

文章编号: 1001-2486 (2001) 04-0010-03

逃逸飞行器喷流干扰流场的分区数值模拟*

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, 应用三维区域边界格式; 通过区域边界格式对区域边界上的通量进行守恒性处理, 发展了一个超音速复杂流场分区算法; 对不同攻角下的逃逸飞行器喷流干扰流场进行了分区数值模拟, 取得了较好的结果。

关键词: 逃逸飞行器; 三维喷流流场; 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 Jet Flowfield of a Launch Escape Vehicle

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 two and three dimensional zonal boundary schemes are derived for patched grid systems. Based on this work, a multizonal numerical algorithm is developed for 2D/3D viscous complicated flow field with supersonic jet. Using this algorithm, the Launch Escape Vehicle (LEV) jet interaction viscous flow field is numerically simulated with angle of attack of 4° and 8° .

Key words: LEV; jet flow; boundary scheme; multizonal numerical simulation

逃逸飞行器喷流干扰流场是一个十分复杂的流场。在流场中有强激波、膨胀波、分离、旋涡等物理现象的存在。这些现象对飞行器的绕流流场及其气动参数有着很大的影响。因此, 逃逸飞行器的喷流干扰流场的数值模拟及其气动参数的计算是飞行器的设计和研制过程中急需解决的问题。

由于逃逸飞行器外形十分复杂, 采用传统的方法生成的单一的结构网格已很难满足计算的要求, 目前, 解决这个问题方法之一是采用分区算法。

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^[1, 2, 3]。

1 分区数值计算方法

1.1 三维区域边界格式

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。

在区域边界上满足上述三个条件的格式, 称为区域边界格式。

在三维流场的分区计算中, 区域边界是一个曲面。在这种情况下, 通量守恒面亦一曲面。图1给出了区域边界面上控制体积单元的示意图, 图2给出了通量守恒面的示意图。

根据通量守恒的原则, 参照图2, 我们可以推得

$$\bar{F}_{(i_2, \Delta, k_2)}^{(2)} = \frac{1}{M_{(i_2, \Delta, k_2)}^{(2)}} \int_u^R \int_u^T \bar{F}_{(i_1, j_{1\max}, k_1)}^{(1)} d\xi d\zeta \quad (1)$$

* 收稿日期: 2000-11-01
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。

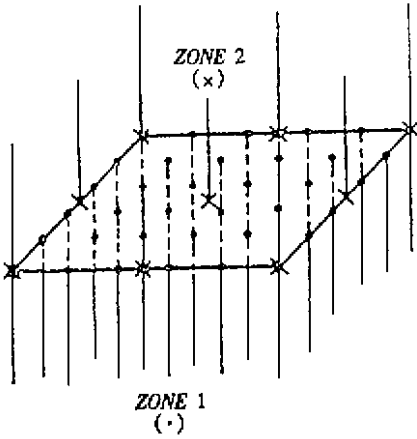


图1 区域边界面示意图
Fig.1 Zonal boundary surface

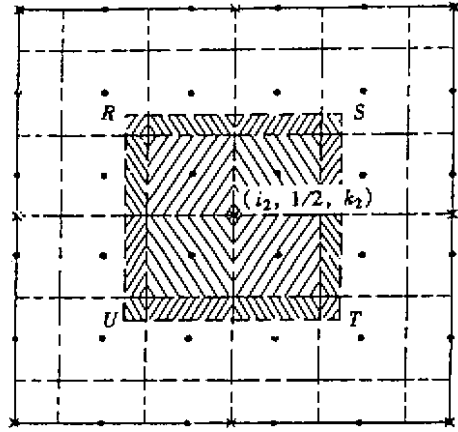


图2 通量守恒面示意图
Fig.2 The surface of conservation of flux

式中 $M_{(i_2, 1, k_2)}^{(2)}$ 为 $\bar{F}_{(i_2, 1, k_2)}^{(2)}$ 所对应的单元界面面积。

假设 $\bar{F}_{(i_1, j_{1max}, k_2)}^{(1)}$ 为片常数分布，则 (1) 式可写成离散形式为

$$\bar{F}_{(i_2, 1, k_2)}^{(2)} = \sum_{k_1=1}^{K_{max}} \sum_{i_1=1}^{I_{max}} N_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(i_2, 1, k_2)} \bar{F}_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(1)} \quad (2)$$

其中 $N_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(i_2, 1, k_2)}$ 为插值系数，其表达式为：

$$N_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(i_2, 1, k_2)} = \frac{A_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(i_2, 1, k_2)}}{M_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(2)}} \quad (3)$$

式中 $A_{(i_1, j_{1max}, k_1)}^{(i_2, 1, k_2)}$ 为 II 区的控制体积单元 $(i_2, 1, k_2)$ 和 I 区的控制体积单元 (i_1, j_{1max}, k_1) 在通量守恒面上的重叠面积。

1.2 三维喷流干扰流场分区数值计算

应用拼接网格系统对复杂流场进行分区数值计算，一般可分为下面几个步骤：

- 1) 在一个子区域内，通过求解控制方程组，得到各内点上的守恒变量的值。
 - 2) 应用区域边界格式，在区域边界上进行守恒性处理，以保证在区域边界上通量守恒。
 - 3) 利用插值，得到另一子区的区域边界上的守恒变量的值。
 - 4) 在另一个子区内，求解控制方程组，以得到内点上变量的值。
- 重复 1) ~ 4) 步，直到计算收敛为止。

2 逃逸飞行器喷流干扰流场分区数值模拟

本文用拼接网格系统和三维区域边界格式，对逃逸飞行器喷流干扰流场进行分区数值计算。控制方程为三维 NS 方程，差分格式为 Jameson 的 LED 格式^[4]，在计算中采用 Baldwin-Lomax 湍流模型。

来流条件为： $M_\infty = 2.0$ ， $Re_\infty = 1.8 \times 10^7$ ，喷流马赫数 $M_j = 2.8$ ，喷流压力比 $P_j/P_\infty = 41$ 。计算网格为二区拼接网格系统。图 3 给出了流场网格示意图。图 4 给出攻角 $\alpha = 4^\circ$ 和 $\alpha = 8^\circ$ 时，采用二区拼接网格计算得到的逃逸飞行器简化外形喷流流场的对称面上的等压线图。

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超音速复杂外形喷流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以及采用多机并行算法计算复杂流场打下了基础。

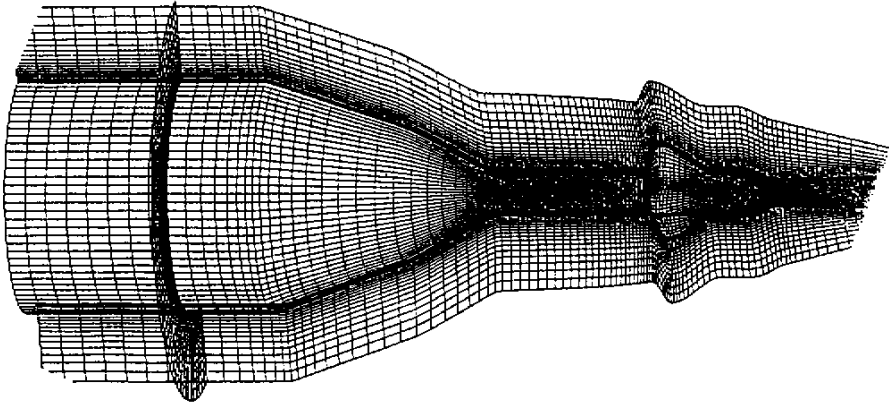


图3 流场计算网格示意图

Fig.3 Computational grid

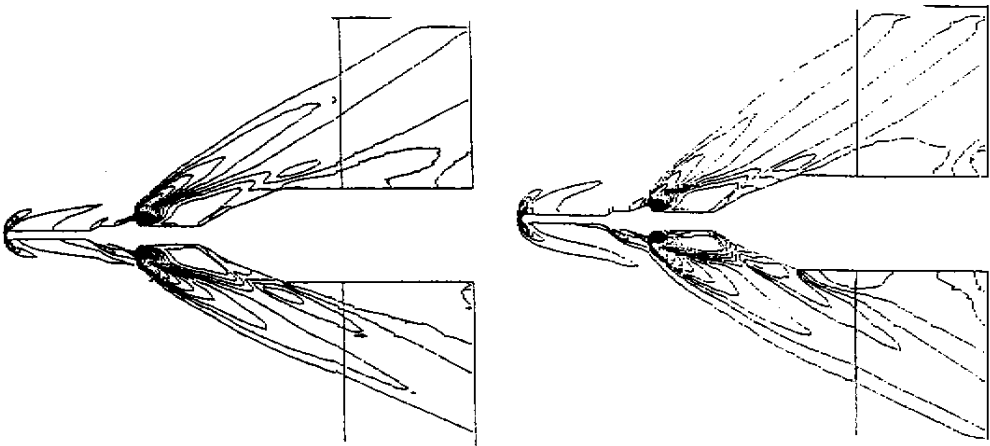
(a) 攻角 $\alpha = 4^\circ$ (b) 攻角 $\alpha = 8^\circ$

图4 逃逸飞行器简化外形喷流流场对称面上等压线图

Fig.4 Pressure contour on symmetry surface of jet flowfield

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;并采用分区数值计算方法计算了不同攻角下的逃逸飞行器三维喷流干扰流场,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 Pateched and Overlapped Grids [N]. 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 Multixonal High-Order Finite Diffeerence Method for the NS Equations [N]. 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]. 国防科大博士论文, 1996. 1.
- [5] Jameson A. Flux-Limited Schemes for the Compressible NS Equation [J]. J. of AIAA, 1995, 11 (2).

