

热-力-电耦合下天线罩电性能仿真及分析

吉建民, 王伟, 余慧龙, 刘涓, 陈博

(北京遥感设备研究所, 北京, 100854)

摘要 在实际飞行工况下, 热力载荷会改变高速飞行器天线罩原有的电磁特性, 从而影响制导性能。提出了一种基于六面体网格划分的热-力-电耦合模型及仿真方法, 可准确表征高速飞行工况下天线罩介电温漂和结构变形对电性能的影响。基于天线罩热-力-电共享网格模型, 首先通过瞬态热仿真得到天线罩响应温度场, 通过静力分析得到天线罩结构变形场。然后, 将天线罩介电温漂和结构变形准确传递到其电磁仿真模型中, 并采用三维射线跟踪法计算其电性能。最后通过一个典型算例对高速飞行工况下天线罩电性能的变化进行仿真和分析, 结果表明电性能变化非常明显, 也进一步说明了所提方法的可行性和研究的必要性。

关键词 高速飞行器; 天线罩; 热-力-电耦合; 介电温漂; 结构变形; 电性能

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.001

中图分类号 TN820.8; TJ760.2 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0002-10

A Simulation Analysis of Electrical Performance of Radome under Condition of Thermo-Mechanical-Electrical Coupling

JI Jianmin, WANG Wei, YU Huilong, LIU Juan, CHEN Bo

(Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract For high speed aircrafts radome, the performance of guidance system is often affected with thermal and mechanical loads changing its original electromagnetic characteristics under actual flight conditions. A Thermo-Mechanical-Electrical (TME) coupling model based on hexahedral mesh partitioning and a simulation method are proposed, and these two methods being employed, the effects of dielectric temperature drift and structural deformation on the electrical performances of radome at high-speed flight can be characterized accurately. First, based on the TME Sharing Mesh Model (TME-SMM), the temperature field of radome is obtained by transient thermal simulation, and the deformation field of radome is obtained by static analysis. And then, the dielectric temperature drift and structural deformation of radome are accurately transferred into its electromagnetic simulation model, and the electrical performance of radome is calculated by three-dimensional ray tracing method. Last, a typical example is utilized for simulating and analyzing the variation of the electrical performance of radome at high-speed flight. The results show that the variation is obvious, and the feasibility and research necessity of the method are further illustrated.

Key words high speed aircrafts; radome; thermo-mechanical-electrical coupling; dielectric temperature drift; structural deformation; electrical performance

收稿日期: 2023-05-30

作者简介: 吉建民(1987—), 男, 江苏涟水人, 高级工程师, 研究方向为天线罩技术。E-mail: huaian.jjianmin@163.com

引用格式: 吉建民, 王伟, 余慧龙, 等. 热-力-电耦合下天线罩电性能仿真及分析[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 2-11. JI Jianmin, WANG Wei, YU Huilong, et al. A Simulation Analysis of Electrical Performance of Radome under Condition of Thermo-Mechanical-Electrical Coupling[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 2-11.

天线罩可保护雷达天线免受极端环境载荷影响,是保证电磁波正常传输的防护壳体^[1-3]。但在实际应用中,天线罩会造成电磁波的能量衰减和相位延迟,进而改变天线原有的电磁辐射特性^[2]。功率传输系数和瞄准误差是天线罩的两项关键指标,分别影响着雷达的探测距离和目标指向精度^[3]。

随着作战技术要求的不断提高,飞行器的飞行速度和打击距离也在不断提高。高速飞行器天线罩承受严酷的气动热、气动力和惯性载荷^[4-6],因此必须对其材料和结构进行精心选择和设计。高速飞行工况下,天线罩受热会诱发材料介电温漂、受热膨胀、受力变形,这都将改变其原有的电磁特性,造成其功率传输系数和瞄准误差偏离原设计值,影响雷达探测性能^[7-9]。为保证天线罩电性能设计的天地一致性,需要实现热、力、电耦合设计,从而有效表征温度响应和结构变形对天线罩电性能的影响。目前,受测试技术的限制,在热力载荷联合作用下测试天线罩电性能是非常困难的。因此,发展数值模拟技术是分析和评价高速飞行工况下天线罩电性能的有效、可行的途径。

如何建立高速飞行器天线罩的热-力-电耦合模型是精确计算实际工作条件下天线罩电性能的关键。Sonalikar 等基于非均匀平面层(IPLs)模型分析了介质平板电性能随温度的变化^[10-11]。Nair 等将天线罩划分为几个窗口区域,通过 IPLs 模型来表征每个窗口罩壁的温度梯度效应,并利用三维射线追踪方法分析了天线罩的电性能^[12]。Parameswaran 等对该方法进行了改进,采用分段插值法更好地模拟了天线罩表面温度场的光滑连续分布^[13],并进一步考虑了热膨胀系数对天线罩壁厚的影响^[14]。上述方法计算高速飞行工况下天线罩电性能采用的射线跟踪法都基于天线罩几何方程,不能适应复杂结构,难以准确表征温度场的三维梯度分布。在实际应用中,天线罩结构往往比较复杂、多样,且在带攻角飞行时,其温度响应呈三维梯度分布。王从思等采用网格划分的机电耦合模型分析了高温烧蚀下天线罩的电性能,分析了壁厚烧蚀量和材料介电温漂对电性能的影响,但未考虑结构变形和罩壁厚方向的介电梯度分布的影响^[15]。张俊武等基于 ANSYS Multiphysics 和 FEKO 软件,研究了天线罩热-电联合仿真方法,其模型处理复杂、计算效率较低,且未考虑结构变形对电性能的影响^[8]。

本文提出了一种基于六面体网格划分的热-力-电耦合仿真方法,可以实现准确表征高速飞行工况下介电温漂和结构变形对天线罩电性能的影响。最后,针对一个典型实例,仿真并分析高速飞行工况下天线罩电性能的变化及原因。

1 热-力-电耦合仿真的总体思路

天线罩热-力-电耦合仿真的基本流程如图 1 所示。

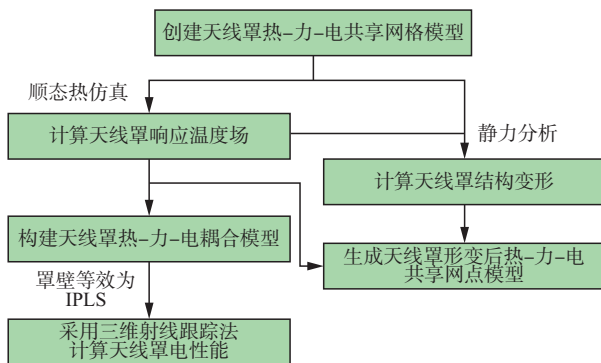


图1 天线罩热-力-电耦合仿真流程

步骤1 创建热-力-电共享网格模型。使用六面体单元网格化天线罩的几何结构,生成天线罩热-力-电共享网格模型,如图2所示。沿罩体厚度方向划分 N_L 层单元,网格尺寸一般不大于单个工作波长,网格划分越密表征温度诱发罩体材料介电特性的梯度分布越精确,但计算效率会相应降低。

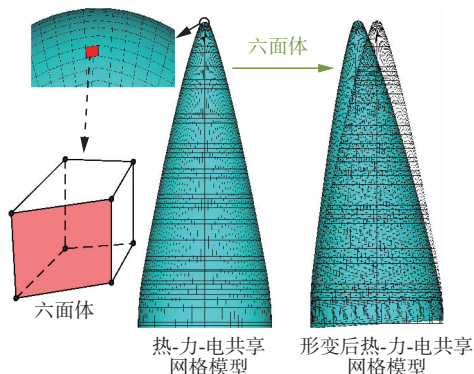


图2 基于六面体网格划分的热-力-电共享网格模型

步骤2 计算响应温度场。在高速飞行过程中,受大气阻力作用,天线罩遭受剧烈的气动加热,其响应温度场呈空间梯度分布,并动态变化。在工程设计中,天线罩的气动热载荷一般为随时间变化的热流或温度。基于热-力-电共享网格模型,可利用 ANSYS、ABAQUS 等软件通过瞬态热仿真,获得飞行工况下天线罩瞬时温度场,如图3所示。

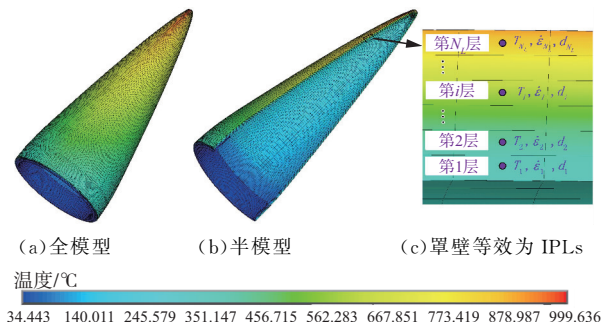


图3 天线罩温度场的三维梯度分布

步骤 3 计算结构变形。在高速飞行中,天线罩的外部力载荷主要为气动力和惯性载荷,通常以天线罩不同截面的弯矩、剪力、轴力作为设计输入载荷形式。根据力载荷特点以及步骤 2 计算的瞬时温度场,基于热-力-电共享网格模型,同样可利用 ANSYS、ABAQUS 等软件,通过静力分析得到所选择的典型时刻的热力载荷联合作用下结构变形场。结构变形包含热膨胀变形和受力变形。

步骤 4 构建热-力-电耦合模型。根据步骤 3 计算出的天线罩结构变形量,将热-力-电共享网格模型中所有网格节点的原始坐标与其位移量叠加,得到变形后热-力-电共享网格模型(见图 4),进而准确表征飞行工况下天线罩结构尺寸。根据步骤 2 计算出的温度场,利用在不同温度下材料介电参数的实测数据,得到变形后热-力-电共享网格模型的介电特性分布。至此,完成天线罩热-力-电耦合模型的创建。

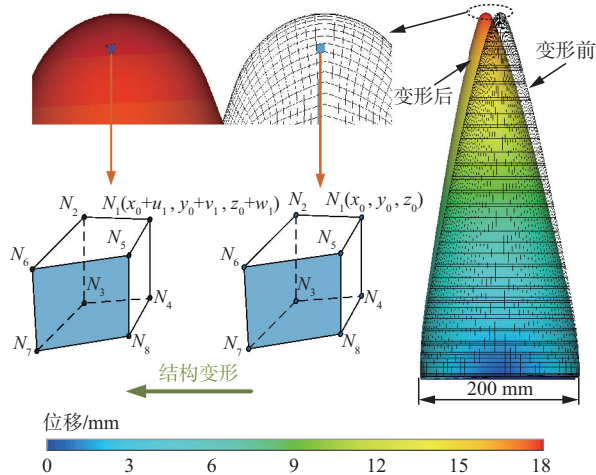


图 4 天线罩变形场及其变形后热-力-电共享网格模型生成

2 基于热-力-电耦合模型计算电性能

如图 5 所示,天线罩内的天线为平面阵列天线, N_s 个辐射源以“十”字网格形式排布。天线主波束方向的单位矢量为 $\mathbf{P}_{OI}$ 。沿着天线主波束方向,每个辐射源点发出的射线与天线罩壁确定一交点 I 。在交点 I 处,罩壁外法线单位方向矢量为 $\mathbf{n}_{OI}$ 。 $\mathbf{P}_{OI}$ 和 $\mathbf{n}_{OI}$ 构成入射面,其夹角为入射角 θ_0 。入射电磁波的单位电场为 $\mathbf{E}_I$,可分解为平行于入射面的水平极化电场 $\mathbf{E}_H$ 和垂直于入射面的垂直极化电场 $\mathbf{E}_V$ 。极化面由 $\mathbf{E}_I$ 和 $\mathbf{E}_V$ 构成。 $\mathbf{E}_I$ 与入射面夹角称为极化角 φ_{OI} 。

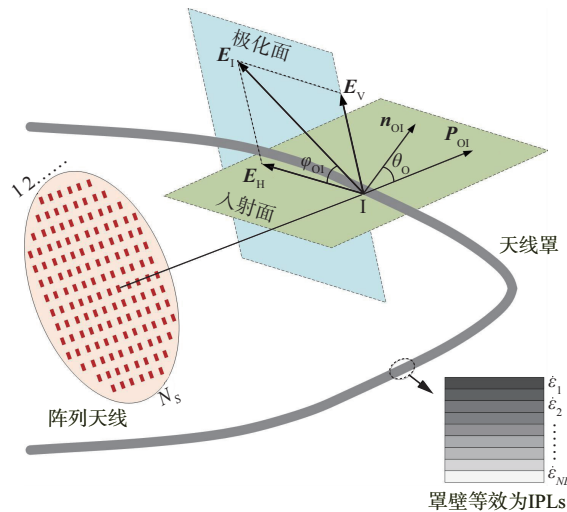


图 5 高速飞行工况下天线-天线罩系统

利用三维射线跟踪法^[2-4],在每条射线的交点 I 处分析电磁波通过天线罩壁的传播特性。在交点 I 处,天线罩壁由 N_L 层六面体单元垒叠而成,为准确表征罩壁厚度方向上因温度诱发的介电梯度分布,将罩壁等效建模为 IPLs,如图 3(c) 所示,即根据已计算出的天线罩温度场,可以很容易地获得第 i 层六面体单元中心点的温度 T_i ,再根据材料随温度变化的实测介电参数,求得该处的复介电常数 $\dot{\epsilon}_i$,即第 i 层六面体单元的介电参数。这样,每条射线都能获得唯一的罩壁结构,进而准确表征高速飞行工况下天线罩电磁特性。

对于每条射线到达罩壁的平面波,可采用等效传输线理论分析其在多层介质平板中的传输特性,进而得到电磁波穿过天线罩后天线口面单元的等效场,并通过积分得到带罩天线远场方向图^[2]。

$$S = \frac{\sum_{n=1}^{N_s} F_n^a T_n^{\text{co}} e^{j \frac{(x_n \sin \theta \cos \varphi + y_n \sin \theta \sin \varphi + z_n \cos \theta)}{\lambda_0}}}{\sum_{n=1}^{N_s} |F_n^a|} \quad (1)$$

式中: T_n^{co} 、 F_n^a 和 (x_n, y_n, z_n) 分别为天线口面上第 n 个辐射单元的复透射系数、电场幅值加权和坐标; θ 和 φ 为天线空间球坐标系中的角度。将天线的和口面加权、差口面加权分别代入式(1)即可获得带罩天线辐射的远场和、差方向图,进而得到天线罩的传输系数 C_{PT} 和瞄准误差 E_{BS} :

$$C_{PT} = \frac{|S_{\text{peak}}^{\text{sum}}|_{\text{with radome}}}{|S_{\text{peak}}^{\text{sum}}|_{\text{without radome}}} \quad (2)$$

$$E_{BS} = \text{angle} |S_{\text{peak}}^{\text{sum}}|_{\text{with radome}} \quad (3)$$

瞄准误差也可以表示为:

$$E_{BS} = \text{angle} |S_{\text{null}}^{\text{diff}}|_{\text{with radome}} \quad (4)$$

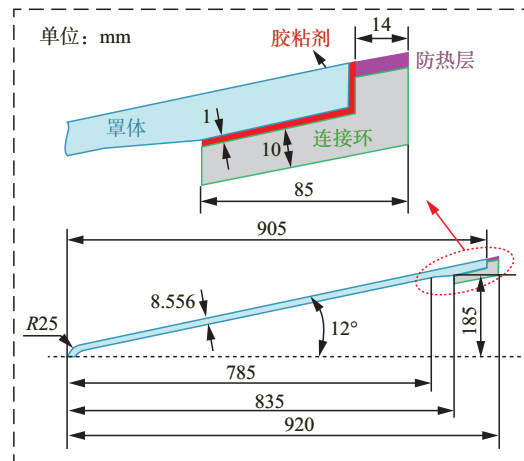
式中: $|S_{\text{peak}}^{\text{sum}}|_{\text{with radome}}$ 和 $|S_{\text{peak}}^{\text{sum}}|_{\text{without radome}}$ 分别为带罩和不带罩的天线远场和方向图的峰值; $|S_{\text{null}}^{\text{diff}}|_{\text{with radome}}$ 为带罩天线远场差方向图的零深; angle 表示远场和方向图峰值或差方向图零深所在的角度位置。

3 实例仿真与分析

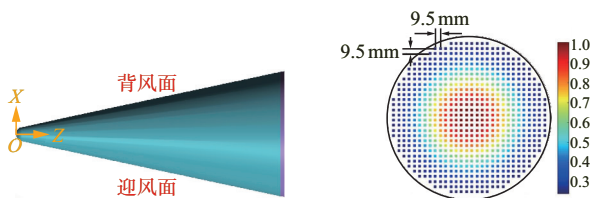
3.1 高速飞行器天线-天线罩系统

天线-天线罩系统包括天线罩和阵列天线,如图 6 所示。天线的口面直径为 0.3 m,位于距天线罩底部 0.2 m 处,安装在旋转中心偏移量为零的方位/俯仰万向节上,工作频率为 16 GHz,含有 716 个辐射单元,单元间隔为 9.5 mm;口面电场为垂直极化,加权分布为最大副瓣-30 dB 的泰勒圆孔径分布。天线罩是由罩体、连接环、防热层和胶粘剂组成的回转对称结构。罩体材料为微晶玻璃 9606,其具有优异的机械性能、抗热震和抗雨蚀性能^[16]。连接环材料为钛合金,利用硅橡胶胶粘剂将罩体粘接到连接环上。防热层是一种低导热、耐高温的隔热涂层。天线罩各部件的材料物理性能见表 1。罩体透

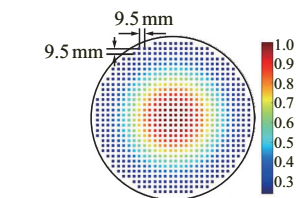
波区域设计为二阶半波长等壁厚,并在方位和俯仰扫描范围($\pm 40^\circ$)内保证常温下最小功率传输系数最大化。



(a) 天线罩尺寸



(b) 天线罩模型



(c) 阵列天线的口面加权分布

图 6 高速飞行器天线-天线罩系统

表 1 天线罩各部件材料物理性能

部件参数	罩体			连接环	胶粘剂	防热层
	25 °C	500 °C	1 000 °C			
相对介电常数	5.65	5.80	6.10			
损耗角正切	0.000 2	0.001 0	0.005 0			
弹性模量/GPa	120	120	100	102	0.001 5	0.003
泊松比		0.245		0.3	0.48	0.42
密度/(g/cm ³)		2.61		4.85	0.8	0.9
比热容/(kJ/(kg·K))		1.05		0.544	1.56	1.3
热导率/(W/(m·K))		2.6		7.44	0.47	0.2
热膨胀系数/10 ⁻⁶ K		5.7		9.36	200	30

3.2 热力分析

天线罩在带攻角飞行时,其外表面的气动热载荷是非回转对称的,有迎风面和背风面之分,如图 6 (b)所示。天线罩外表面温度载荷沿轴向和周向呈

二维变化,其中沿周向 0°对应迎风面,180°对应背风面,如图 7 和图 8 所示。从头部到尾部,沿轴向整体温度下降幅度较大。从迎风面到背风面,沿周向温度也明显减小。

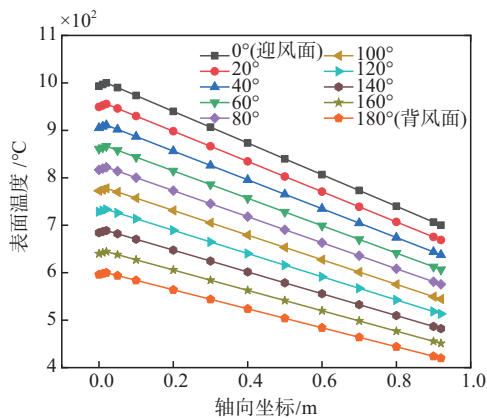


图7 温度载荷

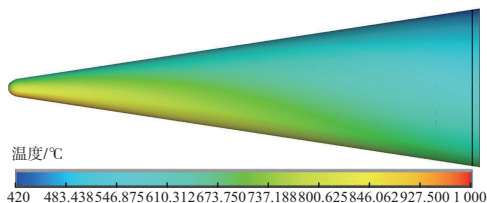


图8 天线罩外表面温度载荷场

天线罩在飞行过程中承受相应的力载荷,其不同截面的弯曲载荷,如图9所示。

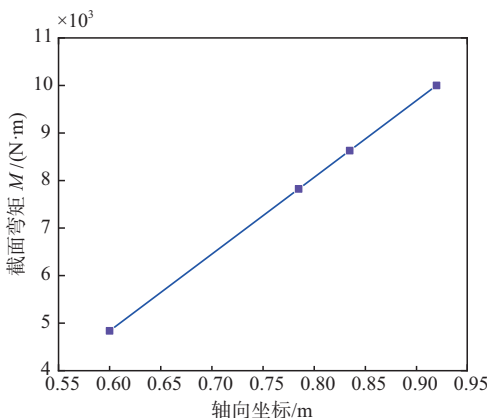


图9 天线罩不同截面的弯曲载荷

3.2.1 温度响应

根据温度载荷,通过瞬态热仿真得到天线罩在不同时刻的温度响应,如图10所示,温度场随时间不断变化,呈现非回转对称性,罩壁厚度方向存在明显的温度梯度。

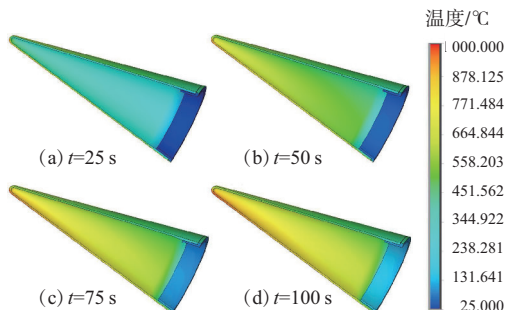


图10 不同时刻天线罩温度场分布

结合图10和表1可知:罩体的温度梯度分布直接反映其介电参数的梯度分布,响应温度场不断变化将导致其电性能不断变化。

3.2.2 结构变形

在高速飞行中,天线罩受热膨胀产生热变形,在力载荷作用下发生机械变形。通过静力分析可以得到天线罩在热力载荷联合作用下的变形场。这里选取 $t = 50$ s 时天线罩的温度场作为热载荷,如图10(b)所示,可得以下计算结果:

1) 单独热载荷作用下天线罩热膨胀产生的热变形如图11(a)所示,天线罩最大位移为 3.64 mm。

2) 热力载荷联合作用下的天线罩变形场如图11(b)~图11(d)所示,其力载荷分别为图9中力载荷的 1/10、1/2、1 倍,天线罩最大位移分别为 3.77 mm、4.39 mm、5.25 mm。

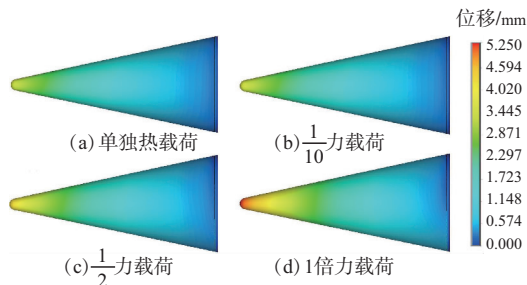


图11 不同热力载荷作用下天线罩变形场

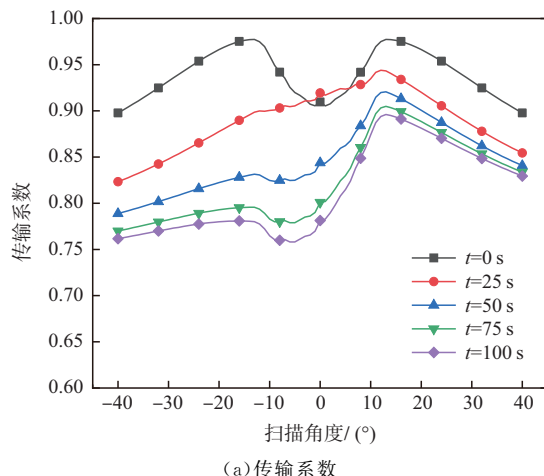
3.3 电性能分析

3.3.1 介电温漂对电性能的影响

在不考虑结构变形影响时,俯仰扫描下天线罩的传输系数与瞄准误差如图12所示。可以发现:

1) 随着时间的推移,天线罩传输系数显著降低。其主要原因是:天线罩整体温度不断升高,导致罩体介电常数不断升高,造成罩壁电厚度不断增加,使其偏离原来设计的最佳电厚度。

2) 天线罩传输系数与瞄准误差都呈现明显的不对称性。其主要原因是:带攻角飞行时,在俯仰面内温度场呈现明显不对称性,加剧了天线罩引起的天线口面单元电场振幅衰减和相位延迟的不对称。



(a) 传输系数

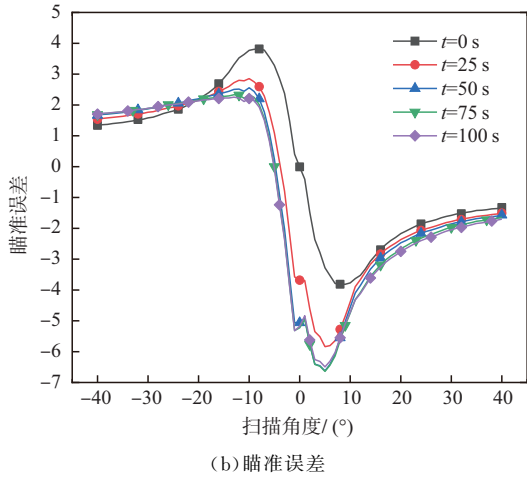


图12 不考虑变形影响天线罩传输系数及瞄准误差

设扫描角为 α ,在典型的俯仰扫描角下($\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha=5^\circ$ 、 $\alpha=12^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$),带罩天线口面单元的电场传输系数与插入相移分别如图13和图14所示。其中, $\alpha=5^\circ$ 时天线罩瞄准误差最大, $\alpha=12^\circ$ 时天线罩功率传输系数最大, $\alpha=30^\circ$ 时天线罩瞄准误差较小。通过总结可以发现:

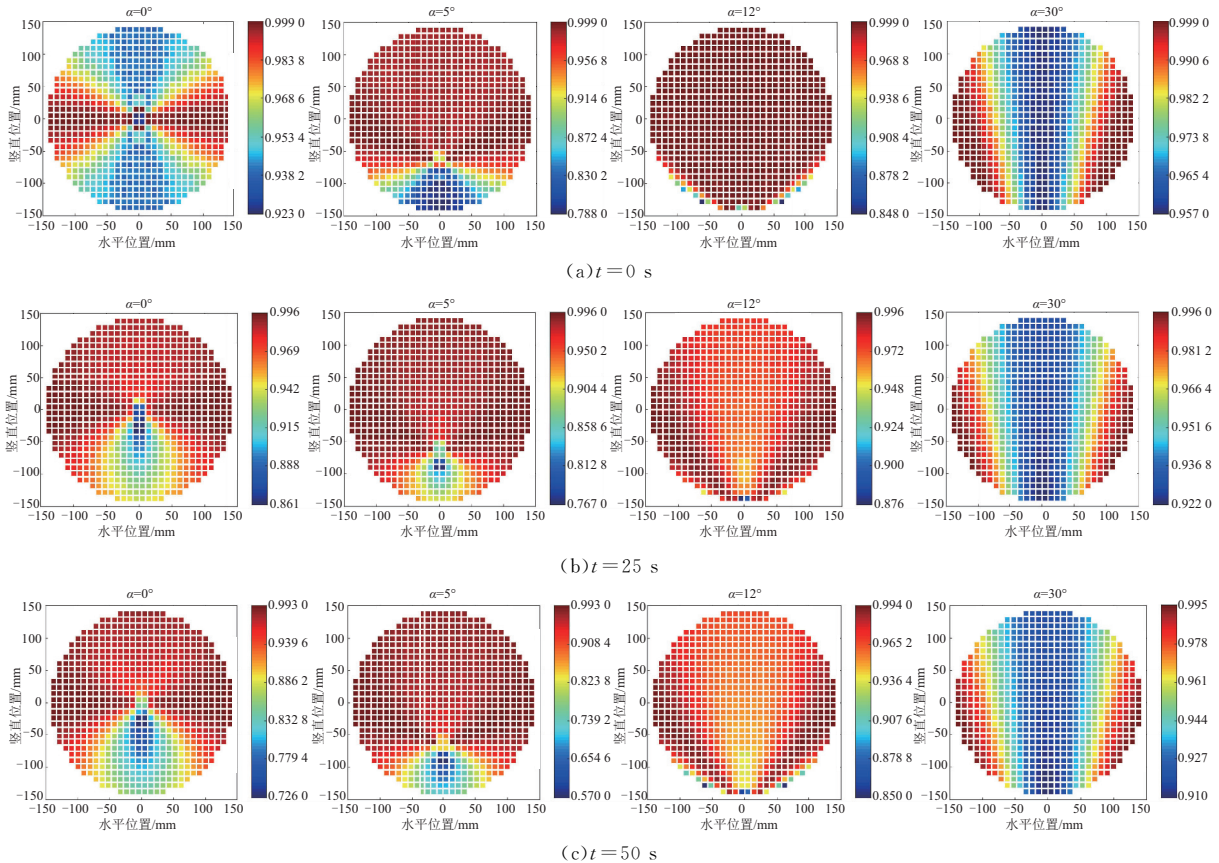
1)在所有典型时刻:俯仰扫描角为 12° 时,天线口面单元的电场传输系数整体较高,除口面下边沿辐射单元外,其他辐射单元的电场传输系数都不低于0.91,尤其是口面中心区域(口面加权最大区域)

辐射单元的电场传输系数都不低于0.94,这是在该角度下天线罩传输系数最大的主要因素。

2)在所有典型俯仰扫描角下:随着时间的推移,带罩天线口面单元的电场传输系数逐渐下降,其造成天线罩传输系数也相应地下降。

3)在俯仰扫描角 5° 下:所有典型时刻的带罩天线口面单元的电场传输系数分布的波动最大;除 $t=0$ s时,其他典型时刻的带罩天线口面单元的电场插入相移分布的波动最大。这说明天线罩瞄准误差除主要受天线口面单元的电场插入相移分布的不对称性影响外,口面单元的电场传输系数分布的不对称性也会产生一定程度的影响。

4)在俯仰扫描角 30° 下:所有典型时刻的带罩天线口面单元的电场传输系数分布的波动最小,而对于带罩天线口面单元的电场插入相移分布,其整体波动量虽然有的时刻不是最小,但在口面中心区域(口面加权较大区域),其波动量一直是最小。这说明天线罩瞄准误差的大小不仅要看到带罩天线口面单元的电场传输系数和插入相移的波动量,还要综合口面电场加权分布进行分析。



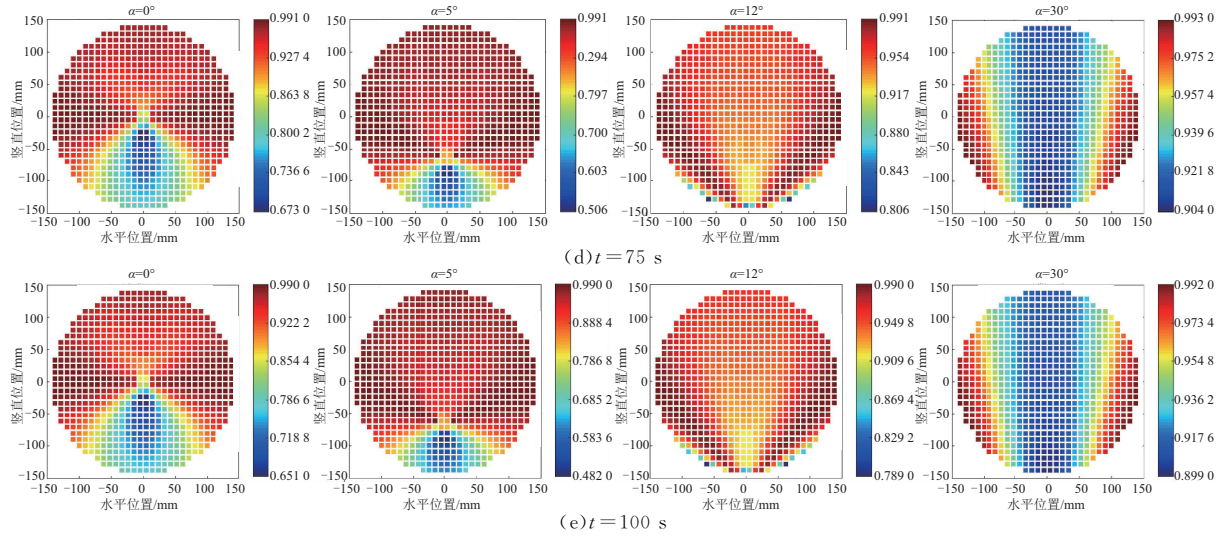


图 13 不考虑变形影响时,不同时刻不同俯仰扫描角下天线口面电场传输系数

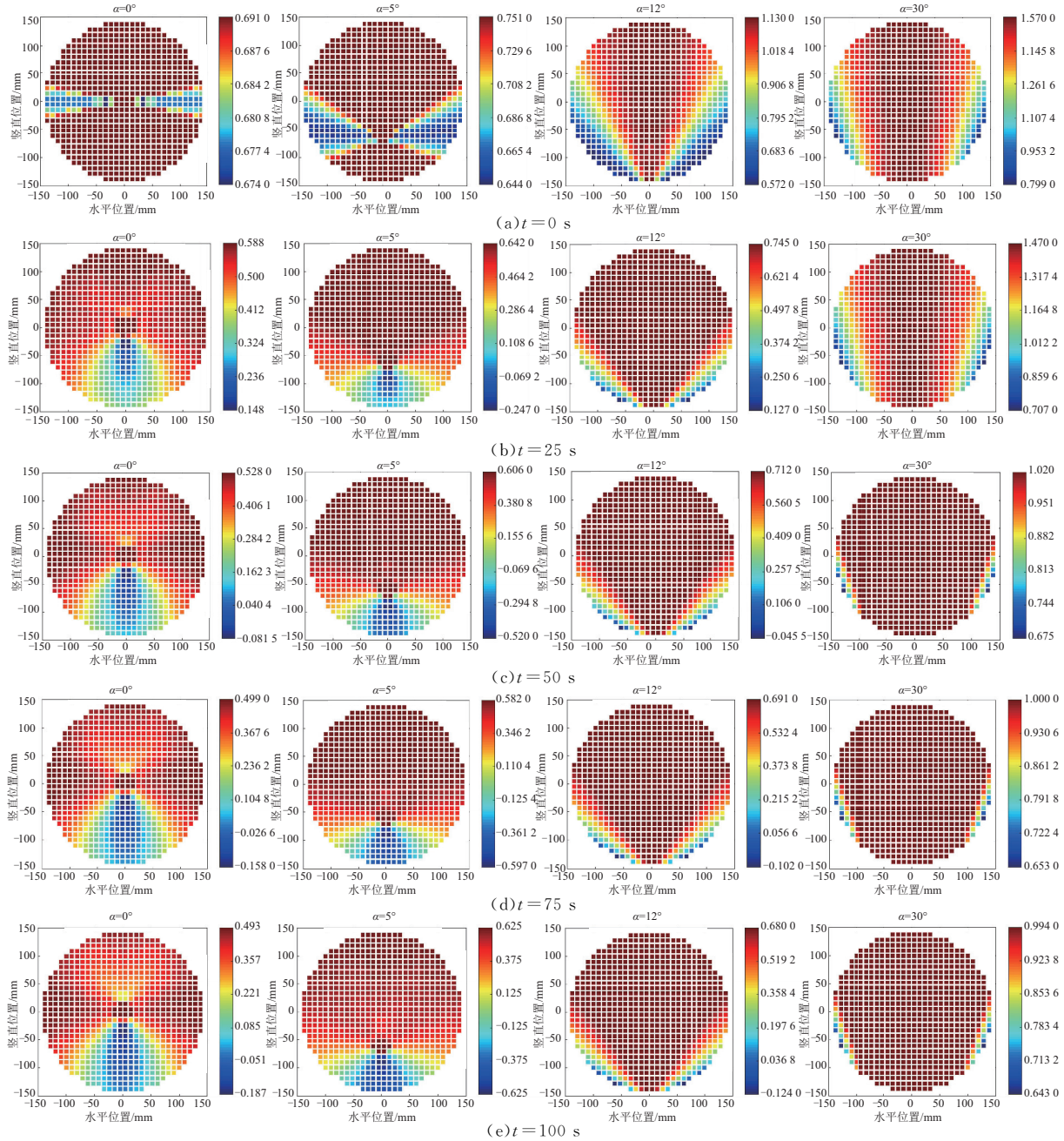
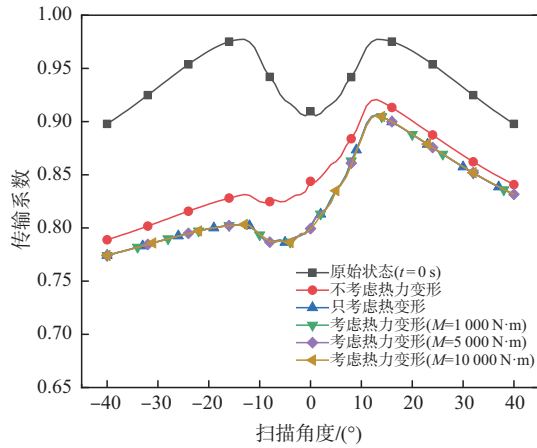


图 14 不考虑变形影响时,不同时刻不同俯仰扫描角下天线口面电场插入相移

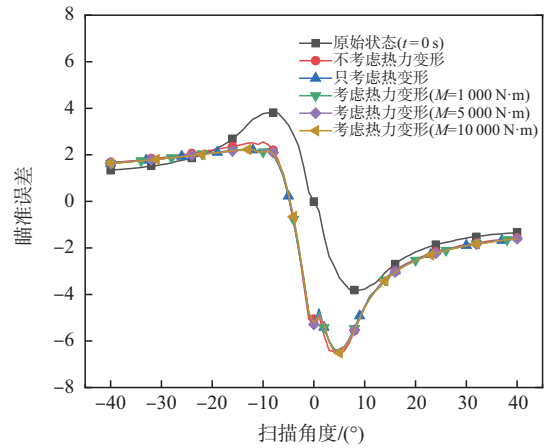
3.3.2 热力载荷联合作用下电性能的变化

从图 11 可以看出,在不同的热力载荷下,天线罩发生了不同程度的变形,相应的电性能如图 15 所示。



(a) 传输系数

可以发现:相对于介电温漂,结构变形对天线罩电性能的影响相对较小;热变形对天线罩电性能的影响明显大于受力变形;力载荷对电性能的影响可以忽略不计。



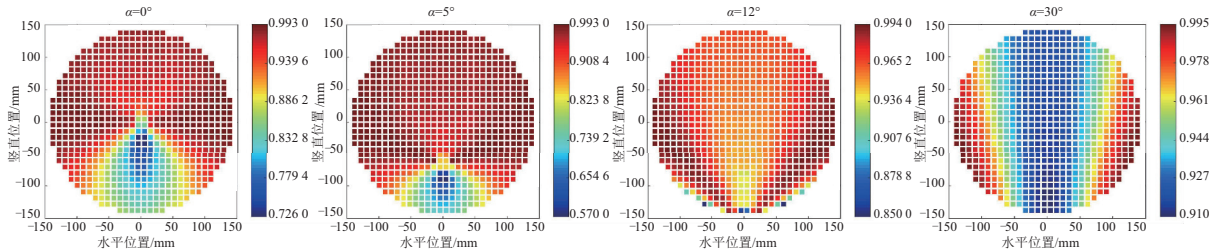
(b) 瞄准误差

图 15 考虑结构变形与介电温漂的天线罩传输系数及瞄准误差

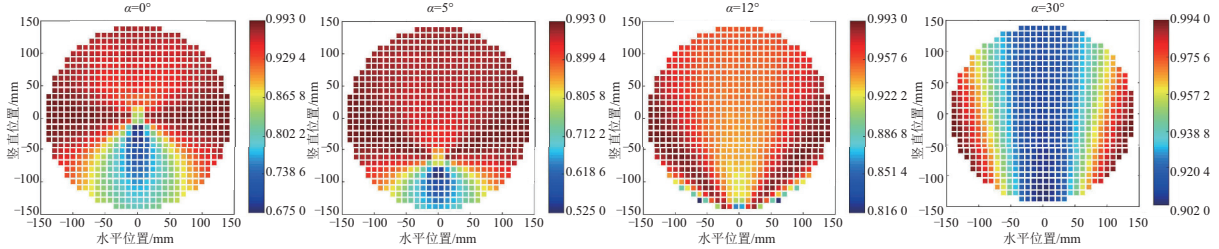
典型的俯仰扫描角下($\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 5^\circ$ 、 $\alpha = 12^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$),带罩天线口面单元的电场传输系数与插入相移分别如图 16、图 17 所示。可以发现:

1)在不同载荷作用下:热变形对带罩天线口面单元的电场传输系数和插入相移的数值大小有相对明显的影响,而受力变形的影响非常不明显。

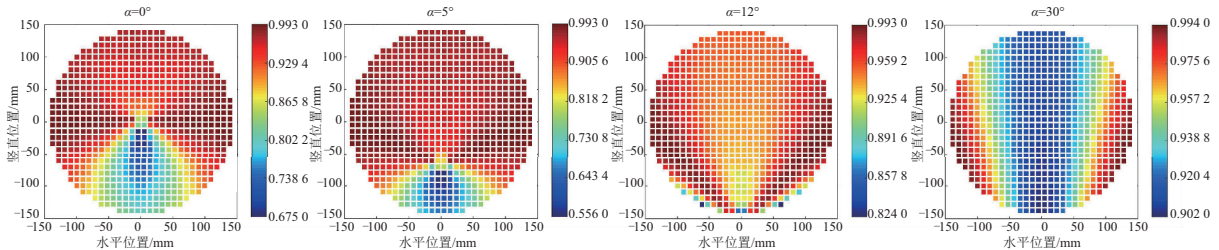
2)在不同载荷作用下:热变形和受力变形对带罩天线口面单元的电场传输系数和插入相移分布特点的影响表现为:在介电温漂影响的基础上,叠加的波动性与不对称性都很小,天线罩瞄准误差无明显变化。



(a) 不考虑结构变形



(b) 只考虑热变形



(c) $M = 1\,000\text{ N} \cdot \text{m}$

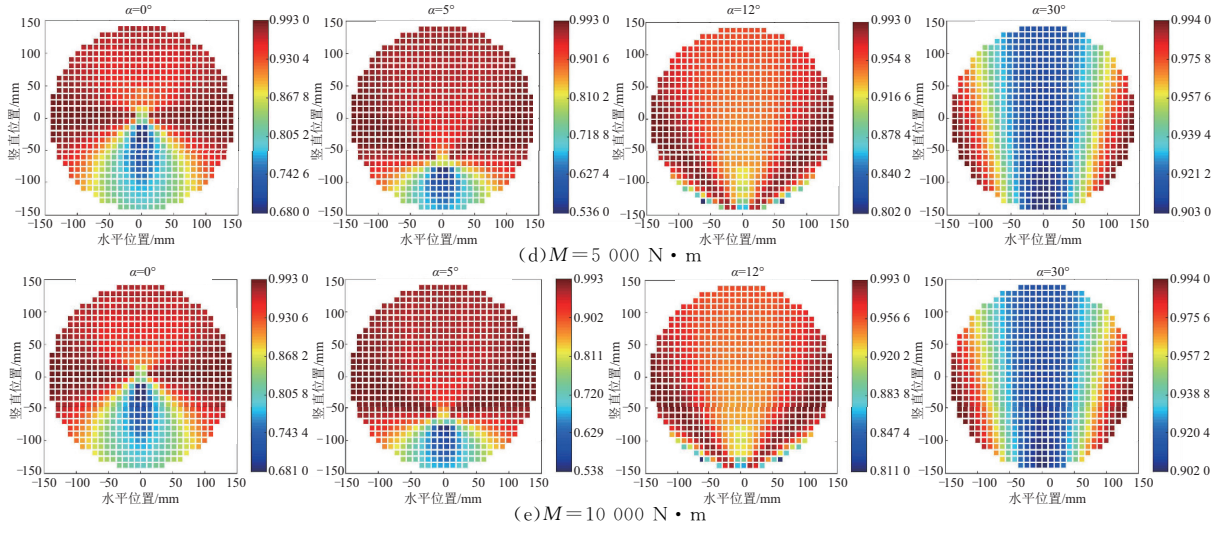


图 16 不同俯仰扫描角下结构变形对天线口面电场传输系数的影响

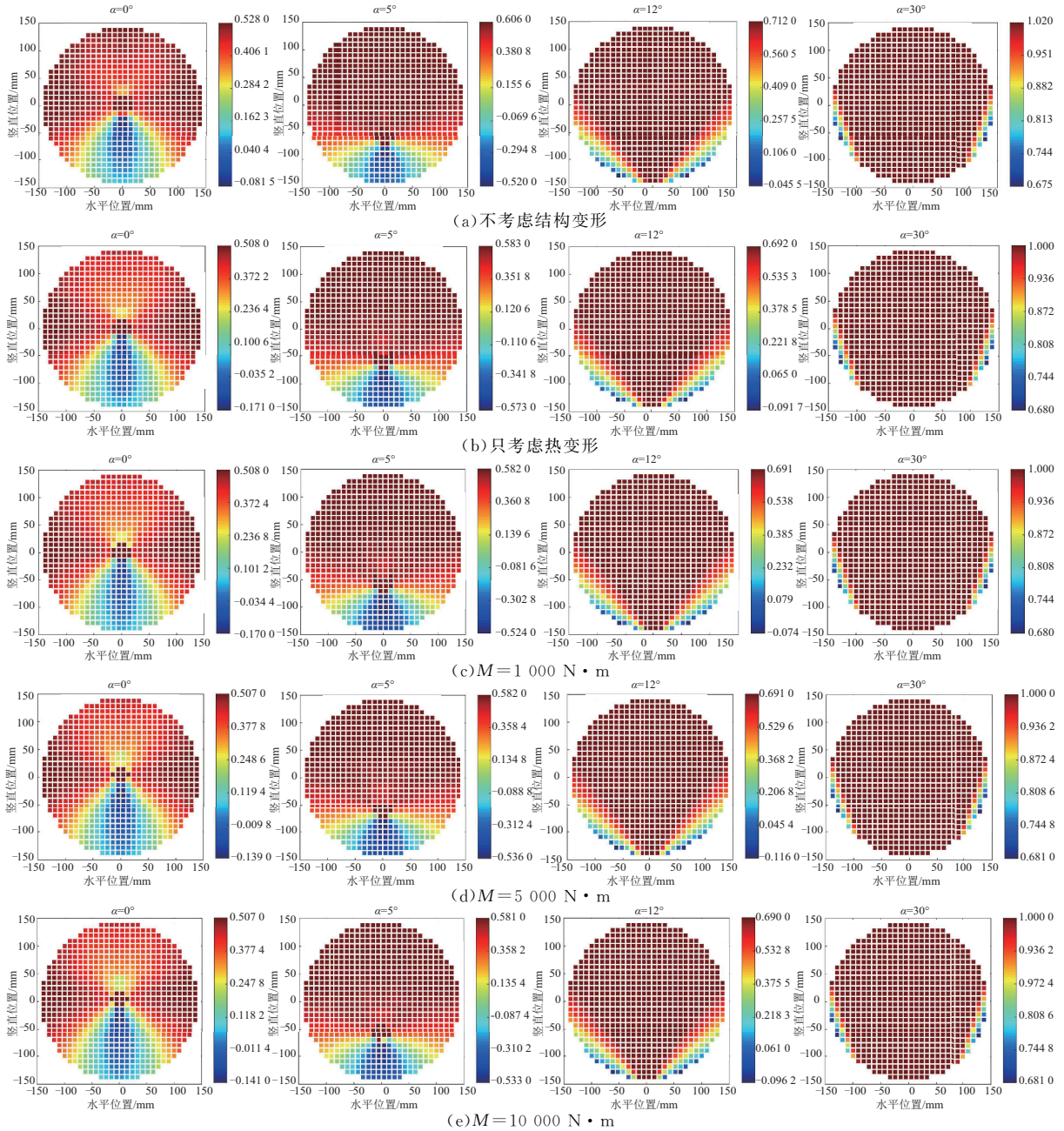


图 17 不同俯仰扫描角下结构变形对天线口面电场插入相移的影响

4 结语

本文提出的基于六面体网格划分的热-力-电耦合模型,可方便且准确地将介电温漂、结构变形传递到电气仿真模型中,实现高速飞行工况下天线罩电性能的快速仿真预示。通过一个典型实例,分析了热力载荷联合作用下天线罩电性能随时间变化,可以得出以下结论:

1)高速飞行载荷引起的天线罩电性能随时间的变化是显著的,不可忽视,需要在仿真与设计中充分考虑热-力-电耦合作用。

2)天线罩电性能对介电温漂最为敏感,其次是热膨胀引起的罩体壁厚变化,其对受力变形最不敏感;在满足热力性能的前提下,天线罩材料建议选用介电性能随温度变化较小的。

3)在高速飞行过程中,天线罩电磁特性随时间变化,导致天线口面单元的电场传输系数和相位延迟不断变化,进而造成辐射远场的变化;其中,天线罩瞄准误差除主要受天线口面单元的电场插入相位延迟的不对称性影响外,口面单元的电场传输系数的不对称性和口面电场加权分布也会产生一定影响。

4)对于相控阵体制的天线-天线罩系统,可以根据仿真获得的天线口面单元的电场传输系数和相位延迟,通过对各辐射单元进行相应的调幅、调相,实现对系统电性能的补偿和优化。

参考文献

- [1] CRONE G A E, RUDGE A W, TAYLOR G N. Design and Performance of Airborne Radomes: A Review[J]. IEE Proceedings F Communications(Radar, and Signal Processing), 1981,128(7):451-464.
- [2] KOZAKOFF D I. Analysis of Radome Enclosed Antennas[M]. Norwood, MA: Artech House, 2010.
- [3] SHAVIT R. Radome Electromagnetic Theory and Design[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [4] 齐共金, 张长瑞, 王思青, 等. 高超音速导弹天线罩关键技术 [J]. 导弹与航天运载技术, 2005(1): 30-34.
- [5] BLOCKLEY R, SHYY W. Encyclopedia of Aerospace Engineering: Volume 1: Fluid Dynamics and Aerothermodynamics[M]. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons, 2010.
- [6] BLOCKLEY R, SHYY W. Encyclopedia of Aerospace Engineering: Volume 5: Dynamics and Control [M]. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons, 2010.
- [7] 张恒庆. 温度变化对天线罩功率传输的影响 [J]. 制导与引信, 2002, 23(3):45-53.
- [8] 张俊武, 刘连元. 高超声速飞行器天线罩热-电联合仿真计算方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2012(4): 53-57.
- [9] 商远波, 王敏, 刘元云, 等. 有限元法在导弹天线罩热透波分析中的应用 [J]. 制导与引信, 2013, 34(2): 38-43.
- [10] SONALIKAR H S. Temperature Dependent EM Investigation of Inhomogeneous Dielectric Wall for Application in Ablatable Radome[C]// 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation. Hyderabad, India: IEEE, 2018:1-5.
- [11] APARNA A P, SONALIKAR H S. Temperature Dependent Electromagnetic Design of Dielectric Wall for Airborne Applications [C]//2019 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation. Ahmedabad, India: IEEE, 2019: 1-5.
- [12] RAVEENDRANATH N, VANDANA S, SANDHYA S, et al. Temperature-Dependent Electromagnetic Performance Predictions of a Hypersonic Streamlined Radome[J]. Progress in Electromagnetics Research-Pier, 2015,154:65-78.
- [13] PARAMESWARAN A, SONALIKAR H. Design of Airborne Radome Using Novel Temperature Dependent Electromagnetic Modeling[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2020,104:37-52.
- [14] PARAMESWARAN A, SONALIKAR H S, KUNDU D. Temperature-Dependent Electromagnetic Design of Inhomogeneous Planar Layer Variable Thickness Radome for Power Transmission Enhancement [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(8): 1572-1576.
- [15] WANG C S, WANG Y, CHEN Y K, et al. Coupling Model and Electronic Compensation of Antenna-Radome System for Hypersonic Vehicle with Effect of High-Temperature Ablation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2340-2355.
- [16] HEYDARIM, GHEZAVATI J, ABBASGHOLIPOUR M, et al. Various Types of Ceramics Used in Radome: A Review[J]. Scientia Iranica, 2017,24(3): 1136-1147.

(编辑:徐楠楠)