

文章编号: 1001-2486 (2000) 04-0012-03

# 三维高超音速复杂流场的分区数值计算\*

李桦, 梁剑寒, 王承尧

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于拼接网格系统, 推导了一种适用于高超音速复杂流场分区数值计算的区域边界格式, 通过区域边界格式对区域边界上的通量进行守恒性处理; 在此基础上, 发展了一个高超音速复杂流场分区算法。对高超音速粘性绕流流场进行了分区数值模拟, 取得了较好的结果。

**关键词:** 三维高超音速流动; 区域边界格式; 分区数值计算

**中图分类号:** V211.4      **文献标识码:** A

## Multizonal Numerical Simulation of Three Dimensional Hypersonic Flowfield

LI Hua, LIANG Jian-han, WANG Cheng-yao

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** According to the conservation of flux on the zonal boundary, a zonal boundary scheme adapted to numerical simulation of hypersonic flowfield is derived for patched grid system. Based on this work, a multizonal numerical algorithm is developed for 2D/3D supersonic and hypersonic viscous complicated flowfield. Using this algorithm, the hypersonic blunt biconic viscous flowfield is numerically simulated with the angle of attack of  $0^\circ$  and  $4^\circ$ .

**Key words:** 3D hypersonic flow; boundary scheme; multizonal numerical simulation

随着计算流体力学的发展及工程实际问题的需要, 采用数值方法模拟的飞行器几何外形越来越复杂, 这对计算流体力学 (CFD) 的网格生成技术和算法提出了更高的要求。目前在 CFD 领域中解决这类问题常用方法之一是采用多块或分区算法<sup>[1-3]</sup>。

在分区算法的实现过程中, 除了需要处理通常所提到的边界条件外, 还要处理一个新的边界——区域边界。为了保证间断面 (如激波) 从一个区传播到另一个区时, 能得到正确的解, 对于区域边界上的通量必须进行守恒处理。本文对于拼接网格系统建立了区域边界守恒格式, 并将其应用到高超音速钝头双锥体粘性绕流流场的求解中, 取得了较好的结果。

### 1 区域边界格式<sup>[4]</sup>

为了使数据能方便、准确地从一个区传递到另一个区, 区域边界条件应满足以下三个要求:

- (1) 数值稳定;
- (2) 保证空间和时间精度;
- (3) 在区域边界上保证通量守恒, 以使得流场间断面能从一个区的网格中移到另一个区的网格。

在超音速及高超音速计算中这个要求尤为重要。

在区域边界上的满足上述三个条件的格式, 称为区域边界格式。

为了便于推导二维区域边界格式, 我们给出了一个二维钝头体绕流流场的二区拼接网格, 如图 1 所示。图中  $A'$ ,  $B'$  线为区域边界。

基本方程以二维非定常的 Euler 方程为例。

通过坐标变换, 原守恒形式的方程变换为:

$$\frac{\partial Q^{(i)}}{\partial \tau^{(i)}} + \frac{\partial E^{(i)}}{\partial \xi^{(i)}} + \frac{\partial F^{(i)}}{\partial \eta^{(i)}} = 0 \quad (1)$$

\* 收稿日期: 1999-12-27  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19482002)  
作者简介: 李桦 (1962), 男, 副教授, 博士。

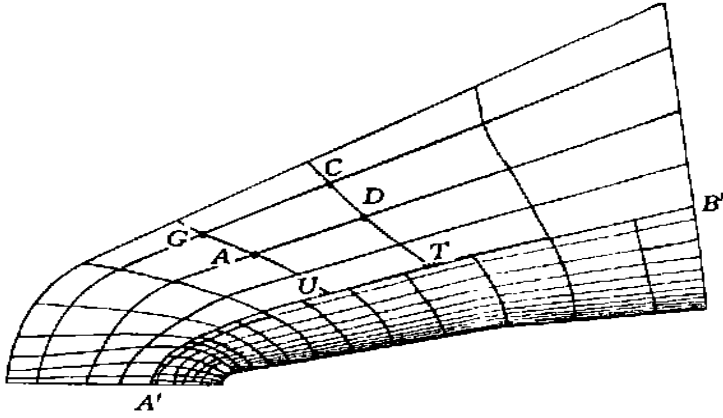


图1 钝头绕流流场二区拼接网格示意图

Fig.1 Patched grid system of flowfield

式中: 对于区域 ①,  $i = 1$ ; 对于区域 ②,  $i = 2$ 。

采用数值离散方法, 将方程 (1) 离散, 用 LU-SSOR 方法进行扫描迭代, 即可对各子区流场进行迭代求解<sup>[4]</sup>。

在子区 ② 的求解过程中, 要用到  $F_{i,1}^{(2)}$  的值。本文根据通量守恒的原则, 推导出二维区域边界格式, 给出了  $F_{i,1}^{(2)}$  的计算公式。

应用守恒形式的显式差分格式, 方程 (1) 离散为

$$\frac{\Delta \xi_{j,k}^{(i)}}{\Delta \tau^{(i)}} + \frac{E_{j+1,k}^{(i)} - E_{j,k}^{(i)}}{\Delta \xi^{(i)}} + \frac{F_{j,k+1}^{(i)} - F_{j,k}^{(i)}}{\Delta \eta^{(i)}} = 0 \quad (2)$$

对于二区的拼接网格系统, 如图 1 所示, 则要求在区域边界 AB 上二区通量守恒。即

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \xi^{(2)}}{2} (F_{1,j}^{(2)} + F_{j_{\max},1}^{(2)}) + \Delta \xi^{(2)} \sum_{j=2}^{j_{\max}-1} F_{j,1}^{(2)} \\ &= \frac{\Delta \xi^{(1)}}{2} (F_{1,k_{\max}}^{(1)} + F_{j_{\max},k_{\max}}^{(1)}) + \Delta \xi^{(1)} \sum_{j=2}^{j_{\max}-1} F_{j,k_{\max}}^{(1)} \end{aligned} \quad (3)$$

为推导满足上式要求的  $F_{i,1}^{(2)}$ , 则有

$$\Delta \xi^{(2)} F_{j,1}^{(2)} = \int_U^r F_{l,k_{\max}}^{(1)} dS_i \quad (4)$$

即

$$F_{j,\frac{1}{2}}^{(2)} = \frac{1}{\Delta \xi^{(2)}} \int_U^r F_{l,k_{\max}}^{(1)} dS_i \quad (5)$$

在数值计算过程中, 为求解上式, 我们假设  $F_{l,k_{\max}}^{(1)}$  沿曲线轴的分布为分片常数分布, 即  $F_{l,k_{\max}}^{(1)}$  在  $(\xi_{s,k_{\max}}^{(1)})$  和  $(\xi_{s+1,k_{\max}}^{(1)})$  之间为常数, 如图 2 所示。

## 2 三维高超音速粘性绕流流场分区数值计算

本文利用拼接网格系统和区域边界格式, 对高超音速钝头双锥体绕流流场进行了分区数值计算。控制方程为三维 NS 方程, 差分格式为 Jameson 的 LED 格式<sup>[4]</sup>。

来流条件为:  $M_{\infty} = 9.9$ ,  $Re_{\infty} = 2.2 \times 10^5$ ,  $T_{\infty} = 49.8\text{K}$ , 计算网格为二区拼接网格系统和四区拼接网格系统。

图 3 给出了流场分区示意图。

图 4 和图 5 分别给出攻角  $\alpha = 4^\circ$  时, 采用二区和四区网格分区计算得到流场的对称面上的等压线。

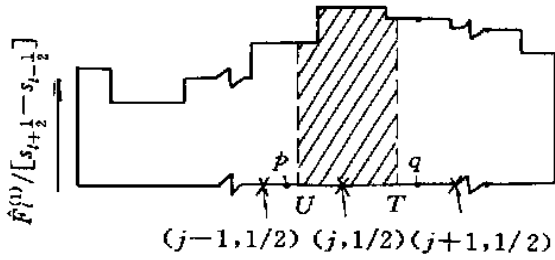
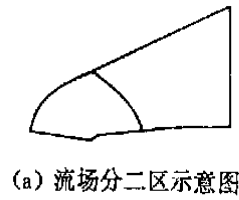


图 2  $F_{l,k}^{(1)}$  分布示意图

Fig. 2 Distribution of  $F_{l,k}^{(1)}$



(a) 流场分二区示意图



(b) 流场分四区示意图

图 3 流场分区示意图

Fig. 3 Multizonal flowfield

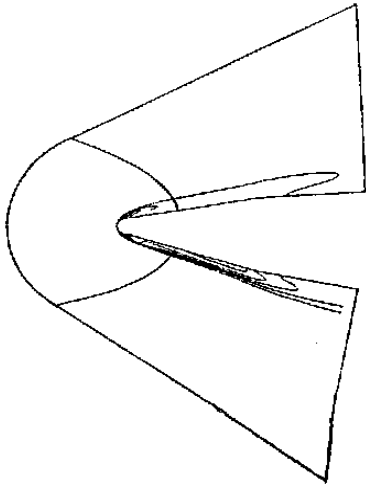


图 4 二区拼接网格计算流场对称面上等压线图

Fig. 4 Isogram of two-zonal patched grid of flowfield

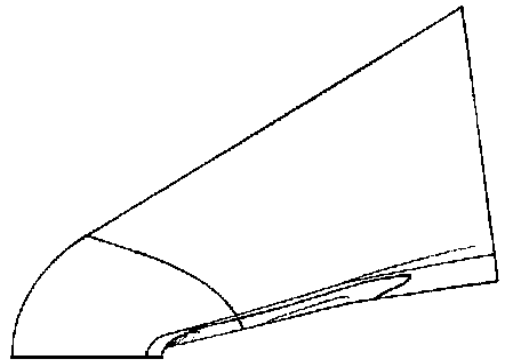


图 5 四区拼接网格计算流场对称面上等压线图

Fig. 5 Isogram of four-zonal patched grid of flowfield

从图中我们看到，激波波系光滑地通过了区域边界。这说明，我们采用的区域边界格式在三维高超音速流场的分区数值计算中处理区域边界是成功的，它为用分区数值计算方法来模拟三维复杂流场打下了基础。

### 3 结论

通过数值计算表明，应用本文建立的区域边界格式能够对分区流场的区域边界上的通量进行守恒性处理，使激波光滑地通过区域边界；应用于三维高超音速流场的分区数值计算，取得了较好的结果。

### 参考文献:

[1] Wang Z J, Yang H Q. A Unified Conservative Zonal Interface Treatment for Arbitrarily Patched and Overlapped Grids [C]. AIAA paper. 94-0320.

[2] Grasso F, Marini M. Multiblock Implicit TVD Solution of High-Speed Internal Flows [J]. Journal Propulsion and Power, 1993, 9 (2).

[3] Rai M M. A Multizonal High-Order Finite Difference Method for the NS Equations [C]. AIAA paper. 95-1706.

[4] 李桦. 三维超音速/高超音速复杂流场分区多机并行数值计算与实验验证 [D]. 长沙: 国防科技大学, 1996.

[5] Jameson A. Flux-Limited Schemes for the Compressible NS Equation [J]. J. AIAA, 1995, 11 (2).