

文章编号:1000-6893(2007)01-0046-06

用动态非结构重叠网格法模拟三维多体 相对运动绕流

田书玲, 伍贻兆, 夏 健

(南京航空航天大学 航空宇航学院空气动力学系, 江苏 南京 210016)

Simulation of Flows Past Multi-body in Relative Motion with Dynamic Unstructured Overset Grid Method

TIAN Shu-ling, WU Yi-zhao, XIA Jian

(Department of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 发展了动态非结构重叠网格技术。提出了基于阵面推进的相邻单元搜索算法和适合于高阶空间离散格式的网格间插值关系定义方法,前者提高了非结构重叠网格在模拟多体间具有大幅相对运动的非定常问题时网格处理的效率,而后者保证了网格间边界附近流场求解精度。非定常 Euler 方程的求解采用有限体积法,通量计算采用 Osher 格式,时间积分采用双时间步长推进。为验证本文提出的方法,分别对定常 M6 机翼绕流和机翼下外挂物投过程的非定常绕流进行了模拟,结果表明该方法提高了非结构重叠网格在模拟多体间具有大幅相对运动问题时的效率,保证了网格边界处的精度,具有较高的工程应用价值。

关键词: 计算流体力学; 外挂物投放; 非结构重叠网格; 非定常流动; 欧拉方程

中图分类号: V211.3 **文献标识码:** A

Abstract: A new dynamic unstructured overset grid method is developed. The neighbor-to-neighbor search algorithm based on advancing front is developed to enhance the searching efficiency. The redefinition of inter-grid boundary satisfies high order spatial accuracy. Unsteady Euler equations are solved on unstructured overset grid by an explicit dual time-stepping, finite volume, upwind method. Numerical results show that the unstructured overset grid method can more conveniently simulate the problems of the unsteady or/and complex multi-body in relative motion.

Key words: CFD; store separation; unstructured overset grid; unsteady flow; Euler equation

在航空工程中,存在许多具有多体相对运动的复杂非定常流场,例如飞行器外挂物投放、人椅系统与飞机的分离、子母弹分离等等。过去,为弄清此类问题中的各个物体的运动行为,常常不得不借助于风洞试验甚至飞行试验。实验不但费用高,而且周期长,而飞行试验则存在相当大的危险性。近年来,随着计算流体力学的不断发展以及计算机硬件的突飞猛进,采用数值方法模拟此类问题已成为可能。

目前,计算流体力学中用于处理复杂几何外形问题的常用网格技术有重叠网格技术和非结构网格技术。由 Steger 等提出的重叠网格技术,把流场适当地划分为多个具有重叠部分的区域,各个区域分别生成独立的网格并在其上求解,在重叠区上通过网格间插值进行区域间信息交换。该技术在解决非定常问题时非常有效,即不需网格

再生。但是对复杂几何外形问题,完成重叠网格系统的建立是件艰巨的任务。例如一个包围整机的重叠网格的生成常常需要熟练的专业网格生成人员数周甚至数月的时间,因而限制了结构重叠网格的应用。而非结构网格在处理复杂外形问题上具有很大的优势,而且其自适应能力使得计算量大大下降。但非结构网格在处理多体间具有大幅相对运动的问题时需要网格进行局部调整,甚至再生,这给非定常模拟带来了极大的不便。如果采用单一上述网格技术,在模拟具有多体间相对运动的复杂外形流动问题时,要么网格生成困难,要么不能处理大幅相对运动。如果能结合结构重叠网格和非结构网格的特点,使具有相对运动的物体周围分别单独生成非结构网格,然后确定网格间的插值关系来完成网格间的信息交换,则这样所定义的非结构重叠网格的每块网格不但容易生成,而且可以处理大幅相对运动的问题。这种网格技术最先于 1999 年由 Nakahashi

收稿日期:2005-10-08; 修订日期:2006-05-15

基金项目:航空科学基金(00A52010-012)

通讯作者:伍贻兆, E-mail: wuzao@nuaa.edu.cn

等^[1]提出,后来在文献[2-4]等中得到推广应用。本课题组对非结构重叠网格技术也进行了一系列的研究,为使其能在实际工程中得到应用,又对三维动态非结构重叠网格技术进行了研究。

本文提出了基于阵面推进的节点宿主单元搜索算法,并给出适合高阶离散格式的插值关系确定方法,不但提高了网格间插值关系确定的效率,而且也提高了重叠区的计算精度。非定常 Euler 方程的求解采用 Osher 格式的有限体积法,时间上采用双时间步长推进。为验证本方法的有效性和合理性,分别对定常 M6 机翼绕流和三维机翼外挂物投放的非定常过程进行了模拟,并与实验数据进行了对比。结果表明本文提出的算法使得非结构重叠网格在处理复杂外形和多体间具有大幅相对运动问题时效率大大提高,并且保证了网格间边界处的精度,具有较高的工程应用价值。

1 非定常控制方程及求解

流体控制方程采用三维非定常 Euler 方程,它的积分形式可以写作

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{W} d\Omega + \oint \left(\mathbf{E} dS_x + \mathbf{F} dS_y + \mathbf{G} dS_z \right) = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho \bar{u} \\ \rho u \bar{u} + p \\ \rho v \bar{u} \\ \rho w \bar{u} \\ \rho e \bar{u} + p u \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho \bar{v} \\ \rho u \bar{v} \\ \rho v \bar{v} + p \\ \rho w \bar{v} \\ \rho e \bar{v} + p v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho \bar{w} \\ \rho u \bar{w} \\ \rho v \bar{w} \\ \rho w \bar{w} + p \\ \rho e \bar{w} + p w \end{bmatrix}$$

式中: ρ 为密度; p 为压强; e 为总能; u, v 和 w 分别表示流体在 x, y 和 z 在方向上的速度分量; $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) = (u - u_b, v - v_b, w - w_b)$ 为网格与流体的相对速度, u_b, v_b 和 w_b 分别为网格在 x, y 和 z 方向的速度分量。

对式(1)采用有限体积法进行空间离散后,可得

$$\frac{d\mathbf{W}}{dt} + R(\mathbf{W}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

式中: R 为残值,是控制体边界上的通量之和,本文采用 Osher 格式来计算控制体边界上的通量。对式(2)的时间离散采用二阶精度隐格式

$$\frac{3\mathbf{W}^{(n+1)} - 4\mathbf{W}^{(n)} + \mathbf{W}^{(n-1)}}{2\Delta t} + R(\mathbf{W}^{(n+1)}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

式中: Δt 为全局物理时间步长。式(3)还可以重新改写为

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \tau} + R^*(\mathbf{W}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中:

$$R^*(\mathbf{W}) = (3/2\Delta t)\mathbf{W} + R(\mathbf{W}) - (2/\Delta t)\mathbf{W}^{(n)} + (1/2\Delta t)\mathbf{W}^{(n-1)} \quad (5)$$

式中: τ 为伪时间; \mathbf{W} 为 $\mathbf{W}^{(n+1)}$ 的近似。这样,求式(3)的每一物理时间步的非定常解就等价于求式(4)的定常解。式(4)的定常解可以通过伪时间推进达到稳定时(即 $\partial \mathbf{W} / \partial \tau = \mathbf{0}$)得到。本文中伪时间推进采用四步 Runge-Kutta 格式,为加速收敛采用伪当地时间步长。这种双时间步长方法最早是由 Jameson^[5]提出的。

2 动态非结构重叠网格

与传统的结构重叠网格一样,在非结构重叠网格上完成流场的计算需要在子网格间进行信息通信。因此,在流场计算之前需要完成网格间信息通信的准备工作,即确定网格间插值关系。在非结构重叠网格技术中,网格间的插值关系的确定是在网格间边界定义过程中完成的。因此,本部分首先以 2D 情况为例给出网格间边界的定义方法,然后给出高效的宿主单元搜索算法,最后给出适合于高阶离散精度的插值关系确定方法。

2.1 网格间边界定义

在网格间边界定义中,把网格节点分为活动节点和非活动节点,活动节点参加流场计算,而非活动节点在计算中挖去。分类的准则参数为节点到物面的距离。

下面给出网格间边界定义的算法:

(1) 循环网格;

(2) 循环当前子网格的网格节点,搜索各个节点的宿主单元,比较宿主单元和节点的物面距,对节点进行归类;

(3) 循环当前子网格的网格单元,根据网格单元中节点的类别对单元分类,如果单元中所有节点都为活动节点则该单元为活动单元,如果全部为非活动节点则该单元为非活动单元,否则为网格间边界单元;

(4) 网格间边界单元中的节点定义为网格间边界节点,这些节点在流场计算中负责网格间信

息传递。

由上述算法可以看出,网格间的插值关系在网格间边界定义过程中已经给出,即给出了网格间边界节点,并且同时知道其宿主单元。如图1所示,(a)和(b)为绕各个物体的初始网格,(c)和(d)分别为网格间边界定义前后的网格。

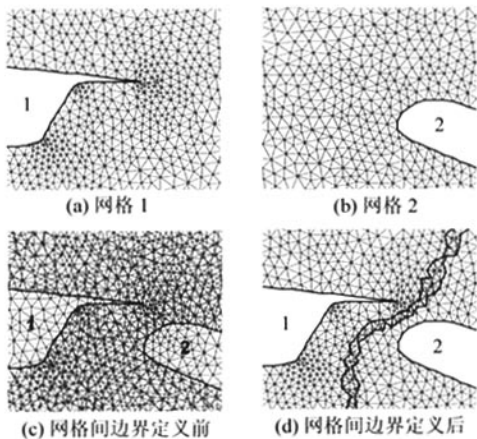


图1 网格间边界定义

Fig.1 Definition of inter-grid boundary

2.2 搜索方法

采用非结构重叠网格在模拟多体间具有相对运动的非定常问题时,每一时间步都需要对网格系统进行网格间边界定义,而在网格间边界定义过程中,每块网格的网格节点都需要得到其宿主单元,其搜索运算量是相当大的,如果没有高效的搜索算法,花费在网格处理上的计算时间就会与流场求解时间相当,甚至更多,这就不能体现非结构重叠网格技术的优越性,并且没有实用价值。为此,必须构造高效的搜索算法。在非结构网格中,相邻单元搜索算法(neighbor to neighbor algorithm)在网格单元搜索时,搜索路径无论在二维还是在三维情况下都是一维的,因此其效率较高。但是,其高效的前提是知道搜索的出发单元,为此,本文提出基于阵面推进的相邻单元搜索算法。本节中以二维图示为例,首先给出相邻单元搜索算法,然后在此基础上给出基于阵面的相邻单元搜索算法。

如图2,点 I 为某块网格的网格节点,已知其坐标,现采用相邻单元搜索算法在图示网格中搜索该节点所在网格单元,即宿主单元,其算法为:

(1) 初始化搜索的出发单元;

(2) 判断节点 I 是否在该单元,若在,则该单元为 I 的宿主单元,否则找出距节点 I 最近的邻居单元,以该邻居单元作为新的出发单元继续判断。

由图2可知,若出发单元选择A,则搜索沿着

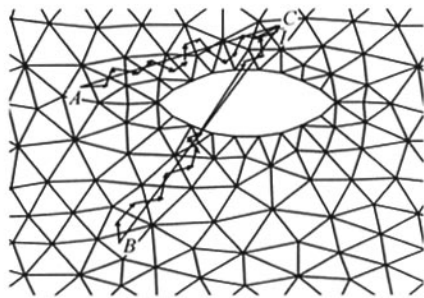


图2 相邻单元搜索算法

Fig.2 Neighbour-to-neighbour search algorithm

一维路径进行,即使三维情况下,该搜索算法也是沿一维搜索路径进行搜索。但是,若搜索碰到物面,如图2中路径BC,由于搜索路径上物面网格单元没有相邻单元,搜索将失败,此时要么选取其他搜索路径,要么做特殊处理。本文通过判断出发单元形心和节点连线与所有物面单元相交情况以及交点个数的奇偶性来进行特殊处理,该方法不但效率高,而且鲁棒性强。

数值研究表明,相邻单元搜索算法的出发单元的选取是影响搜索效率的最大因素。为此,本文提出了基于阵面推进技术的搜索出发单元的选取方法。下面结合二维图示给出该算法。如图3中网格1(虚线)和网格2(实线),已知网格中单元间以及节点间的相邻关系,现在在网格2中搜索网格1中各个节点的宿主单元,则基于阵面推进的相邻单元搜索算法为:

(1) 确定网格1中任意一个节点的宿主单元,对该节点做标记,并把该节点形成一个链表,作为阵面链表;

(2) 如果阵面链表不空,把链表头节点 i 取出;

(3) 循环节点 i 的邻居节点,若邻居节点 j_n 没有做标记,搜索其宿主单元,搜索的出发单元设为节点 i 的宿主单元,搜索到其宿主单元后,对节点 j_n 做标记,并把其入阵面链表;

(4) 删除阵面链表中节点 i ,回到(2)。

如图3所示,节点 i 的宿主单元为ABC,其邻居节点为 j_1 到 j_7 ,在用相邻单元法搜索节点 j_1 到 j_7 的宿主单元时,初始出发单元取ABC,容易看出,节点 j_1 的宿主单元为ABC,其搜索判断一次即可得到, j_2, j_3, j_4, j_5, j_6 和 j_7 宿主单元都为ABC的邻居单元,其搜索仅需2次判断。基于阵面推进的出发单元取法使得网格节点宿主单元的搜索以阵面的形式进行,可以有效地缩短搜索路径,提高搜索效率。

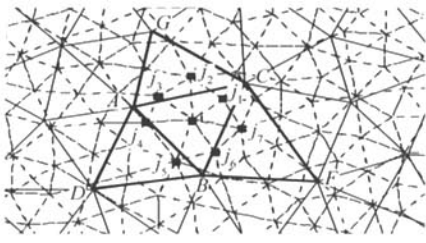


图 3 阵面推进搜索算法

Fig. 3 Advancing front search algorithm

数值实验表明,相邻单元搜索算法与上述阵面推进算法相结合的搜索算法在网格节点宿主单元的搜索中的效率是非常高的,完成 2 套各 150 多万的网格间的宿主单元搜索时间不超过 120 s,这与流场计算时间相比可以忽略不计。

2.3 网格间信息通信

如图 1(d)所示,为网格间边界定义后得到的计算网格。在网格间边界定义过程中已经得到网格间边界节点的宿主单元,在流场计算过程中边界点的流动参数值从其宿主单元中插值得到,插值可以采用 Lagrange 等插值公式。

上述网格间边界定义算法得到的网格间插值边界点为一层,在流场求解时,空间离散若采用一阶精度,则可以满足需要。但是若采用二阶或更高阶精度,如果仍采用上述方法定义网格间边界,则流场计算在网格间边界处的计算精度必然下降。下面通过研究一维情况,给出网格间边界再定义算法以解决该问题。

如图 4(a)所示, $i-1, i$ 和 $i+1$ 分别为非活动节点(非计算节点)、网格边界点(插值点)和活动节点(计算节点)。在计算面 $i+1/2$ 上的通量时,如果采用一阶精度,只需要点 $i+1$ 和 i 即可进行计算。但是,如果采用二阶精度,需要对左右变量进行重构,此时左边变量 W_L 用到节点 $i-1$ 和 i 的值,右变量 W_R 用到点 $i+1$ 和 $i+2$ 的值,而节点 $i-1$ 为非活动点,故不能参加计算,此时要么降低此处通量的计算精度,要么重新定义边界。为保证网格间边界处的计算精度,本文对网格间边界进行重新定义,其算法为:①网格边界点定义为第一类网格间边界点;②循环节点,如果该节点为非活动节点,并且与第一类网格间边界点相邻,则定义该节点为第二类网格间边界点;③把第一类和第二类网格间边界点定义为网格间边界点。如图 4 所示,采用上述算法对网格间边界再定义后, $i-1$ 成为边界点,边界插值点变为两层,可以满足二阶计算精度的需要。图 5 为重新网格

间边界定义后的二维非结构重叠网格,与图 1(d)相比重插值边界范围扩大。

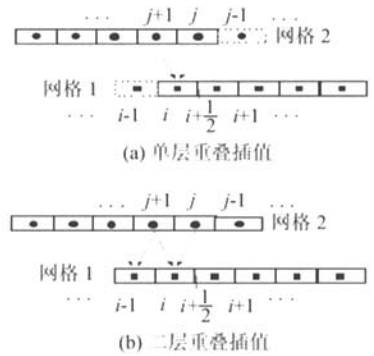


图 4 网格间插值关系示意图

Fig. 4 Interpolation information between grids

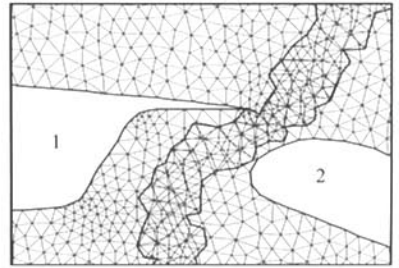


图 5 网格间边界再定义后的计算网格

Fig. 5 Overset unstructured grid after the redefinition of inter-grid boundary

3 数值实验及结果

本文进行了 2 个数值实验,首先为验证程序的有效性,计算了绕 M6 机翼的流场;然后,为说明非结构重叠网格在处理复杂外形的非定常多体运动问题时的优越性,对三维机翼下外挂物投放过程进行了模拟。

3.1 M6 机翼流场计算

本算例中,非结构重叠网格系统由围绕机翼的网格和长方体区域网格组成,二者皆为四面体网格,网格节点数分别为 99 285 和 270 669。如图 6 所示,为网格间边界定义后的计算网格。计算条件为,来流 $Ma=0.84$,迎角 $\alpha=3.06^\circ$ 。

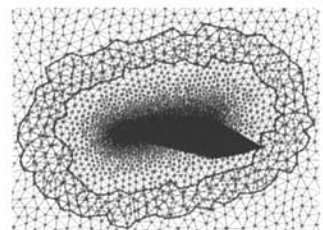


图 6 M6 机翼非结构重叠网格

Fig. 6 Overset unstructured grids for the M6-wing

如图7所示为计算结果的物面压力等值线分布图,可以看到激波捕捉的相当好;图8为机翼展向44%,65%,80%和90%处的物面压强系数分布曲线,并与文献[7]实验结果进行了对比,二者吻合的很好。

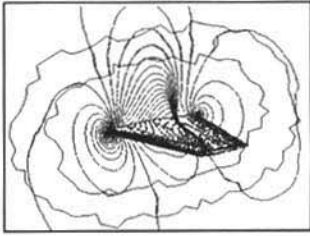


图7 M6机翼表面和对称面上压力等值线

Fig. 7 Pressure contours on the M6-wing and symmetrical plane

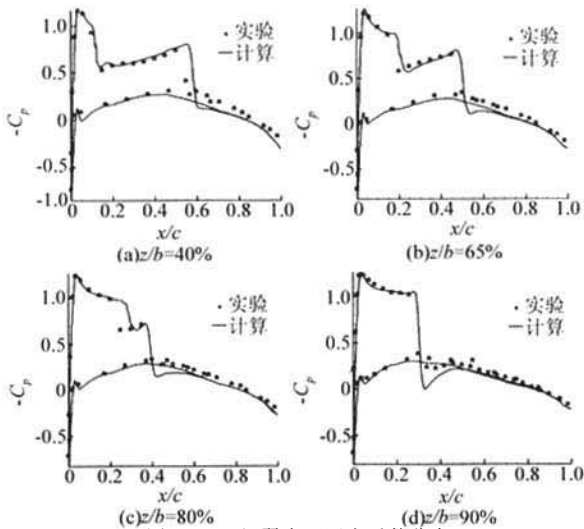


图8 M6机翼表面压力系数分布

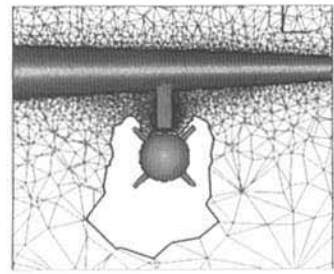
Fig. 8 C_p distributions for the M6-wing

数值实验中发现,如果2套重叠网格在网格边界上的网格单元尺度相差较大,即使利用本文提出的网格间边界再定义方法也会降低网格间插值的精度,其结果会造成计算的收敛性下降。

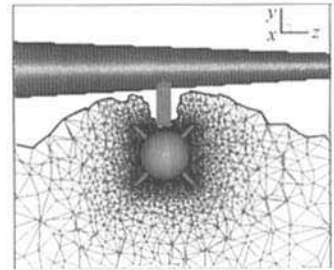
3.2 三维外挂物投放模拟

为验证非结构重叠网格在处理具有多体相对运动非定常问题时的能力,本文模拟了三维外挂物投放的非定常过程,并与实验及文献计算结果进行了比较。

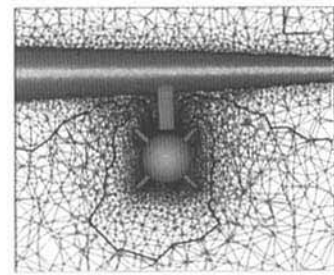
机翼和外加物的几何形状及其他参数参考文献[8]。本文采用的计算网格系统由绕机翼及挂架的网格和围绕外加物的网格组成,网格数分别为388 993和212 406,如图9为网格间边界定义后的网格。计算条件为,来流 $Ma = 0.95$,迎角 $\alpha = 0^\circ$,模拟高度为8 km。



(a) 绕机翼网格



(b) 绕外挂物网格



(c) 非结构重叠网格

图9 网格间边界定义后计算网格

Fig. 9 Overset unstructured grids for store separation

模拟中,外挂物的初始速度和转动角速度都为0。为使外挂物顺利投放而不撞击到机翼,需要给外挂物加以弹射力,本文计算中的弹射力的大小、作用位置及作用距离参考文献[8]。

如图10为初始位置处机翼和外加物的表面压强分布云图,可以看出,激波捕捉的很好。图11给出了外挂物投放过程中运动参数的计算结果和实验结果,图11(a)为外挂物质心的运动轨迹图,计算结果与实验值吻合得相当好;图11(b)和图11(c)为外挂物的速度和转动角速度随时间的变化曲线图,与实验结果相比, x 和 y 向速度分布,俯仰角速度和侧滑角速度分布都吻合得较好,而展向速度和滚转角速度相差较大,这主要是由于计算中弹射力的模型与实验不同造成的,实验中弹射力固定在惯性坐标系中,而在本文计算中,弹射力被固定在与外挂物相连的体坐标系中,故



(a) 0 s 时刻

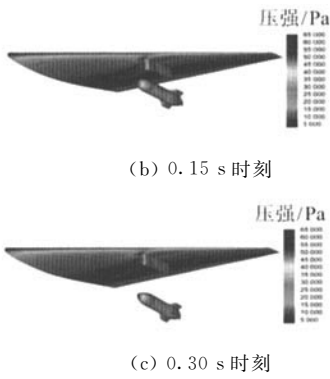
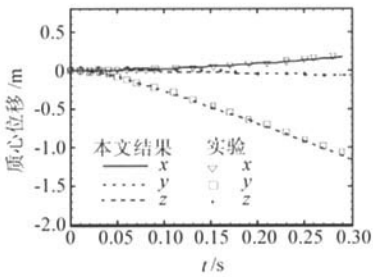
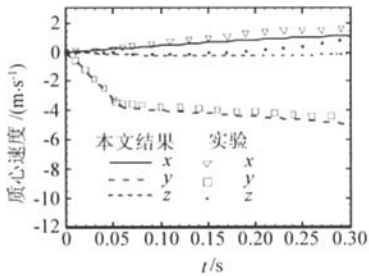


图 10 几个时刻下外挂物位置及物面压强分布云图

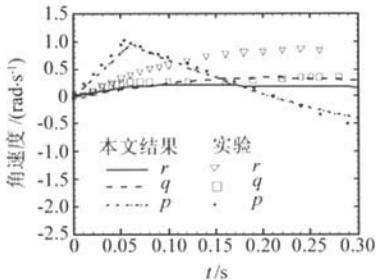
Fig.10 Store positions and pressure contours on the wing/store



(a) 外挂物质心位移



(b) 外挂物速度



(c) 外挂物角速度

图 11 外挂物运动参数随时间变化曲线

Fig.11 Moving parameters for store versus time

造成了二者结果的差异。

4 结 论

非结构重叠网格结合非结构网格和结构重叠

网格的优点,适合于模拟复杂外形以及具有多体相对运动的问题。本文通过构造高效的搜索算法和适合于高阶空间离散格式的网络间插值方法,使得在利用非结构重叠网格模拟多体间具有大幅非定常问题时计算效率大大提高,并且保证了网格间边界附近的计算精度,数值实验说明非结构重叠网格具有较高的工程实用价值。

参 考 文 献

[1] Kazuhiro N, Gumiya T. An intergrid boundary definition method for overset unstructured grid approach[R]. AIAA 99-3304,1999.

[2] Hong L, Dmitri S, Joseph D. An overlapping unstructured grid method for viscous flows [R]. AIAA 2001-2603, 2001.

[3] Fumiya T, Yasushi I. Extensions of overset unstructured grids to multiple bodies in contact [R]. AIAA 2002-2809, 2002.

[4] Fumiya T, Yasushi I. Overset unstructured grids method for viscous flow computations[R]. AIAA 2003-3405,2003.

[5] Jameson A. Time-dependent calculations using multigrid with applications to unsteady flows past airfoils and wings [R]. AIAA 91-1596,1991.

[6] Rainald L. Robust, Vectorized search algorithms for interpolation on unstructured grids [J]. Journal of Computational Physics,1995,118:380-387.

[7] Schmitt V, Charpin F. Pressure distributions on the ONE-RA M6-wing at transonic Mach numbers[R]. AGARDAR-138,1979.

[8] Hall L H, Parthasarathy V. Validation of an automated chimera/6-DOF methodology for multiple moving body problems[R]. AIAA 98-0767,1998.

作者简介:



田书玲(1979—) 男,博士研究生。主要研究方向:计算流体力学数值模拟。电话:025-84892735,E-mail:shulingtian@126.com

伍贻兆(1945—) 男(回族),博士,教授,博士生导师。主要研究方向:计算空气动力学、跨声速空气动力学以及高超声速空气动力学。电话:025-84892894。

夏健(1970—) 男,博士,副教授。主要研究方向:计算流体力学和高超声速空气动力学。电话:025-84891023。

(责任编辑:刘振国)