

文章编号:1000-6893(2009)04-0577-07

平流层浮空器的热特性与研究现状

夏新林, 李德富, 杨小川

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

Thermal Characteristics of Stratospheric Aerostats and Their Research

Xia Xinlin, Li Defu, Yang Xiaochuan

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 研究平流层浮空器热状况的形成机制与特性是进行热控制设计和研究热控制技术的前提,对平流层浮空器技术的发展具有重要作用。在分析平流层对流与辐射热环境特性的基础上,运用传热学基本原理分析了浮空器热状况的复杂形成机制与影响因素。评述了浮空器热特性及其控制技术的研究现状,介绍了相关研究方法、热模型与主要结果,分析了平流层浮空器热特性研究得出的基本认识与存在的问题,指出了应进一步开展的研究方向。

关键词: 平流层浮空器; 热环境; 热特性; 热控制; 传热学

中图分类号: V274 **文献标识码:** A

Abstract: Knowledge of the heat transfer mechanism and thermal characteristics of stratospheric aerostats is the precondition of thermal control design, which is crucial to the development of stratospheric aerostat technology. On the basis of analyzing the convective and radiative thermal environment of the stratosphere, the heat transfer principle is employed to analyze the complex mechanism governing the thermal status of stratospheric aerostats and the influencing factors. After that, the latest research advances in the thermal characteristics of stratospheric aerostats are reviewed. The relevant methods, thermal models and typical results are introduced. The primary conclusions obtained from these advances as well as existing problems are discussed. Finally, the further research areas for the thermal characteristics of stratospheric aerostats are proposed.

Key words: stratospheric aerostat; thermal environment; thermal characteristics; thermal control; heat transfer

平流层浮空器是一种轻于空气的飞行器,具有留空时间长、效费比高、安全性好等优点,在预警监测、导航、通信中继等领域有广泛的应用前景。近年来,对平流层浮空器的研究引起了重视,许多研究机构开展了平流层浮空器的相关技术与应用研究^[1-2]。

热特性变化及环境热效应对平流层浮空器的安全可靠性与控制有很大影响。在升空和返回过程中,平流层浮空器将经历不同的热环境,大气压力和温度等参数随高度大幅度变化,使气囊中填充气体的温度、压力和密度发生变化,影响浮空器的浮力和质心。在定点悬浮和飞行过程中,太阳热辐射和环境温度、风速等参数的昼夜变化,影响浮空器蒙皮和气囊中气体的温度,导致浮空器的浮力、质心变化,从而影响浮空器的定点和飞行控制。

另一方面,浮空器蒙皮温度的变化及非均匀性会使材料产生热疲劳和局部热应力,从而缩短

材料的使用寿命。为提高材料的使用年限,需对蒙皮进行热控制设计。平流层浮空器一般采用铺设在蒙皮表面或翼面上的薄膜太阳能电池供电。电池的热量很难从背面排出,导致太阳能电池温度升高,使光电转换效率下降。载荷舱内电子设备也需要提供温度合适的工作环境才能正常工作。为了实现对浮空器的浮力控制、保证太阳能电池与电子设备的正常工作,必须对平流层浮空器进行热控制设计。因此,研究平流层浮空器的热特性,在此基础上进行有效的热设计与热控制,是平流层浮空器技术中的关键问题之一。

1 平流层浮空器经历的外部热环境

平流层浮空器所经历的外部热环境特点不同于对流层飞行器和近地轨道航天器。对流层飞行器(如飞机)飞行速度很大,高速对流换热是影响其热特性的主要因素,而外部热辐射的作用很小。近地轨道航天器的主要热环境因素是太阳辐射、地球对太阳的反射和地球红外辐射,几乎没有外部对流换热。平流层浮空器飞行速度较低,气流

收稿日期:2008-01-28; 修订日期:2008-04-15

基金项目:国家级项目(A2320061290);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0335)

通讯作者:夏新林 E-mail: xiaxl@hit.edu.cn

密度小,对流和外部辐射都会对浮空器产生显著热影响^[3]。因此,平流层浮空器的外部热环境因素包括大气对流热环境和外部热辐射环境。

1.1 对流层大气热环境

平流层浮空器在升空和返回过程中经过对流层。对流层大气的主要热特征为:①温度随高度增加而递减,平均气温递减率约为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;②空气具有强烈的对流运动;③温度和湿度等在水平方向上的不均匀性显著。

1.2 平流层大气热环境

平流层浮空器定点工作在平流层,平流层大气的主要热特点为:①温度随高度的增加由等温分布变为逆温分布,底部温度约为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$,大约在 20 km 以上,气温又随高度增加而显著升高,顶部温度可达 $-3\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$;②气流以水平运动为主,垂直对流运动很弱。

大气风速随纬度、季节和时间变化,图1是平均风速随高度的变化图^[4],可见 20 km 高空附近风速较小,浮空器一般定点工作在 20 km 附近。

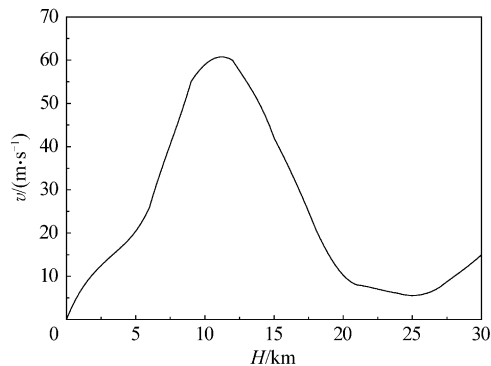


图1 风速随海拔高度的变化^[4]

Fig. 1 Wind velocity distribution with altitude^[4]

1.3 浮空器外部热辐射环境

浮空器的外部热辐射有太阳直接辐射、太阳散射辐射、反照辐射和地球大气的红外辐射等。

太阳辐射能量约 97% 集中在 $0.2\sim 3.0\text{ }\mu\text{m}$ 的波长范围内。不同高度,大气和云层对太阳辐射的衰减和散射不同,辐射强度随高度、方位和纬度变化。大气中的空气分子、水蒸气和灰尘会对太阳直接辐射产生散射,散射主要集中在可见光波段,随天气状况变化。反照辐射包括地面反射和云层反射,地面反射需要考虑不同地貌的反射率,不同天气状况下的云层反射不同。不同表面状况的太阳反照率相差很大,如沙漠为 0.3 ,雪为 0.8 ,

云为 0.6 ,其他表面为 0.1 ^[5]。地球大气的红外辐射包括:①大气红外辐射;②地面和云层红外辐射。地面和大气辐射光谱主要波长为 $3\sim 120\text{ }\mu\text{m}$ 的中远红外波段。

2 平流层浮空器热状况的形成机制

升空、返回和定点过程中,平流层浮空器的热状况是外部热环境与其表面以及内部换热等各种热影响因素的耦合作用结果,如图2所示。如前所述,外部热影响因素包括外表面的红外辐射、太阳直接辐射、散射辐射、地球反照、地-气红外辐射和对流换热;内部热影响因素包括内表面之间的辐射和表面与浮升气体的自然对流换热。此外,平流层浮空器上表面有太阳能薄膜电池,太阳能电池发热对浮空器温度将产生影响。

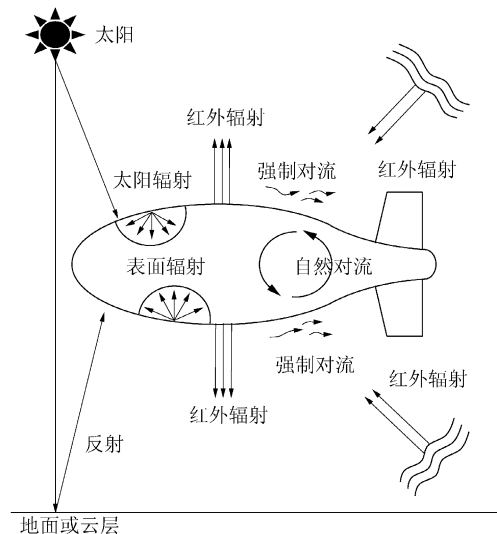


图2 平流层浮空器的热环境因素

Fig. 2 Thermal environment of stratospheric aerostat

从热量的产生与传输机制看,浮空器热状况的形成涉及5种热物理过程:①浮空器外部空气对壳体的对流加热或冷却过程,属于强制对流换热;②太阳对浮空器壳体的辐射加热、壳体与地面及空间的辐射换热形成浮空器壳体外表面的非均匀辐射换热场;③浮空器壳体内、外热环境耦合作用下的非稳态辐射-导热耦合换热;④壳体内表面与气囊内构件、气体的非稳态辐射-对流-导热耦合换热,属于大型复杂几何系统内的多模式耦合换热;⑤设备内部的非稳态辐射-导热-对流耦合换热,属于复杂边界条件下、含内热源物体的复杂耦合换热。

2.1 外部对流换热

浮空器外部对流换热通用控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot (\rho\phi\mathbf{U}) = \mathbf{V} \cdot (\Gamma_{\phi}\nabla\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ρ 为大气密度; t 为时间; \mathbf{U} 为速度向量; ϕ 为通用变量; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; S_{ϕ} 为广义源项。

除数值模拟外,可采用实验关联式计算外部对流换热。自然对流和强制对流可分别采用式(2)和式(3)计算^[6]:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \left[\frac{0.00336GrPr}{1 + (0.559/Pr)^{9/16}} \right]^{1/6} \right\}^2 \quad (2)$$

$$Nu = RePr^{1/3} [0.2275 / (\lg Re)^{2.584} - 850/Re] \quad (3)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数。

2.2 外部辐射热流

环境大气和浮空器壳体的辐射光谱均为中远红外波段。太阳辐射光谱主要集中在可见光和近红外波段。

浮空器壳体吸收的太阳直接辐射热流为

$$q_1 = \delta_{s\alpha_s} \tau_s E_s \cos \beta \quad (4)$$

式中: δ_s 为壳体表面的太阳光可见性判断因子; α_s 为外表面对太阳辐射的吸收率; τ_s 为大气对太阳辐射的透射率; E_s 为太阳常数; β 为表面外法线与太阳光线的夹角。

浮空器壳体吸收的大气散射太阳辐射与地球反照辐射热流为

$$q_2 = \alpha_s E_s (\gamma + \rho_e \tau'_s F_{hu,e}) \quad (5)$$

式中: γ 为大气散射经验系数; ρ_e 为地球反照率; τ'_s 为地球反照效应的综合透射率; $F_{hu,e}$ 为壳体外表面对地球的角度系数。

壳体外表面吸收的地-气红外辐射热流为

$$q_3 = \epsilon \tau_{IR} q_e F_{hu,e} \quad (6)$$

式中: ϵ 为壳体红外发射率; τ_{IR} 为大气对地-气红外辐射的透射率; q_e 为地-气红外辐射热流。

2.3 壳体传热

浮空器壳体材料是多层复合材料,每一层材料的导热性能和辐射性能不同,形成了多层结构内非线性、非均匀的辐射-导热耦合换热。每层材料内辐射与导热的瞬态耦合换热能量方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{V} \cdot (k\nabla T) + \int_0^{\infty} (1 - \omega_{\lambda}) \kappa_{\lambda} \left[\oint_{4\pi} I_{\lambda}(\Omega) d\Omega - 4n_{\lambda}^2 E_{b\lambda} \right] d\lambda \quad (7)$$

式中: c 为比热; T 为温度; λ 为辐射能波长; ω_{λ} , κ_{λ}

和 n_{λ} 分别为材料的光谱散射反照率、光谱衰减系数和光谱折射率; $E_{b\lambda}$ 为温度 T 下真空中的黑体光谱辐射力; $I_{\lambda}(\Omega)$ 为沿 Ω 方向的光谱辐射强度。

求解吸收、散射性非灰半透明材料内的光谱辐射传递方程为

$$\frac{dI_{\lambda}(s, \Omega)}{ds} = \kappa_{\lambda} (1 - \omega_{\lambda}) I_{b\lambda}(s) - \kappa_{\lambda} I_{\lambda}(s, \Omega) + \frac{\omega_{\lambda} \kappa_{\lambda}}{4\pi} \oint_{4\pi} I_{\lambda}(s, \Omega') \Phi_{\lambda}(\Omega, \Omega') d\Omega' \quad (8)$$

式中: s 为材料内的坐标位置; $I_{b\lambda}(s)$ 为 s 点温度对应的黑体光谱辐射强度; $I_{\lambda}(s, \Omega')$ 为沿 Ω' 方向到达 s 点的光谱辐射强度; $\Phi_{\lambda}(\Omega, \Omega')$ 为光谱散射相函数。

2.4 内部传热

浮空器气囊内部的传热包括壳体表面与浮升气体的自然对流传热和表面之间的辐射换热。浮升气体可看做透明气体。

载荷舱内部传热过程复杂,与飞机舱内热环境类似,涉及导热、对流、辐射和内热源等多种因素。舱内的仪器设备工作时将产生废热。白天,载荷舱受到太阳照射,废热会使舱内温度升高,不利于仪器设备的正常工作;夜间,环境气流温度较低,废热有利于保证仪器设备正常工作。因此,需对载荷舱进行热控制。

平流层浮空器外部热环境与内部气囊、载荷和设备等部件的多种换热过程通过表面蒙皮相互影响,形成复杂的多层次耦合传热过程,如图3所示。从热量传输的耦合特性看,浮空器热环境的形成包含以下3个层次的耦合问题:①气囊内热环境与壳体外部热环境的耦合作用;②气囊内各仪器设备、构件及气流间的多种传热方式耦合;③仪器设备内部热源与多种传热方式的耦合和壳体外气流流动与换热间的耦合。

因此,与通常的航空航天器相比,平流层浮空器热特性更为复杂,影响因素更多。这要求平流层浮空器热特性研究必须充分考虑各种热影响因素,以免得出片面性结论。

3 平流层浮空器热特性研究现状

3.1 热特性研究方法 with 热模型

由于费用高、技术难度大,目前对浮空器热特性的研究多采用分析计算的方法,见文献[7-20]。

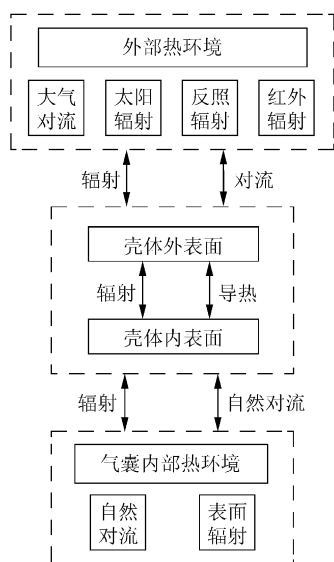


图3 浮空器耦合传热机制

Fig. 3 Coupled heat transfer mechanism of stratospheric aerostat

对浮空器热特性的实验研究较少,实验研究都基于小浮空器模型,如 M. Henze 等^[8]用旋转加热面的方法模拟太阳方位的变化对飞艇自然对流的影响,测试了瑞利数为 10^8 数量级圆柱内部的自然对流换热。

不同浮空器热模型考虑的热影响因素和几何复杂性不同。J. F. Kreider^[9]建立了高空气球的平均温度模型,考虑了太阳直接辐射和地球反照辐射、地球和大气的红外辐射、对流换热和壳体本身辐射。L. A. Carlson 等^[10]对 Kreider 模型进行了改进,考虑了浮升气体中水蒸气杂质的辐射。以上热模型是零维模型,只能得到气球壳体和浮升气体的平均温度。K. Harada 等^[11]用二维无限长圆柱模型计算飞艇的温度,考虑了太阳辐射和红外辐射,用经验公式计算对流换热。H. Franco 等^[12]发展的一个三维气球热模型,此模型考虑了太阳辐射、反照辐射和地球红外辐射,没有考虑对流换热。

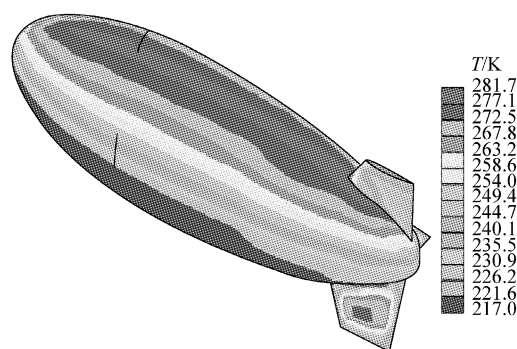
由于浮空器体积很大,用平均温度代表壳体温度和浮升气体温度会造成很大的误差。对流和辐射均对浮空器热特性产生影响,需综合考虑浮空器热特性的各种影响因素。目前研究采用的热模型均进行了较大简化,尚难以较准确地反映浮空器的热特性。

3.2 热特性基本认识

(1) 温度变化特性

目前对浮空器温度的研究多采用稳态模型,

如 Y. G. Lee 等^[13]计算了平流层飞艇壳体的三维稳态温度场,图 4 是其给出的太阳位于飞艇顶部直射时的温度分布。其研究表明,飞艇壳体温度分布非均匀性很大,壳体顶部和底部温度可相差 64 K。K. Stefan^[14]用两节点稳态模型分析了小飞艇的平衡温度,内部气体温差在晴天时约为 51 K,云层较厚时温差可达 71 K。方贤德等^[15]也用两节点稳态模型计算了高空飞艇平衡温度,艇内气体昼夜温差可达 59 K。这类稳态模型对小型飞艇的分析结果与实验数据差别不大。但对尺寸达百米以上的大型飞艇,采用稳态模型会引起很大误差。

图4 飞艇壳体的温度场分布^[13]Fig. 4 Temperature distribution of hull^[13]

在升空和定点悬浮过程中,浮空器具有非稳态热特性。由于内部气体的换热较差,升空过程中,气体膨胀做功,浮空器处于较大的超冷状态。浮空器与外界大气的对流换热和日照条件下吸收太阳辐射热量,可减轻浮空器的超冷状态;升空速率越快,内外气体温差越大,浮空器超冷状态越严重,净浮升力降低越大^[16]。Y. G. Lee 等^[13]对浮空器升空过程中的绝热效应计算结果如图 5 所示,发现只考虑绝热膨胀时内部的温度可低至 90 K,这是不合理的,因此,需考虑膨胀和换热的综合作用。

进一步研究表明,浮空器壳体温度场在升空^[17]和定点悬浮^[18]过程中存在很大的瞬态不均匀性。壳体温度变化很大,升空过程中壳体温度可变化 70 K 以上,昼夜间的壳体温度变化可达 50 K 以上;不同部位温度很不均匀,升空过程中同一时刻浮空器壳体最大温差可达 20 K 以上,定点过程中最大温差接近 30 K。升空过程壳体典型部位的温度变化如图 6 所示。定点过程中,浮升气体昼夜温差可达 30 K 以上,浮空器壳体温度在日出时(壳体左面)迅速增加,而日落时壳体温

度迅速下降(壳体右面),如图 7 所示。

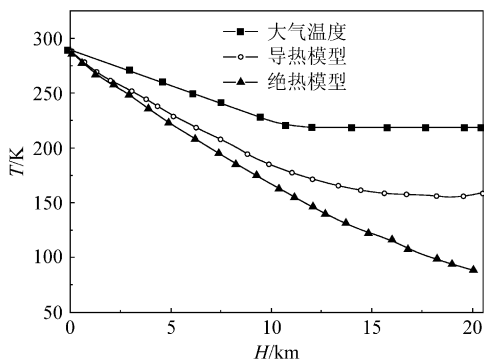


图 5 升空过程中的绝热效应^[13]

Fig. 5 Adiabatic compression effect during ascent^[13]

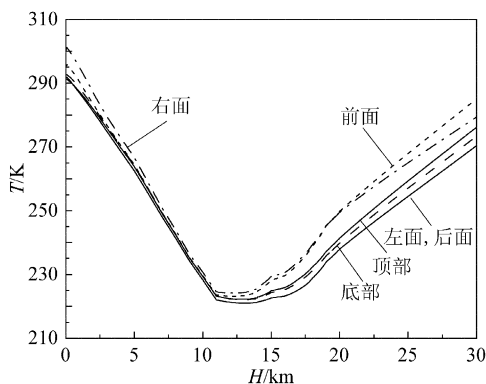


图 6 升空时浮空器不同部位温度变化^[17]

Fig. 6 Temperature change of hull during ascent^[17]

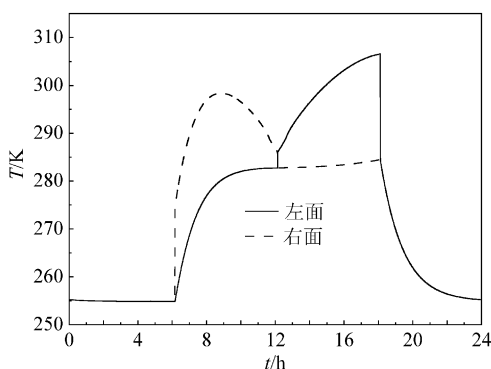


图 7 浮空器壳体温度昼夜变化^[18]

Fig. 7 Diurnal temperature change of hull^[18]

浮空器壳体表面太阳能电池产生的废热影响浮空器温度。K. Harada 等^[11]分析了表面覆设太阳能电池时,长 35 m 飞艇的表面温度,并与低空测量结果进行了对比,如图 8 所示。可见电池温度可高于壳体温度 24 K,氦气温度低于壳体温度,飞艇顶部温度高于底部温度,底部氦气温度与壳体温度相差较小。其他的热分析表明,靠近太阳能电池的艇囊表面温度可在 $-70 \sim -100 \text{ }^\circ\text{C}$ 到

$70 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化^[19]。本文也初步研究了风速对太阳能电池温度的影响,如图 9 所示。发现风速对太阳能电池温度影响很大,太阳能电池温度可高于无太阳能电池的表面温度 60 K,需要对太阳能电池采取热控制措施。

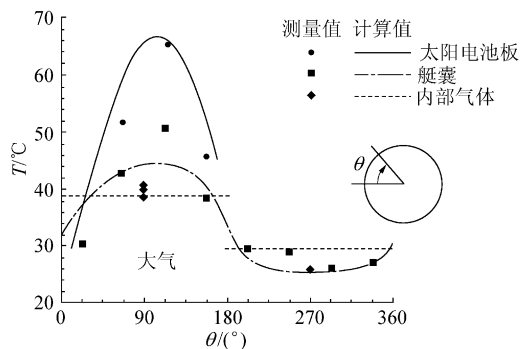


图 8 飞艇周向温度分布^[11]

Fig. 8 Circumferential temperature distribution^[11]

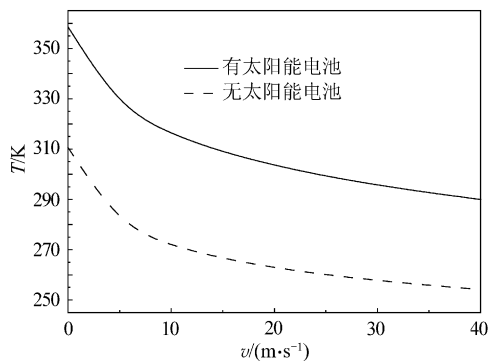


图 9 风速对太阳能电池温度的影响

Fig. 9 Wind velocity effects on solar cell temperature

(2) 对流换热特性

浮空器外部气流的热特性随环境高度变化,引起气流与浮空器表面对流换热系数随海拔高度发生很大变化,如图 10 所示^[17]。另一方面,浮

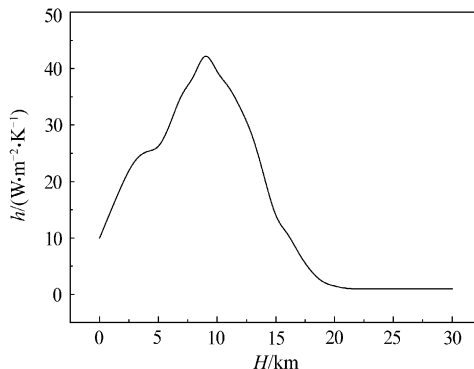


图 10 外部强制对流换热系数随高度的变化^[17]

Fig. 10 Convective heat transfer coefficient with altitude^[17]

空器体积巨大,其表面与大气环境的温差可诱发沿表面的自然对流,其换热系数沿圆周方向的分布如图 11 所示。

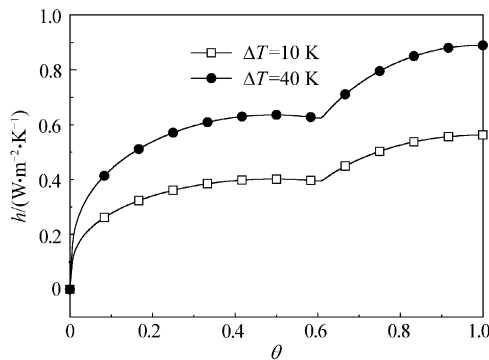


图 11 外部自然对流换热系数分布^[17]

Fig. 11 Natural convective heat transfer coefficient on external surface^[17]

浮空器对流换热不均,不同部位吸收的辐射热流相差较大,在辐射热流大而对流换热小的壳体表面处局部温度较高。太阳的非均匀加热对浮空器气囊内自然对流流态和传热有重要影响,自然对流换热不均,不同时刻自然对流流动和换热相差很大,从而影响浮空器温度分布^[8,20]。

(3) 热辐射特性

由于平流层空气稀薄,太阳辐射强烈,浮空器壳体很薄,是一种多层薄膜复合结构,计算其热特性时需考虑壳体材料的辐射特性^[12,21]。多层结构间的接触方式影响辐射性质,当各层间的间隔小于波长的 1/8 到 1/4 时,多层材料才可看做一种材料,随着间隔的增加,必须分开计算。1996 年, H. M. Cathey^[22] 计算了不同吸收率和发射率气球的平衡温度,提出了一种用部分测量数据确定气球有效辐射性质的方法。分析表明:计算气球有效辐射性质时,不能忽略载荷带子细丝的影响。1998 年, H. M. Cathey^[21] 又分析了气球多层结构的辐射性质,计算了不同结构气球的太阳辐射和红外辐射性质。2004 年, H. Franco 等^[12] 模拟了球体、零压气球和超压气球飘浮在某一高度时的温度,初步获得了这 3 种气球的温度特性。气球无盖时,底部吸收的地球红外辐射和反射辐射热流大,最高温度发生在底部;当在顶部加一层盖时,由于顶部薄膜对太阳辐射的额外吸收和反射,最高温度发生在顶部。

(4) 热控制技术

对浮空器热控制技术开展的研究还较少。一般认为,浮升气体温度昼夜变化很大,这会引气

压变化,从而影响平流层浮空器的外形和所受的浮力。由于压差正比于温差,可通过控制温度来调节气压^[23]。太阳能电池产生的废热不仅使浮空器壳体和浮升气体温度升高,还降低了太阳能电池效率。有学者提出,可在太阳能电池与气囊之间布置一层空气囊,并与环境控制系统连通,让其中充填的空气发生对流,这样不仅减少了太阳能电池向浮空器壳体和浮升气体的传热,还可降低太阳能电池表面的温度,有利于提高效率^[19,24]。

由于平流层浮空器飞行速度相对较低,高空大气密度很低,对流换热很弱,所以要同时借鉴航空器与航天器的热控方法,综合利用辐射和对流换热的控制技术。例如,对浮空器外表面进行光学特性控制设计,同时在浮空器内部采用气体对流的方法^[7]。但有效的热控设计方法与控制技术还缺乏细致深入的研究。

4 结束语和研究展望

传热过程对平流层浮空器的安全和控制有很大影响,目前对浮空器的整体热特性缺乏研究。不同研究者采用的浮空器热模型和分析条件不同,分析结果差别较大。

热分析、热控制和热动力学效应研究是平流层浮空器研制、设计的重要组成与关键问题。浮空器热特性及控制设计理论与技术,既可借鉴已有航天器、飞机等的热分析、热控制研究成果,也有其独特的,需针对性深入研究的方面。这些需进一步开展的研究包括:平流层大气环境的典型特性参数;蒙皮材料的物性参数;蒙皮的细致传热模型与特性;气囊内非刚性、复杂边界条件下的自然对流热动力学特性;超大尺寸浮空器外部的混合对流与热动力学特性;浮空器内、外传热过程的复杂耦合作用;有效的热控制方法与技术等。

通过上述研究,建立完善的平流层浮空器热分析与热控制设计理论,发展相应的数值计算与实验研究手段,才能适应平流层浮空器技术发展的需要。因此,需重视和加强平流层浮空器热特性及其热控制设计理论方法和技术的研究。

参 考 文 献

- [1] Colozza A. Initial feasibility assessment of a high altitude long endurance airship[R]. NASA/CR-2003-212724, 2003.
- [2] 陈务军,董石麟. 德国(欧洲)飞艇和高空平台研究与发展[J]. 空间结构, 2006, 12(4): 3-7.
Chen Wujun, Dong Shilin. Research and development of

- airship and high altitude long endurance platform in Germany(Europe)[J]. *Spatial Structures*, 2006, 12(4): 3-7. (in Chinese)
- [3] 李德富, 夏新林. 超高空低速飞行器的环境热效应分析[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集. 南京: 南京理工大学, 2006: 1158-1161.
Li Defu, Xia Xinlin. Analysis on environmental thermal effects on high altitude low speed vehicles[C]// Chinese Engineering Thermalphysics Proceedings. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 1158-1161. (in Chinese)
- [4] 刘大海, 阎健, 张健勇, 等. 平流层飞艇的能源技术和平衡分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(2): 6-13.
Liu Dahai, Yan Jian, Zhang Jianyong, et al. Power technology and energy balance analysis of the stratosphere airship[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006, 27(2): 6-13. (in Chinese)
- [5] Stefan K. Performance theory for hot air balloons[J]. *Journal of Aircraft*, 1979, 16(8): 539-542.
- [6] Rapert C R M. A heat transfer model for a hot helium airship[R]. AIAA-1987-2443, 1987.
- [7] Sasaki Y. Thermal issues of airship-type stratospheric platforms[R]. The 3rd Stratospheric Platform Systems Workshop, 2001: 78-84.
- [8] Henze M, Weigand B, Jens V W. Natural convection inside airships[R]. AIAA-2006-3798, 2006.
- [9] Kreider J F. Mathematical modelling of high altitude balloon performance[R]. AIAA-75-1385, 1975.
- [10] Carlson L A, Horn W J. New thermal and trajectory model for high-altitude balloons[J]. *Journal of Aircraft*, 1983, 20(6): 500-507.
- [11] Harada K, Eguchi K, Sano M, et al. Experimental study of thermal modeling for stratospheric platform airship[R]. AIAA-2003-6833, 2003.
- [12] Franco H, Cathey H M. Thermal performance modeling of NASA's scientific balloons[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(10): 1717-1721.
- [13] Lee Y G, Kim D M, Yeom C H. Development of Korean high altitude platform systems[J]. *Int J Wireless Information Networks*, 2006, 13(1): 31-42.
- [14] Stefan K. Thermal effects on a high altitude airship[R]. AIAA-83-1984, 1983.
- [15] 方贤德, 王伟志, 李小建. 平流层飞艇热仿真初步探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2007, 28(2): 5-9.
Fang Xiande, Wang Weizhi, Li Xiaojian. A study of thermal simulation of stratospheric airships[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2007, 28(2): 5-9. (in Chinese)
- [16] 姚伟, 李勇, 王文隽, 等. 平流层飞艇热力学模型和上升过程仿真分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(3): 603-607.
Yao Wei, Li Yong, Wang Wenjun, et al. Thermodynamic model and numerical simulation of a stratospheric airship take-off process[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 603-607. (in Chinese)
- [17] 李德富, 夏新林. 浮空器升空过程中的温度变化研究[C]//中国工程热物理学会年会传热传质分会论文集. 广州: 中山大学, 2007: 739-742.
Li Defu, Xia Xinlin. Research on temperature change of stratospheric aerostats take-off process[C]// Chinese Engineering Thermalphysics Proceedings. Guangzhou: Zhongshan University, 2007: 739-742. (in Chinese)
- [18] 李德富, 夏新林. 平流层浮空器定点悬浮过程中的温度变化研究[C]//中国浮空器大会论文集. 北京: 航空工业出版社, 2007: 112-115.
Li Defu, Xia Xinlin. Research on temperature change of stratospheric aerostats during station-keeping[C]// Chinese Aerostat Conference Proceedings. Beijing: Aviation Industry Press, 2007: 112-115. (in Chinese)
- [19] Onda M. Design and applications of a stratospheric long-endurance LTA platform[R]. AIAA-2001-5266, 2001.
- [20] 杨小川, 李德富, 夏新林. 平流层浮空器内部自然对流的数值模拟[C]//中国浮空器大会论文集. 北京: 航空工业出版社, 2007: 116-119.
Yang Xiaochuan, Li Defu, Xia Xinlin. Numerical investigation of natural convection inside stratospheric aerostats [C]// Chinese Aerostat Conference Proceedings. Beijing: Aviation Industry Press, 2007: 116-119. (in Chinese)
- [21] Cathey H M. Scientific balloon effective radiative properties[J]. *Advances in Space Research*, 1998, 21(7): 979-982.
- [22] Cathey H M. Advances in the thermal analysis of scientific balloons[R]. AIAA-96-0695, 1996.
- [23] 欧阳晋, 屈卫东, 席裕庚. 平流层平台的发展及其自主控制关键技术[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2004, (1): 64-67.
Ouyang Jin, Qu Weidong, Xi Yugeng. The development of a stratospheric platform and its autonomous control technology[J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2004, (1): 64-67. (in Chinese)
- [24] 王海峰, 宋笔锋, 王海平. 高空飞艇定点控制关键技术及解决途径[J]. *飞行力学*, 2005, 23(4): 5-8.
Wang Haifeng, Song Bifeng, Wang Haiping. Key technology and the preliminary exploration for the position control of high altitude airships [J]. *Flight Dynamics*, 2005, 23(4): 5-8. (in Chinese)

作者简介:

夏新林(1966—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 热辐射、辐射-对流-相变耦合换热、红外特性与传输。

Tel: 0451-86412148

E-mail: xiaxl@hit.edu.cn

李德富(1981—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 浮空器热分析和热控制、辐射-对流耦合换热。

Tel: 0451-86412148

E-mail: hitldefu@163.com

(责任编辑: 赵利)