

一种改进的物理光学迭代法¹

顾长青 舒永泽

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)

摘要 该文使用线积分形式的 Kirchhoff 公式替代 F. Obelleiro(1995) 提出的物理光学迭代 (IPO) 法中的经典 Kirchhoff 公式, 提出了一种改进的 IPO 法。数值计算结果表明, 改进的 IPO 法和 F. Obelleiro(1995) 的 IPO 法比较, 对三面角反射器、飞机座舱等大口面凹型腔体的电磁散射特性分析, 在数值精度相当的情况下, 计算速度明显提高。

关键词 线积分, Kirchhoff 公式, 物理光学迭代法, 散射

中图分类号 O441

1 引言

F. Obelleiro 等人^[1]提出了分析结构复杂、电大尺寸的开域凹型目标和腔体(如进气道、座舱、角反射器等)电磁散射特性的新方法——物理光学迭代 (IPO) 法, 它不但能有效地模拟目标对电磁波的多次反射, 而且物理思路清晰, 迭代过程简单, 不需矩阵求逆, 便于计算机编程实现。因此, IPO 法受到人们的重视, 并且在开域凹型目标电磁散射特性研究中得到了广泛应用。

文献 [1] 的 IPO 法研究图 1 所示开域凹型腔体电磁散射特性其步骤为: (1) 根据腔外均匀平面电磁波在腔口面形成的等效电磁流, 运用经典 Kirchhoff 公式计算腔壁上磁场分布。(2) 迭代计算磁场积分方程 (MFIE), 求出腔壁上经多次反射后产生的真实壁电流分布。(3) 根据腔壁上电流计算在腔口面上产生的等效电磁流, 再次运用经典 Kirchhoff 公式计算腔外远区散射场。

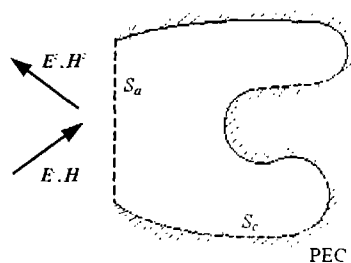


图 1 一般腔结构

本文使用作者提出的线积分形式的 Kirchhoff 公式^[2]对文献 [1] 的 IPO 法作如下改进:

- (1) 直接计算由腔外均匀平面电磁波通过腔口面边缘产生的绕射场和直射场在腔壁上形成的磁场分布。
- (2) 用若干惠更斯源近似腔壁上真实电流分布。计算每一惠更斯源通过腔口面边缘产生的远区绕射场和直射场, 叠加后求出腔体总散射场。数值计算结果表明, 改进的 IPO 法和文献 [1] 的 IPO 法数值精度相当, 但本文的 IPO 法分析三面角反射器、飞机座舱等大口面凹型腔体的电磁散射特性时计算速度有明显提高。

¹ 2000-03-06 收到, 2000-07-06 定稿

2 基本原理

设一均匀平面电磁波以单位波矢量 \hat{k}^i 方向照射图 2 所示的开口腔体, 腔口面边缘 C 上入射电磁场

$$\mathbf{E}^i = \hat{e}e^{-jk\hat{k}^i \cdot \mathbf{r}_a} \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^i = \hat{h}\frac{1}{\eta}e^{-jk\hat{k}^i \cdot \mathbf{r}_a} \quad (2)$$

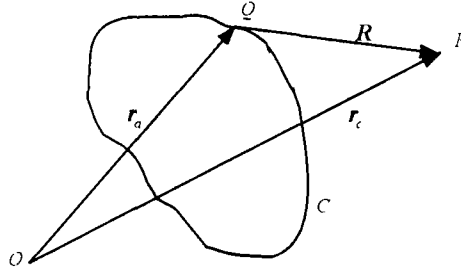


图 2 平面波照射腔口面时的位置矢量

在腔壁上任意一点 P 产生的绕射磁场 $\mathbf{H}^d(\mathbf{r}_c)$, 根据文献 [2] 有

$$\mathbf{H}^d(\mathbf{r}_c) = -\frac{1}{4\pi\eta} \oint_C \frac{e^{-jkR}}{R} e^{-jk\hat{k}^i \cdot \mathbf{r}_a} \left[\hat{R} \left(1 + \frac{1}{jkR} \right) \hat{e} \cdot d\mathbf{l} + \hat{h} \times d\mathbf{l} + \hat{h} \frac{(\hat{R} \times \hat{k}^i) \cdot d\mathbf{l}}{1 - \hat{R} \cdot \hat{k}^i} \right] \quad (3)$$

P 点的直射场为

$$\mathbf{H}^{op}(\mathbf{r}_c) = \zeta(\hat{h}/\eta)e^{-jk\hat{k}^i \cdot \mathbf{r}_c} \quad (4)$$

其中场点在亮区 $\zeta = 1$, 场点在阴影边界上 $\zeta = 1/2$, 场点在暗区 $\zeta = 0$. P 点总的磁场 $\mathbf{H}(\mathbf{r}_c)$ 是由直射场 $\mathbf{H}^{op}(\mathbf{r}_c)$ 和绕射场 $\mathbf{H}^d(\mathbf{r}_c)$ 叠加得到, 即

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}_c) = \mathbf{H}^{op}(\mathbf{r}_c) + \mathbf{H}^d(\mathbf{r}_c) \quad (5)$$

(1)~(5) 式中 \hat{e} 和 \hat{h} 分别是入射波的电场和磁场单位矢量, $\eta = 120\pi$ 是自由空间特性阻抗, 矢量 $\mathbf{r}_c, \mathbf{r}_a, \mathbf{R}$ 如图 2 所示. 积分号 \oint 表示柯西主值积分.

腔壁上感应电流 $\mathbf{J}(\mathbf{r}_c)$ 满足磁场积分方程 (MFIE)

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}_c) = 2\hat{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}_c) + 2\hat{n} \times \oint_{S_c} \mathbf{J}(\mathbf{r}_c') \times \nabla G(\mathbf{r}_c, \mathbf{r}_c') dS_c' \quad (6)$$

式中 S_c 为腔壁表面, \hat{n} 是腔壁的内法向单位矢量. 格林函数 $G(\mathbf{r}_c, \mathbf{r}_c') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_c'|}}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_c'|}$. (6) 式属于第二类 Fredholm 积分方程, 为了得到腔壁上真实电流分布, 采用迭代方法求解.

用若干惠更斯源近似腔壁上真实电流分布. 图 3 所示的惠更斯源在空间一点 Q 处产生的电磁场, 根据式:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \nabla G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds \quad (7)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) / j\omega\epsilon_0 \quad (8)$$

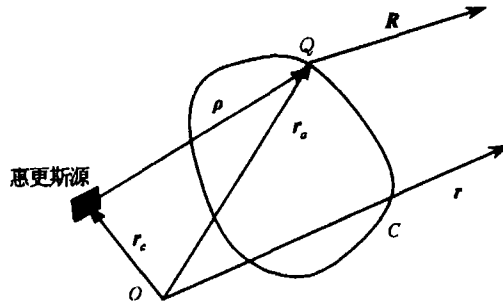


图 3 惠更斯源照射腔口面时的位置矢量

可导出

$$H(Q) = H_0(Q)e^{-jk\rho}/\rho \tag{9}$$

$$E(Q) = \eta E_0(Q)e^{-jk\rho}/\rho \tag{10}$$

其中

$$H_0(Q) = (S/(4\pi))(jk + 1/\rho)(J \times \hat{\rho})$$

$$E_0(Q) = \frac{S}{4\pi jk} \left[\frac{-(1 + jk\rho) + (k\rho)^2}{\rho^2} J + \rho \frac{3(1 + jk\rho) - (k\rho)^2}{\rho^4} (\rho \cdot J) \right]$$

式中 S 是惠更斯源面积。当 Q 点在腔口面边缘上, $\rho = r_a - r_c$ 。(9), (10) 式表明惠更斯源辐射的是一球面波。

类似文献 [2] 推导, 图 3 所示的惠更斯源在腔外远区辐射的磁场为

$$H^S = \frac{1}{r} e^{-jkr} e^{jk\hat{r} \cdot r_c} \left\{ \zeta H_0 - \frac{1}{4\pi} \int_c \frac{e^{-jk\rho}}{\rho} e^{jk\hat{r} \cdot \rho} \left[\hat{r} (E_0 \cdot dl) + H_0 \times dl + H_0 \frac{(\hat{r} \times \hat{\rho}) \cdot dl}{1 - \hat{r} \cdot \hat{\rho}} \right] \right\} \tag{11}$$

大括号中第一项是惠更斯源的直射场, 第二项是惠更斯源通过腔口面边缘在远区产生的绕射场。运用叠加原理可求出腔壁电流在腔外产生的总散射磁场。

雷达散射截面由

$$\sigma_{uv} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |H_u^s|^2 / |H_v^i|^2, \quad u, v = \theta, \varphi \tag{12}$$

确定。式中 $|H_u^s|$ 为 u 极化散射磁场幅度, $|H_v^i|$ 为 v 极化入射磁场幅度。

3 计算时间比较

图 4 所示的正三角反射器由正方体左侧面、下底面和后面构成, 口面由右侧面、上顶面和前面构成。令 x, y, z 方向的分段数为 N , 文献 [1] 的 IPO 法计算时间约为

$$t \approx 3(A_1 + A_2)N^2 + 9(B_1 + B_2)N^4 + 9DN^4N_d \tag{13}$$

式中 A_1 为计算入射波在腔口面上产生的面元等效电磁流的时间; A_2 为计算腔口面上面元等效电磁流在腔外远区辐射场的时间; B_1 为计算腔口面上面元等效电磁流在腔壁上任一点磁场的时

$$t \approx 6(A'_1 + A'_2)N + 9DN^4N_d \tag{14}$$

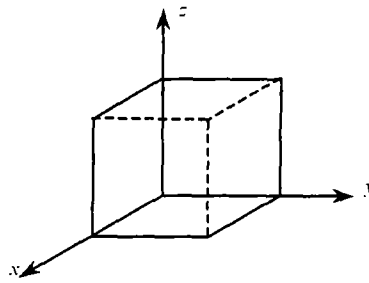
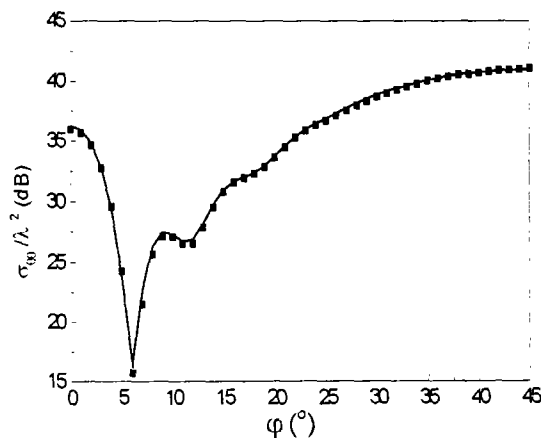
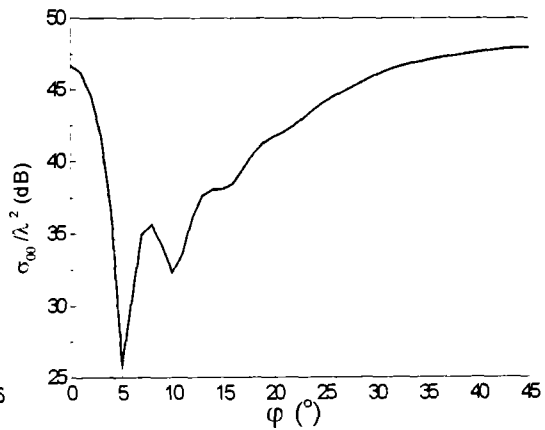


图 4 正三角反射器

式中 A_1' 为计算入射波通过腔口面边缘时线元产生绕射场的时间； A_2' 为计算腔壁上惠更斯源通过腔口面边缘时线元产生绕射场的时间。比较 (13) 和 (14) 式看出，与文献 [1] 的 IPO 法相比，本文的 IPO 法计算三角反射器的电磁散射特性大大节省了计算时间。

4 数值结果

图 5 是边长为 5λ 正三角反射器的 $\sigma_{\theta\theta}/\lambda^2$ 随 φ 变化的曲线，入射波的俯仰角 66° ，每平方波长划分 16 个面元，迭代 2 次。其中实线为本文的 IPO 法计算结果，每点计算时间约 $55''$ ，点线是用文献 [1] 的 IPO 法编制的软件所得计算结果，每点计算时间约 $2'13''$ 。图 6 是用本文的 IPO 法绘出的边长为 7λ 正三角反射器的 $\sigma_{\theta\theta}/\lambda^2$ 随 φ 变化的曲线，入射波的俯仰角 50° ，迭代次数和面元划分数同图 5，每点计算时间约 $3'25''$ 。用文献 [1] 的 IPO 法编制的软件，每点计算时间约 $8'35''$ 。图 5、图 6 曲线与文献 [3] 中图 15 和图 16 曲线吻合很好。从数值结果和数值计算时间比较看出，两种 IPO 法数值精度相当，但本文的 IPO 法计算时间明显减少。

图 5 5λ 正三角反射器 RCS图 6 7λ 正三角反射器 RCS

5 结论

本文提出用线积分形式的 Kirchhoff 公式改进用于分析计算开域凹型目标和开口腔体电磁散射特性的物理光学迭代法。数值计算结果表明，本方法在研究大口面开口腔体结构的电磁散射特性时，与文献 [1] 的 IPO 法相比，节省运算时间的优势非常突出。

参 考 文 献

- [1] F. Obelleiro, *et al.*, An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities, *IEEE Trans. on AP*, 1995, AP-43(4), 356–361.
- [2] Gu Changqing, Xu Jinping, Kirchhoff formula with line integral form and its applications, *南京航空航天大学学报 (英文版)*, 1999, 16(2), 183–187.
- [3] A. C. Polycarpou, *et al.*, Radar cross section of trihedral corner reflectors: theory and experiment, *Electromagnetics*, 1995, 15(2), 457–484.
- [4] 阮颖铮, 等, 雷达截面与隐身技术, 北京, 国防工业出版社, 1998, 第四章.

AN IMPROVED IPO APPROACH

Gu Changqing Shu Yongze

(*Dept. of Electron. Eng., Nanjing Univ. of Aeronaut. and Astronaut., Nanjing 210016, China*)

Abstract The classical Kirchhoff formula in the iterative physical optics (IPO) approach, which was brought forward by Obelleiro(1995), has been replaced by a Kirchhoff formula with line integral form. Based on the new method, an improved IPO approach has been presented. The numerical precision of computation results obtained by the improved IPO approach is almost the same as that of the results computed by IPO approach in Obelleiro's paper(1995). However, the new approach reduces the computation time greatly in analyzing the electromagnetic scattering of large open-ended concave cavities such as a trihedral corner reflector and an aircraft cockpit, etc.

Key words Line integral, Kirchhoff formula, Iterative Physical Optics (IPO), Scattering

顾长青: 男, 1958年生, 教授, 主要研究兴趣为天线与电磁散射, 电磁兼容, 毫米波集成技术等.

舒永泽: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 主要从事天线与电磁散射, 雷达目标特征分析与控制领域的研究工作.