

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.03.045

机载电子设备液冷技术应用研究进展*

杨雨薇, 齐文亮, 张 杰

(西安航空计算技术研究所第四研究室, 陕西 西安 710068)

摘要:液冷技术由于其具有换热系数高、流动性强、工作稳定等优势逐渐成为机载电子设备散热技术的首选。该文首先介绍了目前机载电子设备常用的侧壁式和贯通式液冷技术的应用情况,并总结了目前存在的问题。然后对微通道、喷雾冷却和射流冷却等液冷技术的基本原理以及研究现状进行了综合的阐述,详细总结了各项技术应用的优缺点。最后提出了进一步深入研究机载电子设备液冷技术的建议。

关键词:机载电子设备;冷却方式;液冷技术

中图分类号:TF713.2

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)03-0163-03

Progress in the Application of Liquid-Cooling Technology for Airborne Electronic Equipment

YANG Yu-wei, QI Wen-liang, ZHANG Jie

(AVIC Xi'an Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Liquid cooling technology has gradually become the first choice of heat dissipation technology for airborne electronic equipment due to the advantages of high heat transfer coefficient, strong mobility and stable operation. This paper introduces the application of side-wall and through-wall liquid-cooling technologies commonly used in airborne electronic equipment, and summarizes the existing problems. Subsequently, the basic principles of liquid cooling technologies such as microchannel, spray cooling and jet cooling are comprehensively elaborated, as well as the current research status; and the advantages and disadvantages of each technology application are summarized in detail. Finally, suggestions for further in-depth research on liquid cooling technology for airborne electronic equipment are put forward.

Key words: airborne electronic equipment; cooling methods; liquid-cooling technologies

0 引言

随着电子技术集成化、高频化以及大功率的高速发展,目前电子设备的热流密度已经超过 100 W/cm^2 ,并且呈逐年增大的趋势。而电子设备温度每升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,其可靠性将降低 5% ,因此温度控制对于电子设备的稳定、安全运行起着至关重要的作用。但就目前而言,传统冷却方式散热效率低,已不能满足高密度、高集成、小型化电子设备的散热需求。而液冷技术因具有热传导速度快、冷却热密度高、噪声小等优点而很快成为高性能电子设备散热的主要选择^[1]。为了适应不同装机条件,国外厂商在液冷的实用化方面以及在提高装机的适应性和冷却性能上做了大量工作,使得液体冷却技术发展迅速,并涌现出大量的产品,这些产品在诸如电子吊舱及电子战飞机领域中均得到广泛应用。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^[2];国内也一直在液冷技术的应用上进行不断地探索。

液冷技术是指将电子设备的热量通过液体冷却

介质与热源之间的接触进行传递,然后再通过冷却剂进行热量传递。目前常见的液冷技术包括微通道冷却、射流冷却和喷雾冷却等^[3]。除去较高的冷却能力,液冷技术可以在较少液体存量的情况下实现精确的温度控制,同时还可以在整个换热表面上具有均匀的冷却温度分布。液体冷却具有性能稳定、流动性强以及传热系数高等优点,在电子设备冷却系统运用中取得了重大进展^[4]。

针对日益增长的机载电子设备散热需求,笔者总结了目前冷却技术存在的问题,通过对微通道、喷雾冷却和射流冷却等液冷技术的基本原理以及研究现状的综合阐述,详细总结了各项技术应用的优缺点,并提出了进一步深入研究机载电子设备液冷技术的建议。对液冷技术及其应用进行深入研究,对提高机载电子设备散热能力有着至关重要的意义。

1 机载电子设备主要的液冷技术

目前,电子设备的主要液冷技术分为直接冷却和间接冷却,直接冷却的实现形式是直接将电子设备或者电子器件的发热部分与冷却介质接触(如浸没式液冷、液体喷射冷却、液体喷雾冷却),通过受热升温

* 收稿日期:2023-10-26

作者简介:杨雨薇(1994-),女,陕西宝鸡人,工程师,研究方向:机载电子设备结构设计。

的液体介质进行散热。间接冷却的主要实现形式为槽道冷却,主要应用于机载电子设备^[5]。槽道冷却采用传统的制造工艺和材料,利用铜和铝的优良导热性作为基材,并使用数控机床进行开槽加工,从而形成形状不同的冷却通道^[6]。按照发展的阶段可以将其分为侧壁式液冷和贯通式液冷:①侧壁式液冷技术就是液冷通道在计算机机箱的两个侧壁内,计算机芯片产生的热量通过模块的壳体传导至侧壁,侧壁内部的冷却液吸收热量后将热量带出到计算机的外部;②贯通式液冷是指液冷通道设计与计算机模块外壳内,计算机芯片产生的热量通过导热垫传递到计算机模块外壳的液冷通道内的冷却液体内,其吸收热量后将热量散发到计算机外壳外部。

由于液冷散热装置是密封结构,温度交变过程中冷却液膨胀,液冷散热装置中压力升高,导致结构鼓包开裂,造成泄漏。液冷机载电子设备中常包含微小通道、微小阀门等结构或者部件,当机载冷却液或者机上管路中存在杂质时可能导致微小通道或者微小阀门堵塞卡滞。同时,冷却液的性能参数也会对槽道液冷产生较大影响。槽道液体冷却的散热量较风冷有很大的提高,但是换热能力还需进一步提升。随着电子与通信技术的快速发展,高性能芯片与集成电路的应用日益普及,采用间接冷却方式将很难满足机载电子装备高热流密度散热的要求。

2 机载电子设备液冷技术发展趋势

(1) 微通道冷却

微通道是指具有 $1\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 水力直径的通道或管道。从形状上来看,微通道冷板与常规液体冷却板的结构类似,但是其工作原理却有很大区别^[7]。微细通道中的流体在受热后会快速进入核态沸腾的状态,呈现出极高的不平衡性,并且通道中的过热度远低于常规尺度通道,因此传热性能显著增强。为了增大换热面积,研究者利用各种流道结构对微通道结构进行了优化,其中包括波纹形、肋槽道、梯形、三角形、缩放型、多分支结构,还使用了两层和多层微通道结构^[8]。但是,因为微流道冷板的压损较大,对冷却液的清洁度要求很高,同时加工成本也很高,所以它一直没有被广泛用于航空电子装备的冷却^[9]。目前,国外已经顺利开发出宽 $25\ \mu\text{m}$ 、深 $200\ \mu\text{m}$ 液冷通道的微型散热器,并成功应用于卫星温度控制系统中。目前,我国已对微通道冷却进行了较多的基础理论研究,一些科研单位已对微通道冷却技术在航空集中设备中的应用进行了较为深入的研究。

(2) 喷雾冷却

喷雾冷却指的是将液体从喷嘴高速喷射到相对低速的混合介质中,使液体分散并碎裂成小颗粒雾

滴,通过雾化的液滴与受热面之间的复杂换热过程,从而实现散热的目的^[10]。喷雾冷却因其散热能力强、对工质要求低、与固体表面无接触热阻的特点而在高热流密度器件的散热领域极具应用潜力。然而,液滴冷却过程中喷头易发生堵塞,且传热机制较为复杂;目前喷雾冷却还存在着系统紧凑化、强化传热等问题,若喷头压力过高,还容易造成可靠性差等问题。喷雾冷却在航空航天中的应用面临着如下难题:①在不同大气压、不同高度,特别是在接近微重力的情况下,如何在冷却表面实现气-液两相流的高效清洁,以保证冷却表面无冷却液残留;②需要探明加速、随机振动等因素对喷雾冷却效率的影响,及其与换热的耦合作用机理。最终,要设计出一个可以满足喷雾冷却要求的循环系统,以在各种工况下都能保证良好的系统循环。尽管国内外学者已对该问题开展了一定的研究,但由于飞行器飞行环境的变化、喷雾冷却系统的复杂性、多因素耦合等原因,该领域的研究目前仍处于初级阶段。我国某些大学的热工研究机构曾做过尝试,并已开发出了原理样机(见图1),但还未在机载电子装置中推广使用。



图1 喷雾冷却技术原理样机

(3) 射流冷却

射流冷却是通过高速射流在热源表面形成很薄的液膜来进行换热。射流冷却的主要换热都集中在射流核心撞击目标表面的停滞点,它能在局部区域形成超强的对流传热效应。因此,射流冷却是目前最有发展潜力的大功率电子器件散热技术,特别是对局域高热流密度电子器件而言,可以有效地消除局域热点。射流冷却示意图如图2所示。

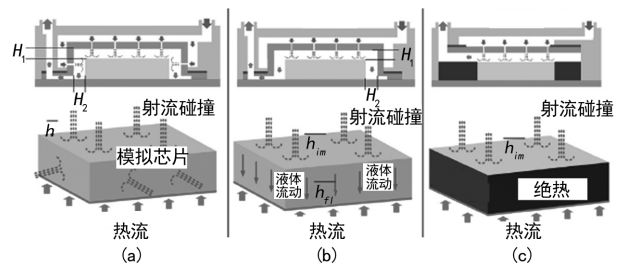


图2 射流冷却示意图

需要注意的是,目前的射流冷却技术仅适合于电子器件的部分传热。由于单个喷嘴将造成冷却区表

面温度分布不均,因此在较宽的表面上,可采用多喷嘴排列的方式进行,这样可以提高整体曲面的传热系数,使表面上的温度分布更为合理。然而,由于多个喷嘴喷出的液体之间的相互影响,使其传热过程变得更加复杂。因此,深入研究多喷嘴射流的冷却机理是提高其冷却效率的关键。射流冷却在我国刚刚起步,一些大学的热工研究所已经对此做了一定的尝试,但还没有与机载环境相结合,而射流冷却由于其蒸发换热的显著优势,将是今后机载电子设备冷却技术的主要发展趋势。

3 发展与应用

鉴于机载对环境条件复杂多变的需求以及有限的空间要求,间接冷却技术的微型化、小型化的机载领域亟待解决的重要课题。但受系统设计复杂、冷却液密封和可靠性等因素影响,直接液冷技术尚未在机载领域大规模应用,这将成为未来机载冷却散热技术领域急需解决的核心问题。在今后的研究中应将试验研究和数值仿真相结合,对直接液冷技术在航空电子装备中的适用条件进行深入研究,并对其换热特性进行深入分析,得出适用于机载电子设备的工作区域以及实际工作的动态变化特性,并对其换热性能进行优化,完善机载电子设备直接冷却的理论体系,从而为其进一步推广提供科学依据。

在航空电子装备向高性能、高可靠性和低成本发展的背景下,单一的冷却和散热方式已经无法满足机载电子装备的需求,混合冷却的方式将应用于机载电子装备中,而液冷技术的智能化将成为未来发展的必然趋势。智能化要求构建分层冷却机制,根据散热能力和经济成本,将各种散热效果不同的散热技术与液冷技术相结合。依据电子设备内部的具体散热条件,使用智能算法来控制散热方式以及液冷的散热效率,自主选择当前条件下最佳的散热方式和散热能力来进行散热,从而达到精准化、经济化、高效化的智能散热,使电子设备的热性能得到最大程度地发挥,最终实现机载电子设备的综合化设计能力。

4 结 语

文章通过对当前液冷技术的系统性梳理,明确指出,目前以微通道冷却、喷雾冷却、射流冷却为主要技术方向的间接冷却方式各具特点并可适用于不同设备工作环境,具有广阔的发展前景。与此同时,受制于液冷技术系统设计复杂性、冷却液密封问题以及整体可靠性问题,直接液冷技术目前还不能大规模应用于工程实践,但更高冷却效率的直接液冷技术仍是未来值得投入大量研究且有望实现巨大突破的重点领域。

需要指出的是,随着航空电子设备复杂化、智能化发展,单一冷却和散热方式已无法满足工程实践的实际需求,智能化、定制化、组合化的冷却方式将成为液冷技术发展的未来趋势。

参考文献:

- [1] 齐文亮,赵 亮,王婉人,等.高热流密度电子设备液冷技术研究进展[J].科学技术与工程,2022,22(11):4261-4270.
- [2] Tuckerman D B,Pease R F W.High-Performance Heat Sinking for VLSI[J].IEEE Electron Device Letters,1981,2(5):126-129.
- [3] Agostini B,Fabbri M,Park J E,et al.State of the art of high heatflux cooling technologies[J].Null,2007(28):258-281.
- [4] 刘 芳,杨志鹏,袁卫星,等.电子芯片散热技术的研究现状及发展前景[J].科学技术与工程,2018,18(23):163-169.
- [5] 张娅妮,陈菲尔,田 洋.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.
- [6] 田 洋.综合化航空电子系统机械结构发展研究[J].航空计算技术,2008(增刊):37-41.
- [7] Tuckerman D B,Pease R.High performance heat sinking for VLSI [J].IEEE Electron Device Letters,1981(2):126-129.
- [8] Kumar A,Nath S,Bhanja D.Effect of nanofluid on thermo hydraulic performance of double layer tapered microchannel heat sink used for electronic chip cooling[J].Numerical Heat Transfer, Part A: Applications,2018(73):429-445.
- [9] Chakravarthii D,Devarajan M,Subramani S.Experimental and numerical investigation of pressure drop and heat transfer coefficient in converging-diverging microchannel heat sink [J].Heat & Mass Transfer,2017(53):2265-2277.
- [10] Gao X.Drop impact in spray cooling[D].Vancouver:University of Britis,2017.