

1-8-2019

Numerical Simulation of Thermal Properties of Active Phased Array Antenna

Wang Yong

1. *China Electronics Technology Group Corporation No.10 Research Institute, Chengdu 610036, China;;*

Ting Lu

2. *University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;*

Longwen Wu

2. *University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;*

Changwu Xiong

1. *China Electronics Technology Group Corporation No.10 Research Institute, Chengdu 610036, China;;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Thermal Properties of Active Phased Array Antenna

Abstract

Abstract: *The grid priority modeling and multi-level meshing techniques are applied to analyze the thermal properties of the active phased array antenna with the micro/mini channels cooling method for simplifying modeling process, reducing the mesh quantity and saving the cost of computation effectively. The multi-level meshing technique can refine the mesh near the boundary of the complex components significantly without changing the mesh quantity in the model, which improves the mesh's quality obviously. Through the thermal simulation and experiment measurement of the antenna, the temperature and pressure field are obtained. It is proved that the addressed approach can advance the calculation efficiency and better simulation accuracy, which has an important engineering application value.*

Keywords

grid priority modeling technique, multi-level meshing technique, micro/mini channels, active phased array antenna, thermal simulation

Authors

Wang Yong, Ting Lu, Longwen Wu, Changwu Xiong, Weng Xia, and Ping'an Du

Recommended Citation

Wang Yong, Lu Ting, Wu Longwen, Xiong Changwu, Weng Xia, Du Ping'an. Numerical Simulation of Thermal Properties of Active Phased Array Antenna[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3526-3532.

有源相控阵天线散热特性的数值仿真

王勇¹, 卢婷², 吴龙文², 熊长武¹, 翁夏¹, 杜平安²

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 四川 成都 610036; 2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 为降低数值仿真中热分析模型的建模难度、减少网格数量、节约计算成本, 提出利用基于网格优先级建模方法和多级网格划分算法对采用微小流道液冷散热方式的有源相控阵天线模型进行热仿真分析。其中多级网格算法在不改变模型内部的网格数量, 可对天线复杂部件进行贴体网格划分, 明显提高网格质量。通过仿真计算和实验结果表明, 该分析方法可获得天线关键部件的温度和压力分布。在保证高精度计算条件下, 该建模方法和网格划分方法可提高计算效率, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 网格优先级建模方法; 多级网格划分算法; 微/小流道; 有源相控阵天线; 热仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 09-3526-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809037

Numerical Simulation of Thermal Properties of Active Phased Array Antenna

Wang Yong¹, Lu Ting², Wu Longwen², Xiong Changwu¹, Weng Xia¹, Du Ping'an²

(1. China Electronics Technology Group Corporation No.10 Research Institute, Chengdu 610036, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The grid priority modeling and multi-level meshing techniques are applied to analyze the thermal properties of the active phased array antenna with the micro/mini channels cooling method for simplifying modeling process, reducing the mesh quantity and saving the cost of computation effectively. The multi-level meshing technique can refine the mesh near the boundary of the complex components significantly without changing the mesh quantity in the model, which improves the mesh's quality obviously. Through the thermal simulation and experiment measurement of the antenna, the temperature and pressure field are obtained. It is proved that the addressed approach can advance the calculation efficiency and better simulation accuracy, which has an important engineering application value.

Keywords: grid priority modeling technique; multi-level meshing technique; micro/mini channels; active phased array antenna; thermal simulation

引言

随着微电子技术研究的不断深入, 电子产品尺寸越来越小、芯片集成度越来越高、热流密度越来越

越大、应用环境越来越复杂。当高功率芯片的热量不能及时散出, 设备内部就会造成热量积聚, 影响设备可靠性。据统计, 55%的电子设备失效是由温度过高引起的, 温度每降低 1℃, 失效率将下降 4%^[1]。半导体元件温度每升高 10℃, 可靠性降低 50%^[2]。所以热分析和热设计在电子设备、尤其军事设备中非常重要。目前电子设备的散热方式有很多, 在相控阵雷达研究初期, 由于内部电子器件热



收稿日期: 2016-11-25 修回日期: 2017-02-13;
基金项目: 国防基础科研计划重点项目(JCKY2013210B004);
作者简介: 王勇(1961-), 男, 四川郫县, 硕士, 研究员, 研究方向为电子设备热设计及结构设计。

<http://www.china-simulation.com>

• 3526 •

流密度不大, 所以多采用强迫气冷方式^[3-4]。但是随着科学技术的推进, 使得天线热设计需求不断增加。在二十世纪六十年代, 美国在研发阵列雷达^[5]时首次采用了冷板冷却方案, 得到液冷具有更好的散热能力。八十年代后期, Tuckerman 和 Pease^[6]创新性提出平直微流道可有效提高冷板散热效率, 并且当微流道水力直径越小, 其换热能力越强。尤其近年来通过对微流道换热的理论和实验研究, 发现其换热能力与模型结构参数、对流换热面积、肋片形状等息息相关^[7]。但是微小流道换热能力在空间尺寸一定时, 具有最优的换热能力^[8-9]。由此微小流道由于结构紧凑、经济成本低、换热能力好等特点被广泛应用于不同领域。使得目前越来越多的相控阵雷达散热研究中结合了微小流道技术和液冷散热方案, 从而有效地降低设备最高温度, 延长设备使用寿命。

但如今电子设备热设计方案越来越复杂, 采用理论分析方法求解非常困难。而数值分析方法以物理守恒定律为基础, 采用离散化计算方法可快速求解多偏微分方程组。这在产品设计开发阶段不仅避免利用重复的产品试验、更降低经济成本, 同时提高产品开发效率, 从而成为解决产品不同物理场耦合分析问题的有效途径^[10-14]。目前数值计算对产品流道热设计和热分析的研究很多, 并且根据研究发现模型建模和网格划分时间是整体模型计算的 60% 以上^[15]。所以数值仿真中如何对模型进行有效、快速的建模和网格划分从而得到模型分析结果, 仍是复杂产品热分析的一大难题。

由于 Icepak 软件可自动识别流、固交界面, 实现流-热耦合分析的快速建模, 能够进行多种网格划分, 所以本文利用 Icepak 对采用微小流道散热的机载有源相控阵天线热特性进行数值计算。其中, 网格优先级建模方法可快速建模, 降低建模难度; 多级网格对模型进行贴体网格划分可改善网格质量, 降低模型计算成本。这将在保证高计算精度的条件下大大提高建模效率, 缩短计算时间, 为复杂模型的热分析提供方法。

1 有源相控阵天线结构

目前有源相控阵天线极大地扩展了雷达的功能并提高了雷达性能, 进而提高和丰富了作战飞机执行任务的能力和作战模式, 所以广泛用于军事等领域。本文分析的 Ka 频段机载有源相控阵天线模型结构, 其外壳各方向的最大尺寸为 132.5 mm×133.5 mm×46.5 mm。相控阵天线由盖板单元、冷板单元和底板单元组成, 各单元内部包含多个组件和板件结构。其中冷板表面均布 4 个用于无线收发功能的 T/R 组件, 各组件内部芯片均匀分布。每个矩形芯片为 12.8 W, 尺寸 7 mm×5 mm×1 mm。则天线阵面 20 个芯片的总功率为 256 W, 如图 1 所示。

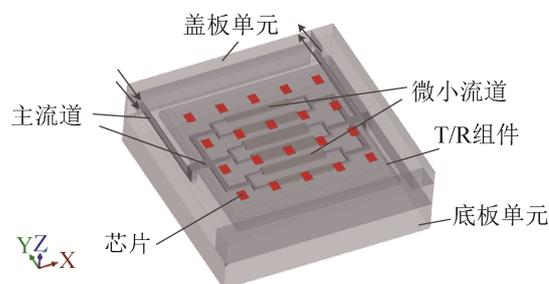


图 1 有源相控阵天线模型

Fig. 1 Model of active phased array antenna

通常气冷散热方式能解决的相控阵天线热控情况的热流密度小于 0.4 W/cm²。而目前微小流道散热能力理论可达到 1 000 W/cm², 所以为达到 Ka 频段机载有源相控阵天线散热需求, 使得芯片最高温度小于 100 °C, 本文天线模型液冷流道采用一体化技术与天线外壳集成, 局部高热流密度区域采用了微小通道散热技术, 从而提高天线整体散热能力, 使得天线不超过额定工作温度。

2 有源相控阵天线数学模型

计算流体动力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 是计算机通过利用基本的守恒定律对模型温度和速度的耦合物理场所做的分析^[16]。

由计算流体力学的理论分析可知, 模型物理场分布与多个因素相关。而本文天线模型采用稳态计

算并假设流体为牛顿流体,所以可得本文数值计算的有源相控阵天线数学模型为

固体内部热传导方程

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q = 0 \quad (1)$$

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

x、y 和 z 三个方向的动量方程

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (4)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

能量方程

$$\rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q \quad (6)$$

式中: λ 为热导率, W/m·K; T 为天线阵温度, °C; Q 为天线阵单位体积内热源, W; ρ 冷却工质的质量密度, kg/m³; c 为天线阵比热, J/kg·K; u , v , w 为流体沿 x, y, z 方向的流速, m/s; f_x , f_y , f_z 分别为单位质量流体所受到的作用力在方向 x, y, z 的分力, N; p 为由流体静压力和流体粘性所引起的表面力, N; μ 为流体粘性系数, kg/m·s;

根据入口处边界条件, 则得

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0, v = v_{in}, T = T_f \quad (7)$$

出口处边界条件

$$P_{out} = 1atm \quad (8)$$

式中: 入口速度为 v_{in} , m/s; 环境温度 T_f , °C; 出

口压力 P_{out} , Pa;

则根据模型边界条件求解上述偏微分方程即可得模型温度和流场分布。但是直接用理论求解较为困难, 所以本文利用数值计算方法对相控阵天线模型的物理场分布进行热分析。

3 天线热仿真模型的建模与网格划分

目前热仿真软件分为两种, 即通用型(ANSYS、COMSOL 等)和专业型(Icepak、Flotherm 等)。其中, 通用型软件的模型操作难度大, 针对性不强, 而 Icepak 具有多种优秀的建模和网格计算方法, 同时具备自动识别流、固交界面的能力, 所以广泛用于电子设备热分析和热设计。

一般模型数值仿真计算效果由两点判断: 准确性和经济性^[17]。即, 使用较低的计算成本来高效率的得到反映实际物理场分布的模型数值计算结果。所以当使用网格密度过大, 虽然可得到模型更为准确的结果, 但会导致模型计算过慢; 采用较少网格使得模型表达过于简单, 不能真实反映温度/压力等的分布和大小。所以如何在两者之间保持平衡是热分析计算的重要保证。

3.1 有源相控阵天线模型建模

一般传统建模方法由尺寸等约束定义的二维草图为依据, 通过三维实体拉伸等再得到模型实体结构。这种方法虽然可对任意结构进行建模, 但是这对专用电子设备, 如风扇、封装芯片等的热分析建模操作较为困难。而 Icepak 等专业电子设备热分析软件可对芯片级、板件级、组件级、系统级等不同层级采用不同的模型简化程度进行基于参数化的对象建模热分析。

其次, 针对流道内嵌于冷板中的复杂模型, 流体与冷板具有复杂结构的重合区域, 本文提出采用基于网格优先级建模方法。

当整体模型树中建立一个实体后, 根据其建模的先后顺序以数字编号作为该模型的优先级大小, 其中最新建立的模型其优先级最大。并且针对不同

类别的模型, 其优先级不同。如板件模型优先级大于实体模型。而针对优先级越大的模型, 其物理结构级别越高。即在对两模型重合区域进行网格划分时, 优先级高的模型所划分的网格会“覆盖”优先级低的模型的网格。所以针对冷板内部嵌入流道的复杂模型来说, 可对冷板实体和流体分别建模。如图 2 所示, 分别建立天线入口接头的固体实体模型和内部流体实体模型(即流道), 其中流体模型优先级高于入口接头的固体模型。在入口接头固体模型的网格划分, 与流体模型重合的区域中不具有网格。则该建模方法对于冷板液冷建模中降低了建模难度, 可快速得到冷板中内嵌的流道模型。

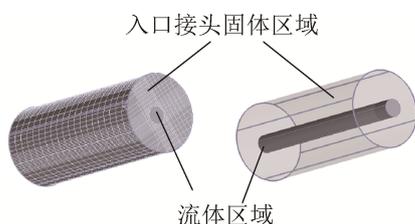


图 2 模型几何结构和网格划分
Fig. 2 Geometry model and mesh result

同时, 由于相控阵阵面出入口、芯片分布等的不同, 其热设计的液冷流道也不尽相同, 且一般其整体流道较为复杂。而在 Icepak 等专业分析软件中, 当保证两接触块体的材料参数一致, 并且接触表面为完全接触、不存在接触热阻时, 可认为该模型为一整体。所以针对相控阵天线, 本文在利用“拼接”的方法对相控阵天线非规则液冷冷板、流道等复杂模型建模。如本文相控阵天线的复杂流道, 可将整体流道进行“划分”, 以多个多边形实体完全接触, 从而得到整体流道模型。

所以利用基于网格优先级的建模方法, 不仅可提高建模效率, 同时对相控阵天线热设计优化时, 仅对需要局部加强换热能力处的流道重新建模, 而无需如传统建模方法中将整个流体模型重新建模, 从而大大降低模型建模难度。

3.2 有源相控阵天线模型网格划分

研究表明, 在 CFD 方法计算中, 网格划分占

整个计算进程时间的一半以上。但是如何得到一个网格数量适中、网格质量满足需求, 并且可达到所需求解精度的最优网格是数值计算的关键。

传统网格划分对 CAD 模型进行网格划分时, 整体模型采用 HD 网格划分方法, 同时由于微流道结构尺寸跨度过大, 所以对于微流道部分采用非连续网格进行局部加密。由此得到采用传统网格划分得到的网格结果见表 1。

表 1 模型网格结果
Tab. 1 Comparison of mesh quality with different mesh techniques

	多面体网格	传统网格	多级网格	网格变化
网格数量	5 357 322	3 523 165		34.24%
节点数量	5 594 481	3 558 685		36.39%
网 格 质 量	Face alignment	0.297 1~1	0.404 1~1	-
	Volume	3.38×10^{-13} ~	6.67×10^{-12} ~	-
	Skewness	7.16×10^{-9}	2.66×10^{-7}	-
量		0.15~1	0.213 6~1	-

而同时 Icepak 提供了一种多级网格划分算法 (multi-level meshing)。多级网格算法在对复杂结构建模时, 尤其是对具有结构多变、非规则几何形体以及表面特性较为复杂的模型, 可以对模型复杂表面处进行局部的网格加密, 在不增加模型内部网格数量的同时, 可以采用较小的网格尺寸来增加模型边界的网格数量和网格密度。从而使得整体网格划分不失真地表达模型, 极大地改善网格质量, 提高计算效率。

根据网格不同加密程度的设置, 对于模型的贴体网格密度也不同。一般在对模型热分析时, 建立的所有模型均需要在立方体的计算域内进行建模, 其计算域的优先级最低。所以针对整体模型计算域的网格参数设置也称为背景网格参数。在多级网格划分中, 假设整体模型的背景网格为 0 级, 当其背景网格在 x、y、z 三个方向上组成的网格尺寸大小为 n, 则 1 级网格尺寸为背景网格尺寸的 1/2, 2 级网格尺寸为 1 级网格尺寸的 1/2, 以此类推。所以当多级网格的设置级数越大, 模型表面附近生成的网格尺寸更小、网格密度更大, 保证网格划分

结果对模型拟合精度的同时,不增加模型内部的网格数量。但是当网格级数超过 4 级时,由于网格密度过大,使得模型网格数量急剧上升,所以为控制模型网格数量,一般需要合理平衡背景网格尺寸和多级网格级数的大小,使其得到较为合理的网格划分结果。

由于液冷散热中流体流动换热系数是决定天线功率芯片换热的关键因素,所以针对本文模型数值计算的网格划分中,对建立的流体模型采用 3 级的多级网格设置方式,其多级网格划分见图 3。

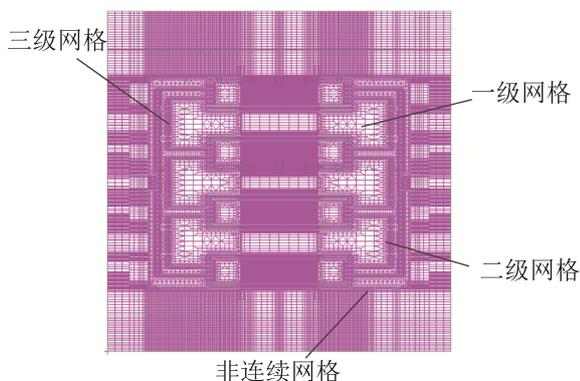


图 3 多级网格的截面网格划分结果
Fig. 3 Result of multi-level meshing technique

当保证整体模型的背景网格参数与传统网格划分方法的尺寸相同,同时由于微流道换热为天线散热的关键方式,所以同时保证流道网格密度基本一致时,得到其网格划分结果见表 1。

当评判网格质量标准的数值越大,则网格质量越好。所以根据本文对同一天线模型不同的网格划分方法得到的网格对比分析可知,当采用多级网格划分方法,在保证模型较高网格密度的同时,提高网格贴体性和网格质量、大大降低模型网格数量,减小计算成本,提高模型计算效率。并且根据研究发现当分析模型结构越复杂,其多级网格划分所降低的网格数量越大,优势越明显。

4 相控阵天线的数值仿真与实验验证

为验证基于网格优先级建模方法和多级网格划分方法计算结果的可靠性,在相同边界条件下,

本文利用数值仿真和实验验证方法对某 Ka 频段的机载相控阵天线的芯片最高温度和进出口压降进行对比分析。

4.1 天线阵面数值仿真

首先对有源相控阵天线散热模型的数值计算做出以下假设: 1.流体为定常且不可压缩; 2.适用 Navier-Stokes 方程; 3.流体在壁面处流速为零; 4.不考虑自然对流和热辐射; 5.入口处的流速均匀分布,出口为静压。采用稳态条件下的湍流模型进行计算。控制方程采用 SIMPLE 算法,差分格式为二阶差分。动量收敛因子为 0.7,压力收敛因子为 0.3。采用 Icpak 基于网格优先级的建模方法和多级网格划分算法对模型前处理,并利用 Fluent 求解器对相控阵天线冷板进行数值分析。

冷却工质为水溶液,冷板材料采用铝合金,环境温度为室温。已知天线入口处的泵送的流量一定,为 0.8 L/min,则由

$$Q=vA \tag{9}$$

其中, $A=\pi r^2$ 为流道的横截面, r 为入口端流道半径 1.75 mm。则模型的入口速度为 1.39 m/s。

由于数值计算中网格密度直接决定了模型分析结果的准确性,所以为验证相控阵天线数值计算的网格无关性,本文采用不同网格数量对比模型数值分析结果见表 2。

表 2 仿真与实验结果对比分析
Tab. 2 Comparison of the results of simulation and experiment

多面体网格	数值分析结果			
	压降 kPa	最高温度 /°C	最低温度 /°C	
网格数量	1 876 934	14.5	53.9	48.5
	2 947 593	14.3	53.1	48.1
	3 523 165	14.3	53.1	47.9
实验验证	16.2	59.7	53.3	
误差/%	11.7	11.1	10.1	

其中增加网格数量的同时也提高了模型网格密度,所以本文利用不同网格数量来表示网格密度的改变。则天线阵面数值仿真结果如图 4 所示。

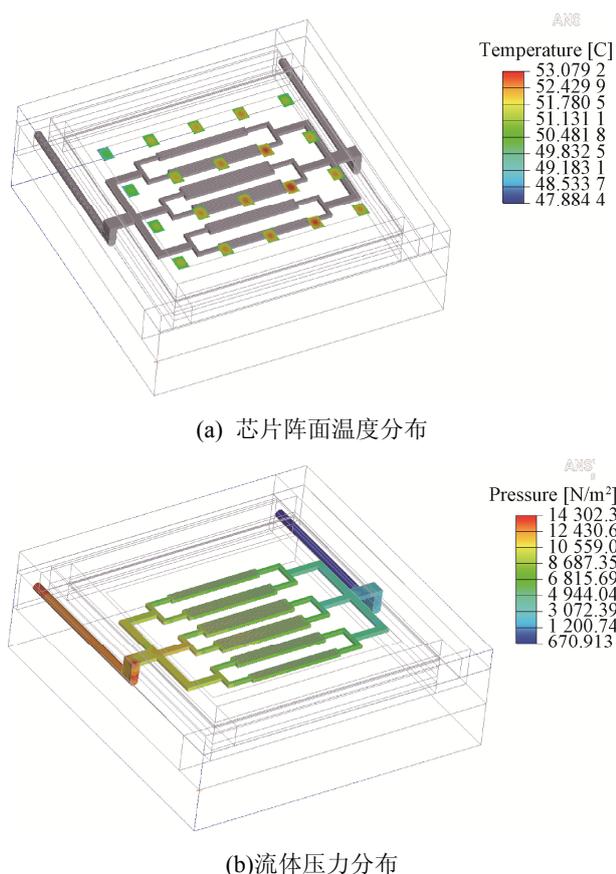


图 4 微流道的天线模型数值结果

Fig. 4 Numerical results of antenna model with the microchannel cooling

4.2 天线阵面试验验证

目前天线阵面的加工工艺多采用焊接方式。但是由于液冷冷板内嵌散热流道, 所以根据传统的机械加工的限制, 使得天线冷板需要将整体流道分为上下两部分加工, 再通过焊接、挤压等手段将冷板组装。但是这使得微小流道由于厚度过小且分布在冷板内部, 使得无法保证微小流道处的密封性。而 3D 打印技术是一种利用不同可粘合材料通过逐层堆叠累积来构造物体的快速成型加工方式。这种增材制造工艺不仅可对任意复杂产品进行加工, 同时由于产品一次成型, 所以保证了天线阵面液冷流道的密封性。所以本文采用增材制造加工(3D 打印技术)相控阵天线样件。并且利用高温陶瓷发热片模拟 20 个阵面芯片, 实验平台如图 5 所示。

整体实验平台液路循环工作主要分为以下几

步: 1. 由齿轮泵为液冷实验样件提供输入的泵送压力; 并利用流量计输出脉冲信号, 使得积算仪可显示该电压下为实验平台提供的流量大小; 2. 当液冷工质进入样件冷板单元中的流道对天线阵面进行散热由出口流出后, 为保证实验平台工质循环工作, 同时不堵塞冷凝器和过滤器的管路, 使出口液冷工质首先通过过滤器, 除去经过液冷通道中进入工质中的杂质, 再进入冷凝器/齿轮泵中工作; 3. 通过冷凝器的工质进入储水罐中储藏, 当第二次进入样件冷却时再进入齿轮泵中以循环工作; 4. 在冷却工质对样件表面芯片进行散热时, 利用压差变送器测量样件进出口压力差, 同时外接数据采集仪按一定频率采集热电偶信号, 由于温度变化热电偶会产生微小的电势差, 从而得到随时间变化的温度值。



图 5 液冷实验平台实物图(不包含电源)

Fig. 5 Liquid-cooled physical experiment platform (does not include the power supply)

本文以芯片中心点温度作为芯片温度监测点结果。所以通过实验结果数据分析, 得到阵面实测芯片的最高温度及流道压降, 与利用不同网格密度得到的仿真结果对比见表 2。

由表 2 可知, 当天线网格密度不断增加, 模型数值分析结果逐渐接近于“精确值”。但是当模型网格数量越多, 计算成本越大。并且根据数值计算和实验结果对比分析, 实验数据的温度和压降大小比仿真结果更大, 两者数据误差在 10% 左右。这是由于实验天线阵面的流道具有一定的表面粗糙度, 并且流道和芯片间的热传递路径存在接触热阻等

的影响。所以本文采用的基于网格优先级建模方法和多级网格划分方法在保证高计算精度的同时,对控制模型计算成本具有一定积极作用,能够作为复杂天线模型的仿真方法,可为相控阵天线热分析和热设计提供指导意义。

5 结论

本文采用基于有限体积法的 Icepak 软件,以机载液冷微小流道有源相控阵天线热分析模型为例,介绍在 Icepak 分析过程中模型建模以及网格划分的优势。与传统建模与网格划分方法相比,本文利用基于网格优先级的模型建模方法,可降低模型建模难度;多级网格算法可大大提高网格贴体性,提高网格质量,降低模型计算成本。仿真结果和实验验证数据表明,利用本文数值求解方式可以反应模型实际物理场分布,得到模型温度和压力结果,同时计算模型具有较高的计算精度。所以针对模型热设计优化具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 段奇君. 面向电性能的天线冷板综合优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 1-4.
Duan Qijun. Comprehensive Optimization Design of Cold Plate of Antenna Oriented to Electrical Performance[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 1-4.
- [2] 刘培生, 仝良玉, 陶玉娟, 等. 精简热模型在集成电路封装中的应用研究[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(5): 48-51.
Liu Peisheng, Tong Liangyu, Tao Yujuan, et al. Application Study of Compact Thermal Model in IC Packaging[J]. Electronic Components and Materials, 2013, 32(5): 48-51.
- [3] Han J C, Glicksman L R, Rohesenow W M. An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-roughened Surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(8): 1143-1156.
- [4] Mike S. SAMPSON MFR Active Phased Array Antenna [C]// Phased Array Systems and Technology. IEEE International Symposium on. IEEE, 2003: 119-123.
- [5] Haupt R L, Rahmat-Samii Y. Antenna Array Developments: A perspective on The Past, Present And Future[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine (S1045-9243), 2015, 57(1): 86-96.
- [6] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance Heat Sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters (S0741-3106), 1981, 2(5): 126-129.
- [7] Ndao S, Peles Y, Jensen M K. Effects of Pin Fin Shape and Configuration on the Single-phase Heat Transfer Characteristics of Jet Impingement on Micro Pin Fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer (S0017-9310), 2014, 70: 856-863.
- [8] 何颖, 邵宝东, 程赫明. 矩形微通道散热器流道的数值模拟及尺寸优化[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(3): 278-286.
He Ying, Shao Baodong, Cheng Heming. Numerical Simulation and Size Optimization of Rectangular Micro-Channel Heat Sinks[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(3): 278-286.
- [9] 张钊, 李林林, 郑朴, 等. 芯片水冷式微通道散热器的优化设计[J]. 制冷与空调, 2015, 15(5): 32-37, 59.
Zhang Zhao, Li Linlin, Zheng Pu, et al. Optimal Design of Water-cooled Micro-channel Radiator for Chips[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(5): 32-37, 59.
- [10] 邱丽原. 相控阵雷达天线模型及仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(2): 151-155.
Qiu Liyuan. Model and Simulation of Phased Array Radar Antenna[J]. Journal of System Simulation, 2014, 29(2): 151-155.
- [11] 张爱清, 徐建波, 刘勇. 某电子设备热设计的数值模拟研究[J]. 电声技术, 2011, 35(12): 32-36.
Zhang Aiqing, Xu Jianbo, Liu Yong. Investigation on Thermal Design for an Electronic Equipment by Numerical Simulation[J]. Audio Engineering, 2011, 35(12): 32-36.
- [12] 刘兵. IcePak 软件在电子设备热设计中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2013, 9(5): 1151-1153, 1165.
Liu Bing. Application of Icepak Simulation Software in Thermal Designing of Air-cooling Equipment[J]. Computer Knowledge and Technology, 2013, 9(5): 1151-1153, 1165.
- [13] 董伟杰, 孟晓丽, 宋晓辉, 等. IGBT 散热器设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2095-2100.
Dong Weijie, Meng Xiaoli, Song Xiaohui, et al. IGBT Radiator Design and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2095-2100.