

某数字 T/R 组件液冷冷板的改进设计*

刘晓红, 江 建

(北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘 要:文中针对某数字 T/R 组件出现的局部过热问题,对原有液冷冷板进行改进设计。组件加工工艺由传统的铣削加工改为一体压铸成型,冷板流道改为铜管嵌装结构,并引入微通道散热技术,分别设计直齿微通道散热模块和菱形柱微通道散热模块。测试结果表明:微通道散热模块对散热效果改善明显,可解决局部过热问题;引入微通道散热模块后冷板流阻有所增加,但在允许范围内;菱形柱微通道散热模块由于边界层重新发展和二次流的产生,散热效果比直齿微通道散热模块好,热流密度越高,改善效果越明显。文中数字 T/R 组件最终选用直齿微通道散热模块的流道结构。菱形柱微通道散热技术可在更高热流密度的情况下应用。

关键词:T/R 组件;液冷冷板;微通道;菱形柱

中图分类号:TK124 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2016)04-0023-04

Optimization Design of Liquid Cold Plate for a T/R Module

LIU Xiao-hong, JIANG Jian

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: To solve the overheat problem in local area of a T/R module, improvements design is carried out for the original liquid cold plate. The T/R module cabinet is processed using die-casting instead of milling. Cold plate flow channel adopts copper-pipe embedded structure. Mini-channel cooling technique is introduced, continuous fins and oblique fins are used in mini-channel heat sink. Experimental investigation demonstrates that the mini-channel heat sink results in a much improved heat transfer performance, overheat problem can be solved; cold plate flow resistance increases when using mini-channel heat transfer enhancement scheme, but it is within the acceptable range; the combination of boundary layers re-development and secondary flows generation in oblique fins mini-channel heat sink causes improved heat transfer performance comparing to continuous fins, and the improvement effects is more obvious when the heat flux is more high. Continuous fins mini-channel is adopted for the T/R module in this paper. Oblique fins mini-channel technique can be widely used in cold plate with higher heat flux.

Key words: T/R module; liquid cold plate; mini-channels; oblique fins

引 言

超大规模集成电路的飞速发展,使得电子器件单位面积上产生的热量急剧增加,这给电子器件的热设计工作带来严峻的挑战^[1-2]。尤其军用雷达、武器系统等,由于工作环境恶劣、可靠性要求高、体积小、重量轻,对电路的集成度和热设计的要求更加严格,微通道散热器应运而生^[3-4]。微通道散热器的特点是:1) 散热齿间距小,齿间流体边界层很薄,利于冷却液与散

热齿的换热;2) 单位体积的换热面积大,起到强化换热的效果。微通道散热技术对解决高集成电子设备的散热问题,提高微电子设备的性能和可靠性起到重要的推动作用^[5-6]。

近年来,有国外学者开展了菱形柱微通道散热技术的研究工作,在 2 个主流道之间建立 1 个小通道,在压差驱动下产生二次流动,破坏边界层,提高散热效果。菱形柱微通道技术已应用于高功率电机散热、锂离子电池散热、IGBT 散热等^[7-9]。本文针对某数字 T/R 组件

* 收稿日期:2016-06-30

的局部过热问题,分析过热原因,对组件冷板和流道结构进行改进设计,并试验验证散热效果。

1 数字 T/R 组件结构

如图 1 所示,数字 T/R 组件为密闭式机箱结构,包含以下几部分:组件壳体、组件上下盖板、供液口、出液口、液冷冷板、T/R 模块(2 个)。液冷冷板位于机箱的中间位置,既是电子元件的安装载体同时又起到为电子设备散热的作用。数字 T/R 组件内的主要热源为 2 个 T/R 模块。T/R 模块安装在冷板正面,每个 T/R 模块内部包含 1 个微波功率管。

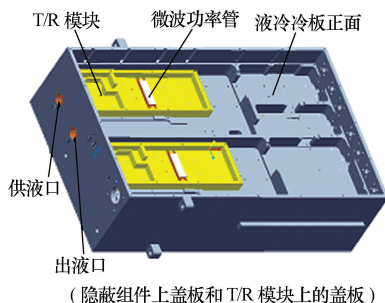


图 1 数字 T/R 组件

如图 2(a) 所示,微波功率管的铜载板焊接在 T/R 模块底板上,螺钉穿过 T/R 模块底板将微波功率管与组件液冷冷板相连,起到加固的作用。微波功率管的结构尺寸如图 2(b) 所示。

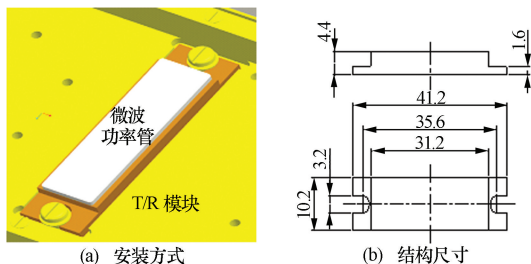


图 2 微波功率管

如图 3 所示,冷板内部流道为 U 形通道,冷却液流经各发热元件对应的冷板区域,将热量带走。在与微波功率管对应的位置,增加了流道宽度,并且在流道内生长 3 个凸台,旨在增加换热面积,提高散热效果。

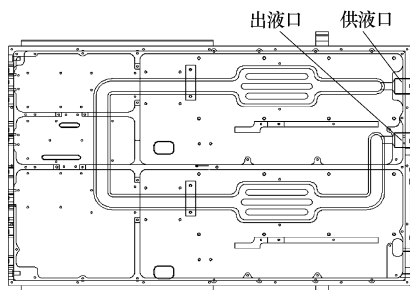


图 3 组件内冷板流道

2 问题描述

在系统调试过程中,数字 T/R 组件出现停止工作的现象。经过故障定位发现,原因是 T/R 模块内部的微波功率管温度过高触发过热保护程序。测试数据显示,在冷却液流量 2 L/min、供液温度 20 ℃ 条件下,距离功率管最近的 T/R 模块底板上的测点温度在未达到热平衡时已超过 90 ℃。为避免功率管烧坏,只能停止试验,而微波功率管的热设计 requirements 是:安装面温度低于 90 ℃。

分析微波功率管过热的原因:

- 1) 冷却液流量为 2 L/min,与功率管安装位置对应的流道内冷却液平均流速为 0.247 m/s,流速过低。
- 2) 与功率管安装位置对应的流道内仅有 3 个凸台,散热面积不足。
- 3) 冷板与冷却液的换热主要发生在靠近冷板表面的薄层内,而流道高度为 9 mm,导致冷却液与冷板换热不充分。
- 4) 冷却液由供液口到出液口共经过 4 个直角转弯,增加了冷板流阻。

3 冷板改进设计

3.1 改进加工工艺

原设计组件的加工流程为:用金属厚料铣削加工出组件大体框架,在组件中间的筋板上铣出流道形状,再钎焊流道盖板。大面积钎焊不仅成本高,而且会增加冷却液泄露的风险。为降低成本、提高流道承压能力和耐腐蚀性,冷却液流道采用紫铜管嵌入冷板的结构形式,避免冷板铝合金材料与冷却液直接接触。紫铜材料耐蚀性优良,能够保证系统长期稳定工作。

雷达系统的数字 T/R 组件数量达 200 个,组件结构采用压铸工艺,比厚料加工对降低成本更有优势。为提高组件经济性和生产效率,组件结构主体的加工工艺改为铝合金压铸。组件框架及各种辅助功能结构均采用一次压铸成型。压铸材料选用高导热率压铸铝合金 AlSi99,导热系数达到 205 W/(m·K),比常规压铸铝高一倍,可大幅提高铸造冷板的传热性能。

改进后组件的加工流程为:首先将紫铜管按照设计弯曲成型,利用专用工装夹具将流道固定,最后与组件框架一起压铸成型。

3.2 引入微通道散热技术

T/R 模块内的微波功率管热负荷为 150 W,热流密度高达 48 W/cm²。常规的蛇形流道已不能满足散热要求,需要引入微通道散热技术,设计散热效果更好。

的流道结构。微通道散热器一方面增加了冷却液与冷板的换热面积; 另一方面微通道内流体边界层变得很薄, 两个方面都大大提高了散热效果。

考虑到微通道散热器的流阻较大, 并且数字 T/R 组件内只有 2 个微波功率管集中发热, 将流道设计成铜管与微通道散热模块相结合的结构形式, 如图 4 所示。微通道散热模块嵌装在与微波功率管对应的位置, 解决局部高热流密度的散热问题。

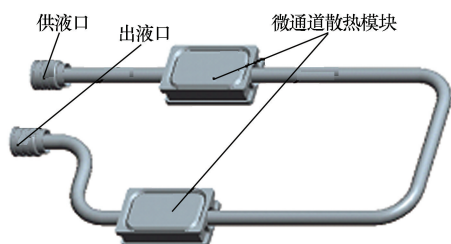


图 4 改进后的流道

3.3 设计微通道散热模块

如图 5 所示, 微通道散热模块包括模块腔体和上盖板 2 部分, 微通道散热器与模块上盖板为一体式结构, 再与模块腔体钎焊在一起。微通道散热器选用紫铜加工而成。内含微波功率管的 T/R 模块直接安装在微通道散热模块的上盖板上。

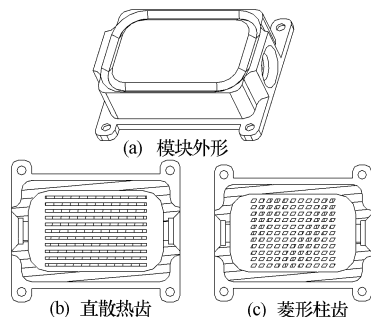


图 5 微通道散热模块

针对微波功率管的散热要求, 设计 2 种微通道散热器: 直齿散热器和菱形柱散热器。直齿散热器设计简单, 易于加工, 缺点是齿间边界层充分发展、流动稳定, 散热器后段的散热效果不理想。菱形柱散热器的设计理念是在 2 个主流道之间建立一定角度的小通道结构, 通过压差驱动不断产生二次流动, 破坏热边界层, 提高散热效果, 缺点是设计难度大、加工成本高、二次流通道结构易堵等。

直齿和菱形柱微通道散热模块的外形结构与安装接口完全一致。散热模块外形尺寸: $50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ 。采用仿真分析优化模块内散热齿几何尺寸。优化后的直齿微通道散热模块几何参数: 齿高 9 mm , 齿厚 0.8 mm , 齿间距 1.2 mm , 齿长

30 mm 。优化后的菱形柱微通道散热模块几何参数: 棱柱高 9 mm , 棱柱长 2 mm , 棱柱厚 1 mm , 棱柱夹角 30° , 沿流向棱柱间距 0.5 mm , 垂直流向棱柱间距 1 mm 。

改进后的 T/R 组件冷板流道结构如图 6 所示。

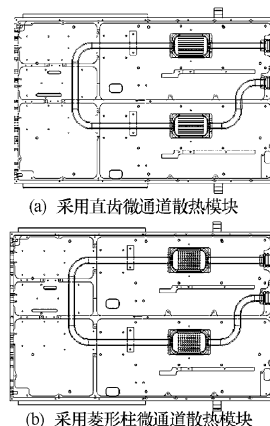


图 6 改进后的 T/R 组件冷板流道

为降低接触热阻和保证可维护性, 在 T/R 模块底板与液冷冷板之间垫有导热系数 $75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、厚度 0.1 mm 的金属钢片。

4 试验测试

4.1 试验系统

试验系统如图 7 所示。水冷机可提供指定温度、流量的冷却液, 冷却液从水冷机流出后进入测试对象的冷板, 吸收热量后返回水冷机重新被冷却, 完成一个循环。压力传感器布置在测试对象的进口管路上, 测量冷却液进口压力。压差传感器布置在测试对象进出口管路之间, 测量冷板流阻。温度传感器分别布置在测试对象进出口管路内, 测量冷却液的进出口温度。其余温度传感器用于测量发热器件 (模拟热源) 和冷板表面的温度。所有温度、压力、流量传感器测量的数据通过数据采集仪器采集, 并输出到数据处理仪器上, 数据处理仪器可以实时显示、记录并处理数据。

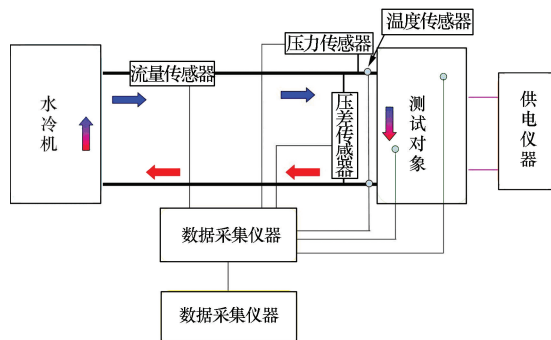


图 7 试验系统示意图

4.2 试验方法

试验中,采用汇聚法设计模拟热源,模拟微波功率管的发热量。模拟热源由金属块、电加热管和保温装置组成。如图8所示,金属块设计为凸形结构,与液冷冷板的安装接口均与真实的微波功率管保持一致。2根 $\Phi 6$ mm电加热管插入金属块的圆孔内,在电加热管与金属块之间灌封高导热系数的导热硅胶,保证电加热管的热量快速传递,避免由于热量堆积导致的电加热管爆裂。在金属块的外侧包裹保温材料,避免热量散失,确保试验数据的准确性。

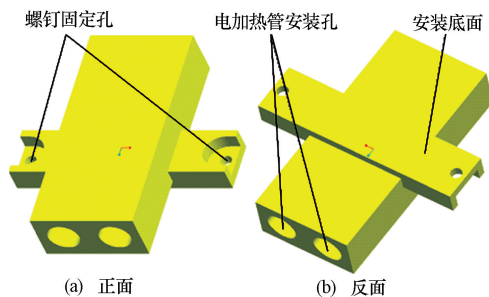


图8 模拟热源

试验中,采用2根电加热管并联模拟1个微波功率管的发热量。电加热管内部为烧结的金属粉末。测试发现,电加热管的电阻随温度变化而变化,为准确测量发热量,在电路中串联1个 $1\ \Omega$ 标准电阻,加热电路如图9所示。试验中,测量交流调压器的输出电压 U ,测量标准电阻两端的电压 U_1 ,计算电加热管的发热量 $P = (U - U_1) \times U_1$ 。

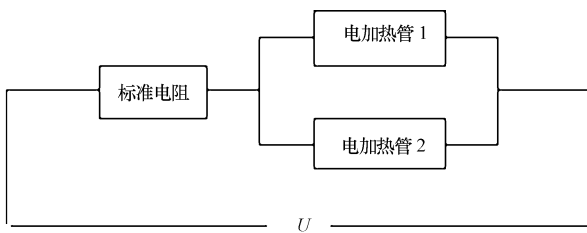


图9 加热电路

4.3 试验条件

- 1) 冷却液为水;
- 2) 冷却液流量 $2\ \text{L/min}$;
- 3) 供液温度 $20\ ^\circ\text{C}$;
- 4) 试验室环境温度 $28\ ^\circ\text{C}$ 。

4.4 试验工况

- 工况1:原设计液冷冷板;
 工况2:采用直齿微通道散热模块的液冷冷板;
 工况3:采用菱形柱微通道散热模块的液冷冷板。

4.5 测试结果及分析

测试结果见表1。

表1 测试结果

序号	项目	工况1	工况2	工况3
1	微通道散热器	—	直齿	菱形柱
2	模拟热源 $1/^\circ\text{C}$	111.2	76.8	68.8
3	模拟热源 $2/^\circ\text{C}$	102.2	74.2	68.1
4	冷板流阻/bar	0.27	0.31	0.34
5	是否满足要求	否	是	是

分析测试数据:

1)对比工况1和工况2,采用直齿微通道散热模块,2个模拟热源的温度与原设计液冷冷板相比分别下降 $34.4\ ^\circ\text{C}$ 和 $28\ ^\circ\text{C}$,散热效果改善明显。流阻增加 $0.04\ \text{bar}$,约15%。

2)对比工况1和工况3,采用菱形柱微通道散热模块,2个模拟热源的温度与原设计液冷冷板相比分别下降 $42.4\ ^\circ\text{C}$ 和 $34.1\ ^\circ\text{C}$,散热效果改善明显。流阻增加 $0.07\ \text{bar}$,约26%。

3)对比工况2和工况3,采用菱形柱微通道散热模块,2个模拟热源的温度与采用直齿微通道散热模块相比分别降低 $8\ ^\circ\text{C}$ 和 $6.1\ ^\circ\text{C}$,散热效果有所改善。流阻增加 $0.03\ \text{bar}$,约10%。

4)采用微通道散热模块的2种液冷冷板均满足微波功率管的散热要求,冷板流阻也满足低于 $0.8\ \text{bar}$ 的设计要求。

综合考虑成本、加工、可靠性、成熟度等因素,最终选取采用直齿微通道散热模块的液冷冷板。

5 结束语

本文针对某数字T/R组件在调试中出现的过热问题,分析过热原因,综合考虑散热效果、经济性、安全性和可维修性,设计铜管与微通道散热模块相结合的流道结构,流道与组件框架一体压铸成型。测试结果表明:改进设计后的2种液冷冷板均满足微波功率管的散热要求;微通道散热模块对散热效果改善明显;引入微通道散热模块导致液冷冷板的流阻有所增加,但在允许范围内。为节约成本和避免过设计,数字T/R组件最终选用直齿微通道散热模块的流道结构。

菱形柱微通道散热器由于边界层重新发展和不断产生二次流,散热效果比直齿微通道散热器好,热流密度越高,改善效果越明显。缺点是设计难度大、加工成本高,可在热流密度更高的情况下推广应用。

参考文献

- [1] 徐德好. 微通道液冷冷板设计与优化[J]. 电子机械工程, 2006, 22(2): 14-18, 40.

(下转第46页)

二次天线,放至固定架;3)拆卸左边块,放至边块箱固定;4)拆卸右边块,放至边块箱固定;5)收起支撑腿,收起垫木;6)天线锁定,转盘锁定;7)收电缆。

实验结果是:在无吊车等辅助设备的情况下,架设时间和撤收时间均小于4 h。

3.2 系统具有的功能及达到的目标

经测试和评估,认为该系统达到以下主要目标:

1)系统到达指定工作地点后能够快速展开,通过自动架设、调平、定北,达到工作状态;2)系统具备一二次点航迹数据、ADS-B数据及飞行计划报文的融合能力;3)一次雷达覆盖 ≥ 100 km(雷达发现概率 $P_d = 0.8$,雷达发现虚警率 $P_{fa} = 10^{-6}$,目标反射截面积 $\sigma = 2 \text{ m}^2$,SWI类目标);(4)二次雷达覆盖 ≥ 250 km($P_d = 0.9$)。

4 结束语

按照本文介绍的车载式空中交通管理系统的机动设计方法研制的样机已通过民航空管局的验收测试。该项设计的创新点在于大口径可撤拼轻质碳纤维天线的设计,碳纤维材料较轻的重量使得人工撤拼大口径反射面天线成为可能,此外,碳纤维天线与金属材料天线相比在加工成本和加工周期方面也有一定优势。实践表明,系统载车平台优化和轻质化可撤拼碳纤维天线的研制是中小机场车载式空中交通管理系统的机动性应用的有效途径之一。

参考文献

- [1] 谢玉兰, 陈文秀. 美国空管自动化系统介绍[J]. 空中交通管理, 2007(6): 39-41.
- [2] 俞中良, 王千骐, 陈忠先. 3821 近程空管一次雷达产业化进展情况[J]. 空中交通管理, 2010(8): 10-12.
- [3] 蒋倩, 程延松. 基于 ATC 系统多雷达信号模拟器的研究和应用[J]. 民航科技, 2014(6): 33-36.
- [4] 唐宝富. 二次雷达天线小型化设计[J]. 电子机械工程, 2006, 22(6): 26-28.
- [5] 张家勇, 徐鹏, 任翔. 机动多功能航管雷达系统研究[J]. 现代电子技术, 2014(9): 4-5.
- [6] 牛忠文, 任翠锋, 鞠金山, 等. 大口径高精度航管雷达天线结构设计与应用[J]. 雷达科学与技术, 2015(1): 103-108.

何启跃(1959-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为无线电通信。

王千骐(1963-),男,研究员级高级工程师,主要研究方向为雷达工程。

牛忠文(1966-),男,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向为雷达结构工艺技术。

任翔(1982-),男,硕士,工程师,主要研究方向为雷达工程。

赵科(1988-),男,工程师,主要研究方向为雷达工程。

(上接第26页)

- [2] 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.
- [3] 赵仁祥. 高效散热微通道液冷冷板焊接技术及成形工艺研究[J]. 电子机械工程, 2008, 24(4): 33-36.
- [4] 任川. 微/小通道冷却技术的工程化应用[J]. 电子机械工程, 2014, 30(5): 1-6.
- [5] 翁夏. 微/小通道冷板在某型相控阵天线上的对比分析[J]. 电子机械工程, 2014, 30(5): 16-18.
- [6] 刘晓红, 江建. 某数字 T/R 组件微通道液冷冷板的热设计[J]. 电子机械工程, 2016, 32(2): 13-16.
- [7] FAN Y, LEE P S, JIN L W, et al. A parametric investigation of heat transfer and friction characteristics in cylindrical oblique fin minichannel heat sink[J]. International Journal

of Heat and Mass Transfer, 2014, 68: 567-584.

- [8] LAW M, LEE P S, BALASUBRAMANIAN K. Experimental investigation of flow boiling heat transfer in novel oblique-finned microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 76: 419-431.
- [9] LEE Y J, SINGH P K, LEE P S. Fluid flow and heat transfer investigations on enhanced microchannel heat sink using oblique fins with parametric study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 325-336.

刘晓红(1982-),女,高级工程师,主要从事雷达结构热设计工作。