单端开口复杂终端腔体 RCS 算法研究

姚伦标^{*},李宁,张琪,于明飞 中国航发贵阳发动机设计研究所,贵州 贵阳 550081

摘 要:在对比分析常用腔体散射的研究方法优缺点基础上,分析了腔体散射具有散射强度高、散射角度宽、高频散射等特征, 亟待解决对电大尺寸复杂终端腔体的精确数学模型处理及计算精度问题。基于以矩量法(MOM)为基础的三维电磁分析软件 FEKO,分别采用低频数值算法、高频近似算法开展了对文献单端开口复杂终端模型的雷达截面积(RCS)对比计算研究,得 出在综合考虑计算精度、效率时,由矩量法改进而来的多层快速多极子法(MLFMM)在电大尺寸复杂终端腔体电磁散射特性 研究中具有较大优势。

关键词:FEKO;MLFMM,腔体,电磁散射特性;RCS

中图分类号: V218 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.10.058

现代战争中,飞行器的低可探测性是其战场生存力的 重要指标。在飞行器的电磁特性研究中,进气道、座舱、排气 喷管等凹腔结构使入射电磁波在腔体内多次反射及相互作 用,电磁能量从口径面返回,可在入射方向上形成强烈的雷 达回波,构成飞行器前向、后向的强散射源。由此,进气道、 喷管等腔体成为评估隐身飞机隐身性能的关键部件,对这类 腔体构件开展雷达截面积 (RCS)分析研究是飞行器隐身技 术的重要研究课题。

飞行器的腔体结构尺寸较雷达波长都为电大尺寸,且 腔体内部均含有复杂的终端结构,这使得腔体的电磁散射机 理十分复杂,散射强度大,相对于平板、曲面等结构的计算分 析难度巨大。早期对腔体的电磁散射特征分析,应用模式匹 配法(MM)^[1]进行分析,其局限性非常明显,后来发展了高 频射线类方法,如弹跳射线法(SBR)、广义射线法(GRE)、 高斯波束法(GB)等,主要是基于高频电磁波的类光学特性 而提出,而基于积分方程的矩量法(MOM)及基于差分方程 的有限元法(FEM)、有限时域差分(FDTD)等方法也得到 不同程度的发展,同时基于上述方法的混合算法也备受研究 学者关注^[2-6]。但对于单端开口复杂终端的腔体结构电磁散 射分析一直没有形成公认的、系统而精确的算法,对其开展 电磁特性分析需要在计算精度与效率上合理取舍。多层快 速多极子法(MLFMM)是基于 MOM 发展而来,在保留了 数值算法计算精度的同时,大大提高了计算效率,使其在电 大尺寸任意几何形状结构的复杂腔体 RCS 研究具有较大优势。

本文基于三维电磁计算软件 FEKO,对单端开口复杂终 端腔体进行不同方法对比计算后,与文献测试结果进行对 比,得出在综合考虑计算精度、计算资源需求、计算效率等方 面因素下的电磁散射分析优选方法。

1 腔体散射研究方法

腔体结构作为一类重要的电磁散射结构,一直吸引着 众多研究者致力于其电磁特性研究。腔体散射具有散射强 度高、散射角度宽、高频散射等特征^[7],且腔体类部件几何尺 寸通常远大于入射电磁波长,属于电大尺寸问题,这些特征 使得腔体类部件 RCS 计算难度很大。对此,国内外学者提 出了各种针对腔体的电磁计算方法^[8]。根据各类方法的特 点,可将其大致分为三类,分别是低频数值算法、高频近似算 法和混合算法。

1.1 低频数值算法

数值方法诸如 MOM、FEM、FDTD 等,是基于严格麦克 斯韦方程及 Stratton-Chu 微积分方程来描述电磁场边值问 题的方法,原则上其可用于研究任意频率范围、任意几何形 状结构的目标,计算精度高,但随着电尺寸的增加,计算量和

收稿日期:2018-08-02; 退修日期:2018-08-24; 录用日期:2018-09-16

*通信作者.Tel.:0851-84101085 E-mail:charles0851@126.com

引用格式: Yao Lunbiao, Li Ning, Zhang Qi, et al. Investigation calculating method of radar cross section from arbitrarily-shaped open cavities [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (10):58-63. 姚伦标,李宁,张琪,等. 单端开口复杂终端腔体 RCS 算法研究 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (10):58-63.

内存资源需求将迅速增加,即使一般计算中心也很难满足。同时高频区的散射变成了局部效应,距离远的面元之间相互作用变得非常微弱,使整个目标离散为基础的 Stratton-Chu 方程效率大大降低^[7]。

1.2 **高频近似算法**

高频算法是基于电磁波的类光学特性提出的针对电大 尺寸的近似算法,早期提出的 MM 法只适合计算规则腔体 且轴向不能有大的变化,因为只有在简单典型体才能找到波 导的本征模式表达式,计算时间也比较长。后来发展了一些 高频射线类方法,如 SBR、GRE、GB、GO、迭代物理光学法 (IPO)等,在计算效率及规模上具有一定优势,因其为近似 算法,计算精度及适用条件都限制了其应用范围,这也是研 究学者致力于不断提高的重要研究方向。

1.3 混合算法

对于内部结构复杂的电大尺寸开口腔体,高频近似方 法处理复杂结构带来的误差太大,而低频数值方法又不能负 载电大尺寸腔体电磁分析的庞大计算量。混合算法理论上 结合了两者的优点,利用高频方法计算终端前的缓变空腔, 利用低频数值算法计算终端的复杂结构^[9,10]。这样大部分 腔体可以用高频算法快速计算,其余电尺寸已经减小到低频 数值方法可处理的程度,降低了对计算机硬件的要求。国内 外学者对此进行了大量探索,但从目前的研究成果来看,并 没有被广泛采用,对诸如航空发动机排气腔体等复杂终端开 口腔体 RCS 分析行之有效的方法。

2 腔体散射研究中存在的问题

从早期的模式匹配法提出至今,国内外学者提出不同 腔体的 RCS 计算方法,但由于腔体结构电磁散射机理复杂, 且实际目标结构复杂多变,目前对于腔体散射研究中仍存在 一些亟待解决的问题。

(1) 电大尺寸问题的精确处理

电磁散射问题的核心是将散射、辐射问题转化为数学 模型,建立数学方程后进行数值求解。理论上说,不管目标 尺寸的大小,只要能建立足够精确的模型都应该能得到问题 的解,但实践证明当目标电尺寸增大或减小到一定尺寸时,数 值解与测量结果之间存在很大差异。对于电大目标的误差, 除了数值离散误差、数学模型误差,还有计算机本身硬件资源 限制也是精确处理问题的一个瓶颈。如以积分方程为基础 的 MOM 方法,其离散方程的系数矩阵通常为满矩阵,需要 大量的求逆过程,其求解通常需要O(N³)量级的数值计算 量和 O(N²)量级的计算机内存资源(N 为未知量数目)^[11]。 因此,解决电大尺寸与计算机限制之间的矛盾,是实现腔体 RCS 精确处理的重要研究内容。

(2)复杂终端

在大量的文献中研究进气道、尾喷管等复杂终端结构 均等效为短路理想导体板,没有考虑复杂终端结构的真实影 响效果。例如,飞机发动机的进气腔道及排气腔道分别是飞 机前向、后向的强散射源,腔道内含有风扇叶片、涡轮叶片、 混合器、稳定器等复杂结构,严格分析终端对电磁波的反射 是十分困难的,不仅建立几何结构的准确数学描述困难,而 且结构的复杂也使散射机理非常复杂。此外,当发动机在运 转中叶片的调制作用也使得该类问题的散射研究更加复杂。

(3) 计算误差

一般来说,不光高频近似算法本身存在误差,低频数 值方法也同样存在误差,主要包括模型描述带来的误差、物 理模型参数测定误差、离散求解误差及计算机求解舍入误 差等方面,如何提高各类方法求解中的误差进行控制,从而 提高腔体电磁散射计算精度也是研究学者的一大挑战课 题。

3 多层快速多极子算法

快速多极子方法 (FMM) 是美国耶鲁大学的 Rokhlin 在 80 年代末提出的。90 年代中后期, C.C. Lu, W.C. Chew 等 将该方法用于精确高效计算电大复杂目标的电磁散射^[12,13]。 为了进一步提高计算速度, 在 FMM 基础上引入了多层的 概念进一步加快了矩阵和矢量相乘, 发展出 MLFMM 方 法。该方法使 MOM 的存储量及计算复杂度都降到了 O (MogN), 适用于电大尺寸任意几何形状结构的电磁散射分 析。

其基本思路是:保留 FMM 中聚集、转移和解聚的概念, 引入多层概念,将未知数分为不同层次的组,让聚集和解聚 过程在细分层进行,通过移置、插值完成低层中的聚集和解 聚,而转移过程只在每层的部分组之间进行,其过程示意如 图1所示。



4 实例对比计算

(1) 计算模型

本文的计算模型为一单端开口、终端带有支板结构的 腔体结构^[14],其腔体直径为300mm,总长为300mm,支板宽 度为100mm,内锥体直径为150mm,结构如图2所示。



图 2 腔体模型 Fig.2 Cavity model

(2) 计算参数

参考文献 [14] 提供了在频率 8GHz 下的测试数据,如 图 3 所示。结合计算机能力,本文计算频率为 8GHz,极化 为水平及垂直极化方式,计算网格约 14 万。以开口端中心 水平面为 0° 俯仰,其中心为 90° 偏航,计算 30°~90° 偏航角 范围内的单站 RCS,角度间隔取 0.5°。



(3) 结果对比分析

本文分别采用低频数值算法 FEM、MLFMM 及高频近似 算法 GO、PO 进行 RCS 计算。图 4、图 5 分别为采用 FEM、 MLFMM 算法的计算结果在水平极化、垂直极化下与文献测试结果对比曲线图。图 6、图 7分别为采用 GO、PO 算法的计算结果在水平极化、垂直极化下与文献测试结果对比曲线图。



图 4 MLFMM 及 FEM 的水平极化结果





图 5 MLFMM 及 FEM 的垂直极化结果

Fig.5 Results of comparison at vertical polarization in MLFMM and FEM





从图 4、图 5 中可以得出,低频数值算法 MLFMM 及 FEM 的计算结果与文献数据十分吻合,在水平极化下 MLFMM 与 FEM 的计算结果差别非常小,但在垂直极化下, MLFMM

的计算结果更加吻合文献数据。从图 6、图 7 可以看出,采 用高频近似算法对单端开口复杂终端腔体结构进行 RCS 计 算很难得到高精度的结果,在偏离中心的小角度范围内,探 测装置接收到的电磁回波主要来自终端的直接反射电磁波, 所以高频算法 GO、PO 还能有一定精度。随着偏离中心角 度的逐渐增大,电磁波经过腔体内壁面及终端的多次反射, 形成复杂的腔体散射效应,高频近似算法就很难对腔体散射 进行精确计算。



图 7 GO 及 PO 的垂直极化结果

Fig.7 Results of comparison at vertical polarization in GO and PO

表1、表2是不同极化方式下、不同方法在不同取值范 围的均值统计,以90°为基准。从表中的均值分布得出,在 水平极化下,采用 MLFMM、FEM 数值算法在15°、30° 及45°范围内的均值与文献结果非常接近,而高频的GO、 PO 在各取值范围内的均值误差较大。在垂直极化方式下, FEM、MLFMM 及GO 法在15°、30°范围内的均值误差 相对小。结合图 4~图7可以得出,采用加速的 MLFMM 法的计算结果与全波有限元 FEM 精确算法的计算结果 基本一致,在15°、30°、45°及60°范围内的均值误差约 ±6% 以内,也进一步说明了 MLFMM 具备精确求解的 能力。

表 1 水平极化下不同范围均值 Table 1 Average of different angle at horizontal polarization

算法	σ/m^2			
	15°	30°	45°	60°
测试	4.7	3.4	2.8	1.8
MLFMM	4.5	3.1	2.8	2.3
FEM	4.6	3.2	2.9	2.4
GO	4.0	2.8	2.2	1.7
РО	2.5	1.3	0.9	0.6

	表2	垂直极化下不同范围均值
Table 2	Average of	of different angle at vertical polarization

算法	σ/m^2			
	15°	30°	45°	60°
测试	4.1	2.7	1.9	1.3
MLFMM	4.4	2.9	2.5	2.0
FEM	4.2	3.1	2.6	2.1
GO	2.8	2.9	2.3	1.8
РО	2.5	1.3	0.9	0.6

通过对计算过程中各种方法的计算机资源使用情况和 时间统计,得到各算法的计算效率,见表 3。可以明显看出, FEM 法虽然计算精度较高,但其对计算机资源需求高,求 解速度慢。而同样具有较高计算精度的 MLFMM 方法,可 以大大降低计算的复杂度和计算时间,计算效率较 MOM、 FEM 等数值算法得到大大提高。采用高频算法,由于其对 求解过程做了一定的近似和假设,所以其求解速度更快,对 计算机硬件需求更低。尽管高频近似算法在这类复杂腔体 散射中很难得到满足精度要求的计算结果,但在一些超电大 平面及曲面等大面元结构的 RCS 计算中,可以兼具精度及 高效的优势,得到广泛应用。

表 3 计算效率 Table 3 Effective of calculation

算法	cpu	内存 /GB	时间 /h
MLFMM	12	61	8
FEM	20	84	360
GO	12	45	2
РО	12	42	2

5 结论

本文通过对比分析目前用于腔体电磁散射研究的一些 常用方法的优缺点基础上,总结了腔体散射的特点及腔体散 射研究中亟待解决的几个问题。通过对文献模型开展不同 算法对比计算分析,得出结论如下:

(1) 在腔体散射研究中需要解决带复杂终端电大尺寸 腔体问题的精确数学模型处理及误差问题。

(2) 采用加速的 MLFMM 方法的计算结果与全波有限 元 FEM 精确算法的计算结果基本一致,各取值范围内的均

值误差约在 ±6% 以内,且与测试结果曲线吻合良好,具备 精确求解的能力。

(3) 基于 MOM 改进而来的 MLFMM 方法在计算单端 开口复杂终端的腔体结构 RCS 研究兼具精度和效率,对其 开展在如发动机排气腔体等电大尺寸复杂终端电磁散射特 性研究中具有重要意义。

参考文献

- Arnon S, Rotman S R, Kopeika N S. Bandwidth maximization for satellite laser communication[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35 (2): 675–682.
- [2] 张炜.开口腔体电磁散射算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
 Zhang Wei. Research on method for open-ended cavity EM scat-

[3] Ling H, Chou R, Lee S W. Shooting and bouncing rays calculating RCS of an arbitrary cavity [J].IEEE Transactions on Anten-

tering [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)

[4] 罗威.三维电大复杂腔体电磁散射问题的混合快速算法研究[D].成都:电子科技大学,2007.

nas and Propagation, 1989, 37 (2), 194-205.

Luo Wei. Investigations of the fast hybrid methods for scattering characteristics of three dimensional electrically large complex cavity [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)

[5] 阮颖铮.雷达截面与隐身技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2002.

Ruan Yingzheng. Radar section and stealth technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)

- [6] Pathak P H, Burkholder R J. High-frequency electromagnetic scattering by open-ended waveguide cavities[J]. Radio Science, 1991, 26 (1), 105–108.
- [7] 许小艳.开口腔体的 RCS 计算 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.

Xu Xiaoyan. Calculation of the radar cross section for open-ended cavities[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)

 [8] 朱贤阳,杨儒贵,陈益林.复杂目标雷达散射截面计算方法的 新进展[J].电波科学学报,1998,13 (3): 322-328.
 Zhu Xianyan, Yang Rugui, Chen Yilin. Recent advances in radar cross section calculating by complex targets[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13 (3), 322–328. (in Chinese)

- [9] Xiang Zhonggui, Tse-Tong Chia. A hybrid BEMWTM approach for analysis of the EM scattering from large open-ended cavities[J]. IEEE Trans and Propagation, 2001, 49 (2): 165–173.
- [10] Jin Jianming, Ling Feng, Shawn T. A hybrid SBRMoM technique for analysis of scattering from small protrusions on a large conducting body[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46 (9): 1349–1357.
- [11] 田可艳.快速算法在电大尺寸腔体电磁散射特性中的应用
 [D].南京:南京航空航天大学, 2006.
 Tian Keyan. Fast aigorithms for electromagnetic scattering of electrically large cavities[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [12] Lu C C , Chew W C. Fast algorithm for solving hybrid integral equations[EM wave scattering][J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 140 (6): 445–460.
- [13] Song J M, Chew W C. Fast multipole solution of three dimension integral equation[J]. IEEE Transactions On Antennas and Propagation, 2005, 53 (2): 793–799.
- [14] Anastassiu H T, Volakis J L, Ross D C, et al. Electromagnetic scattering from simple jet engine models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44: 420–421.

作者简介

姚伦标(1986-) 男,硕士研究生,工程师。主要研究方向:
航空发动机加力/排气设计、目标电磁及红外特性研究。
Tel: 0851-84101085
E-mail: charles0851@126.com
李宁(1976-)男,研究员。主要研究方向:航空发动机加

力及排气系统设计、目标雷达及红外特性研究。

Tel: 0851-84101084

张琪(1982-)男,高级工程师。主要研究方向:航空发动 机加力及排气系统设计、目标雷达及红外特性研究。 Tel:0851-84101085

于明飞(1982-)男,高级工程师。主要研究方向:航空发 动机加力及排气系统设计、目标红外特性研究。 Tel:0851-84101085

Investigation Calculating Method of Radar Cross Section From Arbitrarily– Shaped Open Cavities

Yao Lunbiao*, Li Ning, Zhang Qi, Yu Mingfei

AECC Guiyang Engine Research Institute, Guiyang 550081, China

Abstract: Based on the analysis of advantages and disadvantages of the methods on electromagnetic scattering from cavities, it is analyzed that the characteristics from cavities is high radiation intensity, wide radiation angle and high-frequency scattering. The precise mathematic modal processing and calculation accuracy of large-size arbitrarily-shaped terminal cavities are urgently to be solved. Based on the method MOM of the three-dimensional electromagnetism analysis software FEKO, the low-frequency numerical algorithm and high-frequency approximation algorithm were used to perform RCS comparative calculations on the single-end and arbitrarily-shaped terminal cavities. When the calculation accuracy and efficiency were comprehensively considered, it was concluded that the method of MLFMM improved from MOM has great advantages in the study of the electromagnetic scattering characteristics of large-size arbitrarily-shaped terminal cavities.

Key Words: FEKO; MLFMM; cavitys; electromagnetic scattering; RCS