

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.026

引用格式:郑雪晓.一种弹载相控阵天线多工况快速切换热控方法[J].电讯技术,2014,54(4):513-517. [ZHENG Xue-xiao. A Thermal Control Solution Based on Quick-shift Work Conditions for Missile-borne Phased-array Antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4): 513-517.]

一种弹载相控阵天线多工况快速切换热控方法*

郑雪晓**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对弹载雷达相控阵天线需要满足在试验测试维护长时间工作,而上弹后在无外界附加散热措施情况下短时可靠工作的要求,提出一种基于楔形锁紧装置的可快速更换换热单元天线前端结构设计方法。该方法采用液冷和基于石蜡/石墨复合相变材料储热器作为散热手段,分别实现了稳态散热和瞬态热控。着重阐述了相变材料储热器设计计算时的数学模型和仿真方法。仿真及试验验证表明,可更换换热器相控阵天线前端满足稳态、瞬态多工况热环境稳定工作要求;采用基于石蜡/石墨相变材料储热器作为热沉其储热效果要优于传统金属热沉。

关键词:弹载雷达;相控阵天线;结构设计;热控;相变材料;可更换换热单元

中图分类号:TN03 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)04-0513-05

A Thermal Control Solution Based on Quick-shift Work Conditions for Missile-borne Phased-array Antenna

ZHENG Xue-xiao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The phased array antenna of missile-borne radar needs to work long hours in experimental tests and maintenance, and provide short-time reliable work performance without any cooling measure on the missile. According to the requirement, a structure design method for antenna front-end is presented, with which cooling elements can be replaced quickly based on wedge locking device. The method utilizes liquid cooling and thermal storage based on paraffin/graphite composite phase-change material (PCM) as the means of cooling to achieve steady-state cooling and transient thermal control respectively. The mathematical models and simulation methods during the calculation of thermal storage based on PCM are described. Simulations and experiments show that the proposed front-end design of phased array antenna meets the requirements for stable work in thermal environments of both steady state and transient state (multiple working conditions). The heat sink effect of thermal storage based on paraffin/graphite PCM is superior to that of the tradition.

Key words: missile-borne radar; phased-array antenna; structure design; thermal control; phase-change material; replaceable cooling element

1 引言

相控阵天线具有扫描速度快、跟踪精度高、抗过载能力强等优势,但大量 TR 组件组阵,特别是高频

段天线(Ku 频段以上)由于其总体积小、阵元间距小、芯片效率不高^[1]而导致的发热量大造成了热流密度极高。对于最新的大功率芯片来说,热流密度

* 收稿日期:2014-01-28;修回日期:2014-03-28 Received date:2014-01-28;Revised date:2014-03-28

** 通讯作者:zxx_p@163.com Corresponding author:zxx_p@163.com

已经远超过了 $100\text{ W/cm}^{2[2]}$ 。散热成为了相控阵天线的重要问题,也是亟待解决的关键技术。

对于弹载天线来说,还面临多工况问题。弹载电子产品由于其平台条件限制,多数情况下无法采用强迫冷却,部分产品平台还会通过传导或热辐射的方式对设备加热,因此需要在几十秒到几分钟不等的时间内对设备完成短时温控。然而,为了满足产品出厂之前的地面试验,他机挂飞,以及交付以后的在线维护维修,需要有一套冷却系统对设备实施长时间的稳态散热。为了保证设备技术状态和技术稳定性,在瞬态热控和稳态散热工况切换时,不能拆卸天线阵面,因此需要设计一套可快速更换散热器的热控解决方案。根据文献介绍^[3-5],目前相控阵天线的散热主要还是采用风冷以及液冷的方式,弹载相控阵天线的散热方式采用相变材料储热器或其他热沉形式,而考虑到使用平台特点在稳态散热和瞬态热控不同工况下切换的热控方案很少提及。

为了满足弹载产品多工况适应性热控,在结构

设计时就要考虑相控阵组阵方案,TR 组件结构形式、散热系统均要进行适应性设计,以满足上述要求。

2 结构总体设计

2.1 主体构架设计

考虑到天线阵面的热流密度,拟采用强迫式液冷散热形式。在此基础上相控阵天线常用结构模型有如下 3 种:TR 组件两侧散热、穿通液冷^[4]以及顶部散热,如图 1 所示。两侧散热的结构形式主要适用于阵元规模不大、尺寸小、频段高的设备;穿通液冷可用于大阵面,但由于液冷通道更换需拆解天线阵面,而不更换则会造成设计冗余降低弹载产品的可靠性;顶部散热可用于阵元规模大的设备,但直接采用冷板液冷,则会造成冗余设计,如结合环路热管则可较好地解决问题。本方案针对的弹载设备阵元数量在 256 阵,属于小规模阵列天线,因此选用方案 1。

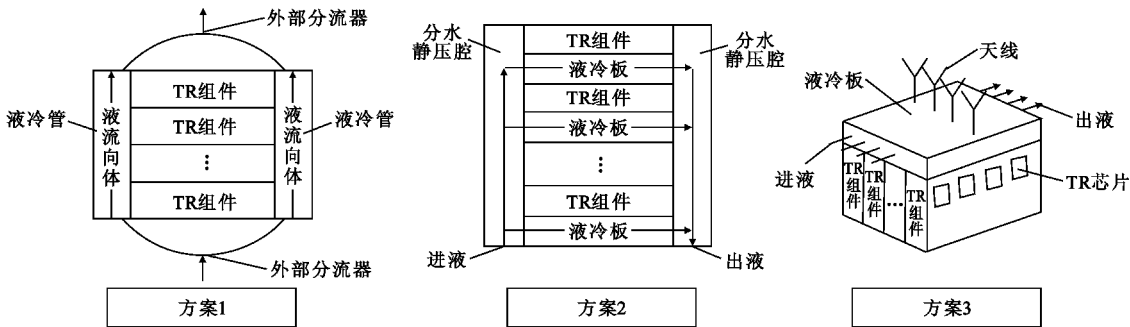


图 1 相控阵天线阵列散热结构
Fig. 1 The radiating structure of phased-array antenna

天线阵面射频前端由天线、TR 组件、功分和差器、波控器、收发校正前端组成,天线阵面与 TR 组件、TR 组件与功分和差器通过高频盲插接插件进行电气互联。由于阵面规模较小,考虑将和差功分器、波控器和结构承载部件一体化设计形成多功能部件。阵面左右侧设计为可更换散热器,其结构布局如图 2 所示。

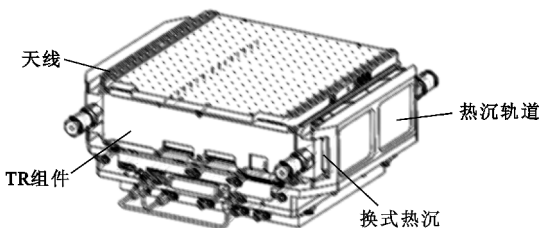


图 2 射频前端示意图
Fig. 2 The structure of RF front-end

2.2 可更换散热器结构设计

如图 2 所示,在 TR 组件阵列两侧面为基于楔形锁紧导轨的可更换热沉,通过结构导轨滑入支架当中。锁紧机构在导轨与 TR 组件之间提供正压力进行锁紧,同时提高 TR 组件加工精度,使外形尺寸达到 $\pm 0.05\text{ mm}$;TR 组件与安装基面之间采用销钉定位提高安装精度,在换热器与 TR 组件接触处粘贴高导热系数衬垫,在正压力的作用下,填补 TR 组件外形的加工误差,和组阵后的装配误差连接热路。为了增加换热效率,液冷模块内部采用“蛇”形结构,相变储热器内部采用“田”或“目”字结构,用于强化传热,提高换热效率。现场可更换散热器结构形式如图 3 所示。

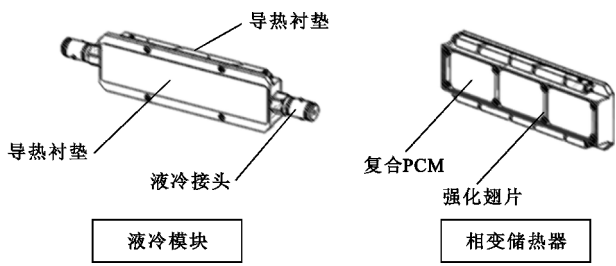


图 3 现场可更换散热器
Fig. 3 The structure of heat dissipator

在地面联式、暗室测试、他机挂飞以及交付后定期测试过程中,使用外部强迫液冷的形式进行冷却。正式交付后可在不维护阵面的情况下松开锁紧器,从阵面前方抽出换热器,改用相变材料储热装置,从而实现短时瞬态温控。由于导热衬垫材质柔软,且有一定粘性,为易损件,反复使用后若出现较大变形,应及时更换。

3 瞬态热控方法

3.1 热沉材料选择

弹载平台上通常情况没有其他散热条件,且工作时间不长,往往设备在未达到热平衡之前就已经完成工作,因此主要考虑采用热沉散热。相较于传统金属热沉,相变材料由于其相变潜热大的特点越来越广地使用于电子设备瞬态热控领域。本方案拟采用相变潜热为 171.4 kJ/kg、导热系数为 4.525 W/m·K 的石墨石蜡复合相变材料(PCM)。该相变材料是采用“液相浸渗法”,利用膨胀石墨对石蜡良好的吸附性能所制备出的石墨/石蜡复合 PCM^[6],具有储热密度大、导热系数相对较高,且无液体泄漏和流动问题,其相变过程体积变化小,价格相对较低的优点。在吸热过程中,相变材料温度没有明显升高,却能吸收大量热量,非常适合在允许升温很小的情况下的电子设备散热。结构设计时将相变材料储热器结构外形与液冷散热通道结构外形进行统一化设计,最终与系统形成相同的结构模型。

3.2 瞬态计算数学模型

由于瞬态工况下采用了 PCM 材料,因此在瞬态热设计时主要考虑 PCM 储热器的计算,从而得到相应的设计依据。

(1) 相变散热数学模型

在本方案中,由于采用了石墨基复合相变 PCM,可忽略固液界面流动问题,因此描述相变简化为建立起 PCM 熔化前比热 $C_{p-solid}$ 、 $C_{p-liquid}$,等效比热

Ceffective,及其融化以及熔解热、熔点之间的关系,即为等效比热法,数学表达式为

$$C_{peffective} = C_{psolid} + \frac{h}{\delta T} \tag{1}$$

式中, h 为 PCM 材料的潜热, δT 为 PCM 的相变温度范围。

焓法数学模型是相变散热最常用的数学模型,由于不考虑内热源,其能量控制方程^[7]为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{2}$$

固、液相温度和焓的关系可表示为

$$T - T_f = \begin{cases} (h - h_s)/c_s, & h < h_s \\ 0, & h_s \leq h \leq h_l \\ (h - h_l)/c_s, & h > h_l \end{cases} \tag{3}$$
$$k = \begin{cases} k_s, & h < h_s \\ k_l, & h > h_l \end{cases}$$

式中, ρ 为密度, h 为比焓, k 为导热系数, T 为温度,下标 s 和 l 分别表示固相和液相。

由于采用复合相变材料无固液界面,因此焓法的进一步描述可表示为

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial H}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ T|_{x=0} = T_0 \end{cases} \tag{4}$$

等效比热和焓法的主要区别是在能量方程中,焓法使用焓来取代原来能量方程中的温度 T ,将 H 和 T 一起作为待求函数,在整个区域(包括液相区、固相区和两相区)建立一个统一的能量方程,利用数值解法求得热焓和温度分布。因此,等效比热法控制方程可表示为

$$\begin{cases} \rho C_e \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ T|_{x=0} = T_0 \end{cases} \tag{5}$$

其中,温度 T 和焓 H 的关系如下:

$$T = \begin{cases} H/C_{p,s}, & H < H_s \\ \frac{H + (T_m - \epsilon) \lambda/2 \epsilon}{C_{p,s} + \lambda/2 \epsilon}, & H_s \leq H \leq H_l \\ T_m + \epsilon + \frac{H - H_l}{C_{p,l}}, & H > H_l \end{cases} \tag{6}$$

其中, ϵ 定义为相变温度范围的一半, λ (J/kg) 为相变潜热, H_s 和 H_l 分别为固相液相的比焓。

可见 T 和 H 都是线性关系,在数学上有相似的解。等效比热法是直接对 C_p 进行赋值处理,焓法是通过一个线性表达式,并引入 H ,实际上,通过对 H 的定义,间接地对 C_p 进行了处理。

实际在数值计算时,对熔点位置的 PCM 区域材料赋予高等效比热,并在该位置处达到一定温度后恢复相应 PCM 液相时的比热,从而实现对 PCM 的模拟。采用该模型,使得数值模拟消耗大幅降低,且计算精度一般能满足工程需求。

(2)相变材料吸热总量计算

设计时,需预先判断相变材料填入总量是否满足要求。由于材料相变过程中,设备对外或多或少存在热交换,因此这个过程相对复杂。工程实际应用时可通过先进行粗略估算后再对模型进行仿真验证,从而解决这个问题。估算相变材料吸热总量可根据公式

$$Q=C_{p1} \cdot m+C_{p2} \cdot m \cdot \Delta t \tag{7}$$

其中, C_{p1} 为相变潜热, C_{p2} 为比热容。

4 仿真验证

4.1 稳态问题仿真

天线模块中包含了 256 个 GaAs 芯片,每块芯片的热耗均为:发射功耗2.4 W,占空比 35%;接收功耗0.2 W,占空比 65%。经过计算,稳态计算时每块芯片的平均热耗均为0.97 W,整个模块上的总热耗为248.32 W,器件主要热物理特性如表 1 所示。稳态仿真时,模块的整体 CFD 模型和流道结构分别如图 4 所示,模块两侧的流道采用直通叉流的模式。根据产品平台要求,初始环境温度均为 70℃。稳态仿真的散热方式为液冷式,工质选择 65 号防冻液(乙二醇与水的混合物),根据试验时地面可能的外部温度情况将入口处工质温度保持在 35℃,根据热流密度设置每根管道的水流量均为2 L/min。

表 1 器件主要热物理特性

Table 1 The heat characteristics of the devices			
热耗/W	封装	最高槽温/℃	热阻/(℃ · W ⁻¹)
0.97	裸芯片	150	45

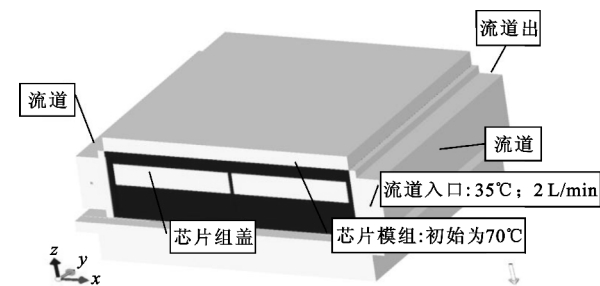


图 4 热仿真模型
Fig. 4 The model of thermal simulation

仿真结果如图 5 所示。

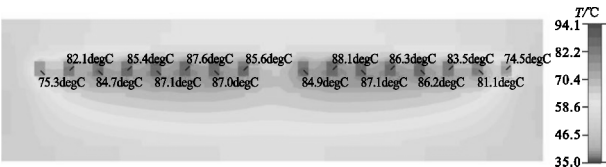


图 5 稳态热仿真结果
Fig. 5 The result of steady-state thermal simulation

芯片槽温为仿真结果中的芯片与壳体贴合面温度 T_1 与单个芯片内部温升之和,可根据公式 $T=T_1+\theta_{JC} \cdot W$ 得出。由计算可知,此模组上的芯片最高槽温依然低于 150℃的极限工作槽温,芯片可以正常工作。

4.2 瞬态热数值计算

在与稳态热仿真边界条件一致的情况下,将液冷模块分两次更换为普通全铝热沉以及加入了石墨/石蜡复合材料的相变材料储热器,分别进行了热仿真,结果如图 6 所示。

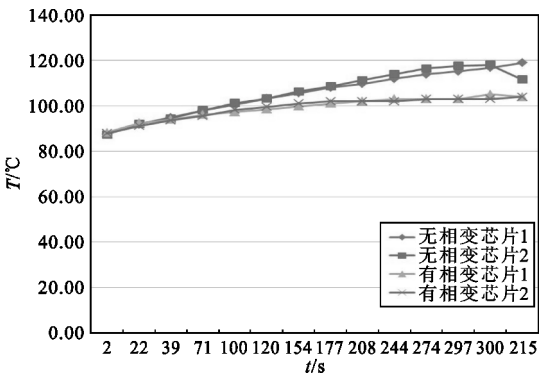


图 6 热仿真结果
Fig. 6 The result of transient thermal simulation

从计算结果可以看出在 140 s 的时间轴附近,安装面温度就已达到 106℃,即140 s时的芯片槽温已经接近 150℃这一极限工作槽温。因此,此种情况下模块最多能够工作140 s。本系统使用 PCM 后,温度随时间增长的斜率明显较使用铝作为热沉的情况较小,即温度增加的速率较小。另外,在 240 s时间轴附近,芯片表面温度已接近 106.35℃,即在240 s时间轴附近,芯片槽温就已接近 150℃的极限工作槽温。因此,使用该相变材料时,该射频前端工作时间延长了100 s。

5 瞬态工况热测试

为了方便热测试,TR 组件设计初便在中央芯片附近设置了热传感器,并通过引线引出。为了体现

采用了石蜡石墨 PCM 的可更换散热器的储热效果,并和仿真结果对比,特意制作了全铝材的热沉。热测试时将设备置于 70℃ 温箱中模拟实际使用中的环境温度,根据此类典型产品弹载工作时间,测试了采用全铝热沉和复合 PCM 热沉作用下各自工作 120 s 和 200 s 时的中央芯片的时间温度曲线,如图 7 所示。温度曲线较仿真结果略高,但趋势相同,说明采用了 PCM 的可更换式热沉起到了较为明显的效果,也使设备满足了使用要求。

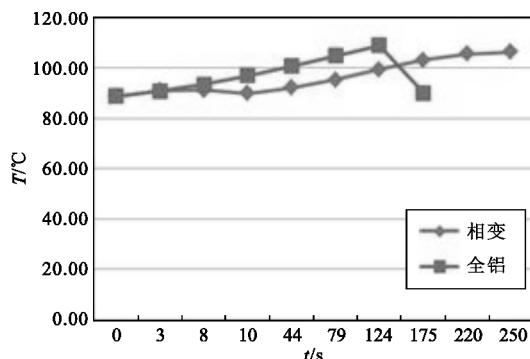


图 7 热测试结果

Fig. 7 The result of thermal measurement

6 结束语

在总结了大量文献中有关相控阵天线散热的方法后,本文为弹载相控阵天线多工况热适应性提出一种思路。采用这种方案,相控阵天线在工况切换时不用对阵面进行大面积拆装,使维修维护性大大提高,可以有效解决多工况可切换的弹载相控阵天线热控问题。但是由于石墨/石蜡相变材料本身物性特点,使相变储热器的重复使用性较差,储热器几次使用后需要更换其中的储热介质才能继续使用。另外,由于石墨的导热系数相较金属导热率系数低,因此在更大规模的相控阵天线散热时,其相变响应时间较慢,成为其进一步的应用障碍。更大规模的弹载相控阵天线散热问题需要综合更多的相变储热的高新技术新工艺来解决,未来环路热管的引入以及更高导热系数的相变材料的综合应用,以及如何实现环路热管与相变材料集成及更换,是下一个研究方向。

参考文献:

[1] 汤晓云,相控阵雷达导引头综述[J].航空兵器,2013(3):25-30.

TANG Xiao-yun. Summarization of Phased Array Radar Seeker[J]. Aero Weaponry, 2013(3):25-30. (in Chinese)

[2] Bonner R W, Desai T, Gao Feng, et al. Die Level Thermal Storage for Improved Cooling of Pulsed Devices [C]// Proceedings of 2001 IEEE Symposium on Semiconductor Thermal Measurement and Management. San Jose, CA: IEEE, 2011:193-197.

[3] 平丽浩. 雷达热控技术现状及发展方向[J]. 现代雷达, 2009, 31(5):1-6.

PING Li-hao. Current Status and Development Trends of Thermal Control Technology for Phased Array Radar System[J]. Modern Radar, 2009, 31(5):1-6. (in Chinese)

[4] 钱宣. 机载有源相控阵雷达天线阵面结构设计[J]. 现代雷达, 2012, 34(9):66-68.

QIAN Xuan. Structural Design of Airborne Active Phased-array Antenna[J]. Modern Radar, 2012, 34(9):66-68. (in Chinese)

[5] 张芳. 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.

ZHANG Fang. Investigation on Application of Phase Change Thermal Control in Electronic Devices[J]. Chinese Journal of Electronic Devices, 2007, 30(5):1939-1942. (in Chinese)

[6] 尹辉斌. 基于快速热响应相变材料的电子器件散热技术[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(7):52-56.

YIN Hui-bin. Cooling Technology of Electronic Device Based on Phase-Change Material with Rapid Thermal Response[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(7):52-56. (in Chinese)

[7] 菅鲁京. 固-液相变装置传热性能数值计算研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5):452-454.

JIAN Lu-jing. Numerical study on heat transfer characteristics of solid-liquid phase change material container[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5):452-454. (in Chinese)

作者简介:



郑雪晓(1981—),男,成都人,2004 年获学士学位,现为工程师,主要从事电子设备结构设计工作。

ZHENG Xue-xiao was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1981. He received the B. S. degree in 2004. He is now an engineer.

His research concerns electronic equipment structure design.

Email:zxx_p@163.com