

# 液冷电子吊舱温度环境测试研究

包胜, 王敬韬, 司俊珊, 祁成武, 褚鑫, 王超

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610000)

**摘要:** **目的** 为液冷电子吊舱热管理系统设计、可靠性预计提供实测数据支撑。**方法** 在液冷电子吊舱搭载航空平台, 通过采集不同季节、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** 在统计工况范围内, 引气温度的波动范围为 $-30\sim 54\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 出现在 $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的概率为80.8%, 而供液温度的波动范围为 $-5\sim 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 出现在 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的概率为85.3%。液冷电子吊舱的引气温度、供液温度呈现明显的季节特性, 从冬季、春秋到夏季, 引气温度、供液温度依次升高, 在夏季引气温度较高的情况下, 环控分系统可使供液温度明显低于引气温度。**结论** 受环控分系统主动温度控制、电子设备发热、电子吊舱热容等影响, 液冷电子吊舱供液温度的波动范围明显小于引气温度的波动范围, 这一特性对提高舱内电子设备的可靠性更有利。供液温度的动态稳定时间约为5 min, 即当电子设备连续工作时间不超过5 min时, 在开展热设计时需要进行瞬态工况评估。

**关键词:** 液冷电子吊舱; 引气温度; 供液温度; 季节; 区间概率; 动态稳定时间

中图分类号: V216 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)04-0080-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.013

## Ambient Temperature Inside Liquid-cooled Electronic Pod

BAO Sheng, WANG Jing-tao, SI Jun-shan, QI Cheng-wu, CHU Xin, WANG Chao

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610000, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to provide actual measurement data support for the design of an electronic pod thermal management system and reliability prediction. The liquid-cooled electronic pods are mounted on the aviation platform to obtain the temperature environment parameters inside the pods by collecting the temperature data inside the electronic pods under different seasons and different flight conditions. The results show that, within the range of statistical conditions, the fluctuation range of bleed air temperature is  $-30\sim 54\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and interval probability in  $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 80.8%, however, the fluctuation range of supply liquid temperature is  $-5\sim 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the interval probability in  $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 85.3%. The temperature level of bleed air and supply liquid inside liquid-cooling electronic pod shows obvious seasonal characteristics, which means from winter to spring/autumn, and to summer, the temperature of bleed air and supply liquid rise in order. As the temperature of bleed air is higher in summer, the environmental control system can make the liquid supply temperature significantly lower than the bleed air temperature. This paper concludes that the fluctuation range of the liquid supply temperature of the liquid-cooled electronic pod is obviously smaller than that of bleed temperature, which is affected by the heat capacity of the environmental control system, electronic

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-31

Received: 2021-01-25; Revised: 2021-03-31

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, 王敬韬, 司俊珊, 等. 液冷电子吊舱温度环境测试研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 080-085.

BAO Sheng, WANG Jing-tao, SI Jun-shan, et al. Ambient Temperature Inside Liquid-cooled Electronic Pod[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 080-085.

equipment and electronic pod structure, and it is more advantageous to improve the reliability of electronic equipment. The dynamic stabilization time of the liquid supply temperature is about 5 minutes, which means that when the continuous working time is less than 5 minutes, it is necessary to carry out transient condition assessment in thermal design.

**KEY WORDS:** liquid-cooled electronic pods; bleed air temperature; liquid supply temperature; season; interval probability; the dynamic stabilization time

电子吊舱具有独立性、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)已广泛应用于机载平台<sup>[1]</sup>。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<sup>[2-9]</sup>,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,液冷散热方式已被广泛采用,电子吊舱热设计与分析显得越来越重要。如某机载红外测量吊舱的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,结合温度与成像特性的相关性来消除热噪声的干扰,可以更准确地得到目标特性<sup>[10]</sup>。

为降低航空电子平台环境控制系统设计、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<sup>[11]</sup>,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热管理模型的建模工作<sup>[12]</sup>。国内从 20 世纪 90 年代至今,这方面的研究呈加速趋势<sup>[13-22]</sup>。

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的实测结果。随着液冷技术的广泛应用,亟需针对性开展航空平台液冷电子设备温度环境的测试研究工作。本文以实际测试结果作为研究对象,分析不同飞行工况下液冷电子吊舱的供液温度、引气温度特性,并对供液温度的动态响应展开详细分析,供相关研究人员在开展热管理系统设计、可靠性预计时参考。

## 1 测试系统介绍

### 1.1 测试对象

测试对象为某液冷电子吊舱,电子吊舱内的环控分系统采用 TTC 双涡轮并行制冷技术体制<sup>[8]</sup>。该项技术体制是一种改进型逆升压空气循环(TTC)吊舱环

控系统,试验过程中所采用的传感器为 PT 型热电偶,恒电压型温度检测电路集成在控制器中。设计条件为地面 38 °C (热天),设计供液温度为 55 °C。

### 1.2 测试目的

测试目的是获取某液冷电子吊舱温度环境。对于液冷电子吊舱内的电子设备而言,供液温度是最直接的散热边界。与此对应,引气温度与舱内环境温度接近,对设备的散热影响次之。因此,分析实际飞行工况条件下的引气温度、供液温度,可以为舱内电子设备热设计、可靠性预计提供支撑。

### 1.3 测试原理

液冷电子吊舱舱内温度环境测试原理如图 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 时钟的高度、速度、攻角等,应使测量得到的液冷电子吊舱环境数据与飞行状态数据同步。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。

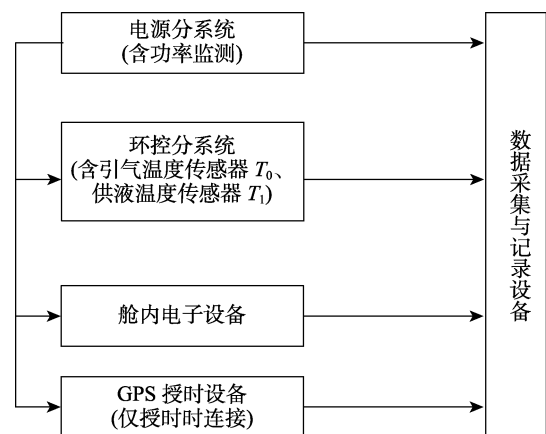


图 1 液冷电子吊舱舱内温度环境实测原理

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

## 1.4 测点分布

吊舱内引气温度  $T_0$ 、供液温度  $T_1$  测量的测点分布如图 2 所示。引气温度测量点位于吊舱引气口，供液温度测量点位于环控分系统供液口。

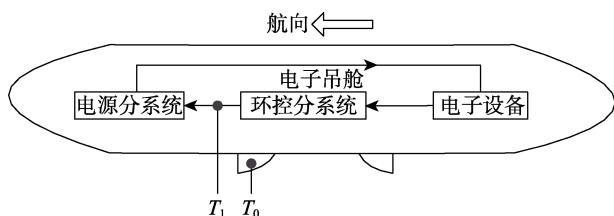


图 2 电子吊舱舱内温度环境测量的测点分布  
Fig.2 Distribution of ambient temperature measurement points inside electronic pod

## 2 结果及分析

为使实测数据更具有代表性,本文选取的飞行架次累计达到数十架次,时间长度跨越 2 a,飞行工况覆盖高空、中空、低空,有效累计飞行时长约 60 飞行小时。为对比季节性气候对吊舱温度环境的影响,针对不同季节的测试结果也分别开展统计分析。为研究引气温度、供液温度的动态响应特性,针对瞬态测试结果开展了响应时间分析。

### 2.1 总体情况

当飞行器在大气中飞行时,空气受到剧烈压缩和黏性阻滞,在飞行器表面边界层内的气流产生强烈的摩擦,气流速度降至壁面,将动能不可逆转地变为热能,从而引起附面层内温度迅速升高,飞行器表面温度也随之升高,这就是飞行器的气动加热现象。参考文献[23]报道了一种简洁高效的气动加热工程算法求解飞行器结构气动热与温度场,其计算结果与实测结果吻合良好,很好地证明了气动加热现象对飞行器表面温度的重大影响,在开展飞行器整体热设计、结构设计时必须考虑该因素。电子吊舱在不同飞行工况同样面临复杂的外部温度环境,吊舱引气温度、供液温度统计概率分布依次如图 3 所示。由图 3 可知,在统计工况范围内,引气温度最低值为  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高值为  $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,引气温度出现在  $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  内的概率最高;供液温度最低值为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高值为  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,供液温度出现在  $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  内的概率最高。对比分析引气温度、供液温度,引气温度范围完全覆盖供液温度范围,即最低供液温度高于最低引气温度,最高供液温度低于最高引气温度。以上情况表明,测试对象的供液条件可以满足设计要求(不高于  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。一般电子元器件的舒适工作温度范围为  $-5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,电子设备长时间工作在非舒适温度区间时,其可靠性大大降低。当散热边界温度低于  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  或高于  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,甚至可能造成电

子设备不可逆的损坏。从测试结果可以看出,采用液冷的方式对舱内电子设备提供散热条件,可以使舱内设备工作环境的温度范围波动更小,而更小的温度波动范围对提高电子设备的可靠性非常有利。

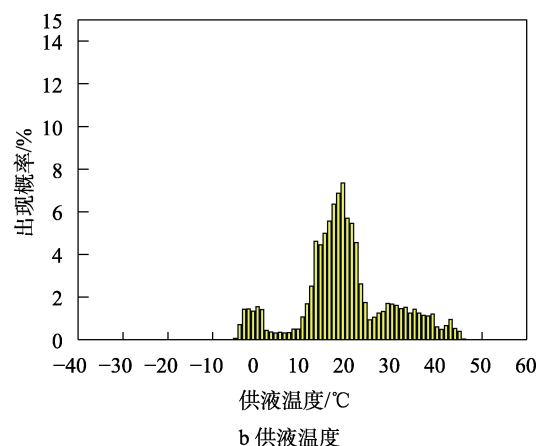
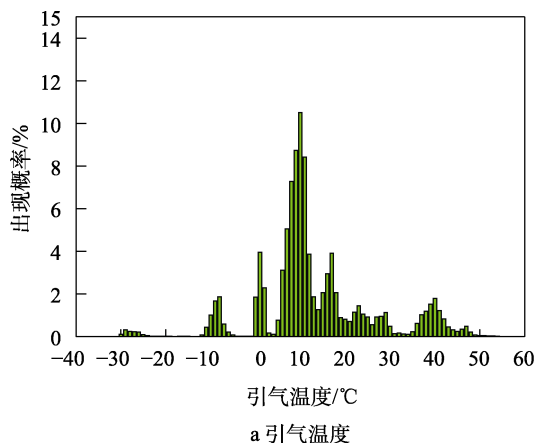


图 3 统计概率分布

Fig.3 Statistical probability distribution: a) bleed air temperature; b) liquid supply temperature

进一步分析吊舱引气温度、供液温度的区间概率分布(见表 1)可知,在统计工况范围内,引气温度出现在  $5\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 62.8%,出现在  $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 80.8%,出现  $< -30\text{ }^{\circ}\text{C}$  或  $\geq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 0%;供液温度出现在  $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 65.5%,出现在  $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 85.3%,出现  $< -6\text{ }^{\circ}\text{C}$  或  $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率为 0%。综合分析引气温度、供液温度的区间概率分布,供液温度的波动范围明显小于引气温度,其原因在于引气温度主要由飞行工况、季节、气温决定,而供液温度除受以上因素影响外,还与环控分系统制冷特性、电子设备工作状态、电子吊舱热容等参数紧密相关。此外,因环控分系统采用了一定的控制逻辑,对液冷电子吊舱内的供液温度实施了主动控制功能。

### 2.2 季节特性

液冷电子吊舱引气温度、供液温度的季节特性统计结果依次如图 4、5 所示。由图 4、5 可知,在统计

表 1 引气温度、供液温度的区间统计概率分布  
Tab.1 Statistical interval probability distribution of bleed air temperature and liquid supply temperature

序号	温度区间/℃	引气温度的区间出现概率/%	供液温度的区间出现概率/%
1	<-30	0.0	0.0
2	-30~-26	1.1	0.0
3	-25~-21	0.2	0.0
4	-20~-16	0.1	0.0
5	-15~-11	0.6	0.0
6	-10~-6	5.4	0.0
7	-5~-1	0.2	5.0
8	0~4	8.4	4.1
9	5~9	24.9	2.0
10	10~14	25.9	14.3
11	15~19	11.9	31.1
12	20~24	5.2	20.1
13	25~29	4.5	6.2
14	30~34	1.0	7.5
15	35~39	4.6	6.1
16	40~44	4.6	3.2
17	45~49	1.4	0.4
18	50~54	0.2	0.0
19	≥55	0.0	0.0

工况范围内, 冬季引气温度的范围为-30~11℃, 春/秋季引气温度的范围为-1~32℃, 夏季引气温度的范围为 5~54℃; 冬季供液温度的范围为-5~23℃, 春/秋季供液温度的范围为 9~43℃, 夏季供液温度的范围为-1~46℃。对比分析不同季节引气温度、供液温度可知, 液冷电子吊舱的引气温度、供液温度呈现明显的季节特性。整体来看, 从冬季、春秋到夏季, 引气温度、供液温度依次升高。特别地, 在夏季引气温度较高的情况下, 液冷电子吊舱的 TTC 涡轮环控系统充分发挥了制冷作用, 使供液温度明显低于引气温度。以上结果表明, 季节变化时, 液冷电子吊舱的 TTC 涡轮环控系统可以发挥良好的平衡作用, 为舱内电子吊舱提高良好的供液温度条件。

### 2.3 动态特性

参考文献[10]报道了超音速工况红外吊舱的红外测量窗口温度的实时变化曲线, 在单次飞行过程中, 红外测量窗口的温度变化范围达到-5~30℃。该变化将直接影响到红外成像精度, 因此有必要研究吊舱环境温度的动态变化特性。本文选取某稳定飞行工况进行动态特性分析(如图 6 所示)。从稳定状态起始时刻起, 飞行速度、飞行高度基本保持恒定, 功率监测

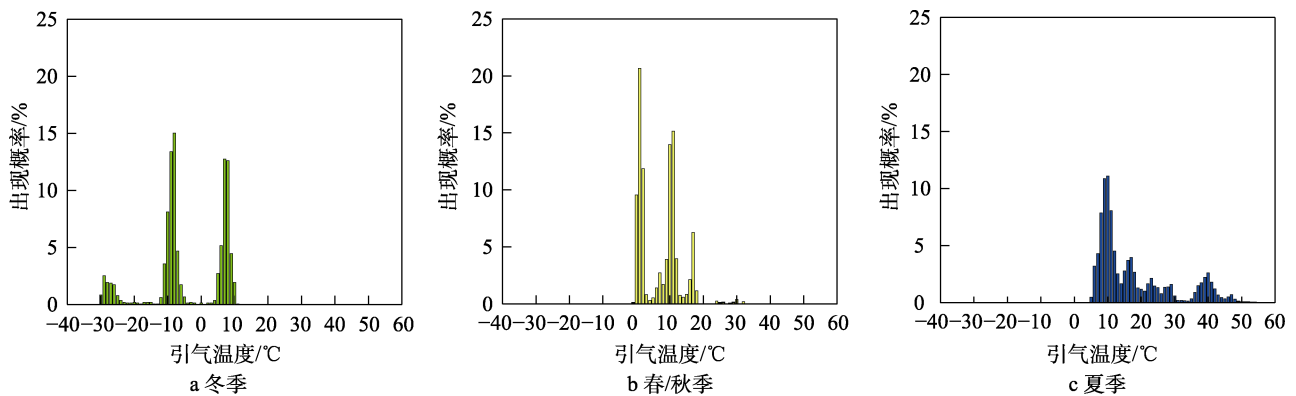


图 4 引气温度统计概率分布

Fig.4 Statistical probability distribution of bleed air temperature: a) in winter, b) in spring/autumn, c) in summer

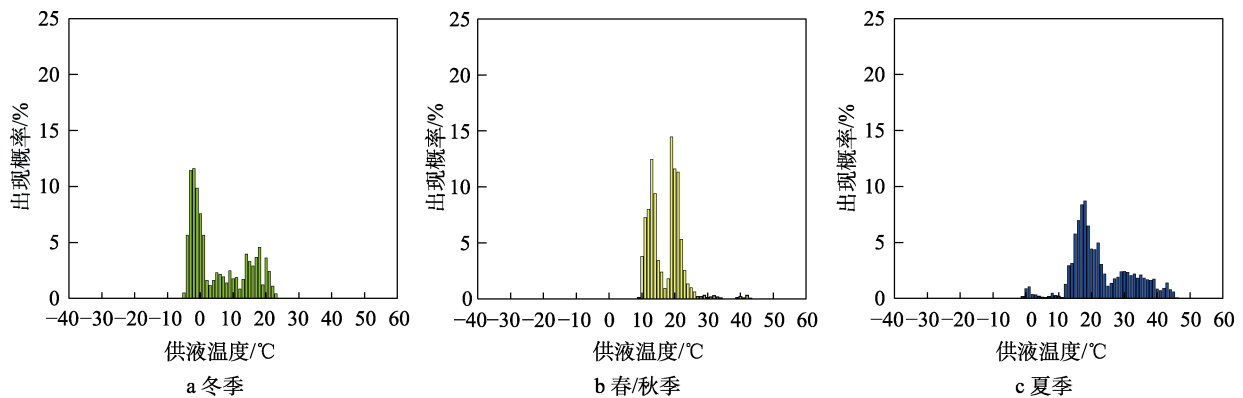


图 5 供液温度统计概率分布

Fig.5 Statistical probability distribution of liquid supply temperature: a) in winter, b) in spring/autumn, c) in summer

值也维持平稳；在 1 min 内，引气温度趋于稳定；在 5 min 内，供液温度趋于稳定。由此推断，液冷电子吊舱引气温度的动态稳定时间不大于 1 min，供液温度的动态稳定时间约为 5 min。以上结果表明，当液冷电子吊舱连续工作时间超过 5 min 时，在开展热设计时需要进行稳态工况评估；当液冷电子吊舱连续工作时间不超过 5 min 时，在开展热设计时需要进行瞬态工况评估。

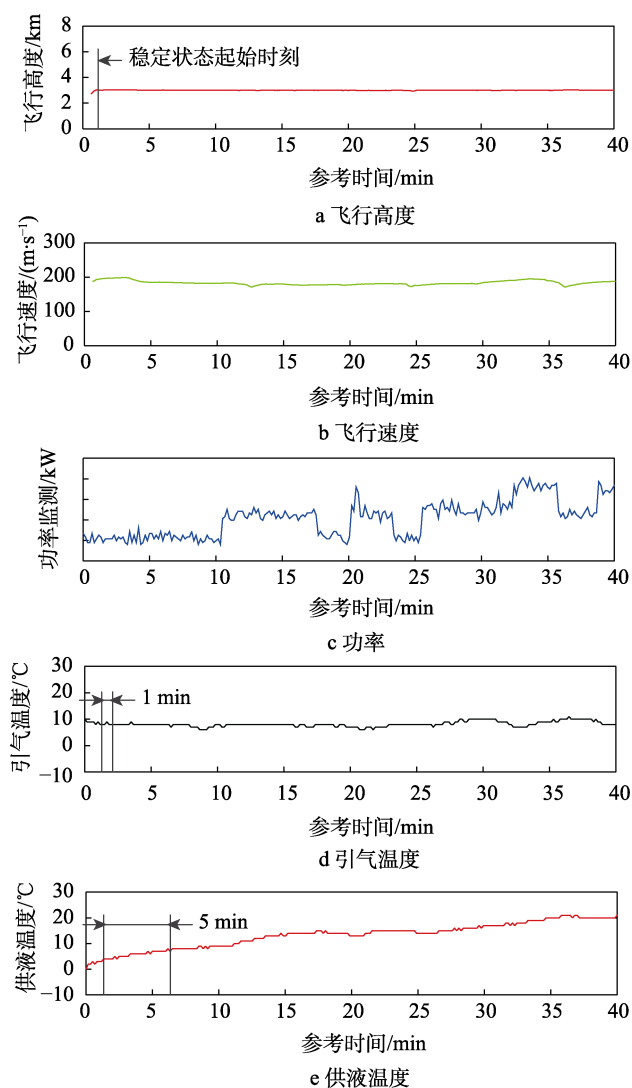


图6 某飞行工况瞬态参数测试结果

Fig.6 Test results of transient parameters in a flight condition: a) flight altitude; b) flight speed; c) power; d) bleed air temperature; e) liquid supply temperature

### 3 结论

1) 受环控分系统主动温度控制、电子设备发热、电子吊舱热容等影响，液冷电子吊舱供液温度的波动范围明显小于引气温度的波动范围。采用液冷的方式对舱内电子设备提供散热条件，可以使舱内设备工作环境的温度范围波动更小，而更小的温度波动范围对提高电子设备的可靠性更有利。

2) 液冷电子吊舱的引气温度、供液温度呈现明显的季节特性，从冬季、春秋到夏季，引气温度、供液温度依次升高。液冷电子吊舱的环控分系统可以发挥良好的平衡作用，为舱内电子吊舱提高良好的供液温度条件。特别地，在夏季引气温度较高的情况下，环控分系统可使供液温度明显低于引气温度。

3) 随飞行工况变化，液冷电子吊舱供液温度的动态稳定时间约为 5 min，即当液冷电子吊舱连续工作时间不超过 5 min 时，在开展热设计时需要进行瞬态工况评估。

### 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): 45-50.  
YU Jian-zu, SU Nan. Environmental Control Technology for Avionics Pods[J]. Cryogenics, 1998(1): 45-50.
- [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, 18(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, 18(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 Lie, JIANG Fu-gen. Thermal Environment Design and Analysis of the Aircraft Electronic Pod[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(4): 55-58.
- [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, 26(3): 407-411.  
YING Wen-jiang. Method for Calculating Transitional Thermal Load in Cabin[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1994, 26(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 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]. 工程热物理论, 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.
- [23] 王志超, 张龙, 姚琳. 高速飞行器结构气动热计算与温度场模拟[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(11): 49-52.  
WANG Zhi-chao, ZHANG Long, YAO Lin. Aerodynamic Heating Calculate and Temperature Field Simulation of High-Speed Vehicles[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(11): 49-52.

责任编辑: 刘世忠