

# 温变形变结构时域有限积分建模方法研究

俞文明<sup>1</sup>, 李逸之<sup>2</sup>, 李伟<sup>3</sup>, 梁加南<sup>2</sup>, 禄晓飞<sup>4</sup>, 崔铁军<sup>1</sup>

(1. 东南大学信息科学与工程学院,南京,210096;2. 江苏赛博空间科学技术有限公司,南京,211111;  
3. 沈阳飞机设计研究所,沈阳,110087;4. 中国酒泉卫星发射中心,甘肃酒泉,735099)

**摘要** 提出并实现了一种温变形变结构的时域有限积分(TDFIT)建模方法,通过快速三维插值技术同时解决了非同类热力电网格和参数曲面的形变映射问题,在确保仿真精度的前提下,实现了任意热分布和较小形变量的热力电联合仿真,适用电大、任意非均匀温变和形变材料的仿真建模。设计了蜕化模型、分层收敛等案例验证了方法的必要性、有效性和正确性。为高温高压下天线罩、飞行器的电磁散射和辐射特性建模提供了热力电一体化建模方法和实用仿真工具。

**关键词** 瞬态仿真;时域有限积分技术;温度形变结构;热力电一体化

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.04.010

**中图分类号** TN82    **文献标志码** A    **文章编号** 2097-1915(2024)04-0066-06

## Finite Integral Time-Domain Modeling for Thermal Deformation Structures

YU Wenming<sup>1</sup>, LI Yizhi<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, LIANG Jianan<sup>2</sup>, LU Xiaofei<sup>4</sup>, CUI Tiejun<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;2. Jiangsu Cyber Space Science and Technology Co. LTD, Nanjing 211111, China;3. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110087, China;4. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735099, Gansu, China)

**Abstract** In this paper, we propose and implement a time-domain finite integral technique (TDFIT) for modeling thermal deformations and variable structures of any complexity. By employing a rapid 3D interpolation technology, we simultaneously solve the deformation mapping of diverse thermoelectric mesh models and parametric surfaces. Our approach ensures the accurate integrated simulation of thermoelectric properties, arbitrary thermal distributions, and minor shape variations. The proposed method is particularly suitable for materials characterized by electrically large scales, non-uniform temperature changes, and deformations. This study presents a thermoelectric integrated modeling approach and a practical simulation tool for analyzing the electromagnetic scattering and radiation properties of radomes and aircraft under high-temperature and high-pressure conditions.

**Key words** transient analysis;finite integral time-domain modeling;deformations and variable structures;thermoelectric integrated

随着航空航天技术的发展,各类飞行器的性能在不同领域取得突破进展。天线罩位于飞行器前

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(61890544)

作者简介: 俞文明(1980—),男,浙江诸暨人,副研究员,研究方向为电磁场数值计算方法。E-mail: wmyu@seu.edu.cn

**引用格式:** 俞文明,李逸之,李伟,等.温变形变结构时域有限积分建模方法研究[J].空军工程大学学报,2024,25(4):66-71. YU Wenming, LI Yizhi, LI Wei, et al. Finite Integral Time-Domain Modeling for Thermal Deformation Structures[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4):66-71.

端,在保护飞行器和关键电子元器件的同时承担着维护雷达天线效能的任务。在高速飞行过程中,天线罩通常处于高温高压状态下工作,高压可能使天线罩发生形变,高温可能使天线罩材料特性发生变化,直接影响天线罩在飞行过程中的电性能<sup>[1-2]</sup>。研究人员通常利用天线罩的结构<sup>[3]</sup>和材料<sup>[3-4]</sup>控制罩体的电磁特性,近年来还主动利用天线罩可能出现的非均匀渐变特性<sup>[5-7]</sup>和新型人工结构功能材料的可调性<sup>[8]</sup>来获取高温高压下更优的天线罩性能。因此开展天线罩力热电一体化仿真分析已经成为当前重要的课题,它不仅可以直接服务于高超声速飞行器天线罩的电性能评估,还可以支撑主动非均匀天线罩体的设计。

力对电磁的影响主要体现为局部或整体形变,而形变由结构力学仿真获取,通常基于有限元体剖分模型,形变表现为网格模型的偏移,偏移的网格化表征难以后续电磁场仿真提供准确的结构特征。热对电磁的影响主要表现为热在结构上的非均匀分布,致使剖分网格的电磁媒质参数发生非规则变化,因此需要电磁建模软件具备网格级媒质参数的赋值和仿真能力。以 HFSS、CST 和 FEKO 为代表的电磁建模软件目前没有基于形变的参数化逆向处理能力和网格级媒质表征功能。COMSOL 擅长多物理场仿真,具备一定的基于解析或拟合表达的自定义材质功能,但同样不擅长处理形变网格的电磁和非规则体分布渐变材质。文献[9]基于 FLUENT、ANSYS 和 CST 实现了力电联合仿真,并对有源相控阵天线受热形变对电特性的影响进行了分析,热分析仅作为引起形变的输入,因为温度不高,没有考虑热对材料电磁参数的直接影响。文献[10]基于一维烧蚀程序、ANSYS 和 FEKO 实现了高超声速飞行器天线罩热-电联合仿真,虽然 ANSYS 能够给出连续的温度分布,但电仿真中天线罩依然被近似为若干个均匀层进行常规仿真,无法准确计入非规则体分布渐变材质的电磁效应。文献[11]实现了一种基于四面体热-电任意网格映射的天线联合建模方法,该方法中热、电网格均采用四面体,避免了网格映射困难的问题,但因为采用了体积分方程,能够解决的问题规模很小,且无法考虑形变问题。文献[12]采用 FLUENT、ANSYS 和平板传输线近似实现了温变天线罩的热电联合仿真,但因平板传输理论的局限性,该方法无法计人温度梯度引入的非规则体分布渐变材质对天线罩电磁特性的影响。文献[13]提出了一种基于 3D 射线追踪与孔径积分的温

度依赖天线罩电磁建模方法,其中雷达罩的几何形状被划分为不同的窗口区域,以考虑空间温度分布的影响,每个窗口中的罩壁由不同数量的层组成,以表示非线性温度梯度,但该方法的输入依靠人工分层,不具有一般性,且所用方法精度偏低。文献[14]也采用了体积分方程,通过充分利用烧蚀和形变的局部特性,在不同的计算中大大节约了矩量法阻抗矩阵的填充时间,相对提高了仿真效率,但因为必须重复利用阻抗矩阵,该方法仅适用计算瞄准误差(bore sight error, BSE)等需要重复计算局部存在微小变化(温变和(或)形变)的同一天线罩,并且单次计算的规模依然受到体积分方程的限制。

本文以高温高压下中大型天线罩的热力电多物理场仿真为出发点,基于热力仿真提供的任意形变和任意温度分布数据,自主研发了基于时域有限积分(time-domain finite, TDFIT)的温变形变结构建模方法,为高温高压下飞行器头罩的辐射和散射特性分析提供建模工具。

## 1 TDFIT 算法及媒质表征

TDFIT 即时域有限积分技术,与时域有限差分方法(finite-difference time domain, FDTD)本质相同。与有限元(finite element method, FEM)一样, TDFIT 允许媒质在空间的任意分布,比 FEM 效率更高,且具有宽频带特性,适合处理电大复杂媒质问题。温变、形变结构即因温度和(或)压力引起材质和(或)结构属性发生变化的结构,主要由高速气动加热引起。其电磁材质随空间位置和结构发生变化,必须基于 TDFIT、FEM 等体剖分才能描述,难点在于形变电磁网格和温度分布的映射处理,需要根据 TDFIT 的网格特点实现温变、形变媒质的共形处理。

TDFIT 算法进行电磁仿真时,对目标进行直六面体剖分,直六面体剖分的基本步骤包括栅格生成和材质填充 2 个过程。栅格生成是指一些覆盖计算域的直角坐标轴平行线组,包括互不相关的 3 个方向,每组与直角坐标平面平行。3 组正交线在空间构成直六面体网格群,网格的最小单元称为 1 个元胞(cell)。在完成栅格划分后,需要根据栅格与目标的相交情况,为每个元胞(直六面体)填充媒质,即将目标模型的材质填充到栅格生成的每个直六面体中。如果模型不受外界因素影响,且媒质固定的情况下,只需填充一种媒质参数即可。但是在实际工

程应用中,例如高速飞行器前端的天线罩,飞行过程中的高温高压会使得天线罩材料性能发生变化,可能直接影响天线罩在飞行过程中的电性能。因此,想要仿真模拟出高温高压条件下天线罩电性能变化的情况,必须将温变形变情况下的天线罩材料性能变化表征出来,以便后续天线罩的电性能仿真。该映射以 TDFIT 的共形等效媒质技术为基础。

在麦克斯韦方程组中,用本构关系表征媒质与电磁场的相互作用:

$$\begin{cases} D = \epsilon E \\ B = \mu H \\ J_{e,L} = \sigma E \\ J_{m,L} = \kappa H \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D$ 、 $E$  分别为电通量和电场强度; $B$ 、 $H$  分别为磁通量和磁场强度; $\sigma$ 、 $\kappa$  分别为电导率和磁损耗; $J_{e,L}$ 、 $J_{m,L}$  分别为电流和磁流密度。将这些关系引入 Maxwell 方程的积分表达式<sup>[15]</sup>,得:

$$\begin{cases} \bar{d} = M_\epsilon \bar{e} \\ \bar{b} = M_\mu \bar{h} \\ \bar{i}_{e,L} = M_\sigma \bar{e} \\ \bar{i}_{m,L} = M_\kappa \bar{h} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $M_\epsilon$ 、 $M_\mu$ 、 $M_\sigma$ 、 $M_\kappa$  为等效媒质参数的离散表达,以  $M_\epsilon$  为例,其定义为:

$$M_{\epsilon,pp} = \frac{\iint_{\tilde{S}_p} \epsilon(r) E(r) d\Omega}{\int_{l_p} E(r) dl} \quad (3)$$

式中: $\bar{d}$  和  $\bar{e}$  分别为物理量  $D$ 、 $E$  在一个单元内的积分量,上标双划线表示面积分,单划线表示线积分。同理, $\bar{i}_{e,L}$  和  $\bar{i}_{m,L}$  分别与  $J_{e,L}$ 、 $J_{m,L}$  对应。对于各向同性的线性媒质,可以假设电磁场在网格面  $\tilde{S}_p$  和网格棱边  $l_p$  上呈均匀分布,则:

$$M_{\epsilon,pp} = \epsilon \frac{\tilde{S}_p}{L_p} = \frac{\epsilon}{r_p} \quad (4)$$

同理,磁导率  $\mu$ 、电导率  $\sigma$  和磁损耗  $\kappa$  对应的网格离散表达式为:

$$\begin{cases} M_{\mu,pp} = \mu \frac{\tilde{S}_p}{L_p} = \frac{\mu}{r_p} \\ M_{\sigma,pp} = \sigma \frac{\tilde{S}_p}{L_p} = \frac{\sigma}{r_p} \\ M_{\kappa,pp} = \kappa \frac{\tilde{S}_p}{L_p} = \frac{\kappa}{r_p} \end{cases} \quad (5)$$

式中:系数  $r_p$  和  $\tilde{r}_p$  分别为主网格及对偶网格上的棱边长与其铰链网格面积的比值,即  $r_p = L_p / \tilde{S}_p$ ,  $\tilde{r}_p = \tilde{L}_p / S_p$ 。

将式(5)代入式(2)并采用中心差分取代微分,即可获得 TDFIT 随时间间隔  $\Delta t$  演化的蛙跳迭代式<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \bar{e}^{n+1} = \left( \frac{M_\epsilon + M_\sigma}{\Delta t} \right)^{-1} \left[ \left( \frac{M_\epsilon - M_\sigma}{\Delta t} \right) \bar{e}^n + \tilde{C} h^{n+\frac{1}{2}} - \bar{i}_{e,i}^{n+\frac{1}{2}} \right] \\ \bar{h}^{n+\frac{1}{2}} = \left( \frac{M_\mu + M_\kappa}{\Delta t} \right)^{-1} \left[ \left( \frac{M_\mu - M_\kappa}{\Delta t} \right) \bar{h}^{n-\frac{1}{2}} - \tilde{C} e^n - \bar{i}_{m,i}^n \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{C}$ 、 $\tilde{C}$  分别为环路积分的离散分段求和算子; $n$  为第  $n$  个时间步; $n \pm \frac{1}{2}$  为  $n$  前后半个时间步。

对天线罩进行热力仿真时,直接获取的结果为一系列形变的空间坐标和对应的温度信息,温度和结构的变化会带来材料性能的变化,对 TDFIT 而言,电磁仿真的影响表现为空间网格对应的介电常数、导磁系数的变化。接下来将重点介绍温度和形变对媒质参数的影响如何反映到 TDFIT 算法的媒质建模中。

## 2 热力电属性的 TDFIT 网格映射

多物理场仿真中,如果不同的物理模型采用不同的剖分网格,则会出现类型、密度的差异,甚至出现位置偏移,因此需要在不同的网格间实现恰当的映射。本研究中,热力仿真采用的有限元法(FEM)使用四面体网格,剖分密度较低,而 TDFIT 以直六面体为基础,根据不同的工作频率采用不同的剖分密度(通常密度较高)。同时,由于气动引起结构形变,致使有限元网格在输出时发生位置偏移,但复杂目标在剖分时必须依赖结构信息,否则难以定位剖分硬点,影响剖分精度。剖分模型输出的热力网格通常不具备属于实体的结构信息(局部不知道整体)。因此,本研究需要在满足电磁建模精度的前提下,同时解决不同类型网格映射和形变网格的 TDFIT 直六面体剖分难题。

温变对应电磁材质参数的网格映射采用插值策略,因为热力仿真通常采用四面体网格,而适用电大尺寸精细结构建模的 TDFIT 采用直六面体网格,因此本研究还需要解决非同类网格和参数曲面的形变插值问题,特别是后者,对保持 TDFIT 共形处理

精度至关重要。在处理参数曲面插值过程中,以目标模型的参数曲面模型和热力仿真点云形变量作为输入,建立点云数据的形变传递函数,为参数曲面的形变预测提供映射函数。本文为温变和形变插值设计了相近的处理方式,同时,为了大幅度提高插值效率,统一采用了八叉树表征的反距离权重插值模型。

实际操作过程中,热力仿真输出热力网格对应点云的坐标和温度信息,经由温变、形变网格传递函数及实测获取<sup>[12-13]</sup>的温度和电磁媒质参数映射表,然后经过填充材质,完成适合 TDFIT 的温变直六面体元胞材质填充。其中温变、形变网格传递函数,即前述插值过程,具体思路如下:以 TDFIT 直六面体元胞中心点表示该元胞,经搜索得到该元胞附近的热分布点云数据,然后采用局部插值精确求解待插值点的位置和媒质参数信息。

热力点云对应媒质向直六面体映射时主要包含两部分工作:

1)点云的表征。空间划分采用八叉树,如图 1 所示,每个叶子节点储存相应区域内的点云数据,为后续加权插值的加速做准备。

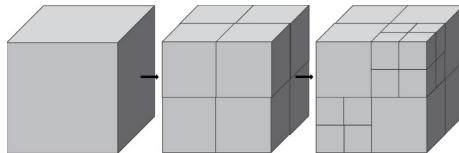


图 1 八叉树结构

2)插值。插值采用反距离插值法。该方法假定每个测量点都有一种与距离成反比的局部影响力,即以元胞中心或顶点为参考,离散点距参考点越近赋予权重越高,反之越低,称为反距离权重法。反距离加权差值法所用的加权函数为:

$$W_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (7)$$

式中: $p$  为任意正实数,通常取 2; $h_i$  和  $h_j$  均为离散点到插值点的距离,以  $h_i$  为例:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (8)$$

式中:( $x, y, z$ )和( $x_i, y_i, z_i$ )分别为任意插值点和热分布网格离散点坐标。

建立八叉树划分空间区域时,每个叶子节点携带相应区域的离散点信息。插值时通过八叉树可以快速定位待插值点所在叶节点,将距离较远的点全部排除在外,从而大大缩短计算时间。反距离权重法的实现分为 3 步:

1)计算待插值点到待插值点所在叶节点所需的

所有离散点之间的距离。

2)计算每个点的权重,权重是距离倒数的函数:

$$W_i = \frac{h_i^{-2}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-2}} \quad (9)$$

3)计算待插值点的媒质参数。

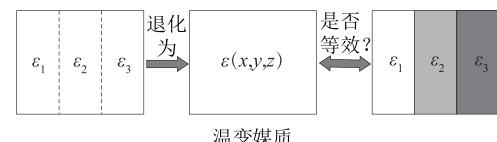
$$\epsilon(x, y, z) = \sum_{i=1}^n W_i \epsilon(x_i, y_i, z_i) \quad (10)$$

通过以上步骤即可实现热力点云向 TDFIT 直六面体的形变位置和媒质参数的映射,为温变、形变媒质的电磁仿真提供准确输入。

### 3 算法校验

因为当前暂时没有相同功能的商业软件和已公开的实验结果,为了验证前述温变形变结构时域有限积分方法的正确性,本研究首先通过渐变蜕化和分层收敛 2 种方式证明温变媒质的有效性和正确性,然后通过可控的形变和分层收敛案例同时证明形变和温变 TDFIT 技术的正确性。以下案例所用的媒质均由实测获取的温变媒质查表获取,因为论证过程与具体的媒质参数无关,因此省略了媒质参数并将案例设定为简单模型的散射。

首先,对电磁建模而言,温变的核心是电磁参数的变化,电磁参数的渐变自然包括分层均匀变化,后者称为前者的蜕化形式。本实验拟通过控制温度的变化,将图 2 所示的 3 层均匀材质以温变媒质的方式进行仿真,其结果应当与传统多层均匀介质模型的仿真结果相同,只是多层介质模型需要以多个实体作为输入。图 2 的模型尺寸为 0.01 m × 0.03 m × 0.03 m,分割方向尺寸为 0.03 m;均匀介质模型的相对介电常数为 6,相对磁导率为 1;多层均匀介质模型 3 层材料的相对介电常数从左到右依次为  $\epsilon_1 = 2, \epsilon_2 = 6, \epsilon_3 = 10$ ,相对磁导率均为 1;非均匀渐变介质模型被蜕化为分层模型,每个虚拟层的电磁参数和分层均匀介质模型相同——因为边界网格的归属存在歧义,实际电磁参数与多层均匀介质模型存在微小的差异。



温变媒质

图 2 退化模型等价案例

以 3 层天线罩模型的散射为例,图 3 对比了蜕化模型(非均匀渐变介质模型)和传统多层均匀介质

模型的结果,作为参考,同时给出了单一介质(均匀介质模型)的结果。

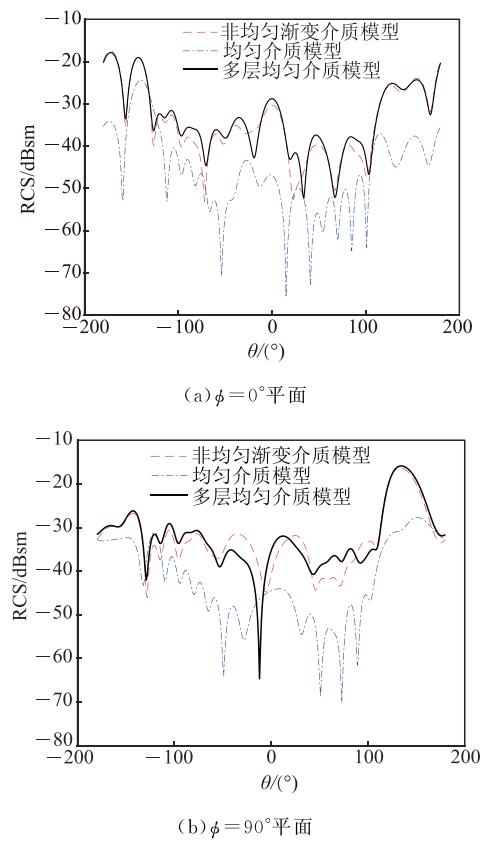


图 3 3 种模型 RCS 结果对比

由图 3 可见,蜕化模型和多层次均匀媒质模型的结果基本一致,两者均与单一媒质的计算结果差距较大。因此,温变媒质模型可以退化表征分层介质模型,且温变对结果的影响不可忽略。

分层渐变媒质是温变媒质的特例,可以作为传统分层媒质的极限。以下案例拟通过逐渐增加传统多层次模型的层数,使其物理属性逐渐逼近渐变媒质,尽管分层需要建立多个实体,而渐变媒质只需 1 个,如图 4 所示。本案例仍以  $0.01 \text{ m} \times 0.03 \text{ m} \times 0.03 \text{ m}$  长方体材料作为温变载体,相对介电常数从左至右由 2 渐变为 10。图 4 为其分层模型的近似,依次为 3 层、6 层、20 层。散射结果对比如图 5 所示。

由图 5 可见,随着分层数的增加,分层模型的结果逐渐收敛到渐变(温变)媒质模型的结果,证明了温变媒质模型的正确性。

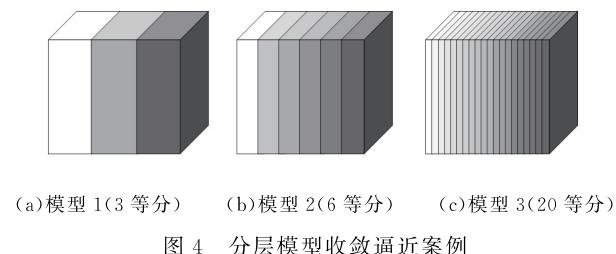


图 4 分层模型收敛逼近案例

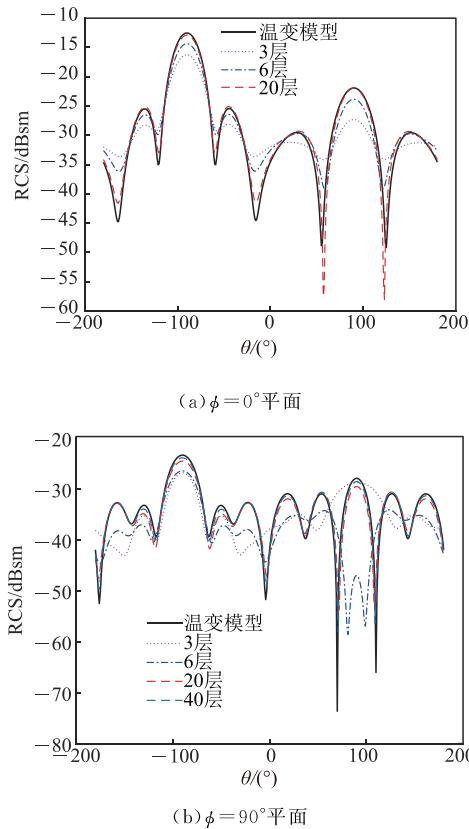


图 5 模型不同分层对结果的影响

为了验证形变以及形变、温变同时作用时本算法的建模效能,设计了如图 6 所示的案例:将包含 3 个凸起的介质块(相对介电常数为 2.2)作为形变前的模型,凸起的上端经水平拉伸凸起宽度的距离后形成形变后的模型,图中均为参数曲面模型。应用中,形变后的模型通常是剖分模型(仿真需要),而从剖分模型逆向重构参数曲面模型至今不可以自动完成。为了提供对比的参考标准,本案例根据设计的形变前后模型逆向设置了形变量。因为方法的有效性与模型是否真实应用无关,所以仍以简单模型的散射问题作为校验案例。

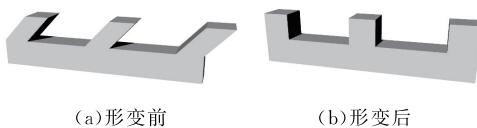


图 6 形变对象

图 7 给出了图 6 所示模型经本方法(以原始参数曲面模型和形变量为输入,输出形变后模型电磁特性的方法)获取的结果与传统方法直接仿真形变后结果的对比。为了便于比较,图 7 给出了形变前的结果。

由图 7 可见,本文方法可以准确得到形变后的几何结构对应的电磁特性,且形变造成的影响不可忽略。本案例提供的模型看似很容易获得参数模型,但真正的曲面天线罩不是可以轻易得到重构结

果的,而本方法同样适用该场合。

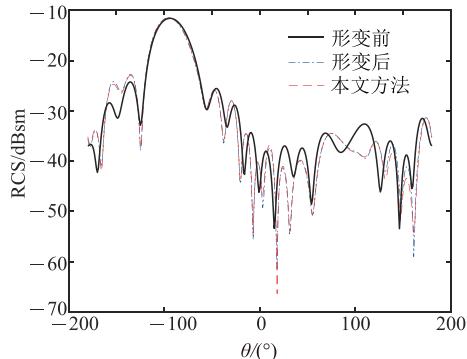


图7 形变验证案例

作为同时表征形变和温变特性的案例,本文赋予图6(b)以温度渐变媒质,如图8所示。图8中,中间凸起的介质块被赋予了温度渐变媒质,其余部分仍然保持相对介电常数为2.2的常规媒质。以图4相同的方式证明算法的有效性和正确性,结果如图9所示。

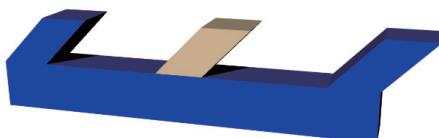


图8 形变温变同时存在的案例

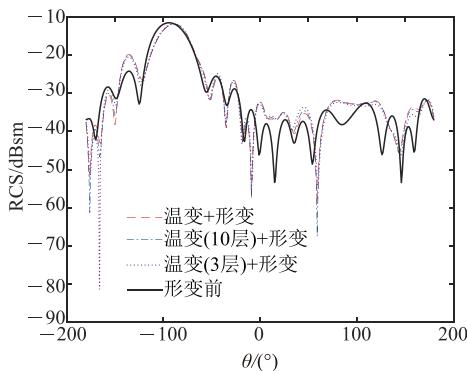


图9 形变温变验证案例

由图9可见,由传统分层模型(足够多层)仿真得到的结果可以收敛至温变形变媒质获取的结果,证明了本算法可以同时精确表征形变和温变特性。

#### 4 结语

本文提出并实现了一种温变形变结构的时域有限积分建模方法,通过快速插值技术同时解决了非同类热力电网格的映射和参数曲面的形变映射问题。可以为高温高压下天线罩、飞行器的电磁散射和辐射特性建模提供热力电联合建模方法和电磁仿真工具。

#### 参考文献

- [1] YOUNES B, SAGAR M S I, OMI A I, et al. High Temperature Antennas: A Review [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2022, 95: 103-121.
- [2] 荆江, 张昱煜, 徐银芳, 等. 高超声速飞行器毫米波天线罩电气性能研究[J]. 微波学报, 2015, 31(1): 50-54.
- [3] KOZAKOFF D J. Analysis of Radome-Enclosed Antennas[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2010.
- [4] 邹春荣, 张长瑞, 肖永栋, 等. 高性能透波陶瓷纤维的研究现状和展望[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(2): 274-279.
- [5] CHEN F, SHEN Q, ZHANG L M. Electromagnetic Optimal Design and Preparation of Broadband Ceramic Radome Material with Graded Porous Structure [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, 105: 445-461.
- [6] XU W Y, DUAN B Y, LI P, et al. Study on the Electromagnetic Performance of Inhomogeneous Radomes for Airborne Applications: Part I: Characteristics of Phase Distortion and Boresight Error[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6): 3162-3174.
- [7] XU W Y, DUAN B Y, LI P, et al. Study on the Electromagnetic Performance of Inhomogeneous Radomes for Airborne Applications: Part II: The Overall Comparison with Variable Thickness Radomes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6): 3175-3183.
- [8] KENION T, YANG N, XU C Y. Dielectric and Mechanical Properties of Hypersonic Radome Materials and Metamaterial Design: A Review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(1): 1-17.
- [9] WANG C S, DUAN B Y, ZHANG F S, et al. Coupled Structural-Electromagnetic-Thermal Modelling and Analysis of Active Phased Array Antennas[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010, 4(2): 247.
- [10] 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.
- [11] 张晓晨, 林朝光, 王振峰, 等. 飞行器热天线热电联合计算方法[J]. 航空学报, 2016, 37(S1): 66-72.
- [12] 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.
- [13] PARAMESWARAN A, SONALIKAR H S. Design of Airborne Radome Using Novel Temperature Dependent Electromagnetic Modeling[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2020, 104: 37-52.
- [14] HE X Y, KONG D H, ZHANG W W, et al. An Efficient Volume Integral Equation Method for Analysis of Boresight Error of a Radome with Minor Ablation[J]. Electronics, 2022, 11(23): 3861.
- [15] 谭述润. 共形时域有限积分技术及其应用[D]. 南京: 东南大学, 2012.

(编辑:徐楠楠)