

平流层飞艇空气动力学研究进展

李峰, 叶正寅

(西北工业大学 翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室 陕西 西安 710072)

摘要: 平流层飞艇有着广泛的功能和用途, 随着科技的飞速发展, 世界上掀起了研究和开发平流层飞艇的热潮。综述了国内外对平流层飞艇空气动力学问题的研究现状及未来的发展趋势, 讨论了目前研究中需要解决的一些关键技术。在此基础上, 总结出今后研究的重点, 并为平流层飞艇的设计提供了参考依据。

关键词: 平流层; 飞艇; 气动特性

中图分类号: V211.54

文献标识码: A

平流层(海拔高度 20 ~ 50 km) 通讯技术是继卫星通信和蜂窝移动通信之后的又一项能引起信息技术领域重大变革的新技术, 平流层飞艇就是一种可工作在临近空间的很重要的飞行器。平流层飞艇具有长滞空时间(与飞机、导弹相比)和高分辨率(与卫星平台相比)等优点, 可以为空中预警、侦察、通信、监视等军事用途提供不可多得的空中载体, 从而必将成为未来飞艇的发展方向^[1-2]。

飞艇已走过了 150 多年的发展历史, 经历了研究探索、不断完善、兴旺发展、逐步衰败、重新复兴等发展阶段。过去的研究主要集中在飞艇的结构设计和动力推进系统上, 而对飞艇空气动力学问题的研究却相对较少, 目前还没有成熟的理论和经验公式可以遵循。事实上, 飞艇的气动特性对增升减阻以及飞行控制都有重要的意义, 特别是流线型的气动外形具有很大的研究和开发空间, 不但可以克服原来只靠空气浮力造成的升力不足的问题, 而且还可以有效的减小空气阻力, 从而给推进系统的设计带来便利。平流层飞艇的空气动力学问题研究与传统的飞机和导弹不同, 这使我们面临许多的新问题。文章通过近年来国内外对该问题的研究进展, 并对该领域需要研究的若干问题进行对比分析思考, 提出了相应的见解, 为进一步深入的研究提供参考。

1 工作环境的影响

平流层飞艇在升空、回收过程中经过对流层。对流层气压高, 空气密度大, 温度随高度的增加而降低, 气流具有强烈的对流、湍流运动, 并存在雨、雷电等自然现象。在平流层飞艇的驻空处(平流层), 风向和温度等相对稳定, 空气无强烈的对流运动、风场均匀, 无雨、雪、雷和电等气象现象, 并伴随有强烈的紫外线。

不同于一般的飞行器, 环境对平流层飞艇的气动性能的影响尤为明显。平流层飞艇是充气的柔性体, 要保持飞艇的气动外形, 就必须通过压力控制, 保持在整个飞行过程中的内外压差。一般可以通过两种方法保持飞艇形状: 一是对气囊进行充气、放气; 一是调整驻空高度。另外一方面, 平流层飞艇的主要升力源是空气的浮力, 其大小主要取决于空气密度。由于大气密度随着高度变化, 因此, 在飞艇前后各配有一个调整气囊, 通过对调整气囊的充放气, 获得浮力控制和纵向配平控制。平流层飞艇的主要工作状态是相对地面保持静止, 因此, 对飞艇的定点控制需要充分考虑高空大气环境的影响。通常根据风向、风速、位置姿态和热分布等信息, 计算出所需动力的大小和空气充放量, 再通过调整两端气囊的

压力和动力推进系统来实现飞艇的定点控制。此外,由于平流层昼夜的温差巨大,温度对飞艇气动外形的影响也非常明显。平流层飞艇的温度控制主要通过蒙皮材料和气囊。蒙皮材料要求耐环境性好,即能承受温度大范围变化($-55 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 左右)、湿度、紫外线的辐射和臭氧腐蚀等。对于气囊温度控制,一般采用对飞艇的上、下以及内表面涂以不同发射率的热控涂层材料,并辅助以内置风机通风装置的方法来增加气囊的温度均匀性^[3]。

2 平流层飞艇的受力和稳定性分析

2.1 受力分析

飞艇属于飘浮体,主要依靠浮力停留在空中。而且其体积庞大、速度缓慢,因此,平流层飞艇的受力情况与飞机这一类高速飞行器并不完全相同,而与水下静浮潜艇有很多类似之处。飞艇所受的外力可分为两类^[4]:

1) 静力,这里指重力和浮升力。飞艇依靠浮升气体产生的升力称为浮升力,区别于飞艇依靠发动机达到一定速度运动而产生的动升力。研究表明,浮升力随着囊体体积增大而增大,但随着高度的增大而减小。

2) 由于飞艇运动而引起的流体动力,包括由风引起的外力。通常将飞艇在实际大气环境中所受的流体动力分为由于惯性引起的流体惯性力和飞艇表面分布的气动压力这两类来考虑。对于流体惯性力,由于飞艇体积庞大,其惯性特性十分显著,因此,必须予以考虑,它与飞艇运动的加速度有关,一般用附加质量表示;后者可以按照飞行器的分析习惯称为空气动力,它与飞行速度关系密切。刘丹的计算表明^[5],附加质量对飞艇的运动有较大影响,附加质量的值不能任意假设。

2.2 稳定性分析

稳定性是飞艇一个固有属性,也是判断飞艇性能的重要依据。平流层飞艇的稳定性包括处于悬停状态的平衡稳定性和处于运动状态、在受到某种干扰作用后的运动稳定性,而后者对其运动规律和基本特性的影响尤为明显。平流层飞艇的运动稳定性可分为纵向和横向两个方面,欧阳晋通过理论分析结合数值仿真的方法对此进行了深入的研究,并得出了有价值的结论^[6]。

平流层飞艇的纵向扰动运动是振荡模态、快速阻尼模态和缓慢模态的线性组合。飞艇的纵向扰动

运动有振荡现象,在低速飞行($U < 6 \text{ m/s}$)时是稳定的,经过较长的过渡过程后运动参数均能够恢复到原平飞状态时的初始值,飞行高度也基本保持不变,随着飞行速度的增大,逐渐变为不稳定运动。

平流层飞艇的横向扰动运动是航向中立模态、滚转振荡模态、螺旋模态和侧滑阻尼模态的线性组合。飞艇的横侧向扰动运动有明显的滚转振荡现象,且振荡既不发散也不收敛,飞艇受扰后偏航角会以一定的速率持续增大,并逐渐进入螺旋运动,飞艇的侧滑运动收敛较快。总的来看,飞艇的横侧向扰动运动是不稳定的,但发散时间常数较大。

由此可知,平流层飞艇的纵向和横侧向扰动运动都是不稳定的。其实这是为了提高飞艇的机动性而有意采用了放宽静稳定性技术造成的。因为对于飞艇这种体积大、惯性大、机动性差的飞行器来说,如果将其设计成静稳定的,对操纵性的影响将会更大。为了提高操纵性,就必须增大尾翼的面积,从而增大了飞艇的重量和空气阻力,所以,目前的平流层飞艇大都设计为静不稳定的^[7]。然而,这样的话,飞艇在受扰动或机动飞行时就会出现稳定性不足或是不稳定的现象,因此,对飞艇自动控制系统的研制和开发将成为今后工作的重点之一。

3 平流层飞艇的气动特性分析

虽然飞艇是轻于空气的航空器,主要凭借空气静力升空,但是飞艇在空中的姿态控制仍是通过气动舵面来实现的。作为各种用途的平台,要使飞艇能够正常的工作,必须精确计算其所受的气动力。平流层飞艇的气动特性在其稳定性、运动轨迹和有效控制等方面起着重要的作用。

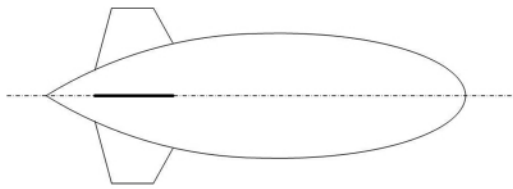


图1 飞艇外形示意图

3.1 常规布局飞艇的气动力分析

常规布局的飞艇一般由艇身和尾翼组成,如图1所示。根据其外形特点,可以将飞艇所受的气动力分成艇身和尾翼所受气动力两部分,并同时考虑艇体产生的上洗流场引起的尾翼气动力的变化和尾翼对艇身气动力的干扰作用。根据王晓亮的研究,每一部分的气动力可以按照无粘性流产生的线性气动力

和粘性引起的非线性气动力分别进行计算^[8]. 飞艇的艇身为旋成体, 艇身的线性升力和俯仰力矩可以根据不考虑粘性情况下的细长体理论得到; 根据 Allen 的横流阻力理论, 粘性效应对升力和俯仰力矩的贡献与位流无关, 非线性力由横向流动引起的圆柱体的阻力确定. Perkins 等人根据实验观察指出, 对于有攻角的旋成体, 其横向流动沿轴向的发展与从静止开始运动的二维圆柱绕流随时间的发展类似. 飞艇的阻力包括摩擦阻力、压差阻力和底面积引起的底阻三部分. 对于流线型艇身, 在零攻角时压差阻力很小, 一般只考虑摩擦阻力 C_{xmc} , 它与艇身表面的附面层状态、雷诺数、马赫数、艇身径长比 (D_{bd}/L_{sh}) 以及表面粗糙度等因素有关. 机身如有底部, 由于气流在底部分离而产生底部阻力. 底部阻力 C_{xdb} 可以用如下的经验公式估算.

$$C_{xdb} = \frac{0.029}{\sqrt{C_{xmc}}} \left(\frac{D_{bd}}{D_{sh}} \right)^3 \quad (1)$$

式中 (D_{bd}/D_{sh}) 为底部直径与艇身最大直径之比. 对于尾翼的气动力计算, 其线性部分可采用马蹄涡作为基本解, 马蹄涡的影响系数由两个半无限三角涡线的影响系数迭加得到. 飞艇在大攻角飞行时, 艇体会产生脱体涡系, 而尾翼处于艇身引起的干扰流场中, 所以在计算时必须考虑艇身涡系的洗流作用. 当尾翼处于大攻角来流时, 前缘和侧缘气流发生分离, 形成很强的脱体涡, 从而翼面上产生侧向流动, 形成附加的非线性升力 (涡升力), 这部分升力通常可由 Polhamus - Lamar 吸力比拟法进行估算.

3.2 气动外形的选择

平流层飞艇艇身的体积由飞艇的载荷和最大飞行高度确定, 而在体积确定的条件下, 不同的外形导致不同的气动阻力, 所以, 最佳艇身外形应以飞艇气动阻力最小为设计目标来确定. 文献 [9] 的研究表明, 飞艇艇身厚度率 d/l 对其体积阻力系数 C_{DV} 有很大影响. 体积阻力系数由公式 (2) 定义:

$$C_{DV} = \frac{0.172(l/d)^3 + 0.252(d/l)^{1.2} + 1.032(l/d)^{2.7}}{R_e^{1/6}} \quad (2)$$

总阻力系数 C_D 为:

$$C_D = \frac{C_{DV} S_{ref}}{S} \quad (3)$$

式中 l 为飞艇艇身长度, d 是艇身横截面最大直径, R_e 是长度雷诺数, S_{ref} 是参考面积, $S_{ref} = V^{2/3}$, S 是艇身总面积. 体积阻力系数 C_{DV} 与厚度率 d/l 的变化关系如图 2 所示, 可已看出, 在厚度率 0.22 附近 C_{DV} 取得最小值. 因此, 飞艇艇身厚度率应选在 0.20

~0.24 范围之内. 在相同体积和厚度率的情况下, 不同的艇身外形子午线形状也会导致不同的阻力. 金安帆的研究表明^[10], 同为椭圆前体的艇身, 选用三次有拐点曲线尾段比选用直线段和椭圆外型产生的阻力要明显减小.

3.3 飞艇的柔性变形

平流层的密度较小, 仅为海平面的 1/13. 为了保证飞艇有足够的浮力使其停留于平流层, 通常要求平流层飞艇有足够大的体积, 其长度一般为 200 m 以上. 同时, 飞艇重量又不宜太大, 一般采用较轻的软体材料, 其整体刚度较小, 类似为弹性薄膜结构. 飞艇的外膜在外围流场作用下会有较大变形, 外围的流场状态分布又与其形状有着密切的关系, 所以, 为了更好的研究飞艇飞行的气动特性, 应将处在平流层的飞艇视为柔性体, 从流固耦合的角度来作进一步的分析. 上海交通大学的刘建闽利用数值计算方法对此进行了探索性研究^[11], 结果表明: 艇身变形量大小随来流速度增大而增大, 最大变形量的横截面一般出现在中前部范围, 这主要与艇身外形轮廓线曲率半径、来流速度以及攻角有关. 在气动弹性变形条件下与不考虑流场和飞艇变形耦合条件下艇体的气动参数在小流速下差别不大, 在高流速条件下有一定的差别, 气动参数的差别随着来流速度的加大而变大. 气动参数的差别还随着来流攻角的加大而变大. 气动变形对气动阻力系数的影响相对较小, 对气动升力系数的影响相对较大. 这样的差别将对飞艇的动力系统和控制系统带来一定影响.

然而, 由于目前尚无合适的柔性体气动力模型试验的相似律, 国内外对上述问题只做过一些数值模拟方面的初步探讨, 今后还需要对此做更加深入的攻关性研究.

4 结束语

平流层飞艇一个包含多种交叉学科的高、精、尖技术的项目, 特别是对其空气动力学问题的研究具有深远的意义和广阔的前景. 文章从多个角度介绍了目前国内外对平流层飞艇空气动力学问题的研究动态, 提出了未来平流层飞艇的发展趋势, 为进一步的研究给出了参考和依据.

参考文献:

[1] 张宇文. 鱼雷弹道与弹道设计 [M]. 西安: 西北工业大学

- 出版社,1999.
- [2] 欧阳晋,屈卫东,席裕庚.平流层验证飞艇的建模与分析[J].上海交通大学学报,2003,33(6):956-960.
- [3] 邓黎.平流层飞艇的环境控制[J].航天返回与遥感,2006,27(3):51-56.
- [4] 施生达.潜艇操纵性[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [5] 刘丹,王晓亮,单雪雄.平流层飞艇的附加质量及其对飞艇运动的影响[J].计算机仿真,2006,23(6):52-56.
- [6] 欧阳晋.空中无人飞艇的建模与控制方法研究[D].上海:上海交通大学,2003.
- [7] Nagabhushan B L, Tan S B. Directional control of an advanced airship [J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(5): 895-900.
- [8] 王晓亮,单雪雄.流层飞艇空气动力估算[J].力学季刊,2006,27(2):295-304.
- [9] Gillett J D. Airship Technology [J]. Cambridge Aerospace Series, 1999, 2(2): 181-188.
- [10] 金安帆,宋文萍.基于阻力气动特性计算的飞艇艇身外形研究[J].航空计算技术,2006,27(2):100-103.
- [11] 刘建闽,薛雷平,鲁传敬.平流层飞艇绕流场与柔性变形的数值模拟[J].力学季刊,2006,27(3):440-448.

Advances in Aerodynamics Research of Stratospheric Airship

LI Feng, YE Zheng-yin

(National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, NWPU, Xi'an 710072, China)

Abstract: Stratospheric airship provides a variety of functions and uses. With the development of science and technology, many countries in the world have a strong interest in developing stratospheric airship. The present research situation and future development trend of stratospheric airship are surveyed and several key technologies are discussed. On this basis, the emphasis of future work of stratospheric airship is summarized and the reference data for future design of stratospheric airship is provided.

Key words: stratosphere; airship; aerodynamic characteristics

(责任编辑:李萍)