

# 电推进羽流电磁效应仿真软件研究与实现<sup>\*</sup>

杨 鑫<sup>1,2</sup>,李林茜<sup>3</sup>,魏 兵<sup>3</sup>

(1.贵州大学 大数据与信息工程学院,贵州 贵阳 550025;  
2.半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心,贵州 贵阳 550025;  
3.西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071)

**摘要:**结合时域有限差分法、物理光学法以及非均匀媒质射线跟踪方法,研究了电推进羽流对卫星电磁传输环境的影响,开发了一款电推进羽流电磁效应仿真软件。因软件采用低频与高频算法相结合的计算构架,故可为这类问题分析提供宽频域的解决方案。最后,通过C#平台对所编制程序进行交互设置,为羽流-卫星系统电磁特性分析提供了一种便捷的手段。研究结果对推动仿真软件国产化可起到一定促进作用。

**关键词:**电推进羽流;时域有限差分方法;物理光学法;射线跟踪方法

中图分类号: TN014

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200283

中文引用格式: 杨鑫,李林茜,魏兵. 电推进羽流电磁效应仿真软件研究与实现[J].电子技术应用,2020,46(8):5-8.

英文引用格式: Yang Xin,Li Linqian,Wei Bing. An electromagnetic effect simulation software for electric propulsion plume[J]. Application of Electronic Technique,2020,46(8):5-8.

## An electromagnetic effect simulation software for electric propulsion plume

Yang Xin<sup>1,2</sup>, Li Linqian<sup>3</sup>, Wei Bing<sup>3</sup>

(1.College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;  
2.Engineering Research Center of Semiconductor Power Device Reliability, Ministry of Education, Guiyang 550025, China;  
3.School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Combined with the finite difference time domain, physical optics and ray tracing in inhomogeneous media, the influence of the electric propulsion plume on the electromagnetic transmission environment around the satellite is studied, and the simulation software for the electromagnetic effect of the propulsion plume is developed. Because the algorithm uses a computational framework based both on the low-frequency algorithm and high-frequency algorithm, it can provide a broadband solution for the analysis of such problems. Finally, using C# platform, a convenient operation interface is obtained, which can provide an effective numerical simulation method for the analysis of the local electromagnetic environment of satellite, and make up for some deficiencies in this field.

**Key words:** electric propulsion plume; finite difference time domain method; physical optics method; ray tracing method

## 0 引言

随着航天理论与技术的发展,特别是在提高航天器有效载荷与深空探测的强烈需求推动下,传统化学推进器的局限性愈发显著,已成阻碍航天技术进一步发展的瓶颈问题。为克服这一问题,于上世纪提出的电推进动力系统逐渐成为研究的重点,并且国外已将该技术成功应用于卫星平台<sup>[1-2]</sup>,但国内尚处探索阶段<sup>[3-4]</sup>。因电推进系统产生的羽流是由大量带电运动粒子组成的,这种粒子系统具有等离子体特性,因而也称之为等离子体羽流。显然,羽流的存在会产生电磁辐射而影响卫星电磁环境,必然对卫星通信、导航以及相关电子元器件产生影响,甚至缩短卫星寿命<sup>[5-6]</sup>。要减弱并尽可能消除这

些负面影响,需进行大量的实验研究。若在实际环境中以物理实验方式分析相关问题,必然产生巨大经济代价;而且在太空中展开实验,本身就有极高操作难度和风险。虽然可采用地面物理试验以弥补空间试验的不足,但仅单一地依靠物理试验同样会产生高额经济代价,同时也难以模拟太空的真实环境<sup>[7]</sup>。有鉴于此,实有必要辅以其他手段研究电推进羽流对卫星电磁环境的影响。就有关研究看,通过研制新的软件平台,能够对推动该问题研究提供一条新的途径。

围绕电推进羽流对卫星电磁环境影响问题,本文设计了一款电磁效应仿真软件。算法上,该软件采用时域有限差分方法(FDTD)、物理光学法(TDPO)以及非均匀媒质射线跟踪方法(RT)相结合的计算架构,使其具备宽频域的计算特点。然后,通过C#平台封装程序,得到友好

\* 基金项目:半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心开放基金(ERCMEKFJJ2019-(05));贵州大学自然科学研究基金((2019)62)

操作界面,同时也易于软件后续维护、更新和升级。就现有文献来看,我国相关成果还较少,因而本款软件对推动该领域计算软件的国产化起到一定促进作用。

## 1 软件设计

### 1.1 总体框架说明

软件总体框架可分为模型建立和电磁效应仿真两部分,在操作界面上显示为如图1左列所示的4个功能区。卫星模型与羽流模型两功能区可提供计算模型的预处理、可视化及界面操作等功能;将导入模型转换为适用于后续计算的数据形式。为适应多种数据形式,羽流模型功能区提供了解析模型、数据拟合模型和离散数据3种建模方式。羽流电磁辐射影响数值模拟功能区,提供羽流对卫星的辐射效应分析,包括高频和低频两种情形。通讯电磁波受羽流影响数值模拟功能区,主要用于分析羽流对通信信号的影响,包括辐射方向特性、相位以及能量衰减等。所以,后两个功能区主要用于羽流对电磁环境的影响分析。软件除提供可视化方式作为前端输出外,还能以多种格式导出计算模型和数据,如.jpg、.tif和.dat格式等。

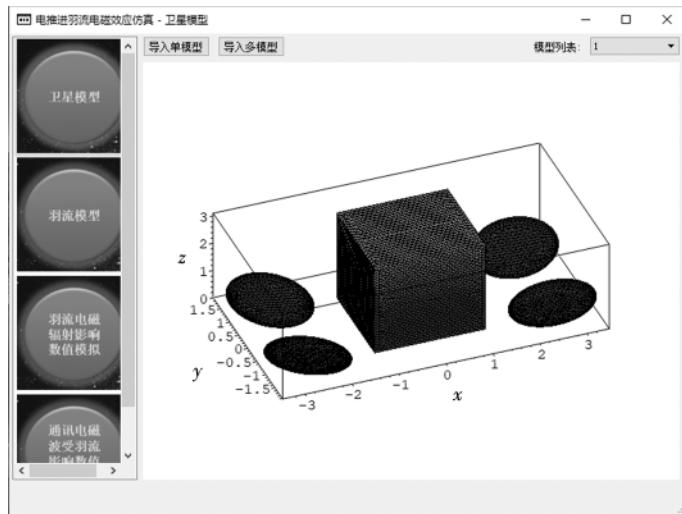


图1 软件总体界面

### 1.2 软件结构及算法

算法功能模块逻辑关系如图2所示,分为模型导入与预处理、电磁效应仿真及结果输出。仿真前,根据导入模型数据的不同形式,需选择相应算法对导入卫星或羽流数据预处理。由于卫星模型是在实际模型基础上,通过表面网格化而得到的几何模型,因而具有固定外形,故导入的模型也将具有固定形式;软件提供.dat和.msh两种读取格式。对于羽流模型,考虑到存在多种获取方式的可能,譬如实测模型或理论模型等,软件针对性地提供多种建模方式,以适应实际问题分析需求。对于以上数据形式,软件均采用Debye模型描述羽流的电磁特性,因为它本质

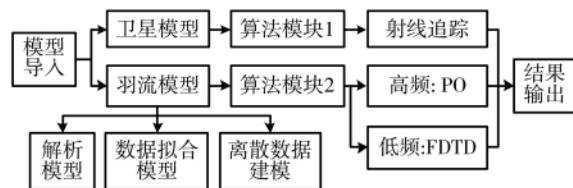


图2 各功能模块间的关系

上属于等离子体。Debye模型描述的介电常数 $\epsilon_r$ 如下<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_c^2} - j \frac{\omega_c}{\omega} \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad (1)$$

此外,软件还可进行相应设置,以满足多模型及多观测点的计算要求。在导入模型后,界面会显示导入情况,便于对模型及相应参数设置进行定性的观察。最后,根据具体问题选定对应算法,即可解析羽流对卫星电磁环境的影响。

在航天领域,无线通信是以高频电波为主,将来甚至可能达到太赫兹波段<sup>[9-10]</sup>。考虑到这一发展趋势及基础研究需求,设计软件时电磁算法以高频算法为主体,包括物理光学法和非均匀介质射线跟踪方法<sup>[11]</sup>。另外,为保证软件低频问题的适用性,算法上还采用了时域有限差分方法<sup>[12]</sup>。其中,物理光学法和时域有限差分方法主要用于羽流对卫星电磁环境的影响分析,而射线跟踪方法用来计算羽流对通信电波的影响。各算法的关系如图3所示。

### 2 软件的应用

本文采用C#语言对算法进行封装,封装后的效果见图4和图5。下面根据低频和高频两种应用场景,简要介绍“电推进羽流电磁效应仿真软件”主要仿真功能。其中,算法选用大致准则为:计算环境的电尺寸在几十个波长及以上时,可选用高频分析方法,反之需采用低频方法。就卫星-羽流系统而言,可通过比较电波波长与系统物理尺寸来选择对应算法。

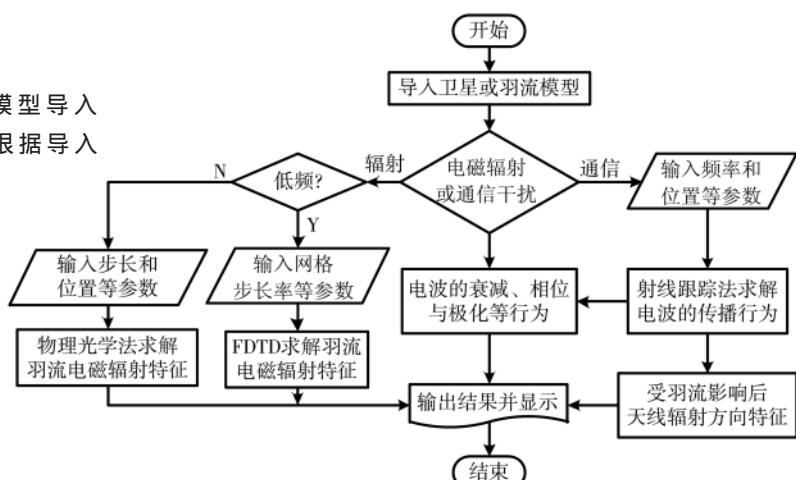
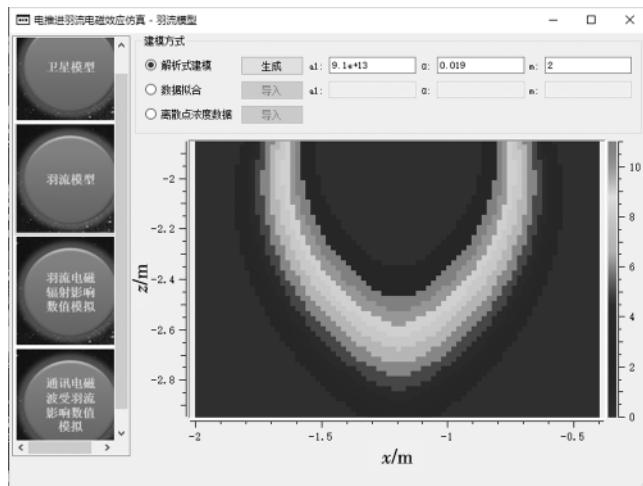
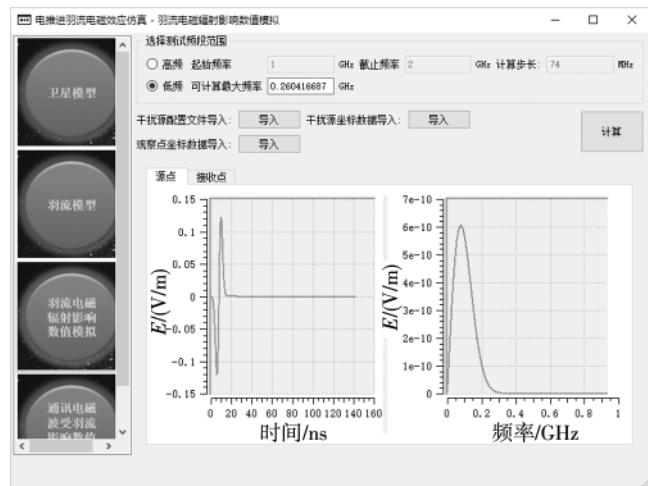


图3 计算流程图

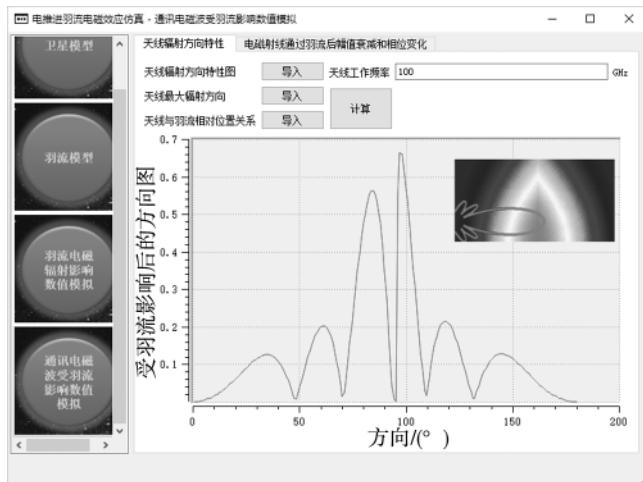


(a) 羽流模型

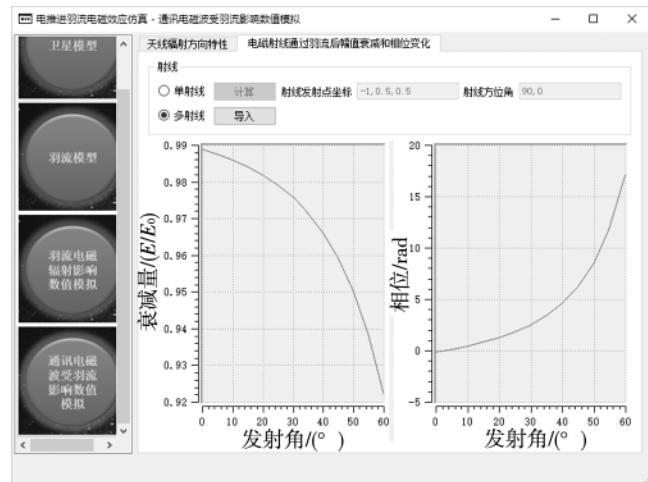


(b) 低频计算结果

图 4 羽流低频辐射效应仿真



(a) 羽流对辐射方向性的影响



(b) 羽流对能量及相位的影响

图 5 羽流对电波传播行为的影响

计算羽流对卫星电磁环境的影响前,需导入相应的卫星(见图 1)和羽流模型;然后,软件会自行完成数据预处理。为提高软件工程实用性,设计时特加入实测数据电磁建模。对于这些不同建模方式,软件均有预留数据接口。接着,设置相应配置参数,如电波频率范围、观察点位置以及干扰源等参数。完成这些配置后,软件开始计算观察点处场的变化情况,并且会将计算结果绘图显示。图 4(a)为仿真的羽流模型示例,以剖面形式显示;图 4(b)给出观察点处电场时域和频域计算结果。计算完成后,所得结果还能够根据需要以不同数据格式导出。

软件另一功能是解析羽流对高频无线信号传输的干扰。同样,仿真前需导入卫星和羽流模型。然后,根据问题求解要求设置参数,如天线位置和它的原始辐射方向特性等。这些配置完成后,软件开始计算羽流对电波传播行为的影响,包括辐射方向性以及相位变化等行为。图 5 是受羽流影响后电磁传输的仿真结果,包括能量衰减与相位变化等。图 5(a)中的子图示意天线原始辐

射方向特征与羽流相对位置。

### 3 结论

结合高频与低频电磁计算方法,本文设计了一款电推进羽流电磁效应仿真软件,主要用于解析羽流对卫星电磁环境以及电波传播行为的影响。采用 C# 平台对代码设计封装,得到友好的人机交互界面。软件具有便捷的操作流程及界面,具有一定的实用性和可维护性,可为卫星-羽流系统电磁分析提供初步的仿真平台,对未来空间物理实验也起到一些辅助作用。

### 参考文献

- [1] BYERS D C, DANKANICH J W. Geosynchronous earth orbit communication satellite deliveries with integrated electric propulsion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(6): 1369–1375.
- [2] FEUERBORN L S A, NEARY D A, PERKINS J M. Finding a way: boeing's "all electric propulsion satellite" [C]. Proceedings of the 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint

Propulsion Conference , Washington D.C.AIAA , 2013 : 1-5.

[3] 张敏 , 邱刚 , 乔彩霞 , 等.霍尔推力器电磁辐射测量方案研究[J].火箭推进 , 2015 , 41(2) : 108-113.

[4] 周志成 , 高军.全电推进 GEO 卫星平台发展研究[J].航天器工程 , 2015 , 24(2) : 1-6.

[5] MULLER H , KUKIES R , BASSNER H.EMC test on the RITA ion propulsion assembly for the ARTEMIS satellite[R]. AIAA 92-3208.

[6] HENRY M D , BRINZA D E.DS1 ion propulsion emission characterization[C].2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings , 2001.

[7] 杨福全 , 顾左 , 张华 , 等.20cm 离子推力器羽流对微波通信影响的实验研究[J].航天器环境工程 , 2012 , 29(1) : 79-82.

[8] SHA Y X , ZHANG H L , GUO X Y , et al. Analyses of electromagnetic properties of a hypersonic object with plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation , 2019 , 67(4) : 2407-2481.

[9] WANG M , LI H , DONG Y , et al. Propagation matrix method study on THz waves propagation in a dusty plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 2016 , 64 (1) : 286-290.

[10] YUAN K , CHEN J , SHEN L , et al. Impact of reentry speed on the transmission of obliquely incident THz waves in realistic plasma sheaths[J]. IEEE Transactions on Plasma Science , 2018 , 46(2) : 373-378.

[11] LING H , KIM H , HALLOCK G A , et al. Effect of arcjet plume on satellite reflector performance[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation , 1991 , 39(9) : 1412-1420.

[12] 葛德彪 , 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第三版)[M]. 西安 : 西安电子科技大学出版社 , 2013.

(收稿日期:2020-04-08)

---

## 作者简介：

杨鑫(1988-),男,博士,讲师,主要研究方向:计算电磁学。

李林茜(1985-),男,博士,讲师,主要研究方向:计算电磁学。

魏兵(1970-),男,博士,教授,主要研究方向:计算电磁学以及复杂媒质中电波传播等。

(上接第 4 页)

表 3 链路功放模块测试结果

$f_0$ /MHz	$P_{\text{out}}$ /dBm	$G_p$ /dB	$I_{\text{ds1}}$ /mA	$I_{\text{ds2}}$ /mA	$\eta_d$ /%
20	40.26	30.26	0.08	0.50	65.38
70	40.90	30.90	0.06	0.53	74.47
120	40.90	30.90	0.07	0.55	70.87
170	40.78	30.78	0.08	0.56	66.78
220	40.80	30.80	0.09	0.61	61.34
270	40.70	30.70	0.10	0.63	57.48
320	40.60	30.60	0.11	0.67	52.57
370	40.35	30.35	0.13	0.66	49.00
420	40.00	30.00	0.14	0.66	44.64
470	39.70	29.70	0.14	0.66	41.66
520	39.50	29.50	0.14	0.64	40.81

出功率大于 9 W, 增益大于 39 dB, 效率高于 40%, 基本满足设计指标。该功放适合应用于广播电台及多种小型化电子对抗平台。

参考文献

- [1] 陈邦媛.射频通信电路[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 胡砚.微波宽带放大器组件设计与实现[D].成都:电子科技大学,2014.
- [3] 谢晓峰,肖仕伟,沈川.0.02~2 GHz GaN 分布式功率放大器的原理及设计[J].现代电子技术,2012,35(24): 141-

144.

- [4] 候照伟.基于 GaN 的 0.5~2.5 GHz 宽带功率放大器的设计[J].电子质量,2016(6):39~44.
- [5] 吴治霖,周伟中.基于 GaN 的宽带功率放大器的仿真[J].通信技术,2017(1):171~175.
- [6] 夏永平,李贺,魏斌.C 波段 GaN 高功率放大器设计[J].电子与封装,2018,18(1):34~38.
- [7] 王中航,习友宝,阚能华.100mW 30~1200 MHz 宽带放大器[J].电子测量技术,2008,31(8):28~31.
- [8] 徐永刚,李飞,钟世昌.S 波段宽带大功率内匹配器件设计[J].电子与封装,2018,18(7):42~44.
- [9] BAHL I J.射频与微波晶体管放大器基础[M].鲍景富,译.北京:电子工业出版社,2013.
- [10] 李游.微波混合集成宽频带放大器研制[D].成都:电子科技大学,2005.
- [11] 王浩全,郭昊,郝明丽.2~6 GHz 宽带功率放大器模块设计[J].电子技术应用,2017,43(7):8~10.
- [12] GUILLERMO G.微波晶体管放大器分析与设计[M].白晓东,译.北京:清华大学出版社,2003.

(收稿日期:2020-04-03)

## 作者简介：

李贺(1986-),男,硕士,中级工程师,主要研究方向:射频微波功率放大器、模块组件设计。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所