

系留气球整流罩散热数值仿真

蒋鹏程，欧阳自强，张文华

(中国特种飞行器研究所，湖北 荆门 448035)

摘要：目的 解决系留气球整流罩散热设计问题。方法 通过建立三维几何和离散模型，利用 FLUENT 开展热-流数值仿真计算，结合编制 UDF 同时实现整流罩外部对流、外部太阳辐射和内部对流、内部红外辐射和内部热源的实时耦合计算（双向耦合）。筛选环境最严酷状态（风速、温度和太阳辐射），对系留气球整流罩在 3000 m 和 6000 m 高度的散热性能进行分析。结果 按最严酷状态进行分析后，在 3000 m 和 6000 m 工作高度，必须引入外界空气向整流罩内强制通风对流，才能保证任务设备工作环境要求。升空后，由于环境温度下降，整流罩散热增加，任务设备（雷达）散热所需引入外界通风量减少。3000 m-3 m/s 工况下，在整流罩进气口质量流量为 1.0 kg/s 时，整流罩内部维持在 39~40 °C；6000 m-3 m/s 工况下，在整流罩进气口质量流量为 0.5 kg/s 时，整流罩内部维持在 25.5~26 °C。整流罩上强制通风进气口应布设在任务设备发热部件下方，同时在整流罩上部和后部开设专用排风口，保证整流罩内部空气流通。结论 双向耦合计算方法可快速获取系留气球整流罩在各状态条件下的散热详情，为整流罩散热设计及内部任务设备的热设计提供详实设计依据，相比工程估算和单向耦合更加贴近实际状态，计算精度更高。双向耦合计算方法和仿真数据可为同类型系留气球整流罩散热设计提供参考。

关键词：系留气球；整流罩；散热；数值仿真；双向耦合

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2020.12.002

中图分类号：V273

文献标识码：A

文章编号：1672-9242(2020)12-0007-06

Heat Dissipation Simulation of Tethered Aerostat Windscreen

JIANG Peng-cheng, OUYANG Zi-qiang, ZHANG Wen-hua

(China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem in the heat dissipation design of tethered aerostat windscreen. Through the establishment of three-dimensional geometry and discrete model, FLUENT was used to carry out thermal flow numerical simulation calculation, and combined with UDF to simultaneously realize the real-time coupling calculation (two-way coupling) of the external convection, external solar radiation and internal convection, internal infrared radiation and internal heat source of the windscreen. The most severe environment (wind speed, temperature and solar radiation) was selected to analyze the tethered aerostat windscreen at a height of 3000 m and 6000 m. After the analysis according to the most severe state, the external air was introduced into the windscreen for forced ventilation and convection at a working height of 3000 m and 6000 m to ensure the requirements of the working environment of the task equipment. After the lift-off, due to the decrease of the ambient temperature, the heat dissipation of the windscreen increased, and the external ventilation required for the heat dissipation of the task equipment (radar) decreased. At the working condition of 3000 m-3 m/s ,when the mass flow at the inlet of the windscreen was

收稿日期：2020-03-16；修订日期：2020-05-20

Received: 2020-03-16; Revised: 2020-05-20

作者简介：蒋鹏程（1982—），男，高级工程师，主要研究方向为飞行器环境控制。

Biography: JIANG Peng-cheng (1982—), Male, Senior engineer, Research focus: aircraft environmental control.

1.0 kg/s, the temperature inside the windscreen was 39~40 °C. At the condition of 6000 m⁻³ m/s, when the mass flow at the inlet of the windscreen was 0.5 kg/s, the temperature inside the windscreen was 25.5~26 °C. The forced ventilation air inlet on the windscreen was arranged under the heating parts of the task equipment, and the special exhaust port was arranged at the upper part and the rear part of the windscreen to ensure the air circulation inside the windscreen. The two-way coupling calculation method can quickly obtain the heat dissipation details of the tethered aerostat windscreen under various conditions, and provide detailed design basis for the heat dissipation design of the windscreen and the thermal design of the internal task equipment. Compared with the engineering estimation and one-way coupling, it is closer to the actual state and has higher calculation accuracy. The two-way coupling calculation method and simulation data can provide reference for the heat dissipation design of the same type of tethered aerostat windscreen.

KEY WORDS: tethered aerostat; windscreen; heat dissipation; numerical simulation; two-way coupling

系留气球是一种利用轻于空气 (LTA) 气体的浮力获得升力的无动力飞行器，具有维护成本低、安全度高、滞空时间久、无噪音等特点^[1-4]。其搭载的任务设备可执行通讯任务、救援任务、气象探测、长时预警侦查等任务^[5-9]，任务设备通常安装在系留气球下部整流罩内。然而随着任务设备性能的不断提升，伴随发热量也急剧增加。若热量不能及时散出，极易导致任务设备故障停机，因此整流罩的散热设计逐渐成为浮空器设计需要考虑的重大问题之一，如图 1 所示。

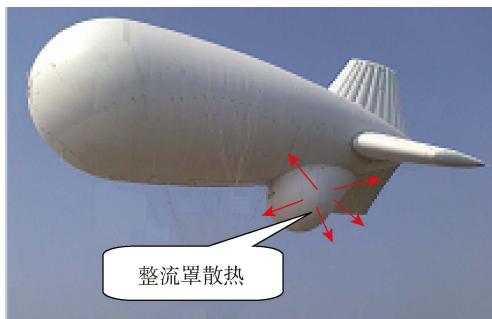


图 1 整流罩散热示意
Fig.1 Heat dissipation diagram of windscreen

近年来国内外专家学者对浮空器(含系留气球和飞艇)开展了大量的研究工作，主要集中于球囊及浮升气体的相关特性研究^[10-14]，尤其以热特性研究为热点，而基于对系留气球这类近地空间浮空器任务设备的环境控制研究涉及甚少。例如，Dai 等^[15]模拟研究了高空超压气球的热力学特性，分析了蒙皮材料热辐射特性和云层厚度对气球热特性的影响。Cathey^[16]研究了高空气球的热力学环境，但未考虑大气红外辐射的影响。茆磊等^[17]采用理论分析和试验测定相结合的办法对浮空器受到太阳辐射问题进行了研究，建立了太阳直射辐射模型、天空散射辐射模型和地面反射辐射模型三个模型。程雪涛等^[18]对低空浮空器进行了热数值分析，考虑多方面因素，建立了浮空器在地面的热分析理论模型。刘四洋^[19]利用传热学公式计算出气囊与外界环境之间的平均对流换热系数及收到的

外界辐射量，再借助 CFD 方法进行气囊热特性数值模，研究了气囊在不同工况下的热特性。Xing 等^[20]建立了球体的上升过程和热稳态模型，并进行了数值仿真，详细分析了薄膜红外特性对气球热性能的的影响分析，结果表明内红外辐射是影响球体热特性的主要因素。徐亮等^[21]对系留气球整流罩的两种典型散热方案进行了简单的二维数值模拟计算，对比了两种散热方案的优缺点，并针对不同使用环境提出建议。苏彦华^[22]用 Fluent 软件对三种整流罩形状(方形、球形、球形修正)的系留气球气动性能进行计算，分析了整流罩形状对系留气球阻力和流场的影响。通过对比浮空器热特性研究的常见方法，可大致分为工程估算法和数值计算法。工程估算法利用经典传热学理论结合大量经验公式获得传热系数，并最终计算出总传热量，该方法优势是模型简化便捷，但存在计算精度低、适用范围小等不足；数值计算法是基于 CFD 和数值传热等多学科的结合，利用计算机求解简化和离散化的数学方程获得近似解，能处理各种复杂流动和传热问题。

文中在数值计算的基础上，考虑到目前普遍采用的单侧集总参数法无法实时双向耦合计算，且实际浮空器蒙皮的温度和流场不均，可能导致计算结果产生较大偏差的问题，采用 Fluent 结合编制 UDF 同时实现整流罩外部对流、外部太阳辐射和内部对流、内部红外辐射的实时耦合计算求解(双向耦合)，可以得到更加准确的预测结果。对于近地空间浮空器负荷的电子通信设备热环境控制具有一定的参考意义。

1 计算模型

1.1 物理模型

建立的模型为类水滴形整流罩，体积约为 1100 m³。整流罩内含由雷达阵面、高频箱、排气口等组成的简易雷达模型作为整流罩内的唯一的发热设备，利用成熟商用软件 Fluent 进行三维稳态流动和传热分析，建立整流罩外流场和整流罩内部计算模

型, 如图 2 所示。在外流场边界设置定向风速, 并在任务设备内部增加换热器和风扇模型强制对流换热, 同时耦合外界太阳辐射和整流罩红外辐射模型, 可以真实地模拟整流罩的散热情况。

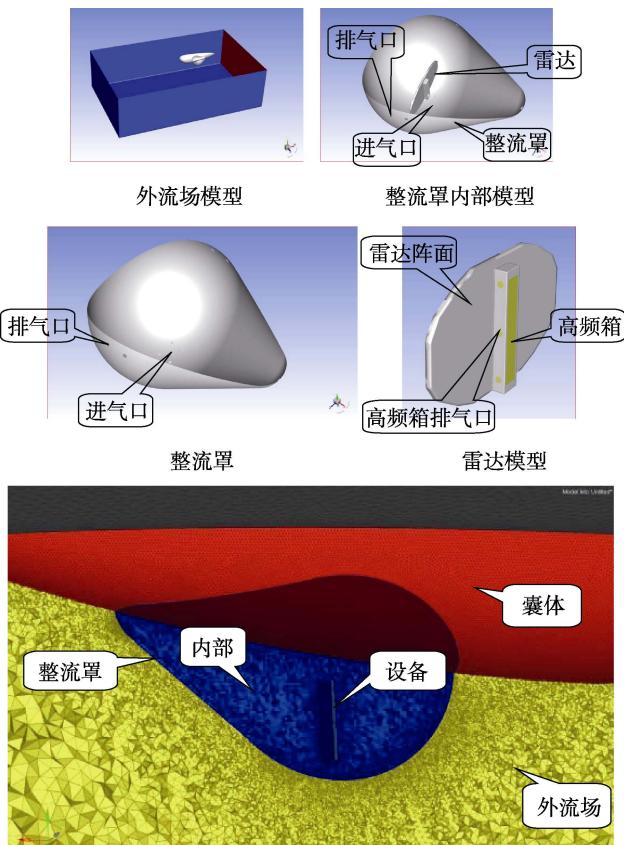


图 2 计算模型
Fig.2 Calculation model

1.2 整流罩对流辐射模型

整流罩在近地高空中时, 能量传递的方式主要为对流和辐射两种方式。具体可以分为太阳直射、云层散射辐射、红外辐射、整流罩内外对流换热及雷达发热输入热能。当整流罩处于稳态时, 根据能量守恒可以得到:

$$C_p \frac{dT}{dt} = q_{s-r} + q_{e-r} + q_{e-ir} + \dots \quad (1)$$

$q_{c-ir} - q_r + q_{in} + q_{in-conv} - q_{out-conv}$

式中: q_{s-r} 为整流罩吸收的太阳的直接辐射; q_{e-r}

为整流罩吸收的地球反射辐射; q_{e-ir} 为被整流罩吸收的地球红外辐射; q_{c-ir} 是吸收的云层的红外辐射; q_r 是整流罩向外辐射的热能; q_{in} 是整流罩内携带的发热设备的输入热能; $q_{in-conv}$ 表示内部对流换热; $q_{out-conv}$ 表示整流罩外表面与环境空气对流换热。具体计算公式可参考陶文铨《传热学》及文献[23-24]。

1.3 数值方法

流体的流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律, 控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\text{div}(\rho U)=0 \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial c_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

式中: p 为静压力; ρg_i 是重力体积力; F_i 为其他体积力, 也可以表示为自定义源项。

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = & \\ \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} & \end{aligned} \quad (4)$$

式中忽略了其他体积热源项, 通过求解能量守恒方程, 可以计算流-固-热的传热问题。以上方程组为数值计算的控制方程, 通过商业软件 FLUENT 的求解器进行求解。

1.4 边界条件

任务设备发热量约为 25 kW, 环境温度不大于 50 °C, 自身冷却风量为 7500 m³/h。外流场入口处风速设为 3 m/s, 出口为压力出口。实际计算时外流场采用 k-omega SST 湍流模型, 增加了横向耗散系数项, 并在黏度定义中添加了湍流剪切应力的运输过程。囊体内外表面红外辐射采用了 DO 模型, 可计算所有光学厚度的辐射问题, 同时还耦合了 Fluent 自带太阳射线模型、内热源和风扇模型, 实现系留气球整流罩的散热数值仿真。为了保证任务设备正常工作, 要求整流罩内空气温度应控制在一定范围内, 计算边界条件和囊体材料特性数据见表 1, 外界风速为统计最小值, 环境温度为高温极值, 太阳辐射为最大时段。

表 1 边界条件与材料物性
Tab.1 Boundary conditions and material properties

海拔高度/m	外界风速/(m·s⁻¹)	环境温度/°C	太阳辐射时段	整流罩内设计最大温度/°C	囊体厚度/mm
3000	3	25.0	6月21日	42	0.22
6000	3	-2.6	9时~10时	30	
导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)	比热 $C_p/(J·kg^{-1}·K^{-1})$	太阳吸收率	红外发射率 ε	空气密度(3000 m)/(kg·m⁻³)	空气密度(6000 m)/(kg·m⁻³)
0.06943	1140	0.345	0.91	0.909	0.66

2 计算结果与分析

3000 m-3 m/s 典型流场、温度场、太阳辐射和流线图见图 3, 各计算工况数据见表 2。由数据可知,

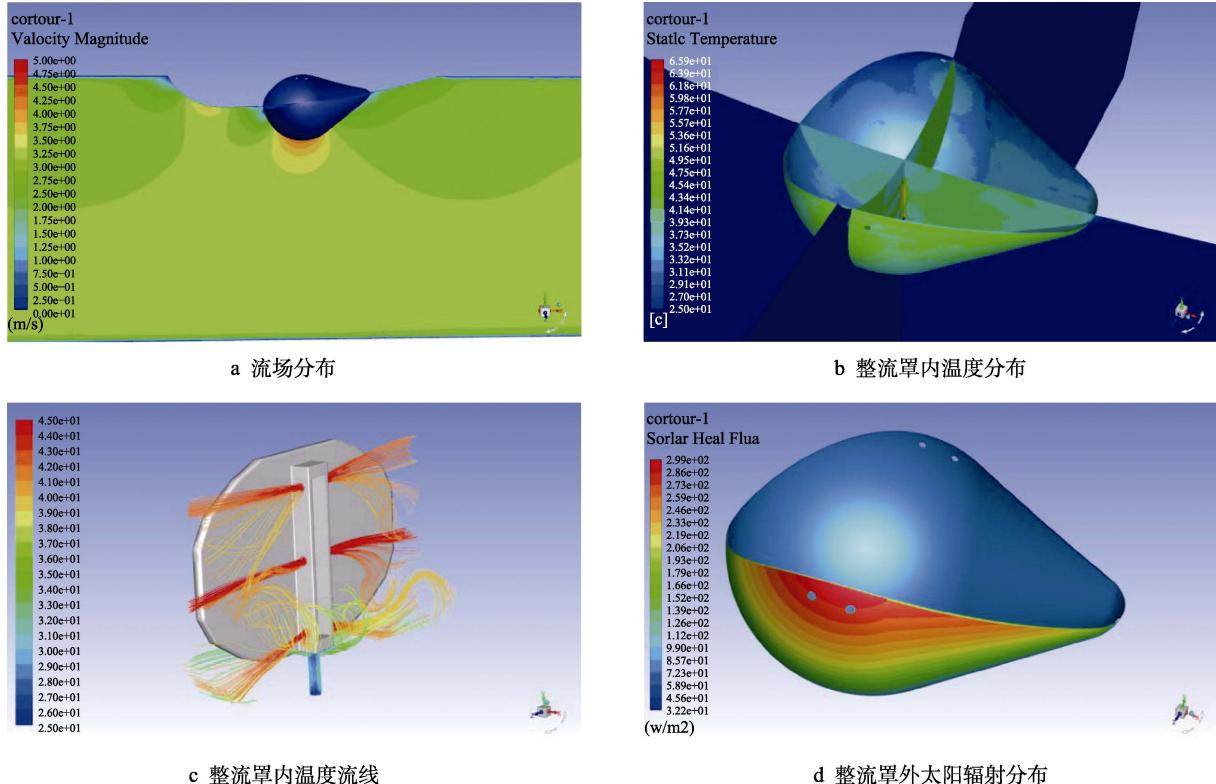


图 3 计算结果

Fig.3 Calculation results: a) flow field distribution; b) temperature distribution in windscreens; c) temperature flow line in windscreens; d) solar radiation distribution outside windscreens

表 2 各工况计算结果数据
Tab.2 Calculation result data under each condition

工况	雷达设备			整流罩散热量	冷却供气流量和温度	整流罩出口排气平均温度/°C	整流罩外表面对流换热量/kW	整流罩外表平均温度/°C	
	冷却风量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	进气平均温度/°C	出气平均温度/°C						
3000 m-3 m/s	1.91	39.8	50.0	总散热 8.7 kW 辐射 35.3 kW	1.0 kg/s, 25 °C	40.1	51.4	24.8	34.3
			发热量 24.13 kW		吸热量 15.23 kW				
6000 m-3 m/s	1.51	25.5	38.9	总散热 10.2 kW 辐射 21.7 kW	0.5 kg/s, -2.6 °C	25.8	56.3	40.8	17.5
			发热量 24.8 kW		吸热量 14.3 kW				

对比表 2 中两种工况下整流罩的仿真计算结果, 可以得到以下结论:

按最严酷状态进行分析, 在 3000 m 和 6000 m 工作高度开通风口引入外界空气向整流罩内强制通风对流, 整流罩内平均温度分别为 40.1 °C 和 25.8 °C, 整流罩内温度环境满足任务设备工作要求。该结论表明, 在任务设备底部的整流罩外壳上设置通风口, 同时在整流罩顶部和后部开设排风口, 可以有效促进整

3000 m-3 m/s 高度, 在整流罩进气口质量流量为 1.0 kg/s 时, 整流罩内部维持在 39~40 °C; 6000 m-3 m/s 高度, 在整流罩进气口质量流量为 0.5 kg/s 时, 整流罩内部维持在 25.5~26 °C。

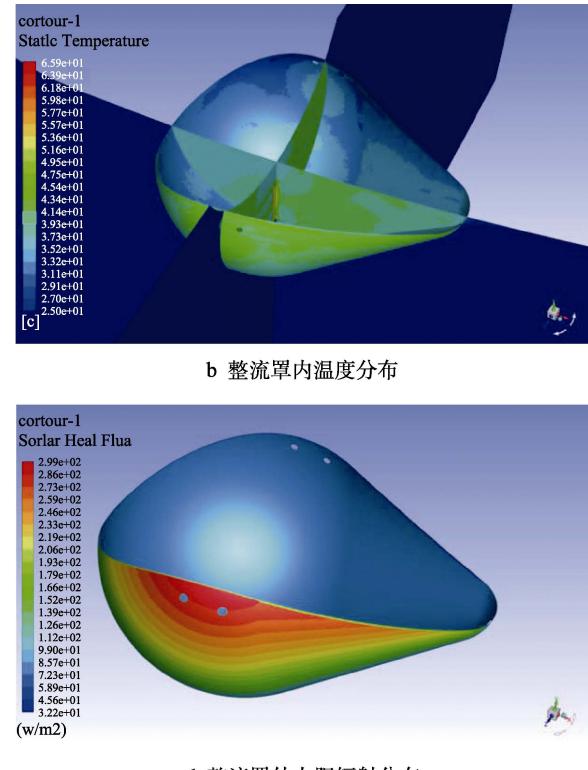


图 3 计算结果

流罩内空气强制对流, 对于雷达散热具有明显作用。

系留气球从 3000 m 上升至 6000 m 高度, 环境温度从 25 °C 下降至 -2.6 °C, 整流罩向环境损失的热量从 68.8 kW 增加至 72.7 kW。此时任务设备散热所需引入外界通风量相应减少, 低温环境空气质量流量从 1.0 kg/s 下降至 0.5 kg/s;

系留气球从 3000 m 上升至 6000 m 高度, 整流罩外表面对流换热量增加近 1 倍, 成为整流罩内雷达散

热的主要途径。该仿真结论表明, 随着浮空器高度增加, 空气密度相对于地面空气变小, 热特性发生变化, 但对流散热仍是最高效的散热方式。不论是保温或散热, 都应优先考虑对流换热影响。

3 结论

文中涉及的仿真计算方法和结论可为同类型系留气球和近地空间浮空器的整流罩散热、保温设计提供参考。通过 Fluent 数值计算快速地获得系留气球整流罩在各高度、环境条件下的散熱情况, 并可直观地获得整流罩内任意位置的流场和温度场分布, 为整流罩及内部任务设备的热设计提供设计依据。通过编制 UDF, 同时实现整流罩外部对流、外部太阳辐射和内部对流、内部红外辐射的实时耦合计算(双向耦合), 不仅更加贴近实际状态, 计算精度更高, 也可用于飞艇艇体、热气球囊体、高空设备舱等设备的热特性分析, 具有十分广泛的应用领域。

参考文献:

- [1] 张志富, 李琦. 系留气球多点式系留拉索设计技术研究[J]. 科技创新与应用, 2019, 267(11): 90-92.
ZHANG Zhi-fu, LI Qi. Research on Design Technology of Multi-point Tether Cable for Tether Balloon[J]. Technology Innovation and Application, 2019, 267(11): 90-92.
- [2] 程龙, 吴利荣, 邢银玲. 浮空器的运用模式探讨[J]. 国际航空, 2017(9): 24-28.
CHENG Long, WU Li-rong, XING Yin-ling. A Discussion on the Application Mode of Aerostat[J]. International Aviation, 2017(9): 24-28.
- [3] 黄宛宁, 张晓军, 祝榕辰, 等. 浮空器在应急通信中的应用[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 55-64.
HUANG Wan-ning, ZHANG Xiao-jun, ZHU Rong-chen, et al. Application of Aerostat in Emergency Communication[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(6): 55-64.
- [4] 陈克艳. 面向智慧城市的浮空器应用研究[J]. 数字化用户, 2018(30): 52.
CHEN Ke-yan. Research on the Application of Aerostat for Smart City[J]. Digital User, 2018(30): 52.
- [5] 李美. 系留气球装备环境工程浅析[J]. 西安航空学院学报, 2015(1): 29-32.
LI Mei. Captive Balloon Equipment Environmental Engineering[J]. Journal of Xi'an Aerotechnical College, 2015(1): 29-32.
- [6] 黄伟良, 李琦. 基于系留气球的空中视频监控在城市反恐中的应用研究[J]. 西安航空学院学报, 2016(1): 50-54.
HUANG Wei-liang, LI Qi. Application of Aerial Video Surveillance in Urban Anti-terrorism Based on Tethered Balloon[J]. Journal of Xi'an Aerotechnical College, 2016, (1): 50-54.
- [7] 张新苗. 球载反巡雷达系统设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(6): 95-96.
ZHANG Xin-miao. Design of Ball Borne Anti Patrol Radar System[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(6): 95-96.
- [8] 邓小龙, 麻震宇, 罗晓英. 国外系留气球装备发展与应用启示[J]. 飞航导弹, 2020(6): 76-82.
DENG Xiao-long, MA Zhen-yu, LUO Xiao-ying. Development and Application of Tethered Balloon Equipment in Foreign Countries[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(6): 76-82.
- [9] 沈寒冰, 丁海煜, 任磊, 等. 提供广覆盖应急通信手段的探讨[C]// 中国通信学会信息通信网络技术委员会年会. 西安: 中国通信学会, 2009.
SHEN Han-bing, DING Hai-yu, REN Lei, et al. Discussion on providing wide coverage emergency communication means[C]. Annual meeting of ICT Committee of China Communications Society. Xi'an: China Institute of Communications, 2009.
- [10] BESSON D, DAGKESAMANSKII R, KRAVCHENKO E, et al. Tethered Balloons for Radio Detection of Ultra High Energy Cosmic Neutrinos in Antarctica[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment), 2012, 662(S1): S50-S53.
- [11] LIU Q, WU Z, ZHU M, et al. A Comprehensive Numerical Model Investigating the Thermal-dynamic Performance of Scientific Balloon[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(2): 325-338.
- [12] ISABEL P G, ANGEL S A, BEZDENEJNYKH N, et al. Transient Thermal Analysis during the Ascent Phase of a Balloon-borne Payload. Comparison with SUNRISE Test Flight Measurements[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8-9): 1507-1513.
- [13] 彭桂林, 赵林华. 系留气球内囊氦空二元气体浓度分布特性试验研究[J]. 低温与超导, 2011(9): 23-25.
PENG Gui-lin, ZHAO Lin-hua. Experimental Study on Concentration Distribution Characteristics of Helium Air Binary Gas in Tethered Balloon Inner Capsule[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011(9): 23-25.
- [14] FERRERO L, RICCIO A, PERRONE M G, et al. Mixing Height Determination by Tethered Balloon-based Particle Soundings and Modeling Simulations[J]. Atmospheric Research, 2011, 102(1-2): 0-156.
- [15] DAI Q, FANG X, LI X, et al. Performance Simulation of High Altitude Scientific Balloons[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(6): 1045-1052.
- [16] CATHEY H. Advances in the Thermal Analysis of Scientific Balloons[R]. AIAA 1996-9605, 1996.
- [17] 范磊, 方贤德, 李大鹏. 浮空器太阳辐射模型研究[J]. 西安航空学院学报, 2013, 31(3): 47-49.
MAO Lei, FANG Xian-de, LI Da-peng. Research on So-

- lar Radiation Model for Aerostat[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2013, 31(3): 47-49.
- [18] 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 低空环境中浮空器的热数值模拟与实验研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2417-2421.
CHENG Xue-tao, XU Xiang-hua, LIANG Xin-gang. Thermal Simulation and Experiment for An Airship under Low Altitude Environment[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2417-2421.
- [19] 刘四洋, 浮空器气囊热特性分析研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
LIU Si-yang. Study on Thermal Characteristics of Aero-stat Ballonet[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [20] DAI Q, XING D, FANG X, et al. Numerical Research on the Thermal Performance of High Altitude Scientific Balloons[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 11: 193.
- [21] 徐亮, 陆景松. 关于系留气球载荷整流罩散热方法探讨与仿真分析[J]. 科技视界, 2019(5): 133-134.
XU Liang, LU Jing-song. Comparative Analysis and Simulation of Two Projects of Heat Dissipation of Aero-stat Windscreen[J]. Science & Technology Vision, 2019(5): 133-134.
- [22] 苏彦华. 系留气球整流罩形状影响模拟研究[J]. 科技视界, 2018, 256(34): 15-16.
SU Yan-hua. Simulation of the Influence of the Shape of the Fairing of Tethered Balloon[J]. Science & Technology Vision, 2018, 256(34): 15-16.
- [23] 董雅洁, 李强, 张雪. 平流层电子设备温度特征的仿真与试验研究 [J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(01): 90-97.
DONG Ya-jie, LI Qiang, ZHANG Xue. Numerical Simulation and Experiment for Thermal Behavior of Stratospheric Electronic Equipment[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(01): 90-97.
- [24] 李辉, 何敬宇, 孙娜. 平流层飞艇驻空过程中热力学特性及影响因素研究 [J]. 西安航空学院学报, 2016, 134(1): 42-45.
LI Hui, HE Jing-Yu, SUN Na. Research on Thermal Performance of a Stratospheric Airship at High-Altitude Station-Keeping Conditions[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2016, 134(1): 42-45.