

电子吊舱温度环境测试分析

包胜, 胡博, 褚鑫, 王超, 尹本浩

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: **目的** 为电子吊舱热管理系统设计提供实测数据支撑。**方法** 在电子吊舱内部不同位置部署高精度温度传感器, 并配套具有统一时标的参数采集设备, 采集不同季节、不同飞行工况下电子吊舱内部的温度数据, 获取舱内温度环境参数。**结果** 当飞行工况稳定时, 电子吊舱内部环境温度的稳定时间约为 1200 s, 稳定值与当地大气总温的差别小于 3 °C。在不同飞行工况下稳定飞行时, 舱内温度高于当地大气静温。以高空 (11 km) 飞行工况为例, 当地大气静温为-50—60 °C, 由于舱体蒙皮受气动加热影响, 舱内环境温度仍维持在-40 °C 以上。**结论** 飞行工况不同, 吊舱内部环境温度有显著差别, 随飞行工况变化, 吊舱内部环境温度的变化相对滞后, 其响应速度与材料导热能力正相关。

关键词: 电子吊舱; 飞行工况; 季节; 温度; 稳定时间; 响应速度

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0043-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.008

A Survey Analysis of Ambient Temperature Inside Electronic Pod

BAO Sheng, HU Bo, CHU Xin, WANG Chao, YIN Ben-hao

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: To support the design of electronic pod thermal management system, a survey analysis of ambient temperature inside a electronic pod has been conducted. The electronic pod is carried by aircraft platform, and multiple high-precision temperature sensors are deployed inside the electronic pod, and they are equipped with parameter acquisition equipment with unified time scale. The cabin temperature is collected under different flight conditions in different seasons, and the results are as follows: Response of ambient temperature inside electronic pod lags far behind of the change of flight conditions, and positive correlation has been found between the response speeds and thermal conductivity of materials. When flight condition remains stable, the ambient temperature inside electronic pod, which is higher than the local atmospheric static temperature, becomes stable in 1200 seconds. Taking high altitude flight conditions (11km) as an example, the local atmospheric static temperature range is (-50—60) centigrade, but the ambient temperature inside electronic pod remains above -40 centigrade, because the pod's skin is affected by aerodynamic heating. The conclusion of this paper is that there are significant differences of the ambient temperatures inside the pod under different flight conditions. When flight condition remains stable, the ambient temperature inside electronic pod, which is close to the total temperature of local atmosphere, becomes stable in 1200 seconds.

KEY WORDS: electronic pods; flight conditions; season; temperature; stabilization time; response speed

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-06-22

Received: 2021-05-25; Revised: 2021-06-22

作者简介: 包胜 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子设备热管理。

Biography: BAO Sheng (1987—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: thermal management of electronic equipment.

引文格式: 包胜, 胡博, 褚鑫, 等. 电子吊舱温度环境测试分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 043-047.

BAO Sheng, HU Bo, CHU Xin, et al. A survey analysis of ambient temperature inside electronic pod[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 043-047.

电子吊舱具有独立性强、可扩展性好的优点,是进一步提升战斗机作战能力的主要方式之一。目前,各种类型电子吊舱(如电子侦察吊舱、激光吊舱、红外吊舱和雷达吊舱等)已广泛应用于载机平台^[1]。当载机在大气中飞行时,气动加热效应使吊舱表面的附面层温度升高,飞行速度越高,气动加热越明显。吊舱表面温度急剧升高,给舱内电子设备的散热带来风险。近20年来,众多研究团队开展了一系列专用于电子吊舱的环境控制系统相关研究^[2-9],提出冲压空气直接冷却供液系统、蒸发循环制冷系统、逆升压空气循环制冷供液系统及改进或组合型的混合制冷系统,解决了大量工程实际应用难题。

随着吊舱内电子设备的集成度越来越高,其热耗也显著提升,电子吊舱热环境设计与分析显得越来越重要。如某吊舱红外测量窗口的温度直接影响目标成像特性,需要实时测量检测窗的温度变化,利用该测量数据以及温度与成像特性的相关性来消除热噪声的干扰,以便更准确地得到目标特性^[10]。

为降低航空电子平台环境控制系统的设计、试验、使用的风险,多种仿真工具在环境控制系统仿真上的应用越来越多^[11],主要有 Dymola、SIMUL8、BuildSim、SimCreator 等,其中 MATLAB/Simulink 和 EASY5 在航空平台环境控制系统仿真上应用较多。国外从20世纪60—70年代开始,已经陆续开展了航空电子平台的动态热管理模型的建模工作^[12]。国内从20世纪90年代至今,这方面的研究呈加速趋势^[13-22]。

综上所述,受限于试验条件及高昂的试验成本,鲜有详细报道航空电子平台舱内温度环境相关实测结果。文中以实际测试结果为研究对象,分析了不同飞行条件下电子吊舱舱内的温度环境特性,尤其对舱内温度环境的动态响应展开了详细的分析,供相关研究人员在开展相关系统设计、仿真时参考。

1 测试系统介绍

1.1 测试原理

电子吊舱舱内温度环境实测原理如图1所示。电源分机负责为数据采集与记录设备供电,数据采集与记录设备负责采集并记录各传感器的测量结果,所有数据均实时存储。载机起飞前,系统需在地面进行GPS授时,保证吊舱内所有测试环境参数具有同一GPS时钟。如多个电子吊舱同时测量,需分别对各个测量和记录设备进行GPS授时,保证不同吊舱所测环境参数具有统一的GPS时间信号。

为确保测量得到的环境数据可用,还应同步获取载机的飞行状态参数。需获取的参数主要包括:含GPS时钟的气压高度、马赫数(Ma)、指示空速、真攻角、大气总温、大气压力等。使测量得到的吊

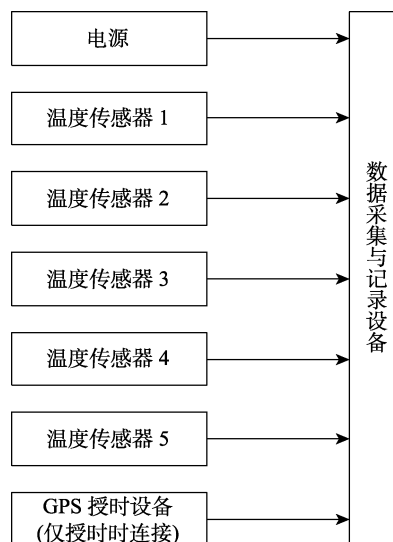


图1 电子吊舱舱内温度环境实测原理

Fig.1 Schematic diagram of measurement of ambient temperature inside electronic pod

舱环境数据与飞行状态数据同步,即飞参记录仪和环境数据测量与记录设备采用同一GPS时钟进行时间记录,从而实现飞参数据和吊舱环境测量数据的时标统一。

1.2 测点分布

为全面评估吊舱舱内温度环境条件,吊舱内温度环境测量的测点分布如图2所示。共有5个温度测量点,依次位于前端天线罩内壁、前端天线罩空气、舱段内壁、后端天线罩空气、后端天线罩内壁。吊舱舱体为薄壁框架结构,壁厚3mm。除天线罩采用无碱布材料外,主体材质均为铝材。

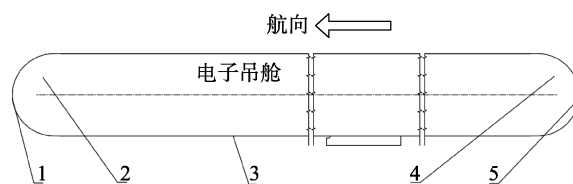


图2 电子吊舱舱内温度环境测量的测点分布

Fig.2 Distribution of ambient temperature measurement points inside electronic pod

2 测试结果及分析

为便于数据分析,尽量选取稳定的飞行工况进行分析。同时为对比气候对吊舱内部温度环境的影响,分别选取不同季节的测试结果开展分析研究。

2.1 冬季工况

某年冬季某日,地面温度为 4°C ,地面压力为 99.1 kPa (绝对压力),飞行参数如图3所示。载机在同一飞行高度(约 3000 m)持续飞行,期间经历

一次加速、一次减速。为便于进行数据分析, 依次将稳定飞行工况段定义为工况 1、工况 2、工况 3, 各工况稳定持续时间依次约为 610、540、1430 s, 每个工况之间为过渡段。

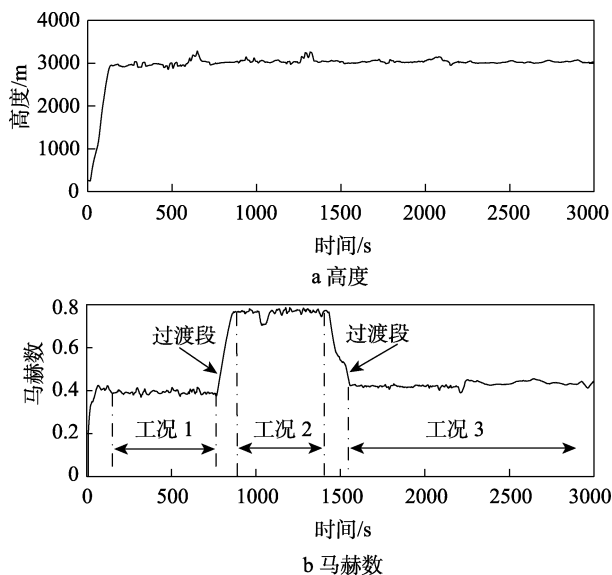


图 3 某冬季工况飞行参数

Fig.3 Parameters of flight condition in winter: a) height; b) mach number

该冬季工况飞行架次中, 吊舱内部环境温度实测结果如图 4 所示。由图 4 可知, 随飞行工况变化, 大气总温同步实时变化, 受热惯性影响, 吊舱内部温度变化相对滞后。在工况 1、工况 2 中, 飞行工况稳定时间较短时, 吊舱内部环境温度不能达到平衡状态, 但温度变化梯度随稳定时间增长而变小。在工况 3 中, 飞行工况稳定时间超过 1200 s 时, 吊舱内部环境温度趋于稳定, 各检测点温度稳定值均与大气总温相近, 差别小于 3 °C。对比分析吊舱内部不同位置的温

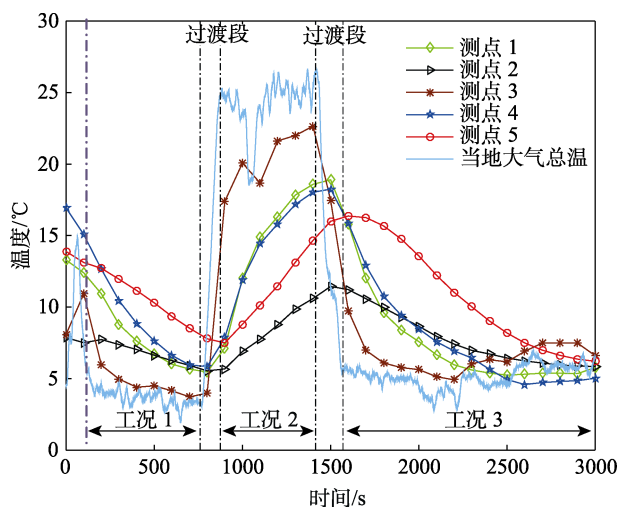


图 4 某冬季工况吊舱内部温度环境测试结果

Fig.4 Temperature measurement results inside electronic pod in winter

度响应特性, 随飞行工况变化, 温度变化由快到慢的位置依次为舱段内壁、前端天线罩内壁/后端天线罩内壁、后端天线罩空气/前端天线罩空气。其主要原因在于舱体壁面为铝材, 天线罩为非金属材料, 铝材导热率远高于天线罩材料, 而空气导热率最低。

2.2 夏季工况

某年夏季某日, 地面温度为 31.5 °C, 地面压力为 96.4 kPa (绝对压力), 飞行参数如图 5 所示。载机在同一飞行高度 (约 5000 m) 持续飞行, 期间经历 2 次减速。为便于进行数据分析, 依次将稳定飞行工况段定义为工况 4、工况 5、工况 6, 各工况稳定持续时间依次约为 500、450、480 s, 每个工况之间为过渡段。

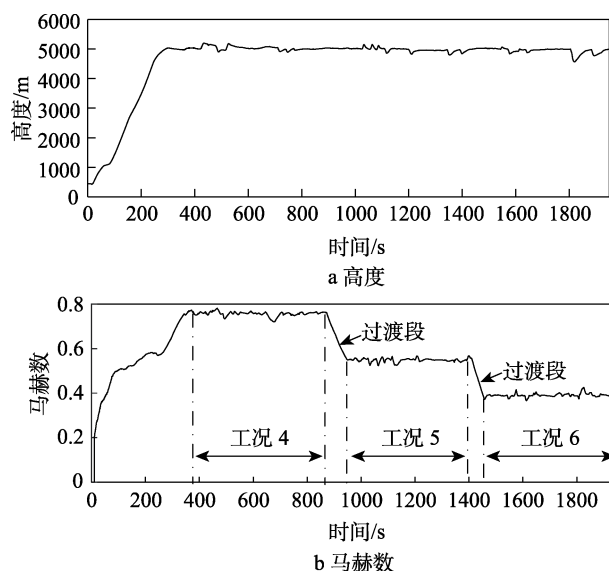


图 5 某夏季工况飞行参数

Fig.5 Parameters of flight condition in summer: a) height; b) mach number

该夏季工况飞行架次中, 吊舱内部环境温度实测结果如图 6 所示。由图 6 可知, 随飞行工况变化, 大气总温同步实时变化, 受热惯性影响, 吊舱内部温度变化相对滞后。在工况 4、工况 5、工况 6 中, 飞行工况稳定时间较短 (≤ 500 s), 吊舱内部环境温度不能达到平衡状态, 但温度变化梯度随稳定时间增长而变小。对比分析吊舱内部不同位置的温度响应特性, 随飞行工况变化, 温度变化由快到慢的位置依次为舱段内壁、前端天线罩内壁/后端天线罩内壁、后端天线罩空气/前端天线罩空气。

2.3 数据统计分析

不同季节工况的测试结果汇总见表 1, 每个工况飞行时间均不少于 20 min, 吊舱内部仅参数采集设备处于加电状态。其中, 地面气温取值为载机起飞前的地面大气温度, 当地大气总温为载机平台测试结果。

因飞行速度在一定范围内变化,某些工况的当地大气总温也在一定范围。当地大气静温是根据当地大气总温实测结果换算得出,舱内环境温度指电子吊舱内部环境温度,表中数据取值为舱内空气温度测试结果,具体为测点2、测点4的测试结果。分析表1可知,

在不同飞行工况下,稳定飞行时,舱内温度高于当地大气静温,这一结论在不同飞行高度、不同季节均成立。以高空飞行工况为例,当地大气静温为 $-50\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由于舱体蒙皮受气动加热影响,舱内环境温度仍然维持在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

表1 不同季节工况的测试结果汇总

Tab.1 Summary of test results in different seasons

工况	季节	地面大气温度/ $^{\circ}\text{C}$	飞行高度/m	当地大气静温/ $^{\circ}\text{C}$	当地大气总温/ $^{\circ}\text{C}$	吊舱内部环境温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	春季	19.6	3190	-6.6	7.8	+8.7~+19.5
2	春季	19.8	5330	-16.3	10.3	+8.9~+25.6
3	春季	25.8	8990	-42.5	-15.9	-15.3~-0.3
4	春季	22.4	9940	-47.2	-23.1	-21.5~-6.4
5	春季	25.8	10020	-49.2	-21.2	-20.3~-8.6
6	夏季	29.6	2960	8.8	+14.7~+19.5	+18.5~+34.3
7	夏季	31.5	5000	-3.8	+5~+25.9	+7.2~+36.9
8	夏季	26.5	5070	-8.5	+14.7~+22.1	+17.2~+36.3
9	夏季	31.2	10980	-46.9	-27.0~-20.1	-26.1~+37.2
10	冬季	4.0	3030	-5.2	+3.8~+25.1	+5.4~+17.6
11	冬季	12.1	4930	-15.4	-8~-5.7	-5.2~+25.6
12	冬季	15.4	4980	-22.7	-8~+6.0	-8.0~+27.2
13	冬季	2.9	8020	-39.8	-9.9	-9.8~+16.4
14	冬季	4.2	10940	-50.8	-32	-30.1~+10.5
15	冬季	6.3	10980	-59.4	-39.7~-31.4	-38.6~-9.4
16	冬季	9.4	11000	-50.3	-21.8	-20~+17.5

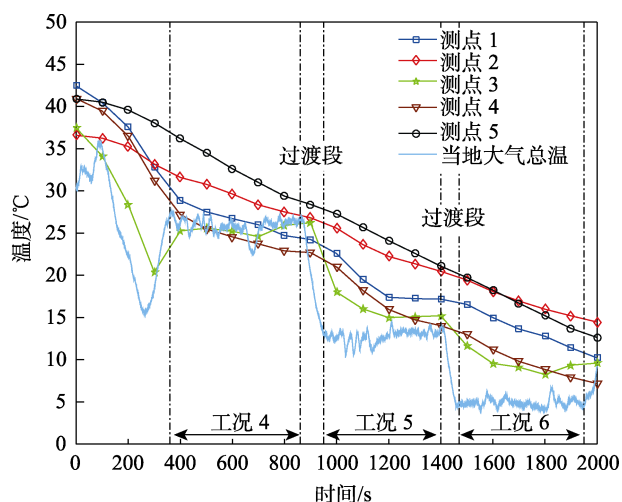


图6 某夏季工况吊舱内部温度环境测试结果

Fig.6 Temperature measurement results inside electronic pod in summer

3 结论

1) 随飞行工况变化,吊舱内部温度环境的变化相对滞后,其响应速度与材料导热能力正相关。当飞行工况稳定时,某电子吊舱内部温度环境的稳定时间约为1200 s,稳定值与当地大气总温的差别小于 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 在不同飞行工况下稳定飞行时,舱内温度高于当地大气静温。以高空飞行工况为例,当地大气静温为 $-50\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由于舱体蒙皮受气动加热影响,舱内环境温度仍然维持在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

参考文献:

- [1] 余建祖, 苏楠. 电子吊舱的环境控制技术[J]. 低温工程, 1998(1): 47-52
YU Jian-zu, SU Nan. Environmental control technology for avionics pods[J]. Cryogenics, 1998(1): 47-52.
- [2] 余建祖, 钱翼稷. 电子设备吊舱冲压空气驱动的环境控制系统研制[J]. 航空学报, 1997(1): 96-99.
YU Jian-zu, QIAN Yi-ji. The development of a ram air driven environmental control system for avionics pods[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 1997(1): 96-99.
- [3] 庞利娥, 蒋福根. 一种机载电子吊舱热环境设计与分析[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(4): 55-58.
PANG Li-e, JIANG Fu-gen. Thermal environment design and analysis of the aircraft electronic pod[J]. Aerospace electronic warfare, 2013, 29(4): 55-58.[知网]
- [4] 肖晓劲, 袁修干, 高峰. 高速电机驱动的逆升压式空气循环制冷系统研究[J]. 真空与低温, 2004, 10(3): 163-167.
XIAO Xiao-jin, YUAN Xiu-gan, GAO Feng. Research on

- reverse-bootstrap air cycle refrigeration system driven by high-speed motor[J]. Vacuum and cryogenics, 2004, 10(3): 163-167.
- [5] 刘鑫鑫. 某型吊舱环控系统组件的研制及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LIU Xin-xin. Development and performance research on the environmental control system components for a certain type of pod[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [6] 邓瑾智. 动力涡轮驱动的逆升压式空气循环制冷系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
DENG Jin-zhi. Research on reverse-bootstrap air cycle refrigeration system driven by powered turbine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [7] 郭侨. 动力涡轮驱动的逆升压式空气循环制冷系统的设计与优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
GUO Qiao. System design and optimization on reverse-bootstrap air cycle refrigeration system driven by powered turbine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [8] 王超, 包胜, 王璐璐. TTC 双涡轮并行制冷吊舱环控系统性能研究[J]. 电子机械工程, 2017, 33(1): 48-51.
WANG Chao, BAO Sheng, WANG Lu-lu. Capability analysis of Double-turbo parallel refrigeration of Turbo-turbo-compressor environment control system of pods[J]. Electro-mechanical engineering, 2017, 33(1): 48-51.
- [9] 王超, 叶元鹏. 某直升机载电子吊舱环控供液系统[J]. 电子机械工程, 2017, 33(5): 32-35.
WANG Chao, YE Yuan-peng. Liquid supply environmental control system for helicopter-mounted electronic pod[J]. Electro-mechanical engineering, 2017, 33(5): 32-35.
- [10] 胡炳梁, 高伟, 杜云飞, 等. 超音速机载红外测量吊舱窗口温度测量实现[J]. 红外技术, 2003, 25(3): 24-26.
HU Bing-liang, GAO Wei, DU Yun-fei, et al. Measure infrared window's temperature of ultrasonic infrared pod[J]. Infrared technology, 2003, 25(3): 24-26.
- [11] 董素君, 封正纲. EASY5 仿真软件在制冷系统仿真中的应用[J]. 低温工程, 2003(3): 34-41.
DONG Su-jun, FENG Zheng-gang. The application of easy5 in refrigeration system simulation[J]. Cryogenics, 2003(3): 34-41.
- [12] 何君, 赵竞全, 孙薇. 航空升压式空气循环制冷组件动态特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 727-729.
HE Jun, ZHAO Jing-quan, SUN Wei. Dynamic simulation of bootstrap air cycle refrigeration components for aircraft environmental control system[J]. Acta simulata systematica sinica, 2004, 16(4): 727-729.
- [13] 姚洪伟, 王浚. 飞机环控系统建模与换热器参数优化研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3040-3042.
YAO Hong-wei, WANG Jun. Modeling of airplane ECS and parameter optimization for heat exchanger[J]. Acta simulata systematica sinica, 2005, 17(12): 3040-3042.
- [14] 应文江. 座舱瞬态热载荷的计算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1994(3): 407-411.
YING Wen-jiang. Method for calculating transitional thermal load in cabin[J]. Transactions of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 1994(3): 407-411.
- [15] 方玉峰. 歼击机环控系统动态仿真[J]. 北航学报, 2003, 17(10): 51-53.
FANG Yu-feng. Dynamic simulation of fighter environmental control system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 17(10): 51-53.
- [16] 宋俊斌, 袁修干. MATLAB 在飞机环境控制系统仿真中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 43-46.
SONG Jun-xiao, YUAN Xiu-gan. MATLAB simulation model of environmental control system[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2002, 28(1): 43-46.
- [17] 穆景阳, 陈江平, 陈芝久, 等. 动态数值仿真在飞机环控系统中应用[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(S1): 19-25.
MU Jing-yang, CHEN Jiang-ping, CHEN Zhi-jiu, et al. Application of dynamical digital simulation to aircraft environment system[J]. Journal of Dalian university of technology, 2001, 41(S1): 19-25.
- [18] 赵俊茹, 史忠科. 飞机环境控制系统的仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(6): 542-544.
ZHAO Jun-ru, SHI Zhong-ke. Simulation study on aircraft environmental control system[J]. Computer automated measurement & control, 2005, 13(6): 542-544.
- [19] 姚伟. 平流层飞艇热力学模型和环境控制方案设想[C]//中国空间技术研究院近空间研讨会. 北京: [出版者不详], 2006.
YAO Wei. Thermodynamic model and thermal control method of astratospheric airship[C]. CAST Near-Space Conference. Beijing: [s. n.], 2006.
- [20] 姚伟, 李勇, 王文隼, 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 Wen-jun, et al. Thermodynamic model and numerical simulation of a stratospheric airship take-off process[J]. Journal of astronautics, 2007, 28(3): 603-607.
- [21] 艾青, 夏新林, 唐尧. 求解飞机蒙皮耦合热效应的壁面热流函数法[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 635-637.
AI Qing, XIA Xin-lin, TANG Yao. The wall heat flux function for solving coupled heat transfer of aircraft skin[J]. Journal of engineering thermophysics, 2006, 27(4): 635-637.
- [22] 夏新林, 艾青, 任德鹏. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 174-177.
XIA Xin-lin, AI Qing, REN De-peng. Analysis on the transient temperature-fields for infrared radiation of aircraft skin[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2007, 26(3): 174-177.