文章编号:0253-4339(2016) 01-0090-05 **doi**:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.01.090

DAM 两相闭式热虹吸回路冷却系统实验研究

张根烜 王璐 张先锋 洪大良

(中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥 230088)

摘 要 两相热虹吸回路由于较高的散热性能在高功率电子设备冷却领域有较好的应用前景。为了解决四通道数字阵列模块的冷却问题,本文设计了一套两相闭式热虹吸回路冷却系统样机并对系统启动特性、充液量和工作倾角对系统散热性能的影响进行了实验研究。研究结果表明,样机系统结构及散热性能满足指标要求,启动性能和工作性能良好。此外,该系统对热耗 1600 W、局部热流密度接近100 W/cm² 的组件的冷却效果良好。

关键词 热虹吸回路;冷却系统;电子设备;实验研究;R134a 中图分类号:TK124:TB61⁺1

文献标识码:A

Experimental Research on a Cooling System with Two Phase Closed Thermosyphon Loop for a DAM

Zhang Genxuan Wang Lu Zhang Xianfeng Hong Daliang

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei, 230088, China)

Abstract Two phase thermosyphon loop has a good potential of application in cooling of electronic equipment with high power source because of its relatively high efficiency of heat dissipation performance. To solve the cooling problem of a DAM with four channels, this paper designs a prototype of two phase closed thermosyphon cooling system. The starting characteristic of the system, the influence of the refrigerant charge and working inclination angle on its heat dissipation performance are investigated experimentally in this paper. The results show that the structure and heat dissipation performance of the system match the requirement. It also can be found that the starting characteristic and the working performance of the system are very good. In addition, a 1600 W module with local heat flux near 100 W/cm² is cooled very well by the system in this paper.

Keywords thermosyphon loop; cooling system; electronic equipment; experiment research; R134a

两相闭式热虹吸回路技术作为重力热管技术的 一种,一般在热虹吸回路循环中不采用毛细芯结构, 工质在蒸发段吸收热源热量由液态变为气态后沿循 环管路进入冷凝器,向二次冷源散热后变为液态,在 重力作用下回到蒸发段,完成整个冷却循环。由于热 虹吸循环可实现蒸发段和冷凝器的分置,传热效率 高、结构较为简单,从而被认为在高效换热器、余热回 收、电子设备冷却以及太阳能集热器等领域具有巨大 的应用潜力^[1-2]。因此,国内外学者针对两相流热虹 吸回路技术从传热^[3-4]、流动^[5-6]、充液率^[7]、工作倾 角^[8]、工质^[9]和应用^[10]等方面作了大量的理论和实 验研究。

在对热虹吸技术进行充分研究的基础上,越来越 多的学者也在开展热虹吸技术在电子设备冷却领域 的应用研究。Khrustalve D 等^[11]设计并测试了一个 两相闭式热虹吸回路系统用于电子器件散热的效果。 研究结果显示,当模拟发热器件热流密度为 70 W/cm²左右时,相对于冷却流体,其蒸发温度的温升 大约为23 ℃。Khodabandeh R 等^[12]设计并测试了一 个用于热耗为104 W 的 CPU 散热的两相闭式虹吸回 路系统。研究结果显示,CPU 的温度相对蒸发温度 的温升能控制在 20 ℃左右。周峰等^[13-14]、韦帮远 等^[15]的研究则显示,两相闭式热虹吸回路系统用于 电子设备舱和通信基站也有较好的散热效果。

虽然目前两相闭式热虹吸回路系统用于电子设备冷却的研究已经非常多,但是用于军用高功率组件冷却上的应用研究的报道还非常少。数字阵列模块(digital array module, DAM)是有源相控阵雷达阵面

收稿日期:2015年4月26日

基金项目:国家安全重大基础研究项目(613164030102)资助项目。 (The project was supported by National Security Major Basic Research Project of China(No. 613164030102).)

的主要功率模块,随着雷达威力和功能需求的日益提 升和雷达功率元器件技术的快速发展,DAM的集成 化、高功率和高热耗的特征日益明显,对高功率高效 冷却技术的需求也愈发迫切^[16]。

本文针对某型高热 DAM 的冷却问题,进行了 两相闭式热虹吸回路技术的应用设计和样机性能 测试,详细分析了冷凝器设计参数和系统充液量 等对系统性能的影响,并开展系统启动特性分析 等工作。

1 DAM 冷却系统样机设计要求

针对某典型高热耗、高热流密度的四通道 DAM 的冷却问题,为提高其冷却系统布置的灵活性,基于 两相闭式热虹吸回路技术设计形成一套可供 DAM 独立使用的冷却系统样机,满足 DAM 高可靠高效散 热,冷却系统样机的主要技术指标如下:

1) 工作环境温度:-40~50℃;

2) 贮存温度:-50~60℃;

3) DAM 总热耗≥1500 W,局部区域热流密度≥
 80 W/cm²;

4) DAM 功放模块表面最高温度≤80 ℃;

5) 蒸发器厚度不超过 10 mm;

6) 冷凝器尺寸不超过 600 mm(长) × 300 mm
 (宽) × 60 mm(厚);

7) 重量≤8 kg_o

2 热虹吸回路冷却系统样机设计

2.1 系统组成与原理

为兼顾 DAM 的实际冷却性能测试以及 DAM 与 冷却系统集成设计的要求,热虹吸回路冷却系统样机 采用独立的箱体结构,由样机箱体(含盖板、底板和 风机)、DAM 模拟件、热虹吸回路冷却系统组成,如图 1 所示。其中热虹吸回路系统安装于机箱内部,由蒸 发器、冷凝器以及连接管路组成,冷凝器布置于蒸发 器上方;DAM 模拟件安装于热虹吸回路系统蒸发器, 位于机箱下部,其结构参数、模拟热源参数与实际 DAM 保持一致。

热虹吸回路冷却系统的工作原理为:基于两相流 热虹吸机理,蒸发器内工质流经 DAM 模拟件吸热, 发生相变完成一次冷却后,流向冷凝器,由机箱风机 驱动空气流经冷凝器完成环境二次冷却,在重力作用 下流向蒸发器,从而形成冷却循环。

本文中的工作倾角为热源的安装面与竖直面之间的夹角,图1中显示的位置代表的工作倾角为90°。



图1 热虹吸回路冷却系统样机组成图

Fig. 1 The composition diagram of the prototyping of two phase thermosyphon cooling system

2.2 DAM 模拟件设计

为真实模拟 DAM 最严苛工况下的冷却性能, DAM 模拟件金属壳体的材料及结构参数与实际 DAM 保持一致,采用电加热管模拟高功率发热器件, 采用薄膜加热器模拟低功率发热器件,并采用合理的 热扩展和界面接触材料确保发热器件至热虹吸回路蒸 发器的传热路径与真实 DAM 完全一致。高功率热源 分为 270 W 和 60 W 两种,各 4 个,低功率发热器件总 热耗约 280 W, DAM 模拟件总热耗约 1600 W, 270 W 热源未经热扩展前局部热流密度约 100 W/cm²。

2.3 热虹吸回路设计

热虹吸回路采用铝合金材料,内部工质选用低沸 点工质 R134a,蒸发器通过气管和液管与冷凝器相 连,如图 2 所示。



 1 工质分配支管 2 蒸发器 3 气管 4 液管 5 冷凝器 6 充液管 图 2 热虹吸回路示意图
 Fig. 2 The schematic diagram of two phase

thermosyphon cooling system

根据 DAM 热源分布情况,蒸发器由 4 个蒸发模 块并联而成,厚 10 mm,蒸发器液态工质分配管路和 气态工质集成管路直径分别为 12.7 mm 和 25 mm, 每个蒸发模块的分配支管直径均为 8 mm,确保每个 蒸发模块的工质分配均匀性,从而达到 4 个主要热源 区的一致性散热,蒸发器组成如图 3 所示。

蒸发器与模拟热源之间通过高导热柔性衬垫相

— 91 —

连,蒸发器模块焊接形成密闭腔体,可承受10 MPa 以 上的压力,蒸发器模块腔体内部采用微槽群结构,确 保蒸发腔内部工质与底板热源区域的高热流密度高 效一次冷却。

冷凝器采用平行流微通道换热器,保证热虹吸回路冷却系统的高效环境散热,冷凝器长 600 mm,高 300 mm,有多组平行的薄翅片和微通道换热板焊接 形成。其结构参见图 1 中的冷凝器部分。对不同厚 度微通道换热板的换热能力与空气侧流量进行分析 对比,并开展冷凝器空气侧流量-压损特性与冷凝器 配备风机流量-压损特性的匹配分析,最终选用宽度 32 mm 的微通道换热板,并配备 3 个高效轴流风机, 冷凝器散热能力约 2 kW,满足 1.5 kW 热耗 DAM 的 环境散热要求,符合 DAM 热虹吸回路冷却系统冷凝 器尺寸设计要求。



图 3 蒸发器结构示意图 Fig. 3 The structural diagram of evaporator

3 样机性能测试

— 92 —

为保证并验证热虹吸回路冷却系统的冷却性能, 首先针对对冷却性能影响较大的系统充液量和工作 倾角进行影响性测试分析,其次针对样机的启动特性 和高温环境下的冷却性能进行测试分析。所有温度 测试结果均为模拟热源温度稳定后一段时间内多个 时刻测点温度的平均值。

3.1 充液量对系统性能的影响分析

充液量对蒸发区工作压力和系统循环驱动能力 均存在影响,进而影响系统性能,是热虹吸回路循环 系统的一个重要参数。理论上对应一种散热对象,热 虹吸回路循环系统存在一个最佳的充液区间。在工 作倾角为 10°时,针对 0.895 kg、0.935 kg、0.965 kg、 1.01 kg、1.04 kg、1.08 kg、1.12 kg 和 1.17 kg 等不同 充液量条件下,开展样机系统冷却性能测试,270 W 热源、60 W 热源以及冷凝器进出口的温升测试结果 如图 4 所示。

测试结果表明,在充液量小于 1.01 kg 时,随着 充液量的提高,系统冷却性能提升明显,各热源温度 不断下降,在充液量达到 1.01 kg 以后,各热源温度 基本稳定,样机系统 270 W 模拟热源的最高温升约 32 ℃。考虑到系统工作压力随充液量的增加而增 大,为兼顾系统冷却性能和工作稳定性,确定本系统 最佳充液量为 1 ~ 1.01 kg,后续测试工作均基于 1.01 kg 的系统充液量进行。



Fig. 4 The test results of the prototyping with different liquid filling quantity

3.2 工作倾角对系统性能的影响分析

热虹吸回路是重力驱动的两相流系统,循环回路 的工作倾角对系统性能影响很大。本文针对不同的 工作倾角,测试样机系统的冷却性能。270 W 热源、 60 W 热源的温升测试结果如图 5 所示。





测试结果表明,工作倾角为 15°时,最有利于系 统两相流循环驱动,系统冷却性能最好,样机 270 W 热源的最高温升约 30 ℃;当工作倾角小于 5°或超过 17.5°时,系统冷却性能较差,工作倾角小于 5°时,对 应 270 W 热源最高温升超过 35 ℃。

3.3 系统启动特性分析

考虑到热虹吸回路系统的启动特性主要由蒸发

区相变启动特性以及系统的两相流循环启动特性决定,因此,热源特性和工作倾角是对系统启动特性影响最大的两个因素,本文针对样机全状态模拟热耗1.5 kW、器件热流密度100 W/cm²的工况,在最不利于启动的0°和1°的工作倾角下,分析样机启动特性,启动过程中模拟热源的温度分布如图6和图7所示。



图 6 样机系统 0°工作倾角启动特性









测试结果表明,样机在没有工作倾角的情况下, 热虹吸系统工质循环难度大,系统启动特性较差,稳 定时间超过10 min,启动过程中模拟热源最高瞬时温 度超过稳态温度30℃以上,不满足启动阶段的系统 冷却要求;样机在1°工作倾角下可以平稳启动,2 min 内达到稳定状态,启动过程中模拟热源最高瞬时温度 仅超过稳态温度2℃左右,满足启动阶段的系统冷却 要求。

3.4 高温环境下系统性能分析

为了验证样机系统在极限高温环境温度的冷却 性能,针对充液量为1.01 kg、15°工作倾角的样机系 统,测试环境温度为50℃下各模拟热源的温度,验证 高温环境下系统性能。

待各模拟热源(270 W 和 60 W 两种)测点温度 稳定后,取间隔 10 s 的 5 个连续温度测试值取均值 作为热源稳态工作温度。测试结果表明,在 50 ℃极 限高温环境下,DAM 模拟件中最左侧 270 W 模拟热 源处表面温度最高,为77.4 ℃,相同类型模拟热源表 面温度差异小于 5 ℃,满足样机系统热控设计要求。

表 1 环境温度 50 ℃下模拟热源温度测试结果 Tab. 1 The temperature of simulated heat sources when ambient temperature is 50 ℃

环境 温度/℃	270 W 模拟热 源 1/℃	270 W 模拟热 源 1/℃	270 W 模拟热 源 3/℃	270 W 模拟热 源 4/℃
50	77.4	76.6	73. 1	72.7

3.5 样机系统结构参数测试

热虹吸回路冷却系统质量为6.5 kg,蒸发器厚度
为10 mm,冷凝器尺寸为600 mm(长)×300 mm(宽)
×32 mm(厚),满足样机系统质量及尺寸要求。

4 结论

本文针对典型4 通道高功率 DAM 的冷却问题, 设计了一套紧凑型热虹吸回路冷却系统样机,并在充 液量、工作倾角对系统冷却性能的影响以及系统启动 特性等方面开展了实验研究。研究结果表明,本系统 可以实现热耗 1600 W、局部热流密度 100 W/cm² 的 组件高效冷却,系统启动性能良好,最佳充液量为 1 ~1.05 kg,最佳工作倾角为 10°~17.5°。此外,本系 统有进一步优化设计的潜力,可以实现更高热耗、更 高热流密度的冷却能力,在高功率组件级冷却方面, 尤其在实现组件分布式冷却方面有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 王鑫煜,辛公明,田富中,等.两相闭式热虹吸管强化传热研究进展[J].化工进展,2012,31(5):965-973.
 (WANG Xinyu, XIN Gongming, TIAN Fuzhong, et al. Research progress of heat transfer enhancement in twophase closed thermosyphon[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(5):965-973.)
- [2] Chen K, Chen Y, Tsai S. An experimental study of the heat transfer performance of a rectangular two-phase natural circulation loop [J]. Experimental heat transfer, 1990, 3 (1): 27-47.
- [3] 张朋磊,王宝龙,韩林俊,等.两相热虹吸循环蒸发侧传 热模型比较[J].化工学报,2013,64(8):2752-2759.

Vol. 37,No. 1 February, 2016

(ZHANG Penglei, WANG Baolong, HAN Linjun, et al. Comparison of evaporating heat transfer m odels in twophase thermosyphon loop [J]. CIESC Journal, 2013, 64 (8): 2752-2759.)

- [4] Noie S H, Heris S, Zeinali, et al. Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in a two-phased closed thermosyphon[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 9(5/6): 973-979.
- [5] 张朋磊,石文星,韩林俊,等.两相热虹吸循环动量模型 评价[J].制冷学报,2013,34(2):1-8.(ZHANG Penglei, SHI Wenxing, HAN Linjun, et al. An assessment of momentum models for two-phase thermosyphon loop[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2):1-8.)
- [6] Imura H, Takeshita K, Horie Y, et al. Flow and heat transfer characteristics in a two-phase loop thermosyphon [J]. Trans of the JSRAE, 1988, 5(1): 63-72.
- [7] Imura H, Sasaguchi K, Kozai H, et al. Critical heat flux in a two-phase thermosyphon [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1983, 26(8): 1181-1188.
- [8] Said S A, Akash B A. Experimental performance of a heat pipe[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1999, 26(5): 679-68
- [9] Esen M. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants[J]. Solar Energy, 2004, 76(6): 751-757.
- [10] 谷雅秀,吴裕远,张林颖,等. 小型无泵溴化锂吸收式制 冷系统的实验研究[J]. 制冷学报,2006,27(5):17-21. (GU Yaxiu, WU Yuyuan, ZHANG Linying, et al. Experimental research on compact pump-free LiBr absorption refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27 (5):17-21.)
- [11] Khrustalev D. Loop thermosyphons for cooling of electronics [C]//Semiconductor Thermal Measurement and Management, Eighteenth Annual IEEE Symposium. IEEE, 2002: 145-150.
- $[\,12\,]$ Khodabandeh R , Lindstrom M. Cooling of CPU with a thermosyphon[C]//2008 Second International Conference

on Thermal Issues in Emerging, Technologies, THETA2, Cario, Egypt, 2008: 353-358.

- [13] 周峰,马国远,王树春,等. 通用电子设备舱用热虹吸管 均热器性能[J]. 北京工业大学学报,2012,38(6):
 910-915. (ZHOU Feng, MA Guoyuan, WANG Shuchun, et al. Radiation performance of thermosyphon spreader for general sealed electric cabins[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(6): 910-915.)
- [14] 马国远,陈杰,周峰. 通信基站应用热虹吸管换热机组的节能潜力[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(1):
 103-108. (MA Guoyuan, CHEN Jie, ZHOU Feng. Energy saving potential for the telecommunication base station using a thermosyphon heat exchanger[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013,39(1):103-108.)
- [15] 韦帮远,邓建强,强科. 通信基站热管加蓄冷被动散热的 模拟研究[J]. 热科学与技术, 2011,10(1):38-44.
 (WEI Bangyuan, DENG Jianqiang, QIANG Ke. Numerical study on passive cooling system with heat pipes and cooling storage for telecommunication base station building
 [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011,10 (1):38-44.)
- [16] 方立军,李佩,马骏,等. 基于微波光电技术的未来数字 阵列构想[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6): 583-586. (FANG Lijun, LI Pei, MA Jun, et al. An idea for future digital array radar based on microwave optoelectronics[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(6): 583-586.)

通信作者简介

张根垣, 男,博士,中国电子科技集团公司第三十八研究所, (0551)68591772, E-mail: zgxagen@ustc.edu。研究方向:雷达结构设计与环控设计。

About the corresponding author

Zhang Genxuan, male, doctor, No. 38 Research Institute of CETC, + 86 551-68591772, E-mail: zgxagen@ustc.edu. Research fields: the design of the structure and environment control of radar.