

文章编号: 1009-4687(2006)04-0032-04

坦克炮塔基体雷达隐身特性有限元仿真研究

程 曦， 韩建保

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要: 利用有限元-边界元数值方法, 建立了微缩坦克炮塔基体雷达散射截面 (RCS) 的仿真计算模型, 研究了模型中各种边界层的设置条件, 计算分析了单元尺寸、单元类型、PML 单元层数以及模型外表面阻抗边界条件对目标 RCS 计算精度的影响. 研究结果表明, 应用一阶六面体 HF120 型单元离散等效源表面到 PML 外表面之间区域, 可将厘米级目标 RCS 的计算时间缩短至 20%, 有限元模型中 PML 单元层数可减少到 3 层.

关键词: 有限元-边界元法; 雷达散射截面; 坦克炮塔

中图分类号: TJ811; O242.21 文献标识码: A

FE – Simulation Research on the RCS of a Tank Barbette

CHENG Xi, HAN Jian-bao

(School of Engineering and Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The simulation model for radar cross section (RCS) of a tank barbette is established by FEM – BEM. Setting principles of suppositional layers such as PML and PEC in the FE model are determined. The influences of element size, element type, number of PML layers and surface impedance boundary conditions on precision of the FE model are calculated and analyzed. The results indicate that dispersing the area between ESS and exterior of PML by first order hexahedral elements HF120 cuts the calculation time down for centimeter objects by 80%. And in the FE model, decreasing the number of PML layers to 3 is also practical.

Key words: finite element method-boundary element method; radar cross section; tank barbette

现代远程侦察和精确打击系统对坦克装甲车辆等地面武器装备构成了无法忽视的威胁. 从战略上讲, 拥有先进侦察技术的一方便拥有更好的“战场单向透明度”. 从战术层次来说, 在先进的侦测系统引导下, 精确打击系统能够有效摧毁锁定的目标. 因此, 如何与这两种主要威胁相抗衡, 特别是如何避免被独具远距离全天候的探测设备雷达发现, 关系到地面武器装备的生存能力及战斗力的发

挥, 是其发展过程中一个必须面临的严峻挑战^[1].

用于计算飞机、战舰、坦克装甲车等电大尺寸目标的雷达电磁散射特性(雷达散射截面 RCS)的基本方法包括: 几何光学法 GO、物理光学法 PO、几何绕射理论 GTD、物理绕射理论 PTD、一致性绕射理论 UTD 等. 这些方法对于计算目标 RCS 都发挥了巨大作用, 但对于具有复杂几何外形的目标, 却常常会在其过渡区、集散区、边缘等处遇到难以

收稿日期: 2006-06-08

基金项目: 北京理工大学学校基础研究基金(05120246E)

作者简介: 程 曦(1981-), 女, 硕士生; 韩建保(1960-), 男, 副教授.

克服的困难,使得计算要么无能为力,要么耗时太长。有限元法则能够比较容易地处理形状复杂目标 RCS 的计算问题^[2~4]。作者利用三维实体建模技术和有限元-边界元法(FEM-BEM),以某型坦克炮塔雷达隐身优化设计后的微缩模型为应用实例,研究复杂目标 RCS 有限元仿真计算模型中各种边界层及电导体的设置,以及单元尺寸、单元类型、PML 单元层数和模型外表面阻抗边界条件等对目标 RCS 计算精度的影响。

1 目标 RCS 有限元模型

有限元法将连续的求解区域离散为一个数量有限且按一定方式连接起来的单元组合体,利用在每一个单元内设定的形状函数来近似整个求解域上的未知场函数。其中单元尺寸对离散化模型的计算精度有着显著的影响,因此一般要求单元的最大尺寸不超过 $1/10$ 波长,以确保足够的计算精度。大型有限元分析软件 ANSYS 提供了一阶的四面体(HF119)和六面体(HF120)两种单元,用于对高频电磁场的有限元模型进行离散化处理。目标雷达散射场一般涉及一个开放的无限区域,因此在目标 RCS 有限元计算模型中设置了特定的边界层以消除无限区域上的积分运算。模型的边界层包括理想匹配层 PML、理想电导体 PEC、理想磁导体 PMC、等效源表面 ESS 和表面阻抗边界条件 SIBC 等,如图 1 所示。

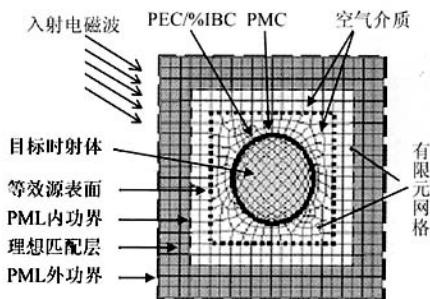


图 1 高频电磁场目标散射有限元模型

图 1 中 PML 反映吸收外行电磁波的吸收边界条件,其特征参数包括匹配层厚度,一般不小于波长的 $1/4$; PML 单元层数,一般不少于 4 层; 常规反射系数,一般小于 1.0,默认值 $1.E-2.5$ (-50dB); 与内部不连续区域或散射体之间的缓冲单元层数,一般不少于 4 层。ESS 围绕目标散射体,处于散射体与 PML 区域之间,用来计算和存储等

效源电流。SIBC 用来近似表示电损耗较小的介质层,以模拟金属材料对电磁波的吸收属性。PEC 边界层又称为电墙(Electric Wall),其上电场矢量的切向分量为零,在目标导体的电损耗可以忽略时,可用 PEC 取代导体外表面。PMC 边界层又称为磁墙(Magnetic Wall),其上磁场矢量的切向分量为零,在目标导体的磁损耗可以忽略时,可用 PMC 取代导体外表面。空气介质用以模拟雷达电磁波的传播环境。

文献 [3] 给出了一个具有较好雷达隐身特性的某型坦克炮塔基体模型,如图 2 所示。以该模型为例,研究模型的 RCS 随各主要建模参数的变化规律,为避免过长的计算时间,将模型尺寸按比例缩小为原尺寸的 $1/200$ (原模型几何特征尺寸为长 3.420 m, 宽 2.560 m, 高 0.7 m)。其 RCS 有限元计算模型中的缓冲单元层数设置为: ESS 与模型之间 6 层缓冲单元, PML 与模型之间 7 层缓冲单元。雷达波频率 $f = 35$ GHz, V 极化, 分别加载水平正前方和 15° 仰角右侧入射的平面雷达波,计算了雷达波在方位角锥面上的双站 RCS 值。

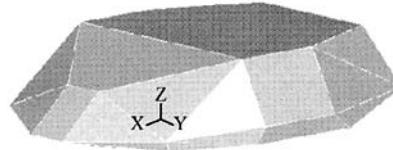


图 2 隐身设计的某型坦克炮塔基体

2 有限元模型特征参数设置

在仿真计算模型中其它设置条件不变的情况下,针对某一特定参数的不同数值进行计算,通过对计算结果的分析比较来确定该参数对模型精确度的影响情况。作者针对目标 RCS 有限元计算模型中的单元尺寸、单元类型、PML 单元层数以及模型外表面阻抗边界条件的设置,计算分析了上述因素对有限元模型计算结果的影响。

2.1 单元尺寸设置

研究单元尺寸对目标 RCS 计算值的影响时,采用 HF120 单元,4 层 PML 单元,把模型外表面阻抗边界设为 PEC。分别取单元长度为 0.0008 m、0.001 m、0.0012 m、0.0016 m、0.002 m、0.003 m、0.005 m 建立 RCS 有限元计算模型,并按单元大小将模型分为两组。第一组包括用前 4 个尺寸较

小的单元划分的模型, 以突显单元尺寸小范围内的变动对计算结果造成的影响, 第二组包括用后 3 个尺寸较大的单元划分的模型, 以分析单元尺寸明显大于 $1/10$ 波长时 RCS 计算结果的变化趋势。计算结果如图 3 至图 6 所示。

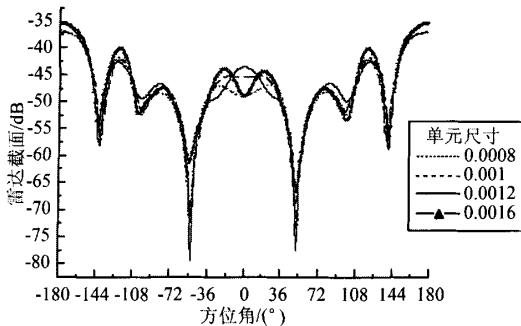


图 3 雷达波水平正前方入射(小单元)

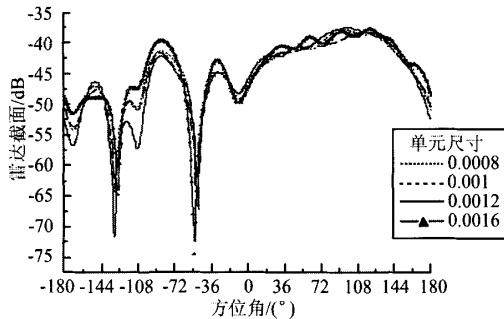


图 4 雷达波俯仰角右侧入射(小单元)

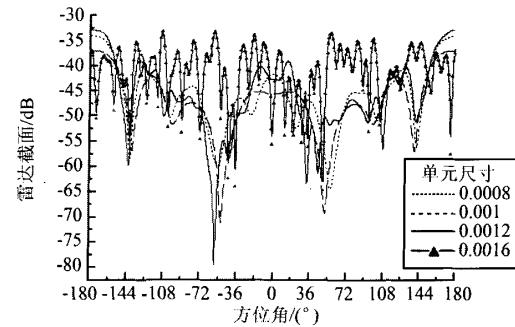


图 5 雷达波水平正前方入射(大单元)

从图 3 和图 4 可以看出, 计算的目标 RCS 随着单元增大, 最初在雷达波入射方向前后出现较大偏差, 但其分布情况基本不变; 随后从雷达波入射方向开始, 波形产生振荡, 极值附近也出现大的偏差。在图 5 和图 6 中, 当单元尺寸增加至 0.005 m (0.625 倍波长) 时, 目标 RCS 波形已经面目全非, 难以从中辨别出最大值出现的方向或重点威胁角域。研究结果表明, 在精度要求不高的情况下, 小

幅度增加单元尺寸尚可, 而尺寸大于 0.625 倍波长的单元将给计算结果带来无法估量的数值离差。

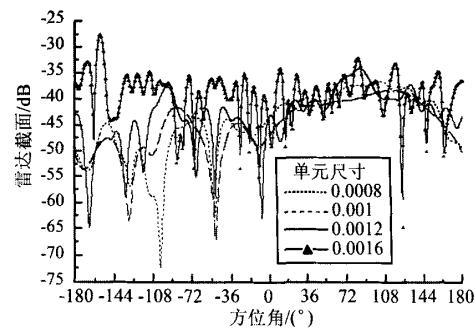


图 6 雷达波俯仰角右侧入射(大单元)

2.2 单元类型选择

研究单元类型对目标 RCS 计算值的影响时, 采用长度为 0.0008 m 的单元, 4 层 PML 单元, 模型外表面阻抗边界设为 PEC, 分别用一阶的 HF119 和 HF120 单元对模型外表面到 PML 外表面之间的区域进行网格划分。HF120 单元的应用情况为 ESS 以外用六面体单元, 以内用退化的金字塔单元。表 1 列出了 RCS 值误差较大的方位角 φ 及其上的 RCS 值, 其中 a 和 b 表示模型分别利用 HF119 和 HF120 单元时的 RCS 计算结果。从表 1 可以看到, 不同类型单元划分的有限元模型计算得到的 RCS 值误差不超过 8% , 只在个别角度上大于 5% , 而最大 RCS 差值在 5 dB 左右。

表 1 不同单元划分模型的 RCS 值比较

φ /°	a /dB	b /dB	$c = -(a - b)$ /dB	c/a /%	c/b /%
水平正前方入射					
49	-68.191	-66.329	1.862	-2.73	-2.81
-51	-66.96	-71.994	-5.034	7.52	6.99
-52	-64.86	-69.821	-4.961	7.65	7.11
-53	-62.739	-66.376	-3.637	5.8	5.48
52	-64.698	-67.991	-3.293	5.09	4.84
15°俯仰角右侧入射					
-131	-64.127	-62.306	1.821	-2.84	-2.92
-49	-63.682	-65.903	-2.221	3.49	3.37

单个一阶 HF119 单元的自由度(6)小于一阶六面体 HF120 单元(12), 但 HF119 单元的体积比同样长度的 HF120 单元小的多, 划分相同区域时, 用 HF119 单元得到的自由度(方程)总数远远大于用 HF120 单元时的自由度, 导致计算时间延长。在该计算实例中, 用 HF119 单元的模型方程数为

367 955, 求解时间为 90 min, 用 HF120 单元的模型方程数为 203 594, 求解时间为 15 min. 而 HF120 单元的缺点在于, 为了能够应用六面体单元, 必须将被划分区域分割为多个方形的组合体, 该处理过程繁琐且工作量大. 综合考虑建模和计算两步骤, 仍然可以看到在选择单元类型对有限元模型进行离散化时, HF120 单元比 HF119 单元具有更好的应用特性, 可以优先考虑.

2.3 PML 单元层数设置

研究 PML 单元层数对目标 RCS 计算值的影响时, 应用长度为 0.0008 m 的 HF120 单元, 模型外表面阻抗边界条件设为 PEC. 为了寻找满足一定精度要求的最小 PML 单元层数, 对 1、2、3、4、5、7 层 PML 单元的有限元模型进行计算对比分析, PML 区域的厚度分别为 1/10、1/5、3/10、2/5、1/2、7/10 波长. 前 3 种 PML 单元层数的设置都不满足高频电磁场散射分析的基本建模规则, 但计算结果却表明, 这不一定会给目标 RCS 的计算精度带来大的影响.

与建模规则上的 4 层 PML 单元模型的计算结果相比, PML 单元层数为 1 时计算出 RCS 的分布情况基本没有改变, 极大值处的误差不到, 但在最小的两个极小值及附近出现相当大的误差. 当雷达波水平入射时, 在方位角 -54° 和 54° 的方向上误差达到 -41.03% 和 -24.53% , 最大差值为 26.066 dB; 当雷达波 15° 俯仰角右侧入射时, 在方位角 -52° 和 -128° 的方向上分别出现 -24.38% 和 -15.67% 的误差, 最大差值为 14.681 dB.

随着 PML 单元层数增加, 极值处误差逐渐减小, 当 PML 单元层数不小于 3 层时, 两种入射雷达波激励下的最大误差仅为 3.26% 和 -1.18% , 最大差值为 -2.345 dB 和 0.757 dB. PML 单元层数再增加, 对提高目标 RCS 计算精度的效果已不大, 相对误差均小于 1%. 对目标雷达隐身优化设计而言, 具有重要意义的是 RCS 的分布情况及极大值, 为了节省计算时间和存储空间, 可将目标 RCS 有限元计算模型中的 PML 单元层数设为 3 层甚至更少.

2.4 模型外表面阻抗边界条件设置

研究模型外表面阻抗边界条件对目标 RCS 计算值的影响时, 用长度为 0.0008 m 的 HF120 单元, 4 层 PML 单元. 假设炮塔基体表面分别由铁

Fe(阻抗 $3.74(1+j)$)、铜 Cu(阻抗 $4.956 \times 10^{-2}(1+j)$)建成. 表 2 和表 3 分别列出了 Fe 和 Cu 模型计算结果与 PEC 表面模型计算结果之间的最大误差, 以及最大误差出现方位角上的 RCS 值.

表 2 PEC 和 Fe 表面的 RCS 值比较

φ /°	a (PEC) /dB	b (Fe) /dB	$p = a - b$ /dB	p/a /%	p/b /%
水平正前方入射					
-54	-63.526	-64.447	0.921	-1.45	-1.43
-50	-69.792	-67.098	-2.694	3.86	4.02
15° 俯仰角右侧入射					
-49	-65.903	-63.526	-2.377	3.61	3.74
-52	-60.209	-60.822	0.613	-1.02	-1.01
-53	-57.409	-58.022	-1.07	-1.07	-1.06

表 3 PEC 和 Cu 表面的 RCS 值比较

φ /°	a (PEC) /dB	c (Cu) /dB	$q = a - c$ /dB	q/a /%	q/c /%
水平正前方入射					
-136	-52.086	-52.964	0.878	-1.69	-1.66
140	-56.717	-55.319	-1.398		2.53
141	-54.781	-53.771	-1.348		2.52
135	-50.277	-51.134	0.857	-1.7	-1.68
15° 俯仰角右侧入射					
-131	-62.306	-63.303	0.997	-1.6	-1.57
-50	-68.276	-66.152	-2.124	3.11	3.21

计算结果表明, 由 Fe、Cu 建成模型表面计算得到的 RCS 值与表面阻抗边界条件设为 PEC 的有限元模型的计算结果相比, 其最大误差都没有超过 5%, 绝大多数方位角上的误差在 3% 以内, 而最大 RCS 差值均不到 3dB. 由此推断, 应用于工程实际中的金属导体目标普遍可用 PEC 代替其表面作为边界条件, 以简化建模阶段的工作.

3 结 论

目标 RCS 有限元计算模型的仿真结果表明, 用于划分网格的单元可以小范围内增大; 单元类型的选择优先考虑 HF120 单元, 可以减小 PML 单元层数到 3 层或 3 层以下; 金属导体材料目标的表面阻抗边界条件可统一简化为 PEC 边界条件.

参考文献:

- [1] 赵晓凡. 坦克装甲车辆主动防御系统研究[J]. 车辆与动力技术, 2002, 87 (3): 53-57.

(下转第 62 页)

- Beijing [J]. Journal of Environmental Science, 2005, 17(2): 319-326.
- [11] 王文, 于雷, 刘娟等. 中巴车实测排放因子和 MOBILE6 预测值的对比分析 [J]. 交通环保, 2005, 26(3): 40-43.
- [12] 杨延相, 杜红, 刘昌文, 等. 用于汽车道路行驶排放测量的车载实验系统 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(4): 62-65.
- [13] 万涛, 于雷, 裴文文, 等. 捷达车实测排放因子和 MOBILE6 预测值的对比分析 [J]. 交通环保, 2005, 26(2): 11-14.
- [14] 王文, 于雷, 杨方等. 基于 OEM 技术的机动车行驶周期的研究 [J]. 交通环保, 2004, 25(2): 14-17.
- [15] Ahn K, Trani A A, Rakha H, et al. Microscopic fuel consumption and energy emission models [C]. Transportation Research Board 78th Annual Meeting, January, CD-ROM, pp. 99-1431, Washington, D. C., 1999.
- [16] U. S. Environmental Protection Agency. MOVES2004 User Guide, Draft [R]. EPA420-P-04-019, Washington, D. C., USA, 2004.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency. EPA's On-board Analysis Shootout: Overview and Results [R]. EPA420-R-02-026, Washington, D. C., USA, 2002.
- [18] 杨方. 基于 PEMS 的轻型车热稳状态下微观尾气排放模型 [D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [19] Mitsui T, Mori K, Hagita K. Automatic Estimation of Vehicle Emissions Using Vehicle Detectors [C]. 84th Transportation Research Board Annual Meeting CD-ROM, Washington, D. C., USA, 2005.
- [20] 陈长虹, 景启国, 王海鲲等. 重型机动车实际排放特性与影响因素的实测研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 870-878.

(上接第 35 页)

- [2] 高本庆, 刘波. 电磁场时域数值技术新进展 [J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4): 401-406.
- [3] 韩建保, 韩双庆, 张鲁滨等. 外露外挂件及结合部外形对炮塔整体 RCS 的影响 [J]. 北京理工大学学

报, 2005, 25(4): 204-206.

- [4] 丁卫平, 徐金平. 带有腔体或槽缝的电大尺寸目标电磁散射特性分析 [J]. 电子学报, 2002, 30(6): 815-818.

(上接第 52 页)

4 结论

多频率检测机制作为车载诊断系统一种较新的控制理念, 已成为不少国外学者的研究方向。部分国外电控系统开发公司已经尝试将其运用到新一代的车载诊断系统中。

周期序列 MAP 法计算量小, 能进一步提高车载诊断系统的响应特性。这对于快速地确认、排除故障, 降低故障对发动机部件和环境的破坏具有重要的作用。

参考文献:

- [1] 秦贵和. 汽车电控系统故障自诊断技术 [J]. 汽车工程, 2000, 22(4): 95-99.
- [2] BOSCH 公司. 汽油机管理系统 [M]. 吴森译. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [3] 陈杰. 分时多任务机制在汽油机电控单元中的应用 [J]. 车用发动机, 2000(2): 21-24.
- [4] Martin K. Misfire Detection by Evaluation Crank shaft Speed Means to Comply with OBDII [C]. SAE 930399, 1993.
- [5] 张尧学. 计算机操作系统教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

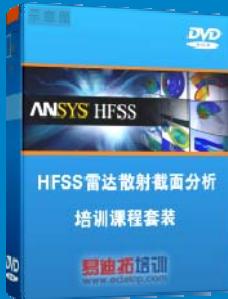
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>