

基于 FEKO 的引信目标近场动态散射特性实时仿真

林存坤¹, 张小宽¹, 张敬伟², 吴盛源¹

(1.空军工程大学防空反导学院,西安,710051;2.空军工程大学科研部,西安,710051)

摘要 引信目标的近场散射特性受到天线方向图、目标局部照射、弹目交会状态等因素的影响,计算过程复杂。首先提出了一种基于 FEKO 的目标近场散射特性实时仿真方法,然后根据引信作用段的特点建立了弹目交会模型,对引信目标的近场动态散射特性进行了实时仿真,仿真结果表明近场散射强度与导弹脱靶量和目标照亮区有直接关系,脱靶量越小,散射强度相对越大,且弹目距离较近时,由于照亮区的不同散射强度将出现较大起伏。

关键词 FEKO;引信;近场散射;实时仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.011

中图分类号 TN011;O441.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0046-04

A Real-time Simulation Method of Fuse Target Near-Field Dynamic Scattering Characteristics Based on FEKO

LIN Cunkun¹, ZHANG Xiaokuan¹, ZHANG Jingwei², WU Shengyuan¹

(1.Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2.Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In view of the facts that fuse target near-field scattering characteristics is affected by series of factors such as antenna pattern, target's partly illuminated and missile and target encounter state, and calculating process is complex, in this paper, a real-time simulation method of target near-field scattering characteristic is presented based on FEKO. Then, a model of missile and target encounter is established in view of the characteristic of fuse operation phase, fuse target near-field dynamic scattering characteristic is calculated real-timely. The result shows that the near-field scattering intensity has something to do with the target's illuminating parts and the missile miss distance. The smaller, the missile miss distance, the stronger, the scattering intensity, and the scattering intensity will present a big undulation cause in the different illuminating parts when a missile is very close to target.

Key words: FEKO; fuse; near-field scattering; real-time simulation

无线电引信广泛应用于现代精确制导武器系统,其对目标的作战效能决定着武器系统的最终杀伤效能。引信属于弹药末端控制设备,作用距

离较近,通常只有几十到上百 m^[1],这使得引信工作在目标散射场的近场。目标近场散射特性的计算不同于远场散射特性,照射天线的辐射特性即天线

收稿日期:2014-12-19

作者简介:林存坤(1989—),男,山东济宁人,硕士生,主要从事雷达目标电磁散射特性研究.E-mail:lincunkun123@163.com

引用格式:林存坤,张小宽,张敬伟,等.基于 FEKO 的引信目标近场动态散射特性实时仿真[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):46-49. LIN Cunkun, ZHANG Xiaokuan, ZHANG Jingwei, et al. A Real-time Simulation Method of Fuse Target Near-Field Dynamic Scattering Characteristics Based on FEKO[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 46-49.

方向图对近场散射特性的影响不能忽视^[2],且近场条件下目标往往处于局部照射,因此入射波不能再近似为均匀平面波,而应是非均匀球面波,即目标各散射元受到的入射波的入射方向和功率各不相同。弹目交会过程中引信天线波束对目标的照射可以看成是对目标的扫描过程,即天线波束主峰方向不再始终对准目标中心,不同照射方向下的照亮区为目标的不同部位。因此,引信目标的近场散射特性计算是一个与目标自身的形状、材料、引信天线辐射特性、以及弹目交会状态等因素有关的动态仿真问题,这使得引信目标近场散射特性的研究相对较为复杂。如何利用现有的成熟软件解决以上问题,是一个值得研究的课题。

1 基于 FEKO 的近场散射实时仿真

FEKO 是目前国内外比较流行和成熟的电磁场高频计算软件,包含 CADFEKO、EDITFEKO 和 POSTFEKO 3 个主要组成部分。现有文献中大多数是利用 FEKO 计算目标的远场电磁散射特性^[3-6],而基于 FEKO 计算近场散射特性的探讨则相对较少。本文所提出的基于 FEKO 的目标近场散射特性仿真的基本步骤见图 1。

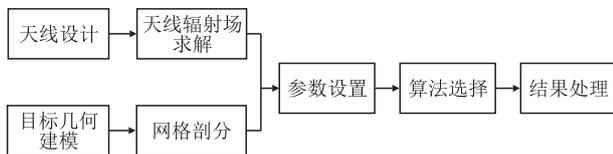


图 1 FEKO 近场散射特性仿真基本步骤

Fig.1 Flow chart of near-field scattering characteristics simulation based on FEKO

首先,根据实际情况,设计了照射天线,其次,在 FEKO 中求解了天线的辐射场,以 *.sph 文件的形式保存,以便在目标近场散射计算时作为球模式激励源输入;最后,在求解设置中选择近场,并选用合适算法仿真目标在该天线照射下的近场散射特性。

为验证方法的准确性,基于 FEKO 对文献[7]中的例子进行了仿真,入射场为赫兹偶极子的辐射场,照射目标为介质立方体,文献[7]中采用的计算方法为有限元全波数值方法,本文的仿真结果见图 2。

由图 2 可知,本文的仿真结果与文献[7]中的参考结果十分接近,远距离球面波入射条件下得到的 GRCS 与平面波入射条件下得到的 GRCS 基本相同,而近距离球面波入射条件下的仿真结果在接收角为 20°和 160°附近与平面波入射条件下的仿真结果有较大差异。说明了本文所提方法的准确性。由于目标是介质立方体,且天线在立方体的对称面

上入射,故 GRCS 应该具有对称性。

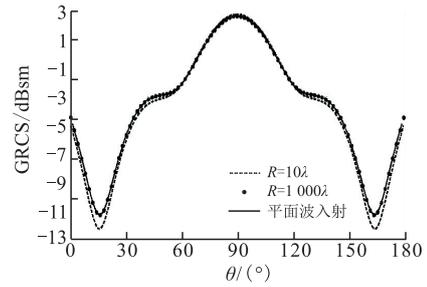


图 2 仿真结果

Fig.2 The simulation results

文献[8]提出了通过实时计算电磁波的入射和散射方向,用 Matlab 循环调用 FEKO,从而实现近场散射特性的实时计算。但在 Matlab 中调用 FEKO 的程序在运行时无法进行并行计算,即无法充分利用计算机资源,且每次循环调用,FEKO 都要进行诸如保存文件、读入目标剖分信息等重复过程,因此存在效率较低的问题。EDITFEKO 中的卡片编辑器可以实现几何模型的建立与剖分以及求解参数的设置,其中利用 for 卡和 next 卡可以实现类似于文献[8]中的 Matlab 的循环调用功能,且可以直接在 EDITFEKO 中运行 FEKO,这不仅解决了无法并行计算的问题,而且省略了程序每次运行的重复步骤等。具体实现步骤如下:

- 1) 计算出待求解电磁波的入射方向和散射方向、照射天线的位置和接收位置等物理量的时间变化序列,并将它们保存下来。
- 2) 在 EDITFEKO 中添加 for 卡和 next 卡。for 卡中设定循环变量名和循环变量的起始值、终止值和循环步长。
- 3) 利用 # 卡添加变量。在设置选项中利用 FILEREAD function 功能将 1) 中的参数赋值给这些变量,利用循环变量控制参数在各自时间变化序列中的具体取值。
- 4) 添加 next 卡。
- 5) 设置并行进程数目,运行 FEKO。

2 引信目标近场动态散射特性

2.1 建立引信天线模型

文献[1]、[9]分别以同轴线式槽缝天线、矩形波导宽边长槽漏波天线建立了单个引信天线模型,并仿真了它们的辐射场。实际的引信天线为使方向图在垂直于弹轴的平面内呈圆形,通常采用两对天线互成 90°配置,从而导致方向图由于电磁波相互干涉形成“瓣状区”。同时,为了确保所建立的引信天线模型具有一定工程实用性,要保证天线方向图主

峰方向与弹轴之间的夹角在 $82^\circ \sim 87.5^\circ$ 之间^[1]。

为了简化仿真过程,假设引信天线在垂直弹轴方向具有理想的圆形方向图,故本文以对称振子组成的均匀直线阵作为引信天线。为了考虑天线辐射特性对近场散射的影响,在 FEKO 中求解了该天线的辐射场,作为入射激励源使用。图 3 给出了该天线的三维方向图。该天线工作频率为 10 GHz,波束倾角为 80° ,具有一定工程实用性。

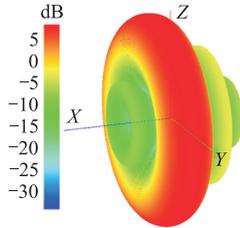


图 3 天线三维方向图

Fig.3 Three-dimensional antenna pattern

2.2 引信作用段弹目交会模型

由于引信作用段时间较短,目标与导弹可以近似为匀速直线飞行,因此通常选择在相对速度坐标系下研究弹目交会运动。目标相对速度坐标系 $o_r x_r y_r z_r$ 的定义为以目标中心为坐标原点,导弹相对目标的速度 V_r 的方向为坐标系的 x_r 轴方向; y_r 轴取在垂直平面内,向上为正; z_r 轴取在水平平面内,与 x_r 、 y_r 轴成右手螺旋关系,见图 4。

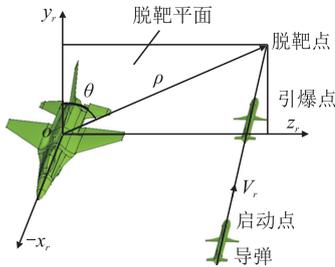


图 4 目标相对坐标系示意图

Fig.4 Schematic diagram of target relative coordinates

在相对速度坐标系中,弹目交会模型涉及的参数主要有弹目相对速度 V_r 、导弹姿态 $(\psi_M, \theta_M, \gamma_M)$ 、目标姿态 $(\psi_T, \theta_T, \gamma_T)$ 、脱靶量 ρ 、脱靶方位 θ ,各参数的具体定义详见文献^[11],上述参数在仿真中均为已知量。在目标相对坐标系中由确定的脱靶量及脱靶方位可以最简洁地表示出导弹的运动方程:

$$\begin{bmatrix} x_{MR} \\ y_{MR} \\ z_{MR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_r t \\ \rho \cos \theta \\ \rho \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{MR}, y_{MR}, z_{MR} 为导弹在目标相对速度坐标系 $o_r x_r y_r z_r$ 下的坐标, t 为导弹到脱靶点的飞行时间。

在 FEKO 中仿真目标的动态散射特性时,最关键的是将不同坐标系下的参数都变换到目标坐标系中,便于 FEKO 求解时的参数设置。导弹位置在目

标坐标系下的坐标 (x_{MT}, y_{MT}, z_{MT}) 为:

$$\begin{bmatrix} x_{MT} \\ y_{MT} \\ z_{MT} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{TR \rightarrow T} \begin{bmatrix} x_{MR} \\ y_{MR} \\ z_{MR} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_{TR \rightarrow T} = M_y(-\varphi_{RT}) M_z(-\theta_{RT}) (M_x(\gamma_T) M_z(\theta_T) M_y(\psi_T)) \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A}_{TR \rightarrow T}$ 为目标相对速度坐标系到目标坐标系的坐标变换矩阵; $\mathbf{M}_i(\theta)$ 为初等旋转矩阵,表示坐标系绕 i 轴逆时针旋转 θ 角度^[11]; φ_{RT} 为目标相对航迹偏角,即相对速度方向在水平面的投影与地面坐标系 x 轴的夹角, θ_{RT} 为目标相对航迹倾角,即相对速度方向与水平面的夹角:

$$\tan(\varphi_{tr}) = \frac{-V_{rz}}{V_{rx}} \quad , \quad -\pi \leq \varphi_{tr} \leq \pi \quad (7)$$

$$\sin(\theta_{tr}) = \frac{-V_{ry}}{|V_r|} \quad , \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{tr} \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

式中: V_{rx}, V_{ry}, V_{rz} 分别为 V_r 在地面坐标系下的 3 个分量。

由于假定引信天线的方向图在垂直于弹轴平面内为圆形,因此弹体旋转对天线方向图没有影响。球模式场的入射方向可由目标坐标系中弹轴指向 (θ_1, φ_1) 表示:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{M \rightarrow T} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\theta_1 = \arccos(z_1 / \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}) \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \arctan(y_1 / x_1) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{A}_{M \rightarrow T}$ 为弹体坐标系到目标系的变换矩阵。

$$\mathbf{A}_{M \rightarrow T} = M_y(-\psi_M) M_z(-\theta_M) M_x(-\gamma_M) M_x(\gamma_T) M_z(\theta_T) M_y(\psi_T) \quad (12)$$

由文中的公式可以得到目标坐标系中的导弹位置 (x_{MT}, y_{MT}, z_{MT}) 和目标坐标系中的弹轴指向 (θ_1, φ_1) ,从而可以确定弹目交会过程的引信天线对目标的照射情况。

2.3 仿真实例与分析

以某型战斗机为研究对象,运用本文建立的天线模型和弹目交会模型求解该目标的近场动态散射特性。图 5 给出了目标在不同脱靶量条件下,近场

散射电场随导弹在目标相对速度坐标系 o_r, x_r 轴上坐标 x_{MR} 的变化曲线。具体仿真参数设置为:目标姿态 $\psi_T = 180^\circ$, $\theta_T = 0^\circ$, $\gamma_T = 0^\circ$, 导弹姿态 $\psi_M = 0^\circ$, $\theta_M = 0^\circ$, $\gamma_M = 0^\circ$, 目标速度为 $V_T = 300$ m/s, 导弹速度为 $V_M = 1\ 000$ m/s, 脱靶方位为 $\theta = 90^\circ$, 脱靶量分别为 $\rho = 3$ m、 $\rho = 7$ m。

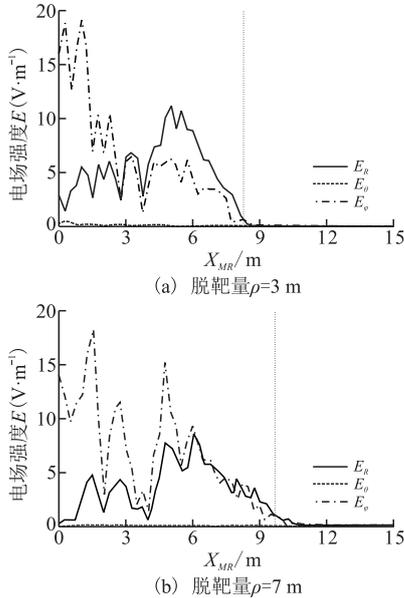


图5 目标近场散射电场变化曲线

Fig.5 Curve of target's near-field scattering electric field

图5中竖直虚线表示弹目交会过程中,目标进入引信天线半功率波瓣宽度内时对应的坐标 x_{MR} 。观察图5结果可知,当弹目距离较远时,散射电场很小,这是因为此时引信天线波束主瓣未照到目标,而副瓣增益较低,且弹目距离较远,因此入射场较小。当目标开始进入主波束半功率波瓣宽度内后,散射电场首先逐渐增大,这是由于随着弹目距离减小,目标照亮区逐渐增大,但之后出现较大起伏,因为交会过程中,目标照亮区不断变化,而不同的照亮区下对应着不同的目标部位,其散射强度必然出现起伏。比较图5的两幅图可知,脱靶量越小,散射电场强度越大,对应的引信接收信号强度也必然越大。需要说明的是在这两种交会条件下,电场 E_θ 分量很小,这是由本文建立的引信天线辐射特性导致的,此时目标受到的天线辐射场 E_θ 分量很小。

3 结语

本文针对近场电磁散射计算问题的复杂性提出了基于 FEKO 的仿真计算方法,并通过建立弹目交会模型,对引信目标近场电磁散射的进行了实时仿真。该方法能够充分地考虑到天线方向图、弹目交会条件等因素对目标近场散射的影响,且基于已有成熟商业软件,实现过程简便。结合实际情况,通过

调整弹目交会模型的各仿真参数,可以得到任意交会条件下目标近场动态散射特性,为进一步研究引信启动区与引信天线主瓣倾角、宽度及目标散射强度的关系、引信作战效能、引战配合效率等问题提供数据支持。

参考文献(References):

- [1] 崔占忠,宋世和,徐立新.近炸引信原理[M].北京:北京理工大学出版社,2009.
CUI Zhanzhong, SONG Shihe, XU Lixin. Proximity Fuze Theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.(in Chinese)
- [2] 吴玲,夏应清.天线方向图对目标近场散射特性影响的研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2014,48(3):39-42.
WU Ling, XIA Yingqing. The Impact of Antenna Pattern on Targets Near-Field Scattering Characteristics[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Science Edition, 2014, 48(3): 39-42.
- [3] 陈德喜,颜俐,王海婴.FEKO软件的RCS仿真应用[J].舰船电子工程,2008,28(9):125-203.
CHEN Dexi, YAN Li, WANG Haiying. Emulational Application by the Software FEKO in the Radar Cross Section[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(9): 125-203.(in Chinese)
- [4] 戴崇,徐振海,肖顺平.非合作目标动态RCJ仿真方法[J].航空学报,2014,35(5):1374-1384.
DAI Chong, XU Zhenhai, XIAO Shunping. Simulation Method of Dynamic RCS for Non-cooperative Targets[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(5): 1374-1384.(in Chinese)
- [5] Podilchak, Symon K. Monostatic and Bistatic HF Radar Cross Section Analysis of Large Vessels Using FEKO [R]. Contract Report, ADA546623, 2011.
- [6] Tonder J V, Jakobus U. Introduction of Curvilinear Higher-order Basis Functions for MOM and MLFMM in FEKO[C]//Computational Electromagnetics Workshop, Turkey: IEEE Press, 2013: 1492-1496.
- [7] 高红伟,巩莉,盛新庆.三维复杂目标近区散射场的计算[J].北京理工大学学报,2014,34(1):88-91.
GAO Hongwei, GONG Li, SHENG Xinqing. Computation of Near-field Scattering by 3-D Complex Target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(1): 88-91.(in Chinese)
- [8] 郭鹏,白亮,武梦洁,等.基于FEKO的雷达散射截面实时计算[J].航空科学技术,2013,15(6):72-76.
GUO Peng, BAI Liang, WU Mengjie, et al. Real-time RCS Calculation Based on FEKO[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 15(6): 72-76.(in Chinese)
- [9] 聂剑坤.弹载天线相关近场电磁散射问题研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
NIE Jiankun. Study on the Related Problems of the Near EM Field of Missile-borne Antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.(in Chinese)
- [10] FANG Chonghua, HUANG Xuemei, Qiong Huang, et al. Near-field Scattering Characters of the Ship[C] // 2013 International Symposium on Antennas and Propagation Society, Nanjing: IEEE Press, 2013: 343-346.
- [11] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男.导弹飞行力学[M].北京:北京理工大学出版社,2013.
QIAN Xingfang, LIN Ruixiong, ZHAO Ya'nan. Missile Flight Dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology University Press, 2013.(in Chinese)

(编辑:徐楠楠)