

动网格生成技术

史忠军, 徐敏, 陈士槽

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:基于动气动弹性仿真中二维动网格方法的研究,提出了一种三维动网格生成技术,该方法的主要特点是在计算域内利用原有的初始网格进行插值计算来构造新网格。对于流体-结构耦合中每时间步长计算的动网格算法主要考虑网格的稳定性和计算效率。最后,选取了二维、三维中一些有代表性的实例进行了演示,结果表明对于变形量不是很大的情形是令人满意的。

关键词:动气动弹性;动网格;计算流体力学

中图分类号:V224;TJ81 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)01-0061-04

随着计算机设备和计算技术发展,CFD 常常用于各种学科之中,如优化设计、气动弹性、热分析、气动伺服弹性^[1]。对于这些问题在小扰动的条件下采用线性方法可以得到很好的解决,但对复杂流场(振动诱发涡流、跨音速颤振、大控制面的运动)要求使用非线性方法,并需要借助大规模的并行计算平台技术。CFD 在各门学科中应用还包括结构载荷计算、表面运动分析、优化设计的区域变形技术,即动网格生成技术。在气动外形设计和气动弹性优化^[2]中,对飞行器气动弹性性能和飞行品质的评估,必须依据飞行器外形的变化,对网格不断地作相应的调整,如颤振分析中,在每一时间步长结构发生变形,我们需要及时给 CFD 计算提供这一信息,就需要使用动网格来适应运动的物面。因此,我们必须对网格再生成的有效性和效率的问题进行研究。对于动网格的算法,最大的困难在于防止边界网格点重复交错和网格点丢失。一种最简单的方法就是根据新的物面重新生成计算网格,但需要花费大量的时间。可行的办法是借助于初始网格数据,使用插值或迭代方法使网格按到边界的距离比例或按原来的稀疏比例重新分布,这样既快速地生成了网格,又保证了网格能及时地反映了物面地变化。

目前国内外所发展的大多数动网格方法主要有代数法^[3]、迭代法^[4]和解析法^[5]。代数法和解析法花费相对便宜,但仅限于振幅小的运动,对于大位移运动可能导致网格交叉或合并^[6]。迭代法能够处理这样大的运动,但要花费昂贵的计算时间。

随着 CFD 技术和动网格技术的发展,动网格技术必须满足^[1]:稳定性(Robustness);精确性(Accuracy);易用性(Ease of Use);效率性(Efficiency);可并行性(Parallelizable)。

1 动网格生成技术

1.1 二维动网格算法

对于空间的网格点,先考虑二维情形 $P(x_{i,j}, y_{i,j})$, 当内边界的网格点在不同时间步长内发生位移时,将引起它周围网格点的位移,为了插值出其它各点的位移,我们以内边界即 $j=1$ 上的点为参考点,按如下方法设计计算:

设变换前的坐标是 $P(x_{i,j}, y_{i,j})$, 变换后的坐标是 $P'(x'_{i,j}, y'_{i,j})$, 当内边界上的点都发生位移时,比如旋

收稿日期:2001-12-24

基金项目:“十五”武器装备预先研究项目(413130308)

作者简介:史忠军(1976-),男,湖南邵阳人,硕士生,主要从事研究方向为弹性飞行器动力学与控制等研究;

徐敏(1956-),女,江苏人,教授,主要从事飞行动态特性与飞行品质和飞行器飞行动力学与控制等研究;

陈士槽(1920-),男,浙江东阳人,俄罗斯宇航科学院外籍院士,中国工程院院士,主要从事飞行力学及控制等研究。

转或发生形变,则内边界上的点 $P(x_{i,1}, y_{i,1})$ 发生位移的角度利用其相邻的两点来确定,按如下方法求出(见图 1,图中只画出到 $j=3$ 的网格):

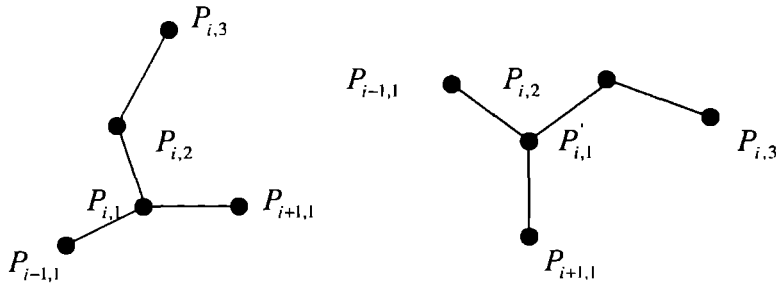


图 1 变换前后的网格点

$$\cos(\theta_{i,1}) = \frac{(x_{i+1,1} - x_{i-1,1})(x'_{i+1,1} - x'_{i-1,1}) + (y_{i+1,1} - y_{i-1,1})(y'_{i+1,1} - y'_{i-1,1})}{\sqrt{(x_{i+1,1} - x_{i-1,1})^2 + (y_{i+1,1} - y_{i-1,1})^2} \sqrt{(x'_{i+1,1} - x'_{i-1,1})^2 + (y'_{i+1,1} - y'_{i-1,1})^2}} \quad (1)$$

$$\sin(\theta_{i,1}) = \frac{(x_{i+1,1} - x_{i-1,1})(y'_{i+1,1} - y'_{i-1,1}) - (y_{i+1,1} - y_{i-1,1})(x'_{i+1,1} - x'_{i-1,1})}{\sqrt{(x_{i+1,1} - x_{i-1,1})^2 + (y_{i+1,1} - y_{i-1,1})^2} \sqrt{(x'_{i+1,1} - x'_{i-1,1})^2 + (y'_{i+1,1} - y'_{i-1,1})^2}} \quad (2)$$

注意在考察 $P(x_{i,1}, y_{i,1})$, 我们把其相邻的两点 $P(x_{i-1,1}, y_{i-1,1})$, $P(x_{i+1,1}, y_{i+1,1})$ 与其组成的三角单元, 对于小单元上所有的网格考虑刚性变形。引入中间变量如下:

$$x_{i,j}^{\text{ref}} = x'_{i,1} + (x_{i,j} - x_{i,1}) \cos(\theta_{i,1}) - (y_{i,j} - y_{i,1}) \sin(\theta_{i,1}) \quad (3)$$

$$y_{i,j}^{\text{ref}} = y'_{i,1} + (x_{i,j} - x_{i,1}) \sin(\theta_{i,1}) + (y_{i,j} - y_{i,1}) \cos(\theta_{i,1}) \quad (4)$$

$$S_{i,j} = \sum_{k=2}^j \sqrt{(x_{i,k} - x_{i,k-1})^2 + (y_{i,k} - y_{i,k-1})^2} \quad (j > 1) \quad (5)$$

$$b_{i,j} = 3 \left(\frac{S_{i,j}}{S_{i,j_{\text{max}}}} \right)^2 - 2 \left(\frac{S_{i,j}}{S_{i,j_{\text{max}}}} \right)^3 \quad (j = 1, S_{i,j} = 0) \quad (6)$$

则新的网格点用如下表达式求出:

$$x'_{i,j} = b_{i,j} x_{i,j} + (1 - b_{i,j}) x_{i,j}^{\text{ref}} \quad (7)$$

$$y'_{i,j} = b_{i,j} y_{i,j} + (1 - b_{i,j}) y_{i,j}^{\text{ref}} \quad (8)$$

显然 $b_{i,j}$ 在内边界 ($j=1$) 为 0, 在外边界 ($j=j_{\text{max}}$) 为 1, 所以控制外边界不变, 而内边界按原样发生变形, 这样通过系数因子 $b_{i,j}$ 对初始网格进行重新调整, 以与新的时间步长内物面变化相适应。

1.2 三维动网格算法

对于三维网格情形, 每一个网格点用标号 $P_{i,j,k}$ 来表示, 其中 $k=1$ 表示物面, $k=k_{\text{max}}$ 表示外边界; 则三维动网格所对应的公式如下:

$$S_{i,j,k} = \sum_{t=2}^k \sqrt{(x_{i,j,t} - x_{i,j,t-1})^2 + (y_{i,j,t} - y_{i,j,t-1})^2 + (z_{i,j,t} - z_{i,j,t-1})^2} \quad (k > 1) \quad (9)$$

$$b_{i,j,k} = 3 \left(\frac{S_{i,j,k}}{S_{i,j,k_{\text{max}}}} \right)^2 - 2 \left(\frac{S_{i,j,k}}{S_{i,j,k_{\text{max}}}} \right)^3 \quad (k = 1, S_{i,j,k}) \quad (10)$$

$$x'_{i,j,k} = b_{i,j,k} x_{i,j,k} + (1 - b_{i,j,k}) x_{i,j,k}^{\text{ref}} \quad (11)$$

$$y'_{i,j,k} = b_{i,j,k} y_{i,j,k} + (1 - b_{i,j,k}) y_{i,j,k}^{\text{ref}} \quad (12)$$

$$z'_{i,j,k} = b_{i,j,k} z_{i,j,k} + (1 - b_{i,j,k}) z_{i,j,k}^{\text{ref}} \quad (13)$$

该方法与文献[7]中的摄动和无限插值法相似, 但我们引入了一个系数因子 $b_{i,j,k}$, 实验表明, 对于三维振幅较小的边界位移的情形, 该插值方法是可行的。其中 $x_{i,j,k}^{\text{ref}}$, $y_{i,j,k}^{\text{ref}}$, $z_{i,j,k}^{\text{ref}}$ 的求解与二维情形相似, 特别是对于简单的旋转变形(绕 z 轴逆时针旋转 θ 角度)可表示为

$$\begin{pmatrix} x_{i,j,k}^{\text{ref}} \\ y_{i,j,k}^{\text{ref}} \\ z_{i,j,k}^{\text{ref}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{i,j,k} \\ y_{i,j,k} \\ z_{i,j,k} \end{pmatrix} \quad (14)$$

2 插值算例

2.1 二维结构动网格算例

选择 NACA0012 翼型作为研究对象,图 2 是该翼型的 O 型结构网格,考虑其在 $\pi/10$ 攻角姿态,图 3 是使用本文方法计算的结果。图 4 是考虑 C 型结构密网格的计算结果,采用了两种不同策略^[8]。一种是保持翼型后缘网格变化光滑,但出口边界网格发生了变化;另一种是保持出口边界网格不变,但翼型后缘处网格发生较大的扭转,得到了本文的计算结果。

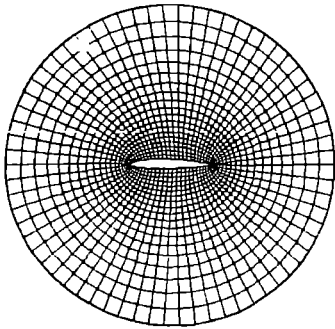


图 2 O 型网格

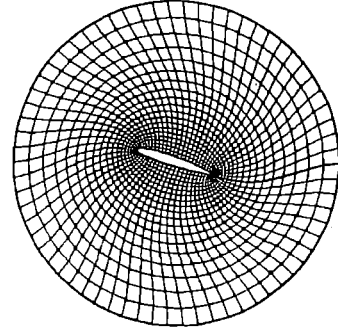


图 3 O 型动网格

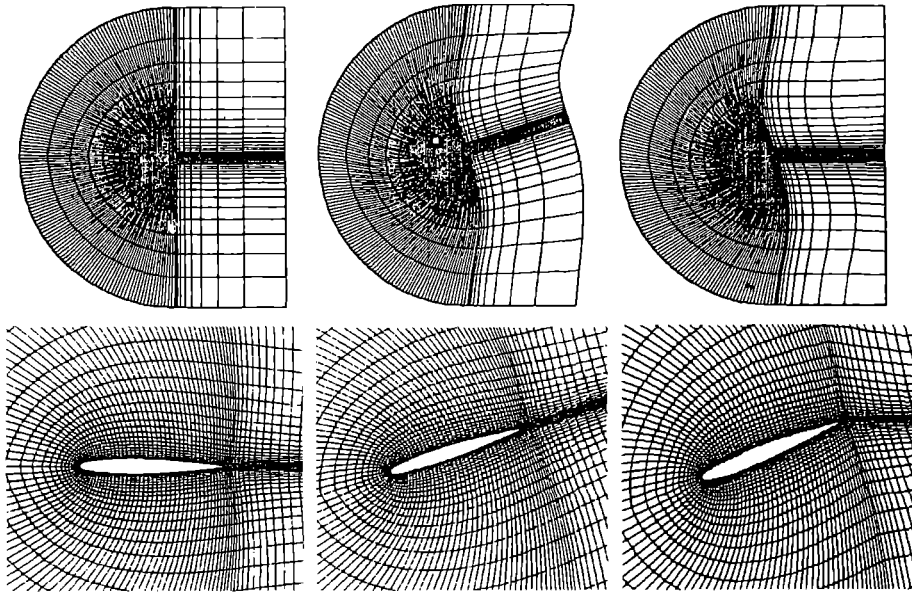


图 4 C 型动网格计算结果比较

2.2 三维结构动网格算例

选择一三维机翼作为研究对象,首先采用椭圆方程法生成机翼的 C 型结构网格(图 5 上),进行气动-结构耦合计算,得到结构变形后的三维机翼,采用动网格技术,重新生成结构网格(图 5 下)。可借助于计算机技术对三维机翼网格动态显示每一时间步长的网格变化,形象生动。

3 小 结

本文从二维动网格方法出发,对二维 O 型、C 型动网格进行了计算,接着运用三维动网格生成技术,对三维机翼动网格进行了计算,主要考虑动网格的稳定性和计算效率,结果表明对于变形量不是很大的情形是令人满意的,网格较好地保留了原来网格地性质(光滑性,正交性等)。今后动网格的主要工作应集中于对于

大变形或扭转运动的多块组合体实行动网格生成技术的研究,并考虑到网格的可并行性,生成高效并适合 NS 求解器的复杂动网格,在此基础上,进行气动 - 结构耦合计算,对每时间步长内的流场信息进行动态仿真。

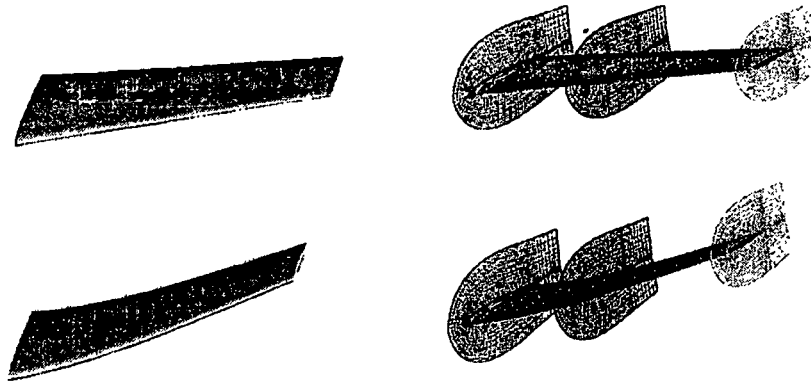


图5 三维机翼形变前后比较

参考文献:

- [1] Mark A P, Eloret C, etc. A Parallel Multiblock Mesh Movement Scheme For Complex Aeroelastic Applications [R]. AIAA - 2001 - 0716.
- [2] Peter M H, Shreekant A. Method For Perturbing Multiblock Patched Grids In Aeroelastic And Design Optimization Applications [R]. AIAA - 97 - 2038.
- [3] Jones W T, Samareh - Abolhassani J. A Grid Generation System for Multi - Disciplinary Design Optimization [R]. AIAA - 95 - 1689 - CP.
- [4] Robinson B A, Batina J T, Yang H T Y. Aeroelastic Analysis of Wings Using the Euler Equations with a Deforming Mesh [J]. Journal of Aircraft, 1991, 28(11): 781 - 788.
- [5] Reuther J, Alonso J, Jrimlinger M J, Jameson A. Aerodynamic Shape Optimization of Supersonic Aircraft Configurations via an Adjoint Formulation on Parallel Computers [R]. AIAA Paper 96 - 4045.
- [6] Wong A, Tsai H, Cai J, etc. Unsteady Flow Calculations With A Multi - Block Moving Mesh Algorithm [R]. AIAA Paper 2000 - 1002.
- [7] Lian Y S, Jonas S, etc. Low Reynolds Number Turbulent Flows Around A Dynamically Shaped Airfoil [R]. AIAA - 2001 - 2723.
- [8] Chansup B, Guru P G. A Parallel Multi - block Moving Grid Method for Aeroelastic Applications on Full Aircraft [R]. AIAA - 98 - 4782.

(编辑:姚树峰)

Analysis of Moving Mesh Generation Technology

SHI Zhong - jun, XU Min, CHEN Shi - lu

(Northwestern Polytechnical University Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Based on the study of the two - dimensional moving meshes in dynamic aeroelastic interaction simulation, a three - dimensional moving grid enrichment approach is developed and illustrated in this paper. The key advantage of this approach is that the meshes interpolated in the computational domain is utilized to remap the flow variables from the old mesh to the new. The robustness and efficiency for coupled structure - fluid time marching computations have been emphasized in mesh deformation algorithm. Examples representing 2D and 3D flow problems are demonstrated, which shows the effectiveness of the approach. The results are satisfactory in the case of small amplitude displacement.

Key words: dynamic aeroelastic; moving mesh; computational fluid dynamics (CFD)