

## 平流层飞艇强迫对流特性数值仿真分析\*

武江涛, 麻震宇, 侯中喜, 柳兆伟

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**强迫对流换热特性对平流层飞艇热状态有重要影响。以平流层飞艇流线型封闭囊体为研究对象,基于囊体内部纯导热传热的假设,采用计算流体力学方法建立平流层飞艇外部流场三维数值模型,对飞艇外部强迫对流换热特性进行仿真分析,得到了不同太阳照射角度、风速和攻角条件下的飞艇表面温度分布和内部平均温度变化规律,为平流层飞艇热状态预测和热控设计提供参考依据。

**关键词:**平流层飞艇;强迫对流;计算流体力学;数值仿真

中图分类号:V274 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)02-177-06

## Numerical research on forced convective heat transfer of stratospheric airships

WU Jiangtao, MA Zhenyu, HOU Zhongxi, LIU Zhaowei

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** During the floating flight, the complex radiation-convection environment remarkably affects the flight performance and security of the stratospheric airship. The forced convection around the stratospheric airship plays an important role in the thermal behavior of the airship. Based on the hypothesis of pure heat conduction inside the airship, a three dimensional CFD model of stratospheric airships was developed and the thermal characteristics of the forced convective heat transfer of the airship were investigated. The distributions of the temperature of skins of the airship and the average temperature of the inner gas were calculated with the variation of the angle of the sun, the wind velocity and the angle of attack. Simulation results can be referenced for the accurate prediction of the thermal behavior of stratospheric airships.

**Key words:** stratospheric airships; forced convection; computational fluid dynamics; numerical simulation

平流层飞艇依靠浮力升空,可实现长期稳定驻留和可控飞行,在对地观测、侦察预警、通信中继、导航定位等领域有着广阔的应用前景和发展潜能。当前,世界各国在平流层飞艇研制方面都处于方案探索与试验验证阶段,围绕“可控进入、长期驻空、安全返回”等核心问题开展基础研究和攻关。不同于飞机、卫星等飞行器,平流层飞艇内部充满大量浮升气体,气体温度变化较大程度上影响飞艇所受浮力变化,气体热力学状态对其飞行状态和运行安全具有重要影响,是典型的“热飞行器”。驻空过程中,平流层飞艇在内外流场环境中经历较复杂的对流换热作用,对飞艇的热状态具有重要影响。开展飞艇对流换热特性研究,揭示并预测飞艇热特性,对于解决平流层飞艇长期稳定驻空问题非常重要。

国内外学者考虑了辐射和对流换热因素,针

对飞艇热模型开展了广泛研究,分别建立了平流层飞艇零维模型<sup>[1]</sup>、两节点模型<sup>[2-3]</sup>、二维无限长圆柱模型<sup>[4]</sup>和三维热模型<sup>[5-7]</sup>,其中飞艇内外表面的对流换热系数均为采用平板或圆柱实验经验公式得到的近似值。当前对平流层飞艇对流换热特性的研究较少。内部自然对流方面, Marc<sup>[8]</sup>开展了平流层飞艇内部对流换热试验研究,并采用水平圆柱近似模拟飞艇内部自然对流,计算得到了平均对流换热系数。杨小川和夏新林<sup>[9-10]</sup>采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,通过均匀对流换热系数表示外部强迫对流,对非均匀热边界条件的椭球形封闭腔内部自然对流进行仿真分析,结果表明,内部流场最大流速不超过 2 m/s,同一时刻内部气体压力非均匀性较小。徐向华<sup>[5]</sup>对球形封闭腔内部对流特性进行了计算,研究表明,艇体内部自然对流增加

\* 收稿日期:2015-04-20

基金项目:国家高分辨率对地观测系统重大专项支持项目(GFZX040201)

作者简介:武江涛(1977—),男,陕西渭南人,博士研究生,E-mail:hale\_airship@sina.com;

麻震宇(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:mazhenyu@nudt.edu.cn

了蒙皮与内部气体的换热,但对内部气体平均温度影响不大,可以简化为固体导热求解。外部强迫对流方面,刘泉等<sup>[11]</sup>考虑长径比和攻角的影响,建立了基于飞艇长径比修正的外部强迫对流换热模型,通过与实验对比验证了建立的经验准则,研究表明,太阳方位角与飞艇攻角对整个飞艇热平衡会有较大影响。Dai 等<sup>[12]</sup>对球形封闭腔外流场开展了二维稳态传热仿真计算,研究了外部强迫对流特性,对高雷诺数条件下的球体外表面平均努塞尔数进行了修正,并与文献结果进行了比较。

综上所述,目前普遍采用的简化对流换热计算方法难以真实反映飞艇热特性。基于文献[5]研究成果,将飞艇内部假设为纯导热传热,采用 CFD 软件 fluent 对平流层飞艇外部强迫对流特性进行仿真分析,计算不同太阳照射角度条件下的飞艇表面温度分布和内部气体平均温度变化规律,分析不同风速和攻角对飞艇对流传热特性的影响,为平流层飞艇热设计提供技术支撑和参考依据。

## 1 外部对流计算模型

### 1.1 几何网格划分

平流层飞艇内部自然对流较为微弱,在相同的热边界条件下,内部气体平均温度和均匀导热假设得到的平均温度差别很小,可将飞艇内部传热简化为固体均匀导热来进行计算。飞艇内部计算只涉及导热问题,而飞艇外部为大气流场,如图 1 所示。分别对飞艇内部计算域和外部流体计算域进行网格划分,图 2 给出了外部流场计算区域和平流层飞艇内、外部网格划分,其中飞艇表面网格的第一层厚度约为 1/2000 飞艇长度。在固体与流体交界面上采用温度耦合求解。

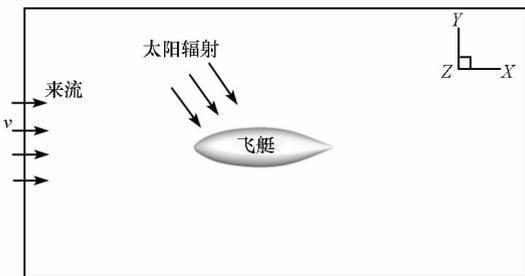
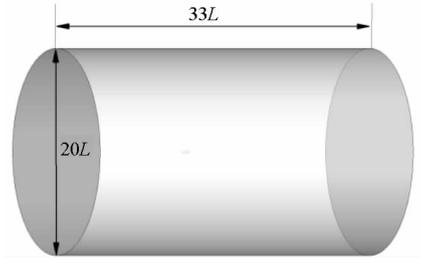


图 1 外部对流计算示意图

Fig. 1 Schematic of convection simulation

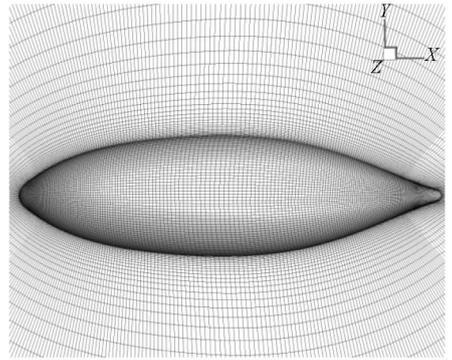
### 1.2 边界条件和数值方法

流场计算采用纳维 - 斯托克斯 (Navier -



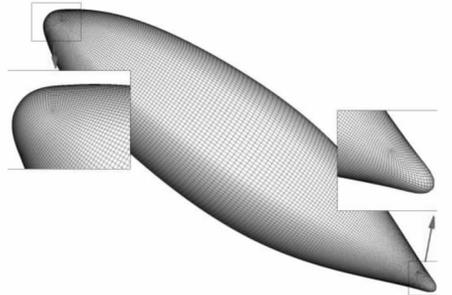
(a) 飞艇流场计算域

(a) Domains of flow calculation



(b) 飞艇外部网格划分

(b) Grids of ambient flows of airships



(c) 艇体内部网格

(c) Grids of inner flows of airships

图 2 计算域网格划分

Fig. 2 Mesh generation of computational domains

Stokes, N - S) 方程,基于有限体积方法对流场进行离散,其中入口边界条件为速度入口,而出口采用压力出口边界。热边界条件采用热流边界的假设,忽略由于温度差异引起的对外辐射不均匀性。不同的照射位置对应于不同的昼夜时刻,研究不同照射位置对飞艇表面温度分布的影响。飞艇表面的热流密度可表示为:

$$q = a_s \cdot \varepsilon_s \cdot (q_{in} - q_{out}) \cdot \cos\gamma_{se} + \varepsilon_r E_0 \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon_s \cdot (q_{in} - q_{out})$  为可吸收的最大热流密度,参考春分日北纬 40° 地区太阳辐照参数得到平均热流密度为 100 W,  $a_s$  为太阳可见因子,  $\gamma_{se}$  为太阳照射方向和飞艇表面的内法线方向的夹角,  $\varepsilon_r E_0$  为吸收的周围环境的红外辐射,设平均值为 20 W。飞艇的表面所受到的热流密度分布如图 3

所示。

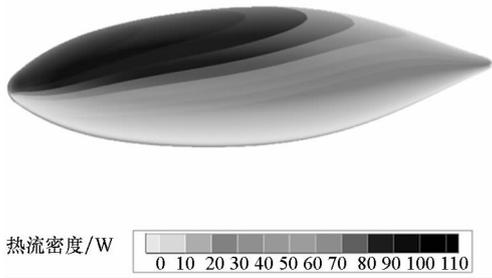


图3 热流边界条件示意图

Fig. 3 Diagram of thermal boundary condition

## 2 外部强迫对流分析

### 2.1 计算条件

飞艇外形采用美国高空飞艇 (High Altitude Airship, HAA) 的几何参数,飞艇长度  $L$  为 152 m, 计算域长度为  $33L$ , 直径为  $10L$ , 如图 2 所示。内部氦气的物理参数见表 1, 计算条件为 20 km 处的标准大气密度、气压、温度参数。

表 1 内部氦气参数

Tab. 1 Parameters of Helium

组分	100% He
气体密度	0.012 4 kg/m <sup>3</sup>
内部气体质量	1860 kg
气体比热容	5.2 × 10 <sup>3</sup> J/(kg · K)
热传导系数	0.144 W/(m · K)

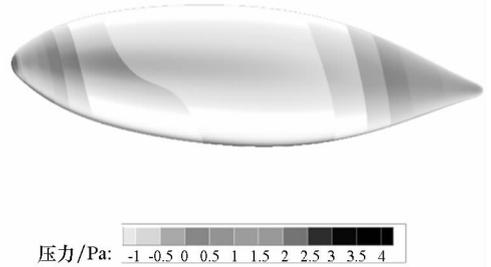
### 2.2 典型状态分析

以太阳斜上方 45° 照射、10 m/s 来流速度和 4° 飞行攻角为平流层飞艇典型飞行状态, 对外部流动传热进行仿真计算。

平流层飞艇外表面压力分布和流动特性如图 4 所示。由于 20 km 的空气密度非常低, 由动压引起的表面相对压力非常小。观察附近的流线可以看出, 在飞艇有飞行攻角时, 在飞艇后缘的背风区出现漩涡。

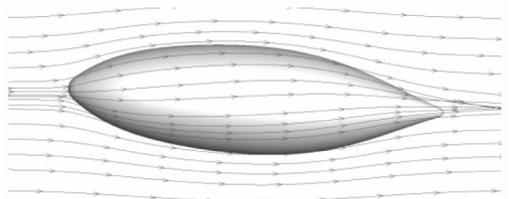
平流层飞艇表面温度分布和内部温度分布如图 5 所示。飞艇上部温度较高, 下部温度相对较低, 这是由于飞艇上部受到太阳直射热流的加热作用; 飞艇尾部的温度相比飞艇头部温度稍高, 这是由于较热的飞艇表面蒙皮对贴近艇体的气流产生加热作用, 使得靠近后缘的飞艇外部气流温度比前部气体稍高, 因此艇体尾部的温度较高; 在典型状态条件下, 飞艇受热最为严重的区域为飞艇

头部的驻点区域以及飞艇后缘的背风区域, 最高温度超过 300 K。



(a) 飞艇表面外部压力分布云图

(a) Pressure distributions of airship skins

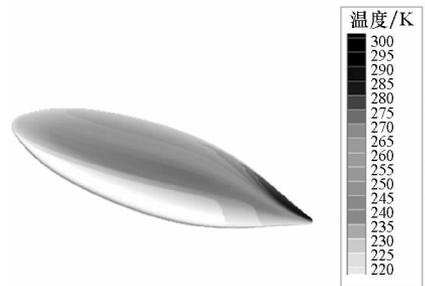


(b) 飞艇表面流线示意图

(b) Flow lines of airship surfaces

图 4 平流层飞艇典型状态表面压力计算结果

Fig. 4 Pressure results of stratospheric airships



(a) 飞艇表面温度分布云图

(a) Temperature distributions of airship skins



(b) 飞艇内部温度分布云图

(b) Temperature distributions inside the airship

图 5 平流层飞艇典型状态温度计算结果

Fig. 5 Temperature results of stratospheric airships

### 2.3 太阳照射角度影响分析

对于不同的太阳照射角度, 由于飞行攻角和风速相同, 可忽略表面压力分布差异。图 6 给出了不同太阳照射角度条件下艇体表面温度分布云

图。如图 6 所示,太阳照射角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间变化,在不同的照射位置下,飞艇表面温度分布明显不同。当太阳照射角度为  $0^\circ$ ,即照射位置在头部时,表面高温部分位于头部区域,且高温区域非常小。

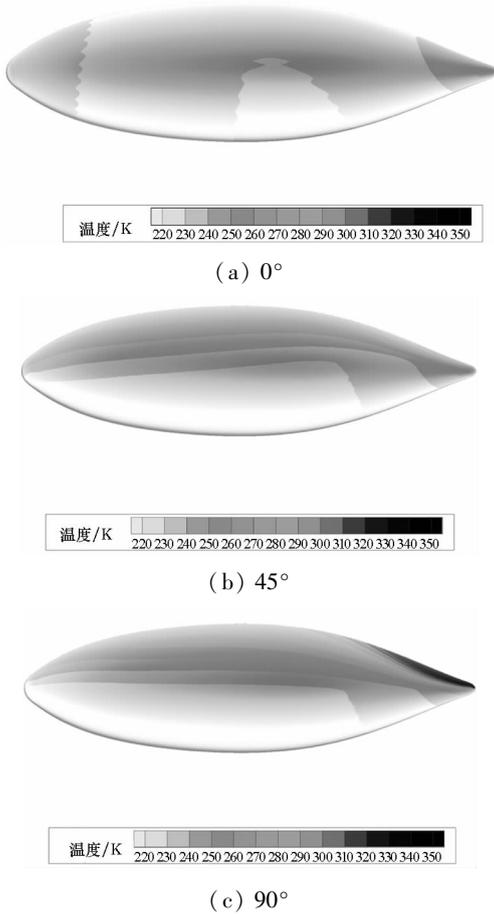


图 6 艇温度随照射角度变化计算结果  
Fig. 6 Temperature contours under different radiation angles

图 7 给出了不同太阳照射角度条件下艇体内部平均温度变化曲线。如图 7 所示,当太阳照射

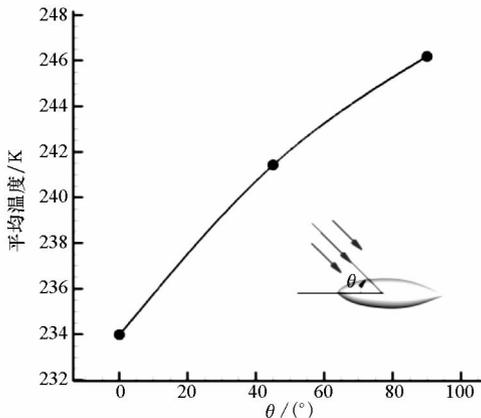


图 7 内部平均温度随太阳照射角度变化曲线  
Fig. 7 Average temperature of Helium under different radiation angles

角度为  $0^\circ$ ,内部平均温度约为 234 K,而当太阳照射角度为  $90^\circ$ ,即照射位置处于正上方时,内部平均温度约为 246 K,高出约 12 K。这是由于不同的照射角度对应的热流值不同。

### 2.4 风速影响分析

图 8 给出了不同风速条件下艇体表面温度分布云图。其中,假设飞艇保持  $4^\circ$  攻角飞行,风速在  $5 \sim 15 \text{ m/s}$  范围内变化。由图可见,不同风速下飞艇表面温度分布规律一致,由于飞艇的上表面受到热流的加热作用,造成上部温度比下部温度高,当周围冷空气流过飞艇表面时带走了部分热量,飞艇周围空气被加热,因而尾部温度比头部温度稍高。

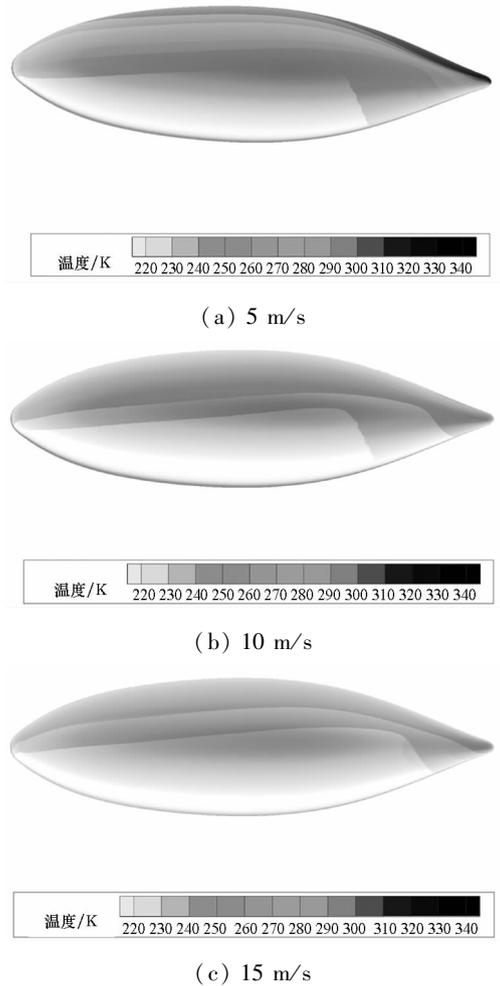


图 8 飞艇温度随风速变化计算结果  
Fig. 8 Temperature contours under different wind velocities

图 9 给出了不同风速条件下艇体内部平均温度变化曲线。如图 9 所示,内部氦气平均温度随风速增大而降低,风速为  $5 \text{ m/s}$  时的内部平均温度为 260 K,风速为  $15 \text{ m/s}$  时的内部温度为 235 K 左右,降幅达到 25 K。飞艇飞行空速的增加可有

效缓解飞艇的超热问题,但同时会带来更大的阻力作用,对能源动力系统提出挑战。

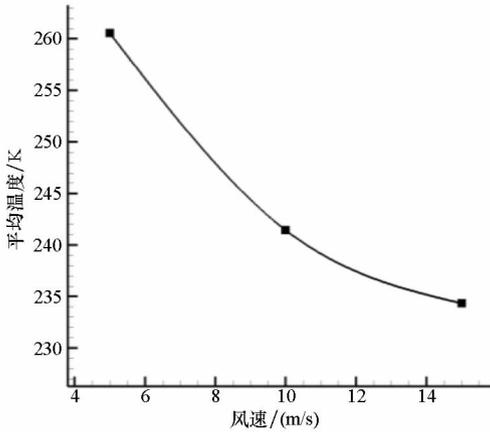


图 9 内部平均温度随风速变化曲线  
Fig. 9 Average temperature of Helium under different wind velocities

### 2.5 攻角影响分析

图 10 和图 11 分别给出了不同攻角条件下艇体表面温度分布云图和艇体内部平均温度变化曲线。其中,假设风速为 10 m/s,飞艇飞行攻角在 0°~8°范围内变化。由图 11 可见,飞行攻角对飞

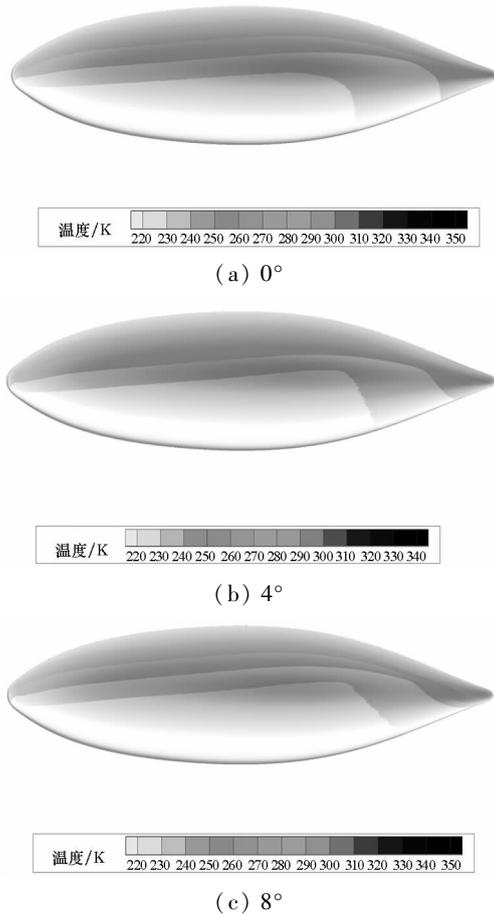


图 10 飞艇温度随攻角变化计算结果

Fig. 10 Temperature contours under different attack angles

艇表面的温度分布和内部平均温度值影响较小。随着飞行攻角的增大,内部氦气平均温度略有降低,但降低幅度较小。

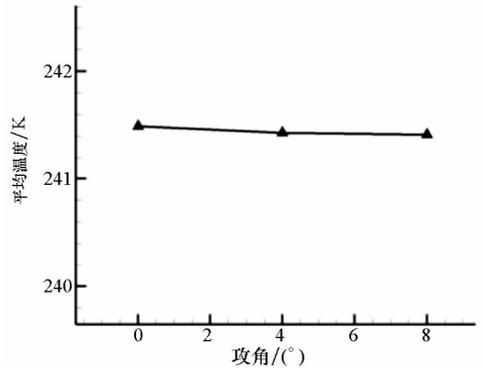


图 11 内部平均温度随攻角变化曲线

Fig. 11 Average temperature of Helium under different attack angles

### 3 结论

基于飞艇内部纯导热传热假设,建立平流层飞艇对流换热数值计算模型,采用 CFD 软件 fluent 对平流层飞艇外部强迫对流特性进行仿真分析,计算了不同太阳照射角度条件下的飞艇表面温度分布和内部气体平均温度变化规律,并分析了不同风速和攻角对飞艇对流传热特性的影响。计算结果表明:飞艇表面受热最为严重的区域为飞艇头部的驻点区域以及飞艇后缘的背风区域,最高温度超过 300 K,由于气流经过飞艇表面的加热作用,飞艇尾部相比飞艇头部温度稍高。太阳照射角度对飞艇表面温度分布影响较大,飞艇照射方向位于头部时内部平均温度约为 234 K,照射方向位于正上方时内部平均温度约为 246 K,温度上升约 12 K;在不同的风速条件下飞艇表面温度分布规律一致,飞艇内部平均温度随风速的增大而降低,风速为 5 m/s 时内部平均温度为 260 K,风速为 15 m/s 时内部温度降至 235 K,降幅达到 25 K;飞行攻角对飞艇表面温度分布和内部平均温度影响较小,随着攻角的增加,飞艇内部平均温度有小幅度降低。平流层飞艇内外流动较为复杂,需开展进一步研究以揭示其对流传热特性和机理。

### 参考文献 (References)

[1] 刘东旭,杨永强,吕明云,等. 蒙皮热辐射特性对平流层浮空器氦气温度影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(7): 836-840.  
LIU Dongxu, YANG Yongqiang, LYU Mingyun, et al. Effect of envelop thermal radiative properties on the stratospheric super-pressure LTA vehicle helium temperature [J]. Journal

- of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 836 – 840. (in Chinese)
- [2] Stefan K. Thermal effects on a high altitude airship [C]// Proceedings of the 5th Lighter-Than Air Conference, AIAA 83 – 1984, 1983.
- [3] 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 & Remote Sensing, 2007, 28(2): 5 – 9. (in Chinese)
- [4] Harada K, Eguchi K, Sano M, et al. Experimental study of thermal modeling for stratospheric platform airship [C]// Proceedings of AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences, AIAA 2003 – 6833, 2003.
- [5] 徐向华, 程雪涛, 梁新刚. 平流层浮空器的热数值分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11): 1848 – 1851.  
XU Xianghua, CHENG Xuetao, LIANG Xingang. Thermal analysis of a stratospheric airship [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(11): 1848 – 1851. (in Chinese)
- [6] 李德富. 平流层浮空器的热特性及其动力学效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
LI Defu. Thermal behavior and its dynamic effects on stratospheric aerostats [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] 李小建. 临近空间浮空器热-结构耦合数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
LI Xiaojian. Numerical simulation of thermal-structure coupling for near space airship [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [8] Henze M, Weigand B, Jens V W. Natural convection inside airships [C]// Proceedings of the 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, AIAA 2006 – 3798, 2006.
- [9] 杨小川. 复杂热环境中大型薄壳体内的自然对流数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
YANG Xiaochuan. Numerical simulation of natural convection inside huge thin-skin enclosures exposed to complicated thermal environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 夏新林, 李德富, 杨小川. 复合热条件下椭球形封闭腔内低压气体的自然对流[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 453 – 458.  
XIA Xinlin, LI Defu, YANG Xiaochuan. Natural convection of low pressure gas in ellipsoidal enclosure induced by combined thermal conditions [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 453 – 458. (in Chinese)
- [11] 刘泉, 徐庶民, 钟伟, 等. 基于长径比修正的飞艇对流换热准则关系式研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(5): 387 – 392.  
LIU Quan, XU Shumin, ZHONG Wei, et al. A heat transfer empirical correlation for the stratospheric airship based on its length-to-diameter ratio [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5): 387 – 392. (in Chinese)
- [12] Dai Q M, Fang X D, Xu Y. Numerical study of forced convective heat transfer around a spherical aerostat [J]. Advances in Space Research, 2013, 52(12): 2199 – 2203.