DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2023.01.007

某车载毫米波雷达组件热设计与参数优化

杨洪伦^{1,2},彭 伟²,洪大良²,程仕祥²,周 围²

(1. 深空探测实验室,安徽 合肥 230088; 2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽 合肥 230088)

摘 要:为实现毫米波雷达组件高效可靠的散热,根据前端电讯热控需求,文中提出均温板-翅片一体化风冷热控 结构设计方案,并采用仿真设计软件对热设计方案进行了分析和仿真优化。研究结果显示:组件各芯片温度均在 安全温度以下,发射芯片的最高结温(最高温度)为141.1°C,与传统风冷散热器相比,采用新型风冷散热器可使 芯片最高温度降低9.8°C,强化散热效果明显。此外,也对风冷散热器结构参数和界面接触热阻进行了分析,确 定均温板翅片高度30 mm、翅片间距3 mm为该热设计的优选方案。该研究结果可供高效风冷散热和毫米波组 件热设计工程应用参考。

关键词:毫米波雷达;风冷散热器;均温板;热设计

中图分类号:TK124 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2023)01-0040-04

Thermal Design and Parameter Optimization of a Vehicle-borne Millimeter-wave Radar Module

YANG Honglun^{1,2}, PENG Wei², HONG Daliang², CHENG Shixiang², ZHOU Wei²

(1. Deep Space Exploration, Hefei 230088, China;

2. The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: For efficient and reliable heat dissipation of millimeter-wave radar modules, according to the thermal control requirements of radar module, the integrated thermal control structure design of the uniform temperature plate and air-cooled heat sink is proposed. The thermal design software is employed to analyze and optimize the thermal design structure of the radar module. The research results show that the temperatures of the module chips are below the safe temperature and the maximum junction temperature of the emitter chip (the maximum temperature) is 141.1 °C. Compared with the traditional air-cooled heat sink, the novel integrated air-cooled heat sink can reduce the maximum temperature of the chip by 9.8 °C. In addition, the structural parameters and interface contact thermal resistance of the air-cooled heat sink are analyzed. It is determined that the optimal thermal design scheme is 30 mm fin height of uniform temperature plate and 3 mm fin spacing. This research results provide a reference for engineering application of high efficiency air-cooled heat dissipation and millimeter-wave module thermal design.

Key words: millimeter-wave radar; air-cooled heat sink; uniform temperature plate; thermal design

引 言

毫米波雷达具有波束窄、分辨力高、抗干扰能力 强、大气衰减和损耗低等优势,相对于传统微波雷达, 具有体积小、集成度高、重量轻等特点,对提高雷达的 机动性与隐蔽性具有重要意义,因此毫米波雷达有望 引领新一代轻量高机动性雷达技术的发展^[1-2]。随着 高性能高功率芯片的使用以及雷达组件集成度的提 高,芯片等功率器件产生的大量热量在狭小空间难以 高效散失,威胁到雷达组件的安全运行和可靠性,因此 雷达设备的热管理系统成为提高雷达威力的瓶颈之 —^[3-5]。

针对雷达组件的散热需求,研究人员提出了一系 列有效的解决方案。对于空间尺寸较为宽裕、热流密 度较低的场合,文献[6]提出了一种自然散热、均温板 散热和外部强制风冷散热的组合散热方案。文献[3] 对机载毫米波雷达天线进行热设计,提出了热管与强 迫风冷相结合的冷却散热方案。其仿真计算结果表 明,新型冷却方式合理可行,可为同类产品热设计提供 重要参考。文献[7]针对局部热流密度较大的应用场

^{*} 收稿日期:2022-02-22

合,采用金刚石/铜进行芯片热扩展并采用多级翅片和 插式辅助翅片相结合的液冷冷板结构,可满足紧凑高 效的散热需求。文献[8]研究了3种不同构型的微通 道冷板的散热特性,分析了不同热流密度、流量和翅片 参数等对换热系数和换热效率的影响。

本文的某装甲车毫米波雷达整体热耗小,但热耗 分布不均匀,热源较为集中。常规铝合金风冷散热器 热设计方案难以实现高效散热,且无法保证芯片热设 计的温度均匀性。同时,由于组件数量少,总发热量较 小,所以采用液冷热设计会导致液冷机组和管网等附 属设备过多。本文针对雷达组件热耗分布特征,综合 比较各方案,提出了均温板-翅片一体化风冷散热方 案,利用均温板的高效传热特性,使翅片基板温度更均 匀,以提高翅片的散热效率,实现组件高效散热。文中 首先对组件进行热仿真,确定满足散热需求的风量,再 根据风压确定风机类型和数量,最后对散热结构进行 优化设计,并对不同热设计方案进行对比分析。

1 问题描述

如图1所示, 雷达组件的外形包络尺寸为 280 mm(长)×200 mm(宽)×115 m(厚)。壳体 的中间隔板将雷达分为2个区域:一层为雷达发射、接 收的有源阵面, 另一层为低功率射频组件、数字板、电 源等器件。有源发射阵面为组件主要热源, 包含64块 发射芯片、64块接收芯片、8个末级波控和8个功分驱 动芯片。内部功率器件热设计输入条件和规格尺寸见 表1, 组件内部的总热耗为424 W。文中针对上述热源 分布特征和应用场景需求, 对组件中的功率器件进行 了风冷散热设计。有源阵面与风冷散热器直接贴合进 行散热。低功率射频组件、数字板、电源等其他有源器 件直接与组件壳体的中间隔板接触, 在与风道相通的 一侧隔板上设计有翅片, 用于强化器件散热。





组件热设计需要满足在50°C高温环境下满负载 工作时,有源阵面芯片结温不超过145°C,各类功率器 件外壳温度不超过85°C。考虑到因车载系统的负载 限制,组件无法采用液冷方式散热,再结合实际使用条 件、系统复杂程度以及成本,确定采用风冷技术进行组 件热设计。

表 1 内部功率器件热设计输入条件				
器件名称	热耗/ W	数量/ 个	热流密度/ (W·cm ⁻²)	总热耗/ W
发射芯片 接收芯片 末级波控 功分驱动芯片 电源 数字板 低功家射频组件	$3.8 \\ 0.8 \\ 2.0 \\ 2.7 \\ 26.0 \\ 42.0 \\ 24.0 $	$ \begin{array}{r} 64 \\ 64 \\ 8 \\ 8 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} $	4.75 1.00 2.00 2.70 	$243.2 \\51.2 \\16.0 \\21.6 \\26.0 \\42.0 \\24.0$

2 热仿真分析

2.1 热设计

阵面的热量较为集中,且分布不均匀,传统铝合金 风冷翅片基板难以使芯片热量有效扩散。因此本文 结合均温板、相变冷却、翅片风冷等散热技术,利用一 体化热力学设计方法和先进的加工工艺,进行了均温 板--翅片一体化风冷散热器结构设计。组件热设计的 具体实现途径如下:1)通过螺钉将功率器件与风冷翅 片基板集成压紧,并采用导热衬垫降低器件与翅片底 板之间的接触热阻。2)针对阵面热源分布情况,采用 均温板-翅片一体化风冷散热器结构,将风冷散热器的 翅片与均温板集成为一体。翅片和均温板一体成型, 消除了界面热阻,保证均温板的冷凝面热量可靠高效 地通过风冷翅片散失,解决了翅片和均温板独立加工 后再焊接在一起的可靠性问题,提高了传热效率,降低 了器件的工作温度。3)对于数字板、电源和射频组件 等功率设备,将散热翅片与壳体一体加工,消除了界面 热阻,提高了这些功率器件的散热效率。

为了提升雷达组件在高温工况下的散热性能,通 过大量仿真优化,确定风冷翅片结构,并分别在壳体内 部设置高9 mm、厚1 mm、间距为3 mm的翅片,用于强 化数字板、电源和射频组件的散热。散热翅片与壳体 为一体加工,消除了界面热阻。同时在有源阵面侧采 用高30 mm、厚1 mm、间距为3 mm的均温板-翅片一 体化风冷翅片散热器。选用4台Ebmpapst 424J/2HP 风机,其尺寸为40 mm × 40 mm × 28 mm。在有源 阵面与散热翅片基板之间以及数字板的芯片与壳体 之间采用导热衬垫降低接触热阻。该衬垫的厚度为 0.5 mm,热导率为 5 W/(m·K)。为分析优化后组件 的散热效果,采用最不利于散热的极限工况进行计算, 风机的进口温度为50°C,壳体采用6063铝合金材料。 根据微波组件提供的数据,设置芯片结至芯片外壳(与 翅片基板接触的芯片外壳处)的热阻值为18°C/W。

2.2 仿真模型

根据软件建模、流体仿真与热仿真的特点和要求, 建模过程中对对组件散热影响不大的细节进行了适当 的简化,主要是忽略了所有与组件传热关系不大的局 部部件(螺钉孔、倒角、圆角等)、辐射换热因素影响以 及组件与环境之间的自然对流换热。

2.3 仿真结果与分析

图2为采用传统铝合金风冷散热器的有源阵面温 度分布图。由仿真结果可知,阵面发射芯片温度明显 高于接收芯片温度,芯片最高温度为150.8°C,超过了 芯片安全运行温度,出现在发射芯片的中心位置,阵面 中心的芯片温度明显高于阵面边缘的芯片温度。出现 上述现象的原因主要是传统铝合金翅片热导率较低, 无法快速有效地将芯片热量扩散掉,翅片基板温度均 匀性较差,温差大,局部的翅片散热效率低,导致中心 热量集中,温度升高。



图 2 传统铝合金风冷散热器的有源阵面 芯片及翅片基板温度分布

基于上述问题,本文提出了采用均温板-翅片一体 化风冷散热器。散热器基板为均温板,可以使热量在 平面上得到有效扩散,使得整个基板的温度较均匀,从 而提高风冷翅片的整体散热效率。如图3所示,芯片 的最高温度为141.1°C,低于芯片工作的安全温度,与 铝合金风冷散热器相比,降低了9.8°C。同时发射和 接收芯片的温度均匀性也比铝合金翅片的好。与铝合 金翅片不同的是,该芯片的最高温度出现在阵面的最 右侧。这主要是因为均温当量热导率较高,均温板热 量主要是从有芯片侧向无芯片侧传递的,右侧传热路 径较长,导致温升较高。



图 3 均温板-翅片一体化风冷散热器的 有源阵面芯片及均温板温度分布

如图4所示,电源及射频单元的外壳最高温度分别 为62.1°C和62.7°C。对数字板上热流密度高的2块 芯片进行仿真分析,其温度分别为70.3°C和74.5°C。 上述元器件的温度均在安全运行温度以下。此时风机 空气的入口温度为50°C,出口平均温度为62.8°C,平 均温升为12.8°C,风道中最大压力损失为254.2 Pa,风 道中最大流速为13.7 m/s。



图 4 数字板、电源和综合射频单元温度分布

3 参数优化与分析

对影响组件热设计的参数进行优化和分析,以获 得组件的最优结构配置,提高组件热设计的效率和可 靠性。

3.1 结构优化

组件的热设计结构尺寸主要有翅片高度、翅片厚 度间隙比等参数。根据上述仿真结果,阵面芯片结温 和数字板芯片最高壳温为重点关注对象,因此结构优 化主要采用芯片温度作为表征指标,研究结构设计对 芯片温度的影响。

根据组件总体结构设计,均温板翅片和壳体翅片 总高度为39 mm,因此分别对均温板翅片和壳体翅片 高度进行了参数分析,如图5所示。



图 5 均温板翅片和壳体翅片高度对芯片温度的影响

由图5可知:随着均温板翅片高度的增加,阵面芯片的温度首先快速下降,然后趋于平缓,当翅片高度为 30 mm时,阵面芯片的最高结温为141.1°C;均温板翅 片的增加对应壳体翅片的减少,随着均温板翅片高度 的增加,数字板芯片温度首先略有下降,然后快速上 升,当均温板翅片高度为10 mm时,数字板芯片外壳温 度最低为70.9°C。由此可知,均温板翅片和壳体翅片 都有一个最优散热能力高度。这主要是因为当翅片高 度超过最优值时,更高的翅片受另一侧空气温度的影 响,从而加热翅片,使得芯片温度升高。

本文将翅片厚度设置为1 mm,通过改变翅片间隙 来研究翅片厚度间隙比对均温板风冷散热器性能的影 响。翅片间隙对芯片温度、风量和风压的影响分别如 图6和图7所示。

由图6可知,随着翅片间隙的增加,阵面芯片和数 字板芯片的温度均先快速下降至最低值,然后缓慢上



图 7 翅片间隙对风量和风压的影响

升。这主要与风冷散热面积和风量有关。由图7可知: 当翅片间隙为1 mm时,虽然翅片换热面积较大,但风 道间隙小,流动阻力较大,风机的风量仅为29.9 m³/h, 风道中温升较大,导致芯片温度较高。随着翅片间隙 的增加,风道流动阻力显著下降,风量明显增加,芯片 温度快速下降。当翅片间隙超过最低温度临界值时, 温度再次上升。这主要是因为翅片的换热面积是限制 风冷散热器散热效率的主要因素,风量增加带来的散 热效率提升弱于散热面积减少带来的影响。当翅片间 隙在2.5~3.5 mm时,芯片温度最低且变化最为平缓, 因此选择3 mm翅片间隙作为热设计的优选方案。

3.2 接触界面优化

本文采用均温板-翅片一体化风冷散热器,消除 了均温板与风冷散热器之间的接触热阻,但有源阵面 芯片与均温板之间仍然存在接触界面,而界面热阻是 影响芯片温度的重要因素。本文在芯片和均温板之 间采用导热衬垫降低接触热阻。假设压缩后的衬垫 厚0.35 mm,忽略压紧力和衬垫材料对接触热阻的影 响,通过改变导热衬垫的热导率,分析界面热阻对组 件热设计性能的影响。分别对导热衬垫热导率为 3 W/(m·K),5 W/(m·K),7 W/(m·K),10 W/(m·K) 和15 W/(m·K)时的散热性能进行仿真分析,结果如 图8所示。仿真结果表明:随着导热衬垫热导率的增 加,有源阵面芯片的最高温度先明显下降,然后逐渐趋 于平缓;当导热衬垫热导率小于5 W/(m·K)时,增加 热导率是提高组件热设计性能的有效手段,可提高设 备工作的安全性和可靠性。

图 8 导热衬垫热导率对芯片温度的影响

4 结束语

针对毫米波雷达组件的热控需求,本文提出均温 板-翅片一体化风冷散热器的热控结构设计,并对热设 计方案进行了评估和仿真优化。研究结果如下:1)得 益于均温板高效的传热性能,均温板-翅片一体化风冷 散热器可使芯片最高温度降低9.8°C,强化散热效果 明显,同时可以显著提高芯片的温度均匀性,保证了雷 达的电讯指标。2)多热源风冷散热器的翅片高度等结 构参数存在最优设计值,对多热源风冷散热需要综合 考虑不同器件的散热需求,实现最优设计。

该毫米波雷达组件的热设计研究,可以在风冷方 案选择、结构设计和参数优化等方面为高效风冷散热 和毫米波组件热设计工程应用提供参考。目前,均温 板传热机理和变工况运行性能仍未完全明确,还需进 一步探究均温板在交变温度场、瞬变热负荷和不同布 置方式等复杂工况下的适应性和传热特性。

参考文献

- [1] 李科选, 王美焰, 李畅. 某毫米波雷达天线系统结构设计 与分析[J]. 机械与电子, 2019, 37(3): 43-46.
- [2] 李骏, 王健安, 赖凡. 毫米波片上雷达技术研究进展 [J].
 微电子学, 2019, 49(4): 545-549.
- [3] 魏涛, 钱吉裕, 孔祥举. 某机载毫米波雷达天线仿真热设 计[J]. 电子机械工程, 2014, 30(3): 16-18.
- [4] 任恒. 某相控阵雷达天线阵面热设计及流量分配研究[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 80-84
- [5] 任恒, 刘万钧, 洪大良, 等. 某相控阵雷达T/R组件热设计 研究[J]. 火控雷达技术, 2015, 44(4): 60-64.
- [6] 章玮玮, 张根烜, 叶锐, 等. 某光控相控阵雷达组件热设计 与参数优化[J]. 机械与电子, 2019, 37(6): 22-27.
- [7] 田野, 刘剑超, 朱学凯. 某密闭机箱结构设计与热仿真分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 204-207.
- [8] 任恒,房景仕,张根烜. 微通道液冷冷板散热特性研究[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(3): 343–348.

杨洪伦 男,1995年生,博士,主要从事电子设备 热设计工作。