

现代重载飞艇发展现状及趋势

闫峰, 黄宛宁, 杨燕初, 祝榕辰

中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 现代重载飞艇结合了传统飞艇技术和固定翼、旋翼飞机技术及气垫船技术, 具有载荷能力强、续航时间长、操控简单可靠、对地面基础设施依赖小等突出优点, 目前已有多个国家开展了重载飞艇的研究与技术验证。本文综述了国内外现代重载飞艇研制的进展和现状, 重点描述了国外已经开展技术验证型号飞艇的相关研制项目, 针对重载飞艇艇囊气动外形设计、保形结构设计与分析、升力控制及气垫着陆器设计等方面进行了梳理, 探讨了技术可行性, 展望了重载飞艇的发展前景。

关键词 现代重载飞艇; 混合动力源; 大载重; 长航时; 气垫着陆器

从古至今, 人们一直对天空有着不凡的憧憬和梦想, 渴望能像鸟儿一样在天空自由翱翔, 嫦娥奔月、万户飞天等神话故事及敦煌壁画中高飞入云的神女、无数星相学家凝望星辰的感慨笔录, 都是古人飞天梦想的记录, 无不形象地描绘了人们梦想飞行的美好愿景。为了实现这一梦想, 人类的祖先进行了无数次艰辛的尝试, 许多大胆的猜想被付诸实践, 这其中最早出现的孔明灯就是热气球的原型。

古希腊科学家阿基米德(Archimedes)于公元前245年发现了浮力定律, 这一定律是所有飞艇和气球设计最基本的理论依据。虽然浮力定律早在公元前就已被发现, 而且气体受热上升的现象自人类首次使用火以后就每天都可以观察到, 但直到18世纪欧洲工业革命到来, 才为人类探索自然提供了良好的条件, 加快了人类飞行探索的步伐, 人们开始认真构思并制作飞行器。18世纪后期, 法国人发明了热气球, 这是人类历史上首次乘坐自制航空器飞离地面, 在当时创造了巨大的轰动(图1)。

气球的诞生使飞行成为可能, 然而由于气球和空气是相对静止的, 只能靠拉动绳索做有限的控制, 很难让人产生

自由飞翔的感觉, 人们就开始考虑将正圆的气球变为流线型并加上动力装置和操纵系统, 以实现飞行控制进而能够自主驾驶。1852年9月24日, 法国人吉尔法(Giffard)驾驶使用3马力蒸汽机制造的44 m飞艇, 在巴黎上空飞行了27 km, 正式宣告了飞艇的诞生(图2)。这次飞行开创了人类可控动力飞行的新纪元, 比莱特兄弟第一架有动力可操控载人飞机试飞成功早了近半个世纪。

后来, 德国齐柏林飞艇的诞生正式

宣告飞艇的发展进入黄金时代。齐柏林飞艇(Zeppelin airship)是德国著名飞艇设计师斐迪南·冯·齐柏林伯爵在20世纪初期设计的一系列硬式飞艇的总称, 20世纪30年代起, 以齐柏林飞艇为首的大型飞艇称霸大西洋客运市场。

兴登堡号飞艇(LZ 129 Hindenburg), 航空器注册编号为D-LZ 129, 是由齐柏林公司在腓特烈港的博登湖设计并建造的一艘大型硬式载客飞艇。兴登堡号于1931年秋季开始建造, 并于1936年3月4日完成首飞, 全



图1 Montgolfier兄弟制作的热气球
Fig. 1 Montgolfier hot-air balloon

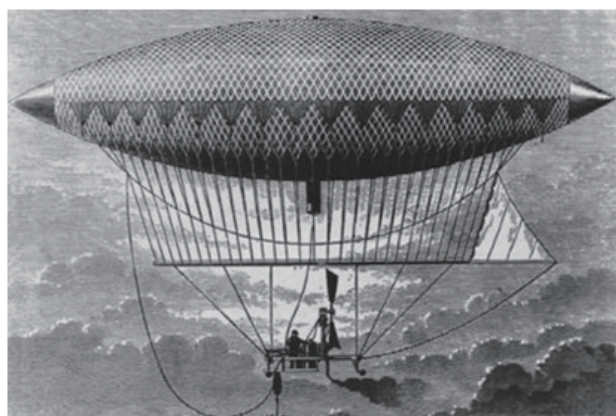


图2 吉尔法研制的飞艇
Fig. 2 Airship made by Giffard

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-09-30

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目(2016140)

作者简介: 闫峰, 助理工程师, 研究方向为浮空器总体设计与分析, 电子信箱: yanfeng@aoe.ac.cn; 黄宛宁(通信作者), 高级工程师, 研究方向为浮空器遥测遥控, 有效载荷应用, 电子信箱: hwn@aoe.ac.cn

引用格式: 闫峰, 黄宛宁, 杨燕初, 等. 现代重载飞艇发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 68-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.09.009



图3 兴登堡号飞艇环球飞行

Fig. 3 Hindenburg round-the-world flight

长 245 m, 最大直径 41 m, 重 220 t, 其长度是波音 747 的 3.5 倍, 仅比泰坦尼克号短 24 m(图 3)。

1937 年 5 月 6 日, 大约下午 7:30, 兴登堡号飞艇正在新泽西州莱克赫斯特海军航空总站上空准备着陆时, 仅 34 s 就被烧毁。灾难在 803 英尺的高空中发生, 1000 多名观众目击兴登堡号瞬间烧成了一个空架子。直到事故发生为止, 兴登堡号飞艇已 10 次安全地往返大西洋两岸之间, 共载客 1002 人次。随着兴登堡号飞艇的失事, 以及飞机技术的快速发展和成熟, 飞艇在这场竞争中完全处于下风, 几乎销声匿迹。

进入新世纪后, 尽管喷气式运输机市场有所增长, 但燃料成本的上涨和环境问题再一次改变了飞艇和飞机的经济性, 对大型重载货运飞艇的投资再次浮出水面。英国、美国等飞艇技术强国均已将重载货运飞艇列入长期发展规划, 在货运市场强烈需求的刺激下, 世界范围内许多研究机构、科研院所甚至高校均已卷入现代重载飞艇研发的竞争潮流之中。

过去 20 年来, 众多优秀的重载飞艇设计出现在人们的视野中, 改变了人们对于飞艇的认知。英国先进技术集团的 Sky Cat 飞艇是最早的设计, 揭开了重载飞艇研制的序幕; 美国洛克希德·马丁公司的 P-791 飞艇成功试飞, 开拓了重载飞艇的市场; 美国全球航空公司的 Aeroscraft 飞艇引入众多新技术, 丰富了重载飞艇的设计; 英国混合航空飞行器公司的 AirLander 10 飞艇整装待发, 再次提高了重载飞艇行业的关注度。

中国众多学者也都开展了现代重载飞艇技术的研究, 但大都处于理论研究的阶段。本文通过对现代重载飞艇发展现状的归纳, 总结了现代重载飞艇发展中的关键技术、存在的问题以及未来发展趋势, 尝试为国内重载飞艇行业的发展提供借鉴。

1 现代重载飞艇的特点及应用

Khoury 在飞艇技术^[1]中将重载飞艇 (heavy lift airship) 定义为具有至少 50 t 运载能力或者可以运载一些超大型不规则货物的运输飞艇。20 世纪 80 年代初期, 随着人们对飞艇技术认知的不断深入, 一些为固定翼飞机开发的技

术被应用于货运飞艇, 例如动升力外形设计技术、矢量推进技术、现代电传与导航控制技术等, 这些技术的应用改善了飞艇的可靠性和安全性, 逐步形成了现代重载运输飞艇^[2]。

现代重载飞艇主要依靠轻于空气的浮升气体产生静升力, 同时利用高气动升力外形和矢量推进器等多种升力源提供动升力, 以静升力为主、动升力为辅, 具备可控飞行能力和升力控制能力的新型运输类浮空飞行器(图 4)。由于结合了传统飞艇技术和固定翼、旋翼飞机技术, 现代重载飞艇的操纵特性和稳定特性得到极大提升。

现代重载飞艇采用组合艇囊的高升力布局形式(图 5), 在静浮力基础上增加了气动升力和矢量推进力, 采用混合动力源的方法显著提高了飞艇的运载能力, 对于飞艇而言, 大载重与长航时存在必然的联系, 当飞艇具有大载重飞行能力时, 势必将为燃料重量提供更多可利用的空间。基于此, 现代重载飞艇具有大载重、长航时的特点, 是一种适用于跨洲际、越洋运输的优质平台。

现代重载飞艇应用了基于气垫船技术设计而成的气垫着陆器 (air cush-

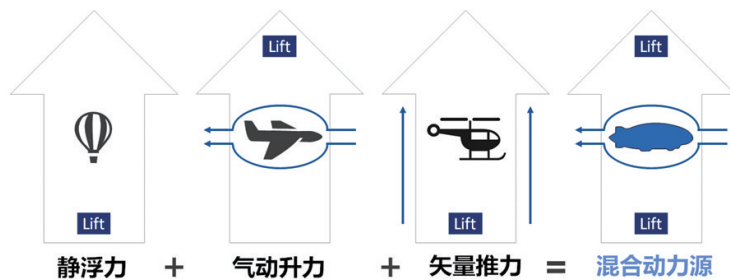


图4 现代重载飞艇混合动力源

Fig. 4 Hybrid power source for modern heavy lift airship

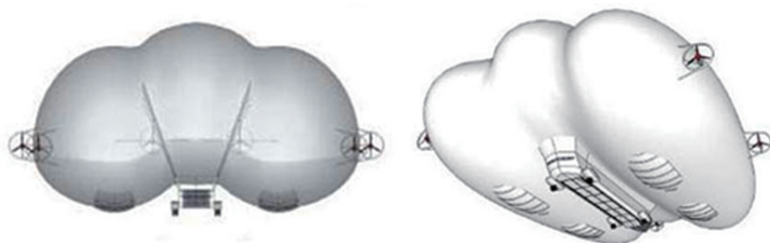


图5 现代重载飞艇高升力布局

Fig. 5 Lifting-body of modern heavy lift airship



图6 P-791飞艇气垫着陆器

Fig. 6 Air cushion landing system of P-791 airship

ion landing system, ACLS)(图6)。气垫把具有一定压力的空气围封在飞艇下形成空气层,利用空气产生的静压力支撑飞艇,由于气垫的阻力系数小,可以有效地减小飞艇在地面移动过程中受到的摩擦力^[3]。ACLS技术不仅使现代重载飞艇具有短距离滑跑起降的能力,在艇上装备的大功率动力系统和矢量控制系统的配合下,还具有高地面操纵特性,极大地降低了飞艇对地面基础设施的依赖程度。

现代重载飞艇对运行场地要求宽松,只需地面较为平坦即可,飞艇可在草地、沼泽甚至水面上完成起降、移动过程,当飞艇安全着陆后,ACLS可在飞艇与支撑面之间形成真空密封,使飞艇像吸盘一样牢牢地吸附在地面上,形成一个稳定的平台,这样不仅可以抵抗地面风速变化带来的侧向力,而且便于货物的装载与卸载过程(图7)。因此,现代重载运输飞艇可用于执行向基础设施水平较低的偏远地区进行点对点精确运输的任务。

作为一种运输工具,现代重载飞艇兼顾了运载能力、运输速度和运输费用3项指标,有效地填补了传统运输手段在大型、重型货物远距离运输领域的空白(图8)。据预计,现代重载飞艇经过仔细的优化设计后,不仅其运载能力将

得到大幅度提升,其运输费用每公里每吨比海运可减少约60%^[4]。

除了用于运输外,现代重载飞艇还可以应用于大规模抢险救灾、海岛开发、空中侦察和通信中继,并且在不久的将来,更有机会成为一种新型的航空旅游模式,总之,现代重载飞艇的发展前途明朗,具有十分广阔的应用前景。



图7 吸附、垫升状态下的气垫着陆器

Fig. 7 Grip mode and hover mode of ACLS

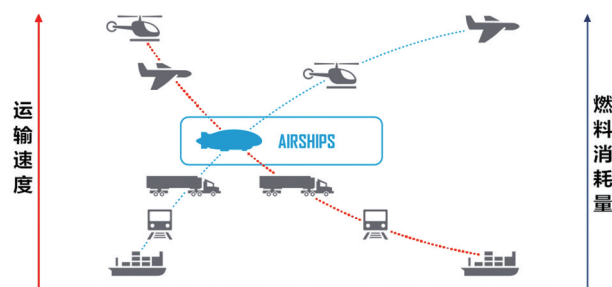


图8 不同运输工具效能对比

Fig. 8 Efficiency comparison of different transportation tools

统和艇首推进器,后者在低速飞行时能精确控制艇首方向,飞艇下部安装气垫着陆系统,使飞艇能够平稳地降落在平地、草地、沼泽或水面上,该系列飞艇有望被应用于执行空中运输、预警、反水面战、地雷探测等任务,其概念设计如图9所示。Sky Cat 系列飞艇包括 Sky Cat-20、Sky Cat-200 和 Sky Cat-1000 3 种型号,预期 Sky Cat-200 型号可实现 200 t 级货物的中远距离运输。

Sky Cat 重载飞艇的技术验证艇 Skykitten 1 于 2000 年 7 月 23 日进行了首次飞行,飞艇具有短距离起降和垂直起降的能力,气动特性十分平稳,并且

在无任何外界辅助的情况下完成了在陆地及水面上的起降^[6](图 10)。

2.2 洛克希德·马丁公司重载飞艇

在美国洛克希德·马丁公司的发展规划中,将重载飞艇的研制周期分为 4 个阶段^[7](图 11)。第 1 阶段是技术验证阶段,验证重载飞艇发展中涉及的关键技术;第 2 阶段是研制持续 ISR 监视能力、远距离长航时的 20 t 级小型重载飞艇;第 3 阶段是研制用于舰队补给、灾难营救的 50 t 以上级中型重载飞艇;最后一个阶段,是实现 500 t 以上运载能力,全球可达的大型重载飞艇。

洛克希德·马丁公司的先进发展工

程部(臭鼬工程部)早在 1998 年就开始秘密启动大型重载飞艇的研制项目,已经制造了一种原形飞艇,称为 P-791,其外形如图 12 所示。

P-791 飞艇采用三囊体布局形式,由于飞艇气囊在产生浮力的同时还会产生气动升力,是重载飞艇的关键部件,因此洛马公司的研究人员给予了高度的重视,进行了包括气动优化分析、尾部减阻分析、艇囊承压应力分析在内的多项仿真(图 13~图 14)。

P-791 飞艇蒙皮由具有高强度质量比的 Vectran 纤维织物热合而成,内部填充压力为 700 Pa 的氦气,依靠氦



图 9 Sky Cat 重载飞艇概念图

Fig. 9 Conception design of Sky Cat heavy lift airship



图 10 Skykitten 1 技术验证飞艇

Fig. 10 Skykitten 1 technical demonstration airship

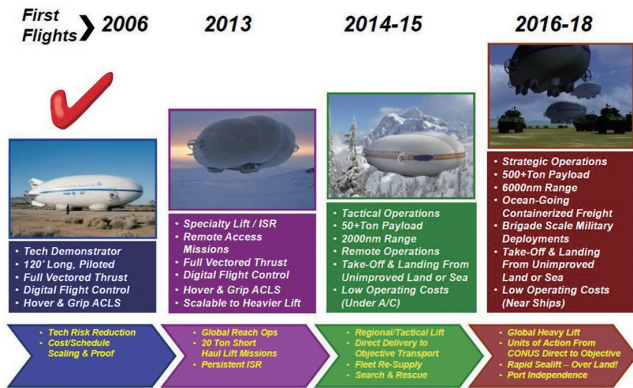


图 11 洛马公司重载飞艇发展规划示意

Fig. 11 Heavy lift airship development plan of Lockheed Martin



图 12 洛马公司 P-791 重载飞艇

Fig. 12 P-791 heavy lift airship of Lockheed Martin



图 13 P-791 飞艇艇囊外形

Fig. 13 Outline drawing of P-791 airship hull

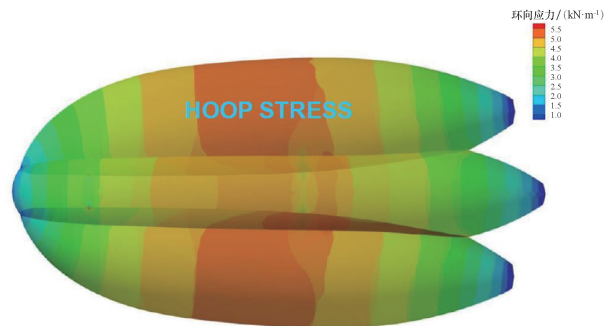


图 14 P-791 飞艇艇囊承压仿真分析

Fig. 14 Simulation and analysis of P-791 airship hull

气内压维持飞艇气动外形。在飞艇两侧和尾部安装 2 组共 4 个可 90° 偏航、90° 俯仰的矢量涵道螺旋桨推进器(图 15), 发动机采用 100 hp 四缸两冲程风冷 Hirth F-30-ES, 可以辅助飞艇实现爬升、下降及姿态控制, 飞艇的最高速度为 30 节。

P-791 飞艇于 2006 年 1 月 31 日进行了时长为 5 min 的首飞, 成功地完成绕场一周的飞行。首次试飞中, P-791 先进行了短距离滑跑起飞, 随后在空中进行了爬升和转弯, 飞行十分平稳, 最后飞艇使用气垫着陆器安全返回地面。此后, 在飞行员 Eric Hansen 和 Bill Francis 的操作下共进行了 6 次、每次 30 min 的飞行测试, 其中进行了发动机停机测试, 飞艇反应正常, 并且在一次试验中一个着陆气垫意外磨损失效, 飞艇仍平稳着陆^[8]。

2014 年, Hybrid Enterprises 与洛马公司达成一致, 将共同商业化运作基于 P-791 飞艇改进而成的 LMH-1 重载飞艇(图 16)。Hybrid Enterprises 总部位于美国佐治亚州亚特兰大, 是一家在全球六大洲、120 多个国家提供专业货物运输服务的企业, 此次合作, 将作为洛马公司重载飞艇的独家代理商。

在 2015 年 6 月巴黎航展上, 洛马公司宣布 LMH-1 飞艇所有 FAA 适航标准申请材料已经完备, 预期(美国联邦航空管理局)将在 2018 年初投入运营。LMH-1 重载飞艇 80% 的升力来自飞艇气囊内部填充的氦气所产生的浮力, 其余 20% 的升力来自三囊体外形在飞行中产生的气动升力以及矢量推进器产生的可倾转推力。基于这种混合式升力来源, LMH-1 飞艇可以 60 节的速度, 携带 20 t 货物或 19 名乘客, 运行 2600 km 的距离^[9](图 16)。

LMH-1 飞艇的矢量推进器和尾翼控制面由位于驾驶舱的电传控制系统操作(图 17)。LMH-1 飞艇的着陆方式有短距滑跑和垂直 2 种可选方式: 当飞艇前进速度小于 20 节时, 采用垂直着陆模式; 当飞艇前进速度大于 25 节时, 采用短距滑跑模式。



图 15 P-791 飞艇矢量推进器

Fig. 15 Vector thruster of P-791 airship hull



图 16 LMH-1 飞艇外形

Fig. 16 Outline drawing of LMH-1 airship



图 17 LMH-1 飞艇驾驶舱

Fig. 17 Cockpit of LMH-1 airship

2.3 美国 Aerocraft 重载飞艇

Aerocraft 硬式可变浮力重载飞艇是美国全球航空公司为美国国防部研制的战略运输飞艇, 是服务于美军“维稳与重建”战略的重要工具, 主要面向不易抵达的地区, 如阿富汗、部分非洲地区和具有重要战略地位的亚洲地区, 用于实现战略设施、资源和物资的重置与分配^[10]。

全球航空公司将 Aerocraft 重载飞艇定位于一种能够改变当今货物运输

大格局的飞艇(game-changing airship)。它的主要用途是实现超大型、重型货物的点对点运输, 战时可以将超大型武器快速转场运输, 战略意义重大。

Dragon Dream 飞艇是美国政府资助的 Pelican 项目研制的模拟样机, 也是 Aerocraft 重载飞艇技术验证艇(图 18)。根据美国国防部高级研究计划署(DARPA)公布的资料, Dragon Dream 飞艇融合了众多当前浮空器领域的高端技术^[11]。



图 18 Dragon Dream 技术验证飞艇

Fig. 18 Dragon Dream technical demonstration airship

2.3.1 静态重量控制技术

静态重量控制技术(COSH)是硬式可变浮力飞艇的精髓所在(图19、图20)。通过压缩机将飞艇硬式蒙皮内部的氦气压入飞艇内部预先设置的压力气囊中,减小氦气体积,进而减小飞艇浮力,这一原理与潜水艇控制浮力实现浮潜的原理十分相似。这就解决了传统飞艇因长时间飞行燃料消耗带来的重量减轻问题,是一项具有创新性和革命性的先进技术。通过调节飞艇的浮

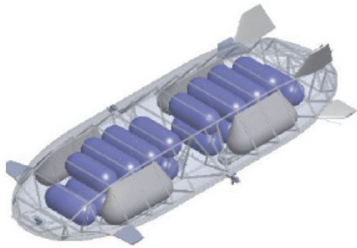


图19 Dragon Dream飞艇COSH系统分布图

Fig. 19 COSH system of Dragon Dream airship

力,还可以实现垂直起降和不加压舱物装卸载荷等任务,该系统的浮力调节范围在1.4~1.8 t之间。

2.3.2 硬式框架和蒙皮结构

Dragon Dream飞艇内部采用硬式框架维持飞艇外形,框架结构由超轻量碳纤维和铝合金桁架构成,并在其中用高强度绳索紧固(图21)。由于采用硬式结构,飞艇的推进器、吊舱等结构件可以直接安装在框架上,提高了飞艇的结构稳定性。据统计,Dragon Dream飞



图20 Dragon Dream飞艇内部压力气囊
Fig. 20 Inner air bags of Dragon Dream airship

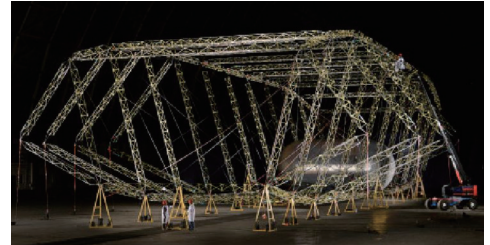


图21 Dragon Dream飞艇硬式框架
Fig. 21 Rigid frame of Dragon Dream airship



图22 Dragon Dream飞艇硬式蒙皮
Fig. 22 Rigid skin of Dragon Dream airship

2.3.3 简洁的航电系统

Dragon Dream飞艇的航电系统是经过特殊设计的,更加注重飞行员操作的简洁性,航电系统以飞艇管理系统(vehicle management system, VMS)为核心,可以帮助飞行员控制包括COSH、垂直起降推进器、着陆系统在内的所有子系统,通过集中式触屏显著地减轻了飞行员的操纵压力(图23)。

2013年1月Dragon Dream飞艇完成原型机制造,并开始进行组装测试和艇库内试飞,9月进行了艇库外试飞,

飞行中通过卸载500磅重的模拟货物,验证了COSH系统的有效性。2013年10月,因飞艇停放的加利福尼亚Tustin前军事基地的艇库部分坍塌,导致造价3500万美元的Dragon Dream飞艇部分损毁,目前正在进行修复工作^[2]。

2.4 英国AirLander重载飞艇

2010年6月,诺斯洛普·格鲁门公司与美国陆军空间与导弹防御司令部和陆军战略司令部签署合同,研究设计一款长航时智能飞行器(long endurance multi-intelligence vehicle, LEMV),主要

艇硬式框架共采用了200余根长度在5~17 m的桁架。

硬式蒙皮安装在内部硬式框架之上(图22),通过与框架的相互作用将飞艇受到的作用力传递耗散,主要由2部分组成:是具有高强度质量比的铝合金蜂窝板结构,在铝合金板材外部铺覆了由Mylar为主要基底的纤维织物,纤维织物的其他成分根据飞艇的不同性能要求可能有所不同,例如反射率、氦气渗透率、强度及耐久性等。

用于长时间驻空执行高空侦察与监控任务^[3]。2012年8月7日,该项目验证飞艇成功进行了首次飞行试验(图24)。

后来由于财务问题,LEMV项目被迫搁置,该项目研制的验证飞艇被英国混合航空飞行器公司(Hybrid Air Vehicle, HAV)收购。2014年2月,HAV公司重启该飞艇的研制工作,将飞艇命名为AirLander 10(图25),并得到了英国政府418万美元的研发基金。

AirLander 10采用多升力源设计,升力体外形在飞行中产生的气动升力

提供飞艇总升力的40%,其余部分由囊体内氦气产生的浮力提供。在两侧囊体下部安装管道状气垫着陆器,可以帮助飞艇实现地面操作及两栖起降,并且在飞行过程中可以排气收回以减小飞

行阻力。AirLander 10由4台350马力Li V8直喷发动机驱动,可携带10 t有效载荷在6100 m高空续航飞行5天^[14]。

后续发展中,HAV公司计划于2017年推出具有60 t运载能力的Air-

Lander 50重载飞艇(图26),其设计参数见表1,并且在市场需求的推动下,有可能在2022—2024年推出具有200 t运载能力的版本^[15]。

2016年3月21日,混合航空飞行



图23 Dragon Dream飞艇航电系统
Fig. 23 Avionics system of Dragon Dream airship



图24 LEMV飞艇试飞
Fig. 24 Flight test of LEMV airship



图25 AirLander 10重载飞艇
Fig. 25 AirLander 10 heavy lift airship



图26 AirLander 50重载飞艇概念图
Fig. 26 Conception design of AirLander 50 heavy lift airship

表1 AirLander 10和AirLander 50重载飞艇参数
Table 1 AirLander 10 and AirLander 50 parameters

名称	主气囊体积/m ³	三向尺寸	续航时间/d	升限/m	巡航速度/节	系统总重/kg	载荷能力/kg
AirLander 10	38000	92 m×43.5 m×26 m	5	6100	80	20000	10000
AirLander 50	103000	119 m×60 m×35 m	4	6100	105	58100	60000

器公司在英国贝德福德媒体发布会上表示,AirLander 10将于2016年4月在英国进行首次试飞。

3 中国重载飞艇的发展现状

3.1 中航通飞重载飞艇研制计划

2015年7月2日,珠海企业中航通用飞机有限责任公司(简称中航通飞)与法国飞鲸控股公司在法国图卢兹签署了战略合作协议,拟共同投资成立合资公司,开展重载飞艇项目合作,计划研制生产60 t级的重载飞艇。

法国飞鲸公司在2014年承担了一

项法国“未来工业”项目,为法国国家林业局(ONF)研制承载60 t级的重载飞艇,型号为LCA-60T(图24)。该艇采用了硬式结构设计,其最大飞行速度为100 km/h,可载重60 t货物飞行4500 km^[16]。

截至目前,该合作计划尚未推出原理验证样机,合作方法国飞鲸公司也只是公布了设计概念图(图27)。中航通飞的总经理曲景文表示,面向“十三五”,中航通飞将通过国际合作,研制生产60 t级的重载飞艇,面向国际国内市场开展销售与服务。

3.2 中国航天科工集团公司068基地重载飞艇

2015年9月21日,中国航天科工集团公司068基地远望科技有限公司与中国科学院电子技术研究所合作,完成了首阶段的航空物探飞行试验(图28)。此次飞行试验利用068基地自行研制的双椭球体自控飞艇搭载重535 kg航空瞬变电磁系统进行飞行,最大飞行高度为海拔843 m。

本次试验历时24天,顺利完成了异常环测试、定点测线、背景噪声测试及一致性测试等全部飞行试验科目。



图 27 飞鲸公司 LCA-60T 重载飞艇概念图
Fig. 27 LCA-60T heavy lift airship of Flying Whales Company



图 28 中国航天科工 068 基地双椭球体飞艇
Fig. 28 Double ellipsoid airship of 068 base

此次试验的成功为该型飞艇向航空物探等新领域拓展奠定了坚实基础,同时也意味着中国在重载飞艇研究领域迈出了重要一步^[17]。

3.3 中国重载飞艇理论研究

中国众多学者已开展重载飞艇领域的相关研究,包括北京航空航天大学、中国电子科技集团公司第三十八研究所、中国特种飞行器研究所、中国科学院光电研究院、西北工业大学在内的一批研究机构和院校已经取得了一定的研究成果。

北京航空航天大学的糜攀攀^[18]提出了一种基于 NACA(美国国家航空咨询委员会)高升力翼型的组合囊体式重载飞艇,并采用计算流体力学(CFD)方法将其与常规飞艇进行对比,说明了重载飞艇设计的有效性;北京航空航天大学的孟军辉等^[19]进行了浮升混合式重载飞艇总体设计和参数分析工作,并对其气动性能、总体飞行性能和经济性能展开了研究;中国特种飞行器研究所的龙飞等^[20]从气动特性、浮升特性、重量特性、续航特性等方面比较了常规飞艇和重载飞艇的综合性能,表明重载飞艇可以借助动升力来平衡燃油的消耗,且有效载荷大、载油量大、可操纵性好,更有利于长航时飞行。

4 现代重载飞艇设计关键技术

4.1 高动升力外形优化设计

经过多年来对飞艇的探索实践,人们逐渐意识到,飞艇的外形将对飞艇的整体性能产生重要的影响。传统的飞

艇外形接近于流线形绕纵轴旋转所得旋成体,这种外形被认为是兼顾空气动力学、静升力和结构要求的最佳折中。但是,随着近年来飞艇任务的多元化、长期化及复杂化,传统的飞艇外形很难同时满足所有要求,因此,不断有人尝试对飞艇的囊体外形进行改进^[21]。

现代重载飞艇采用高动升力外形设计,与常规布局飞艇的飞行性能对比后可以发现,在体积相同的情况下,虽然重载飞艇在阻力特性方面不如常规布局飞艇,但由于其外形动升力较大,可以借助动升力来平衡燃油的消耗,如前所述更有利于长航时飞行。

高动升力外形优化设计需要兼顾气动升阻特性、形状保持能力和成型工艺性,以达到提高飞艇性能的目的^[22]。在 P-791 飞艇设计的初期,设计人员对飞艇囊体进行了充分的气动计算,在计算过程中发现仅有微小差别的艇囊,会

对飞艇气动性能产生巨大的影响,随着图 29 中飞艇囊体后缘点位置的变化,气流分离区逐渐减小,气动特性逐步提高,经测算,修改后的模型比原模型可减少 3~4 倍阻力。

4.2 组合艇囊内部保形与应力分散

现代重载飞艇通常采用组合艇囊结构提供气动升力,封闭气囊受内压作用时,将向外膨胀变形趋于球体,因此为了维持升力体外形,在艇囊内部需要采取一定保形措施。

常用的内部保形手段主要有隔膜和拉绳,其主要有两方面作用^[23]。一是承受囊体向外扩张产生的应力,保持飞艇外形。隔膜或拉绳通常在艇囊间相贯位置处上下相连,通过自身微小变形承受艇囊扩张产生的应力。内部保形的另一个作用是传递载荷,使飞艇均匀受力,飞艇吊舱通常安装在艇囊下部,由于重量较大,会对艇囊下部材料产生

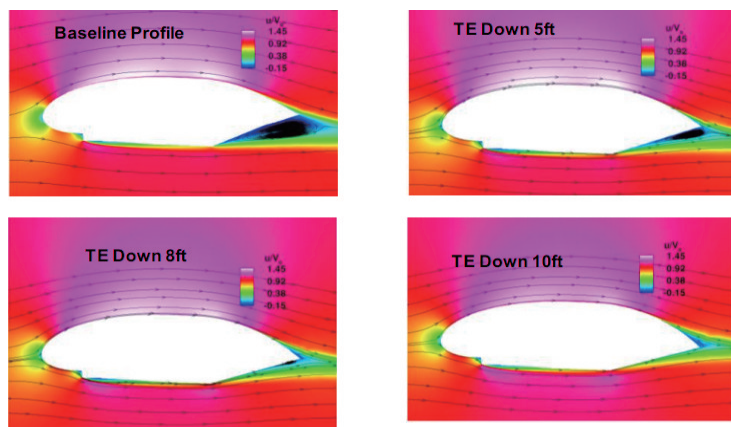


图 29 P-791 艇囊尾部减阻分析
Fig. 29 Tail drag reduction analysis of P-791 airship

较大的拉应力,此时隔膜和拉绳将成为载荷的传递路径,将吊舱等结构件的重量传递至整个艇体,减小艇囊下部的局部应力。

组合艇囊交汇处是重载飞艇保形的重要部位,其应力水平要远远高于艇囊其他部位,设计时应通过一定技术手段将其应力分散,防止出现局部应力集中破坏艇囊结构。目前较为可行的应力分散手段是在交汇处艇囊材料内部加入刚性拉丝等构件,依靠其较大的刚度承受囊体变形产生的应力。另外,根据艇囊满充时单个囊体的变形曲线,可以在囊体交汇处使用具有一定初始弧度的材料,以减小材料变形应力。

组合艇囊内部空间有限,以较低的重量成本设计出具有足够强度和刚度的内部保形结构,是需要重点解决的问题,囊体交汇处应力分散结构的设计与实际使用的效果,是需要探索和反复尝试的工艺。

4.3 升力控制技术

对于现代重载飞艇,通常使用柴油或汽油作为飞艇推进器的能量来源,为了实现长航时飞行,燃料占比通常较大。随着飞行航时的不断增加,燃料的消耗使飞艇总重逐渐降低,若总升力无法与之匹配,飞艇极易净轻失控,因此必须采取一定措施对飞艇的升力进行控制。

升力控制的目标是使飞艇在受控状态下实现爬升和下降^[24]。飞艇的升力来源主要有3个方面:一是飞艇气囊中浮升气体产生的浮力,二是动升力体外形在飞行中产生的气动升力,三是螺旋桨或涵道风扇提供的矢量推力。早期齐柏林大型硬式飞艇的使用中,通过在飞艇顶部设计引水槽,飞艇寻找并穿梭于积雨云中以获取雨水作为压舱物,第二次世界大战时,LZ-120飞艇曾经降落在水面上汲水作为压舱物,但效果并不理想^[25]。若无法找到合适的压舱物,早期飞艇往往只能通过排出浮升气体的方法控制升力。

随着科学技术的发展,越来越多的升力控制技术被人们掌握并应用于飞艇研制中,其中较有代表性并有可能应

用于重载飞艇上的除了前面介绍的COSH技术之外,还有浮重比控制技术。

对于多升力源重载飞艇,浮力占飞艇重量的比重称为浮重比(buoyancy ratio, BR),是现代重载飞艇设计中的关键参数。飞艇起飞重量与浮力的差值称为初始净重,此部分重量由高气动升力外形在飞行过程中产生的气动升力提供。当飞艇达到设计升限时,浮力不再发生大范围波动,可近似认为浮力为一常数项,此时,可通过调节气动升力的大小对总升力进行控制,这样一来,即使在压力高度飞行,飞艇的总升力也是可以调节的,极大地提高了飞艇的操控特性。

初始平飞阶段,气动升力与初始净重相等,随着航时的不断累积,燃油消耗使得飞艇重量不断减小,此时,通过调节飞艇攻角或飞行速度,使得气动升力同步减小即可满足飞艇的运动平衡。为了避免飞艇在燃油消耗过程中出现净轻现象,设计时可令飞艇在不装燃油时仍保持净重状态,从而通过初始浮重比的设计消除出现净轻失控的可能性。

初始浮重比的设计应兼顾飞艇的升力控制范围、气动特性和起降安全性;初始浮重比越小,气动升力的调节范围越大,但较大的净重值将增大推进器功率,且起降时由于飞行速度较低存在安全隐患;初始浮重比越大,所需的飞艇气囊体积越大,由此将产生更大的阻力。通常,初始浮重比的设计范围在0.6~0.8之间,设计者可按较高初始浮

重比展开设计,同时增大燃料舱的设计容积、选用稍大功率的发动机,在执行长航时飞行任务时,增加燃料的携带量使飞艇以较低浮重比起飞,这样可以保证飞艇在优选浮重比范围内工作的同时增加燃料携带量^[26]。

4.4 气垫着陆器设计

作为现代重载运输飞艇的重要组成部分,气垫着陆器的研究具有十分重要的意义。对于传统构形飞艇,地面操作是一个很大的难题,一般需要一个很庞大的地面维护队伍,起降时要有压舱物装卸,安装调试及存放时需要巨大的艇库。现代重载运输飞艇应用了气垫着陆器,既可以停在平整的跑道上,也可以停在任何开放的空地上,着陆后飞艇被吸附于地面,可无需系留而安全地停在基地地面,独特的外形设计减小了飞艇的高度,降低了艇库的建造难度,再加上装备大功率的动力系统以及矢量控制技术,使得现代重载飞艇的地面操纵特性从根本上得以改善。

目前常用的气垫着陆器主要有Sky Cat飞艇应用的双体船式、AirLander 10应用的管道式、LMH-1飞艇应用的三点盘式以及P-791飞艇应用的四点盘式4种(图30~图33)。

双体船式气垫着陆器对称安装在飞艇两侧,与地面接触面积较大,可以有效减小飞艇对地面的压强,使飞艇可以在较为柔软的地面移动,并且可以增强飞艇在移动过程中的稳定性,其结构与早期飞机使用的软着陆气垫类似,可以说,双体船式气垫着陆器有着较为成



图30 Sky Cat飞艇双体船式气垫着陆器
Fig. 30 Catamaran ACLS of Sky Cat airship



图31 AirLander 10管道状气垫着陆器
Fig. 31 Profiled pneumatic tubes ACLS of AirLander 10 airship

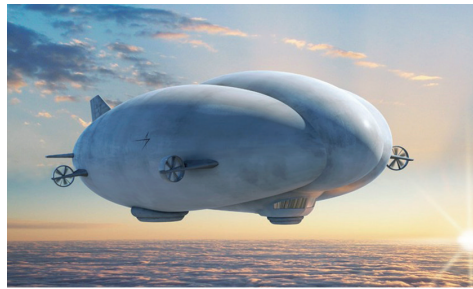


图32 LMH-1飞艇三点盘式气垫着陆器
Fig. 32 Three-point disklike ACLS of LMH-1 airship



图33 P-791飞艇四点盘式气垫着陆器
Fig. 33 Four-point disklike ACLS of P-791 airship

熟的技术支撑。但是,由于与地面接触面积大,导致气垫周长较大,当飞艇出现过大的倾角时,例如滑跑起飞或过度倾斜,气垫与地面之间会出现较大的泄流间隙,使得气垫内气流从该间隙泄露而出,导致气垫压力急剧降低^[27]。

管道状气垫着陆器通过两侧的柱状气囊实现缓冲,同时也起到保护飞艇艇囊的作用,在飞艇飞行过程中可以收回减小飞行阻力,结构较为简单。但是由于并未采用气垫垫升原理进行设计,其地面移动效果和滑跑起降效果还有待考察。

三点盘式气垫着陆器布局方式与飞机前三点式起落架相似,两个主气垫对称安装在飞艇重心之后,第3个气垫外形稍小,安装在飞艇吊舱下部。前三点式布局使得飞艇具有良好的方向稳定性,侧风着陆时较为安全,在飞艇进行地面滑行时,操纵转弯也较为灵活。但是由于前气垫安装在吊舱正下方,着陆时吊舱中的仪器设备和人员会承受更大过载,另外,前、后气垫结构不尽相同,增大了设计的难度。

四点盘式气垫着陆器成阵列对称地安装在飞艇两侧,所采用的4个小气垫可以有效地降低飞艇对地面的压强,并且由于飞艇重心在4个气垫中间,所以可以有效地保持飞艇的稳定性,在两侧矢量推进器的配合下,飞艇可以实现无牵引的地面移动。相比于双体船式着陆气垫,四点盘式构形采用了4个小气垫,这就在保证气垫总面积足够大的情况下,解决了飞艇倾斜导致的气垫压

力降低的问题,并且气垫泄流周长减小,可以有效降低工作时风机消耗的功率。相比于三点盘式构形着陆气垫,四点盘式构形4个气垫都安装在艇囊下方,着陆时可以减小吊舱的冲击过载,并且4个气垫完全一致,设计制造较为方便。四点盘式构形的缺点是当飞艇着陆时,进近拉平后,需要同侧的两个气垫先触地,经过2~3个弹跳周期后方可稳定,对驾驶人员的要求较高。

气垫着陆器设计时应综合考虑结构难易程度及可靠性、飞艇地面操纵灵活性、起降安全性等因素,由于涉及到飞艇的起降操作,必须给予高度重视。在P-791飞艇的着陆气垫设计过程中,专门制造了着陆气垫模型,并研制了具有360°旋转能力的试验平台(图34)和高速数据采集系统,以模拟真实的着陆状况。



图34 P-791飞艇气垫着陆器模型及试验平台
Fig. 34 Model pad and test rig of P-791 airship ACLS

5 重载飞艇技术未来发展趋势

5.1 艇体结构的设计与分析

现代重载飞艇的尺度庞大,必定属于大型或巨型飞艇范畴,与中小型飞艇有着本质的区别。对于大型重载飞艇,单纯的柔性结构几乎很难满足要求,而完全刚性的结构则抵消了50%以上的浮力,并且这种情况随着飞艇尺度的增大将更加明显,因此未来大型重载飞艇应考虑使用半硬式结构。

目前较为成熟的半硬式结构设计是德国Zeppelin Luftschifftechnik公司的Zeppelin NT载人飞艇^[28],依靠铝合金和碳纤维复合材料制成的半硬式结构显著提高了结构利用率,因此尽管没有采用高气动升力外形设计,该飞艇同样具有较高的载重能力。进行半硬式艇体结构设计时,可考虑使用艇首至艇尾一体式龙骨或在载荷挂载位置使用

硬式结构进行局部加强,无论采用何种结构,柔性艇囊与硬式结构连接位置都关乎艇体结构安全性,必须进行精细的设计和详尽的分析。

5.2 新能源的开发与利用

能源是提供飞艇飞行、控制、信号测量、信息传输以及操作等各种动作的能量,通常具有重量轻,效率高,稳定可靠等特点。目前飞艇常用的能源形式主要有燃油发动机形式、纯电形式和油电混合形式。燃油发动机具有较高的质量比功率,但其消耗后会导致飞艇的浮重平衡被破坏;纯电形式通常采用储能电池,或太阳电池+储能电池的循环能源形式,使用中具有较高的效率并且不会带来重量变化;油电混合形式往往用于单种能源不能满足任务需求的情况,结构复杂度较高,但用燃油供应动力,用储能电池供应飞艇设备电源却是一种适用于长航时飞行的优选方案。

对于现代重载运输飞艇,首先应考虑引入循环能源以弥补艇上能源的消耗,在艇囊较为平坦的上表面铺设柔性薄膜太阳能电池是一种较优的选择。其次应采用油电混合能源形式,以应对飞行中多种不同工况,比如应急抗风、高速飞行时采用燃油作为动力,而低速巡航时使用电池能源作为动力。对于采用油电混合能源形式的飞艇,由于电能是可以补充的,而燃油无法补充,因此飞行中应以电能为主、燃油为辅。

另外,氢燃料因具有高质量比能量,各国正在研究开发氢燃料活塞动力发动机,将优先应用于飞机,如美国正在针对全球观测者(Global Observer)和鬼眼(Phantom Eye)^[29]研制液氢燃料发动机,如果液氢发动机得以应用,将使飞艇的载重量和飞行时间进一步提高。

5.3 热力学特性

现代重载飞艇具有长航时飞行的能力,其飞行过程中必然要经历昼夜交替的过程,昼夜温差的变化将对飞艇的外形、内压产生巨大的影响,飞艇热特性研究是一项重要且关键的研究内容。

重载飞艇运行高度属于中低空域,根据现有研究情况来看,对于中低空飞艇,最大的热环境影响因素是太阳直接

辐射和地面红外辐射。日间,太阳直接辐射占主导地位,内部氦气温度上升;夜间,地面红外辐射占主导地位,但是由于周围大气温度低,内部氦气温度会大幅度下降。

探索平衡飞艇昼夜温差的方法需要从热力学角度入手,对飞艇隔夜飞行展开数值模拟,根据飞艇昼夜飞行特性数值模拟的结果,从改善艇囊材料能量吸发比入手,研究、选择合适的艇囊材料,在日间吸收较少的太阳辐射,而在夜间吸收较多的地面红外辐射,降低艇囊内部氦气的昼夜温差(图35)。

5.4 飞行控制策略与优化

现代重载飞艇全包围飞行通常包括起飞、爬升、巡航和下降着陆等过程,远距离长航时飞行任务中,巡航过程占据绝大部分飞行时间。定高度平飞时,飞艇所携带燃料的消耗速率是推进器功率的函数,当推进器功率最小时,飞艇耗油量最低,此时对应的飞行速度即为最小燃料消耗速度,为了节约能源成本并增加飞行时长,重载飞艇平飞时应以最小燃料消耗速度飞行为佳。

随着飞艇续航时间的不断累积,燃料的消耗使得飞艇的净重不断变化,导致最小燃料消耗速度也在不断变化。实际飞行时,应定时间间隔监测最小燃料消耗速度的变化情况,实时调整飞艇飞行速度,以确保飞艇始终运行在最小燃料消耗速度下,所选择的时间间隔应足够小,有研究表明,当时间间隔取为36 s时,即可满足监测精度要求^[30]。

飞行策略的优化主要围绕飞艇不同阶段的飞行轨迹优化设计展开,研究飞艇在某个高度内从一个地点飞到另一个地点的最优轨迹。研究在不同性能指标下,如时间最短、能量最少或者

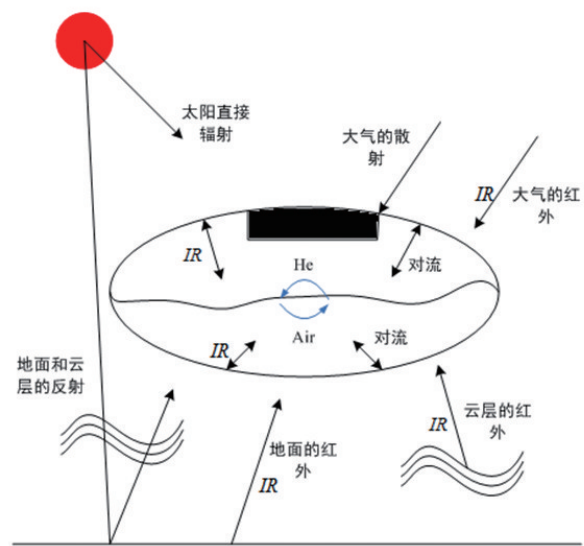


图35 飞艇热力学环境示意

Fig. 35 Thermodynamic environment of airship

综合最优等,得出最优飞行策略对提升飞艇的续航时间具有非常重要的意义。

目前,国内外对重载飞艇长航时飞行策略的研究主要集中在结合风场环境、利用大气风能调节飞行轨迹方面,这是一种几乎不需要消耗能源的方法,是飞艇飞行策略优化研究的一个重要研究方向。除此之外,飞行策略优化还受到众多热力学因素的影响,未来将利用环境协同控制理念,降低飞艇对能源的需求,是延长重载飞艇续航时间的一种切实可行的方法。

5.5 完善的气象保障条件

与所有浮空飞行器一致,现代重载飞艇对高空环境因素变化的敏感程度要远远高于固定翼飞机,并且在进行长航时、远距离运输的过程中,必然要经历多种气象条件的更替,若无法准确预知飞行路线前方气象环境的变化,对重载飞艇的飞行安全性将是巨大的威胁。

在发展现代重载飞艇的同时,必须同步研制一套高预报准确率的气象保障系统,利用气象卫星、气象雷达等天空地一体化的气象保障体系合理规划飞行航迹,规避大风或雨雪等不利的天气,只有在准确实时的气象预报的条件下,飞艇才能够充分发挥现代高科技的动力系统,导航控制系统的作用,完成各种载重运输的任务^[31]。

6 结论与展望

现代重载飞艇采用区别于传统飞艇的高气动升力外形设计,结合了固定翼、旋翼飞机技术及气垫船技术,艇上装备大功率动力系统及矢量推进器,可以实现垂直起降或短距离起降,具备优越的地面操作能力和飞行控制能力。但是,从重载飞艇概念首次验证至今已过去 15 年的时间,可遗憾的是依然没有一艘该类型飞艇投入商业运营。长远来看,若想进一步提高重载飞艇的载重量和续航时间,艇体结构设计及新能源技术方面还有待深入研究;而长航时飞行带来的附加问题,例如飞艇热力学特性、飞行控制以及气象保障等方面还

有待进一步完善和解决。

目前,市场投资信心缺失成为制约现代重载运输飞艇发展的重要因素,由于重载飞艇货运装载量大,飞艇尺度大,需要占用庞大的资金,投资者大都持观望态度,他们与重载飞艇制造商一样,怀着急迫的心情,等待着一次完美的重载运输演示试验,掀起重载货运市场的滔天波澜。

不过,这种无人问津的局面很快就要被打破了。根据美国全国广播公司 CNBC 在 2016 年 3 月 30 日的报道,英国直线航空公司 Straightline Aviation 已经与 Hybrid Enterprises 达成采购承诺,将订购 12 架洛马公司研制的 LMH-1 重

载飞艇,总价值约 4.8 亿美元,第一次交付日期是 2018 年,最后一批飞艇的交付日期不会晚于 2021 年。这是重载飞艇首次斩获订单,被一些媒体评论人认为是浮空器发展史上的分水岭,将对运输和航空业带来巨大变革。

尽管洛克希德·马丁公司只是收到了订购意向,还尚未落实到合同上,但是一旦有一艘重载货运飞艇进入商品化阶段并取得成功运营,将会有更多的投资者进入飞艇货运市场;当销售竞争和市场占有率出现时,会推进重载飞艇技术更加完善,两者形成良好御环。良性循环之下,现代重载飞艇必将拥有美好的未来。

参考文献 (References)

- [1] Khoury G A. Airship Technology Second Edition[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] 郭允良. 现代“高静/动升力比”运输飞艇概述[J]. 航空科学技术, 2009(6): 3-5.
- [3] Guo Yunliang. The overview of the modern high static lift/dynamic lift ratio transport airships[J]. Aeronautical Science and Technology, 2009(6): 3-5.
- [4] 李桂春, 李铮捷. 气垫船气囊与气垫[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [5] Li Guichun, Li Zhengjie. Hovercraft air bag and air cushion[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [6] Boyd R. Performance of hybrid air vehicles[C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Aerospace Sciences Meetings.US Reno: AIAA, 2002.
- [7] Valera L, Nagabhushan B L. Design trends and global developments in modern LTA vehicles[C/OL]. [2016-01-28]. http://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2002/PAPERS/P9.PDF.
- [8] Arnold W L, Nayler MAIAA MRAeS. Airship development world-wide—A 2001 review[C]//1st AIAA, Aircraft, Technology Integration, and Operations Forum, Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. US Los Angeles: AIAA, 2001.
- [9] Chang M. Planning and executing an integrated test strategy for complex aerospace systems[R]. New York: AIAA, 2012.
- [10] Rhodes J. UPSHIP[J/OL]. Code One, 2001-06-08[2016-04-20]. http://www.codeonemagazine.com/p3_article.html?item_id=71.
- [11] Michael D. White. Lockheed Martin Goes Up, Up and Away[EB/OL].(2015-11-20) [2016-04-25]. <http://www.linkedin.com/pulse/lockheed-martin-goes-up-away-michael-d-white>.
- [12] Gen William Tuttle. The aerospace: The 21st century air vehicle[J]. Defense Transportation Journal. [2016-04-20]. <https://www.highbeam.com/doc/1G1-303569396.html>.
- [13] Aircraft proof of design demonstration vehicle: Dragon dream[R/OL]. [2016-04-20]. http://aeroscraft.com/download/i/mark_dl/u/4011780344/4613039290/tech.pdf.
- [14] Perry Chiamonte, Lawsuit filed against Navy for destroyed experimental airship[EB/OL].(2015-03-10)[2016-04-25]. <http://www.foxnews.com/tech/2015/03/10/lawsuit-filed-against-navy-for-damaged-experimental-airship.html>.
- [15] Metzger A, Whalen K. A persistent enemy requires persistent surveillance[R/OL]. [2016-04-20]. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:JBAos3eWqRQJ:www.secretprojects.co.uk/forum/index.php%3Ftopic%3D10300.10%3Bwap2+&cd=2&hl=zh-CN&ct=clnk>.
- [16] Airlander 10 technical data[EB/OL]. [2016-04-25]. <https://www.hybridairvehicles.com/aircraft/airlander-10>.
- [17] Airlander[R/OL]. [2016-04-25]. <http://www.clivesimpson.co.uk/wp-content/uploads/AIR-Int-airlander-web-sept-14.pdf>.
- [18] 杨铁虎, 胡懿. 中法合作开发重载飞艇[EB/OL]. (2015-07-03)[2016-04-25]. <http://world.people.com.cn/n/2015/0703/c1002-27246266.html>.
- [19] Yang Tiehu, Hu Yi. Sino French cooperation in the development of heavy airship[EB/OL]. (2015-07-03)[2016-04-25]. <http://world.people.com.cn/n/2015/0703/c1002-27246266.html>.
- [20] 张斌. 068 基地双椭球体飞艇圆满完成首阶段航空物探飞行试验[EB/OL]. (2015-09-24)[2016-04-25]. <http://www.casic.com.cn/n103/n135/n1008321/c2392125/content.html>.
- [21] Zhang Bin. 068 base double ellipsoid airship successfully completed the first phase of aviation geophysical flight test[EB/OL]. (2015-09-24)[2016-04-25]. <http://www.casic.com.cn/n103/n135/n1008321/c2392125/content.html>.
- [22] 糜攀攀, 孟军辉, 吕明云. 浮升混合飞艇气动性能及总体参数分析[J]. 北京航空航天大学学报(自然版), 2015, 41(6): 1108-1116.
- [23] Mi Panpan, Meng Junhui, Lü Mingyun. Aerodynamic and overall parameters analysis of buoyancy-lifting hybrid airship[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1108-1116.
- [24] 孟军辉, 张一, 刘东旭, 等. 升力体式浮升混合飞艇设计及参数分析[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1500-1510.

- Meng Junhui, Zhang Yi, Liu Dongxu, et al. Design and parameter analysis of liftbody-type buoyancy-lifting hybrid airships[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(5): 1500-1510.
- [20] 龙飞, 黄龙太, 姜琬. 某常规飞艇与混合式飞艇总体设计和性能分析[J]. *航空工程进展*, 2012, 3(2): 150-155.
Long Fei, Huang Longtai, Jiang Wan. Overall design and performance analysis of a conventional airship and a hybrid airship[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2012, 3(2): 150-155.
- [21] 闫峰, 姜鲁华, 崔燕香. 飞艇外形布局气动特性分析[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(6): 97-102.
Yan Feng, Jiang Luhua, Cui Yanxiang. Aerodynamic performance analysis of layout of airship hull[J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(6): 97-102.
- [22] 李金明, 龙飞. 国外大型对流层飞艇发展现状、特点与趋势[J]. *航空科学技术*, 2015(1): 1-6.
Li Jinming, Long Fei. The development status and trend of large troposphere airship abroad[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2015(1): 1-6.
- [23] Amy Kronsteiner. PEGASUS[R]. California: California Polytechnic State University, 2010.
- [24] Prentice B E, Knotts R. Cargo Airships: International Competition[J]. *Journal of Transportation Technologies*, 2014, 4(3): 187-195.
- [25] 张伟. 大型载重飞艇的升力控制方法探索[J]. *科技传播*, 2014(12): 181-182.
Zhang Wei. Lift control method for large scale airship[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2014(12): 181-182.
- [26] Carichner G E, Nicolai L M. Hybrids...the airship messiah? [C]//AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology (LTA) Conference. Daytona Beach, Florida: AIAA, 2013.
- [27] 闫峰. 混合式飞艇气垫减震器分析与设计方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
Yan Feng. Analysis and design of air cushion shock absorber for hybrid airship[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [28] Hagenlocher K. Zeppelin NT[R]. New York: AIAA, 1993.
- [29] 麦田. 高空长航时竞赛——美国下一代无人机的探讨[J]. *航空世界*, 2014(1): 6-9.
Mai Tian. High altitude long endurance race—the next generation of unmanned aerial vehicles in the United States[J]. *Aviation World*, 2014(1): 6-9.
- [30] Buerge B. The Suitability of hybrid vs. conventional airships for persistent surveillance missions[R]. New York: AIAA, 2010.
- [31] 贺卫亮. 载重飞艇的适应性分析[R]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.
He Weiliang. Adaptability analysis of airship[R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

Overview of developing status quo and trend of modern heavy lift airships

YAN Feng, HUANG Wanning, YANG Yanchu, ZHU Rongchen

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Modern heavy lift airship is a new kind of air vehicles which employ traditional airship technology, fixed-wing aircraft technology, rotary-wing aircraft technology and hovercraft technology. It has become one of the most popular vehicles due to its transportation advantages such as large carrying capacity, high maneuverability and no need of ground infrastructure. This article overviews the developing status quo of heavy lift airships and introduces in detail some related projects of airships for technical demonstration. The feasibility of the technology is investigated in terms of aerodynamic shape, forming-defining elements, buoyancy control and air cushion landing system. Finally, the future development of modern heavy lift airships is predicted.

Keywords modern heavy lift airship; hybrid power sources; heavy lift; long endurance; air cushion landing system

(责任编辑 刘志远)