弹载相控阵天线系留液冷散热设计与优化分析

杨科,郭威威

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471099)

摘要:目的 对某相控阵天线开展散热设计与优化分析。方法 基于液冷强迫散热设计理论方法,进行某型 相控阵雷达天线热设计,制定液冷散热方案。应用 CFD 仿真软件 FloEFD 建立流固耦合热仿真模型,对天 线散热情况进行热仿真分析,得到该设备关键测试点的温度变化情况。结果 热仿真结果表明,整个系留 测试试验中,关键监测点的最高温度在允许的工作温度范围内;每个系留测试周期中存在散热冗余时间。 结论 热仿真分析表明,该设备制定的热设计方案可以满足使用要求,并为设备的设计改进和测试方案的优 化提供指导和建议。

关键词:热设计;热仿真;液冷

中图分类号: V24; TJ761.1; TN784 文献标识码: A **DOI**: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.12.007

文章编号: 1672-9242(2021)12-0037-05

Design and Optimization Analysis of Liquid Cooling for a Missile-Borne Phased Array Antenna

YANG Ke, GUO Wei-wei

(AVIC China Airborne Missile Academy, Luoyang 471099, China)

ABSTRACT: Based on the theory and method of water-cooled forced cooling, the thermal design of a phased array radar antenna was carried out, and liquid cooling scheme was formulated. The fluid-solid coupling thermal simulation model was built based on the CFD simulation software FloEFD. The temperature change of the key test point on the antenna was introduced by the thermal simulation for the heat dissipation of the antenna. The thermal simulation results showed that the maximum temperature of the key test points was within the allowable operating temperature range in the whole tethered test. And there was redundant time for cooling in each test period. Thermal simulation analysis indicated that the thermal design project of this device fulfilled the requirements, which also provides guidance and suggestions for the design improvement of the equipment and the optimization of the test project.

KEY WORDS: thermal design; thermal simulation; liquid cooling

精确制导武器已逐渐成为现代战场的杀手锏。面 对复杂多样的目标,隐身性、强电磁干扰成为敌方突 防的重要技术手段。相控阵天线能够显著地提升导弹 的抗干扰、杂波抑制能力,具有波束捷变以及多波束

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2020-06-21

Received: 2021-04-25; Revised: 2020-06-21

作者简介:杨科(1987—),男,硕士,高工,主要研究方向为空空导弹热仿真、可靠性仿真。

Biography: YANG Ke (1987—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: thermal simulation and reliability simulation of air-to-air missile.

引文格式:杨科,郭威威. 弹载相控阵天线系留液冷散热设计与优化分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 037-041.

YANG Ke, GUO Wei-wei. Design and optimization analysis of liquid cooling for a missile-borne phased array antenna[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 037-041.

能力,可以实现多批次目标跟踪^[1]。天线散热设计是 雷达结构设计中的重要环节,对天线系统的工作可靠 性具有重要意义。此外,阵面散热设计是否合理直接 关系到系统的整体结构方案,且一定程度上决定了产 品的任务成功率^[2]。

随着航空电子设备的飞速发展,舱内电子产品的体积功率密度越来越大。例如,某些雷达天线部件中使用的芯片的热流密度已达到甚至超过 300 W/cm²。 美国 GEC 研究表明,随着电子元器件及电子设备温度的升高,其失效率呈指数增长。一般来说,环境温度每升高 10 °C,失效率就增大 1 倍以上,因此也称为 10 °C法则^[3-4]。据美国空军研究统计,导致电子设备失效的主要因素中,温度过高引起的失效超过 55%^[5]。因此,如何有效降低设备中元器件或组合部件的温度,早已成为提高产品可靠性设计的重点和难点^[6]。液体冷板作为一种高效成熟的冷却设备,在民用和军用领域得到了广泛的应用^[7]。

对于传统的散热设计方法,经验性和继承性的设 计往往占较大比重。工程师大多通过类比或应用简单 有限的经验公式进行粗略的设计计算和分析,相似型 号提供的有效数据对设计的总体思路有很大影响。再 者就是通过预留较大的设计余量来满足实际的热设 计要求。由此,虽然在一定程度上满足了热设计要求, 但造成了设计资源的严重浪费。整体来看,产品的功 能性和可靠性并没有达到最优,甚至还会影响整个系 统总体方案的实施,最终导致设计反复迭代,研制周 期过长。因此,在雷达结构热设计中,选取高效合理 的散热设计手段及方法显得越来越重要^[8]。

目前电子设备热设计中较为流行的一种设计方 法是借助 CFD (Computational Fluid Dynamics)仿真 软件,对总体方案进行热仿真分析,为设计者提供直 接的设计参考。尤其针对流固热耦合的液体冷板的散 热问题,流体域和固体域均不能单独计算求解,也无 法单独描述流体运动和固体现象的变化。因此,合理 利用 CFD 仿真分析工具能够达到事半功倍的效果。 文中针对某型导弹天线的系留状态作为散热设计和 仿真分析的对象,分析确认系留液冷方案能否满足产 品的系留测试要求;保证内部发热芯片最高温度控制 在允许的温度范围内,达到设计要求;同时对制定的 系留测试液冷方案进一步地优化。

1 问题提出

相控阵天线主要由天线线阵、液体冷板、TR 模 块、天线电源等多个部分组成。其中,TR 模块为主 要发热源,在末制导段满载工作时往往能达到数千瓦 的功率。此外,相控阵天线受到天线电源的热耦合影 响,仅仅依靠液冷板及天线框架作为冷端散热,会使 整个天线的热设计难度大大提高。系留飞行试验主要 用于评估导弹目标探测及跟踪性能,其费用昂贵、试验困难。因此,在单次飞行试验中,尽可能多地进入 目标区域并对目标实施探测具有重要意义。面对长时 间的性能测试,大功率相控阵天线必须要借助其他高 效的散热方式来保证该部件的正常工作而不发生热 失效。

天线总体散热结构布局如图 1 所示,冷却液从冷 板底部流入,在冷板内部完成对 TR 模块的紊流散热 后,经冷板底部流出;之后进入天线电源内部流道进 行散热;最后经电源侧面出口流出。此散热设计的目 标是确保相控阵天线在 40 ℃的环境条件下,在系留 飞行测试试验中,依次进行 3 个循环周期,每个周期 满功率发射工作 90 s,断电冷却 10 min,天线模块底 板温度不超过 110 ℃。



图 1 天线散热结构布局 Fig.1 Layout of antenna cooling structure

位于天线 T/R 模块内部底板前端的大功率芯片 如图 2 所示,发热芯片满功率工作时,必须通过底部 散热基材将热流迅速导入外壳,否则热失效的风险极 大。散热方案选用的冷却液热物性参数见表 1。



相控阵天线结构设计和液冷方案能否满足文中 面临的主要散热分析问题的要求?系留测试费用昂 贵、困难多,系留测试方案若满足要求,是否存在进

表 1 冷却液热物性参数 Tab.1 Thermophysical parameters of coolant

冷却液	密度/(kg·m³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	动力黏度/(Pa·s)	普朗特数 (Pr)	
65#冷却液	1100	3600	8.105×10^{-4}	5.42	

一步完善的空间[9-10]?

2 液冷散热设计

天线冷板内部冷却液的流量 q 为^[5]:

$$q = \frac{60000Q}{C\rho\Delta t} \tag{1}$$

式中: q 为冷却液流量, L/min; Q 为总损耗, W; C 为冷却液比热, J/(kg·C); ρ 为冷却液密度, kg/m³; Δt 为冷却液温升, C, 一般取 5~8 C。

冷板表面的换热系数 h₁为^[5]:

$$h_{\rm l} = \frac{Q}{A(T_{\rm max} - T_{\rm out})} \tag{2}$$

式中, A 为换热面积(将发热面积定义为冷却区域的面积), cm²; T_{max} 为冷板表面允许的最高温度, \mathbb{C} ; T_{out} 为液冷板的出口温度, \mathbb{C} 。

考虑到功能性和结构设计的局限性,无法将发热 芯片集成到液冷板内部,只能通过热传导的方式,将 模块内部热量传导至液冷板,通过对液冷板散热来达 到给芯片散热的目的。这无疑增加了芯片与液冷板之 间散热通道的热阻,因此,需要尽可能地提高液冷板 的散热效率,以降低模块壳体的温升。

将相关材料物理特性带入式(1),经过分析确定 *Q*=2700 W, Δ*t*=12 ℃, 计算得到 *q*=3.4 L/min。

根据天线结构设计参数,初步确定 $A=180 \text{ cm}^2$, $T_{\text{max}} \leq 90 \degree$, $T_{\text{out}} \leq 70 \degree$,计算得到 $h_1=0.5 \text{ W/(cm}^2 \cdot \degree)$ 。 要保证天线模块壳体最高温度不超过 110 °C,冷板换 热系数不低于 0.5 W/(cm²·°),传统的液冷散热器考 虑增加顺排或叉排散热柱(当量直径 $d_e>1 \text{ mm}$),便 可满足散热使用要求^[11]。

3 热仿真分析

由于涉及有限元瞬态分析的问题,冷板内部有非 均匀分布的散热柱,且结构本身非常复杂,难以通过 解析法进行预估。因此,通过数值仿真计算,可以得 到对冷板内部流场及温度场的变化情况。在数值仿真 计算时,需要作如下简化和假设。

1)采用瞬态计算模式,认为冷板入口流速均匀。

2) 冷却液为理想的牛顿流体。

3) 热辐射的影响忽略不计。

4) 外边界为自然对流。

基于 FloEFD 软件进行 CFD 建模, 然后对相控阵 天线进行数值仿真分析。由于天线模型比较复杂, 为 了减小数值仿真的计算量, 提高计算效率, 对三维模 型进行合理的简化:1) 删减或修补安装螺纹孔和倒 角等细节部分;2) 对热分析结果影响较小或者无影 响的部位进行修改简化。

3.1 基本参数设定

仿真计算前, FloEFD 软件按照如下边界条件进行设定。

1)辐射。选择 OFF,即忽略辐射。

2)流动特性。选择层流和湍流。

3) 瞬态分析。选择 ON,即进行瞬态分析。时间 设定为三个周期,2070 s。

4) 入口边界条件。冷却液入口温度为 40 ℃, 入口水流速为 2.5 L/min。

5)壁面边界条件。默认外壁面热交换系数为 5W/(m²·℃)。

6)环境温度设置为 40 ℃,固体初始温度设置为40 ℃。

相控阵天线的主要结构材料为 3A21 铝合金。TR 模块发热芯片为简化模型,其物理参数均做均匀化处 理,通过外壳主要封装材料的热物属性,等效模拟芯 片的热传导系数及比热容。材料的详细参数见表 2。

3.2 运行仿真计算

在芯片部位设定体积目标,以监测芯片的温度响 应情况;为了监测天线模块壳体外表面的最高温度, 在 16 通道底板中间部位设定表面目标,以监测关键

表 2 结构材料热物性参数 Tab.2 Thermophysical parameters of structural materials

	rab.2 Thermophisteal parameters of structural materials				
材料	密度/(kg·m ³)	热传导系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	所属结构	
铝 5A05	3600	K _n :12 K _p :2806	921	模块壳体	
铝 6063	2690	209	900	冷板	
铝 3A21	2770	193	1089	默认材料	
无氧铜	8900	393	397	芯片基材	

部位的温度响应情况。

根 据 边 界 条 件 的 要 求 , 设 定 入 口 流 量 为 2.5 L/min,出口压力为 0.3 MPa,占空比为 40%,收 发工作 90 s 后,断电冷却 10 min。共进行 3 个周期的仿真计算,每个周期加电 90 s 后,16 通道底板、芯片及出口流体的温度值见表 3。关键监测点的温度变化如图 3 所示。



表 3 每个周期加电 90 s 末关键监测点温度值

Tab.3 Temperature values of key test points at the end of 90 s power-on for each cycle

时间/s	出口/℃	16 通道底板/℃	芯片/℃
90	52.59	91.69	108.76
780	57.34	96.09	113.16
1470	62.26	100.89	117.96



图 3 关键监测点温度变化

Fig.3 Temperature change curves of key test points: a) 16-channel backplane and chip temperature change; b) outlet fluid temperature change

3.3 后处理结果分析

根据计算结果可知,每个周期加电 90 s 后,16 通道底板(中间)的温度均低于 110 ℃。因此,导引 头的液冷散热设计满足 40%占空比,工作 90 s,断电 10 min 的边界条件。经过 3 个周期的测试,水箱中流 体温度最终超过 54 ℃,温升约 14 ℃。

图 3a 可以看出,液冷散热方案仍存在一定的完善空间。例如,在每个周期约 400 s 时,天线模块的 壳体温度已经降至 45 ℃左右的较低水平,在后续断 电冷却将近 300 s 的时间内,温度无明显变化。因此, 若每个测试周期节省 300 s,按照 40%占空比、加电 90 s 后断电的冷却方案,可以在原有总时间内,至少 完成 5 个周期的测试;可以在成本不变的情况下,显 著提高系留测试的效率。

采用 FloEFD 软件自带的后处理工具,处理整个 天线系留流体系统的流动迹线图,模拟天线系留过程 中流体的运行状态。液冷板内部流体流速分布情况如 图 4 所示。

由图 4 可以看出,由于内部结构复杂,流体速度 减弱明显甚至停滞。如线框区域的液冷板流道内存在 流体运动死区,会降低液冷散热效率。因此,需要考 虑液冷板内部结构设计的合理性。

4 结论

1) 基于有限元数值仿真计算,可以在产品设计



图 4 天线液冷板流速分布 Fig.4 Velocity distrbution of liquid cooling plate for antenna

早期得到产品的内部温度场分布以及关键元器件的 温度,并快速分析出产品热设计存在的短板,针对问 题及时予以修改,通过较少的设计迭代,满足产品的 技术要求。

2) 基于 FloEFD 模拟相控阵天线的空中系留条件,分析了天线在40%占空比发射、工作90s、断电10min、三个周期内的温度响应情况。仿真结果表明,流体出口处水温线性升高,天线模块壳体在每个周期内的温度最高点均低于110℃的温度极限,热设计能够满足空中系留测试试验的要求。

3)对比原测试方案,在系留总时间不变的情况 下,可将测试周期提升至5个。

参考文献:

- 廖桂生,徐经纬,李婕,等. 弹载相控阵雷达系统设计 与信号处理问题[J]. 航空兵器, 2017(1): 3-9.
 LIAO Gui-sheng, XU Jing-wei, Li Jie, et al. Key issue on system design and signal processing for missle-borne phased array radar[J]. Aero Weaponry, 2017(1): 3-9.
- [2] 梅启元. 热仿真分析技术在相控阵雷达天线散热设计中的应用[J]. 电子机械工程, 2007, 23(3): 11-13.
 MEI Qi-yuan. Application of thermal simulation on the cooling of a phased array antenna[J]. Electro-mechanical engineering, 2007, 23(3): 11-13.
- [3] 许连虎,杨科. 发控盒散热设计的热仿真及热测试分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 97-101.
 XU Lian-hu, YANG Ke. Thermal simulation and thermal test analysis of heat radiation design for control box[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(1): 97-101.
- [4] 于慈远,于湘珍,杨为民. 电子设备热分析/热设计/热 测试技术初步研究[J]. 微电子学,2000,30(5):334-337.
 YU Ci-yuan, YU Xiang-zhen, YANG Wei-min. A preliminary study on the techniques for thermal analysis/design/ test of electronic equipments[J]. Microelectronics, 2000, 30(5): 334-337.
- [5] GJB Z27—1992, 电子设备可靠性热设计手册[S].
 GJB Z27—1992, Thermal design manual for reliability of electronic equipment[S]

- [6] STEINBERG D S. Cooling Techniques for Electronic Equipment, 2nd Edition[M]. United States of American: A Wiley-Interscience Publication, 1991.
- [7] 冯静. 液体冷板计算仿真研究[J]. 船舶电子对抗, 2013, 36(2): 82-84.
 FENG Jing. Research into calculation and simulation of liquid cooling board[J]. Shipboard electronic countermeasure, 2013, 36(2): 82-84.
- [8] 丁成斌, 王克成等. 基于 Flotherm 的一种电源设备热 仿真分析[J]. 机电元件, 2011, 31(4): 28-31.
 DING Cheng-bin, WANG Ke-cheng, et al. Thermal simulation of power uint based on flotherm[J]. Electromechanical components, 2013, 36(2): 82-84.
- [9] 余军,马雅青,等. 电动汽车用液冷散热器的设计及仿 真[J]. 大功率变流技术, 2015(3): 51-53.
 YU Jun, MA Ya-qing, et al. Design and simulation of water-cooled radiator used in electric vehicle[J]. Hign power converter technology, 2015(3): 51-53.
- [10] 顾学歧,李峻勤. 冷板的优化设计及强度计算[J]. 北京 工业大学学报, 1998, 24(1): 24-32.
 GU Xue-qi, LI Jun-qin. The optimal design and strength calculation of cold plate[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1998, 24(1): 24-32.
- [11] 赵惇殳. 电子设备热设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

ZHAO Dun-shu. Thermal design of electronic equipment[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.