

国内外机载电子设备液体冷却系统分析

白茹, 李定坤, 郭曼利

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 首先分析了国内外机载电子设备液冷系统的工作原理, 即冷却液在液体泵的作用下, 进入电子设备冷板, 带走电子设备的热量, 再通过热交换器进行降温处理, 热量传递到空气或燃油中, 降温后的冷却液流向液体泵, 进行下一次的冷却循环。其次分析了某些机载电子设备因安装位置不适用液冷系统, 则采用强迫通风为其进行冷却, 但热量最终经过空气还是传递至液冷系统中。最后对未来飞机的液体冷却技术进行了展望, 液冷系统未来的发展趋势一定是有区域故障隔离能力, 且冷却液的流量是随着热载荷而动态变化的, 其代偿损失也较小。

关键词: 机载电子设备; 液冷; 代偿损失; 高热流密度; 环境控制

中图分类号: V243

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)10-0073-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.010

Liquid Cooling System for Airborne Electronic Equipment at Home and Abroad

BAI Ru, LI Ding-kun, GUO Man-Li

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

ABSTRACT: Firstly, the working principle of the liquid cooling system of airborne electronic equipment at home and abroad is analyzed, that is, under the action of the liquid pump, the cooling liquid enters the cold plate of electronic equipment, takes away the heat of electronic equipment, and then goes through the heat exchanger for cooling treatment. The heat is transferred to the air or fuel, and the cooled cooling liquid flows to the liquid pump for the next cooling cycle. Secondly, it is also analyzed that some airborne electronic equipment is cooled by forced ventilation because its installation position is not suitable for the liquid cooling system, but the heat is finally transferred to the liquid cooling system through the air. Finally, the future of aircraft liquid cooling technology is prospected. The future development trend of liquid cooling system must be the ability of regional fault isolation, and the flow rate of coolant changes dynamically with the heat load, and its compensatory loss is also small.

KEY WORDS: airborne electronic equipment; liquid cooling; compensatory loss; large heat flux; environmental control

机载电子设备多布置在飞机气密舱内, 电子设备工作时, 70%~90%的输入功率转变成热量。资料显示, 电子设备温度超过 80 °C 时, 每增加 1 °C, 电子元器件的可靠性下降 5%^[1-2]。飞机上常使用自然散热或强

迫通风方式对机载电子设备进行冷却, 强迫通风的冷源有: 空调供气、座舱排气、座舱空气和冲压空气等。如波音 747 使用座舱排气对机载电子设备进行冷却, ERJ-145 使用冲压空气冷却前电子设备舱中的机载电

收稿日期: 2021-09-25; 修订日期: 2021-12-20

Received: 2021-09-25; Revised: 2021-12-20

作者简介: 白茹 (1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子设备液体冷却。

Biography: BAI Ru (1992-), Female, Master, Engineer, Research focus: electronic equipment liquid cooling.

引文格式: 白茹, 李定坤, 郭曼利. 国内外机载电子设备液体冷却系统分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 073-079.

BAI Ru, LI Ding-kun, GUO Man-Li. Liquid Cooling System for Airborne Electronic Equipment at Home and Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 073-079.

子设备^[3]。随着机载电子设备的发展趋于模块化、小型化、大功率、大封装密度，机载电子设备单位体积和表面积上的热流密度越来越大。考虑到传统冷却方式换热效率低^[4]，对高热流密度的机载电子设备来说，该方式已无法满足散热要求。液冷系统换热效率较高，工作性能较稳定，用于机载电子设备冷却已成必然^[5-8]。液体冷却系统发展迅速，在电子吊舱及电子战飞机中均得到广泛应用。20世纪70年代，国外在舰载固定翼预警机E-2C上应用小型的液体冷却系统，并于20世纪80年代形成液体冷却系统的相关标准^[9]。本文通过分析国内外典型机型的液冷系统，为今后设计液冷系统提供参考。

1 国内飞机液冷系统分析

1.1 系统概述

以国内某型飞机为例，电子设备液冷系统原理如图1所示。液体冷却系统由液体泵、过滤器、温度控制活门、空-液热交换器、气液分离器、控制与显示装置、储液箱等组成。液冷系统选择热学性能较好的65号冷却液^[10-12]。

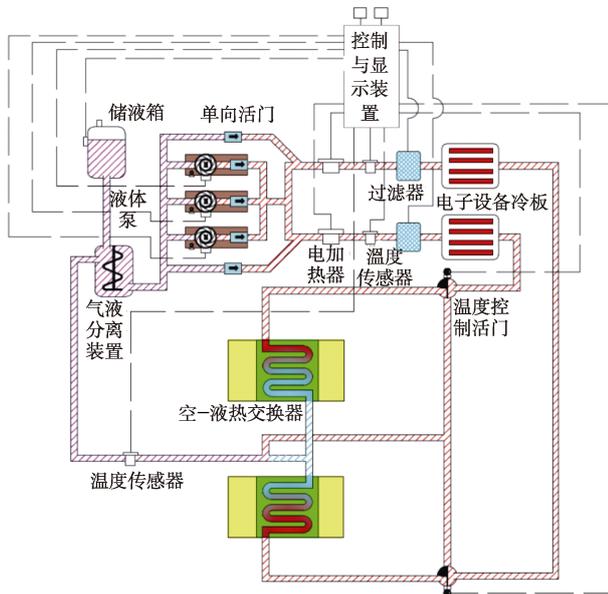


图1 国内某型飞机电子设备液冷系统
Fig.1 Liquid cooling system of a domestic aircraft electronic equipment

1.2 系统原理

机载电子设备液冷系统的冷却液储存在储液箱中，经过气液分离装置，除去冷却液中的气体，防止对下游液冷泵的气蚀。冷却液被液体泵增压后，通过管路进入电加热器，防止进入电子设备冷板的冷却液温度过低。冷却液经过滤器滤掉其中的杂质，进入电子设备冷板，将电子设备产生的热量带走，冷却液温

度升高。为保证冷却液的循环使用，在液冷系统下游设置空-液热交换器，对冷却液进行降温。通过调节温度，控制活门的开度，将冷却液温度调整到设计范围。降温的冷却液经气液分离装置，重新流向液冷泵，进行下一个冷却循环。储液箱除用来储存冷却液，还可以维持系统管路内冷却液压力的稳定，防止因压力波动对泵产生不利影响。系统设有温度传感器来测量管路内冷却液的温度，并通过控制与显示装置控制系统参数。为防止冷却液倒流，管路中还设有单向活门。

1.3 系统设计特点

- 1) 驱动装置余度设计。在液冷系统中设置3台液体泵，其中2台液体泵工作，1台备份。
- 2) 冷却液循环流动。冷却液经液冷泵驱动流入电子设备冷板，带走电子设备产生的热量，自身温度升高。系统下游设有空-液热交换器，对冷却液进行降温，并重新流回液冷泵处，进行下一个冷却循环。
- 3) 系统温度控制。系统中设有温度传感器、电加热器、温度控制活门，通过控制装置保证管路内冷却液的温度维持在设计范围内，进而保证系统的正常使用。

1.4 国内其他机型的应用

预警机集指挥控制、通信导航、电子对抗等功能于一身^[13]，对机载雷达进行冷却十分重要。随着雷达的不断发展，单位面积上的高热流密度也在不断增加^[14-17]。若采用通风冷却方式为雷达装置降温，当飞机的飞行速度较低时，很难为雷达提供足够的冲压空气。国内某机型采用液冷技术，解决大功率雷达的冷却散热问题，系统原理如图2所示。该机液冷系统由液体泵、蓄液器、冷板、热交换器以及活门组成。液体泵驱动冷却液从蓄液器流入冷板，吸收雷达装置产生的热量，而液体自身的温度升高。冷却液从冷板流出后，经热交换器的降温处理，重新流入蓄液器，实现冷却液的循环流动。控温旁路防止从热交换器流出的冷却液温度过低。

国内某直升机有大功率电子设备，为解决其散热问题，采用液冷方式进行冷却，系统的工作原理如图3所示。储液箱中的冷却液在液体泵的加压作用下流经温度调节活门，进入热交换器后，与外界空气进行换热，冷却液流经过滤器，进入电子设备冷板，与电子设备进行热交换，将热量带走，随后冷却液经压力、流量传感器，进入储液箱，完成一个工作循环^[18]。从温度调节活门处引出的一条旁路，用来调节管路中冷却液的温度。系统中设有传感器，监测管路内冷却液的温度、压力、流量是否在设计范围内，并将信息反馈至控制装置。

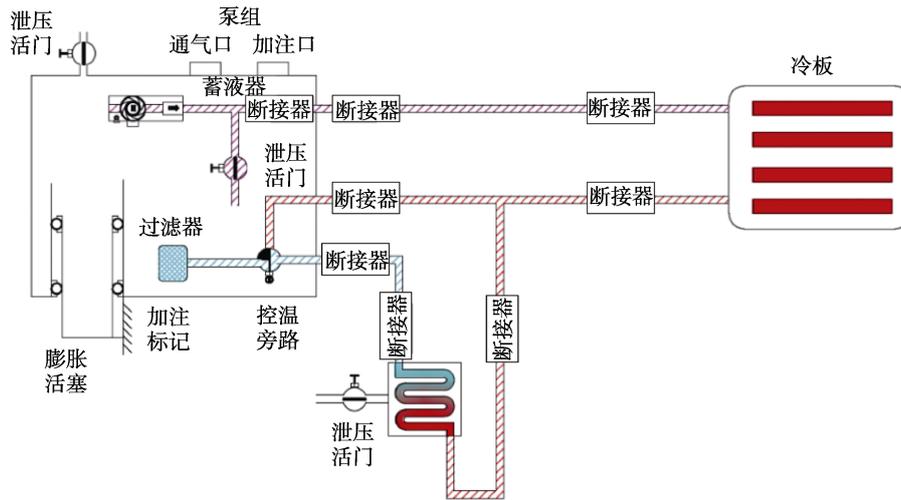


图 2 国内某预警机雷达装置液冷系统
Fig.2 Liquid cooling system of a domestic early warning aircraft radar device

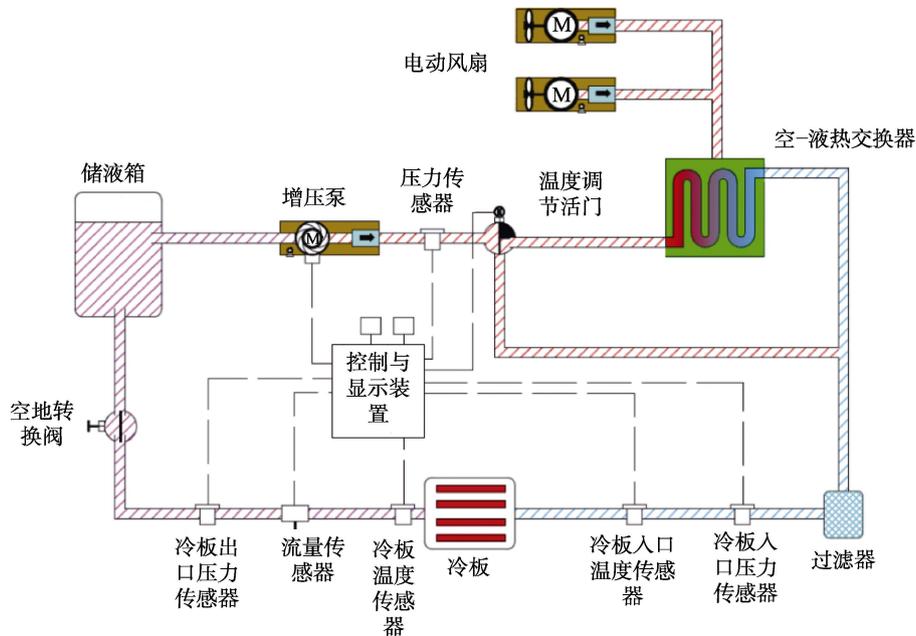


图 3 国内某直升机电子设备液冷系统
Fig.3 Liquid cooling system of a domestic helicopter electronic equipment

2 国外飞机液冷系统分析

2.1 系统概述

国外某超音速巡航飞机具有低空高亚音速和高空 2 倍音速性能, 突防能力强, 生存力高, 载弹量大, 机身装有大量电子设备^[19-20], 热载荷可高达 170.9 kW, 且随着技术发展及功能扩升, 机载电子设备的热载荷也在不断增加。为满足电子设备的散热要求, 且考虑到电子设备的安装位置, 该飞机使用液体冷却和强迫通风冷却相结合的方式, 系统原理如图 4 所示。液冷系统使用稳定性较好的 PAO 冷却液。

2.2 系统原理

该机的电子设备冷却系统由 4 个主循环回路组

成, 分别是液体冷却回路、燃油冷却回路、空气冷却回路、中间冷却回路。

该机前电子设备舱、左侧中央电子设备舱、机翼电子设备舱等设备舱中的电子设备使用液冷散热。在液体冷却回路中, 电子设备产生的热量由冷板传递给冷却液, 冷却液在泵的作用下, 依次流过中间冷却回路、燃油冷却回路, 2 套升压式空气制冷系统的热交换器, 利用对应系统的热交换器将冷却液的热量传递出去。传递至中间冷却回路的热量通过热交换器, 将热量传递至燃油冷却回路, 然后通过风冷将热能传递至空气中。

武器电子设备是利用一套升压式空气循环冷却系统进行冷却的。由气源系统来的预调空气经初级空气-液体换热器、次级空气-液体换热器, 对空气进行

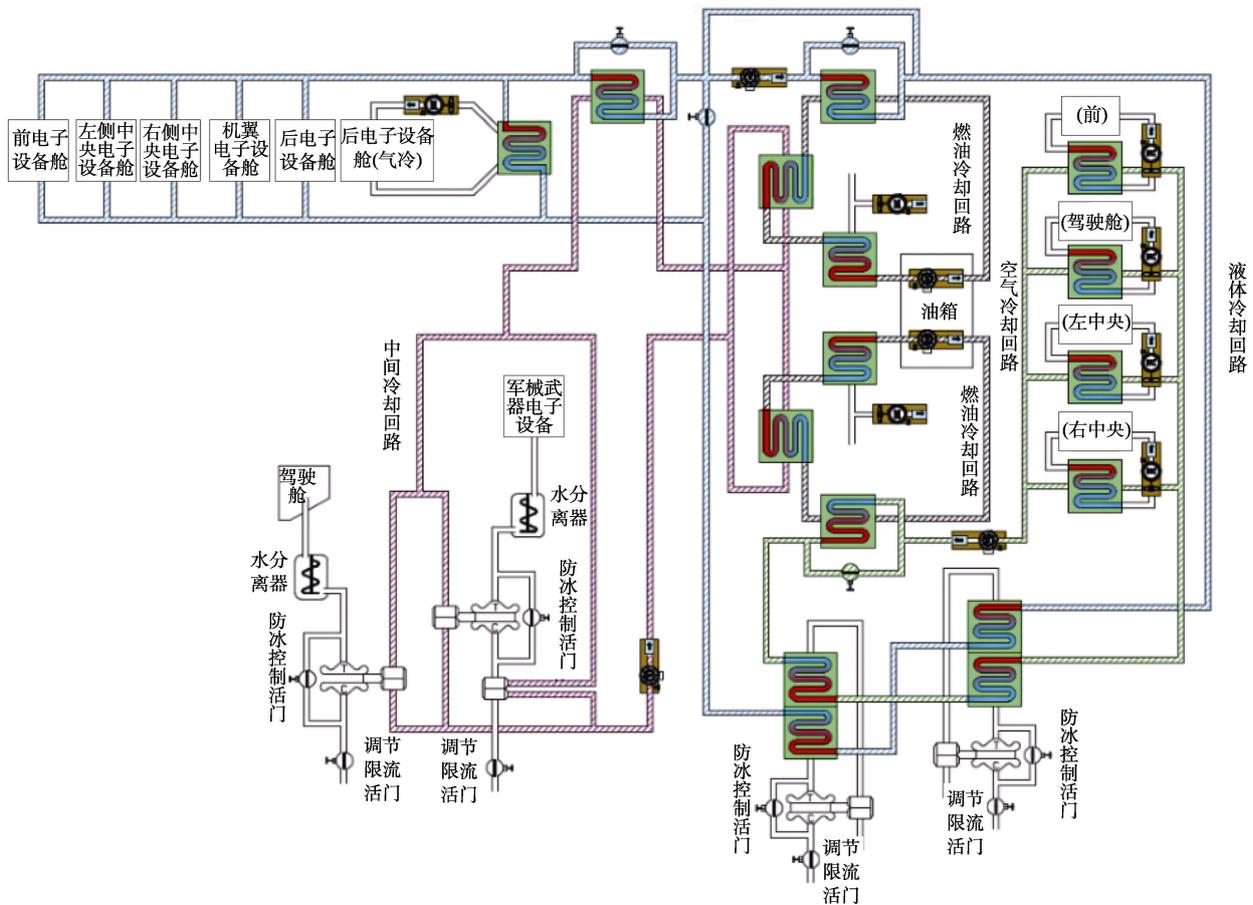


图 4 国外某飞机电子设备冷却系统
Fig.4 A foreign aircraft electronic equipment cooling system

降温处理，空气的热量传递至中间冷却回路的冷却液中。降温后的空气经水分离器除去空气中的水分，冷却武器电子设备。

在前电子设备舱、左中央电子设备舱、右中央电子设备舱等设备舱中有一些电子设备的安装位置不易使用液体冷却，其采用强迫通风方式进行散热。空气的温度控制在 29.4~37.8℃。电子设备架内设有安全活门，以便应急情况下进行冲压空气冷却。电子设备的热量传递至空气中，然后由热交换器将热量传递给空气冷却回路的冷却液中。借助冷却液流动，最终将热量传递至燃油冷却回路的燃油以及 2 套升压式空气制冷系统的空气中。

2.3 系统设计特点

1) 冷却液循环流动。与其他机载电子设备液冷系统一样，冷却液是在管路中循环使用的，通过合理布置热交换器来不断调节冷却液的温度。

2) 液冷与风冷的结合。该机载电子设备冷却系统同时使用液冷与风冷 2 种冷却方式，以液冷系统管路为干线，风冷系统管路为支线，对电子设备舱中集中安置且热载荷大的电子设备直接使用液冷冷却，对于零散布置或热载荷小的电子设备采用强迫通风进

行散热。空气循环小回路将电子设备热载荷传给干线管路内的冷却液，然后经燃油冷却回路和升压式空气循环制冷系统将热量传递出去。

3) 燃油热沉。该机载电子设备冷却系统，尝试将燃油作为主要热沉。通过合理设计燃油冷却回路，将冷却液的热量传递到燃油中，然后在自身回路的热交换器作用下将热量传给空气。热量的传输路径为：电子设备—冷却液—燃油—空气。

3 液冷系统设计展望

3.1 液冷设备分布

对于高热流密度的电子设备来说，传统的自然散热与强迫通风制冷方式已不满足需求，采用液体冷却已是必然趋势。目前机载电子设备的安装位置分布较广，呈全机分散分布，为使用液冷系统需要对电子设备进行舱室划分^[21]，便于集中散热。同时也减少冷却管路的长度，进而降低系统的代偿损失^[22]。

3.2 故障隔离能力

液冷系统中，液体泵作为动力源，驱动冷却液循环流动，冷却液沿着管路通往各电子设备，将其热量

带走,最终通过热交换器将热量带到空气/燃油中。此方式技术成熟度较高,但缺点是没有区域故障隔离能力,当某区域发生故障,将会使整个液冷系统无法工作。

为解决该问题,可结合电子设备的舱室划分,在每个舱室内设有液冷小循环,在飞机上设有液冷大循环,2个液冷循环通过关断活门连接。舱室小循环中的热量传递至飞机级的大循环中,最后排至空气或燃油中。当某舱室小循环发生故障,可关闭该小循环处的关断活门,而不会影响其他舱室的小循环,即实现区域故障隔离。

3.3 变流量系统

液冷系统的设计参数有:压力、温度和流量^[23-24]。目前液冷系统中冷却液的流量是固定的,即没有任何控制液体流量的自动化装置或设备,冷却液流量的变化由泵的运行转速或台数来决定,因此流过电子设备的冷却液流量也不变。液冷系统的流量基本是按系统中电子设备的最大热负荷设计的,实际上电子设备以最大热负荷工作运行的时间通常很短。定流量系统绝大多数时间内的供液量是大于系统运行时所需的实际流量,从而导致泵的无效能耗和系统代偿损失增大。因此,需在定流量液冷系统的基础上进行改进,使液冷系统中冷却液的流量能随着热负荷的变化而变化,降低液体泵电能的消耗,达到节能目的^[25-26]。

3.4 管路材料

管路是液冷系统的重要组成部分,管路减重对飞机的意义重大。复合材料具有质轻高强、良好的抗疲劳性及减震性等优点^[27-28]。在设计液冷管路时,可采用复合材料,减轻液冷管路的质量,减少系统的代偿损失。

3.5 高效冷板研发

冷却液通过冷板将机载电子设备产生的热量带走,选用更为高效的冷板很有必要。国内外对冷板的性能优化研究从未停止过^[29-35],目前与冷板相关的研究主要以提高传热效率、降低流阻为目的,实际上冷板板面温度的均匀性也很重要。随着电子设备的热流密度越来越大,不仅对冷板的散热效率有要求,对冷板板面温度的均匀性也提出要求。在今后冷板的研发中,要以提升冷板板面温度均匀性为目的,开展一系列的设计与试验研究。

4 结语

随着机载电子设备的不断发展,其单位体积和表面积上的热流密度越来越大。为保证电子设备的使用寿命和可靠性,机载电子设备冷却方式从最初的自然散热发展到强迫通风冷却,再到液体冷却。另外,未

来飞机可能需要执行长航时的任务,液冷系统需满足长时间为高热流密度电子设备进行冷却散热的工作需求,保证电子设备的正常高效工作,确保飞行安全。为适应电子设备的发展和未来飞机的作战需求,液体冷却技术也应不断发展。

参考文献:

- [1] 陈恩. 电子设备热设计研究[J]. 制冷, 2009, 28(3): 53-58.
CHEN En. The Heating Design Study of Electronic Equipment[J]. Refrigeration, 2009, 28(3): 53-58.
- [2] 周海峰, 邱颖霞, 鞠金山, 等. 电子设备液冷技术研究进展[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 7-10.
ZHOU Hai-feng, QIU Ying-xia, JU Jin-shan, et al. Research Development of Liquid Cooling Techniques for Electronic Equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 7-10.
- [3] 党晓民, 马兰, 马庆林. 民用飞机环境控制系统手册[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.
DANG Xiao-min, MA Lan, MA Qing-lin. Manual of Civil Aircraft Environmental Control System[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2019.
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [5] 张娅妮, 陈菲尔, 田津. 机载电子设备冷却散热技术的发展[J]. 航空计算技术, 2012, 42(4): 113-116.
ZHANG Ya-ni, CHEN Fei-er, TIAN Feng. Development on Heat Dissipation Technique of Airborne Electronic Equipment[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(4): 113-116.
- [6] 谢丽娜, 郭亮. 对液冷技术及其发展的探讨[J]. 信息技术与政策, 2019(2): 22-25.
XIE Li-na, GUO Liang. Discussion on Liquid Cooling Technology and Development[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(2): 22-25.
- [7] GHAJAR A, TANG W C, BEAM J. Comparison of Hydraulic and Thermal Performance of PAO and Coolanol 25R Liquid Coolants[C]//6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Colorado Springs, Virginia: AIAA, 1994.
- [8] 赵亮, 杨明明, 董进喜. 小型液冷系统设计[J]. 机械工程师, 2016(1): 92-94.
ZHAO Liang, YANG Ming-ming, DONG Jin-xi. Design of Miniature Liquid Cooling System[J]. Mechanical Engineer, 2016(1): 92-94.
- [9] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-Performance Heat Sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [10] 董进喜, 杨明明, 赵亮. 电子设备液冷散热的冷却液热

- 学性能分析[J]. 电子科技, 2013, 26(4): 106-109.
DONG Jin-xi, YANG Ming-ming, ZHAO Liang. Thermal Performance Analysis of Electronic Equipment Liquid Coolant[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(4): 106-109.
- [11] 杨明明, 白振岳, 董进喜. 65号冷却液的金属腐蚀性研究[J]. 机械工程师, 2016(4): 140-141.
YANG Ming-ming, BAI Zhen-yue, DONG Jin-xi. Research on Metal Corrosion of No. 65 Coolant[J]. Mechanical Engineer, 2016(4): 140-141.
- [12] 张梁娟, 赵天亮, 方晓鹏, 等. 低电导率乙二醇冷却液在雷达液冷系统的应用[J]. 现代雷达, 2019, 41(8): 65-69.
ZHANG Liang-juan, ZHAO Tian-liang, FANG Xiao-peng, et al. Application of Low-Conductivity Ethylene Glycol Coolant for Radar Liquid Cooling System[J]. Modern Radar, 2019, 41(8): 65-69.
- [13] 林一平. 我国预警机进入世界先进水平[J]. 交通与运输, 2013, 29(3): 36-37.
LIN Yi-ping. My Country's Early Warning Aircraft Enters the World's Advanced Level[J]. Traffic & Transportation, 2013, 29(3): 36-37.
- [14] 徐产兴. 舰载预警机雷达[J]. 现代舰船, 2003(8): 36-37.
XU Chan-xing. Shipborne Early Warning Aircraft Radar[J]. Modern Ships, 2003(8): 36-37.
- [15] 陈国海. 下一代预警机雷达技术[J]. 现代雷达, 2010, 32(3): 1-4.
CHEN Guo-hai. Technologies for next Generation Airborne Early Warning Radar[J]. Modern Radar, 2010, 32(3): 1-4.
- [16] 唐文辉. 相控阵雷达液冷系统设计研究[C]//2019年船舶电子自主可控技术发展学术年会论文集. 南京:中国造船工程学会, 2019.
TANG Wen-hui. Research on the Design of Phased Array Radar Liquid Cooling System[C]//Proceedings of the 2019 Annual Conference on the Development of Ship Electronics Independent Controllable Technology. Nanjing: China Shipbuilding Engineering Society, 2019.
- [17] 陈锋, 黄湘鹏. 舰载固定翼预警机雷达技术[J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 25-28.
CHEN Feng, HUANG Xiang-peng. Technologies of Carrier-Based AEW Radar[J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 25-28.
- [18] 黄文捷, 刘道锦. 液体冷却系统在特种直升机上的应用[J]. 直升机技术, 2008(2): 44-46.
HUANG Wen-jie, LIU Dao-jin. Application of Liquid Cooling Systems to Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2008(2): 44-46.
- [19] 贾宇飞. 国外航空电子系统的发展[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 9-11.
JIA Yu-fei. Development of the Avionics System[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(10): 9-11.
- [20] UPADHYA G, MUNCH M, ZHOU Peng, et al. Micro-Scale Liquid Cooling System for High Heat Flux Processor Cooling Applications[C]//Twenty-Second Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Dallas: IEEE, 2006.
- [21] 程劲嘉. 综合模块化航空电子的液冷设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 151-155.
CHENG Jin-jia. Liquid Cooling Technology in Integrated Modular Avionics[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6): 151-155.
- [22] 贾丽姣, 左向梅, 邱勇. 试验机改装中液冷系统的常见故障及排除方法[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(1): 161-163.
JIA Li-jiao, ZUO Xiang-mei, QIU Yong. Common Faults and Troubleshooting Methods of Liquid Cooling System in Experimental Aircraft Modification[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(1): 161-163.
- [23] 崔永龙, 施红, 陈常栋. 飞机液冷系统的流量测量及计算[J]. 价值工程, 2017, 36(15): 85-88.
CUI Yong-long, SHI Hong, CHEN Chang-dong. Flow Measurement and Calculation of Aircraft Liquid Cooling System[J]. Value Engineering, 2017, 36(15): 85-88.
- [24] 赵颖杰, 吴惠祥, 张贺磊. 飞机液冷系统导管流量标定方法[J]. 航空制造技术, 2016, 59(S1): 132-135.
ZHAO Ying-jie, WU Hui-xiang, ZHANG He-lei. Method of Flow Calibrating of Aircraft Liquid Cooling System[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(S1): 132-135.
- [25] 张二岩, 高飞, 赵煜, 等. 电子设备液冷保障设施设计[J]. 液压与气动, 2018(11): 94-98.
ZHANG Er-yan, GAO Fei, ZHAO Yu, et al. Study of the Refrigerant Equipment for Electronic Device[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(11): 94-98.
- [26] 周尧, 田洋, 张丰华. 机载电子设备液冷系统的模糊控制研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(5): 144-146.
ZHOU Yao, TIAN Feng, ZHANG Feng-hua. Research on Fuzzy Control of Airborne Liquid Cooling System[J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(5): 144-146.
- [27] 顾轶卓, 李敏, 李艳霞, 等. 飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2773-2797.
GU Yi-zhuo, LI Min, LI Yan-xia, et al. Progress on Manufacturing Technology and Process Theory of Aircraft Composite Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2773-2797.
- [28] 王巧玲, 魏栋, 李光俊, 等. FRP复合材料管材航空应用及成型技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2020, 63(22): 92-101.
WANG Qiao-ling, WEI Dong, LI Guang-jun, et al. Application of FRP Composite Tubes in Aerospace Field and Developments of Manufacturing Technology: A Review[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(22): 92-101.
- [29] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 52-59.

- TAO Wen-bo, XIE Ru-he. Research and Development of Organic Phase Change Materials for Cool Thermal Energy Storage[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(1): 52-59.
- [30] 杨天润, 孙锲, WENNERSTEN Ronald, 等. 相变蓄冷材料的研究进展[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(3): 567-573.
- YANG Tian-run, SUN Qie, RONALD W, et al. Review of Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(3): 567-573.
- [31] 高肃钧, 赵健勇, 吕云, 等. 液冷板性能多参数优化与性能分析[J]. *山东工业技术*, 2018(6): 133-134, 114.
- GAO Su-jun, ZHAO Jian-yong, LYU Yun, et al. Multi-Parameter Optimization and Performance Analysis of Liquid Cold Plate Performance[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2018(6): 133-134.
- [32] 尹本浩, 蒋威威, 何冰, 等. 液冷电子设备的冷板流阻匹配研究[J]. *电子机械工程*, 2013, 29(2): 1-4.
- YIN Ben-hao, JIANG Wei-wei, HE Bing, et al. Research on Flow Resistance Matching Design of Liquid Cooling Cold Plate for Electronic Equipment[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2013, 29(2): 1-4.
- [33] 李健, 王凯, 林小平, 等. 基于 ICEPAK 的液冷冷板散热的性能分析[J]. *流体机械*, 2016, 44(12): 71-74.
- LI Jian, WANG Kai, LIN Xiao-ping, et al. Performance Analysis on Heat Sinking of Liquid-Cooling Cold Plate Based on ICEPAK[J]. *Fluid Machinery*, 2016, 44(12): 71-74.
- [34] 陈程, 朱永明, 谢斌, 等. 紧凑型液冷散热器的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(9): 1956-1960.
- CHEN Cheng, ZHU Yong-ming, XIE Bin, et al. Experimental Study of a Water-Stirring Radiator[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(9): 1956-1960.
- [35] 解金华, 邹吾松. 某机载 S 形深孔液冷板优化设计[J]. *电子机械工程*, 2014, 30(4): 1-4.
- XIE Jin-hua, ZOU Wu-song. Optimization Design of an Airborne S-Shape Deep Hole Liquid Cooling Plate[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2014, 30(4): 1-4.

责任编辑: 刘世忠