

动力气垫地效翼船的设计特点及其发展前景

恽良, 邬成杰, 谢佑农, 彭桂华

(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

[摘要] 文章简要地阐述了动力气垫地效翼船(又名两栖地效翼船)的设计特点及其在中国的发展过程。同时也指出其在军、民方面可能的发展前景,即设想发展一种同时具有两栖性、高速性、耐波性,既可在地效区内高速稳定航行,也可飞出地效区作空中跳跃、机动,还可作软着陆的两栖地效飞行器(Amphibious WIG Plane),与俄罗斯最近发展的地效飞行器(Экранолёт)极为相似。

[关键词] 动力气垫; 两栖; 地效翼船; 特点; 前景

1 前言^[1,2]

1.1 人类对水上高速运载工具的追求

人类总是不断寻求高速运载工具,以缩短旅途时间和扩大生存空间。半个世纪以来,飞机速度提高了十几倍,汽车速度提高了5倍以上,而船舶航速仅提高了1倍多,总在30~40 kn徘徊。20世纪50年代以来,人们研制成功了水翼艇、气垫船、高速双体船等一系列高速水面艇,但由于种种原因,其民用营运航速依然很难超过60 kn,尤其是在风浪中维持高航速更难。总之,就船舶而言,人类自50年代以来虽经种种努力,要同时获得超高航速($v > 80$ kn)与优良的耐波性,依然是个问题。

1.2 地效翼船的问世

飞机着陆时,由于地面效应,飞机将产生额外的升力。这种地面效应将产生如下空气动力现象:

1) 贴近地面飞行时,由于翼面气流的堵塞,使翼面压力大增,从而增加机翼的升力;

2) 正常飞行时,由于翼端涡的存在将产生下洗速度;在贴近地面或水面时,下洗速度大大减小,从而减小了由于翼端诱导速度而产生的诱导阻力。

由此可见,飞机贴近地面航行时(即成为地效飞机),将产生较大的航行升阻比 L/D ,从而获得超高航速及离水航行后的优良耐波性。

1.3 两种地效翼船的出现

目前世界各国研制的各种地效翼船(Wing-in-Ground Effect Craft, WIG)大致可归纳为两种,即动力增升地效翼船(PARWIG)与动力气垫船(DACC)。

1.3.1 动力增升地效翼船 初期地效翼船的起飞类似于水上飞机,完全借助于船体及其侧浮体在加速时产生的动水压力和机翼升力,因此起飞时间长,距离大,船体及其侧浮体在起飞前遭受很大的水动力冲击压力,起飞阻力峰大,在风浪中起飞尤其困难,但一旦起飞成功,则可获得很高航速与起飞高度,如前苏联550 t质量、300 kn航速的“里海怪物”。前苏联专家们在机翼前端加一前置导管螺旋桨或涡轮风扇或涡轮喷气发动机,将高压气流吹入机翼下面成为动力增升型地效翼船,使机翼在不高的速度下能产生较大的升力,从而大大降低起飞航速、减小阻力,改善波浪中的抨击能力、越峰能力以及船体强度、耐波性等。前苏联的“雏鹰”型艇即为一例。但俄罗斯在建造了第一条“里海怪物”后30多年来发展步履艰难,尤其在民用方面,

始终未形成商品化,其技术方面的原因,可归纳为以下6点^[2]:

1) 结构特性 展弦比很大,机翼突出于船身之外,增加了碰撞危险;

2) 机动性 排水航行航速为15~20 kn,与水上飞机一样使机动性受到限制;在航速400 km/h、飞高3~5 m时不能猛烈改变航向、航速;

3) 导航手段与方法 地效翼船控制运动的观察特性与水翼艇及气垫船不同,现有的避碰规范等已不适用;

4) 航行安全保证 地效翼船的高速航行特性增加了碰撞的危险性。与传统方法不同,它没有足够的时间和适当的方法来规避,因此地效翼船在港口河网地带高速飞行很难保证航行安全;

5) 耐波性 波浪中起飞艰难,增加了营运的困难;

6) 由于不具备两栖性,故岸上须备有多项复杂设备,如下水滑道、停机平台、拖曳装置等;若在沿海潮汐地带运行,以上设备更为复杂。

1.3.2 动力气垫船 俄罗斯地效翼船之父阿历克谢耶夫在其晚年时终于觉悟到发展动力增升地效翼船的困难,从而着手于更符合民用的动力气垫船的开发。此型船采用较小的机翼展弦比,在使用前置导管桨时,机翼与浮舟和襟翼一起形成很好的气垫系统,它不仅有很好的起飞性能和较小的越峰阻力,而且具有一定的两栖性与可登陆性。但由于展弦比较小,因此高速飞行时升阻比较动力增升式略有下降。俄罗斯的伏尔加-2即为典型的一例。此外由于气动布局的特点,此型艇高速时飞高很小,即贴近水面航行,且只能在极强的地效区航行,因此俄称其为动力气垫船。

1.4 动力气垫地效翼船(DACWIG)

中国船舶及海洋工程设计研究院(以下简称MARIC)吸纳动力增升地效翼船和动力气垫船的优点,发展了一种动力气垫地效翼船,此船采用了前置导管桨和气垫系统,它具有强气垫功能,使艇经常处于离水飞行,还具有一定的飞高能力($\bar{h} = h/c \approx 0.1 \sim 0.15$, h 为飞高, c 为机翼弦长)。这种船具有以下特点:

1) 高航速和运载能力 由于在地效区航行,其航速比水翼船和气垫船提高1倍,达到70~120 kn;

2) 经济性好 由于是在强地效区内离水飞行,

因而具有较高的升阻比和运输效率,在与气垫船、水翼艇升阻比相同的情况下,相对航速,即傅氏数高2~3倍;

3) 多航态航行能力和低速机动性 具备排水、气垫、离水飞行能力,因而具有大的航行灵活性;

4) 两栖性、可登陆性和飞行生态性 不需要机场跑道,毋需码头,如同全垫升气垫船那样可在沙滩、草地等支承压力较小的场地机动,且航行兴波小,不会伤及临近小船与堤岸;

5) 在强地效区航行,自稳性强,不需要复杂的自控设备和精密的飞行航态测量设备;

6) 由于自稳性强,因此驾驶方法接近于全垫升气垫船,并且安全可靠;

7) 耐波性 由于有一定飞高和强气垫作用,因此峰阻小,在风浪中易于起飞,且失速较小;

8) 超低空飞行时隐蔽性好,有利于军事目的;

9) 可按船用标准建造与维护,因此造价与维护费用较低。

2 “750”两栖地效翼船的问世^[3,1]

MARIC于20世纪80年代初瞄准两栖地效翼船,进行了约30个风洞模型研究试验,以探索主翼翼型、气道形式、前置导管与主翼的相对位置关系和与基线之间的夹角、前置导管的高度配置以及整个艇的气动布局与高平尾翼的配置等。在此基础上开始建造可载1~2人的“750”自航试验艇(见图1)。



图1 “750”动力气垫地效翼试验艇

Fig.1 “750” DACWIG test craft

“750”艇基本参数:最大起飞质量745 kg;有效载荷172 kg;总长8.47 m;翼展4.8 m;总高2.43 m。

“750”艇起飞性能:可在4~5级风、0.5 m

波高(湖中波)下起飞,起飞时间约30 s,起飞距离160 m,起飞航速约45 km/h;最大航速132 km/h;最大飞高0.5 m;续航力130 km;紧急迫降时艇体遭受的最大冲击载荷约为1.54 g (g 为重力加速度, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$)。

“750”艇在淀山湖进行了数年的试验,试验是成功的,尤其是耐波性,如此小的艇能在较大的逆风浪中起飞,表明动力气垫作用的重要。但是要发展成为实用艇尚存在一些问题,如:

- 1) 静升推比 η_{LS} ($\eta_{LS} = W/T_{SO}$, W 为船的质量, T_{SO} 为前置导管桨额定静推力)尚嫌不足,将影响艇的可登陆性与两栖性;
- 2) 高速飞行时升阻比不高;
- 3) 由于气动布局的需要,船的结构面积很大,增加了质量等;
- 4) 保证纵向稳定性、配平和重心变化的操纵机构尚不够完善,等等。

为此必须研究更加完善的第二代动力气垫地效翼船的气动布局、总体布置、结构形式、材料与操纵机构,以迈入实用阶段。

3 “751”动力气垫地效翼船的研制

1995年中船总公司下达20座“751”(即“天鹅”号)掠海地效翼船的研制任务,该船由MARIC设计,求新造船厂建造(见图2及本期封面)。

“751”船的基本参数与技术性能:

- 1) 总长×总宽×总高 19.04 m×13.4 m×5.2 m;
- 2) 总质量 $\approx 8 \text{ t}$;
- 3) 静水最大飞行航速 $>130 \text{ km/h}$;
- 4) 适航性 能在2~3级海情下短距起飞和持续稳定飞行,能在3级海情下安全航行;
- 5) 两栖性 能从陆上垫升下水,从水中垫升登陆;
- 6) 操纵性 能低速原地回转,高速作“之”字形机动航行,并在各种航态(如低速排水、中速垫态、高速)下稳定航行;作为试验性客船可在河网地带与河口等地作中低速航行;
- 7) 载客量 15~20人;
- 8) 船体材料 主要承力构件采用LY12硬铝合金,其他如浮舟、主翼、高平尾翼、垂直安定面、组合翼等采用Ciba复合夹芯材料;
- 9) 动力装置 采用3台活塞式航空发动机,

其中2台HS6E-1发动机驱动2台可调螺距的4叶前置导管螺旋桨(每台功率为257 kW),另一台HS6A发动机驱动二叶可调螺距螺旋桨(210 kW)。

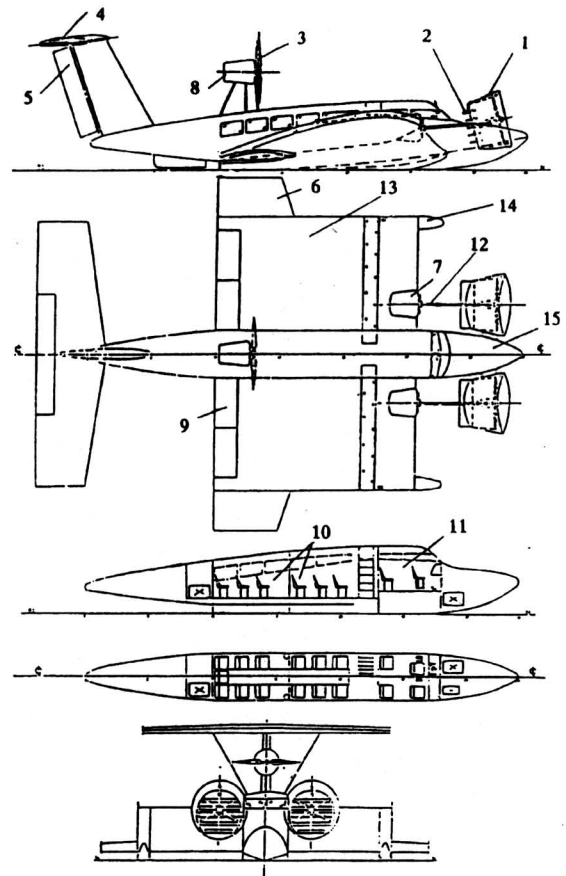


图2 “天鹅”号动力气垫地效翼船总布置图
Fig.2 General arrangement of “SWAN”
dynamic air cushion WIG craft

1-前置导管螺旋桨;2-导流片;3-推进空气螺旋桨;4-高平尾翼;5-方向舵;6-组合翼;7-垫升主机;8-推进主机;9-襟翼;10-前后客舱;11-驾驶舱;12-前机传动轴系;13-主翼;14-浮舟(侧壁);15-主船体。

MARIC从1995年开始进行模型风洞与静垫升试验。为了节省经费,采取了较大的缩尺比($\lambda = 11.5 \sim 13$),并且在风洞中进行数十次半船模吹风试验,在此成功的基础上进行全船模的风洞吹风试验、自由飞试验以及固体壁面上的静垫升试验。在风洞试验中证实具有令人满意的升推比、升阻比、配平与稳定性等空气动力参数后,进行了自航模自由放飞与水池拖曳试验,这是在实际的水面环境下的定性与定量试验。最后进行施工设计与建造。

为了改善性能,在“750”艇的基础上采取了如下主要措施对“751”艇进行设计与建造:

- 1) 增大主翼翼展,从而获得较大的静气垫面积与静垫升力;
- 2) 修改主船体及侧浮体线型以改善静垫升力及水上起飞性能;
- 3) 修改主翼翼型以改善静、动气动性能;
- 4) 采用组合翼以改善气动性能,并为今后两栖地效飞行器的设计作准备;
- 5) 采用前置导管桨后导流片与襟翼以改善气动配平与纵向稳定性;
- 6) 修改尾翼结构与布置以改善纵向稳定性;
- 7) 采用 Ciba 复合材料以减轻质量、简化工艺、适应水上航行要求。

MARIC 于 1995 年底开始“天鹅”号设计,1996 年设计完毕,求新厂 1996 年 8 月开始建造,1997 年 6 月完工。经过一年多的试验,艇在静垫升、下水、上陆、水上机动、起飞、越峰、快速性、各种航态气动中心配平及纵横向稳定性等方面均满足任务书要求,最高航速也达到设计指标,并有较大潜力。此外该艇具有较好的超载能力,在 8.1~8.4 t 总质量状态下能在地面上静垫升、下水与水上离水飞行(见本期封面)。

由于淀山湖场地太小,“天鹅”号的试验是很不充分的,如耐波性、高速机动性、陆上机动与越障性、水上续航力等均有待补充试验,同时在研制过程中也发现如下问题:

- 1) 所采用的动力装置很难适应长轴系运行,因此主机附件尚有故障;
- 2) 由于设计和建造的方法与规范基本取自高速船,又是首制试验艇,因此艇超重很多,装载系数下降较大。

4 发展前景

4.1 民用发展前景

“天鹅”号的研制成功,初步说明它可以同时具有高速性、两栖性和耐波性,而且能作排水航行、气垫航行和在强地效区内高速飞行;不仅可在敞水面上高速飞行,而且可以在江、河、湖、海以及浅水、沼泽地带航行,因此可用于交通、旅游、救生、缉私等。

不久的将来, MARIC 准备开发一种更为实用的 110 座、巡航速度 240 km/h、续航力为 500

n mile、总质量达 35~40 t 的动力气垫地效翼船,见图 3。该船可用于台湾海峡、渤海湾、黄河、香港地区、长江三角洲和珠江三角洲。

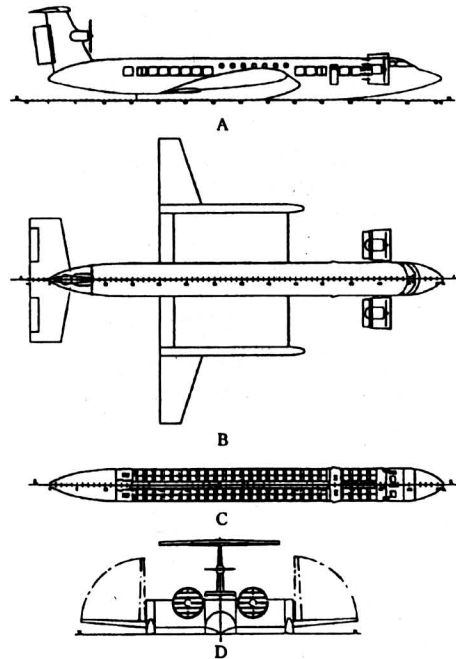


图 3 110 座动力气垫地效翼船方案图

Fig.3 Sketch of 110 passengers dynamic air cushion WIG craft

A-侧视图; B-顶视图; C-座舱平面图; D-前视图

4.2 军用前景

由于动力气垫地效翼船具有上述特点,且可采用折叠翼方式(如图 3),故可进入山洞隐蔽,还可在登陆母舰、两栖攻击舰和航空母舰上作为舰载超高速登陆艇、导弹攻击艇、机动与攻势布雷艇、巡逻艇、缉私艇等。作为军用艇它还具有在短时间内飞出地效区的能力,使艇能在高速时作短时间腾高、跳跃、越障、急速机动,同时又能在陆上或水上作软着陆,扩大其作战能力。

由于艇的升力与航速成二次方关系,而艇的升力随飞高的变化在弱地效区($\frac{h}{c}=0.2\sim 0.5$)变化缓慢,因此与飞机不一样,驾驶员可在不变纵倾角的情况下控制油门而直接拉高,但需保证艇有适当的纵向、垂向与横向稳定性。在这种情况下艇应该在气动布局上作进一步改进,即中央主翼应有充分的静力与动力气垫性能,以保证良好的两栖性、

登陆性与静水和波浪上的起飞特性。

两侧硕长的组合翼，由于展弦比较大，因此具有优良的空气动力品质；安装副翼后改善了地效区外飞行的稳定性。鉴于组合翼为可折叠式，因此不妨碍其上陆、进洞、进舰和靠船帮、码头等。

5 俄罗斯地效翼船发展近况

俄罗斯地效翼船的发展过程大致为：

1) 20世纪70年代至80年代发展的“雏鹰”型艇具有地效区内飞行能力，却没有两栖性，他们称之为“地效翼船”(Экраноплан)，是动力增升式的；

2) 90年代发展的“雨燕”(Стриж)型地效翼船具有较好的地效区外飞行能力，图4示出该船作空中机动，由于可以像飞机一样作侧滑与横倾运动，具有足够的回转向心力，从而可以在空中急转弯。



图4 俄罗斯“雨燕”号地效翼船作空中机动

Fig.4 Maneuver in air of Russia
“Стриж” WIG craft

3) 90年代初发展的动力气垫船“伏尔加-2”、“两栖星”等具有两栖性和强地效区运行能力，但飞高极小，耐波性差^[4]。

4) 1999年俄罗斯推出一种型号为“依伏尔加-2”(ИВОЛГА-2)地效飞行器(Экранолёт)，同时具备在地效区内高速飞行能力和两栖性，见图5，虽然此船仅为初创阶段，其航行性能尚未公开，但却代表一种发展方向^[5]。

由此可见，俄罗斯地效飞行器的发展与我国极为相似，这种地效飞行器在技术上当然比较复杂，它实际上是一种航空与高速船舶技术、流体力学与空气动力学、气垫技术与地效翼技术的有机结合。

在高速船、航空、气垫技术、地效机翼技术、

水动与气动力学领域具有三十余年研制经验的中国学术界与工程界，只要走强强结合的道路，就一定能在不长的时间内突破技术难关，研制出实用的动力气垫地效翼船。

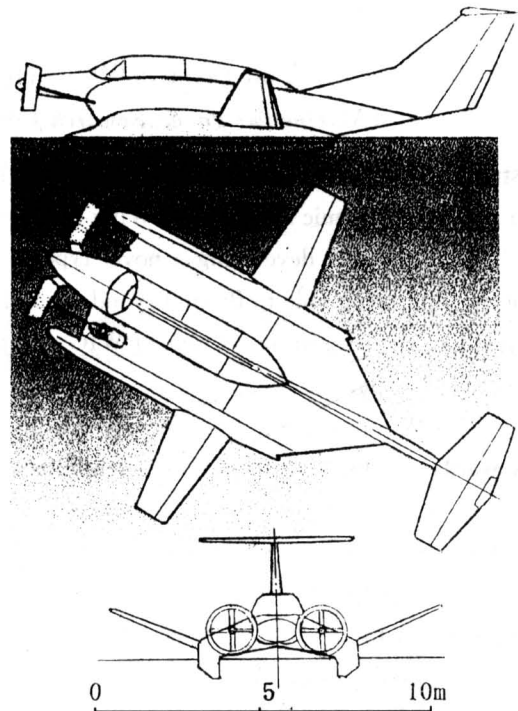


图5 俄罗斯最新成就地效飞行器
“ИВОЛГА-2”

Fig.5 Newest type “ИВОЛГА-2” WIG
craft of Russia

参考文献

- [1] 恽良, 彭桂华, 邬成杰. 两栖地效翼船在中国的研究与发展 [A]. '99中国国际船艇及其技术设备展览会技术报告会学术论文汇编 [C]. 上海, 1999, 3
- [2] 恽良, 彭桂华. 21世纪水上高速客运的方向——动力气垫地效翼船 [J]. 船舶工程, 1996, (5): 7~13
- [3] 胡安定. 两栖地效翼船的发展 [A]. 第一届中国国际高性能船舶会议论文集 [C]. 上海, 1988
- [4] Егоров Ю. Амфистар [J]. Катера и Яхты, 1998-1999, (3-4): 4~7
- [5] Макаров Ю. “Иволга-2” На испытаниях [J]. Катера и Яхты, 1999, (2): 4~7

Design Feature and Evolution of Dynamic Air Cushion Wing-in-ground Effect Craft

Yun Liang, Wu Chengjie, Xie Younong, Peng Guihua

(*Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China*)

[**Abstract**] The design features and the evolution of the Amphibious wing in Ground Effect Craft (AWIG) (also so called Dynamic Air Cushion Wing-in-Ground Effect Craft, DACWIG) in China are described in this paper. The prospect of developing a novel type of WIG, with high speed, fine seaworthiness, marvelous amphibious, and being able to fly in/beyond ground effect zone and softly land on ground, as well as maneuver in air (just like the Russian novel type of WIG, Эcranолёт “ИВОЛГА – 2”), for both civil and military application is full of hope.

[**Key words**] dynamic air cushion; amphibious; wing-in-ground effect craft; feature; evolution

(cont. from p.61)

Studies on the Inhibition of Impurities in Caustic Decomposition of Tungsten Concentrates

Li Honggui, Li Yunjiao, Sun Peimei, Liu Maosheng

(*Central-South University of Technology, Changsha 410083, China*)

[**Abstract**] The Inhibition of impurities of As, P, Si and Sn in the caustic decomposition of tungsten concentrates was studied. It indicated that in the presence of scheelite (CaWO_4) and $\text{Ca}(\text{OH})_2$, during caustic decomposition of scheelite with NaOH, impurities, such as As, P, Si, will be more completely inhibited in the cake in the forms of NaCaAsO_4 , $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, CaSiO_3 and CaSnO_3 . It has been proved in laboratory experiment and industrial practice that the content of As and Si in the Na_2WO_4 solution from caustic decomposition of scheelite and wolframite mixed concentrates is only 20% ~ 30% of that from caustic decomposition of wolframite concentrates with the same contents of WO_3 and impurities.

[**Key words**] metallurgy of tungsten; caustic decomposition; inhibition of impurities