

The Conceptual Design and Research on New Air-Water Engine

Xiaolong Zhong, Yun Wang, Jun Xia

Aircraft Engineering College, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi
Email: zxlalsace@hotmail.com, wangyun66@126.com, 331651877@qq.com

Received: May 19th, 2016; accepted: Jun. 5th, 2016; published: Jun. 8th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to realize the air-water engine, a new multi-bypass amphibious engine conceptual design is proposed. The situation of air mode is analyzed briefly based on the establishment of a three dimensional finite element model. The situation of water mode is analyzed and calculated, and determines the metal sodium as the fuel of the reaction of metal and water. The relationships of fuel flow, combustion chamber pressure, thrust, fuel flow rate and specific impulse are obtained. The suitable range of fuel flow rate is preliminarily determined and the effect of propulsion of water mode is affirmed. The simulation of the design parameters of the metal-water reaction engine is conducted with CFD software. The parameter which is the most advantageous to metal-water reaction and the propulsion effect of the metal-water reaction engine is determined. Preliminarily evaluating the design goal of the new air-water engine is achieved.

Keywords

Aero-Engine, Air-Water Amphibious, Conceptual Design

新型水空两用发动机概念设计与研究

钟霄龙, 王云, 夏俊

南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

Email: zxlalsace@hotmail.com, wangyun66@126.com, 331651877@qq.com

收稿日期: 2016年5月19日; 录用日期: 2016年6月5日; 发布日期: 2016年6月8日

摘要

为实现发动机的水空两用,提出了一种新型的多涵道水空两用发动机概念设计。在建立了初步的三维有限元模型的基础上,重点对水中模式的工作情况进行了分析计算,初选金属钠作为水反应燃料,得到了燃料流量、燃烧室压强、推力的变化关系及燃料流量和比冲的变化关系,初步确定了燃料流量的适宜范围,肯定了水中工作条件下的推进效果。使用CFD软件对金属水反应冲压发动机的参数设计进行了模拟分析,确定了最有利于金属水反应和水冲压发动机推进效果的参数选择。初步评定新型水空两用发动机达到了设计目的。

关键词

航空发动机,水空两用,概念设计

1. 引言

随着科技和时代的发展,飞行器呈现出越来越多样化的发展势头,多栖飞行器即是这种环境下的产物;同时在另一方面,面对未来战争的需求,只能在天空中飞行的飞机有一定局限性,如果有既能在空中飞行,又能潜入水下航行的水空两用飞机,将会获得特别的作战效能甚至带来新的作战方式的转变,对未来战争的发展具有重要的意义[1]。

目前世界上对水空两用飞行器的研究的主要目的是为了研制出一种配合潜艇作战的快速武器而进行的,称之为潜射无人机。虽然潜射无人机目前只是处于初期的研制、论证和试验阶段,并没有成熟的运用于战场发挥其作用,但它的发展情况和前景很受各国相关部门关注。美国先后研制了海上搜索者、鸿鹅、海上哨兵三型潜射无人机[2][3]。

要实现飞行器的水空两栖作战就必然需要有一个能够水空两用的动力装置。目前世界上潜射无人机的动力装置多采用燃料电池动力系统,在空中依靠电力驱动飞行,其缺点是无法实现长时间的空中巡航,且无法完成潜艇式的水中行进,极大地限制了水空两用飞行器的应用。本概念设计即是针对水空两用飞行器的新概念动力装置设计。该设计借鉴了传统涡轮风扇发动机,同时有机融合了金属-水反应冲压发动机,总体设想是在空中工作时使用涡扇发动机实现喷气推进以提升空中巡航能力,在水下工作时使用金属-水反应发动机实现水冲压喷射推进,使得飞行器在水中也能像潜艇一样航行。

2. 新型水空两用发动机概念设计及总体方案

2.1. 新型发动机总体方案设计

新型水空两用发动机为实现在空中和水下两种不同工况条件下的持续工作,其设计参考了中小型涡轮风扇发动机及外骨架结构形式[4][5],取消了中心转轴,同时舍弃了压气机、涡轮的静子叶片,代之以内、外转子层,使得压气机和涡轮均实现对转。位于内转子层内部的中央涵道,作为水中工作时的介质通道,同时为安置金属水反应冲压发动机提供了结构上的基础。具体的结构实现形式如下:

发动机前部支撑架固定安置在发动机罩内,发动机罩与发动机尾部支撑架固定安置在飞行器的发动机安装架上。外转子层通过前止推轴承、后止推轴承及圆周轴承安装在支撑架上,可绕轴心转动。内转子层通过前止推轴承、后止推轴承及圆周轴承安装在支撑架上,可绕轴心转动。为保证强度和刚度,可在发动机罩及内、外转子层上布置加强筋。压气机叶片与涡轮叶片固定装于榫槽上,榫槽分布于外转子层内侧及内转子层外侧。风扇叶片固定装于外转子层外侧的榫槽上。环形燃烧室固定安装在内转子层上,可随内转子层一起转动。如图1所示。

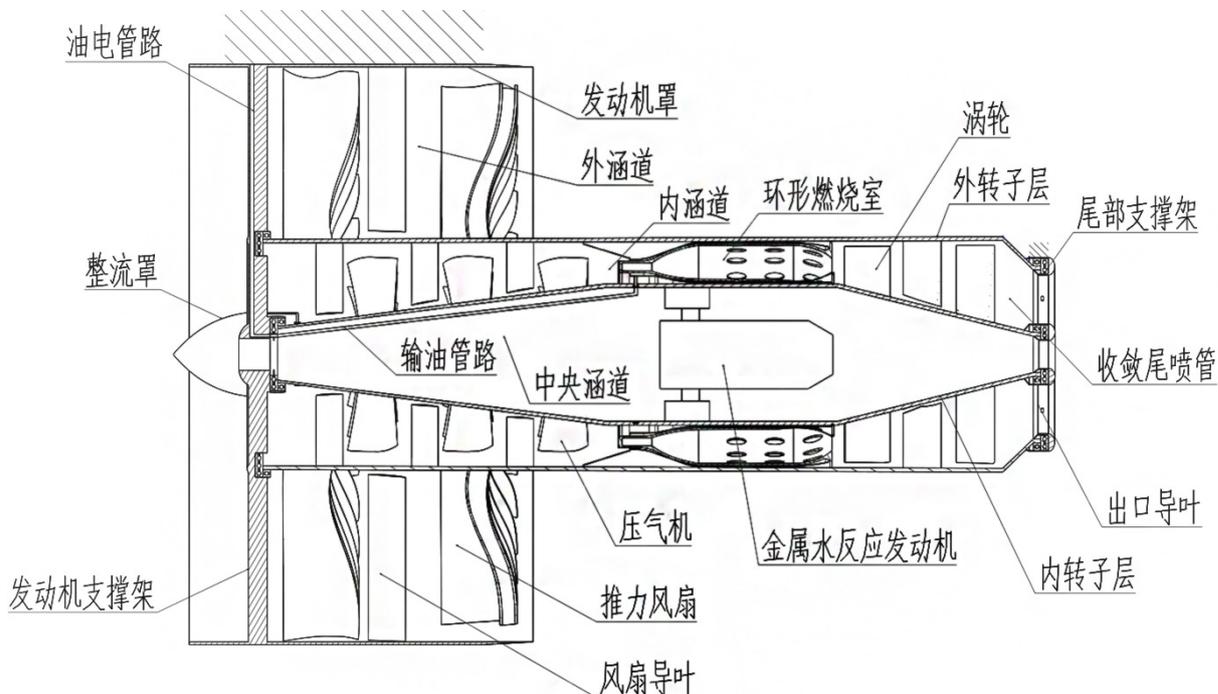


Figure 1. The conceptual design of new air-water engine

图 1. 新型水空两用发动机总体概念设计示意图

新型水空两用发动机的工作原理简介如下：

空中工作状态下，外转子层和内转子层对转，水冲压发动机不工作。气流一部分进入外涵道经由风扇离开发动机，一部分进入内涵道，经由压气机压缩做功后，通过收敛通道结构进入环形燃烧室进行燃烧，高温高压燃气从燃烧室喷出后推动涡轮做功，从而驱动内转子层和外转子层转动。燃气经过涡轮后通过收敛尾喷管再经由出口导叶离开发动机。以此实现发动机在空中的持续工作。

在将要进入水中工作状态时，发动机在水面位置吸入少量水，经由压气机形成水雾对环形燃烧室及其他高温部件逐渐进行冷却，同时发动机转速下降，待发动机整体冷却至合适温度后，发动机停转并整体进入水中。

水中工作状态下，发动机前部整流罩开启，金属水反应冲压发动机进入工作状态，水沿中央涵道经由水流主入口进入金属水反应燃烧室；金属燃料腔处的水流辅入口打开，少量水流经此入口进入金属燃料腔进行初步金属水反应，反应生成的热量用来加热固态形式储存的水反应金属，使其成为液态方便反应的进一步进行，反应生成物及熔化的金属燃料一起进入金属水反应燃烧室，与水进一步充分混合发生剧烈反应，产生大量氢气和能量，反应生成物沿中央涵道喷出，实现持续喷水推进。通过调节水流辅入口阀门大小，可以方便得控制金属燃料的加入速率，从而控制金属水反应的进行程度，达到调节金属水反应发动机推力的目的。

2.2. 新型水空两用发动机总体结构设计

新型水空两用发动机总体结构形式以传统涡轮风扇发动机为基础，有机融合了多项新技术，对多个部件进行了取舍、增添，其总体结构布局如图 2。

建立三维模型有助于对新概念发动机进行各项参数(如重量、转速、噪声、压比等)的估算与模拟。新型发动机材料采用航空用钛合金，材料平均密度 4470 kg/m^3 ，发动机本体结构估算质量为 496.4 kg (1094.5 lb)，附件估算总重为 165.5 kg (364.8 lb)，发动机总体估算质量约为 660 kg (1459.3 lb)与同类型发动机相比在结构重量方面减少了 $35\% \sim 50\%$ ，大幅度提高了结构效率。压气机部分采用了经典的 NACA stage35

叶型，共有 6 级叶片。新型发动机部分组件的结构设计如表 1 所示。

2.3. 新型水空两用发动机部分关键结构设计

2.3.1. 轴承支承设计

新型水空两用发动机的主要转动部件是内、外转子层，二者均由支撑架上的轴承来支撑。其中，前、后止推轴承均使用多排径向球轴承，多排球轴承被证明在高速运转的环境下，仍能保持优秀的使用性能与稳定性，使用维护成本更低。前后圆周轴承均使用双层圆周滚动轴承，在高速转动条件下，双层滚动轴承将绝对转速以合适的转速分配比分配至内、外滚动体，进一步减小了高速旋转对轴承的负荷，降低材料及制造工艺要求。内、外转子层的支撑结构形式如图 3 所示。

2.3.2. 油电路路设计

油电路路从机身经由发动机罩埋设在前部支撑架内。当管路接近内转子层安装位置时，首先分出输电管路，通过固定安装在内转子层外侧的一圈导电滑环与沿轴向埋设在内转子层的数条电路联通，并最终进入环形主燃烧室点火装置和水冲压发动机。对于燃油通道，绕过轴承并与架设在中央涵道的输油管

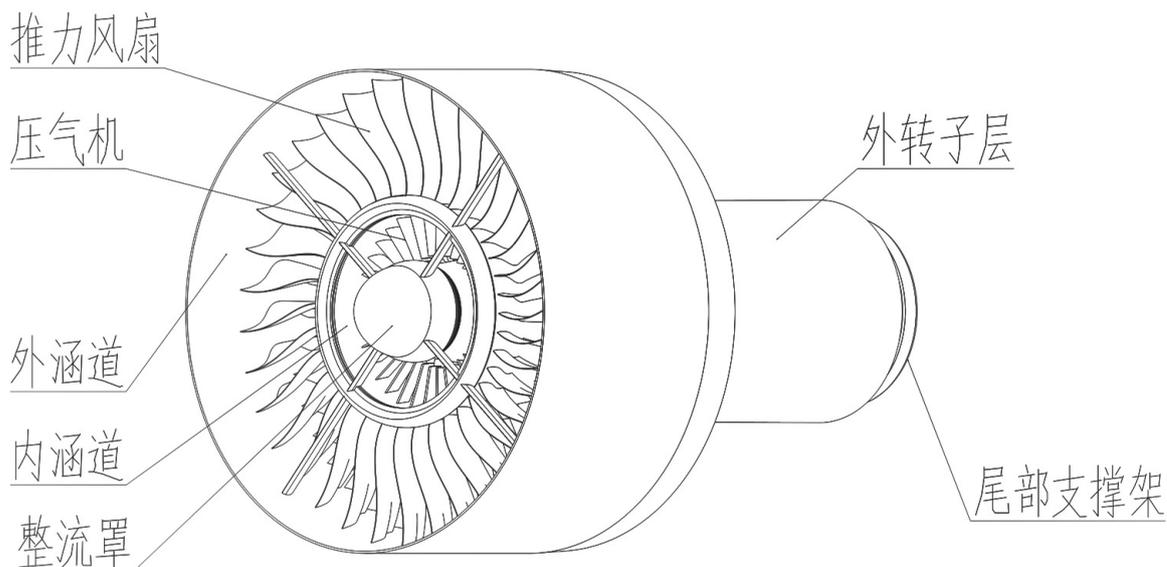


Figure 2. The cutaway view of architectural design of new air-water engine

图 2. 新型水空两用发动机总体结构设计剖视图

Table 1. The architectural design of some components

表 1. 部分组件结构设计

部件	尺寸, mm	叶片			厚度, mm	重量, kg
		类型	级数	每级数目		
内转子层	长: 800.4	压气机叶片	3	36	5	83.6
		涡轮叶片	2	36		
外转子层	长: 815.9	压气机叶片	3	45	5	182.3
	半径: 152.2	涡轮叶片	1	36		
发动机罩	长: 308.276				4	14.8
	半径: 336.7					

路联通，燃油经由输油管路进入内转子层，最终进入环形燃烧室，输油管路末端接头结构与内转子层之间缝隙布置刷式密封防止燃油泄漏。内转子层中的输油管路沿周向布置 8 条。如图 4、图 5 所示。

2.3.3. 金属水反应冲压发动机设计

初步设计金属水反应冲压发动机总体结构为圆筒型，前部为水流主入口，筒壁四周沿周向均布四个金属燃料入口，四个金属燃料入口的另一端与环形金属燃料腔联通，环形金属燃料腔的前部沿周向布置四个大小可调的水流辅入口。圆筒内部为金属水反应燃烧室，水金属燃料与水发生的剧烈化学反应主要在此处进行。后部为收敛喷管，金属水反应生成物经由收敛喷管喷出，产生持续动力。金属水反应冲压发动机总体结构示意图如图 6 所示。

3. 新型水空两用发动机水中工况性能分析

3.1. 水反应金属燃料的选择

水反应金属燃料的主体即为水反应金属，同时也含有少量氧化剂粘合剂和添加剂等成分，混合后形

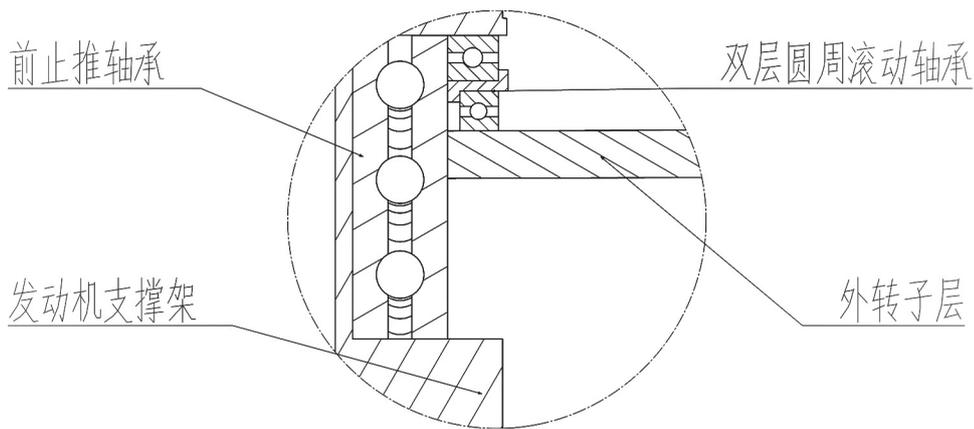


Figure 3. The front supporting structure of outer rotor
图 3. 外转子层前部支撑结构

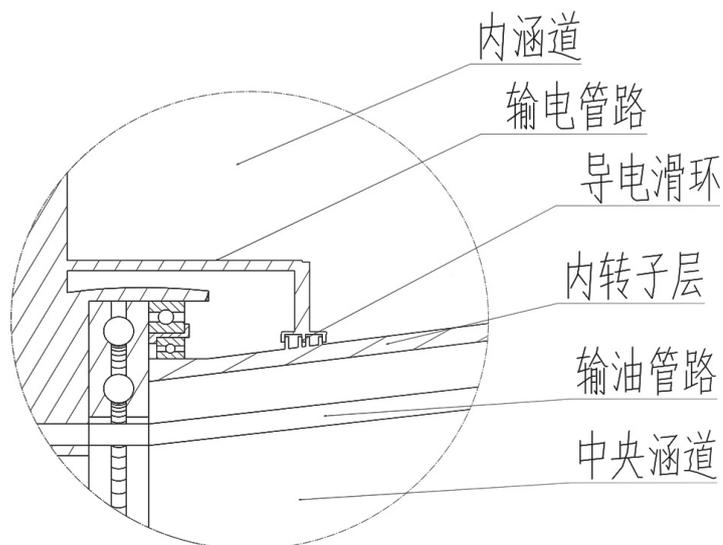


Figure 4. The design of slip ring and oil tube
图 4. 导电滑环及输油管路设计

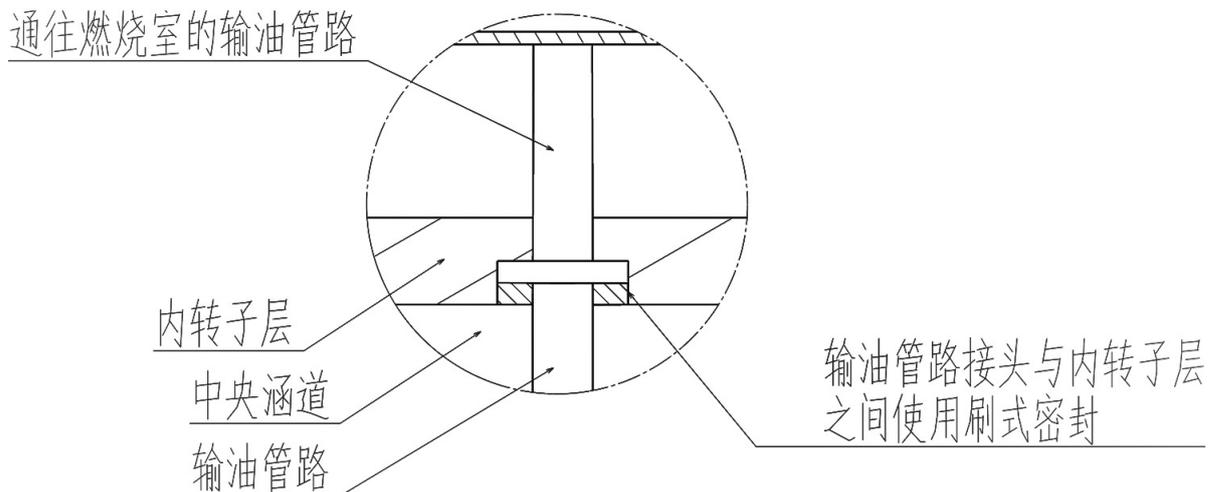


Figure 5. The joint structure at the end of oil tube

图 5. 输油管路末端接头结构

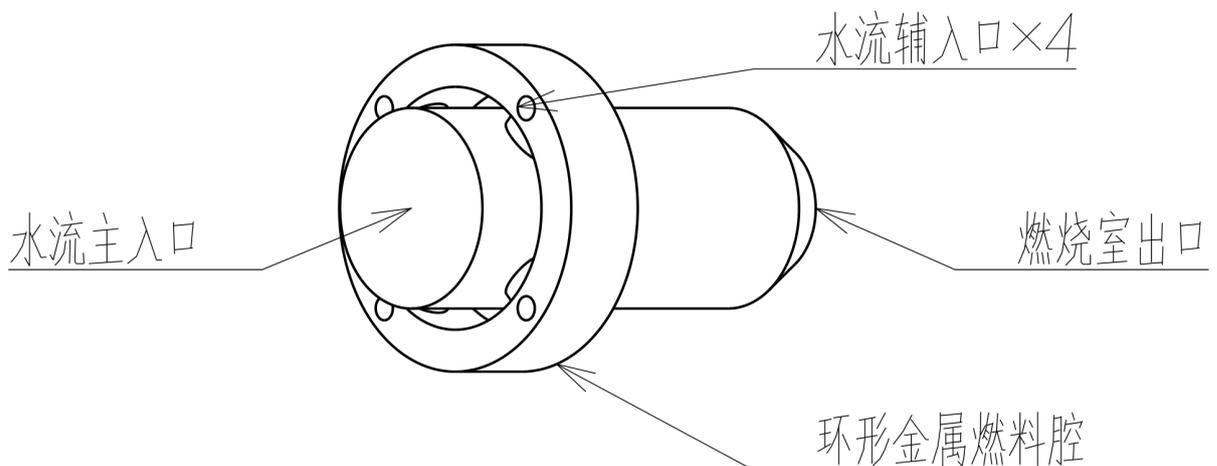


Figure 6. The sketch diagram of metal/water reaction ramjet

图 6. 金属水反应冲压发动机结构示意图

成的固体贫氧燃料即为金属水反应冲压发动机的主燃料。衡量水反应金属燃料效能的标准主要有体积能量密度与质量能量密度，二者值越高，则燃料的效能越高，表 2 是一些常见的还原性强的水反应金属单质的体积能量密度和质量能量密度。

由表 2，综合考虑金属燃料的能量密度、毒性、与水反应难易程度及可控程度、储存条件等因素，选取金属钠作为本设计中金属-水反应燃烧室的金属燃料。

3.2. 金属水反应冲压发动机的理论分析与计算

衡量金属水反应冲压发动机性能和工作质量的基本参数包括推力、喷口流速以及比冲[6]等，接下来对水室压强、推力和比冲等主要性能参数进行初步的理论分析和计算，以期能对其进行大致的性能评定。

设由燃烧室喷嘴喷出水反应金属燃料钠的速率为 x kg/s，在简化问题的原则下，忽略温度变化对该反应的影响，设 PV 保持恒定值。由反应方程式可知：在标准情况下，若燃烧室内压强为 p 时，则单位时间内产生气体的体积为 $0.49 x/p$ m^3 。同时由分析可知，流量 q 必定和燃烧室内单位时间产生的气体体积相同，则流量 $q_1 = 0.49 x/p$ m^3 。设发动机位于水下 30 米，那么喷口处的压强约为 4×10^5 Pa [7]。

Table 2. The volume and gravity energy density of metal/water reaction fuel
表 2. 金属与水反应燃料的体积能量密度与重量能量密度

金属种类	密度(g·cm ⁻³)	体积能量密度(kJ·cm ⁻³)	重量能量密度(kJ·g)
Be	1.85	68.93	37.26
Al	2.70	45.77	16.95
Mg	1.74	25.27	14.52
Ca	1.54	15.79	10.25
Na	0.97	5.89	6.07
K	0.86	3.09	3.59

由伯努利方程 $p + \rho gh + pv^2 = C$ 可知：当喷口处压强与外界压强平衡时，有：

$$p + \rho gh + pv^2 = 0 \quad (1)$$

则有喷口流速

$$v = \left[\sqrt{\frac{2(p-4) \times 10^5}{\rho}} \right] \quad (2)$$

设喷口面积为 A ，则流量

$$q_2 = \left[\sqrt{\frac{2(p-4) \times 10^5}{\rho}} \right] \times A \quad (3)$$

由 $q_1 = q_2$ 有

$$\frac{0.49x}{\rho} = \left[\sqrt{\frac{2(p-4) \times 10^5}{\rho}} \right] \times A \quad (4)$$

在结构设计上，金属水反应燃烧室的出口总面积给定为 $A = 200 \text{ mm}^2$ 。

由(4)式可知，如果能够调控水反应金属燃料钠的流量，即可直接对燃烧室内的压强 p 进行调节，进而控制推力 F 与比冲 I 等性能指标，从而控制整个水中运行体。

3.2.1. 推力 F

金属水反应冲压发动机产生有效推力的关键就是水金属燃料与水发生燃烧反应，产生大量气体压缩工质水加速喷出，故水金属燃料的加入速率会对推力产生显而易见的影响。由(2)和(4)可导出推力 F 的计算公式：

$$F = \frac{5.0 \times 10^4 \times x^2}{p-4} \quad (5)$$

由公式(5)可得推力 F 随燃料流量 x 的变化曲线如图 7。

图 7 非常清楚的显示出了燃料流量 x 与推力 F 的变化关系。由图中关系可知，由于喷口面积 A 保持不变，推力 F 随着燃料流量 x 的增加而递增，二者的关系曲线呈单调递增状。由(4)、(5)二式可知，压强 p 随燃料流量 x 的变化关系决定了推力 F 随燃料流量 x 的变化。压强 p 随燃料流量 x 的变化关系也可从图 8 中清楚的看出。随着燃料流量 x 的增加，压强 p 呈现出单调递增的态势，但变化趋势随着流量 x 的增大而趋向平缓。

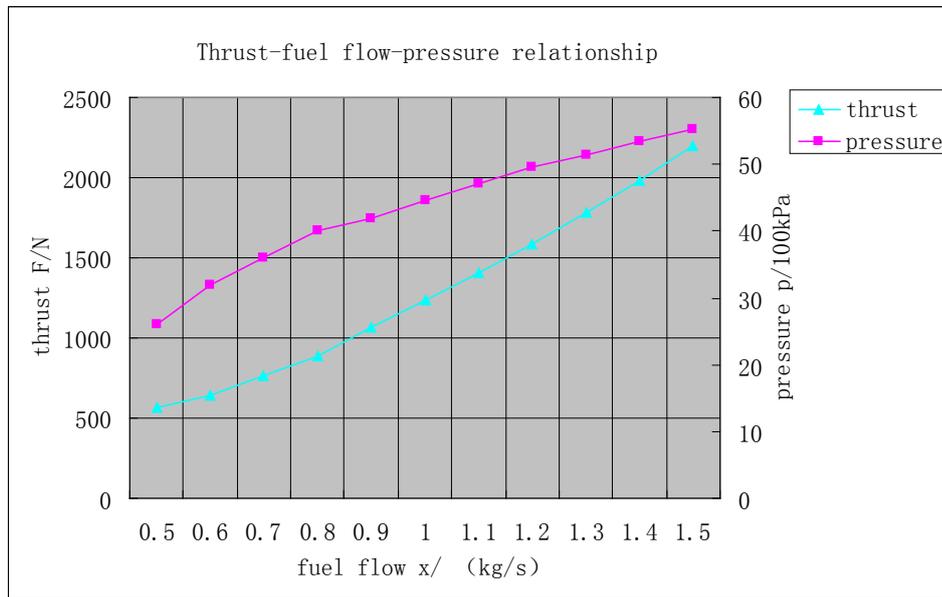


Figure 7. The relationship of thrust, fuel flow and pressure

图 7. 推力 F -燃料流量 x -压强 p 关系曲线

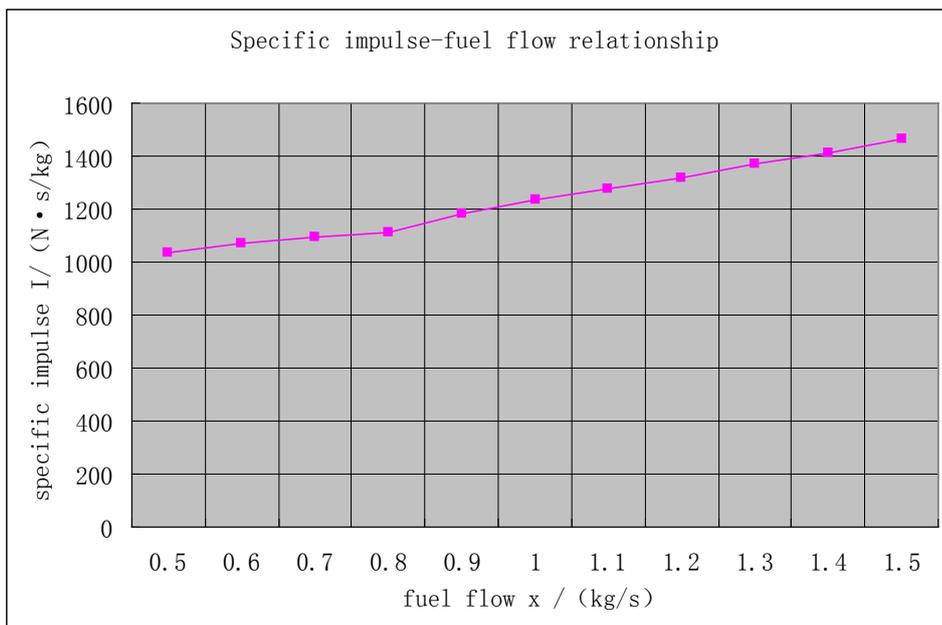


Figure 8. The relationship of specific impulse and fuel flow

图 8. 比冲 I 与燃料流量 x 关系

于是可知，通过控制燃料流量 x 可以显而易见的控制压强 p ，从而实现控制总推力 F 的目的。从图中可以看出，当燃料流量 x 在 0.5~1.5 kg/s 的范围内变化时，压强 p 的理论变化范围从 2600 kPa 到 5520 kPa，此时推力 F 的理论变化范围从 568 N 到 2197 N。经过分析可以得出，控制燃料流量 x 在此范围内时，可以得到较满意的推进效果。

3.2.2. 比冲 I

比冲的定义是单位质量流量推进剂产生的推力，因此又称为比推力。比冲可用于衡量推进燃料本身

能量密度的高低, 另一方面发动机工作过程中的完善程度也对比冲有一定影响。比冲的定义式为:

$$I = \frac{F}{x} \quad (6)$$

于是由(5)、(6)式可知:

$$I = \frac{5.0 \times 10^4 \times x}{p-4} \quad (7)$$

当燃烧室喷口总面积 A 确定的情况下, 钠水反应发动机比冲 I 随燃料流量 x 的变化关系曲线如图 8 所示。

由图 8 可看出, 在燃料流量 x 从 0.5 kg/s 变化到 1.5 kg/s 过程中, 随着燃料流量的增加, 比冲 I 是单调递增的, 且变化范围从 1036 N·s/kg 到 1464 N·s/kg, 变化曲线比较平缓。

通过以上对钠水反应发动机推力 F 和比冲 I 的分析可知, 当多涵道水空两用发动机处于水中工作状态时, 比冲可达到 1000 N·s/kg, 从理论上来说能够提供可接受的推进效果。如何通过更加合理地控制燃料流量来调节发动机的推力, 是今后研究工作的方向。

4. 结论

1) 本文首先对多涵道水空两用发动机进行了总体结构设计, 提出了一种可以适应空中和水中两种不同工况条件下工作的新型结构形式, 并进行了初步的三维建模, 为后续的模拟仿真工作奠定了基础。

2) 对新型发动机在空中工作状态下的情况进行了初步的分析。该发动机理论上能够在满足性能要求的前提下大幅减轻结构重量, 提高结构效率和发动机推重比, 减少燃油消耗率。但定量的模拟仿真计算工作尚未开展, 是以后进一步工作的重点。

3) 对新型发动机在水中工作状态下的工作情况进行了分析。在水中工作时, 发动机依靠钠水反应燃烧室作为推进动力来源。在初步给定钠水反应燃烧室出口面积的前提下, 对钠水反应发动机产生的推力 F 及比冲 I 进行了计算分析, 得到了燃料流量、燃烧室压强、推力的变化关系及燃料流量和比冲的变化关系, 初步确定了燃料流量的适宜范围, 肯定了水中工作条件下的推进效果。但更多对金属水反应冲压发动机水中工作情况的仿真模拟将留待下一步的工作完成。

基金项目

本课题由国家自然科学基金资助, 基金号: No. 51266012。

参考文献 (References)

- [1] 朱莎. 水空两用无人机动系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [2] 杨羽. 可变形式混合动力海空飞行器[EB/OL]. <http://hyhxqds.csname.org.cn/zpzs/zxsbszps/269386.htm>
- [3] 陈建峰, 杨龙. 美国 DARPA 提出的“潜水飞机”概念[EB/OL]. <http://wuxizazhi.cnki.net/Search/XDJC200903014.html>
- [4] Chamis, C.C. and Blankson, I.M. Exo-Skeletal Engine—Novel Engine Concept. NASA/TM-2004-212621.
- [5] Chamis, C.C., Kuguoglu, L. and Abumeri, G. Structural Evaluation of Exo-Skeletal Engine Fan Blades. NASA/TM-2003-212711.
- [6] 李宜敏, 张中钦, 等. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 112-330.
- [7] 王云, 焦志斌, 吕浩福. 钠水反应喷水发动机研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(7): 37-40.