

带旋转修正的弹簧-TFI混合动网格方法

张兵, 韩景龙*

南京航空航天大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要: 网格存在大变形时,传统的超限插值(TFI)动网格方法易于引起网格正交性问题。依据几何关系并考虑其插值特点,提出了一种带旋转修正的 TFI 动网格方法。对结构网格块进行分块,在子块角点间建立弹簧元,并基于弹簧类比法计算角点位移;子网格内部结点位移采用修正后的 TFI 动网格方法进行计算,从而形成具有弹簧-TFI 混合特征的动网格新方法。以典型二维及三维黏性网格为例进行方法的有效性研究。结果表明,在显著大变形情况下,引入旋转修正得到了正交性和光顺性良好的变形网格。另外,该方法的计算效率较传统 TFI 动网格方法有所降低,但相比弹簧方法提高 1 到 2 个量级。

关键词: 动网格; 旋转修正; 弹簧类比法; 超限插值; 计算流体力学

中图分类号: V211.3; V215.3 **文献标识码:** A

主流的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)一般采用有限体积方法进行空间离散,通过求解基于 Euler 描述的 Navier-Stokes 方程实现。基于此,存在动边界的非定常计算中,需要运用动网格技术来实现求解域的变形。良好的动网格能力是开展流固耦合研究的关键因素。目前,寻求一种兼具变形能力强和计算效率高的动网格技术仍然是 CFD 领域的研究热点之一。

借助于网格生成思路,大多数网格生成方法,如代数型^[1]、椭圆型^[2]等,均可应用于动网格过程。其中超限插值(Transfinite Interpolate, TFI)方法^[3-7]是应用较为广泛的一种高效的代数动网格方法,但不适用于大变形情况。弹簧类比法^[8-11]是一种基于有限元思想的动网格方法,其通过在网格结点之间建立弹簧元,并采用迭代法求解结点静力平衡方程实现网格变形,由于需要

迭代求解,其计算量大大增加,这对于黏性网格尤为显著。Delaunay 三角形^[12]方法是一种经典的非结构网格生成方法,文献^[13]和文献^[14]提出一种相似的动网格计算方法,适用于大变形及黏性网格,计算速度可达弹簧方法的 10 倍以上。文献^[15]和文献^[16]采用边界元方法进行动网格计算,将流体网格作为无限弹性体对待并采用有限元方法求解结点位移,以避免网格交错及负体积。由于需要迭代计算,其效率较低。另外,采用弹簧类比法等有限元方法,需要采用非结构数据存储格式,计算过程对内存访问带宽有很高要求,这也是此类方法效率低下的一个重要原因,一般情况下其计算时间比 TFI 方法高 1 到 2 个量级。

不同于已有研究思路,本文对网格变形的几何拓扑关系进行分析,阐述传统 TFI 方法在大变形时网格正交性差的原因,进而通过旋转修正加以改进,提出一种适用于结构网格的动网格新方

收稿日期: 2011-01-04; 退修日期: 2011-02-18; 录用日期: 2011-04-05; 网络出版时间: 2011-04-19 17:03:15

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110419.1703.006.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110419.1703.006

基金项目: 国家自然科学基金(10872089)

* 通讯作者. Tel.: 025-84896484 E-mail: hjlae@nuaa.edu.cn

引用格式: 张兵, 韩景龙. 带旋转修正的弹簧-TFI 混合动网格方法 [J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1815-1823. Zhang Bing, Han Jinglong. Spring-TFI hybrid dynamic mesh method with rotation correction [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1815-1823.

法,即:弹簧-TFI 混合动网格方法,该方法兼具 TFI 动网格方法的高效性和弹簧类比法的适用性。

1 弹簧-TFI 混合方法

动网格的计算目的是将边界位移传递到计算域内部结点,也即已知边界结点位移计算内部结点位移。因此,多块结构网格的动网格计算可分为如下 2 个层次:①网格块之间的运动;②网格块内部结点的位移。对于网格块之间的运动,文献[6]采用弹簧连接不同网格块的角点,通过求解静力平衡方程计算各个角点的位移。对于内部结点,采用 TFI 动网格方法将边界结点位移通过插值函数分布到网格块内部结点。该方法优点在于可以将边界变形传递到整个计算区域,但大变形时仍不能保证网格块内部网格质量。

本文将每个网格块进行分割生成多个子块,在子网格块上运用上述弹簧类比法求解角点位移,如图 1 所示。

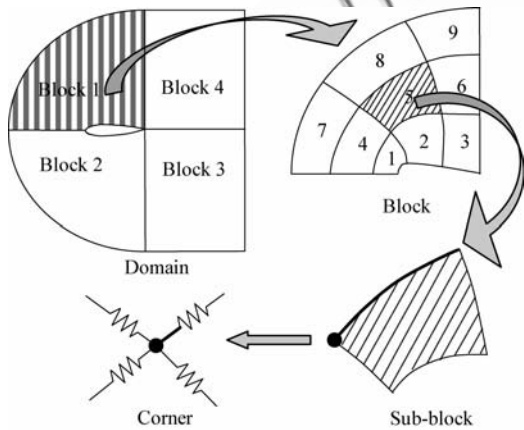


图 1 网格块分割示意图

Fig. 1 Sketch map of mesh block splitting method

对于任意子块角点 i , 其静力平衡方程如下:

$$-\sum_{j=1}^{NE_i} k_{i,j} \Delta \mathbf{x}_i + \sum_{j=1}^{NE_i} (k_{i,j} \Delta \mathbf{x}_j) = 0 \quad (1)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}_i$ 为第 i 角点的位移矢量; $\Delta \mathbf{x}_j$ 为和第 i 角点相连的第 j 个角点的位移矢量; NE_i 为和第 i 角点相连的弹簧元的个数; $k_{i,j}$ 为连接 i, j 角点的弹簧元刚度, 其值通常取角点距离的倒数。

方程式(1)可采用雅克比迭代或 Gauss-Seidel 方法求解。注意: 当子块分割份数等于边界结点数时, 该方法退化为弹簧类比法。分割份数

决定了块内网格变形的均匀性, 子块越多网格变形越光滑, 但计算量越大, 考虑到子块内部采用 TFI 方式计算, 每个方向分割份数在通常可取 2~8 之间。

对于单个网格块(子块)内部的结点位移, 采用 TFI 方法计算, 三维情况下的计算公式如下:

$$\Delta \mathbf{x}_{i,j,k} = \mathbf{U} + \mathbf{V} + \mathbf{W} - \mathbf{UV} - \mathbf{VW} - \mathbf{UW} + \mathbf{UVW} \quad (2)$$

$$\mathbf{U} = (1 - \alpha_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{1,j,k} + \alpha_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j,k} \quad (3)$$

$$\mathbf{V} = (1 - \beta_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i,1,k} + \beta_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i,j_{\max},k} \quad (4)$$

$$\mathbf{W} = (1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i,j,1} + \gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i,j,k_{\max}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{UV} = & (1 - \alpha_{i,j,k})(1 - \beta_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{1,1,k} + \\ & \alpha_{i,j,k}(1 - \beta_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},1,k} + \\ & (1 - \alpha_{i,j,k})\beta_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i,j_{\max},k} + \\ & \alpha_{i,j,k}\beta_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j_{\max},k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{VW} = & (1 - \beta_{i,j,k})(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i,1,1} + \\ & \beta_{i,j,k}(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i,j_{\max},1} + \\ & (1 - \beta_{i,j,k})\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i,1,k_{\max}} + \\ & \beta_{i,j,k}\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i,j_{\max},k_{\max}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{UW} = & (1 - \alpha_{i,j,k})(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{1,j,1} + \\ & \alpha_{i,j,k}(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j,1} + \\ & (1 - \alpha_{i,j,k})\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{1,j,k_{\max}} + \\ & \alpha_{i,j,k}\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j,k_{\max}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{UVW} = & (1 - \alpha_{i,j,k})(1 - \beta_{i,j,k})(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{1,1,1} + \\ & \alpha_{i,j,k}(1 - \beta_{i,j,k})(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},1,1} + \\ & (1 - \alpha_{i,j,k})\beta_{i,j,k}(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{1,j_{\max},1} + \\ & (1 - \alpha_{i,j,k})(1 - \beta_{i,j,k})\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{1,1,k_{\max}} + \\ & \alpha_{i,j,k}\beta_{i,j,k}(1 - \gamma_{i,j,k}) \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j_{\max},1} + \\ & \alpha_{i,j,k}(1 - \beta_{i,j,k})\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},1,k_{\max}} + \\ & (1 - \alpha_{i,j,k})\beta_{i,j,k}\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{1,j_{\max},k_{\max}} + \\ & \alpha_{i,j,k}\beta_{i,j,k}\gamma_{i,j,k} \Delta \mathbf{x}_{i_{\max},j_{\max},k_{\max}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: 下标表示结点编号; α, β 和 γ 为结构网格 3 个方向归一化的弧长坐标。采用如下公式计算:

$$\alpha_{1,j,k} = 0, \alpha_{i,j,k} = \frac{\sum_{n=2}^{i_{\max}} \|\mathbf{x}_{n,j,k} - \mathbf{x}_{n-1,j,k}\|_2}{\sum_{n=2}^{i_{\max}} \|\mathbf{x}_{n,j,k} - \mathbf{x}_{n-1,j,k}\|_2} \quad (10)$$

$$\beta_{i,1,k} = 0, \beta_{i,j,k} = \frac{\sum_{n=2}^{j_{\max}} \|\mathbf{x}_{i,n,k} - \mathbf{x}_{i,n-1,k}\|_2}{\sum_{n=2}^{j_{\max}} \|\mathbf{x}_{i,n,k} - \mathbf{x}_{i,n-1,k}\|_2} \quad (11)$$

$$\gamma_{i,j,1} = 0, \gamma_{i,j,k} = \frac{\sum_{n=2}^k \| \mathbf{x}_{i,j,n} - \mathbf{x}_{i,j,n-1} \|_2}{\sum_{n=2}^{k_{\max}} \| \mathbf{x}_{i,j,n} - \mathbf{x}_{i,j,n-1} \|_2} \quad (12)$$

2 旋转修正

由式(2)可知,TFI 动网格方法在计算结点位移时各个位移分量之间是不相关的,因此不能很好地反映旋转变形。为方便说明,下面给出二维仅考虑 y 方向位移的情况,如图 2 所示。

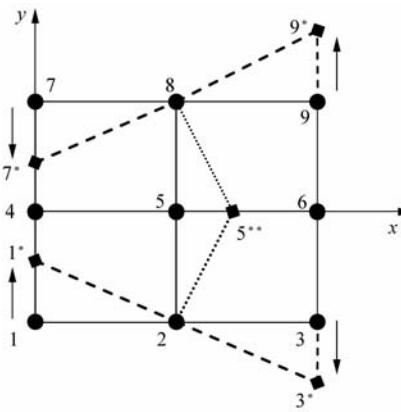


图 2 旋转修正示意图

Fig. 2 Sketch map of rotation correction

图中编号 5 结点为内部结点,其他为边界结点。假设边界结点 1、3、7、9 变形到 1^* 、 3^* 、 7^* 、 9^* 位置,依据 TFI 计算公式,结点 5 在坐标轴 x 方向位移为 0,此时网格在边界处的正交性较差,结点 5 的理想位置应该在 5^{**} 处。从几何关系上可以看出,如果考虑结点 8 和 2 的旋转变形,在 TFI 计算结果的基础上再进行适当的旋转运算,结点 5 可以变形到满足正交性要求的位置上。

2.1 旋转变换分类

和平动位移不同,旋转变形不仅与位移的 3 个分量有关,而且还与旋转中心点有关,即需要已知旋转变换的几何拓扑关系。下面给出旋转变换的几何拓扑结构类型:

- (1) 边绕端点旋转,如图 3(a)所示。
- (2) 面绕角点旋转,如图 3(b)所示。
- (3) 面绕边旋转,如图 3(c)所示。
- (4) 体绕角点旋转,如图 3(d)所示。

(5) 体绕棱旋转,如图 3(e)所示。

(6) 体绕面旋转,如图 3(f)所示。

作为旋转中心的角点、线及面称为旋转依赖对象,通常只有动边界上的点、线及面才作为依赖对象处理,对于子网格块,其内部对接边界也需按依赖对象处理。对于不同变换类型,旋转中心的需要选取不同边界结点。对绕角点旋转的情况,旋转中心直接取该角点;对绕边旋转的情况,例如二维网格块绕 $i=1$ 棱旋转,则内部点 (i,j) 的旋转中心为点 $(1,j)$,三维则依次类推;对绕面旋转的情况,例如网格块绕 $k=k_{\max}$ 边界面旋转,则内部结点 (i,j,k) 的旋转中心为结点 (i,j,k_{\max}) 。上述拓扑结构信息在整个计算过程中只需进行一次。

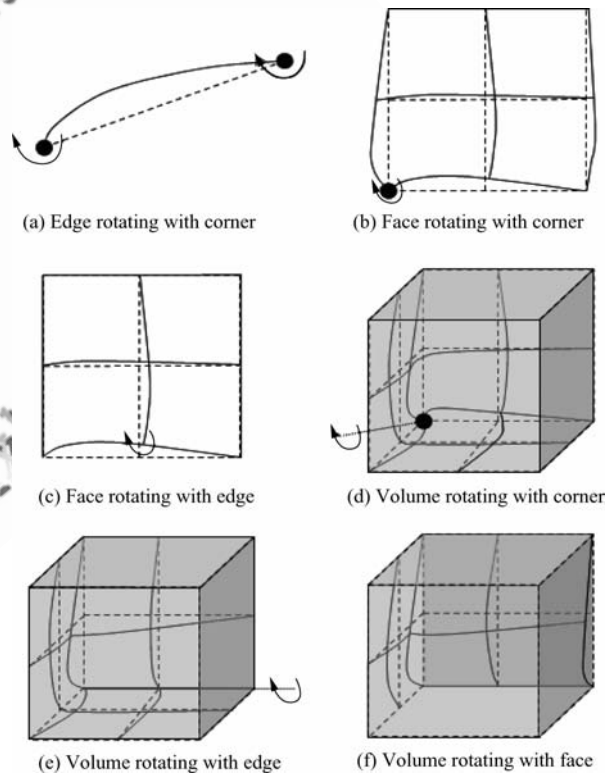


图 3 旋转变换类型

Fig. 3 Rotation correction types

2.2 旋转矢量修正

结点旋转矢量定义为如下形式:

$$\mathbf{R} = \theta [r_x \quad r_y \quad r_z]^T$$

式中: θ 为旋转角度; r_x 、 r_y 和 r_z 为旋转轴单位矢量的 3 个分量。

假设和结点 i 相连的结点的总数为 NE_i , 如图 4 所示为结点 i 和其中的任一结点 j 构成的边的变形示意图, i_2, j_2 为变形后位置。

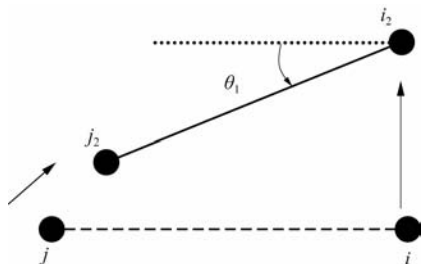


图 4 边界结点的旋转变形

Fig. 4 Rotation transformation of boundary node

已知边界各结点位移, 则结点 i 的旋转矢量计算公式如下:

$$\mathbf{R}_i = \frac{1}{NE_i} \sum_{j=1}^{NE_i} \mathbf{R}_{i,j} \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_{i,j} = \arccos \left[\frac{(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{x}_{j_2} - \mathbf{x}_{i_2})}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_2 \|\mathbf{x}_{j_2} - \mathbf{x}_{i_2}\|_2} \right] \cdot \frac{(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \times (\mathbf{x}_{j_2} - \mathbf{x}_{i_2})}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|_2 \|\mathbf{x}_{j_2} - \mathbf{x}_{i_2}\|_2} \quad (14)$$

在求出所有边界结点的旋转矢量后, 通过 TFI 方式将旋转矢量插值到块内部结点, 参考式 (2)~式(9), 只需将其中的位移矢量替换成旋转矢量即可。注意每个块可能存在多种旋转变换拓扑结构, 此时内部结点旋转位移需要进行叠加。

对于黏性网格, 如果式(2)~式(9)中的系数 α, β 和 γ 直接按照式(10)~式(13)取, 由于远离旋转中心处的结点的系数值较大, 则可能出现网格变形过大的情况, 可以采用如下 Sigmoidal 函数进行修正:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-c_1(x-c_2)}} \quad (15)$$

$$\alpha_{i,j,k}^{\text{fixed}} = S\left(\frac{\alpha_{i,j,k}}{i/i_{\max}}\right) \alpha_{i,j,k} + \left(1 - S\left(\frac{\alpha_{i,j,k}}{i/i_{\max}}\right)\right) \frac{i}{i_{\max}} \quad (16)$$

$$\beta_{i,j,k}^{\text{fixed}} = S\left(\frac{\beta_{i,j,k}}{j/j_{\max}}\right) \beta_{i,j,k} + \left(1 - S\left(\frac{\beta_{i,j,k}}{j/j_{\max}}\right)\right) \frac{j}{j_{\max}} \quad (17)$$

$$\gamma_{i,j,k}^{\text{fixed}} = S\left(\frac{\gamma_{i,j,k}}{k/k_{\max}}\right) \gamma_{i,j,k} + \left(1 - S\left(\frac{\gamma_{i,j,k}}{k/k_{\max}}\right)\right) \frac{k}{k_{\max}} \quad (18)$$

式中: 系数 c_1 取 10~100, c_2 取 0.05~0.30。

在求出所有内部结点的旋转矢量后, 对块内部某结点 i , 已知其旋转矢量 \mathbf{R} 及旋转中心点坐标 \mathbf{x}_c , 则旋转位移按下式计算:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{rot}} = \mathbf{M}_{\text{rot}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c) - \mathbf{x} \quad (19)$$

式中: \mathbf{x} 为结点当前坐标; \mathbf{M}_{rot} 为旋转变换矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{M}_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} r_x^2 a + b & r_x r_y a - r_z c & r_x r_z a + r_y c \\ r_x r_y a + r_z c & r_y^2 a + b & r_y r_z a - r_x c \\ r_x r_z a - r_y c & r_y r_z a + r_x c & r_z^2 a + b \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $a = 1 - \cos \theta, b = \cos \theta, c = \sin \theta$ 。

3 计算流程

计算流程如下:

(1) 预处理。首先进行子块划分, 创建块结点之间的弹簧连接, 记录弹簧元结点编号信息以及角点相连的弹簧元信息, 并计算弹簧刚度; 其次进行几何拓扑数据计算, 存储棱-角点、面-角点、面-棱、体-角点、体-棱以及体-面信息, 并计算式(10)~式(12)中的系数 α, β 和 γ 。

(2) 每个时间步更新网格。首先求解内部角点静力平衡方程, 得到各个块和子块的角点位移; 其次采用 TFI 方式由边界位移计算内部结点位移; 然后采用 2.2 节的旋转修正方法计算旋转位移并叠加到结点位移。

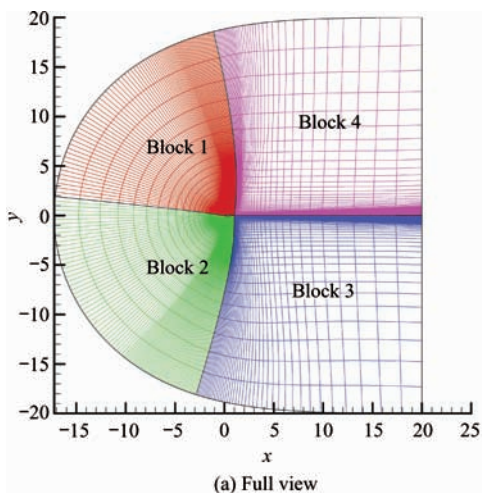
4 算例

4.1 RAE2822 二维黏性网格

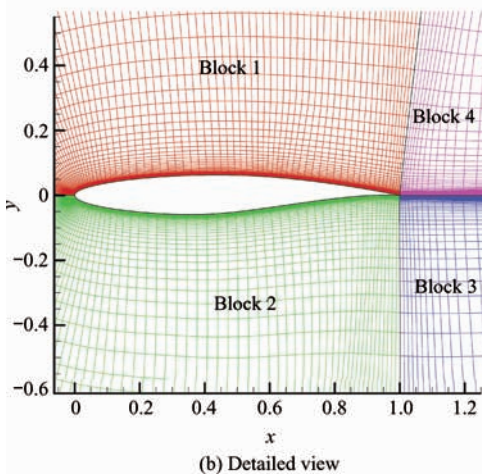
网格拓扑结构为 C 型网络, 共分为 4 块, 结点数目分别为 $89 \times 97, 89 \times 97, 41 \times 97$ 和 41×97 , 翼型弦长为 1, 壁面第一层网格高度为 1×10^{-6} , RAE2822 原始网格如图 5 所示。计算机 CPU 为 Intel Xeon E5504, 内存为 6 GB, 所有计算均采用单个核心。

边界运动设置为绕 1/4 弦点逆时针旋转 45° , 在这个变形角度下, 传统 TFI 动网格方法网格在翼型前缘处会产生严重扭曲, 正交性较差。为考察子块及旋转修正的影响, 下面给出 4 种方法的计算结果: ①传统 TFI 动网格方法如图 6 所示; ②采用弹簧类比法如图 7 所示; ③采用本文方法, 子网格数目为 1, 如图 8 所示; ④采用本文方法, 子网格

为 4×4 , 如图 9 所示。所有计算式 (15) 中的系数 c_1 取 30, c_2 取 0.2。子网格块为 1 时, 块 1 的旋转依赖边界为翼型上表面, 块 2 依赖边界为翼型下表面, 块 3 和 4 的依赖边界为翼型后缘角点。



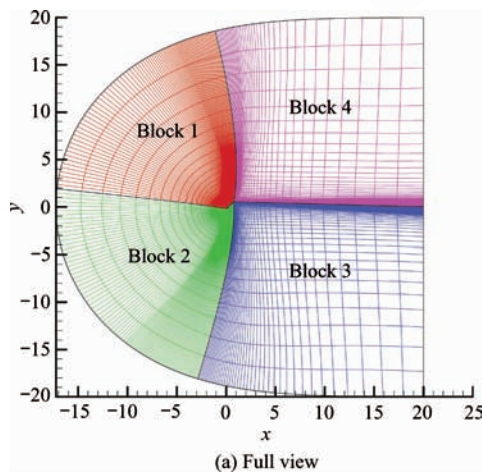
(a) Full view



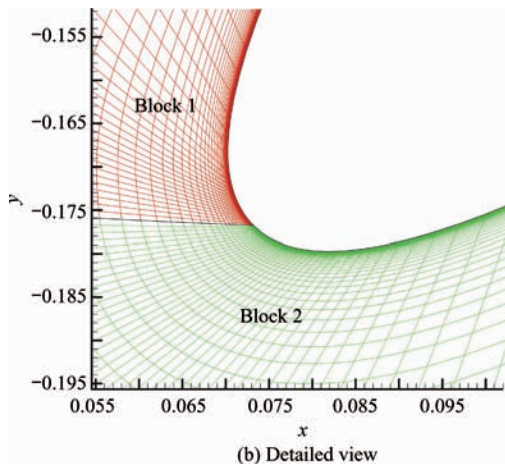
(b) Detailed view

图 5 RAE2822 原始网格

Fig. 5 Original mesh of RAE2822



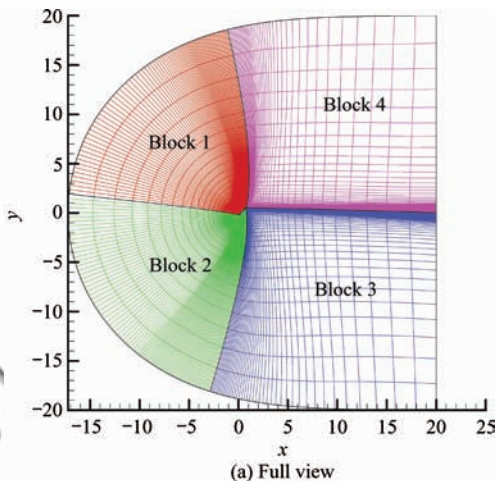
(a) Full view



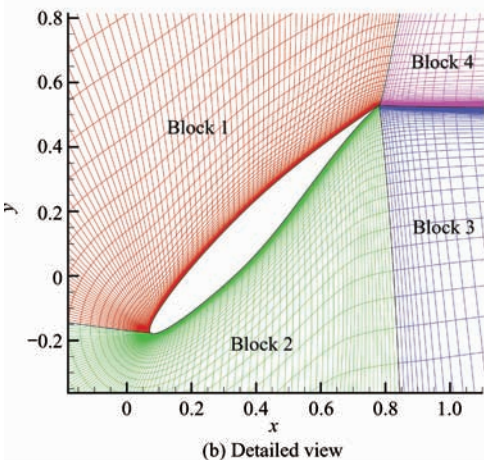
(b) Detailed view

图 6 TFI 动网格方法的 RAE2822 网格变形图

Fig. 6 Mesh deformation of RAE2822 airfoil using TFI method



(a) Full view



(b) Detailed view

图 7 弹簧类比的 RAE2822 网格变形图

Fig. 7 Mesh deformation of RAE2822 airfoil using spring analysis method

由图 6 和图 7 可知, 采用传统 TFI 动网格方
© 航空学报编辑部 http://hkxb.buaa.edu.cn

法和弹簧类比法时,近壁面处网格的正交性较差。如图 8 所示,相比而言即使不采用子网格,旋转修正后的网格质量也非常好,在采用 4×4 子网格块时,壁面附近的网格正交性基本未变化,整体网格更加光滑,如图 9 所示。

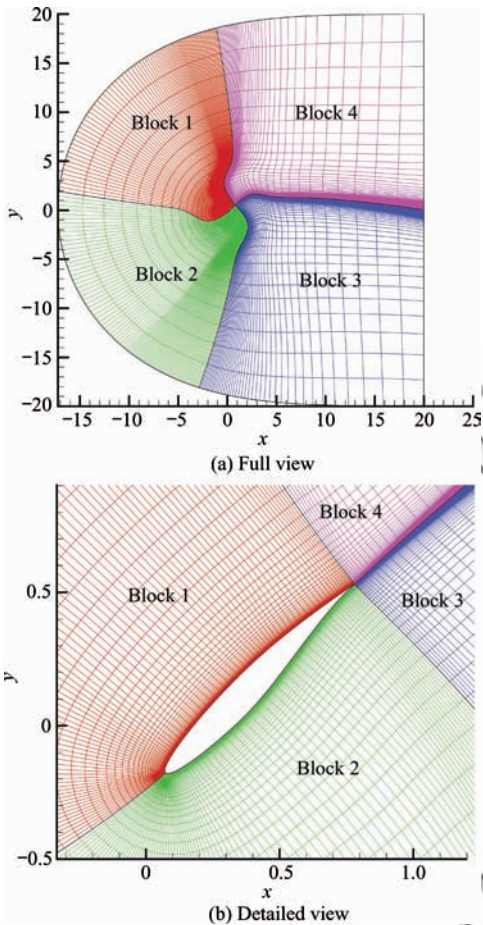


图 8 子网格块数目为 1 的 RAE2822 网格变形结果
Fig. 8 Mesh deformation of RAE2822 airfoil with 1 sub-block

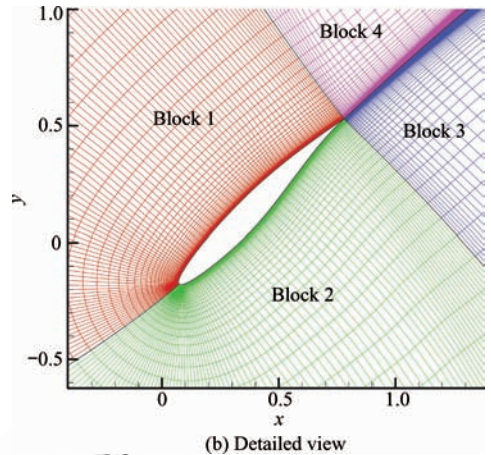


图 9 子网格块数为 4×4 的 RAE2822 网格变形结果
Fig. 9 Mesh deformation of RAE2822 airfoil with 4×4 sub-blocks

采用弹簧类比法时,一个时间步长内的变形量不能取大,否则极易造成负体积。上述计算中一共分 500 步将旋转角度逐渐增加到最大值。采用本文方法则直接增大到最大值。考虑到实际计算过程中每个时间步上的变形量不会很大,因此在对计算效率时,仅和弹簧类比法的一个时间步进行比较。表 1 给出了 4 种方法的计算时间比较。由表 1 可知,本文方法计算时间是 TFI 动网格方法的 3~4 倍,是弹簧类比法的 1/20 到 1/30。

表 1 计算时间(C型网格)

Table 1 Computational time (C mesh)

Method	Time/ms
TFI	0.95
Spring analogy, one step	105.00
Rotating fix with 1 sub-block	3.50
Rotating fix with 4×4 sub-blocks	4.00

4.2 AGARD445.6 黏性网格

几何模型为 AGARD445.6 机翼,网格拓扑结构为 C-H 型网格,一共分为 8 个块,结点总数为 170 万。原始网格如图 10 所示。

翼型运动设置为绕根部旋转 60° ,图 11 为传统 TFI 方法计算结果,显然在翼梢位置网格正交性较差。图 12 为本文方法子网格块为 1 时的计算结果,图 13 为本文方法子网格块为 $3 \times 3 \times 3$ 时的计算结果,二者相差不大,网格壁面附近仍保持原始网格的正交性,整体网格光滑性良好。

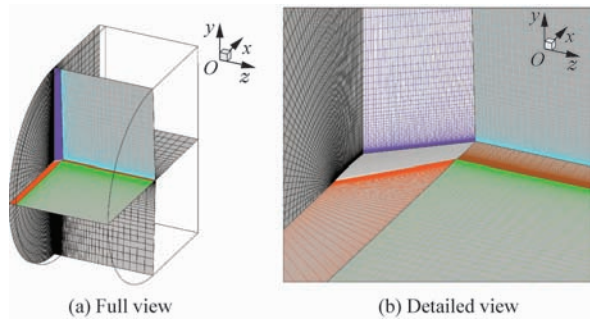


图 10 AGARD445.6 机翼原始网格
Fig. 10 Original mesh of AGARD445.6

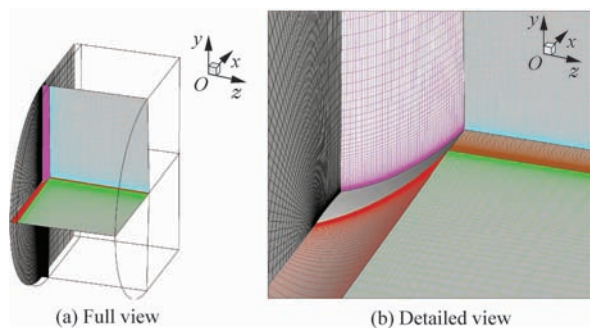


图 11 TFI 动网格方法的 AGARD445.6 网格变形图
Fig. 11 Mesh deformation of AGARD445.6 wing with TFI method

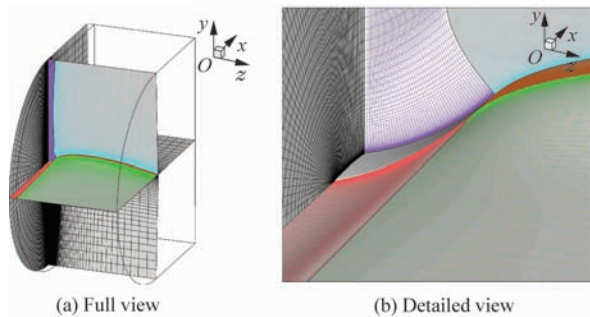


图 12 子网格块为 1 的 AGARD445.6 网格变形结果
Fig. 12 Mesh deformation of AGARD445.6 wing with 1 sub-block

计算硬件配置同 4.1 节算例,表 2 给出了不同计算方法的计算时间。同样,弹簧方法采用 500 步递增方式计算,表中给出的是单步时间。显然 TFI 动网格方法最快,本文两种方法的计算时间基本相等,是 TFI 动网格方法的 3.5 倍左右;弹簧类比法最慢,是本文方法的 60 倍。

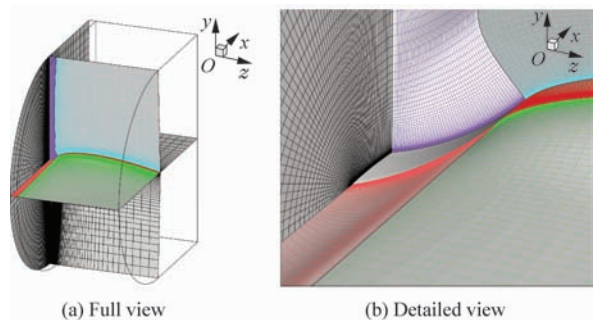


图 13 子网格块数为 $3 \times 3 \times 3$ 的 AGARD445.6 网格变形结果
Fig. 13 Mesh deformation of AGARD445.6 wing with $3 \times 3 \times 3$ sub-blocks

表 2 计算时间(C-H 型网格)

Table 2 Computational time (C-H mesh)

Method	Time/ms
TFI	200
Spring analogy, one step	41 300
Rotate fix with 1 sub-block	650
Rotate fix with $3 \times 3 \times 3$ sub-blocks	695

4.3 DLR-F4 翼身组合体黏性网格

几何模型为 AIAA 阻力计算工作室的标准模型,为保证网格质量,机身附近流体网格采用 O 型拓扑结构,外部再嵌套 H 型网格,网格一共分为 122 个块,网格结点总数为 210 万,壁面法向第一层网格高度为 0.1,整体网格及局部放大图如图 14 所示。

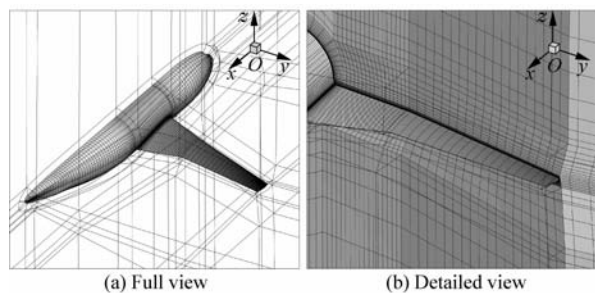


图 14 DLR-F4 翼身组合体原始网格
Fig. 14 Original mesh of DLR-F4 wing-fuselage

结构最大变形在翼梢位置,为绕 x 轴旋转 30° ,变形前后的结构如图 15 所示。分别采

用 TFI 动网格方法和本文所述方法进行了动网格计算。

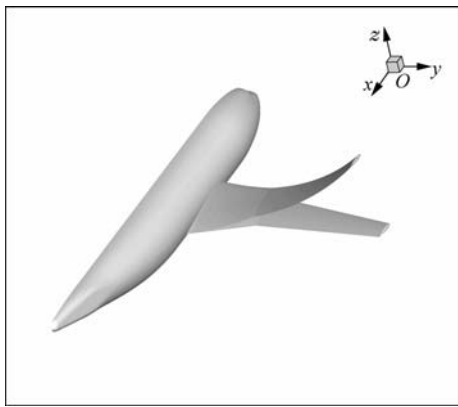
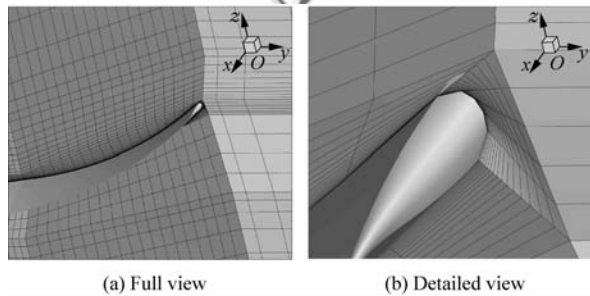


图 15 结构变形图

Fig. 15 Deformation of structure

图 16 为传统 TFI 动网格方法的网格变形结果,从局部放大图中可知,翼梢位置的网格正交性很差,出现过度扭曲,并产生负体积。图 17 为使用本文方法的计算结果,计算过程未采用子网格块,结果显示并未出现负体积,从局部放大图中可

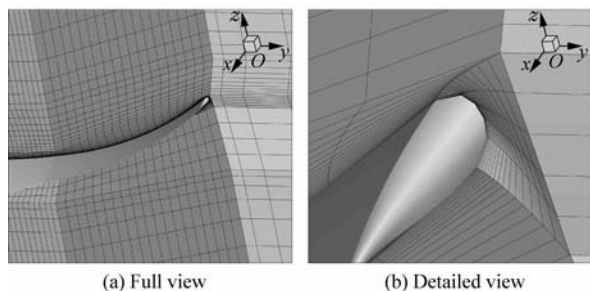


(a) Full view

(b) Detailed view

图 16 TFI 动网格方法的网格变形结果

Fig. 16 Mesh deformation with TFI method



(a) Full view

(b) Detailed view

图 17 带旋转修正的 TFI 动网格方法的网格变形结果

Fig. 17 Mesh deformation with rotation corrected TFI method

看出翼梢位置仍能保证较好的正交性。就计算时间而言,TFI 动网格方法为 290 ms,带旋转修正方法为 1 400 ms,对于 210 万规模的网格,这样的计算时间是完全可以接受的。

5 结 论

(1) 通过对网格块进行分割,在子网格块角点建立弹簧元,并应用弹簧类比法计算子网格块的角点位移,计算结果表明在仅需较少的子块即可以使整体网格具有更好的光顺性,同时计算时间仅增加 10% 左右。

(2) 针对 TFI 动网格方法在大变形时出现网格正交性差的问题,从几何关系出发,指出了造成该结果的原因是由于 TFI 动网格方法在插值过程中各个位移分量是不相关的,进而提出了通过几何旋转修正改进网格正交性方法。该方法仅需在原有 TFI 程序基础上添加旋转修正即可保证网格在壁面附近的正交性,计算时间仅为 TFI 动网格方法的 3 到 4 倍。

参 考 文 献

- [1] Gordon W N, Hall C A. Construction of curvilinear coordinate systems and application to mesh generation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1973, 7(4): 461-477.
- [2] Thompson J F, Thames F C, Mastin C W. Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies[J]. Journal of Computational Physics, 1974, 15(3): 299-319.
- [3] Reuther J J. Aerodynamics shape optimization of complex aircraft configurations via an adjoint formulation [R]. AIAA-1996-20094, 1996.
- [4] Byun C, Guruswamy G P. A parallel multi-block moving grid method for aeroelastic applications on full aircraft [R]. AIAA-1998-24782, 1998.
- [5] Jones W T, Samareh-Abolhassani J. A grid generation system for multi-disciplinary design optimization [R]. AIAA-1995-1689, 1995.
- [6] Tsai H M, Wong A S F, Cai J, et al. Unsteady flow calculations with a parallel multiblock moving mesh algorithm [J]. AIAA Journal, 2001, 39(6): 1021-1029.
- [7] Gaitonde A L, Fiddes S P. Three-dimensional moving mesh method for the calculation of unsteady transonic flows[J]. The Aeronautical Journal, 1995, 99 (984): 150-160.

- [8] Farhat C, Degand C, Koobus B, et al. Torsional springs for two dimensional dynamic unstructured fluid meshes [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 1(63): 231-245.
- [9] Blom F J. Considerations on the spring analogy[J]. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 2000, 32(6): 647-668.
- [10] Degand C, Farhat C. A three-dimensional torsional spring analogy method for unstructured dynamic meshes [J]. *Computers and Structures*, 2002, 80(3-4): 305-316.
- [11] Zeng D H, Ethier C R. A semi-torsional spring analogy model for updating unstructured meshes in 3d moving domains[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(11-14): 1118-1139.
- [12] Chew L P. Constrained Delaunay triangulations[J]. *Algorithmica*, 1989, 4(1): 97-108.
- [13] Liu X Q, Qin N, Xia H. Fast dynamic grid deformation based on Delaunay graph mapping[J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 211(2): 405-423.
- [14] 刘学强, 李青, 柴建忠, 等. 一种新的动网格方法及其应用[J]. *航空学报*, 2008, 29(4): 817-822.
- Liu Xueqiang, Li Qing, Chai Jianzhong, et al. A new dynamic grid algorithm and its application[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(4): 817-822. (in Chinese).
- [15] Chen P C, Hill L R. A three-dimensional boundary element method for CFD/CSD grid interfacing[R]. AIAA-1999-1213, 1999.
- [16] Johnson A A, Tezduyar T E. Simulation of multiple sphere falling in a liquid-filled tube[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 134(4): 351-373.

作者简介:

张兵(1981—) 男,博士研究生。主要研究方向:飞行器气动弹性力学。

E-mail: zhangbing_end@163.com

韩景龙(1952—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:飞行器气动弹性力学,复杂结构动力学与控制。

Tel: 025-84896484

E-mail: hjlae@nuaa.edu.cn

Spring-TFI Hybrid Dynamic Mesh Method with Rotation Correction

ZHANG Bing, HAN Jinglong *

State Key Laboratory of Mechanics and Control for Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Problems of orthogonal properties become more serious when the traditional transfinite interpolation (TFI) dynamic mesh method is employed for large deformations. Based on an analysis of the geometric relationship and interpolation features, an improvement for the present TFI method is proposed with a rotation correction. A new spring-TFI hybrid dynamic mesh method is developed for a structured mesh. First, each block of the computation domain is divided into several sub-blocks. Then, a spring network which connects the corners of all sub-blocks is established to smooth the mesh by means of spring analysis. Finally, a modified TFI method is used for calculating the inner deformations of the sub-blocks. Computational results of typical two and three dimensional viscous grids indicate that good orthogonal and smoothing properties can be achieved by rotation correction for large mesh deformations. In addition, the computational efficiency is slightly decreased than the traditional TFI method, but improved by 1 or 2 orders of magnitude when compared with the spring analogy method.

Key words: dynamic mesh; rotation correction; spring analogy method; transfinite interpolation; computational fluid dynamics

Received: 2011-01-04; Revised: 2011-02-18; Accepted: 2011-04-05; Published online: 2011-04-19 17:03:15

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110419.1703.006.html DOI:CNKI:11-1929/V.20110419.1703.006

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10872089)

* Corresponding author. Tel.: 025-84896484 E-mail: hjlae@nuaa.edu.cn