

雷达功能模块液冷散热技术分析

曾敬 林志旭

四川九州电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

摘要: 本文全面分析了雷达功能模块中的热源分布及散热需求,特别是对T/R组件等高功耗部件的热流密度进行了详细评估。基于这些分析,探讨液冷散热技术在雷达功能模块中的重要意义及其工作原理和分类;系统介绍了雷达功能模块液冷散热系统的总体设计思路,包括冷却介质的选择、流道结构的优化设计以及散热装置与热管的精细选型。通过这些措施,确保雷达系统在高功率工作状态下的稳定运行和高效散热。

关键词: 雷达功能;液冷散热技术;原理

1 雷达功能模块热源分析

1.1 雷达功能模块结构概述

雷达功能模块作为雷达系统的核心部分,集成了信号处理、波形生成、功率放大、天线控制及收发转换等多项关键技术。其基本组成包括天线阵列、T/R (Transmitter/Receiver, 发射/接收) 组件、信号处理模块、电源管理系统以及控制系统等。在这些组成部分中,T/R组件扮演着尤为关键的角色。T/R组件是雷达系统中负责信号发射与接收的核心单元,它集成了功率放大器、低噪声放大器、收发开关以及天线接口等元件。在高精度探测场景下,T/R组件需要迅速且准确地切换工作状态,以实现微弱回波信号的接收和对远距离目标的发射探测。同时,在高功率发射时,T/R组件中的功率放大器会产生大量的热量,若不能及时散发,将严重影响雷达系统的稳定性和探测性能。因此,T/R组件不仅是雷达功能模块的关键组成,也是热耗最为集中的部件之一。

1.2 热源分布与热流密度计算

雷达功能模块的热源分布主要集中在T/R组件及与之紧密相连的功率放大器等元件上。这些元件在高强度工作时,会产生大量的热量,并通过热传导、热对流和热辐射等方式向周围环境散失。为了准确评估雷达功能模块的散热需求,有必要对其热源分布和热流密度进行量化分析。根据实验数据和仿真模拟结果,典型T/R组件在高功率发射状态下的热耗率可达到数十瓦甚至上百瓦每组件。假设雷达系统配备有64个T/R组件,且所有组件均同时工作于高功率模式,则总热耗可达数千瓦量级^[1]。进一步,考虑到T/R组件内部结构紧凑、元件密集,其热流密度通常较高,局部区域甚至可超过100W/cm²。为了更具体地说明,我们可以假设某型号雷达的T/R组件在高精度探测模式下,平均热耗为50W/组件,且热流主要集中在组件的功率放大器部分。若采用有限元分析方法

(FEM)对T/R组件进行热仿真,并结合实验数据进行校正,可得到更精确的热流密度分布图。该图将直观展示T/R组件内部各区域的热流密度差异,为后续的液冷散热设计提供重要参考。雷达功能模块的热源主要集中在T/R组件等关键元件上,其高热流密度特性对散热设计提出了严峻挑战。因此,在液冷散热系统的设计中,必须充分考虑热源分布和热流密度的实际情况,以确保雷达功能模块的稳定运行和高效散热。

2 液冷散热技术及其在雷达功能模块中的应用意义

液冷散热技术是一种高效、可靠的散热解决方案,它通过利用液体的高比热容和优异的导热性能,将电子设备内部产生的热量迅速带走并散发到周围环境中。在雷达功能模块中,液冷散热技术的应用具有极其重要的意义。雷达功能模块,尤其是其核心部件T/R组件,在高精度探测和高功率发射时会产生大量热量。如果不能及时有效地将这些热量散发出去,将会导致组件温度升高,进而影响雷达系统的整体性能和稳定性,甚至可能引发设备故障。液冷散热技术正是针对这一难题而设计的。通过液冷散热系统,冷却液在泵的作用下循环流动,流经雷达功能模块内部的散热管道,与发热元件进行热交换,将热量带走。这种散热方式不仅散热效率高,而且能够保持雷达功能模块内部温度分布均匀,避免局部过热现象的发生;液冷散热系统还具有噪音低、维护方便等优点,能够显著提升雷达系统的整体性能和可靠性^[2]。因此,液冷散热技术在雷达功能模块中的应用,对于保障雷达系统的稳定运行、提高探测精度和延长设备寿命具有重要意义。随着雷达技术的不断发展,液冷散热技术也将继续优化和完善,为雷达系统提供更加高效、可靠的散热解决方案。

3 雷达功能模块液冷散热技术原理及分类

3.1 液冷散热技术原理

液冷散热技术是一种利用液体的高效热传导和对流特性来实现热量传递与散失的先进散热技术。其基本原理在于,当雷达功能模块等电子设备在高功率运行下产生大量热量时,这些热量首先通过热传导方式传递给与之紧密接触的冷却液。在泵的驱动下,冷却液在封闭的系统中循环流动,将吸收的热量带至散热器或热交换器中。在散热器中,冷却液通过增大与空气的接触面积,利用对流和辐射的方式将热量散发到周围环境中,从而实现热量的有效转移和散热的目的。这一过程中,冷却液充当了热量传递的媒介,有效地降低雷达功能模块内部的温度,保障设备的稳定运行。

3.2 液冷散热技术分类

液冷散热技术根据其使用的冷却介质不同,可以大致分为水冷、油冷和制冷剂制冷三大类。(1)水冷散热技术:是最常见的一种液冷散热方式,它使用水或水基混合液作为冷却介质。水具有较高的比热容和良好的导热性能,能够有效地吸收和传递热量。同时,水资源的丰富性和易得性也使得水冷散热技术具有较低的成本优势;水也存在导电性和腐蚀性等问题,因此在应用中需要采取适当的防腐和绝缘措施。(2)油冷散热技术:使用非导电的矿物油或合成油作为冷却介质。油冷散热技术具有较高的热容量和稳定性,能够在高温、高压等恶劣环境下保持良好的散热性能;油冷系统还具有较好的减震降噪效果。(3)制冷剂制冷技术:则采用低沸点的制冷剂(如氟利昂、氨等)作为冷却介质。制冷剂在蒸发过程中吸收大量热量,从而降低被冷却对象的温度。制冷剂制冷技术具有极高的散热效率和温控精度,特别适用于对散热要求极高的应用场景;由于制冷剂的特殊性质和潜在的环境污染问题,制冷剂制冷技术在使用和维护上需要更加严格的控制和管理。

对比分析各种液冷散热技术的优缺点,可以看到:水冷散热技术以其成本低、散热效果好、应用广泛等优点成为主流选择;油冷散热技术则在特定高温、高压环境下表现出色;而制冷剂制冷技术则以其超高的散热效率和温控精度在特定领域占据一席之地。在实际应用中,应根据雷达功能模块的具体需求和工作环境选择最合适的液冷散热技术^[3]。

4 雷达功能模块液冷散热系统设计

4.1 系统总体设计

在雷达功能模块液冷散热系统的总体设计中,秉持着高效、可靠与经济适用的原则,精心策划了全方位的散热解决方案。这一方案的核心在于冷却介质的慎重挑选、流道结构的深度优化以及散热装置的周密布局。针

对冷却介质的选择,进行了广泛而深入的分析,综合考虑了介质的物理特性、散热效率、与雷达功能模块内部材料的兼容性,以及长期维护的便捷性;选定一种特定的高性能冷却液,其拥有出色的比热容和导热性能,能够快速吸收并传导雷达模块产生的热量,同时保持与内部材料的稳定共存,为系统的长期稳定运行提供了坚实的保障。借鉴了先进的流体动力学理论,结合精确的数值模拟和仿真技术,设计出一套低阻高效的流道结构。该结构不仅确保冷却液能够顺畅地流经雷达功能模块的所有发热热点,实现热量的全面捕捉,还通过优化流道布局,降低流动过程中的阻力,提升了整体的热交换效率。紧密结合雷达功能模块的实际热源分布情况,通过精确计算和模拟,合理确定了散热器的安装位置和数量。这样的布局确保热量能够迅速、均匀地散发到周围环境中,有效降低模块内部的温度梯度,提升散热效果;还特别考虑散热装置的易维护性,采用模块化设计思路,使得在需要时能够便捷地进行检修和更换,降低了系统的维护成本和时间。

4.2 冷却介质选择

在雷达功能模块液冷散热系统的设计中,冷却介质的选择是一个关键步骤,它不仅直接影响到散热效果,还关系到系统的稳定性和维护成本。不同冷却介质具有各自的物理性质和散热性能,因此需要进行全面的分析以做出合适的选择。第一,要考虑冷却介质的物理性质,如比热容、热导率、密度、粘度等。比热容是衡量物质吸热能力的指标,高比热容的冷却介质能够吸收更多的热量,从而更有效地降低雷达功能模块的温度。热导率则反映物质内部热量传递的效率,高热导率的冷却介质能更迅速地将热量从发热元件传导至散热器;冷却介质的密度和粘度也会影响到其在管道中的流动性能,低粘度、高密度的介质流动更加顺畅,有助于减少流动阻力和泵送功耗^[4]。第二,评估不同冷却介质的散热性能。这通常通过实验测试和数值模拟来进行,以了解在特定工况下各种介质的散热效果。实验测试可以提供真实环境下的数据支持,而数值模拟则可以预测不同条件下的散热性能变化趋势。通过对比分析,可以选出散热性能优越且适合雷达功能模块工作环境的冷却介质。第三,冷却介质的相容度和可维护性也是选择过程中需要考虑的重要因素。相容度指的是冷却介质与雷达功能模块内部材料之间的化学和物理兼容性。如果冷却介质与材料发生反应或腐蚀,将会导致设备性能下降甚至损坏。因此,在选择冷却介质时,必须进行严格的相容性测试;可维护性也是不容忽视的方面。具有良好可维护

性的冷却介质能够降低系统的维护成本和难度，提高系统的整体可靠性。

4.3 流道设计与优化

一个精心设计的流道结构不仅能够提升散热效率，还能减少流动阻力，降低泵送功耗，从而延长系统的使用寿命。根据雷达功能模块的热源分布和散热需求，初步规划流道的基本布局。这一步骤需要综合考虑发热元件的位置、形状以及热量产生的强度，确保冷却介质能够直接、有效地接触到这些热源；还需要考虑流道的入口和出口位置，以及冷却介质的流动方向，以确保整个系统内的温度分布均匀，避免出现局部过热或冷却不足的情况。热设计理论提供了关于热量传递、对流换热等基本原理的指导，而热仿真工具则能够模拟不同流道结构下的热量分布和流动情况。通过仿真分析，可以直观地观察到冷却介质在流道中的流动状态，以及热量从发热元件传递到冷却介质的过程。基于这些仿真结果，可以对流道结构进行迭代优化，调整流道的尺寸、形状和布局，以减少流动阻力、提高热交换效率。关注以下几个方面：一是流道的截面形状和尺寸，它们直接影响到冷却介质的流速和流量分布；二是流道的弯曲程度和分支情况，过多的弯曲和分支会增加流动阻力，降低散热效率；三是流道与发热元件的接触面积和方式，良好的接触能够确保热量迅速、有效地传递到冷却介质中。

4.4 散热装置与热管选择

在雷达功能模块液冷散热系统设计中，散热装置与热管的选择同样扮演着至关重要的角色。为了有效应对雷达功能模块在高负载工况下产生的大量热量，我们需要对散热装置与热管进行深入分析和精细选择。（1）散热装置的选择：散热装置作为冷却介质与外界环境之间热量交换的关键部件，其性能直接决定了热量散失的效率和速度。针对雷达功能模块的特殊需求，我们优先考虑具有高导热系数、大面积热交换能力及良好空气动力性能的散热装置。常见的选择包括高效能鳍片散热器、冷板以及微通道散热器等。高效能鳍片散热器通过增加热交换面积来提升散热效果，适合应用于对散热需求较为均匀的场景；而冷板则适用于与雷达功能模块直接接

触，利用大面积均温能力将热量迅速传递到外部散热系统中；微通道散热器则凭借其紧凑的结构和卓越的换热性能，在高热流密度环境中表现出色。根据散热装置的安装位置、尺寸限制及热辐射方向等因素进行综合考虑，确保其与雷达功能模块的匹配度和兼容性。（2）热管的选择：热管作为一种高效的传热元件，通过其内部的蒸发-冷凝循环机制实现热量的快速传递和散失。在雷达功能模块液冷散热系统中，热管常被用作将局部高温热源的热量迅速传输至远程散热器或冷源，以实现热量在系统中的有效分配与转移。在选择热管时，我们关注其材料性能、传热能力、工作环境适应性以及耐用性等因素。首先，热管的工作介质应具有良好的热稳定性、相变性能和低的饱和蒸气压，以确保在不同温度下都能高效运行；其次，热管的几何形状和尺寸应根据实际应用场景进行优化设计，以匹配热源的形状和尺寸，减小热阻并提高传热效率；考虑到雷达工作环境可能涉及震动、冲击等因素，还需选择结构强度较高、抗震性能好的热管，以保证系统的稳定运行。

结束语

通过对雷达功能模块液冷散热技术的深入研究，不仅提高了对散热机制的理解和把握，还提出一套科学合理的液冷散热系统设计方案。这些努力有助于进一步提升雷达系统的探测性能和运行稳定性，为其在复杂多变环境下的可靠应用提供坚实保障。随着科技的不断进步，雷达功能模块液冷散热技术将继续创新发展，为实现更高性能的雷达系统奠定坚实基础。

参考文献

- [1]宋之玉.陆军战术雷达对抗技术研究[J].航天电子对抗,2020,36(1):39-45.
- [2]张伟.李娜.数据中心雷达服务器液冷散热技术综述[J].信息技术与网络安全,2022,41(6):1-6
- [3]刘晓燕.王晓明.浸没式液冷技术在数据中心雷达服务器中的应用研究[J].制冷与空调,2021,21(10):74-78.
- [4]陈浩.刘涛.相控阵雷达液冷散热系统设计与性能分析[J].雷达与对抗,2023,33(1):45-50.