

应用动网格技术计算着陆过程中 缓冲发动机喷流流场

赵春梅, 祝成民

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 利用 Fluent 软件对着陆过程中缓冲发动机的喷流流场进行数值计算, 发动机与地面相对位置的不断变化使计算域形状不断改变。为了保证计算的正确性, 必须采用动网格技术。介绍了实现移动网格的基本方法, 并结合使用网格弹性平滑移动和网格重构方法实现了着陆过程中缓冲发动机喷流流场的非定常数值计算; 得到了随发动机着陆产生的喷流流场的压强场与速度场。与稳态计算进行比较, 结果表明, 所采用的动网格技术适用于发动机运动过程中喷流流场的计算。

关键词: 缓冲发动机; 动网格技术; 数值计算

中图分类号: V430-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 01-0028-06

Calculation of jet stream flow field of reverse jet engine during landing with dynamic mesh technology

ZHAO Chun-mei, ZHU Cheng-min

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flow field of a reverse jet engine during landing is numerically calculated with Fluent software. The shape of the computational domain is changed with the relative position of ground and engine. In order to assure the accuracy of calculation, the dynamic mesh technology must be used. The basic methods to realize the mobile grid are described in this paper. The unsteady flow field numerical calculation during the engine landing is achieved by using the methods of grid spring-based smoothing motion and region face remeshing. The static pressure field and velocity field of the jet flow field generated the engine landing. In comparison with the steady calculation of flow field, the results show that the dynamic mesh is applicable for the calculation of jet flow field during the movement of reverse jet engine. The result is significant for the analysis of stirred dust pollution caused by the engine exhaust during landing.

Keywords: reverse jet engine; dynamic mesh technology; numerical calculation

收稿日期: 2010-05-13; 修回日期: 2010-12-30

作者简介: 航空科学基金项目(20100151)

作者简介: 赵春梅 (1983—), 女, 硕士研究生, 研究领域为火箭发动机工作过程数值仿真

0 引言

火箭发动机反向喷气是一种常见的着陆缓冲技术, 可用于返回式卫星、月球及行星探测着陆器等装置的软着陆过程。准确计算着陆过程中的喷流流场对着陆缓冲装置的设计有重要的意义^[1,2]。由于缓冲发动机需要在接近地面(对于月球或其他行星为月面或行星表面, 以下均称为地面)时工作, 地面对发动机喷流流场有不可忽视的作用。随着飞行器的着陆, 地面与缓冲火箭发动机的相对位置不断变化, 使喷流流场成为非定常流场。这一因素给分析计算带来了一定困难。

采用计算流体力学方法对缓冲发动机的喷流流场进行数值计算^[3,4], 考虑地面与发动机相对位置变化对喷流流场造成的影响, 本文使用动网格技术实现了对整个着陆过程中缓冲发动机非定常喷流流场的数值计算, 得到了缓冲发动机在着陆过程中喷流流场实时变化的压强场和速度场, 并分析了地面处压强随着陆时间的变化曲线。

1 动网格生成技术

目前, 常用的基于有限体积法的动态网格划分方法主要有三种: 弹性平滑移动法、动态层法和局部网格重构法^[6]。弹性平滑移动法是通过调整已知移动边界节点位移的控制容积的内部节点来实现网格的动态变化。该方法只调整网格节点的位置, 不改变网格的连接方式, 适用于结构化网格和非结构化网格。这种网格移动方法的过程可以表达为以下的迭代方程

$$\Delta x_i^{n+1} = \frac{\sum_j^n k_{ij} \Delta x_j^n}{\sum_j^n k_{ij}} \quad (1)$$

式中: Δx_i 是节点 i 的位移; n_i 是与节点 i 相邻的节点的数量; k_{ij} 是节点和与之相邻的节点之间的弹性常量系数, 这里弹性系数可以定义为

$$k_{ij} = \frac{1}{\sqrt{|x_i - x_j|}} \quad (2)$$

由于边界的位移是已知的, 方程通过 Jacobi 矩阵对流域内部所有节点进行扫描求解。在求解过程中, 更新后的节点位置可以由式 (3) 表示

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta x_i^{n+1}, \text{ converged} \quad (3)$$

图 1 为圆柱体的一端运动, 其网格经过动态弹性变形前后对比图。

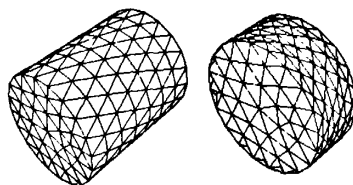


图 1 网格弹性平滑移动前后对比图

Fig. 1 Comparison of interior nodes before and after elasticity smoothing motion

动态层方法是基于弹性平滑移动方法之上, 根据网格的运动情况添加或删除网格层。这种方法的优点在于生成的网格比较均匀, 质量较高。

局部网格重构法可在一定程度上避免弹性平滑移动方法造成的局部三角形网格和四面体网格在被拉伸或压缩时产生网格质量恶化或网格形状退化的现象。应用局部重构方法时需定义网格的最大尺寸和最小尺寸, 以及容许网格偏斜的最大倾斜度。凡是大于最大尺寸、小于最小尺寸或超过定义的倾斜度网格都要重新划分。图 2 右侧两图为圆柱下边界进行局部网格重构前后对比图。

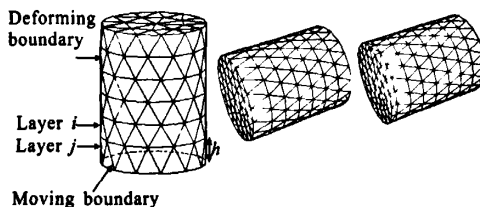


图 2 圆柱体局部单元重构前后对比图

Fig. 2 Comparison of partial elements of cylinder before and after reconstruction

上述三种移动网格方法各有优缺点, 结合本文的实际情况, 采用网格弹性平滑移动法和局部网格重构方法实现动态边界网格的更新和移动。

针对网格点运动后，部分网格会出现较大变形的问题，以网格畸变度作为标准，使用网格自适应技术校正网格，以保证计算的精度。

2 着陆过程中缓冲发动机喷流流场的数值模拟

2.1 动网格的控制方程

在任意具有运动边界的控制体内，守恒型控制方程的积分式通用格式可表示为^[7]

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (u - u_s) dA = \int_{\partial V} (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_V S dV \tag{4}$$

式中： ϕ 表示流场通用变量，可以表示 u 、 v 、 w 等求解变量； ρ 为流体密度； Γ 是广义扩散系数； S 是广义源项； V 为任意控制体积； u 为流体流动的速度矢量； u_s 为移动网格的移动速度； ∂V 用于代表控制体积的边界。

式 (4) 中非稳态项采用一阶向后差分离散

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi V)^{n+1} - (\rho \phi V)^n}{\Delta t} \tag{5}$$

第 $(n+1)$ 时刻的值 V^{n+1} 为： $V^{n+1} = V^n + (dV/dt) \Delta t$ ， dV/dt 是控制容积的时间导数。同时满足网格守恒定律， dV/dt 由下式计算

$$\frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} u_s \cdot dA = \sum_j u_{sj} \cdot A_j \tag{6}$$

式中： n_r 是控制容积的表面总数， A_j 是其中第 j 个面矢量，每个控制容积上的点乘 $u_{sj} \cdot A_j$ 可由下式算出： $u_{sj} \cdot A_j = \delta V_j / \Delta t$ ，其中 δV_j 是控制容积的第 j 个表面在 Δt 时间内扫过的体积。

2.2 计算区域网格划分和动态网格技术的应用

采用 Fluent 软件对发动机喷流流场进行数值计算，为了减少数值模拟的计算量，先对喷管内流场进行数值计算，然后以喷管出口参数为喷管外喷流流场的计算入口边界条件。采用结构化网格对喷管内进行划分，根据边界层原理，喷管靠近壁面部分气体流动变化较为剧烈，而靠近对称轴部分，气体流动变化较为平缓，为了保证数值

模拟的精度，对靠近壁面处进行等比加密处理，喷管内部网格如图 3 所示。由于三角形网格在处理边界移动问题时利于计算域中网格的重构，因此本文采用三角形网格划分喷管外部计算域，共计 165564 个网格单元，计算域的边界条件如图 4 所示。本文图中 x 表示水平距离， y 表示垂直距离。采用以地面相对发动机喷管运动的方法实现发动机下降过程的流场计算，从而使数值计算过程更加稳定。

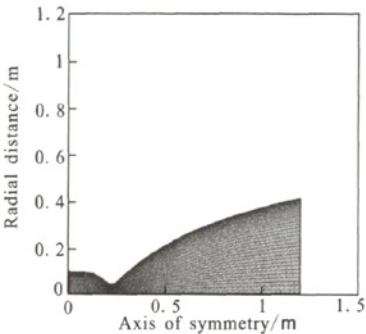


图 3 喷管网格

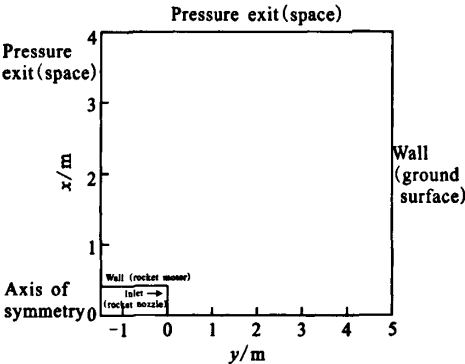


图 4 计算域边界条件

Fig. 4 Boundary condition of computational domain

通过编程控制地面网格点的运动，使其相对发动机位置匀速上升。计算域的网格更新则采用网格弹性平滑移动法和局部网格重构法。下图 5 是使用动网格技术计算地面匀速向上运动 0.1 米过程的网格变化，地面网格局部放大如图 5 (b) 所示，可见网格更新质量良好，没有出现较大变形和畸变的网格。

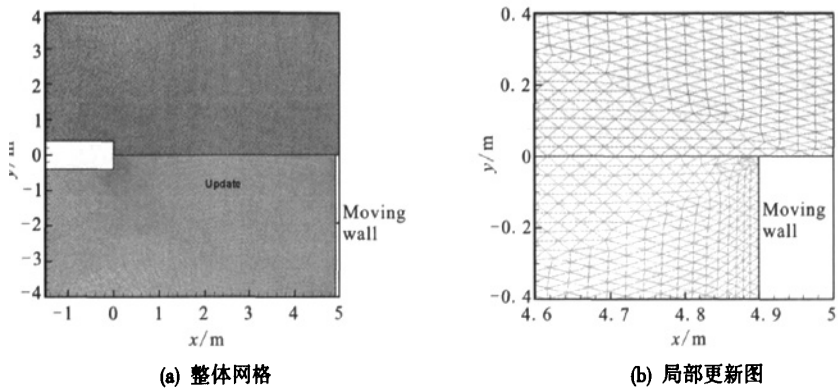


图 5 网格更新前后对比图
Fig. 5 Comparison before and after grid update

2.3 数值模拟及结果分析

模拟中使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 采用对分裂迎风格式 (a dvection upwind splitting method, AUSM) 求解方程^[8], 计算的具体过程见文献^[9-10]。

2.3.1 喷管内流场

喷管入口为压力入口边界条件, 出口为压力出口边界条件, 采用二维轴对称模型进行计算, 图 6 至图 8 分别为喷管内静压流场分布图、马赫数分布图和静温分布图。

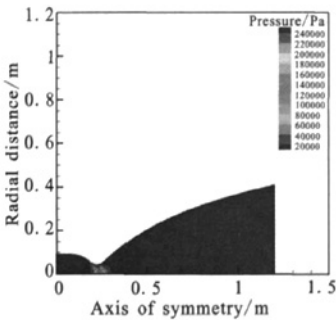


图 6 静压云图
Fig. 6 Contour of static pressure

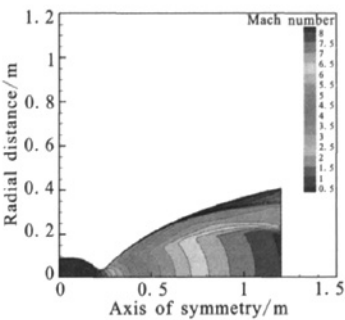


图 7 马赫数分布云图
Fig. 7 Contour of Mach number distribution

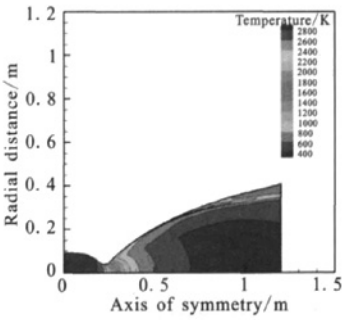


图 8 静温云图
Fig. 8 Contour of static temperature

2.3.2 喷管外流场分析

将计算得到的喷管内流场在喷管出口截面处的轴向速度、径向速度、总温、总压及静压值保存, 以此作为喷管外流场计算的入口条件。利用上述动网格技术对缓冲发动机距离地面 5 m, 计算宽度为 4 m 的二维轴对称喷流场进行数值模拟。稳态计算缓冲发动机初始位置的流场压强云图如图 9 所示, 此后缓冲发动机开始以 3 m/s 的速度匀速下降, 下降 0.5 s 后所得流场的速度分布与初始位置速度场对比图如图 10 所示。

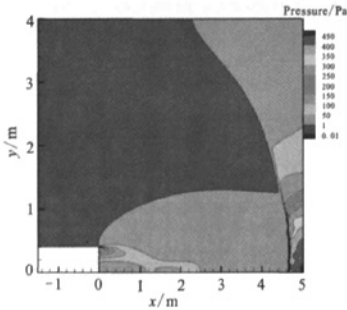


图 9 发动机距离地面 5 m 处压强场
Fig.9 Static pressure field of engine at 5 m above ground

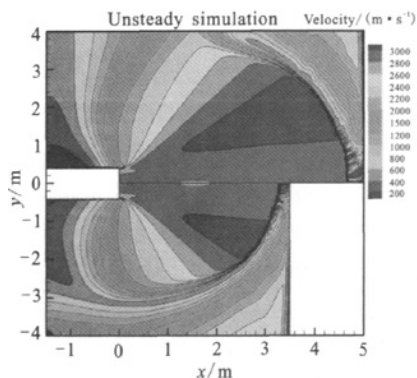


图 10 地面匀速运动 0.5 s 与初始位置速度场对比图

Fig. 10 Comparison of velocity contour after 0.5 s ground uniform motion with steady position

环境压强为 0.01 Pa, 从图 6 可以看出喷管出口压力在 0.02 MPa 左右, 燃气在喷管内处于极度膨胀不足的工作状态, 所以在喷流场速度猛烈膨胀至 3000 m/s, 这是符合实际情况的。这时的喷流场处于高温高速的状态, 对地面的侵蚀作用是不容忽视, 在探月等空间探测活动中, 由于缓冲发动机喷流激起的月壤颗粒对探测器的影响是不容忽视, 所以分析从 5 m 处到缓冲发动机降落到地面这一过程中喷流流场的实时变化对后续的研究有着重要的意义。对地面以 3 m/s 的速度匀速上升 0.5 s 的过程进行计算, 得到喷流流场的压强等值图与速度等值图, 分别如图 11 和图 13 中上侧图所示。

2.3.3 缓冲发动机距地面 3.5 m 时喷流场分析

本文同时采用稳态的计算方法对缓冲发动机距离地面 3.5 m 处的喷流场进行计算, 并将两种方法计算所得流场进行对比。

图 11 为非稳态计算流场与稳态计算流场所得压强的对比云图, 上侧为采用动网格技术计算所得流场压强分布, 分布情况与稳态计算所得流场基本一致, 但在地面附近的流场相对于稳态计算所得流场变化较大, 这对于分析地面粉尘颗粒在发动机喷流中运动有较大影响, 因此在计算这类动态流场时采用移动网格技术是必要的。图 12 为地面附近压强随发动机着陆 0.5 s 过程的变化曲线, 开始着陆至 0.4 s 期间地面轴线处压强有

所增加, 这种流场实时变化是利用稳态计算方法无法捕捉的。

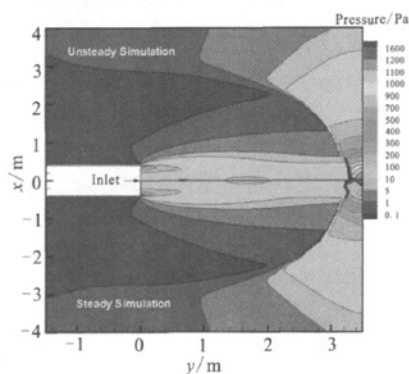


图 11 发动机距离地面 3.5 m 处非稳态与稳态计算喷流流场的压强云图对比

Fig. 11 Pressure contour comparison of jet stream flow field of engine at 3.5 m above the ground by steady and unsteady states calculation

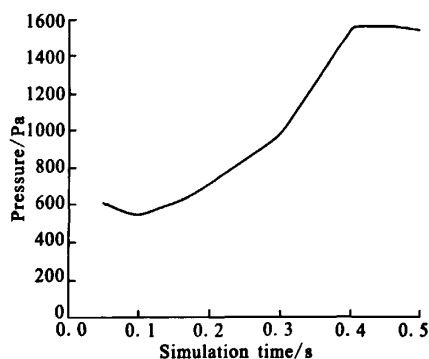


图 12 地面对称轴处压强随时间变化曲线

Fig. 12 Pressure versus time at symmetry axis of ground

缓冲发动机距离地面 3.5 m 时, 采用非稳态与稳态数值计算所得速度场的对比图如图 13 所示, 地面匀速运动 0.5 s 计算所得速度场在上侧压力出口边界处分布较稳态计算所得流场分布趋势平稳, 随着发动机逐渐降落, 地面附近的反射压强逐渐增大, 导致喷流流场的速度有所减小。针对非稳态计算过程比稳态计算时间长的问题, 本文采用了并行计算的方法提高了非稳态的计算效率。

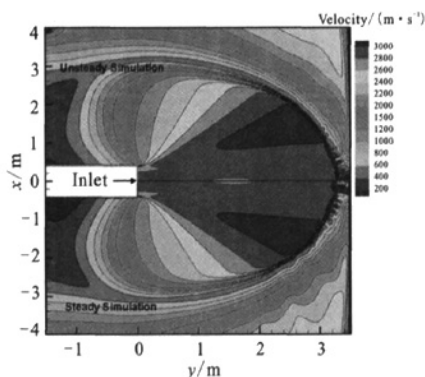


图13 地面距发动机出口3.5 m处非稳态与稳态计算速度场对比图

Fig. 13 Comparison of velocity field of engine outlet at 3.5 m above ground by steady and unsteady state calculation

3 结论

本文利用网格弹性平滑移动和网格重构方法实现了缓冲发动机喷流流场网格的动态更新,计算着陆过程中缓冲发动机的非定常喷流流场。结果表明,这种动网格技术可以有效计算计算区域有较大变化的非定常流场。由于缓冲发动机在空间探测中应用广泛,因此对缓冲发动机在着陆过程中非定常流场的计算可为未来分析缓冲发动机的喷流与探测星体表面颗粒的相互影响提供技术支持,并对研究缓冲发动机激起的地面颗粒在发

动机喷流流场中的运动分布情况及避免空间探测活动中探测器受到地面粉尘颗粒的污染有重要意义。

参考文献:

- [1] 朱汪,杨建中.月球探测器软着陆机构着陆腿模型与仿真分析[J].宇航学报,2008,29(6):1723-1728.
- [2] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005.
- [3] 朱自强.应用计算流体力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [4] 阎超.计算流体力学方法及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [5] 李万平.计算流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [6] 江帆,黄鹏.Fluent高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [7] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 黄江涛,高正红.几种典型迎风格式的分析与比较[J].航空计算技术,2008,38(1):1-5.
- [9] DEMIRDZIC I, PERIC M. Finite volume method for prediction of fluid in arbitrarily shaped domains with moving boundaries[J]. Int. J. Numer. Mech. Fluids. 1990(10): 771-790.
- [10] 杨建明,吴建华.动网格技术数值模拟挑流冲刷过程[J].水动力学研究与进展,2001,16(2):156-158.

(编辑:陈红霞)