Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.02.002

飞机/发动机复杂腔体遮挡算法研究

杨 涛,陈玉林

(中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽合肥 230088)

摘 要:利用电磁场高频近似理论,计算飞机进气道、喷管和座舱等腔体的 RCS,需要考虑腔体内表面 网格单元感应电流之间的相互影响,即判断网格单元之间的相互遮挡关系。在分析比较直接搜索及改进算 法、并行+直接搜索算法和拓扑法的基础上,提出了快速判断复杂腔体面网格单元相互可见性的新算法— 拓扑踪迹算法。计算分析表明,文中算法不仅适用于任意复杂电大腔体遮挡关系判断,计算速度比其他三 种算法提高若干倍,且构建腔体的体网格越大计算速度越快。

关键词:复杂腔体; 雷达散射截面; 遮挡判断; 并行算法

中图分类号:TN957; V228.7 文献标识码:A 文章编号:1672-2337(2013)02-0118-07

An Occlusion Algorithm for Complex Cavities of Aircraft and Engine

YANG Tao, CHEN Yu-lin

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: According to the high-frequency electromagnetic field approximation theory, it is necessary to consider faradic mutual interaction of the inner surface cells in the duct. That is to evaluate mutual occlusion of the cells by RCS calculation of the inlet, nozzle and cockpit in the aircraft. In this paper, on the basis of comparing direct search and improved algorithm, parallel+direct search algorithm and topological algorithm, a new algorithm-topology trace algorithm is proposed, which can quickly judge the mutual visibility of surface grid cells on the complex cavities. Computational analysis shows that the algorithm presented in this paper is not only applicable to evaluating occlusion of any complex cavities, but also has the compution speed faster than the other three algorithms by several times. Furthermore, the bigger the volume meshes are, the faster the computation speed is.

Key words: complex cavity; radar scattering cross section(RCS); occluding test; parallel algorithm

1 引 言

在飞行器雷达散射截面(RCS)分析中,进气 道、喷管和座舱等开口腔结构是飞行器的强散射 源,其 RCS 计算一直是飞行器 RCS 预估当中的研 究重点。对于飞行器电大腔体的 RCS,一般采用 高频散射机理^[1]或混合方法分析。进入开口腔的 电磁波经过腔体内壁的多次反射返回出口,可形 成很强的后向散射^[2]。在利用物理光学法^[3](PO) 或者物理光学迭代法^[4](IPO)计算大型、复杂腔体 时,需要将表面离散成许多三角形面元,迭代计算 各个面元上的感应电流密度,然后对网格单元区 域进行积分求解腔体 RCS。在计算各面元感应电 流密度时,由高频近似理论知,需考虑目标网格面 元能否被入射电磁波照明和各网格面元之间能否 相互照明的问题。按照物理光学法的高频理论, 如果某面元处于阴影区,或者被其他面元所遮挡, 该面元不参与当前积分计算,而照明区的面元则 需对其积分。所以利用高频方法计算目标 RCS 前,必须考虑面元网格之间遮挡关系。本文以计 算喷管 RCS 过程中判断网格面元相互遮挡关系为 例来分析研究四种算法。

目前在腔体 RCS 计算前处理中,还没有现成 的实现遮挡关系判断的高效算法^[5]。本文对比分 析了几种常规的判断算法,并在此基础上提出一 种更为高效的遮挡关系判断算法。对于小型喷 管,应用文中的直接搜索及改进算法,可以快速准 确地判断面元之间的遮挡关系,但是对于大型复杂喷管,上述方法往往耗费相当长的计算机时。 此时,利用拓扑法和并行+直接搜索法可以提高 计算效率。虽然并行算法可提高近计算机核数 (或 CPU 数)倍的计算速度,但对于结构复杂喷管 而言,仍不是一种有效快捷的方法。此外,通过与 拓扑踪迹算法的对比,拓扑法不仅适用性较窄且 计算时间仍不理想。采用拓扑踪迹算法,若喷管 体网格生成比较合理,则计算速率是上述方法的 若干倍,甚至可达十几倍,且适用于任意结构复杂 腔体模型。

本文利用的计算资源是:

操作系统 Windows XP 32 位 SP3(DirectX 9.0c)。

处理器 Pentium 双核 E5400@ 2.7GHz。 内存 2GB(DDR3 1600 MHz)。

2 网格单元可见的条件

本文用 Gambit 对任意喷管模型都进行三角 形面元剖分,体网格是四面体类型。任意模型两面 元网格 A,B 之间相互可见必须满足的条件是:

(1)两面元 A, B之间法向相互指向, 面元 A 和面元 B 的表面法向单位矢量,由 Gambit 导出的 mesh 文件数据得到。

(2) *A*,*B* 两三角面元之间没有任何其他面元的遮挡^[6]。

3 遮挡关系的判断算法

3.1 直接搜索及改进算法

(1)判断图 1 中任意两面元 A(腔体底端)和 面元 B(腔体顶端)是否满足第 2 节条件(1)。若是 则继续判断;否则面元 A,B 相互不可见。

(2) 在图 1 中, 遍历除面元 A, B 以外所有腔体面元 C, 依次判断其是否遮挡面元 A, B, 即判断A, B 是否满足第 2 节条件(2), 若存在任一面元 C 不满足, 则 A, B 不可见; 否则 A, B 相互可见。

(3)对模型所有面元两两之间都进行(1)、(2)判断,得到全部面元间遮挡关系。

为了缩小(2) 中 C 面元的搜索范围,减少对不 必要面元(如图 1 中面元 D) 搜索,加快判断效率, 构建直接搜索区域,不再对面元 A,B 以外所有面



图 1 模型中面元 A, B 的位置

元一一搜索判断,因为可能遮挡面元 A,B 的 C 面 元只会存在于这个区域。

构造方法:求得面元 A, B 中心连线的中点 O的位矢 $\dot{\mathbf{r}}_{o}(\mathbf{r}_{ox}, \mathbf{r}_{oy}, \mathbf{r}_{oz})$,并计算面元 A, B 中心之 间在坐标 x, y, z 三个方向的偏差量。

$$\vec{r}_{e} = 0.5 \cdot (\vec{r}_{c1} + \vec{r}_{c2})$$
 (1)

$$dx = |r_{c2x} - r_{c1x}|$$

$$\mathbf{l}\mathbf{y} = |\mathbf{r}_{c^{2}y} - \mathbf{r}_{c^{1}y}| \tag{2}$$

$$dz = |r_{c2z} - r_{c1z}|$$

式中, $\mathbf{r}_{c1}(\mathbf{r}_{c1x}, \mathbf{r}_{c1y}, \mathbf{r}_{c1z})$, $\mathbf{r}_{c2}(\mathbf{r}_{c2x}, \mathbf{r}_{c2y}, \mathbf{r}_{c2z})$ 分别 是面元 A 和面元 B 的中心位矢。

以O为中心,以 $dx + \delta$, $dy + \delta$, $dz + \delta$ 构造 长方体区域作为搜索空间,如图 2 所示,其中 δ 为 网格步长。构建直接搜索区域时增加 δ 偏差量,是 为了避免遗漏搜索区域顶角位置可能出现遮挡面 元的情况。在这个空间中搜索可能遮挡面元 A,B的第三个面元C,可以减少了所要搜索判断的面元 数量,节省了判断时间。



图 2 直接搜索区域

判断面元 C 是否在搜索区域中对面元 A, B 遮挡的算法是:

① 面元 C 位于直接搜索区域条件: $|\mathbf{r}_{cx} - \mathbf{r}_{ox}| < 0.5 \cdot d\mathbf{x} + \delta$ $|\mathbf{r}_{cy} - \mathbf{r}_{oy}| < 0.5 \cdot d\mathbf{y} + \delta$ (3) $|\mathbf{r}_{cz} - \mathbf{r}_{oz}| < 0.5 \cdot d\mathbf{z} + \delta$

 $(\mathbf{r}_{\alpha}, \mathbf{r}_{\alpha}, \mathbf{r}_{\alpha})$ 是面元C中心点位矢,为避免线段 AB 平行于某坐标轴,无法构造直接搜索区域的情况,故在式(3)三个坐标分量增加一个微小增量 δ 。

② 遍历直接搜索区域中面元,当存在任一面 元不满足第2节条件(2),则面元A,B相互不可 见;否则A,B可见。

假设每个直接搜索区域,假设平均判断 M 个 面元对当前两面元遮挡,则共需进行约 N(N – 1)M/2 次相互可见的条件判断。因而,当喷管网 格数目在几万以上时,使用此方法对发动机喷管 的网格剖分结果进行遮挡关系判断时效率较低。

进一步改进算法提高计算效率,可将构造的 直接搜索区域再分割若干子区域,如图 3 所示。遮 挡面元C就只会在区域1或区域2,相比上述方法, 进一步缩小搜索区域。但并不是子区域越多越 好。对于某一模型,总有最优的子区域数 L,大于 L则需进行面元是否处于直接搜索区域的式(3) 判断增多,小于 L则进行第 2 节条件(2)判断的面 元增多。但最优值 L 对于同一模型不同的网格数 或不同模型,不具有统计规律。不同直接搜索区 域子区域数 L 一般根据经验控制在 2^i (0 $\leq i \leq 6$) 范围。



图 3 搜索区域的分割

3.2 并行+直接搜索算法

3.1节算法都不能很好地满足工程需求,本文 在3.1节算法的基础上,应用并行计算思想,编写 遮挡关系判断的并行程序^[7],以提高计算速率。 由于模型中 A 面元与其他面元之间的遮挡关 系判断,不影响模型中 B 面元与其他面元之间的 遮挡关系判断。同时将面元之间遮挡关系的逻辑 值,存放在 16 位无符号整型变量组的各个位上,计 算结果的数据量减少,各子进程传递给主进程的 数据量相应很少。因而,可利用基于 MPI 的并行 思想,判断模型面元间的可见性。假设用 T 个 CPU 并行计算面元间的遮挡关系,则计算速率相 比单核提高将近 0.8T ~ 0.9T 倍。

3.3 拓扑法

3.2节算法虽然并行效率较高,但对计算机硬件要求较高。本文应用并改进参考文献[5]中方法,改善3.2节中方法的计算效率和对硬件需求的问题。

首先对整个管道三角形网格重新排序是拓扑法 判断面元相互可见性必要的前处理^[8-9],也是整个算 法的核心和难点。排序过程中需要用到整个网格模 型的数据,包括结点数组、棱边数组和面元数组。

三角面元网格排序的算法是:

(1) 网格顶点初始化

寻找喷管曲面唇口边界,并将其上的结点某 属性值设置为 0,其他所有结点该项属性值设为 *M*(*M* 大于结点总数),如图 4 所示。



图 4 网格结点的初始化

(2) 网格结点标识和三角面元排序

 ① 从任意面元开始,将面元属性变量 min 设 置为该面元属性最小结点的属性值。

② 将该面元的序号 c 设置为 min +1,同时将 该面元中结点属性值大于 min 的结点属性值设置 为 min +1。

③ 统计 ①② 前后所有结点属性值变化的绝 对值之和存入变量 sum,直到 sum =0,即结点编号 和面元排序完成,退出循环,即便实现网格结点标 识和三角面元排序,如图 5 所示。

图 5 网格结点及面元排序

实现网格单元遮挡关系判断:

假设三角面元 A 属于第 i 个环,三角面元 B 属于第 $j(j \ge i)$ 个环,则两三角片 A、B 中心点连 线 L 只可能和环号排序在 i,j 之间的三角面元相 交。而且进行连线段 L 与第 $k(i \le k \le j)$ 环的三 角面元求交判断时,也不需和第k 环里的所有面元 求交判断。采用第 2 节条件(1)(2) 及公式(3),在 $k(i \le k \le j)$ 环上,搜索判断是否存在遮挡面元。

本算法与文献[5] 算法相比较,其优点是: ①三角面元网格排序算法简洁;②避免最耗费机 时的步骤,即利用宽度优先原则实现网格结点标 识。缺点是:在实现网格单元遮挡关系判断中,未 再对第 k 环构造包围盒。

判断遮挡关系共同缺点:对于图 6 表面不连续的模型,算法不再适用,不具有普遍的通用性,需要更改算法及程序。



3.4 拓扑踪迹算法

鉴于上述三种算法,都不能很好地解决计算 效率的问题,文中提出一种新的算法。该算法是 上述三种算法计算效率的若干倍,若构造质量优 质的体网格,甚至可达十几倍的计算效率,极大地 提高了计算效率,节约喷管 RCS 计算时间。

3.4.1 mesh 文件数据信息

模型进行网格剖分后,会得到网格(面网格或体网格)之间的区域连通性,即某一面网格左右两

个体网格编号、构成该面网格节点编号和构成体 网格的各面网格编号,如图7所示,序号*i*的面网格 S_{abc} 左右体网格分别是体 ① 和体 ②,构成体网格 ① 的四个面元,序号相应是 $|(S_{abc}), || i(S_{bcd}),$ $||| (S_{abd}), |V(S_{acd})$ 。这些信息都存储在 mesh 文 件中,在 mesh 文件中面元信息是:

22d 1ed 1ee 83b 0

(22*d* 1*ed* 1*ee*)是构成这个面元的三个结 点在总结点中的序号,且按三个结点顺时针顺序 确定面元法向量,如图8所示。(83*b* 0)是面元的 左右两侧体网格在总体网格中的序号。左右体网 格之分是面元法向量指入的是左边体,即83*b*。右 边体序号为0是指该面元为壁面面元,右侧不再有 体网格。上述序号采用的是16进制。





构造网格时,可以对模型金属壁面网格设置 为WALL,从而使壁面网格另一侧的体网格序号 统一设置为0,即碰到此种情况自动识别该面元为 壁面网格,射线不会再穿过该面元。

通过导出的网格数据 mesh 文件,定义棱边 类、面元类和体元类三种数据类型,创建所有的面 网格单元和体网格单元对象,如此将任一面单元 与其连通体单元和节点信息相关联,将任意一体 单元与其连通的面单元信息相关联。 本文中使用三角形网格剖分模型,面元是三 角形面元,体网格单元为四面体,对于每一个四面 体对象,构成其各个面元法向量都取为指向该四 面体的内部。面元的结点按照顺时针顺序存放在 mesh 文件中,如图 8 所示。

3.4.2 算法实现

判断任意两个壁面面元之间的遮挡关系的 算法:

(1)通过所创建的数据类型和对象,得到面元 所构成四面体网格的序号,面元三个结点坐标,面 元中心点坐标和面元法向量及体单元的四个面元 序号。

(2) 从任意两个壁面面元开始判断,如图 9 所 示,判断面元 S_{ABC} 和面元 S_{CED} 相互可见性。两面 元中心点连线是 O₁O₂。由于面元 S_{ABC} 是壁面面 元,面元信息中必然有个体单元序号是 0,故由面 元信息可知 S_{ABC} 所连通体单元 V_{ABCE} 序号。

(3) 在体网格单元 V_{ABCE} 中,由体单元信息,判断 O_1O_2 穿过 V_{ABCE} 中其他三个面元的哪个面元。

判断方法是:① 面元法向量须与 $\hat{r}_{O_2O_1}$ 成钝 角;②利用满足① 平面点法式方程和 O_1O_2 连线 直线方程,分别求 O_1O_2 与其他三个面元的交点P位矢 \hat{r}_{p} 。满足下列条件的面元,才是 O_1O_2 从 V_{ABCE} 体内穿出的面元。

 $\begin{cases} \beta_{i} = \left[(\vec{r}_{i\%_{3}} - \vec{r}_{p}) \times (\vec{r}_{(i+1)\%_{3}} - \vec{r}_{p}) \right] \cdot \vec{n}_{3} \\ \beta_{i} \ge 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \end{cases}$ (4)

式中, \vec{r}_i 为三角面元的各个定点的位置矢量; $\vec{r}_{O_2O_1}$ 为点 O_1 和点 O_2 位矢差。

由图 9 可知, O_1O_2 在 V_{ABCE} 所穿过的面元是 S_{ACE} 。



(4) 由面网格对象 S_{ACE} 的数据信息,得到与 面元 S_{ACE} 相连的另一个体网格单元的 V_{ACDE} 序号, 若序号 =0,则面元 S_{ACE} 是壁面,则不再继续判断, 此时面元 S_{ABC} 和面元 S_{CED} 被遮挡,相互不可见。 若序号 $\neq 0$,则在 V_{ACDE} 中求的除面元 S_{ACE} 外,与 O_1O_2 相交的另一个面元,重复(2),(3) 步,直到判 断的体单元序号等于面元 S_{CED} 的非 0 体单元序 号,则不再判断,此时则面元 S_{ABC} 与面元 S_{CED} 相互 可见。

(5) 在(2),(3) 步判断过程中,会有两种特殊 情况,即面 S_{ACD} 和面 S_{AHG} 的中心 O_1O_2 连线通过 四面体的棱边 AB,如图 10 所示,或面元的中心 O_1O_2 连线通过四面体的顶点 A,如图 11 所示。



图 10 面元中心点连线 O1O2 与四面体棱线相交



图 11 面元中心点连线 O1O2 经过四面体的顶点

对于这两种情况存在的主要问题:如何利用 网格拓扑关系,准确地寻找到 O₁O₂ 通过公共棱边 或公共顶点后,所穿入下一个四面体,追踪 O₁O₂ 连线 所经过所有体和面,即追踪 O₁O₂ 连线的 踪迹。

处理方法是:如图 10 所示,在四面体 V_{ABCD} 内, O_1O_2 连线仅且仅会从交点在三角形面元内部的 面元网格穿出该体单元,进入下一个四面体。因 而,按照步骤(3)中①②,确定 O_1O_2 连线经过面

4

元 S_{ABD} 穿出,进入下一个体网格V_{ABED}。继续执行 步骤(4),判断这种特殊情况下面 S_{ACD} 和面 S_{AHG} 之间的遮挡关系。

这种情况下,O₁O₂ 连线经过的踪迹只有两条,按该处理方法,无论沿用哪一条踪迹都能得到 正确结果。这种处理方法同样也适用于 O₁O₂ 连 线穿过四面体顶点的情况。只是此时,O₁O₂ 连线 的踪迹存在数万以上种可能,而且路径复杂,甚至 踪迹可能穿过起始体单元和终止体单元之间三维 空间中的所有体单元。总之,这两种情况下,不论 共用顶点或棱边的体网格有多少,采用以上处理 方法,都能找到 O₁O₂ 穿过的每一个四面体,正确 地确定面元之间的遮挡关系。

由上述算法介绍可知,判断效率直接与所构建 模型的体网格和面网格相关。当喷管面网格尺寸越 大,内部体网格尺寸越大,遮挡关系判断需要穿过的 体网格就越少,计算时间也就越短,因而在构造模 型体网格时尽可能生成大尺寸体网格。图12为单 端开口圆柱腔体相同面网格,不同体网格数对计 算效率的影响。图13为对应体网格剖分情况。由 图可以明显看出,体网格越大,计算时间越短。





图 13 不同体网格剖分模型

值。由图 15 可以看出, RCS 计算值是一样的, 且与

文献[10]和实验结果^[11] 逼近。可见,上述各种算法 对遮挡关系的判断是有效的且结果也是相同的,说 明上述各种算法都可用于遮挡关系的判断。

应用自主开发的 RCS 计算程序得到图 15 模型 RCS

图 14 为采用上述各种算法得到的遮挡关系,

各种算法计算精度和效率



图 15 弯折的矩形开口腔体

图 17 为不同算法对图 16 模型遮挡关系判断 效率的对比。

图 16 二元喷管模型^[12]尺寸为:进口直径 600 mm,喉道距进口 250 mm,喉道直径 379.5 mm, 出口距进口 1000 mm,出口宽 951.06 mm,宽高比为 2:1的二元喷管模型,面元网格数 N=40 332。采 用 3.1~3.4 节四种算法计算遮挡关系的时间比较 如图 17 所示,其中 3.1 节算法中 L=4。

通过图 17 可以看出,相比其他算法,3.4 节算 法计算时间最短,且可以较好地满足大尺寸模型 计算需求。其他算法时间较长,这是因为每判断 一个面元与其他所有面元之间遮挡关系时,搜索 相应构造的长方体区域中是否会遮挡的第三个面 元数量增多。



图 16 二元喷管模型的网格



5 结束语

本文所讨论的四种方法对模型面元之间遮挡 关系的判断都是有效的,基于 Gambit 的新算法的 计算速度是其他三种算法的若干倍,若构建体网格 质量较好可以达到十多倍。新算法更适合复杂大尺 寸喷管模型的 RCS 计算,极大地缩短计算时间,相 比文献[5]拓扑算法具有较好的通用性和高效性。 新算法不仅适用于三角形面网格,也适用于四边形 网格。相比三角形面网格,四边形网格的体网格和 面网格数量减少,进一步提高计算效率。

参考文献:

- [1] 夏新仁,尹成友. 弹头形状对导弹 RCS 影响的分析
 [J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(2):102-107.
 XIA Xin-ren, YIN Cheng-you. Analysis of Effect of Warhead Shape on Missile's RCS[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(2):102-107. (in Chinese)
- [2] 张浩斌. 腔体电磁散射的混合算法研究[D]. 西安:西 北工业大学,2003.
- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业 出版社,1998:389.
- [4] Obelleiro-Basteiro F, Rodriguez J L, Burkholde R J.

An Iterative Physical Optics Approach for Analyzing the Electromagnetic Scattering by Large Open-Ended Cavities[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1995, 43(4):356-361.

- [5] 李争亭,胡毕富,席平. 腔体 RCS 计算前置处理中网 格单元的相互遮挡判断[J]. 工程图学学报,2008(1): 61-66.
- [6] 许小艳. 开口腔体的 RCS 计算[D]. 西安:西安电子 科技大学, 2007.
- [7] 都志辉. 高性能计算之并行编程技术-MPI并行程序 设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2001:348.
- [8] 姬金祖,刘战合. 基于面元分组的电磁遮挡算法及其 优化[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(4):453-456.

JI Jin-zu, LIU Zhan-he. Electromagnetic Occultation Algorithm Based on Facets Grouping and Optimization [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4):453-456. (in Chinese)

- [9] 周建江,舒永泽. 简单形体目标电磁遮挡算法研究
 [J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(1):96-103.
 ZHOU Jian-jiang, SHU Yong-ze. Research on Electromagnetic Shadowing Algorithm of Simple Targets
 [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, 27(1):96-103. (in Chinese)
- [10] 闫玉波, 葛德彪, 聂小春, 等. 应用改进迭代物理光学 方法分析电大尺寸开口腔体散射[J]. 微波学报, 2001, 17(1):35-39.
- [11] Ling H. RCS of Waveguide Cavities: A Hybrid Boundary-Integral/Modal Approach [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1990, 38(9): 1413-1420.
- [12] 杨涛,杨青真,李岳锋. 轴对称及二元喷管 RCS 的数 值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8):1819-1823.
 YANG Tao, YANG Qing-zhen, LI Yue-feng. Numerical Simulation of RCS for Axisymmetric Nozzles

and Symmetrical Two-Dimensional Nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8):1819-1823. (in Chinese)

作者简介:



杨 涛 男,1986年出生,山东泰安 人,2011年于西北工业大学获硕士学 位,现为中国电子科技集团公司第 三十八研究所助理工程师,主要从事 电磁场数值计算、RCS减缩技术研究。 E-mail:yang1985tao@163.com