

文章编号:0258-1825(2011)01-0052-07

## 拓扑结构改变流场数值方法研究及应用

张辉<sup>1</sup>, 谭俊杰<sup>1</sup>, 崔东明<sup>1</sup>, 石清<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**物体从相互接触的状态分离时会导致流场拓扑结构的改变, 针对拓扑结构改变过程提出了一种非结构重叠网格算法。该方法主要包括“洞边界”自动判定、重叠区形成和流场信息交换三个方面的关键问题。针对三维问题提出了判定洞边界的“曲面判定方法”; 对于重叠区待插值的网格节点建立了“动态叉树”贡献单元搜索方法。洞边界上待插值点的流场参数通过插值方法从其贡献单元上得到。弹丸从炮口发射的过程中, 由于弹丸与炮管的分离导致了流场拓扑结构变化, 而当炮口带有制退器时将使流场的边界条件更加复杂。利用非结构重叠网格方法对弹丸从带有炮口制退器的火炮中发射过程进行了数值模拟, 分析了初始冲击波形成和发展过程, 详细描述了运动弹丸对膛口流场的影响。本文提出的算法将能够有效地应用到航空、航天以及兵器技术领域的工作中, 特别是物体分离过程导致的流场拓扑结构改变问题。

**关键词:**流场, 分离, 拓扑结构, 非结构重叠网格, 炮口制退器, 运动边界

**中图分类号:** O35

**文献标识码:** A

### 0 引言

航空、航天以及兵器技术研究中包含大量的运动边界问题, 例如导弹从战斗机上的发射过程、飞机副油箱的抛落、直升机旋翼的周期性运动以及弹丸的发射过程等等。物体结合和分离前后的流场不是拓扑近似的, 所以认为流场的拓扑结构发生了改变。当前模拟包含运动边界流场的方法主要有网格变形方法和局部网格重构方法<sup>[1-3]</sup>, 而且这两种方法通常结合起来运用, 以适应较大幅度的边界运动。相互接触的物体分离时, 其接触的部位并没有事先生成网格, 所以不能应用网格变形方法进行处理, 使网格变形与局部网格重构方法的应用受到限制。在众多的运动边界问题中, 物体的分离过程尤为复杂, 物体分离前后的流场拓扑结构发生突变, 目前尚没有成熟的方法应用于这一类复杂流场的数值模拟。

基于 Steger 提出的重叠网格的概念<sup>[4]</sup>, Nakahashi 于 1999 年首次建立了非结构重叠网格 (Overset Unstructured Grids, 简称 OUG) 方法, 并且成功应用于模拟外挂物从飞机上的抛落过程<sup>[5]</sup>。该方法针对运动物体单独生成网格, 使网格跟随物体一起在背景网格上运动, 通

过网格重叠区域进行流场信息的交换, 能够适用于刚体任意类型的大范围运动。之后 OUG 方法已经被 Nakahashi 等人应用于多种分离过程的数值模拟<sup>[6,7]</sup>, 但是尚不能对相互接触物体的分离过程进行数值模拟。国内的田书玲等人采用 Nakahashi 等提出的洞边界判定和贡献单元搜索方法对外挂物的投放过程进行了数值模拟, 假设外挂物与飞机之间存在狭小的缝隙, 没有考虑流场拓扑结构的改变<sup>[8,9]</sup>。

本文提出一种改进的 OUG 方法, 用于模拟流场拓扑结构改变过程。其中包括洞边界的“曲面判定方法”、贡献单元的“动态八叉树”搜索方法和拓扑结构改变过程的特殊处理。利用该方法对弹丸发射的过程进行了研究。

### 1 控制方程与离散方法

积分形式的 Euler 方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} U dV + \iint_{\partial\Omega} F \cdot n dA = 0 \quad (1)$$

其中,  $\Omega$  为控制体,  $\partial\Omega$  为控制体的边界曲面,  $n$  是控制体边界曲面  $\partial\Omega$  的单位外法矢量, 守恒型变量  $U$  和无粘通量  $F$  的表达式如下:

\* 收稿日期: 2010-03-01; 修订日期: 2010-05-25.

作者简介: 张辉 (1982-) 博士, 主要从事计算流体力学、场协同原理及并行计算技术研究。

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u_n \\ \rho u u_n + p n_x \\ \rho v u_n + p n_y \\ \rho w u_n + p n_z \\ e u_n + p u_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$p$  为气体的静压,  $\rho$  为密度,  $e$  单位体积总能,  $u, v$  和  $w$  分别是  $x, y$  和  $z$  方向的速度分量,  $n_x, n_y$  和  $n_z$  是单位外法矢量  $n$  在  $x, y$  和  $z$  方向的分量。  $u_n$  的表达式如下:

$$u_n = u n_x + v n_y + w n_z \quad (3)$$

总能  $e$  的表达式如下:

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) \quad (4)$$

将控制方程离散为如下的形式:

$$\frac{\partial(VU)_i}{\partial t} + \iint_{\partial \Omega_i} F \cdot n dA = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_j \frac{1}{V_i} n_{ij} A_{ij} F_{ij}(U) \quad (6)$$

$A_{ij}$  是相邻控制体  $i, j$  公共面的面积,  $n_{ij}$  是该公共面的单位外法矢量,  $V_i$  是控制体  $i$  的体积。

通量  $F_{ij}$  由 HLLC 格式<sup>[10]</sup> 计算, 计算过程如下:

$$F_{ij} = \begin{cases} F_i & \text{if } S_i > 0 \\ F(U_i^*) & \text{if } S_i \leq 0 < S_M \\ F(U_j^*) & \text{if } S_M \leq 0 < S_j \\ F_j & \text{if } S_j < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$U_i^*$  和  $U_j^*$  的定义如下:

$$U_i^* = \begin{bmatrix} \rho_i^* \\ (\rho u)_i^* \\ (\rho v)_i^* \\ (\rho w)_i^* \\ e_i^* \end{bmatrix} = \frac{1}{S_i - S_M} \begin{bmatrix} (S_i - u_n) \rho_i \\ (S_i - u_n) \rho_i (\rho u)_i + (p^* - p_i) n_x \\ (S_i - u_n) \rho_i (\rho v)_i + (p^* - p_i) n_y \\ (S_i - u_n) \rho_i (\rho w)_i + (p^* - p_i) n_z \\ (S_i - u_n) e_i - p_i u_n + p^* S_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$U_j^* = \begin{bmatrix} \rho_j^* \\ (\rho u)_j^* \\ (\rho v)_j^* \\ (\rho w)_j^* \\ e_j^* \end{bmatrix} = \frac{1}{S_j - S_M} \begin{bmatrix} (S_j - u_n) \rho_j \\ (S_j - u_n) \rho_j (\rho u)_j + (p^* - p_j) n_x \\ (S_j - u_n) \rho_j (\rho v)_j + (p^* - p_j) n_y \\ (S_j - u_n) \rho_j (\rho w)_j + (p^* - p_j) n_z \\ (S_j - u_n) e_j - p_j u_n + p^* S_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

$F_i^*$  和  $F_j^*$  的表达式如下:

$$F_i^* = F(U_i^*) = \begin{bmatrix} S_M \rho_i^* \\ S_M (\rho u)_i^* + p^* n_x \\ S_M (\rho v)_i^* + p^* n_y \\ S_M (\rho w)_i^* + p^* n_z \\ S_M (e + p^*)_i^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F_j^* = F(U_j^*) = \begin{bmatrix} S_M \rho_j^* \\ S_M (\rho u)_j^* + p^* n_x \\ S_M (\rho v)_j^* + p^* n_y \\ S_M (\rho w)_j^* + p^* n_z \\ S_M (e + p^*)_j^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,

$$p^* = \rho_i (u_n - S_i) (u_n - S_M) + p_i = \rho_j (u_n - S_j) (u_n - S_M) + p_j \quad (12)$$

$S_M$  按下式定义:

$$S_M = \frac{\rho_j u_n (S_j - u_n) - \rho_i u_n (S_i - u_n) + p_i - p_j}{\rho_j (S_j - u_n) - \rho_i (S_i - u_n)} \quad (13)$$

$S_i$  和  $S_j$  的计算公式由 Sun<sup>[11]</sup> 给出:

$$S_i = \min[u_n - c_i, \hat{u}_n - \hat{c}] \quad (14)$$

$$S_j = \min[u_n - c_j, \hat{u}_n - \hat{c}] \quad (15)$$

$$\hat{u}_n = \tilde{u} n_x + \tilde{v} n_y + \tilde{w} n_z \quad (16)$$

$$\tilde{u} = (u_i + u_j R_\rho) / (1 + R_\rho) \quad (17)$$

$$\tilde{v} = (v_i + v_j R_\rho) / (1 + R_\rho) \quad (18)$$

$$\tilde{w} = (w_i + w_j R_\rho) / (1 + R_\rho) \quad (19)$$

$$\tilde{c}^2 = (\gamma - 1) \left[ \tilde{H} - \frac{1}{2} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2 + \tilde{w}^2) \right] \quad (20)$$

$$\tilde{H} = (H_i + H_j R_\rho) / (1 + R_\rho) \quad (21)$$

$$R_\rho = \sqrt{\rho_j / \rho_i} \quad (22)$$

对非定常流场的时间离散采用四阶 Runge - Kutta 法。

## 2 求解拓扑结构改变过程的 OUG 方法

不论是基于结构网格还是非结构网格的重叠网格方法, 其基本的实现步骤是相同的, 即首先将拥有复杂边界外形或者运动边界的流场划分为多个单独的相互重叠的区域, 生成各自分区的网格; 然后在各网格分区之间建立起合理的信息交换机制。下面将对 OUG 方法的各个步骤进行详细叙述。

### 2.1 重叠区的建立和洞边界的形成

假设流场中有相对运动的物体 A 和 B, 划分出围绕两个物体的流场区域 1 和区域 2。根据需要在区域 1 和区域 2 中分别单独生成非结构网格, 如图 1(a) 所示。然后根据流场中物体 A 和 B 的相对位置, 使两套网格

叠加在一起,将处于另外一个物体内部的网格单元去除,形成各自独立的计算区域,即“挖洞”。形成的重叠网格系统如图1(b)所示,流场区域1和区域2在图1(b)中的重叠区域中通过插值传递流场信息。

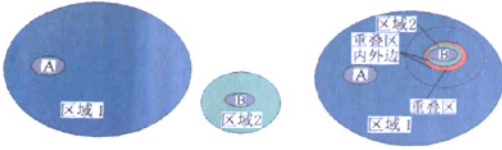


图1 洞边界及重叠区形成

Fig.1 Formation of hole-boundaries and overlapped area

为模拟物体的非正常相对运动,洞边界的确定必须能够自动完成,而洞边界的划分必须以节点和单元的位置判断为基础。Nakahashi 给出了根据离物面距离判定节点和单元位置属性的方法<sup>[5]</sup>。本文根据结构网格下的重叠网格洞边界判定方法<sup>[12]</sup>,提出针对非结构网格的曲面(线)判定方法,其判断条件较物面距判定方法大为简化,有利于提高程序运行速度。以二维情况为例,其详细的判定步骤如下:

(1)如图2所示,建立一条包围某运动物体的封闭曲线,一定存在一个与该封闭曲线相切的四边形;

(2)处于四边形之外的所有网格节点均标识为“未激活”节点;

(3)对于处于四边形内部或者恰好处于四边形边界上的网格点  $P$ ,在封闭曲线上总能找到一点  $P_1$  使线段  $PP_1$  的距离最短,即线段  $PP_1$  垂直于曲线。

(4) $\vec{P}_1P$  为从点  $P_1$  指向点  $P$  的向量, $\vec{n}$  为  $P_1$  点处曲线上的外法线方向,若满足  $\vec{n} \cdot \vec{P}_1P > 0$ ,则点  $P$  在曲线外部,将其标识为“未激活”点,否则点  $P$  在曲线内部或者在曲线上,将其标识为“已激活”点;

(5)如果某单元的所有网格节点的标识均为“已激活”,则将此单元标识为“已激活”单元;如果某单元中所有的节点均标识为“未激活”,则将此单元标识为“未激活”单元,即此单元为“洞中”单元;如果某单元的所有节点中有的标记为“已激活”,有的标记为“未激活”,则将此单元标识为“洞边界”单元,该单元横跨于洞边界上;

(6)隐去处于洞中的“未激活”单元,形成“网格空洞”,剩下的“已激活”单元将参与流场的计算,“洞边界”单元将用于重叠区的信息传递。

对于三维情况,建立包围物体的封闭曲面,并且形

成该曲面的外切长方体,位于封闭曲面内部的节点为“已激活”点,四面体网格的属性同样根据其四个节点的属性判断,隐去“未激活”单元,形成洞边界。

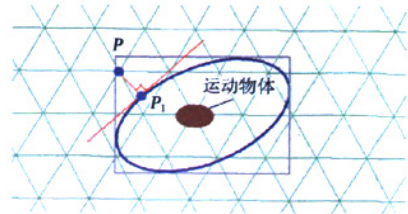


图2 非结构网格中的曲线判定方法

Fig.2 Curved surface judging method in unstructured grids

## 2.2 贡献单元的判定方法

在两套非结构网格形成的重叠区中,若一套网格中的某个节点位于另外一套网格的某个单元中,则称此单元为该节点的贡献单元,插值过程中通过贡献单元上的流场信息插值得到该节点的对应参数。对于非结构网格,贡献单元的判定有面积/体积判定方法<sup>[13]</sup>、形函数判定方法<sup>[14,15]</sup>和求解线性方程组方法<sup>[15,16]</sup>等等。结合后文的插值方法进行综合考虑,本文采用形函数判定方法。

以二维情况为例,如图3所示的三角形  $ABC$ ,需要判断  $P$  点是否位于其内部。

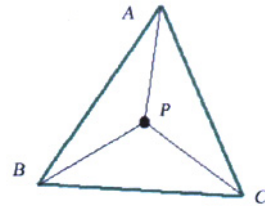


图3 待插值点与单元位置关系

Fig.3 Relative location of node and its donor cell

假设三角形  $ABC$  的三个网格节点  $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$  和  $C(x_C, y_C)$  构成凸包  $H$  (convex hull),  $H$  定义如下<sup>[14,15]</sup>:

$$H = \{ \lambda_1 A + \lambda_2 B + \lambda_3 C; \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, 3; \sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 \} \quad (23)$$

假设有一点  $P(x, y)$ ,若  $P$  点位于凸包  $H$  内部,则其坐标  $x$  和  $y$  可以由如下的线性方程组唯一确定:

$$\begin{bmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$\alpha, \beta$  和  $\gamma$  称为形状参数, 对于任何一点  $P$ , 计算其形状参数, 若形状参数满足:  $\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \gamma \geq 0$ , 则点  $P$  位于三角形  $ABC$  内部, 确定三角形  $ABC$  为点  $P$  的贡献单元; 否则三角形单元不包含点  $P$ 。

与二维情况类似, 三维情况下的凸包为四面体单元  $ABCD$ , 点  $P(x, y, z)$  相对于四面体的形状参数  $\alpha, \beta, \gamma$  和  $\chi$  由如下线性方程组确定:

$$\begin{bmatrix} x_A & x_B & x_C & x_D \\ y_A & y_B & y_C & y_D \\ z_A & z_B & z_C & z_D \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

若满足  $\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \gamma \geq 0, \chi \geq 0$ , 则点  $P$  位于四面体  $ABCD$  内部, 该四面体单元为点  $P$  的贡献单元。

### 2.3 贡献单元的搜索方法

随着物体的不断运动, 网格系之间的相互关系随时间不断变化, 节点的贡献单元也不断改变, 每个时间步的推进都要对贡献单元进行搜索。最简单的搜索方法是对网格单元逐个进行判断, 对于每个节点平均需要对一半数量的网格单元进行判断, 这种方法将耗费大量的时间, 在数值计算中很难有效地应用。“邻近单元搜索方法”<sup>[5]</sup>采用类似 Delaunay 划分方法将网格单元按照不同区域归类进行搜索, 由于其搜索路径是一维的, 从而获得较高的搜索效率。

针对非结构网格的管理, 叉树结构<sup>[17-19]</sup>是一种高效的数据结构, 本文提出了“动态叉树”搜索方法, 通过不断更新四/八叉树的结构适应物体之间的连续运动。“动态叉树”搜索方法的实现步骤如下:

(1) 对于不同时刻网格系之间的相互关系, 采用 2.1 节中的曲面判定方法进行重叠区域的划分, 自动判断贡献单元的瞬时空间分布。

(2) 当贡献单元的范围确定以后, 删除当前的叉树结构。非结构网格的网格节点的数量远少于网格单元的数量, 所以选择将所有贡献单元的网格节点加入新的四/八叉树中。

(3) 搜索离待插值点的最近点从叉树的根开始, 逐层向上搜索, 直到搜索到包含待插值点的最高层次正方体为止。在此正方形(体)中包含的所有网格节点中筛选出离待插值点最近的网格节点, 完成最近点的搜索。

(4) 对以最近点为顶点的所有网格单元进行判断, 确定待插值点的贡献单元, 其判断方法如 2.2 节中所述。

### 2.4 插值方法

在基于结构网格的重叠网格算法中, 对应于二维和

三维的情况, 最常用的插值算法分别是“双线性插值”和“三线性插值”方法。针对非结构网格, 本文采用参考文献 15 提供的具有二阶精度的线性插值算法。假设点  $P$  上的参数  $q$  可以通过四面体的四个节点通过如下的插值关系得到:

$$q = q_A \phi_A + q_B \phi_B + q_C \phi_C + q_D \phi_D \quad (26)$$

求解如下线性方程组即可得到  $\phi_A, \phi_B, \phi_C$  和  $\phi_D$ :

$$\begin{bmatrix} x_A & x_B & x_C & x_D \\ y_A & y_B & y_C & y_D \\ z_A & z_B & z_C & z_D \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

对比公式(25)和(27), 二者完全相同, 所以采用本插值算法和形函数贡献单元判定方法, 计算中仅需要进行一次线性方程组的求解, 能有效减少计算量, 提高程序的运行效率。

### 2.5 流场拓扑结构改变过程的处理

实际的工程应用中, 有很多包含拓扑结构改变的过程, 其中弹丸的发射过程尤其复杂, 因为这一过程包含复杂的内弹道过程和弹丸与身管之间的高速和大位移的相对运动, 如图 4 所示。需要提出一种有效的方法, 能够自动对上述的过程进行处理。

弹丸在膛内运动时, 与火炮身管之间紧密接触并且做高速的相对滑动。由于弹丸和身管之间紧密接触, 重叠区的划分和重叠区插值过程不能按照 2.1 ~ 2.3 节所述的方法进行, 必须进行特殊的处理。

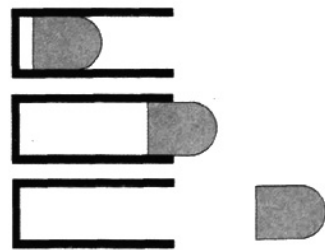


图 4 弹丸发射过程简图

Fig. 4 Sketch of projectile launching process

以二维情况为例进行详细说明。图 5(a) 中的网格是围绕弹丸生成的, 在弹丸运动过程中与弹丸始终保持相对静止。根据弹丸不同时刻的位置, 在两套网格中形成变化的重叠区域。重叠区域中的网格节点如果存在贡献单元则按照 2.2 节中介绍的方法进行处理。对于图 6 中以圆点标志的待插值网格点, 这些点的共同特征是均位于身管壁的内部, 流场中不存在包含它们的贡

献单元。点  $P_1$  为位于身管壁内部的一个待插值点,点  $P_2$  为流场中最接近点  $P_1$  的位置。点  $P_1$  处的参数通过流场中点  $P_2$  的贡献单元插值得到。

上述处理方法可以方便地扩展到相互接触物体相互分离过程的数值模拟中。两个物体相互分离过程中,处于物体内部而且不存在贡献单元的网格节点逐渐从对方物体内部移出,当两个物体完全分离时,所有待插值点均存在各自的贡献单元。

同样以弹丸发射过程为例,当弹丸到达身管口部时,弹丸的一部分网格位于身管内部,另外一部分则已经处于膛口外部的流场中。如图 5(b) 所示,以圆点标记的网格节点仍然处于身管壁内部,流场中不存在包含它们的贡献单元;以方点标记的节点处于流场中,这部分节点均存在各自的贡献单元,对于这两类情况需要采用以上介绍的不同方法进行处理。

当弹丸远离膛口以后,在弹丸周围形成封闭的重叠区,洞边界上的所有节点均存在各自的贡献单元,可以用 2.4 节的插值方法进行信息的传递。

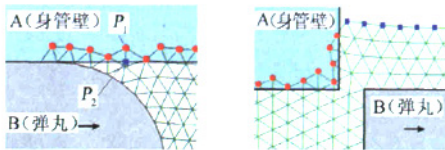


图 5 弹丸在膛内/外时重叠网格处理方法

Fig. 5 Treatment of overlapped grids in and out of barrel

### 3 算例

火炮发射过程中会使炮管后坐,为了减少火炮身管的后坐,可以采用炮口制退器对火药气体的排空过程进行控制。通过使部分火药气体流向身管的侧后方,使炮口制退器受到反作用力,减少身管的后坐,但同时也大大增加了流场的复杂程度,加剧了冲击波对周围环境的影响。

本算例采用如图 6 所示的炮口制退器模型为研究对象。采用的计算域为真实流场的四分之一,炮口制退器和弹丸的表面网格如图 7 所示。

由于内弹道过程是包含化学反应的三维两相流,目前尚没有成熟的算法对其进行模拟。本算例的膛内火药气体和弹丸运动的相关内弹道参数由一维内弹道程序计算得到。内弹道过程开始后火药不断燃烧,弹丸从静止状态启动之后开始做变加速运动,其前方的空气受到压缩,一系列压缩波不断增强,最终形成一道激波。如图 8 所示,0.005s 时刻,弹丸前部已经形成具有一定

强度的激波。

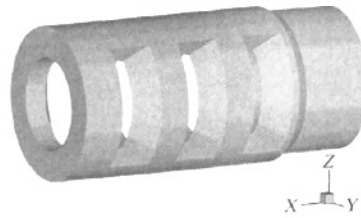


图 6 炮口制退器外形

Fig. 6 Profile of a muzzle brake

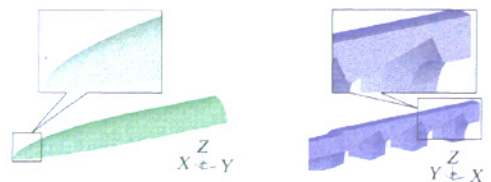


图 7 弹丸和炮口制退器表面网格分布

Fig. 7 Surface grids of projectile and muzzle brake

弹丸和其前方的压缩空气柱一起向膛口方向运动,如图 9(a) 所示,0.0104s 时刻,弹丸前方的激波已经运动到炮口制退器入口处;之后压缩空气将从炮口制退器的侧孔和前方的弹丸向大气中流出,形成复杂的初始流场,如图 9(b) 所示;图 9(c) 中为后效期开始前瞬间膛口处的流场结构。

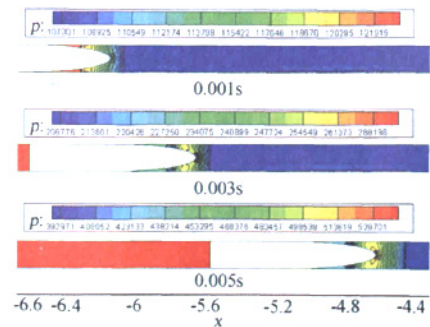


图 8 弹丸压缩前方空气过程 (Pa)

Fig. 8 The process of projectile compressing air

弹丸离开膛口的瞬间即完成了流场拓扑结构的改变,膛内的高温高压火药燃气从弹丸与炮口制退器内壁的缝隙中向大气中高速流出。0.012s 时膛口流场如图 10(a) 所示,此时初始流场的激波前沿位于弹丸的前方,从炮口制退器第一排侧孔中排出的火药气体已经进入初始流场中,高速运动的弹丸头部已经形成了斜激波。在(b)图的 0.0122s 时刻,弹丸头部赶上初始流场



的波阵面,而炮口制退器侧孔的出口处已经形成了复杂的波系。(c)图中的时刻,弹丸头部已经突破初始流场,其头部的斜激波使初始波阵面发生弯曲并与之相交。从炮口制退器中流出的高速燃气射流逐渐赶上弹丸并且包围弹丸的尾部,如图(d)所示。

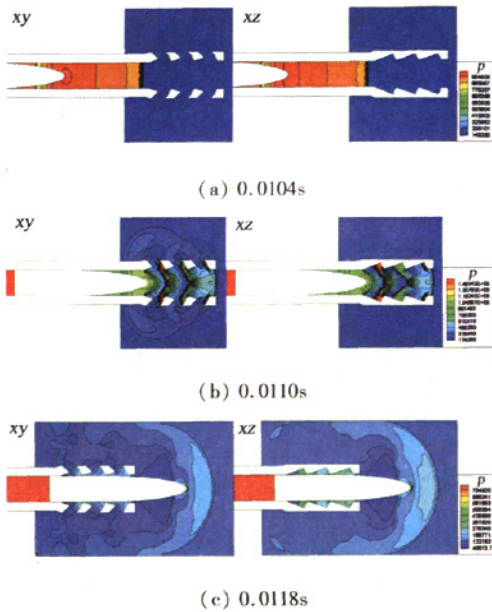


图 9 膛口初始流场的形成 (Pa)

Fig. 9 Formation of precursor flow field

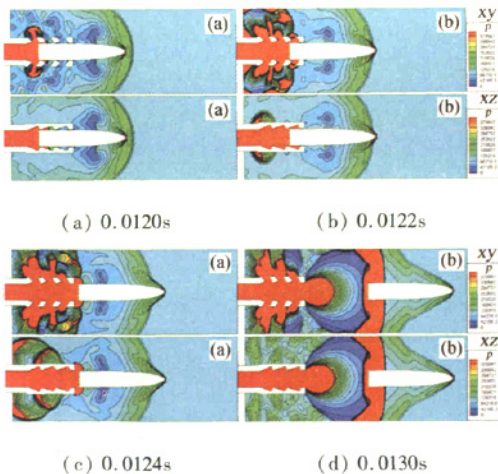


图 10 膛口外流场压力分布 (Pa)

Fig.10 Pressure distribution out of muzzle brake

#### 4 结 论

为模拟包含运动边界和拓扑结构改变的流场,提出

了一种改进的 OUG 方法。其中主要包括洞边界的划分、重叠区的建立、贡献单元的搜索方法和流场参数的插值方法。弹丸的发射过程十分复杂,是典型的运动边界问题。利用本文提出的 OUG 方法,模拟了弹丸从膛内加速直至离开膛口过程中的流场变化,对膛口初始流场的形成以及弹丸和炮口制退器对火药气体流出的过程进行了分析。验证了本文提出的数值方法能够适用于包含复杂边界外形和拓扑结构改变流场的数值模拟。

#### 参 考 文 献:

- [1] FORMAGGIA L, PERAIRE J, MORGAN K. Simulation of a store separation using the finite element method [J]. *Appl. Math. Modeling*, 1988, 12:175-181.
- [2] BAUM J D, LÖNER R, MARQUETTE T J and LUO H. Numerical simulation of aircraft canopy trajectory [R]. AIAA, 1997, 97-1885.
- [3] BAUM J D, LÖNER R. Numerical simulation of pilot/seat ejection from an F-16 [R]. AIAA, 93-0783, 1993.
- [4] STEGER J. L., DOUGHERTY F. C. BENEK J. A: A chimeric grid scheme [A]. ASME Mini - Symposium on Advances in Grid Generation[C], 1982.
- [5] KAZUHIRO NAKAHASHI, FUMIYA TOGASHI: An intergrid - boundary definition method for overset unstructured grid approach [R]. AIAA, 1999, 99 - 3304: 496-506.
- [6] FUMIYA TOGASHI, KAZUHIRO NAKAHASHI, YASUSHI ITO: Flow simulation of NAL experimental supersonic airplane/booster separation using overset unstructured Grids [R]. AIAA, 2000 - 1007: 1-11.
- [7] FUMIYA TOGASHI, YASUSHI ITO, KAZUHIRO NAKAHASHI: Extension of overset unstructured grids to multiple bodies in contact [R]. AIAA, 2002 - 2809: 1-10.
- [8] 田书玲,伍贻兆,夏健. 基于非结构重叠网格的二维外挂物投放模拟 [J]. *空气动力学学报*, 2007, 25 (2): 245-249.
- [9] 田书玲,伍贻兆,夏健. 用动态非结构重叠网格法模拟三维多体相对运动绕流[J]. *航空学报*, 2007, 28 (1): 46-51.
- [10] TORO E F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics(chapter 10) [M]. Springer, Berlin 1997.
- [11] SUN M, TAKAYAMA K. An artificially upstream flux vector splitting scheme for the Euler equations [J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 189(1): 305-329.
- [12] 张震霖. 外挂物投放技术的数值方法研究[D]. [硕士学位论文], 西北工业大学, 2004.

- [13] 郭正. 包含运动边界的多体非定常流场数值模拟方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2002.
- [14] LÖHNER R. Robust, vectorized search algorithms for interpolation on unstructured grids [J]. *Journal of Computational Physics*, 1995, 118(2): 380-387.
- [15] MARSHALL C GALBRAITH. Development and application of a general interpolation algorithm [R]. AIAA, 2006, 2006-3851.
- [16] BURKARDT J. Geometry geometric calculations[A]. FSU Computational Sciences Faculty Web Page, URL: [http://www.csit.fsu.edu/~burkardt/f\\_src/geometry/ geometry.html](http://www.csit.fsu.edu/~burkardt/f_src/geometry/geometry.html)[ cited 28 June 2005].
- [17] LÖHNER RAINALD. Some useful data structures for the generation of unstructured grids [J]. *Communications in Applied Numerical Methods*. 1988, 4(1): 123-135.
- [18] SAMET H. The quadtree and related hierarchical data structures [J]. *Computing Surveys*, 1984, 16(2): 187-260.
- [19] BONET JAVIER, PERAIRE JAIME. Alternating digital tree (ADT) algorithm for 3D geometric searching and intersection problems [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1991, 31(1): 1-17.

## Study and application of the numerical method to simulate the topological changes of flow field

ZHANG Hui<sup>1</sup>, TAN Jun - jie<sup>1</sup>, CUI Dong - ming<sup>1</sup>, SHI Qing<sup>2</sup>

(1. College of Energy Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 211800, China

2. China Aerodynamics Research and Development Center Mianyang, Sichuan, 621000 China)

**Abstract:** To solve the problems which contain changes of topological structure, an OUG (overset unstructured grids) method is improved in this paper. This method contains the following three important parts: the automatic judging of hole - boundaries, the forming of overlapped areas and the transferring of flow field information. The "curved surface judging method" was advanced to build the hole - boundaries. The "Dynamic Quadtree/Octree" search algorithm is proposed to search the donor cells of the nodes which locate on the hole - boundary. Flow parameters of non - active nodes on the hole - boundary are calculated by interpolating from the donor cells. In a launching process, the relative sliding and departing takes place between a bullet and a barrel contacting with each other, and therefore topological structure of the flow field changes, when a muzzle brake is fixed on the muzzle, the flow field of power gas changes to be more complex. This OUG method is applied to simulate the process of a projectile being launched from cannon which has a muzzle brake. The process of precursor shock wave being formed is clearly shown in the simulation results. The influences of the projectile to the muzzle flow field are all described in detail. This method is proved powerful to solve the problems of moving bodies which are in contact with each other separating from each other, especially the process of topological structure changing during the departing period of the moving bodies.

**Key words:** flow field; depart; topological structure; Overset Unstructured Grids (OUG); muzzle brake; moving boundary