 马世杰. 鱼雷热动力装置设计原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [5] 王保国, 刘淑艳, 刘艳明, 等. 空气动力学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [6] 赵寅生. 鱼雷涡轮机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [7] 陈宜辉, 王树宗, 昌放辉, 等. 活塞式鱼雷凸轮发动机配气参数优化研究[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(6): 61-62.
- [8] 崔绪生. 国外鱼雷技术进展综述[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(1): 6-11.

(责任编辑 周江川)