

文章编号: 1671-0576(2020)01-0012-04

雷达导引头散热方法研究综述

刘 扬¹, 刘伟平², 庄春跃², 朱 骏²

(1. 海军装备部驻上海地区第六军事代表室, 上海 201109;
2. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对雷达导引头不同使用工况, 论述了雷达导引头主要的散热方式, 包括被动散热和主动散热。被动散热包括结构件导热、相变材料储热以及热管导热等方式。主动散热包括风冷、液冷、压缩气体膨胀制冷、喷雾冷却等。通过综合分析, 相变材料储热是目前雷达导引头散热的常用技术。未来制导舱空间越来越紧凑, 热管加相变材料复合散热的应用有利于提高空间利用率。此外, 喷雾冷却在高热流密度领域具有良好应用前景。

关键词: 雷达导引头; 热设计; 被动散热; 主动散热

中图分类号: TN830.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.01.003

Thermal Design Method of Missile Borne Radar Seeker

LIU Yang, LIU Wei-ping, ZHUANG Chun-yue, ZHU Jun

(1. The 6th Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Shanghai, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: According to different working conditions of radar seeker, the main heat dissipation modes of radar seeker are discussed, which include passive heat dissipation and active heat dissipation. Passive heat dissipation includes heat conduction of structural members, phase change materials thermal storage, heat conduction of heat pipe, etc. Active heat dissipation includes air cooling, liquid cooling, compressed gas refrigeration, spray cooling, etc. Through comprehensive analysis, phase change materials thermal storage is a common technology for heat dissipation of radar seeker. With the space of radar cabin becoming more compact in the future, the application of heat pipe and phase change material will be conducive to improving the utilization rate of space. And spray cooling has a good application prospect in the field of high heat flux.

Key words: radar seeker; thermal design; passive cooling; active cooling

收稿日期: 2019-12-31

作者简介: 刘 扬(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事导弹武器系统设计研究。E-mail: 254688452@qq.com

通信作者: 刘伟平(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事导引头结构设计研究。E-mail: 475455255@qq.com

0 引言

近年来,雷达导引头正快速向多模复合、成像制导、小型化等方向发展。随着对制导系统性能需求的大幅提升,相控阵雷达导引头逐步取代机械扫描雷达导引头^[1]。相控阵雷达天线 T/R (Transmitter and Receiver) 组件发射效率不高,阵列布置密集,导致 T/R 组件热流密度高,其散热问题成为技术发展的瓶颈。同时近年来随着对导引头实时成像、多模制导、抗干扰等需求增加,使得导引头对信号运算处理能力需求激增。为满足算力需求,信号处理单元中一般设计多片高性能 DSP 芯片并行计算。同时导引头也逐步往小型化轻量化方向发展,使得设备散热成为需要重点考虑的问题。

雷达导引头工作环境空间狭小、密闭、设备集中、整体工作时间有限等特点,决定了其热设计与地面设备不同。目前雷达导引头的散热方式根据散热机理分为被动散热和主动散热,包括自然传导散热、相变材料温度控制、能量疏导等被动散热方式以及强制散热等主动散热方式。本文将论述目前弹载雷达导引头所常用的散热方法以及未来面对更加严苛的需求时可能发展的方向。

1 被动散热

被动散热是电子设备通过热传导以及空气自然对流的散热方式。一般导弹飞行高度较高,舱体内空气稀薄,电子设备靠空气对流散热能力差,主要通过热传导散热。

1.1 结构件传导散热

对于工作时间较短,发热量不高的器件,由于印制板导热率低,一般采用壳体起凸台的方式将器件热量传导至壳体或框架等结构件,依靠结构件的热沉储存热量。图 1 为某信号处理机箱体散热结构。导引头为了轻量化、小型化,一般采用铝合金材料。弹载电子设备常用结构件材料的物理参数如表 1 所示。相比其他材料,铝合金的导热性较好,热容值在金属材料中也较高,在发热量不高的条件下可以满足使用需求,该方式实现容易、

经济性好。

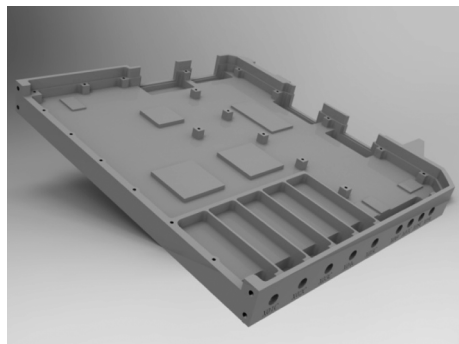


图 1 某信号处理机箱体

表 1 弹载电子设备常用热沉材料物性参数

材料	密度/ (kg/m^3)	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)	比热容/ ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
铝合金 2A12	2 800	121.0	921.0
铝合金 6061	2 700	154.0	896.0
铝合金 6063	2 700	193.0	900.0
镁合金 MB15	1 800	117.2	1 034.2
不锈钢 4Cr13	7 800	28.9	460.0
不锈钢 2Cr13	7 800	22.2	461.0
紫铜	8 900	381.0	390.0

对于箱体中多块印制板并列安装的结构,会有位于中间位置的印制板的器件无法直接与壳体接触的情况。目前常见的散热措施包括增加印制板覆铜量和提高印制板的导热性。文献[2]研究了覆铜层数及覆铜百分比对于印制板平行板面方向热导率的影响,结果表明增加覆铜层数及覆铜百分比有利于提高印制板的导热率。另一种方式为类似搭“热桥”的方法,如图 2 所示。通过选用铝合金或紫铜等高导热率材料制成的导热片,将器件与壳体连接,将热量传导至壳体。文献[3]对该结构形式进行了仿真,验证了该散热方式的有效性。

1.2 相变材料应用

近年来随着大功率微波器件以及高性能处理芯片的应用,仅依靠结构件热沉无法满足散热需求。相变材料(Phase Change Materials, PCM)的应用成为提高热沉的重要手段。相变材料在特定温度下从一种聚集态转变到另一种聚集态,会伴

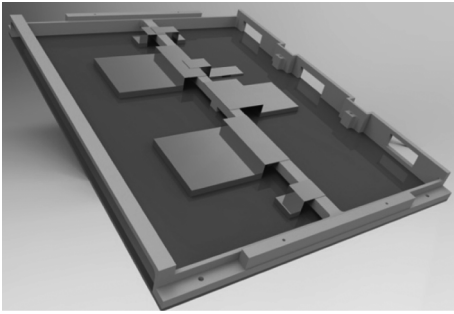


图 2 采用热桥方式散热

随着大量储热或放热的现象,这些热量即为相变材料的潜热。以固-液相变为例,在加热到熔化温度时,会产生从固态到液态的相变,熔化过程中,相变材料吸收并存储大量潜热。常见的相变材料物理参数如表 2 所示,其中石蜡类相变材料具有潜热大、无毒、无腐蚀性、相变温度适宜、相变时体积变化率不大等优点,广泛应用于航天产品上,国内外均有大量关于其应用研究的公开文献^[4-5]。

表 2 常见相变材料物性参数

材料	密度/ (kg/m^3)	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)	比热容/ ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	导热系数/ ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)
十八烷	28	244	810	0.158
石蜡	58~60	189	920	0.210
月桂酸	42~44	178	1 007	0.147
棕榈酸	61~64	187	989	0.162
硬脂酸	69	203	965	0.172
氢氧化钡 八水化合物	78	301	2 180	1.020
硝酸锂 三水化合物	30	269	1 550	0.670

从表 2 中可以看出,相变材料虽然有较大的潜热,但是其导热系数较低,在应用过程中可能出现相变冷板导热不均的情况。为解决上述问题国内外已有多位学者开展了相关研究,解决措施主要分为两大类:(1)增大冷热源与相变材料的换热面积,包括添加金属翅片和使用泡沫金属网格等;(2)在相变材料内添加导热系数较高的金属颗粒来形成复合相变材料。文献[6]采用双温度模型模拟了不同种泡沫金属基复合相变材料的相变换热过程。文献[7]将相变储能材料注入泡沫金属材料孔隙中构成复合相变材料,并对其进行了仿真,结果表明泡沫金属对复合相变材料的传热特

性有很大的改善。文献[8]研究了在石蜡中添加膨胀石墨对复合材料导热系数的影响。文献[9]以石蜡为复合相变材料的基体,分别添加氧化铜、二氧化硅和氧化锌的纳米颗粒,通过两步法制备多种石蜡基纳米金属复合相变材料。文献[10]以乙二醇为相变基体,添加银纳米颗粒,结果表明添加纳米金属颗粒能够明显增强相变材料的导热能力。

1.3 热管技术应用

热管充分利用了热传导原理与相变介质的快速热传递特性,具有极佳的导热能力。该技术广泛应用于宇航、军工、民用电子设备等领域。一般热管由管壳、吸液芯和端盖组成,如图 3 所示。热管内部一般被抽成负压状态,充入适当易挥发低沸点的液体,吸液芯一般由毛细多孔材料构成。热管一端为蒸发端,另一端为冷凝端。当蒸发端受热时,毛细管中的液体迅速汽化,蒸汽在热扩散的动力下流向另一端,并在冷端冷凝释放出热量;液体再沿多孔材料靠毛细作用流回蒸发端;如此循环,直至热管两端温度相等。热管利用介质在热端蒸发后在冷端冷凝的相变过程,达到热量快速传递的效果。

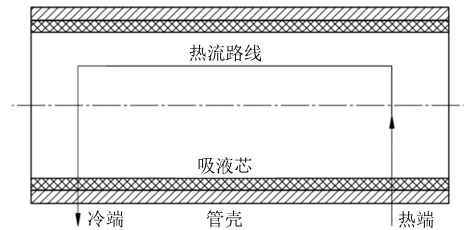


图 3 热管结构示意图

相控阵雷达 T/R 组件热流密度高,发热量集中,散热是必须解决的问题。以往热管技术主要应用于舰载雷达、机载雷达以及地面雷达^[11,13],近年来在相控阵雷达导引头中也得到了广泛应用。由于目前相控阵雷达导引头工作时间较短,天线阵面散热一般采用相变冷板储热的方式。随着未来相控阵雷达导引头功率的不断增加以及工作时间增长,天线阵面的相变冷板厚度将越来越大,使得天线罩内部空间紧张。特别是近几年来发展的滑翔高超声速武器,采用特殊气动外形的异形非轴对称天线罩,罩内可利用空间小,这对导

引头的布局及散热都将是一个挑战。

在未来导引头小型化的趋势下,提高空间利用率是小型化的一个重要途径。由于热管具有极佳的导热性,使得相变材料的布置不再局限于贴合天线阵面。文献[14]采用热管相变材料复合热控装置对相控阵雷达导引头天线进行散热,其中相变材料布置在天线后端两侧,充分利用了天线罩内空间,减小了天线阵面的厚度。

2 主动散热

主动散热是采用低于散热对象温度的冷源进行的主动换热方式。常见的方式有风冷、液冷、压缩气体膨胀制冷、喷雾冷却等。

由于雷达导引头制导舱为狭小封闭空间,风冷、液冷一般常用于导引头地面连续工作调试^[15]。风冷散热也应用于雷达导引头。对于长航时的巡航导弹,雷达导引头需长时间开机搜索,国内已有雷达导引头发射机采用相变冷板储热,信号处理机采用小型风扇主动散热的方案。由于信号处理机发热功率不大,利用风扇散热可以有效避免积热,通过空气对流充分利用舱内结构件储热。另外由于该巡航导弹巡航段速度为亚音速,气动加热不严重,舱外壁温度较低,强迫风冷也有利于舱内设备通过舱壁进行散热。

压缩气体膨胀制冷主要用于红外导引头。红外导引头探测器需要工作在较低温度,由于其本身发热量较小,制冷系统只需将环境温度降低至工作温度。一般利用高压气瓶释放气体通过节流孔,利用膨胀吸热达到快速制冷目的^[16]。由于高压气体膨胀无相变过程,其潜热较小,而采用液氮、液氩等介质汽化散热则需面临无法长时间存储、容器体积较大、使用时需要临时加注制冷介质等问题,将其应用于雷达导引头散热,经济性和可靠性也是需要重点考虑的问题。

喷雾冷却是将冷却介质通过雾化分解为无数的离散型小液滴,喷淋到加热表面通过单相换热和两相换热带走热量的一种冷却方式。喷雾冷却具有散热功率高、冷却均匀、无沸腾滞后效应、介质需求量小等特点,在电子电器、冶金制造、航空航天及医疗等高热流密度领域具有良好应用前

景。国内外已有学者开展了相关研究。文献[17]研究了喷雾冷却在功率电子器件领域的应用。文献[18]对比了喷雾冷却和微喷射冷却对电子器件的冷却效果。文献[19]进行了闭式喷雾冷却试验,分析对比了不同喷嘴类型和喷雾高度下传热性能的变化规律。文献[20]以水为冷却介质,采用半实心旋流式机械雾化喷嘴和实心机械雾化喷嘴,对影响无沸腾换热特性的因素、强化换热方法等进行了研究。喷雾冷却实质是一种强化换热,可以有效解决大热流密度情况下的热量导出问题,对于雷达导引头封闭的工作环境,喷雾冷却系统还需要配备相应的循环收集装置和介质容器,同时根据需求设置储热装置。

3 结束语

未来的导弹将向超声速和高超声速方向发展,有源相控阵雷达、合成孔径雷达成像技术等将广泛应用,雷达导引头工作时长将显著增加,巨大的发热量将对散热设计提出更高的要求。相变材料的应用是目前雷达导引头散热储热的常用技术,成熟度较高。未来制导舱空间越来越紧凑,热管加相变材料复合散热的应用有利于提高空间利用率、增大相变材料的填充量。喷雾冷却在高热流密度领域具有良好应用前景。

参考文献

- [1] 李响. 某相变储热装置的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 1-2.
- [2] 周丽萍, 宋燕平. 星载行波管电源的热设计及热分析[J]. 空间电子技术, 2009, 6(3): 73-76.
- [3] 庄春跃, 刘宽耀, 刘伟平. 星载印制电路板的热仿真[J]. 制导与引信, 2018, 39(3): 56-60.
- [4] 张芳, 王小群, 杜善义. 相变温控在电子设备上的应用研究[J]. 电子器件, 2007, 30(5): 1939-1942.
- [5] ALAWADHI E M, AMON C H. PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(1): 116-125.