

文章编号: 1671-0576(2020)01-0007-05

# 相控阵反向并行流道液冷冷板设计与热仿真

刘亚龙, 陆 玥, 张发洋, 刘 宇

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 为了在高发热功率条件下得到更好的相控阵雷达发射/接收(Transmitter/Receiver, T/R)组件温度一致性,设计了一种反向并行流道液冷冷板。基于 Icepak 热仿真分析软件对反向并行流道冷板与 S 型、分支型流道冷板进行了散热效能仿真,然后以阵面温度和温度分布标准差为指标对三种冷板进行了对比。结果表明:反向并行流道冷板换热降温效果好,且温度一致性最佳。为相控阵雷达冷板的均温性设计提供了参考。

**关键词:** T/R 组件; 液冷冷板; 流道; 热仿真; 均温性

**中图分类号:** TB131

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.01.002

## Design and Thermal Simulation of Liquid Cooling Plate with Opposite-parallel Flow Channel for Phased Array Radar

LIU Ya-long, LU Yue, ZHANG Fa-yang, LIU Yu

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to get better temperature uniformity for phased array radar transmitter/receiver (T/R) module with high calorific power, a liquid cooling plate with opposite-parallel flow channel is designed. Thermal simulation for S-channel, tree-channel and opposite-parallel channel cooling plate is carried out based on Icepak software. The antenna array temperature and standard deviation of temperature distribution among three types of cooling plate is compared. The results show that the opposite-parallel flow channel cooling plate has best performance of cooling and temperature uniformity. It provides guidance for the temperature uniformity design of liquid cooling plate flow channel for phased array radar.

**Key words:** T/R module; liquid cooling plate; flow channel; thermal simulation; temperature uniformity

## 0 引言

有源相控阵雷达具有波束扫描、多目标快速搜索、抗干扰能力强等优势,是现代弹载雷达的主流发展方向<sup>[1]</sup>。发射/接收(Transmitter/Receiver, T/R)组件作为有源相控阵雷达导引头的关键部件<sup>[2]</sup>,在工作时约 70% 的电功率转变为热功率<sup>[3]</sup>,巨大的热量会降低其工作性能和可靠性<sup>[4-6]</sup>。液冷冷板是液冷散热系统中起到换热作用的关键部件。影响液冷冷板换热效能的因素很多,包括流道形式、流道截面尺寸、进出液口位置、冷却液种类、流速、流量等<sup>[7-8]</sup>。其中,冷板内部流道形式对于系统散热效能有重要影响。

相控阵阵面的温度分布差异(阵面温度一致性)对各个 T/R 组件相位一致性影响显著<sup>[9-10]</sup>,相位一致性差会导致产品性能下降。因此,在散热的同时保持阵面温度的均匀分布尤为重要。本文基于 Icepak 热分析软件,针对相控阵雷达阵面散热问题,以液冷冷板流道形式为研究对象,开展了仿真设计和分析优化,设计了一种反向并行流道形式的液冷冷板,并将其与 S 型、分支型流道冷板进行了散热效能仿真对比。

## 1 Icepak 仿真实理论与模型构建

### 1.1 Icepak 仿真实理论

热仿真分析软件 Icepak 适用于电子设备电路板级和系统级热仿真,以及发热和散热分析。集成了壳体、印制电路板(PCB)、风扇、散热器等常用模型和丰富的材料库,可模拟强迫对流、传导、流固耦合传热等多种传热形式<sup>[11]</sup>。

液冷冷却属于不可压缩、常物性、无内热源的三维对流传热问题<sup>[12]</sup>。对液体介质做传热仿真分析时,需要作如下假设<sup>[8]</sup>:

- 流体物性参数为常数;
- 流体为不可压缩的无间隙连续介质;
- 忽略辐射散热和自然对流的影响;
- 流体为单相流体;
- 不考虑热源与冷板间的接触热阻。

液冷冷却过程中发生的热交换可根据牛顿冷却公式计算,热交换量  $Q$  表达式为

$$Q = hA(T_1 - T_2) \quad (1)$$

式中:  $h$  为换热系数;  $A$  为换热面积;  $T_1$  和  $T_2$  分别为出口和进口处的冷却液温度。

### 1.2 Icepak 液冷散热仿真模型构建

三维几何模型可通过 Geometry-Design Modeler 软件转化为 Icepak 的可识别模型,导入 Icepak 后设置环境参数、热参数、边界条件和求解参数等,进行建模求解。Icepak 提供了 Hexa Unstructured、Hexa Cartesia、Mesher-HD 三种网格类型,通过对局部网格进行加密、划分连续与非连续网格,控制网格质量。用 CFD-Fluent 求解器进行求解,当求解残差值达到收敛标准或迭代次数等于预设迭代次数时,认为计算收敛并结束求解。

典型液冷系统的工作原理如图 1 所示。液泵将冷却液从储箱压入冷板,迫使冷却液循环流动,热源传递给冷板的热量由冷却液带入换热器,换热器通过风扇将冷却液的热量耗散到大气中,降温之后的冷却液继而流回储箱。

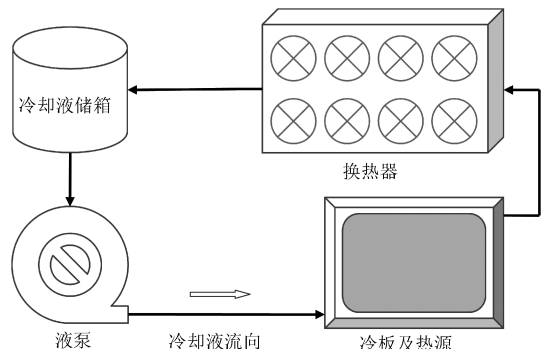


图 1 典型液冷冷却系统工作原理图

仿真模型中,相控阵冷板是直径为 200 mm、厚度为 10 mm 的薄圆柱体,冷却液进口、出口各两个。冷板表面均匀分布着直径为 4.5 mm 的接插件预留孔,布置冷板内部流道需避开接插件预留孔。热源(T/R 组件)简化为厚 2 mm 的薄片,热源表面与冷板表面紧密贴合,如图 2 所示。冷板和热源材质选择 Al-2024-T6 铝合金,冷却液选择纯水,Al-2024-T6 铝合金和纯水的主要物性参数见表 1。仿真中环境温度与冷却液初始温度恒为 20 °C。

在后处理中,提取热源的最低温度  $T_L$ 、最高温度  $T_H$ 、平均温度  $T_M$ 、温度分布标准差  $\sigma$  和温度分布云图作为冷板散热效能评判指标。其中,温度分布标准差  $\sigma$  的表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_M)^2}{n}} \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为各测量点温度;  $n$  为测量点数量。  $\sigma$  越小,说明区域内各点温度越趋近于平均温度,即温度一致性越好。

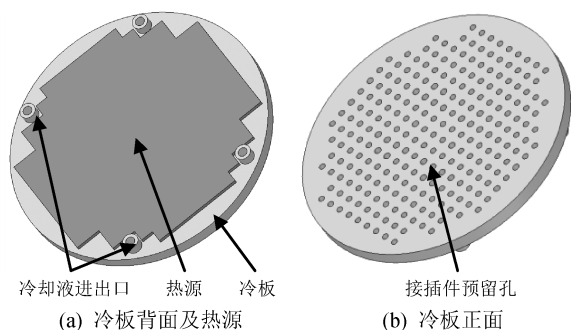


图 2 冷板及热源结构示意图

表 1 纯水与 Al-2024-T6 铝合金的主要物性参数

物性参数	纯水	Al-2024-T6 铝合金
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 000	2 770
比热容/(J/(kg·K))	4 180	875
导热率/(W/(m·K))	0.6	177
体积膨胀率/(K <sup>-1</sup> )	0.000 21	—
粘度/(kg/(m·s))	0.001	—
扩散率/(m <sup>2</sup> /s)	1.0	—
千摩尔质量/(kg/kmol)	18.015	—

## 2 反向并行流道形式液冷冷板

学者们研究和对比了多种形式流道冷板的散热效能,包括 S 型、平行型、分支型、网格型、菱形、螺旋形等流道排布形式<sup>[5,13]</sup>。采用这些流道形式的冷板所无法避免的一个问题是冷板不同区域温度差异显著。其原因是冷却液在流动过程中温度不断升高,换热能力逐渐弱化,在流道末段难以有效起到换热作用。冷却效果相对流道初段变差,导致冷板散热一致性不佳。

为解决上述问题,设计了图 3 所示的反向并行流道冷板。该冷板有两条互不联通的流道围绕着预留孔盘绕分布,两条流道互相平行且冷却液流向相反。流道 1 的初段与末段分别对应着流道 2 的末段与初段,一条流道换热能力的强区域与弱区域分别对应着另一条流道的弱区域与强区

域。两条流道的换热能力互为补充,有利于平衡冷板散热能力差别和提高温度一致性。

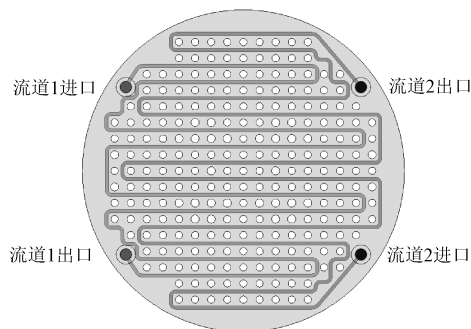


图 3 反向并行流道冷板示意图

## 3 三种流道形式冷板散热效能对比

### 3.1 对照组流道冷板设计

为对比分析反向并行流道冷板的散热效能,另外设计了 S 型流道和分支型流道两种冷板,示意图分别见图 4 和图 5。三种冷板外形尺寸相同,均包含两条互不连通的流道,流道截面均为 2 mm×6 mm 的矩形。

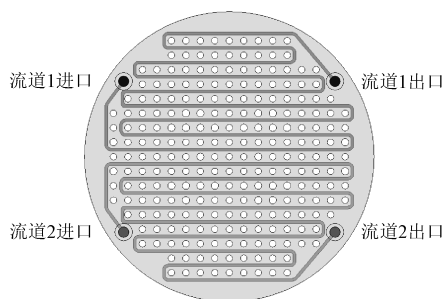


图 4 S 型流道冷板示意图

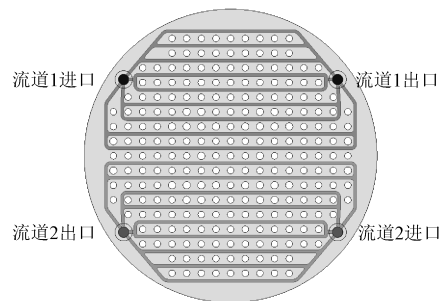


图 5 分支型流道冷板示意图

### 3.2 Icepak 热仿真模型构建

将热源、冷板和流道模型导入至 Icepak 中,建立三种冷板的换热效能仿真模型。设置热源功

率为 2 kW,冷却液流量分为 1,2,3,4,5 L/min 共 5 个梯度。采用 Mesher-HD 方法划分网格并进行优化,最终得到网格数量约 80 万个。计算模型设置为 Turbulent 中的 Zero Equation。开始求解后经过约 100 次迭代,检测得到的热源温度、冷

却液出口温度趋于稳定,残差值达到收敛标准,求解过程结束。在后处理中提取三种冷板的  $T_L$ 、 $T_H$ 、 $T_M$  和  $\sigma$ ,如图 6 所示。仿真得到的冷却液流量 3 L/min 时的典型热源温度分布云图如图 7 所示。

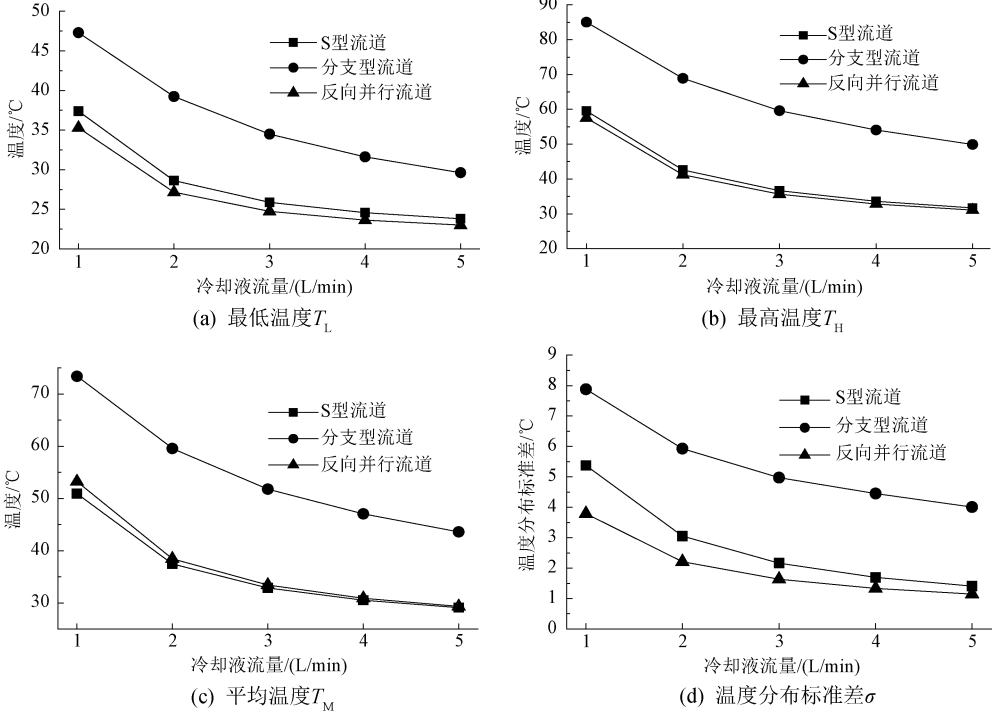


图 6 三种流道冷板散热仿真结果

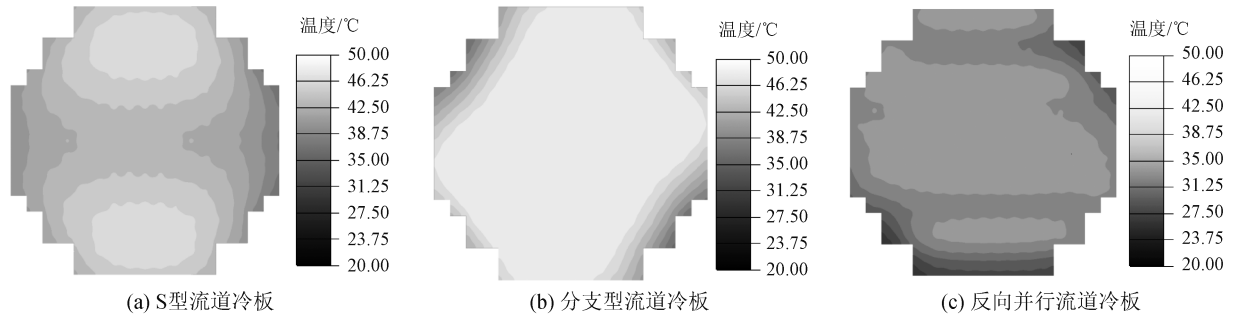


图 7 热源温度分布典型云图

### 3.3 热仿真结果分析

由仿真结果分析可得:

a) 随着冷却液流量的递增,热源温度不断下降,同时降幅逐渐趋缓,说明冷却液流量的增加能够提升散热效能,但流量增加到一定程度后,散热效能的提升将不再显著;

b) 热源温度分布云图表明三种类型流道冷板的散热能力都存在着“强区”、“弱区”,S型流道

冷板的上下两端、反向并行流道冷板的中心区域存在较小的高温区,反向并行流道冷板的高温区温度更低且面积更小,而分支型流道冷板的高温区温度高且面积大;

c) 任一流量条件下,反向并行流道的温度分布标准差  $\sigma$  显著低于 S 型和分支型流道,说明在反向并行流道冷板冷却的条件下,热源的点温度最趋近于热源平均温度,其散热均温性能最优。

## 4 结束语

本文针对相控阵雷达 T/R 组件散热问题,以阵面温度和温度分布标准差  $\sigma$  (温度分布一致性) 为主要指标,对于液冷冷板流道设计进行了仿真研究。设计了一种具有流道散热能力互为补充特点的反向并行流道冷板,并将其与 S 型、分支型流道冷板进行了散热效能仿真对比。仿真结果表明:反向并行流道冷板具有良好的散热效能和最佳的阵面温度分布一致性,为相控阵雷达阵面液冷冷板的均温性设计提供了参考。

### 参考文献

- [1] 唐怀民,魏飞鸣,宋柯.相控阵雷达导引头技术发展现状分析[J].制导与引信,2014,35(3):6-10.
- [2] 李秋生.相控阵雷达导引头总体技术研究[J].武器装备自动化,2007,26(1):3-4.
- [3] 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.
- [4] 金旸霖.一种新型的液冷机箱及冷板散热系统研究[J].电子技术与软件工程,2016(8):111-114.
- [5] 陆冬平,慎利峰,马磊.一种弓状 S 型流道冷板设

计与热仿真分析[J].中国电子科学研究院学报,2018,5(13):562-569.

- [6] 彭思平,顾网平,王燕玲,等.相变技术在 T/R 组件温控中的应用[J].制导与引信,2017,38(2):51-55.
- [7] 吕云,赵勇.基于 CFD 的液冷板参数优化与性能预测[J].科技传播,2018(5):144-146.
- [8] 林名润,翟玮昊,王江,等.高功率雷达冷板的流动性及散热性研究[J].机械设计与制造,2017(11):231-233.
- [9] 谭慧,陈加进,吴龙文,等.多热源相控阵天线微通道冷板拓扑结构设计[J].电子科技大学学报,2019,48(1):150-155.
- [10] 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.
- [11] 刘兵.Icepak 软件在电子设备热设计中的应用[J].电脑知识与技术,2013,9(5):1151-1154.
- [12] 杨雄鹏,张磊,曹伦,等.IGBT 用水冷板式散热器的数值模拟[J].电子机械工程,2014,30(2):43-45.
- [13] 李健,赵如意,张恒,等.某高效散热冷板的结构设计及优化[J].机械设计与制造,2018(1):55-57.

(上接第 6 页)

发子阵数增加或者脉宽增加时,时域匹配滤波需要的乘法器数量成倍增加,而频域匹配滤波法乘法器增加不多,有利于工程实现。

## 4 结束语

本文结合 MIMO 雷达导引头应用特点,分析了 OFDM-LFM 波形的自相关和互相关特性,设计了基于子阵的 OFDM-LFM 波形,给出了基于 DDS 芯片产生多路正交信号的方法。针对 OFDM-LFM 波形匹配接收问题,采用基于 FPGA 的工程实现方法,分析了时、频域正交信号匹配接收的算法结构和运算量,给出了不同子阵数、脉宽、采样率及 FFT 点数的使用资源对比。当信号脉宽比较小,匹配滤波器阶数不高时,采用时域匹配滤波法,工程实现简单;当收发子阵数增加或者脉宽增加时,采用频域匹配滤波法,节省资源。

### 参考文献

- [1] LI J, STOICA P. MIMO radar signal processing [M]. 北京:国防工业出版社,2013:1-3.
- [2] 何子述,韩春林,刘波.MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J].电子学报,2005,33(12A):2441-2445.
- [3] 王蓓.MIMO 雷达正交波形设计[D].西安:西安电子科技大学,2012:21-32.
- [4] 刘波,何子述,王海江.MIMO 雷达中的 DFCW 设计及性能分析[J].电子科技大学学报,2010,39(5):688-691.
- [5] 段军棋.正交波形 MIMO 雷达信号设计及处理研究[D].成都:电子科技大学,2009:23-25.
- [6] 刘波.MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究[D].成都:电子科技大学,2008:20-25.
- [7] 王静,邹小东,郑巧珍,黄飞.MIMO 雷达 OFDM-LFM 信号匹配滤波设计与实现[J].制导与引信,2018,39(2):9-12.