

临近空间环境对高空飞艇长时驻空影响研究进展

冯 慧¹ 刘 强¹ 姜鲁华² 苗景刚¹ 杨燕初¹

(1. 中国科学院光电研究院,北京,100094;2. 中国科学院高能物理研究所,北京,100049)

摘要:临近空间长航时浮空平台具有极大应用价值,高空飞艇与超压气球成为当前研究热点。从近年各国试验情况来看,国外已成功实现超压气球在临近空间高度的长航时飞行,但要实现高空飞艇长时驻空飞行,还有诸如环境预测、材料、能源、推进等很多关键技术需要突破。本文分析了临近空间环境要素特征,重点研究了大气密度、温度、风场、辐射和臭氧等要素对飞艇的影响,并借鉴超压气球高度、轨迹以及压力控制等相关技术,探索研究高空飞艇长航时驻空飞行的技术途径,对高空飞艇设计、研制与飞行控制有一定参考价值。

关键词:临近空间;大气环境;高空飞艇;长时驻空;超压;轨迹控制

中图分类号:V11 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2017)S-0069-07

Research Progress of Near-Space Environment Effects on High Altitude Airship Long Duration Flight

FENG Hui¹, LIU Qiang¹, JIANG Luhua², MIAO Jinggang¹, YANG Yanchu¹

(1. Academy of Opti-electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing,100094, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing,100049, China)

Abstract: The near-space long duration lighter-than-air has great applications, so the high altitude airship and super-pressure balloon have been attracting worldwide interest. The long duration flight of super-pressure balloon in the near-space had been successfully achieved abroad. To accomplish the long duration flight of airship in the near-space, the core technologies in the fields of environment prediction, airship envelope material, power supply, propulsion, etc, needs breakthrough advancements. This study analyzes the environment elements of the near-space, and researches the influence of the atmospheric density, atmospheric temperature, wind field, ozone, and radiation on the airship. Moreover, the altitude, trajectory and pressure control technologies of the super-pressure balloon are investigated, and the feasible technologies for the high altitude airship long duration flight are proposed, which is useful for high altitude airship design, manufacture and flight.

Key words: near-space; atmosphere environment; high altitude airship; long duration flight; super pressure; trajectory control

临近空间一般指距地面 20~100 km,介于传统航空航天之间的稀薄大气层,临近空间长航时浮空平台包括超压气球、高空飞艇等,具备载重高、驻空时间长、覆盖范围大和探测精度高自身独特优

势^[1-2]。

超压气球属于高空气球发展的新形式,一般不具备动力装置,主要利用临近空间风场环境实现长航时飞行,具有一定程度的轨迹控制能力。美国

基金项目:国家高分辨率对地观测系统(Y14202A16N)资助项目。

收稿日期:2017-05-15;**修订日期:**2017-06-20

通信作者:冯慧,女,工程师,E-mail:fh@aoe.ac.cn。

引用格式:冯慧,刘强,姜鲁华,等. 临近空间环境对高空飞艇长时驻空影响研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2017,49(S):69-75. FENG Hui, LIU Qiang, JIANG Luhua, et al. Research progress of near-space environment effects on high altitude airship long duration flight[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017,49(S):69-75.

NASA 的 ULDB 超压气球项目在 2008 年完成了飞行时间长达 54 天的环绕南极三圈的飞行试验,平飞段记录的昼夜间高度波动在其驻空高度 100~150 m 的范围内^[3-5]。

高空飞艇与超压气球在工作模式上有所区别,高空飞艇具备动力,一般工作在距地面 18~30 km 附近的高度区域,利用环境条件相对稳定的平流层中下部,具备定点、盘旋或低速飞行的能力^[6]。高空飞艇系统属于体积庞大的复杂工程系统,要最终实现其长时驻空飞行,不仅仅是飞艇本身的问题,还涉及到环境、能源、材料和控制等诸多学科的配合和突破。本文研究分析了临近空间环境要素特征及对飞艇的影响,分析影响高空飞艇长时驻空的关键问题,探索可能的解决途径。

1 临近空间高空飞艇发展现状

近年来,美、欧、俄、日等先进国家先后启动了高空飞艇研发工作。但随着研究的深入,高空飞艇的技术难度也逐渐被重新认识,以美军为例,自 2007 年以来先后投资近 70 亿美元用于 15 个“投资超过 100 万美元、既包括平台又包括载荷”的“重要”飞艇项目。这些项目中,包含 4 个飞行高度在海拔 18 km 以上的高空飞艇,其中 3 个项目因多种原因已经终止,1 个项目仍在继续研究。从其运行结果看,飞行试验过程中故障频发,关键技术解决途径的风险估计不足,顶层规划不够严谨,造成资源浪费^[7-9]。

其他在高空飞艇研究方面投入较大的国家是日本,其同样在 20 世纪 90 年代末期至 21 世纪初期将平流层飞艇列为重大发展计划,但经数十年发展,除在 2003 年曾尝试将实验飞艇(未带能源系统)送至 16.4 km 高度后,其后转向对蒙皮材料、能源电池等单项关键技术的攻关^[10]。

中国相关浮空器研制单位也于“十一五”、“十二五”期间开展了高空飞艇的研制与飞行试验的工作,在平流层飞艇飞行试验方面取得一定的工作进展,但已开展的少数飞行试验多为缩比飞行或单项关键技术验证,尚未真正实现长时驻空飞行。

从国内外高空飞艇研究进展来看,迄今为止,尚未有长航时飞行试验的成功案例,人们在该领域并未取得根本性重大工程突破。究其原因:(1)相比对流层与空间环境,临近空间缺乏长期观测数据的积累,对其认识、研究和应用相对落后^[11-12];(2)浮空器本身对于大气环境的敏感度较高,临近空间复杂的环境对于高空飞艇长时驻空飞行带来更大挑战;(3)高空飞艇本身诸如材料、能源和动力等多项单项技术还需要进一步发展^[13],目前难以满足

飞艇长时驻空的需求,较多文献对此已加阐述,本文不再累述。本文重点研究环境高特征以及对长航时高空飞艇驻空的影响。

2 临近空间环境特征及对高空飞艇的影响

临近空间涵盖的空间位置比较复杂,包括平流层(对流层顶~55 km)、中间层(平流层顶~85 km)和热层底层,同时又包含了整个臭氧层和电离层 D 层(50~90 km)和 E 层(90~130 km)。其下层受对流层大气活动影响比较明显,对流层顶高度随地理纬度和季节而变化,在低纬度地区平均高度为 17~18 km,在中纬度地区平均为 10~12 km,在极地地区平均为 8~9 km,并且夏季高于冬季。临近空间上层主要受到太阳辐射和宇宙射线的影响。

临近空间大气稀薄,仅占地球大气总质量 9%,气象要素分布复杂,包括大气密度、温度、压力、风场、臭氧及辐射等,以下对各环境要素的影响加以分析。

2.1 临近空间大气密度与压力特征及影响

重力场中临近空间范围地球大气可视为由多种气体成分组成的均匀混合物,大气密度与大气压力随海拔高度增加近似以指数规律单调下降,如图 1 所示。20 km,密度约为海平面的 7%,大气压力约 5 500 Pa;高度 30 km,大气密度约为海平面的 1.5%,气压约 1 170 Pa;100 km 处密度为海平面百万分之一,已接近真空。

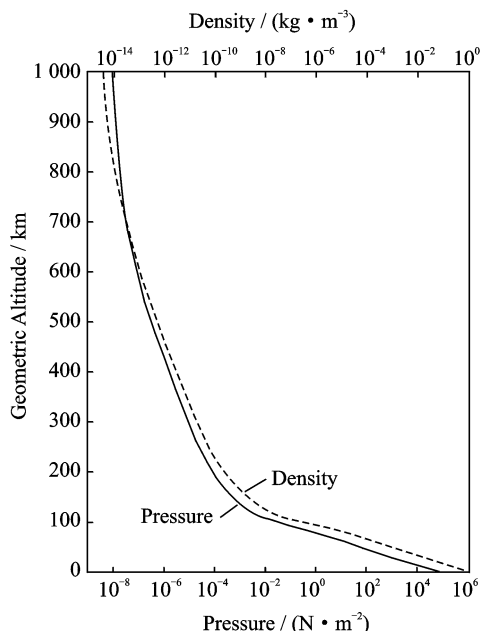


图 1 大气压力与密度同海拔高度的关系

Fig. 1 Total pressure and mass density as a function of geometric altitude

大气密度、压力随高度增加快速下降,对高空飞艇总体设计、驻空高度与动力推进系统等带来很大挑战:

(1)影响高空飞艇平台工作高度和体积,在临近空间每增加 1 kg 的质量,需要近百立方米氦气囊体积来补偿。寻找轻质结构、蒙皮材料以及布局优化减重设计极其重要。

(2)对飞艇驻空过程中的压力控制、高度控制带来困难。以某常规流线型飞艇为例,艇体内部通常采用主、副气囊结构,通过对副气囊充、放空气进行艇体压力控制。以某常规飞艇为例,当飞艇由驻空高度 20 km 下降至 19 km 时,若无其他高度调节手段,艇体副气囊需充空气方可平衡浮力增加,副气囊体积需增大万余立方米,这要求副气囊需有足够的余量,带来艇体体积增大、重量增加,而且对高空风机的工作效率提出很高要求。反之亦然,飞艇高度升高,需要副气囊排出空气,主气囊需有足够余量。

(3)对飞行平台的动力和推进系统的选择带来困难。一是临近空间环境普通燃油发动机无法正常工作,只能采用带压缩机的涡轮发动机或电动机加螺旋桨来提供动力。二是动力推进效能也会降低,飞艇驻空过程迎风定点或巡航下,动力控制困难,能耗高。

2.2 临近空间大气温度特征及影响

采用美国标准大气模型^[14],临近空间区域大气温度垂直分布如图 2 所示。由图 2 可见,临近空间温度特征较为复杂,在 10~20 km,大气温度基

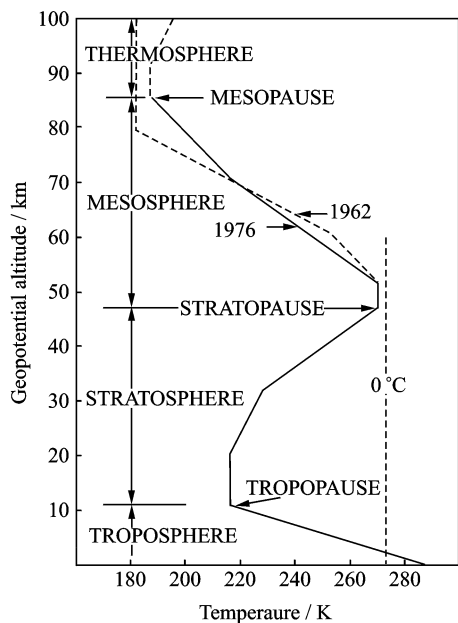


图 2 美国标准大气模型温度-高度变化曲线

Fig. 2 Temperature-height profile for U S standard atmosphere

本恒定在 $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$,即所谓的同温层。在 20~50 km 范围内,气温随海拔高度的上升而增加,每千米约能升温 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,平流层顶 50 km 处,气温升至 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这个大气圈层温度升高的主要原因是高浓度臭氧吸收大量空间紫外线。

临近空间的温度特征使高空飞艇长时驻空飞行面临复杂的热环境,一方面,高度 20 km 处飞艇表面与周围环境间有较大的温差,这有利于对流换热;另一方面,临近空间上方大气稀薄,有利于辐射散热。研究飞艇对流换热与辐射换热强弱变化对于设计飞艇热控措施具有重要意义。国内相关实验证明,高空飞艇长时昼夜驻空过程面临温度升高带来的“超压”问题,若不施加热控措施,白天太阳直接辐射引起氦气和外界大气温差可超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜晚则基本一致^[15]。温度升高导致气囊膨胀,囊体压差变化,超过艇体材料承受范围,此时需对艇体排放气,将引起飞艇浮力重力不平衡问题,驻空高度随之涨落。若无其他浮重平衡措施,飞艇将失去驻空能力。

若单纯依赖囊体材料承压而不排放气体,就要求囊体材料必须具有很高的抗压性。文献[16]研究了直径约 20 m 正球形浮空器,在其设计驻留高度 20 km 处,白天内外压差须达到 1 000 Pa 以上,才能抵抗 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差作用,此压差变化对目前常规高空飞艇囊体材料抗压强度带来很大挑战。

因此,要实现高空飞艇的长时驻空,需要研究飞艇散热特性与飞艇换热机制,提出有效的热控措施,降低温度升高带来的“超压”。文献[17]综合考虑临近空间范围大气温度、密度和压力,气体导热系数、粘度以及空间辐射背景等因素,对高空热控过程中关键的散热特性问题进行了比较分析,并计算给出 33 km 可作为飞艇辐射换热、对流换热强弱的分界点,33 km 以下范围,对流换热效果占主导。

2.3 临近空间大气风场特征及影响

高空飞艇为了定点、盘旋以及低速巡航,目前一般采用的技术方案是整体采用流线型气动布局,以降低平飞阻力及对能源的需求。能源系统采用太阳能电池与储能系统相结合的循环能源系统,动力采用电机驱动螺旋桨的形式。

飞艇在定点驻留或机动飞行时,为克服平流层水平风的影响,螺旋桨需始终工作,由此带来能耗问题对循环能源系统的设计提出很大挑战。鉴于目前能源技术发展现状,太阳能电池的转化率、储能电池的功率质量比还需进一步提高。

为减小高空飞艇长时飞行的能耗,除优化飞艇总体设计,减小风阻外,还可充分利用临近空间风

场的环境特性。临近空间平流层高度范围大气运动主要以东西方向的水平运动为主,基本无垂直运动。

2002年,吕达仁^[18]等提出准零风层概念,在平流层底部20 km附近的大气层中,上下层纬向风风向相反。准零风层下部为著名的西风带,随着高度的上升,风速会逐渐减小,到达一定高度后,风速减为零,随着高度的继续增加,风向变为东风;在准零风层的高度内,南北方向风速维持在较小的量级^[19]。作为利用风场剖面的一个案例,文献^[20]基于平流层底部准零风层的概念,研究了定点浮空气球轨迹控制问题,基本结构为高空气球下方通过系缆吊装轨迹控制器,轨迹控制器位于气球下方6~8 km的西风激流区中,通过调整轨迹控制器的翼面与舵面,对高空气球的轨迹进行控制。

现有的观测数据表明,风场随经纬度、高度发生改变^[21]。此时,准确寻找零风层,以及获得零风层的变化规律成为亟待解决的问题,目前尚缺乏详实的准零风层的位置数据。应结合地基与天基观测手段,寻找具体驻空区域下的准零风层,进而对其加以利用。

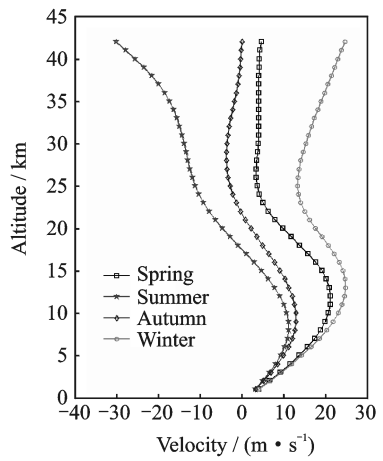
水平风场分布随经纬度、季节存在不同,以HWM2007模型计算北京上空风场,风场数据如图3所示,水平纬向风和经向风随季节而变化,其中纬向风在夏至和秋分时存在零风层,该层纬向风速为零,上下存在东西风切变。经向风在25 km以上,风速随海拔高度变化比较大。

2.4 臭氧及紫外辐射特征及其影响

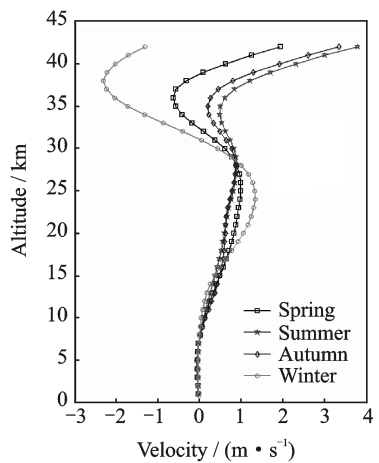
臭氧主要分布在10~50 km的平流层大气中,极大值在20~30 km之间,浓度最大可达720 DU(多普逊臭氧单位),约为地面臭氧浓度的50倍,这里臭氧总量是大气臭氧总量的1/2。臭氧可吸收太阳紫外辐射,是平流层上部分大气增温的主要原因。

紫外线是电磁波中10~400 nm辐射的总称,强弱取决于太阳高度角,波长短于300 nm的所有紫外辐射虽只占太阳总辐照约1%,但影响很大。紫外线光子能破坏分子聚合物的化学键,引起光化学反应,造成聚合物分子量降低,材料分解裂析、变色、抗拉强度降低,并改变热控涂层光学性质,使表面逐渐变暗,对太阳辐照的吸收率显著提高,影响飞艇的温度控制。

紫外线和臭氧会影响橡胶、环氧树脂粘合剂性能的稳定性,有实验数据表明,臭氧与紫外线对高空飞艇蒙皮材料老化程度影响非常显著^[22-23],日本、美国相关机构对几种商品化高强纤维(Vectran, Zylon, Spectra 和 Kevlar)采用氙弧灯进行



(a) Zonal wind component



(b) Merid wind component

图3 大气风场模型速度-高度变化曲线

Fig. 3 Mean horizontal wind profile

500 h加速老化地面模拟试验,此外还进行透湿试验、臭氧曝置和户外曝置试验,材料的强度损失可达27%~60%。

高空飞艇在临近空间长航时驻空飞行,蒙皮材料经紫外线和臭氧的共同作用,其老化程度远大于地面模拟试验。2004年,日本航空宇宙技术研究所将Vectra和Zylon蒙皮材料安装到飞行试验飞艇上,对蒙皮材料性能进行评估,飞行试验结果表明,没有进行防紫外老化处理的Zylon蒙皮材料强度下降了40%^[24],而该飞艇驻空时间仅为30 min。此外,飞艇长时驻空过程中,蒙皮材料老化影响材料阻隔性能,导致艇体氦气渗漏扩大,这对飞艇驻空时间带来不利影响。这要求未来囊体发展需要在高效超轻耐候层开发、提高耐紫外性能和隔热功能、增加蒙皮材料承力层拉伸强度以及提高蒙皮材料性能预报能力等方面开展研究与技术攻关。

临近空间环境要素复杂,本身相互影响,高空飞艇长航时驻空飞行能力与多个环境要素耦合。从高空飞艇长航时驻空飞行控制的角度考虑,需重点关注的问题有:大气温度与太阳辐射引起的飞艇

昼夜驻空巨大温差变化,进而带来的飞艇艇体超压问题;风场环境特征下飞艇长期驻空的适应性以及风场环境下的轨迹控制问题,后一问题难点在于大气密度随海拔升高而明显降低引起的飞艇高度控制困难。

3 高空飞艇长航时驻空飞行技术

3.1 超压气球长航时驻空技术

美国 NASA 的 ULDB 项目团队经多次探索与技术攻关,已成功开展了多次长航时飞行试验,其长航时飞行成功的经验与关键技术对探索高空飞艇长时驻空技术的解决途径很有借鉴意义。分析其长航时驻空飞行技术,可分两个方面。

(1)耐超压的球体结构,其球体完全封闭并能承受较大的内外压差,具有昼夜循环中驻空高度稳定的优点。在飞行过程中,温度变化引起的内外压差变化完全由球体承受,不需排出任何气体或释放压舱物便可维持高度。若不计球体氦气泄露,其浮升气体量、球体体积基本保持恒定,在总重不变、外界环境变化不大的情况下,可以实现长时间驻空飞行。

(2)轨迹控制技术能力,通过对准零风层的预测和跟踪,采用调节副气囊等手段对超压气球飞行高度进行主动控制,将球体移动至预定前进的风层,并利用该层风场将球体运动方向和速度转变为预定状态,从而实现对气球轨迹的修正。

3.2 高空飞艇长航时驻空技术方法探索

3.2.1 飞艇艇体抗超压技术

借鉴超压气球的结构特点,高空飞艇艇体抗超压的实现方式目前大致有两类途径:

(1)优化艇体构型以降低飞艇蒙皮材料上的应力,或寻求创新、对重点部位进行加强筋设计来提高囊体材料强度。计算结果表明,不同的结构布局对平流层飞艇蒙皮应力和位移的影响较大,合理的艇形设计能充分发挥材料的受力性能,使囊体受力、变形较小,且比较均匀^[22-23]。

日本学者基于南瓜型超压气球原理提出设计了一个 48 m 长的南瓜型组合式飞艇结构(如图 4 所示),从而将蒙皮材料的强度重量比提高到常规飞艇的 6 倍^[27]。有中国学者提出带充气骨架的空中展开飞艇^[28],该艇形继承空中展开飞艇独特升空方式优势,在飞艇的纵向布置刚性骨架,环向布置由薄膜材料制成的充气骨架,形成一种带刚柔混合骨架的新型空中展开飞艇(见图 5)。这两种方案,都可以在不改变囊体材料约束的基础上提高承压能力,不过艇体构型的设计是综合考虑气动力、结构强度以及重量平衡等多个因素进行互相平衡

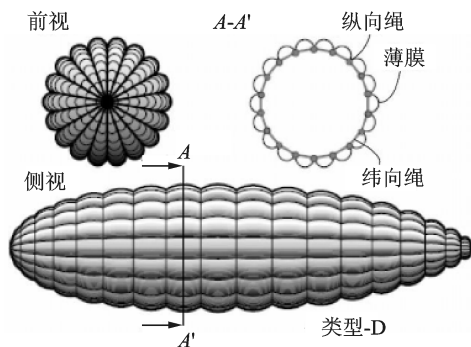


图 4 日本新概念南瓜型组合飞艇结构示意图

Fig. 4 New concept Japanese pumpkin airship structure diagram

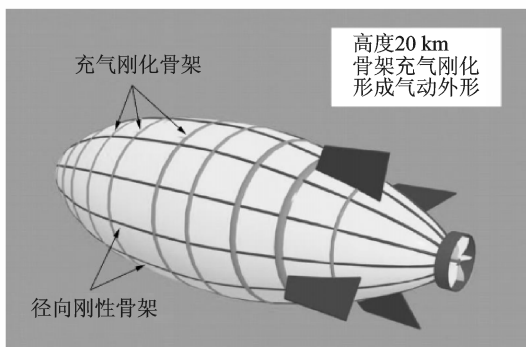


图 5 带充气骨架的可展开飞艇结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of deployable airship with inflatable skeleton

的最优结构,需要进行全方位考量。

(2)艇体的超压主要是由于临近空间环境下昼夜驻空、温度变化引起的,因此还可以考虑热控措施,通过主动换热的方式降低艇体内气体温度,进而降低艇体超压。热控措施包括加大对流换热能力、选用吸发比小的蒙皮材料或者对蒙皮材料进行散热涂层,强化换热等措施。

3.2.2 风场特性下的飞艇轨迹控制技术

应考虑对飞艇实施主动控制,寻找准零风层或风速小的飞行区域,减小动力推进能耗。临近空间风场环境下,轨迹的控制通过水平位置与高度控制实现,难点在高度的控制,目前有两种主要途径:

(1)采用飞行控制手段,通过实施姿态控制、矢量推力等手段进而改变飞艇的高度。这种方式与飞艇驻空飞行要求一致,但需要额外的功耗。

(2)采用压力控制手段,飞艇利用风机对副气囊进行充放气,改变系统重量,通过调节飞艇浮重平衡进而控制飞艇驻空高度的变化。这种方法的优点是简单易行、结构和能源消耗较少;缺点则是目前高空风机的流量受限,调节周期较长,适合较长时间尺度(如几小时到一个昼夜)的高度调节。

以上两种方法也可以配合使用,结合地面风场

实测数据,对飞艇做能耗最优的航迹规划,共同实现对飞艇的高度控制,使飞艇进入准零风层区域或风速较小的区域驻空飞行。

4 结 论

从目前高空飞艇发展现状来看,要真正实现临近空间高空飞艇长航时驻空飞行,取得工程性重大突破,不仅需进行材料、能源和推进等单项关键技术攻关,提高其性能指标,还需关注临近空间环境要素特征及其对高空飞艇长航时驻空的影响,针对飞艇长航时飞行中的关键问题,提出了可行的技术途径,包括:

(1)临近空间大气温度、压力和太阳辐射等多种因素互相作用引起的飞艇昼夜驻空过程巨大温差变化,带来艇体超压的问题;臭氧及紫外辐射则引起飞艇蒙皮材料老化,包括材料强度降低、阻隔性能下降等问题,影响飞艇驻空时间。针对艇体抗超压、材料老化问题,一方面开展技术攻关,提高囊体材料性能、进行抗老化处理;另一方面,可考虑优化艇体构型、开展主动热控等措施增强艇体抗超压能力。

(2)临近空间风场环境特征下飞艇长期驻空适应性问题的。针对飞艇高度控制、压力控制综合作用下的轨迹控制问题,借鉴超压气球长航时飞行的经验与技术,提出采用姿态控制、矢量推力和压力控制等技术途径,主动控制飞艇高度与轨迹,有效利用风场特性降低能耗。

以上研究可为高空飞艇总体方案设计与飞行提供一定的参考价值,后续针对飞艇超压与轨迹控制问题还需进一步深入研究。

参考文献:

[1] 赵达,刘东旭,孙康文,等. 平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势[J]. 航空学报,2016,37(1):45-56.
ZHAO Da, LIU Dongxu, SUN Kangwen, et al. Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 45-56.

[2] 郭岗,申卯兴. 临近空间军事应用现状及发展趋势[J]. 飞航导弹,2012(2):16-21.
GUO Gang, SHEN Maoxing. Status and development of near-space military application[J]. Winged Missiles Journal, 2012(2):16-21.

[3] 祝裕辰,王生,姜鲁华. 长航时超压气球技术的发展现状[C]// 2014年中国浮空器大会论文集. 哈尔滨:[s. n.],2014:15-24.
ZHU Rongchen, WANG Sheng, JIANG Luhua. Sta-

tus of long duration super-pressure balloon technology[C]// The Proceedings of Aerostat Conference of China 2014. Harbin:[s. n.], 2014:15-24.

[4] FAIRBROTHER D A, PIERCE D L. NASA balloon program status[C]// AIAA Balloon Systems Conference. Seattle, Washington:AIAA, 2009:2800.

[5] CATHEY H M. The NASA super pressure balloon—A path to flight[J]. Advances in Space Research, 2009, 44: 23-38.

[6] 唐克,冯宝龙,谢保军. 临近空间飞行器开发利用现状与发展趋势[J]. 飞航导弹,2012(11):44-48.
TANG Ke, Feng Baolong, Xie Baojun. Status and development of the near-space vehicles utilizing[J]. Winged Missiles Journal, 2012(11): 44-48.

[7] 李联合,程建,王庆. 美军临近空间飞艇项目建设情况及启示[J]. 装备学院学报,2015, 26(1):63-67.
LI Lianhe, CHENG Jian, WANG Qing. Analysis of the near space airship projects of US army and its enlightenments[J]. Journal of Equipment Academy, 2015, 26(1):63-67.

[8] ANDROULAKAIS S P, JUDY R A. Status and plans of high altitude airship program[C]// AIAA Lighter-than-Air Systems Technology Conference. Daytona Beach Florida,[s. n.],2013.

[9] OLIVEIRA F A, MELO F C. DEVEZAS T C. High-altitude platforms present situation and technology trends[J]. Aerospace Technology Management São José dos Campos, 2016, 8(3):249-262.

[10] 洪延吉,金星,李小将,等. 临近空间飞行器技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012:11-14.
HONG Yanji, JIN Xing, LI Xiaojiang, et al. Near-space vehicles technologies [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012:11-14.

[11] 杨秉,杨健,李小将,等. 临近空间飞艇运行环境及其影响[J]. 航天器环境工程,2008,25(6):555-557.
YANG Bing, YANG Jian, LI Xiaojiang, et al. Near-space airship working environment and effects[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 555-557.

[12] 孙磊,廉璞,常晓飞,等. 临近空间大气环境建模及其对飞行器影响[J]. 指挥控制与仿真,2016,38(5): 107-111.
SUN Lei, LIAN Pu, CHANG Xiaofei, et al. Near space atmosphere modeling and its effect on the aircraft[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(5): 107-111.

[13] AGLIETTI G S, MARKVART T, TATNALL A R, et al. Solar power generation using high altitude platforms feasibility and viability [J]. Progress in Photovoltaic: Research and Applications, 2008(16): 349-359.

[14] U S Standard Atmosphere[R]. U S. Government

- Printing Office, Washington D C,1976.
- [15] LIU Qiang, YANG Yanchu, CUI Yanxiang, et al. Thermal performance of stratospheric airship with photovoltaic array [J]. *Advances in Space Research*, 2016.
- [16] 刘东旭,樊彦斌,马云鹏. 氦气渗透对高空长航时浮空器驻空能力影响[J]. *宇航学报*, 2010, 31(11): 2477-2482.
- LIU Dongxu, FAN Yanbin, MA Yunpeng. Effect of helium permeability on working endurance high altitude long duration LTA vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(11):2477-2482.
- [17] 马伟,宣益民,韩玉阁. 临近空间热环境分析及低速飞行器的热设计方法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(5): 1272-1277.
- MA Wei, XUAN Yimin, HAN Yuge. Thermal environment analysis and thermal design principle of stratospheric vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1272-1277.
- [18] 吕达仁,孙宝来,李立群. 零风层与我国首次高空气球停留试验[J]. 目标与环境特性研究, 2002, 22(1):45-51.
- LU Daren, Sun Baolai, Li Liqun. Zero wind layer and the first dwell experiment of high-altitude balloon in china[J]. *Target Environment Feat*, 2002, 22(1):45-51.
- [19] 陶梦初,何金海,刘毅. 平流层准零风层统计特征及准两年周期振荡对其影响分析[J]. *气候与环境研究*, 2012, 17(1):92-102.
- TAO Mengchu, HE Jinhai, LIU Yi. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer and the effects of the quasi-biennial oscillation on it[J]. *Climatic and Enviromental Research*, 2012, 17(1):92-102.
- [20] 常晓飞,白云飞,符文星,等. 基于平流层特殊风场的浮空器定点方案研究[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(1):12-17.
- CHANG Xiaofei, BAI Yunfei, FU Wenxing. Research on fixed point aerostat based on its special stratosphere wind field[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(1): 12-17.
- [21] 赵佳莹,徐海明. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19(5): 587-600.
- ZHAO Jiaying, XU Haiming. Comparison of wind velocity among reanalysis and radiosonde datasets over China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(5): 587-600.
- [22] 谭惠丰,刘羽熙,刘宇艳,等. 临近空间飞艇蒙皮材料研究进展和需求分析[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(6):1-8.
- TAN Huifeng, LIU Yuxi, LIU Yuyan, et al. Research progress and requirement analysis of envelope materials for near space airship[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(6):1-8.
- [23] 王兆希,窦宝峰,逢型召. 平流层浮空器用柔性复合材料的断裂性能[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(2): 211-216.
- WANG Zhaoxi, DOU Baofeng, PANG Xingzhao. Fracture properties of flexible composites from aerostat[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(2):211-216.
- [24] SHOJI M, Kouichi S, Toyotoshi K. Tear propagation of a high-performance airship envelope material[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(5):1546-1553.
- [25] 高海健,陈务军,付功义. 平流层验证飞艇结构体系比较研究[J]. *宇航学报*, 2011, 32(4):713-720.
- GAO Haijian, CHEN Wujun, FU Gongyi. Comparison investigation for architecture of stratospheric demonstration airship[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(4): 713-720.
- [26] 王全保,陈吉安,段登平,等. 平流层飞艇外形的设计优化[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(9):44-47.
- WANG Quanbao, CHEN Jian, DUAN Dengping, et al. Shape optimization of stratosphere airship[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(9):44-47.
- [27] SMITH M S, Lee E. Applications of scientific ballooning technology to high altitude airships [R]. AIAA-2003-6711, 2003.
- [28] 谭惠丰,王超,王长国. 实现结构轻量化的新型平流层飞艇研究进展[J]. *航空学报*, 2010, 31(2):257-264.
- TAN Huifeng, WANG Chao, WANG Changguo. Progress of new type stratospheric airships for realization of lightweight[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(2):257-264.