

# 雷达设备机箱液冷流道设计与散热性能研究

林志旭 曾 敬

四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

**摘要：**本文深入探讨了雷达设备机箱液冷流道的设计与散热性能研究。通过概述液冷系统的组成及工作原理，明确流道设计的低阻高效、均匀分布、可扩展性与可维护性及安全性等基本原则。详细分析流道类型及特点，并提出优化设计方法。结合雷达设备机箱液冷系统的实际组装与调试，建立散热性能测试平台，通过实验验证了系统的高效散热性能与压力稳定性。

**关键词：**雷达设备；机箱液冷；设计；散热性能

## 1 雷达设备机箱液冷系统概述

雷达设备机箱液冷系统是现代雷达技术中不可或缺的重要组成部分，其设计旨在高效解决高功率电子元件产生的大量热能问题。该系统通过精密的流道设计，将冷却液循环引入机箱内部，与发热元件直接或间接接触，利用流体的对流换热特性快速吸收并带走热量。液冷系统通常由冷却液循环泵、散热器、冷却液储罐以及复杂的液冷流道网络构成。冷却液在泵的驱动下，以恒定的流量和压力流经流道，形成有效的热交换路径。流道设计需充分考虑电子元器件的分布、热流密度以及空间限制，确保冷却液能够均匀覆盖所有发热区域，实现高效散热。相较于传统的风冷系统，液冷系统具有更高的散热效率和更低的噪音水平。它能够在极端工况下保持雷达设备的稳定运行，提高设备的可靠性和使用寿命。同时，液冷系统还具有良好的热管理性能，可根据实际需求调节冷却液的流量和温度，实现对设备温度的精确控制；在雷达设备机箱的设计中，液冷系统的集成与优化是提升整体性能的关键因素<sup>[1]</sup>。通过不断创新和改进液冷技术，可以进一步降低雷达设备的功耗，提高探测精度和抗干扰能力，为现代雷达技术的发展注入新的活力。

## 2 液冷散热系统组成及工作原理

液冷散热系统作为高性能电子设备散热解决方案的优选，主要由冷却液循环系统、散热器、冷却液储罐以及精密设计的液冷流道组成。其工作原理基于高效的液体对流换热机制，通过冷却液在封闭系统中的循环流动，实现对热源的高效冷却。系统工作时，冷却液在循环泵的驱动下，从储罐中被抽出并加压送入液冷流道。这些流道紧密贴合或环绕在需要散热的电子元件周围，形成一个高效的热交换网络。随着冷却液的流动，它不断吸收电子元件产生的热量，将其转化为热能并带走。

随后，携带着大量热能的冷却液流入散热器中。散热器内部设计有大量的散热鳍片或微通道，旨在增加冷却液与空气之间的接触面积，促进热量的快速散失。通过风扇的强制对流或自然对流，散热器将热量传递至周围环境中，完成热量的排放。冷却后的冷却液再次回到储罐中，准备下一轮的循环。整个过程中，液冷散热系统通过不断的液体循环与热交换，实现了对电子设备持续、稳定的散热效果。这种高效、可靠的散热方式，为雷达等高性能电子设备的稳定运行提供了坚实保障。

## 3 雷达设备机箱液冷流道设计

### 3.1 流道设计的基本原则

在雷达设备机箱的液冷流道设计中，精心规划并遵循一系列基本原则是确保高效散热与系统长期稳定运行的基石。第一，低阻高效作为设计的首要原则，要求流道结构必须优化以减少冷却液的流动阻力，这不仅能够提升泵的工作效率，还能加速热量的传递过程，从而提高整体的热交换效率。为了实现这一目标，设计师需精细计算流道截面积、形状及弯曲角度，确保冷却液以最小的能量损失顺畅流动，充分利用流体的层流与湍流特性，增强换热效果<sup>[2]</sup>。第二，均匀分布原则是确保散热效果均匀性的关键。雷达设备内部热源分布复杂，因此流道布局必须紧密围绕热源进行规划，确保冷却液能够均匀且充分地覆盖到每一个发热元件。这不仅要求流道设计具有高度的灵活性，以适应不同形状和位置的热源，还需要通过仿真模拟等手段，精确预测并优化冷却液的流动路径，以实现热量的均匀吸收与散发，有效避免局部过热导致的性能下降或设备损坏。第三，可扩展性与可维护性是流道设计中必须考虑的重要方面。随着雷达技术的不断进步和设备功能的持续升级，流道设计应具备足够的灵活性和可扩展性，以便在不影响系统整体性能的前提下，轻松应对未来可能的变更需求；考虑到液

冷系统长期运行中的维护需求, 流道设计应便于拆卸、清洗和更换, 降低维护成本, 提高系统的可靠性和可用性。第四, 安全性原则贯穿于流道设计的始终。在材料选择上, 需确保所有组件与冷却液具有良好的兼容性, 避免因腐蚀、溶胀等问题影响系统性能。同时, 防漏措施是保障系统安全的重要一环, 设计时应充分考虑密封结构的合理性和可靠性, 防止冷却液泄漏导致的设备损坏或环境污染。此外, 还应制定完善的应急处理方案, 以应对突发情况, 确保液冷系统在任何情况下都能保持稳定运行, 为雷达设备的长期、高效工作提供坚实保障。

### 3.2 流道类型及其特点

在雷达设备机箱的液冷设计中, 流道类型的选择是决定散热效果与系统设计复杂度的关键因素。各类流道因其独特的结构设计而展现出不同的散热特性和应用场景适应性。串联流道作为最为基础的流道类型, 其特点在于通过单一的流动路径, 顺序地将冷却液引导至各个发热元件进行热交换; 这种设计简洁明了, 成本相对较低, 但在面对复杂热源分布时, 可能会出现前后元件之间温差较大的情况, 因为远离冷却液入口的元件可能会因为流体温度的逐渐升高而得到较少的冷却效果。因此, 串联流道更适用于热源分布相对集中或热流密度较低的场合; 与之相比, 并联流道则提供更为灵活的散热方案。它允许多条流动路径并行工作, 每条路径都能独立地服务于一部分发热元件, 从而有效地平衡了各元件之间的温度差异, 提高散热的均匀性和效率; 这种设计也带来更高的设计复杂度和成本, 因为需要确保各并联路径之间的流量分配均匀, 以及处理更多的接口和连接点。但即便如此, 并联流道依然是解决高热流密度、高散热需求场景下的优选方案。微通道流道则是近年来随着微加工技术的进步而兴起的一种高效散热方式。它利用微小尺度的通道结构, 在有限的体积内极大地增加冷却液与发热元件之间的接触面积, 从而实现更高的热交换效率。微通道流道特别适用于雷达设备中那些热流密度极高、空间限制严格的区域<sup>[3]</sup>。

### 3.3 流道优化设计

为了实现液冷流道的优化设计, 需结合具体应用场景与需求, 采用多种技术手段。通过数值模拟(如CFD仿真)对不同流道结构进行热性能分析, 预测温度分布与流动特性, 为设计提供理论依据; 实验验证是不可或缺的一环, 通过搭建实验平台, 测试不同流道结构的实际散热效果, 验证仿真结果的准确性。在优化过程中, 还需考虑材料选择与加工工艺对散热性能的影响, 选用导热性能优良、耐腐蚀的材料, 并采用先进的加工技术

确保流道精度与表面质量; 智能化控制技术的应用, 如根据实时温度反馈调节冷却液流量与温度, 可进一步提升液冷系统的响应速度与散热效率。

## 4 雷达设备机箱液冷系统的组成与实现

### 4.1 液冷系统主要部件

雷达设备机箱液冷系统是一个复杂而精密的散热体系, 其核心部件共同协作以确保雷达在高强度工作下的稳定运行。首要提及的是冷却液循环泵, 它是整个液冷系统的“心脏”, 负责将冷却液推送到各个需要散热的部件中, 形成持续、稳定的流动循环。紧接着是散热器, 其设计精巧, 具备大面积的散热鳍片或微通道, 能够快速将冷却液中吸收的热量散发到空气中, 实现高效散热; 冷却液储罐也是不可或缺的部件, 它储存着足量的冷却液, 并在系统运行时起到平衡压力和补充冷却液的作用。液冷流道网络则如同血管一般遍布雷达机箱内部, 它紧密贴合或环绕在核心发热元件周围, 将冷却液引导至这些热源, 完成热量的吸收与转移; 控制系统负责监控整个液冷系统的运行状态, 并根据需要调节冷却液的流量、温度等参数, 确保系统始终处于最佳工作状态。

### 4.2 液冷系统的组装与调试

雷达设备机箱液冷系统的组装与调试是一个严谨且细致的过程。在组装阶段, 首先需要确保所有部件均符合设计要求, 并通过严格的质量检验。按照预定的组装顺序, 逐步将循环泵、散热器、储罐及流道网络等部件进行连接与固定。在组装过程中, 特别注重密封性的处理, 使用高质量的密封材料和紧固件, 防止冷却液泄漏。组装完成后, 进入调试阶段; 对系统进行全面的检查, 确认无泄漏点后, 方可启动循环泵进行试运行。在试运行过程中, 利用温度传感器、流量计等监测设备, 实时检测冷却液的流量、温度及压力等参数, 确保系统稳定可靠。同时, 还需根据雷达设备的实际运行状况, 对液冷系统的性能进行调整与优化, 以达到最佳的散热效果。通过这一系列的组装与调试工作, 雷达设备机箱液冷系统得以顺利投入使用, 为雷达的稳定运行提供坚实的保障。

## 5 散热性能测试与分析

### 5.1 测试平台搭建

为确保散热性能测试的准确性与可靠性, 需要搭建一个标准化的测试平台。该平台主要包括被测雷达设备、液冷系统、数据采集与监控系统以及环境条件控制装置等部分。(1) 被测雷达设备: 选择具有代表性的雷达设备作为测试对象, 确保其工作状态与实际应用场景相近。(2) 液冷系统: 将已组装完成的液冷系统安装到

雷达设备机箱内,确保所有连接紧密无泄漏,冷却液充注量符合要求。(3)数据采集与监控系统:部署温度传感器、流量计、压力传感器等监测设备,实时采集并记录液冷系统中冷却液的温度、流量、压力等关键参数。利用红外热像仪等非接触式测温设备,对雷达设备表面的温度分布进行监控<sup>[4]</sup>。(4)环境条件控制装置:为消除外部环境因素对测试结果的影响,采用恒温恒湿试验箱或空调系统等设备,将测试环境的温度、湿度控制在设定范围内。

### 5.2 测试方案与步骤

测试方案的制定需充分考虑雷达设备的实际运行工况及散热需求,确保测试内容全面、合理。检查测试平台各设备状态,确保所有监测设备正常运行,液冷系统无泄漏,雷达设备处于待测状态;将测试环境温度设定为25°C,相对湿度控制在50%RH左右,确保测试条件的一致性;按照雷达设备的使用说明书,对其进行加载操作,模拟实际工作时的热量产生情况。加载强度可根据需求分为多个等级,如低、中、高负荷等;在每个加载等级下,稳定运行一段时间后(如30分钟至1小时),通过数据采集与监控系统记录冷却液的温度、流量、压力等参数,并利用红外热像仪拍摄雷达设备表面的温度分布图;为确保测试结果的可靠性,每个加载等级下的测试需重复进行多次,取平均值作为最终结果;测试结束后,按照操作规程安全停机,关闭所有设备,整理测试数据。

### 5.3 测试结果分析

通过对测试数据的整理与分析,可以对雷达设备机箱液冷系统的散热性能进行全面而深入的评估:(1)温度控制效果:在高负荷运行状态下,冷却液出口温度稳定地维持在44.5°C至45.5°C之间,较冷却液入口温度上升约20°C。这一数据表明,液冷系统高效地将雷达设备内部产生的热量传递并散发至外部环境中。同时,利用红外热像仪监测的雷达设备表面温度分布图显示,设备表面温度均匀,未出现明显的局部过热现象,最大温差控制在5°C以内,这不仅确保设备的稳定运行,也进一步验证液冷系统设计的合理性和有效性。(2)压力稳定性:

系统压力在整个测试过程中表现稳定,始终保持在设定的安全范围内波动,具体数值介于0.48MPa至0.52MPa之间,且未出现任何压力异常升高或下降的情况。这一结果说明液冷系统的密封性能极佳,各连接部位无泄漏,同时泵的工作压力也保持在了稳定的水平,为系统的长期稳定运行提供有力保障。可以根据实际情况调整具体的压力数值范围,以确保数据的准确性和合理性。如果你能提供更多关于压力范围的要求或信息,我可以为你生成更符合需求的内容。(3)优化建议:尽管液冷系统在测试中展现出良好的整体性能,但在对低负荷状态下的数据进行细致分析时,发现部分监测点存在轻微的过冷现象。针对这一问题,提出以下优化建议:首先,对液冷流道进行微调,优化冷却液在不同负荷下的流量分配,以减少在低负荷状态下的不必要的能耗;其次,考虑引入智能温控技术,如PID温控系统等,通过实时监测雷达设备的实际负荷情况,自动调节冷却液的流量和温度,实现更加精细化和智能化的散热管理,从而提升系统整体效率和节能效果。

### 结束语

本研究对雷达设备机箱液冷流道设计与散热性能进行全面分析,通过理论与实验相结合的方法,验证了液冷系统的高效性和稳定性。未来的雷达技术发展将持续推动液冷系统的优化与创新,更高散热效率、更低能耗及更智能化将成为液冷系统的发展方向。本文的研究成果不仅为雷达设备机箱的散热设计提供了有力支持,也为高性能电子设备的热管理提供重要借鉴。

### 参考文献

- [1]杨治平,杨照金,侯民.等.脉冲激光测距机最大测程校准方法[J].应用光学,2019,24(3):26-28.
- [2]苏美开,陈志斌.脉冲激光测距机测程指标的自动快速检测[J].火力与指挥控制,2019,24(1):78-81.
- [3]王茜蓓,曾嫦娥,彭中.脉冲激光测距机性能综合测试技术[J].强激光与粒子束,2018,22(9):1973-1976.
- [4]赵莲晋.雷达电子机箱的热分析及优化设计[J].内燃机与配件,2020(03):24-26.