

高频通信机电设备散热技术优化与实践

金福林 杨 群

武汉烽火信息集成技术有限公司 湖北 武汉 430073

摘 要：高频通信机电设备的散热技术至关重要，本文通过介绍传导、对流、辐射及液冷等主要散热技术，分析了散热对设备性能、可靠性和使用寿命的影响。文中详细阐述了散热材料的优化选择、散热结构的优化设计、智能散热控制系统的构建等策略，并通过某通信基站的散热技术优化实践案例，展示了这些策略在实际应用中的效果，优化后的基站设备在高温时段能稳定运行，通信信号强度和设备可靠性显著提升。

关键词：高频通信；机电设备；散热技术；优化；实践

引言

高频通信机电设备在现代通信网络中扮演着关键角色，但其散热问题一直是影响设备性能和可靠性的重要因素。随着设备功率的不断提升，散热需求也日益增加。本文旨在探讨高频通信机电设备的散热技术优化与实践，通过介绍和分析主要散热技术及其优化策略，为提升设备散热性能提供有益参考。

1 高频通信机电设备散热的重要性

1.1 对设备性能的影响

随着温度的升高，晶体管内部载流子的迁移率增加，电流放大倍数增大，但若温度过高，则可能导致晶格畸变，漏电流显著增大，静态工作点漂移，进而影响电路的稳定性和精度，甚至引发电路振荡，严重影响信号的处理和传输质量。高温环境下集成电路内部的电子迁移现象加剧，金属连线电阻增大，导致信号传输延迟增加，功耗上升，设备整体运行速度和数据处理能力下降，且可能加速芯片老化，缩短使用寿命，而且高温还会促使设备内部电子元件产生更多热噪声，这些噪声叠加在有用信号上，降低信噪比，尤其在高频通信和远距离通信中，热噪声的增加会严重干扰信号传输，导致误码率上升，通信质量大幅下降。若设备散热不良，在卫星通信等场景下，热噪声可能成为通信成败的决定性因素，影响通信的可靠性和稳定性。

1.2 对设备可靠性和使用寿命的影响

在高温条件下，电子元件内部的材料会经历物理和化学变化，高频通信机电设备内部组件密集，热量分布不均导致热应力产生，对设备结构完整性构成威胁。电路板、外壳等部件因受热膨胀程度不同而发生形变，严重时出现开裂、焊点松动等结构性问题，直接影响电气连接和信号传输，甚至引发短路等故障，导致设备损坏或安全事故。在功率较大的高频通信设备中，散热设

计不合理会加剧热应力影响，使电路板等关键部件在持续热应力作用下积累微小裂纹，最终部件失效，设备寿命大幅缩减。所以有效的散热策略对高频通信机电设备至关重要，不仅维持设备高性能运行，还保障设备可靠性和延长使用寿命。采用高性能散热材料、优化散热结构设计、提高散热效率等措施，可有效控制设备内部温度，减缓元件老化，降低热应力负面影响，提升设备稳定性和耐用性，减少故障停机时间，降低维护成本，延长设备生命周期，为通信网络稳定运行和高效传输提供坚实保障^[1]。

1.3 对系统运行稳定性的影响

高频通信机电设备在运行过程中，面临着由环境温度变化和自身发热所带来的温度波动挑战，这对系统运行的稳定性构成了直接威胁。当环境温度快速上升或下降时，电子元件的参数会随之发生迅速变化，而设备的控制系统往往难以及时适应这种动态变化，从而导致系统的工作状态出现异常，影响整体通信质量。若高频通信机电设备的散热系统效率低下，设备温度将持续攀升，进而触发一系列连锁反应，首先高温环境会导致电子元件的性能显著下降，信号处理过程中出现错误的可能性增加，严重影响通信链路的正常工作，为了应对高温环境，设备的控制系统可能会被迫采取降频、限流等保护性措施，虽然这在一定程度上可以减缓设备过热的速度，但也会导致设备的整体性能大幅下降，难以满足高效的通信需求。

2 高频通信机电设备主要散热技术

2.1 传导散热技术

传导散热技术基于材料的导热性能，遵循傅里叶定律，即热量传递速率与温度梯度及材料导热系数成正比。在设备中，高导热材料被用作热传导通道，将电子元件产生的热量高效传递到设备外壳或散热鳍片上，进

而通过自然对流或强制对流与周围空气进行热交换,实现散热。这一技术在功率放大器模块中尤为常见,其中功率晶体管被直接安装于导热性能优异的金属散热器上,迅速导出热量。电路板设计中也融入了传导散热理念,采用多层结构,并在特定层中使用高导热金属材料作为热传导层,确保热量能在电路板上均匀分布并有效传递至散热区域。传导散热技术的优势在于结构简单、可靠性高,且无需附加动力设备,特别适用于低功耗设备或对散热要求不高的局部区域。然而,其散热效率相对较低,尤其是在大功率设备中,仅凭传导散热难以满足快速散热的需求。热传导路径的热阻对散热效果具有显著影响,若热传导材料选择不当或存在接触不良,将严重削弱散热性能。

2.2 对流散热技术

对流散热技术是高频通信机电设备中另一种重要的散热方式,包括自然对流散热和强制对流散热两种形式。自然对流散热依赖于空气密度差产生的自然对流现象,当设备表面温度高于周围空气时,受热膨胀的空气上升,形成对流,带走设备表面的热量。这一过程无需额外动力设备,运行成本低且静音,适用于对噪声敏感且散热需求不高的设备。然而,自然对流散热的效率相对较低,易受环境温度和空气流动条件的影响。相比之下,强制对流散热通过风扇、鼓风机等动力设备强制空气流动,显著提高了散热效率,尤其适用于大功率、发热集中的部件。在通信基站机柜等应用中,强制对流散热通过精心设计的风道,使冷空气均匀流过设备内部发热部件,有效满足大功率设备的散热需求。但强制对流散热需要额外的动力设备,增加了能耗和成本,同时风扇等设备运行时会产生噪声,且存在一定的故障率,对设备的可靠性构成一定影响。

2.3 辐射散热技术

辐射散热技术是一种基于电磁波发射原理的散热方式,它允许物体通过表面向周围环境释放热量。在高频通信机电设备中,辐射散热根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体单位时间内辐射的能量与其表面绝对温度的四次方成正比,所以任何温度高于绝对零度的物体都具备辐射散热的能力。在高频通信设备的实际应用中,为了增强辐射散热效果,通常会在设备外壳表面涂覆具有高发射率的涂层。这些涂层,尤其是黑色或深色表面处理,因其较高的发射率而能有效促进设备内部热量以辐射形式散发至周围环境中。这种做法在卫星通信设备等特殊环境下尤为重要,因为在这些场景中,传导和对流散热可能受到限制,而辐射散热则不受介质限制,能在真空

中有效进行。辐射散热对于那些难以通过传导和对流有效散热的小型发热元件而言,也具有一定的辅助散热作用,但是辐射散热技术散热效率相对较低,特别是在环境温度较高的情况下,散热效果会大打折扣^[2]。

2.4 液冷散热技术

液冷散热技术是一种高效的散热方式,它利用液体作为冷却介质,通过循环流动带走热量。该技术的原理在于液体具有较高的比热容,能够吸收大量热量而自身温度升高较小。在液冷系统中,冷却液被输送到发热部件附近进行热交换,吸收热量后再通过散热器将热量散发出去,冷却后的液体则重新循环至发热部件。由于液冷散热能提供极高的散热效率,它常被应用于大功率高频通信机电设备,如大型数据中心的通信设备和高功率雷达设备等,这些设备在运行时会产生大量热量,传统的风冷散热方式难以满足其散热需求。液冷散热不仅能快速带走大量热量,有效降低设备温度,提高设备的可靠性和性能,还能实现精确的温度控制,满足不同部件对温度的不同要求。但液冷系统也存在缺点,需要专门的冷却液循环装置、管道和散热器等,这增加了设备的体积、重量和成本,而且冷却液存在泄漏风险,一旦发生泄漏,可能会对设备造成严重损坏。

3 散热技术优化策略与实践

3.1 散热材料的优化选择与应用

新型高导热材料如碳纳米管和石墨烯,凭借其远超传统金属的导热性能,成为提升散热效率的关键。碳纳米管被添加到散热膏中,用以填充芯片与散热器间的微小缝隙,显著降低了接触热阻,加速了热量的传导。而石墨烯薄膜则因其超高的导热率,被贴合在发热量大的元件表面,迅速将热量扩散开来,应用石墨烯散热材料后,芯片温度有效降低5-10℃。此外复合材料的研发也取得了显著进展,金属—高分子复合材料结合了金属的高导热性与高分子材料的可塑性、绝缘性,如铝基高分子聚合物复合材料,能制成形状复杂的散热部件,紧密贴合不规则发热元件,增大散热接触面积。陶瓷—金属复合材料在耐高温、绝缘的同时,还具备良好的导热能力,适用于电气隔离和散热要求高的区域。在材料表面处理技术方面,通过激光蚀刻技术在散热片表面形成微小凸起或凹槽,大幅增加表面积,强化了对流换热。电泳涂装技术则在散热材料表面涂覆一层具有高发射率的涂层,增强了辐射散热效果,使设备在自然对流环境下的散热效率提高了10%~20%。

3.2 散热结构的优化设计

在高频通信设备的散热结构设计中,一系列优化设

计策略被采用以提升散热性能。散热鳍片结构得到优化,采用变截面设计,根部较厚以增强热传导,顶部较薄以增加散热面积,同时优化倾斜角度以促进空气顺畅流动,提高散热效率。此外,仿生学设计灵感被融入散热鳍片中,模拟动物羽毛或植物叶片结构,在有限空间内大幅增加散热面积并促进空气湍流,增强对流换热效果。在风道设计方面,利用计算流体动力学(CFD)模拟软件对设备内部风道进行仿真分析,根据发热元件分布和热量产生情况,精准设计风道走向,使冷空气优先流经发热严重区域,实现热量均匀散发。在风道内增设扰流板,增强空气扰动,提高换热系数。此外,构建由热界面材料、均热板和散热鳍片组成的多层散热结构,热界面材料紧密连接芯片与均热板,高效传递热量;均热板利用内部相变材料快速均匀分布热量;散热鳍片则将热量散发到空气中。这种多层结构设计在保证高效散热的同时,有效减小了散热体积,特别适用于对空间要求严格的高频通信设备。

3.3 智能散热控制系统的构建

首先,在设备的关键发热元件如芯片、功率管的正上方及周边,以及设备内部空气流动的进出口处,合理布局了高精度温度传感器。对于大型且发热不均匀的设备,则采用分布式温度传感器阵列,全面监测设备不同位置的温度变化,确保采集到的温度数据能够准确反映设备的实际热状态。在智能控制算法方面,引入了自适应模糊PID控制算法,该算法能够根据温度变化的速率和幅度自动调整PID参数,相比传统PID控制,具有更快速、准确的响应能力。在设备启动或负载突变时,该算法能够迅速调整风扇转速,避免温度过度上升或下降。此外,深度学习算法也被应用于设备温度数据的分析,通过对历史温度数据和运行状态的学习,预测未来温度变化趋势,提前调整散热策略。智能散热控制系统还与设备的运行状态实现了联动控制,通过监测设备的信号强度、数据传输速率等参数,实时判断设备的工作负荷,并根据工作负荷的变化自动调整散热功率,在数据传输高峰时提供足够的散热能力,在设备空闲或低负荷

运行时降低散热强度,从而减少能耗。

3.4 散热技术优化实践

针对某通信基站在夏季高温时段面临的设备超温、通信信号不稳定及故障率上升问题,我们进行了一系列的散热技术优化实践。在优化前,该基站采用普通风冷散热系统,散热风扇效率低,散热鳍片设计不合理,且缺乏针对设备内部热流分布的有效管理。为解决这些问题,我们采取了以下优化措施:首先,将散热风扇更换为高效离心式风扇,显著增大了风量和风压;其次,重新设计了散热鳍片,采用变截面和仿生结构,有效提高了散热面积和换热效率;同时,利用计算流体动力学(CFD)模拟软件对风道进行了优化,确保冷空气能够均匀流过各个发热部件;最后,安装了智能温度传感器和基于自适应模糊PID算法的控制器,实现了散热系统的智能控制。这些优化措施实施后,基站设备在高温时段能够稳定在安全温度范围内运行,通信信号强度提升了15%,故障率降低了30%,显著提高了通信质量和设备可靠性^[3]。

结语

综上所述,散热技术的优化与实践对于高频通信机电设备的稳定运行和性能提升具有重要意义。通过合理选择散热材料、优化散热结构、构建智能散热控制系统等措施,可以有效降低设备温度,提高通信质量和设备可靠性,随着技术的不断发展,高频通信机电设备的散热性能将得到进一步提升,为现代通信网络的高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]陈永华,酒晨霄,张文斌,等.大功率电子器件的自驱动散热系统技术研究[J].兵器装备工程学报,2024,45(9):307-313.
- [2]胡延伟,马占书.基于时间序列分析的高频通信系统接收电路故障诊断方法[J].长江信息通信,2024,37(11):99-101.
- [3]李丽,胡艳君,张磊,等.基于DSP的高频通信电源运行控制方法[J].通信电源技术,2020,37(19):71-72,76.