

非结构弹性体动网格方法应用策略及改进

张 斌, 杨 涛, 丰志伟, 张青斌, 葛健全, 霍 霖

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对 3 种代表性的经典弹性体动网格方法,从网格最大变形能力、质量评价指标和空间分布趋势 3 个方面综合分析了各方法的网格变形特性,重点总结了各方法的适用范围.结合工程实际,研究了特定问题的弹性体动网格应用策略.最后,整合各经典弹性体动网格方法的优势提出了改进方法,并通过 NACA 0006 翼型的超声速俯仰振荡加以验证.研究表明:基于面积的弹性体法适用于加密型网格,而基于距离的弹性体法适用于均匀型网格,该应用策略可为工程问题提供指导.改进方法效果明显,在大变形时相对基于距离的弹性体法的各项网格质量增幅均在 10% 以上,相对基于面积的弹性体法的最小网格质量增幅几乎达到 4 倍,并且在数值模拟中具有较高的精度,可显著增强弹性体法的鲁棒性.

关 键 词: 动网格; 弹性体; 非结构网格; 应用策略; 加权改进

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Application strategy and improvement of unstructured dynamic grid method based on elasticity analogy

ZHANG Bin, YANG Tao, FENG Zhi-wei,
ZHANG Qing-bin, GE Jian-quan, HUO Lin

(College of Aerospace Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Taking the field of application as a focal point, three classical dynamic grid methods based on elasticity analogy were analyzed in many ways, such as deformation capability, deformation quality and spatial distribution. Combined with engineering demand, the application strategy for grid deformation was presented. Finally, a improvement was proposed for integrating advantages of classical dynamic grid methods based on elasticity analogy, and then verified through pitch oscillation of NACA 0006 airfoil in hypersonic condition. Results show that, when faced with densified grids, the area modification can be controlled better, but faced with uniform grids, the distance modification is more suitable, so this application strategy can provide a guidance for engineering. Secondly, the improvement is accurate in simulation, its all grid quality parameters exceed 10% than classical method based on distance, what's more, its minimum grid quality parameter is about four times the classical method based on area. In conclusion, the improvement is effective in strengthening the robustness of classical elasticity analogy.

收稿日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51375486); 航天支撑技术基金(1602010114002)

作者简介: 张斌(1990—),男,博士生,主要从事气动外形布局设计与优化研究.

引用格式: 张斌,杨涛,丰志伟,等.非结构弹性体动网格方法应用策略及改进[J].航空动力学报,2017,32(3):648-656. ZHANG Bin, YANG Tao, FENG Zhiwei, et al. Application strategy and improvement of unstructured dynamic grid method based on elasticity analogy[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 648-656.

Key words: dynamic grid; elasticity analogy; unstructured grid; application strategy; weighted improvement

动网格技术是指通过网格变形、网格重构和局部网格重构等方法使计算网格适应计算区域的改变,是处理包含运动边界非定常问题的关键技术^[1].结合非结构网格易于处理复杂外形与高效自适应性的优势,非结构动网格技术近十年来得到了充分发展^[2],在可变形飞行器、机翼气动弹性等问题中得到广泛的应用.

但是,网格重构不仅会因网格生成增加计算量,还会带来载荷平衡运算、处理不可微等额外工作量及耗散误差.另外,大部分动边界问题属于小变形问题,例如自由表面振动、机翼气动弹性等,单独使用网格变形方法就能解决此类问题^[3],所以当前动网格技术很重要的工作就是提高网格变形能力和网格质量来保持数值解的精度.

目前国内外可靠性较高的网格变形方法主要有弹簧方法、弹性体法和径向基函数法等,Yang等人^[4]总结了弹簧法和弹性体法的变形特性,并指出弹性体法变形能力明显优于弹簧法.周璇等人^[5]指出弹性体法是基于物理模型的通用网格变形方法,其网格变形能力、变形质量和局部网格单元控制要优于弹簧法、径向基函数法等.虽然弹性体法具有较高的鲁棒性,但是因为计算量大、网格变形效率低、实现复杂等短板,在工程实际中应用频度不高.

随着计算机技术的飞速发展,特别是高性能计算机越来越成熟,动网格生成算法的并行化和分布化极大地提高了变形效率.另外,现有的算法在变形质量、算法可靠性、几何适应性等方面还有待于进一步提高,弹性体法高鲁棒性的优势更加突出,越来越引起研究者的重视.

弹性体法最早由 Tezduyar^[6]在处理绕圆柱的不可压缩流问题中提出,随后 Tezduyar 及其研究小组在动边界问题的研究中多次运用并提出改进^[7-11],此后又有不少学者对这种方法进行了发展^[12-14],目前常用于气动优化设计、多体相对运动、机翼折叠等计算流体力学领域.

虽然弹性体法发展迅速,衍生出众多改进方法,但是每种方法都有其特性和局限,如何在工程应用中选择最优方法是当前亟待解决的问题.周璇等人^[5]也提出,研究针对特定问题的网格变形策略,以提高特定情形下的网格变形质量,是未来动网格技术领域的研究重点.因此,很有必要研究

经典弹性体动网格方法的适用性,为工程应用提供参考.

本文首先介绍了经典弹性体动网格方法,然后以二维矩形旋转模型为例,从网格最大变形能力、质量评价指标和空间分布趋势3个方面,综合分析了各方法的网格变形特性和优缺点.最后以工程实际为背景,选取不同的网格类型,重点研究了特定问题的网格变形策略,可为工程应用提供指导.

1 经典弹性体动网格方法

最早提出的线弹性体表达了弹性体法的基本思想,后续发展的基于面积(体积)或距离的弹性体法得到广泛引用,这3种经典弹性体动网格方法(下文简称弹性体法)基本代表了弹性体法的研究进展,本文以此进行特性分析和应用策略研究.

1.1 线弹性体法

在弹性力学中^[15],当应力小于材料的弹性比例极限时,应力与应变之间的关系是线性的.对于线弹性体法,认为只要给出合理的弹性模量,就可用线弹性方程控制网格运动,此时定义网格的弹性模量是各向同性的^[1].

以二维非结构网格为例,假设任意网格节点 (x, y) 的位移矢量 $\mathbf{U}(x, y) = (u, v)$,其中 $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$.按照平面域内弹性力学的基本原理,任意网格节点的应力和应变状态可表示为 $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}]^T$.

根据弹性力学的平衡方程 $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}$,忽略弹性体内力^[16]令 $\mathbf{f} = \mathbf{0}$,应力张量满足守恒关系

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0} \quad (1)$$

结合假设的位移矢量 $\mathbf{U}(x, y) = (u, v)$ 和弹性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$,网格单元满足线性运动定律

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) \quad (2)$$

此外,弹性应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 与应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 满足广义胡克定律

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵.结合式(1)~式(3),可得弹性应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 与网格节点位移矢量 $\mathbf{U}$ 的关系

$$\nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U} + \nabla \lambda (\nabla \cdot \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U})^T = \mathbf{0} \quad (4)$$

其中 λ 和 μ 为代表材料弹性属性的拉梅常量,可

用弹性模量 E 和泊松比 ν 来表示,即 $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

最后通过有限元法求解上述方程即可实现网格运动,主要包括由插值函数推导单元刚度矩阵,整合形成系统刚度矩阵,结合边界条件求解线性方程组等步骤.

对于线弹性体, λ 和 μ 为常量,其控制方程可写为

$$\mu \nabla \cdot \nabla U(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot U) = 0 \tag{5}$$

因为线弹性体在整个网格采用固定的控制参数 λ 和 μ ,所以网格变形时动边界附近的小网格单元易发生较大的扭转,导致网格变形能力有限.

针对线弹性体的弊端,目前的研究主要是将网格的控制参数“化整为零”,每个网格单元的变形可由单元大小、位置和形状等多种因素决定,其中基于距离、基于面积(体积)的弹性体法最为经典,可显著提高网格的变形能力和局部网格质量.

1.2 基于距离的弹性体法

网格变形最易在运动边界处发生堆积,进而出现“网格交叉”导致变形失败,而且动边界附近的网格质量对计算精度影响较大,需要特别关注.为解决上述问题,需要把弹性模量设置为从动边界向外边界逐渐递减的趋势,这样越靠近动边界,网格刚性越强、变形越小,将大部分变形量转移到外部网格中,在增强网格变形能力的同时可保证动边界附近的网格质量.

为此,Löhner^[16]在动网格研究中,提出了一种根据网格到运动边界的距离来提高网格鲁棒性的思路,即以全局网格单元最小网格边长为基准,根据网格单元节点到运动边界的平均距离的倒数来决定该单元的弹性模量

$$E_i = \frac{L_{\min}}{L_i} \tag{6}$$

其中 E_i 为当地网格单元的弹性模量, $L_{\min}$ 为全局网格单元最小网格边长, L_i 为当地网格单元节点到运动边界的平均距离.

Deconinck 等人^[17]根据线弹性方程,在线性运动定律中引入修正项,提出了针对旋转问题的改进,最终整理 $\lambda_i = -E_i, \mu_i = E_i$,结合基于面积(体积)的弹性体法,极大地增强了弹性体的鲁棒性.

1.3 基于面积(体积)的弹性体法

出于计算精度的要求,计算网格往往会在动边界处加密,该区域的网格面积小、排布密且最易出现无效网格.但是基于距离的弹性体法对网格

疏密并不敏感,若根据网格单元大小来控制弹性模量,可进一步提高加密区域的网格质量.

Stein 等人^[18]在线弹性体基础上,提出了将弹性模量与网格面积(体积)建立联系思路,即以全局网格最小单元面积(体积)为基准,根据网格单元面积(体积)的倒数来决定该单元的弹性模量

$$E_i = \frac{S_{\min}}{S_i} \tag{7}$$

其中 $S_{\min}$ 为全局网格最小单元面积(体积), S_i 为当地网格单元面积(体积).

但是当全场网格单元的尺寸相近时,基于面积(体积)的弹性体法就会失效,此时基于距离的弹性体法更加合适.同样结合 Deconinck 等人^[17]的结论,令 $\lambda_i = -E_i, \mu_i = E_i$,可进一步增强弹性体的鲁棒性.

虽然弹性体法因为大型结构方程组的迭代求解,相对其他网格变形方法的计算效率较低^[5],但是经过验证,本文提到的 3 种经典弹性体法的计算效率基本相同,且并不是影响计算进程的主要因素.以本文的矩形旋转模型为例,设定结构求解器的迭代步数为 100 步/次,弹性体法主导的网格变形时间不足数值计算时间的 1%,对整个非定常计算耗时的影响很小.

2 应用策略分析

为寻找各方法的应用策略,本节选取二维非结构矩形旋转模型^[19],从网格最大变形能力、质量评价指标和空间分布趋势 3 个方面,综合分析经典弹性体法的突出特性和适用范围,其中线弹性体在全场网格设定弹性模量 $E = 2 \times 10^{11}$,泊松比 $\nu = 0.3$ ^[20].

2.1 网格质量定义

针对二维非结构网格,参考 Patrick 建立的网格质量评价指标^[21],定义 $f_{\text{size}} = \min(\tau, 1/\tau)$,其中 $\tau = S/\zeta$, S 为网格单元面积, ζ 为以该三角形单元第二长边构建的等边三角形面积;定义 $f_{\text{shape}} = \frac{4\sqrt{3}S}{a^2 + b^2 + c^2}$,其中 a, b, c 为网格单元的三边边长.

综合两个指标即可建立比较全面的网格质量评价体系,即 $f_{\text{size-shape}} = f_{\text{size}} f_{\text{shape}}$,当 $f_{\text{size-shape}} = 1$ 时,单元的总体质量最好, $f_{\text{size-shape}} = 0$ 时单元的总体质量最差.最后,定义所有网格的平均网格单元

质量 $F_{\text{mean}} = (\sum_{i=1}^{N_e} f_{\text{size-shape}})/N_e$,最小网格单元质

量 $F_{\min} = \min(f_{\text{size-shape}}^1, f_{\text{size-shape}}^2, \dots, f_{\text{size-shape}}^{N_e})$, 其中 N_e 为网格单元数.

2.2 矩形旋转模型

初始网格如图 1 所示,运动边界为 10×1 (无量纲)水平放置矩形,边界层网格高度为 0.1(无量纲),远场最外层网格高度为 1(无量纲),全场网格共有 6 403 个节点,12 466 个三角形面元. 网格变形过程中,矩形从初始状态以角速度 1.745 rad/s 作逆时针旋转,最大转角为 180° .

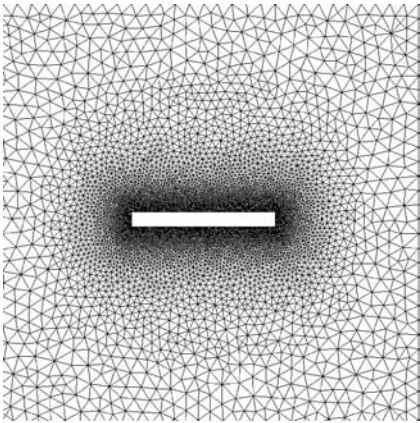


图 1 矩形旋转模型初始网格拓扑图
Fig. 1 Initial grid topology of rectangle rotating model

2.3 最大变形能力比较

网格变形能力见图 2. 当转角为 86.1° 时,线弹性体网格在矩形顶角处出现“网格交叉”单元,达到最大变形极限,如图 2(b)所示. 而矩形转角

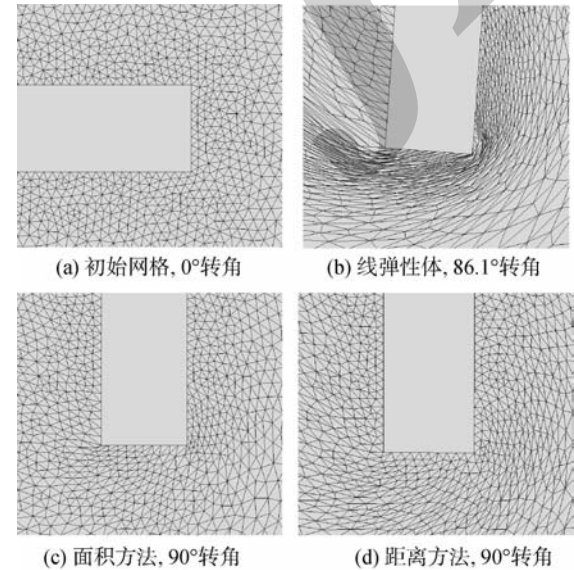


图 2 网格变形能力对比
Fig. 2 Contrast of grid deformation ability

增大至 90° 时,基于面积的弹性体法(简称面积方法)和基于距离的弹性体法(简称距离方法)的网格保持完好,尤其动边界附近网格与初始网格保持较好的一致性,如图 2(c)、图 2(d)所示.

通过计算,面积方法和距离方法最大转角可分别达到 384.3° 和 463.5° ,虽然此时网格拉伸扭曲严重但是依然没有出现“网格交叉”单元. 这是因为两种非线性弹性体法可以有效地将网格变形向外传递,由更多的外场网格承受变形,变形能力明显增强.

2.4 网格质量随旋转角度变化

图 3 给出了 3 种经典弹性体法在整个计算域的平均网格质量 F_{mean} 和最小网格质量 $F_{\min}$ 随矩形转角变化的对比结果. 图中, F_{mean} 代表平均网格质量, $F_{\min}$ 代表最小网格质量,下标 initial 代表初始网格, area 代表面积方法, distance 代表距离方法, constant 代表线弹性体法.

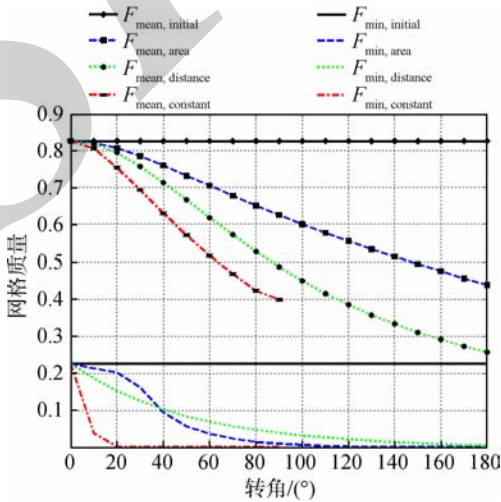


图 3 3 种方法网格质量随矩形转角变化
Fig. 3 Grid quality varying with rectangle rotating angles of three methods

随着转角增加,3 种方法的网格质量均在下落,但是线弹性体的平均网格质量和最小网格质量均明显差于两种非线性弹性体法,其最小网格质量在转角 30° 时已经处于 10^{-6} 量级,接近失效. 在转角小于 40° 时,面积方法可以兼具更佳的平均网格质量和最小网格质量,这也是常用的变形范围;当转角较大时,虽然距离方法的最小网格质量保持较好,但两者相差不大,面积方法对平均网格质量控制更好.

对于局部加密型的网格,特别是运动边界的附近区域,网格面积小排布密且很大程度地影响计算

精度,通过面积方法来控制网格变形更加有效.该矩形旋转模型是典型的加密型网格,最大尺寸比达到 10,所以本例中面积方法对质量控制更好.

2.5 网格空间分布趋势

为了直观比较两种非线性弹性体法的特性,图 4 展示了在矩形转角为 20° 、 90° 和 180° 时的网格分布对比图,并将质量最差的网格单元以红点标示.左图为面积方法,右图为距离方法.

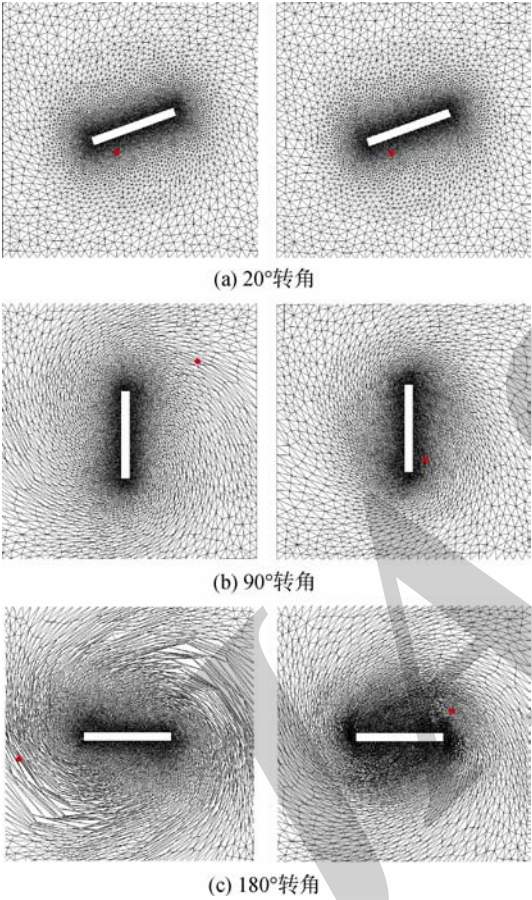


图 4 两种非线性弹性体法在矩形典型转角时网格分布
Fig. 4 Grid distribution of two nonlinear elasticity methods with rectangle rotating typical degrees

通过图 4 发现,在 20° 转角时两者分布基本一致;随着转角增加至 90° ,面积方法在运动边界附近的网格保持较好,但是外场网格变形严重,且质量最差单元远离运动边界;当转角达到 180° 时,上述趋势更加明显,距离方法虽然在矩形两端网格扭曲明显,但是全局网格并未出现类似面积方法的严重畸变.

2.6 方法应用策略

通过对经典弹性体方法的特性分析,可得出

对工程应用的参考策略:基于面积(体积)的弹性体法适用于加密型网格,可充分保持动边界网格的一致性;基于距离的弹性体法适用于均匀型网格,在一定程度能够统筹全场网格.

对于加密型网格,大部分网格集中在运动边界附近,面积方法以牺牲远场网格为代价获得运动边界网格更强的鲁棒性,这导致面积方法“舍远求近”获得了更好的平均网格质量,从网格有效性和计算精度来讲,面积方法适用于加密型网格.

对于均匀型网格,每个网格单元的面积相差不大,面积方法将会失效.根据网格到运动边界距离的关系,距离方法可由内向外“均匀传递”网格变形,在提高动边界附近网格稳定性的同时兼顾网格质量,更适用于均匀型网格.

3 工程案例验证

为进一步验证本文提出的应用策略,下面针对特定的内、外流场动边界问题,选取不同的网格类型,分别对本文的 3 种经典弹性体法进行应用.

3.1 机翼-外挂物分离

以二维机翼-外挂物分离的外流场仿真为例,翼型和外挂物均采用 NACA 0012,初始时刻机翼和外挂物攻角 $\alpha=0^\circ$,为模拟外挂物下俯转动且相对翼型向下并向下游平动^[22],外挂物绕 $3/4$ 弦点以角速度 1.745 rad/s 作逆时针旋转,同时在每个时间步以 $\Delta x=0.0001, \Delta y=-0.002$ 移动,共计算 200 步.网格有 7696 节点,14679 个单元,外边界为圆形,半径为 4 倍机翼弦长,对机翼与外挂物之间的区域进行加密,如图 5 所示.

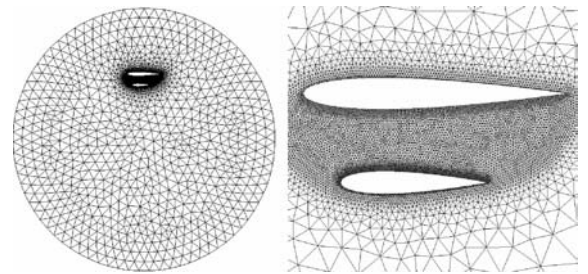


图 5 机翼-外挂物分离模型初始网格拓扑及局部放大图
Fig. 5 Initial grid topology of wing-bomb separating model and its local amplification

图 6 所示为 3 种弹性体法的网格质量随外挂物分离的对比结果.在运动过程中,两种非线性弹性体法的网格质量明显优于线弹性体法,但是面积方法的平均、最小网格质量都要好于距离方法.

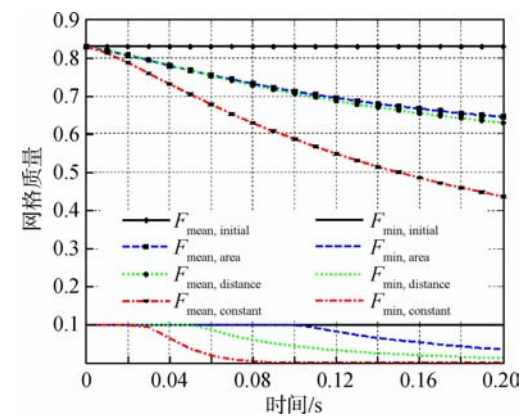


图 6 3 种方法网格质量随外挂物分离变化
Fig. 6 Grid quality varying with bomb separating of three methods

图 7 对比展示了两种非线性弹性体法在分离过程 1.5 s 时,机翼与外挂物头部区间的网格分布,可以发现面积方法在该区域的网格分布更加向外扩张,可以有效地将变形量向外场传递,网格拉伸没有距离方法明显。

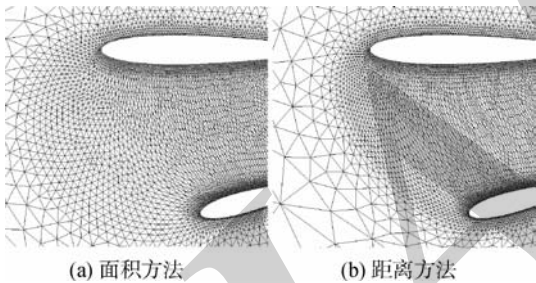


图 7 两种经典非线性弹性体法在 1.5 s 时的网格分布
Fig. 7 Grid distribution of two classical nonlinear elasticity methods with 1.5 s

该机翼-外挂物分离模型充分验证了本文提出的应用策略,对于局部区域加密明显的网格类型,面积方法更加有效。

3.2 弹性板振荡

流固耦合现象涉及流场变化与结构运动、变形之间的相互影响,在众多工程领域中都是值得关心的问题,而弹性板振荡是流固耦合研究中的经典问题,国内外进行了大量研究^[23-24]。

本文针对一端固支弹性薄板,模拟其二维截面在连续来流条件下的振荡过程.薄板的尺寸为 1 cm×0.4 cm,密度为 2 550 kg/m³,弹性模量为 2.5 MPa,泊松比为 0.35;流场域为 12 cm×6 cm,流体密度为 1 kg/m³,动力黏度为 0.2 Pa·s.流场域和弹性薄板的初始网格如图 8 所示,其中图 8(b)中红色单元为弹性薄板内部网格,流场网格

有 24 853 个节点,49 144 个单元,弹性薄板网格有 30 个节点,28 个单元。

来流速度为 170 m/s,取板长为参考长度,则雷诺数 $Re = 332.6$,时间步长为 10 ms,共计算 0.5 s.平板在来流载荷的激励下会开始振荡,随着时间推移,最终在流场中达到稳态.流场与弹性薄板之间耦合运动的数据梯度变化较小,可采用相对均匀的网格分布降低计算量。

3 种方法的网格质量随时间变化如图 9 所示,虽然三者的平均网格质量几乎相同,但是距离

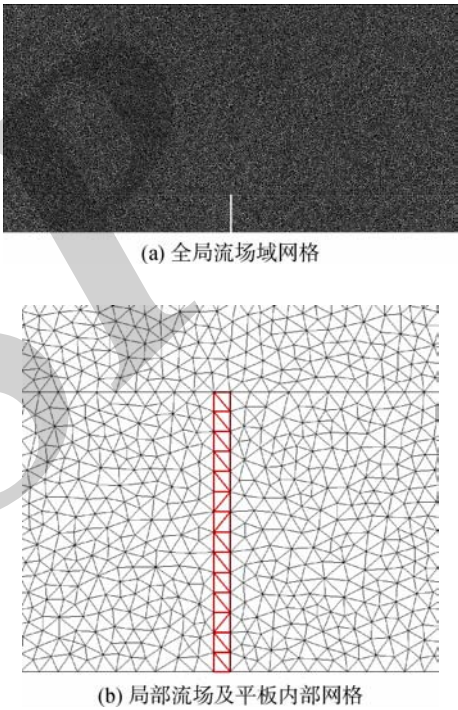


图 8 弹性板振荡模型初始网格拓扑
Fig. 8 Initial grid topology of oscillating elasticity panel model

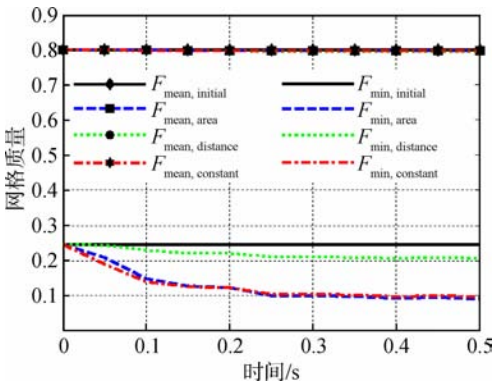


图 9 3 种方法网格质量随时间变化
Fig. 9 Grid quality varying with time of three methods

方法的最小网格质量明显较好,在 0.5 s 时相对于面积方法有 130% 的提升,这对计算精度更加有利。在整个过程中,线弹性体法与面积方法网格质量的走势基本一致,可见此时面积方法对网格变形的控制几乎失效。

为充分证明本文应用策略的可信度,图 10 展示了 0.5 s 时两种经典非线性弹性体法的网格分布图。对比发现,距离方法的网格分布较好,与初始网格保持了较好的一致性,而面积方法的网格分布明显较差,特别是平板顶部网格变形严重。

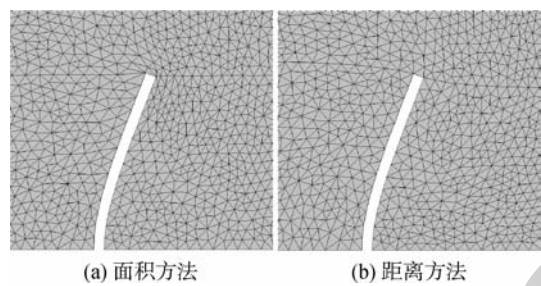


图 10 两种经典非线性弹性体法在 0.5 s 时的网格分布
Fig. 10 Grid distribution of two classical nonlinear elasticity methods with 0.5 s

经上述分析,对于均匀分布的网格类型,距离方法控制的更好,而面积方法几乎失效,完全符合本文提出的应用策略。

4 改进方法研究

虽然上述工程案例验证了本文提出的弹性体法应用策略,但是大多数的计算网格兼具“加密”与“均匀”的特征,需要综合考虑。如果在运动边界由面积方法主导,在远场附近由距离方法主导,中间区域根据两种非线性弹性体法加权的方式逐步过渡,这样可以结合两者的优势,在工程应用中具有更强的通用性。

首先对两种非线性弹性体法的弹性模量归一化,然后由“加权控制参数”对两者进行改进,可得加权改进的弹性模量表达式

$$E = \omega E_1 + (1 - \omega) E_2 \tag{8}$$

其中 E_1 为面积方法的弹性模量, E_2 为距离方法的弹性模量, ω 为加权控制参数。

依托本文的二维非结构矩形旋转模型,设定加权控制参数 ω 从 0 递增到 1,由距离方法 E_2 逐步过渡到面积方法 E_1 。分别作出在矩形在小变形(40°转角)和大变形(80°转角)时,平均网格质量(F_{mean})和最小网格质量(F_{min})较经典非线性弹性

体法(面积、距离方法)的增加幅度 δ ,选取最佳的改进结果如表 1 所示。

表 1 最佳改进弹性体法的网格质量增幅
Table 1 Grid quality increase of improved elasticity analogy method

变形 类型	加权控制 参数 ω	F_{mean} 增幅/%		F_{min} 增幅/%	
		面积 方法	距离 方法	面积 方法	距离 方法
小变形 (40°转角)	0.6	−1.75	4.61	71.91	57.62
大变形 (80°转角)	0.4	−10.44	10.46	389.99	57.37

$$\delta = \frac{F_{\text{modified}} - F_{\text{classical}}}{F_{\text{classical}}} \times 100\% \tag{9}$$

式中 F_{modified} 为基于改进弹性体法的网格质量, $F_{\text{classical}}$ 为基于经典弹性体法的网格质量。

根据表 1 中结果,改进弹性体法在小变形和大变形时,除了相对面积方法的平均网格质量略有下降,其他结果均有不同程度的增加,尤其相对面积方法的最小网格质量得到大幅提升,改进效果显著。

经过多方验证,对于本文提出的改进弹性体法,在小变形时控制参数 ω 取 0.6 或 0.7,在大变形时控制参数 ω 取 0.4 或 0.3,总能取得一定的改进效果,增强了经典弹性体法的鲁棒性。

5 改进方法验证

翼型非定常绕流问题一直是动网格研究中的重要问题,针对本文提出的改进弹性体法,选取 NACA 0006 翼型的超声速俯仰振荡为研究对象,数值计算结果与文献[25]结果进行对比。

计算过程中,NACA 0006 翼型绕 1/4 弦点作周期性俯仰振荡,其瞬时攻角随时间的变化规律如下所示:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_m \sin(\omega t + \phi_a) \tag{10}$$

其中 $\alpha(t)$ 为瞬时攻角的位置, α_0 为平均攻角, α_m 为俯仰振幅, ϕ_a 为俯仰相位, ω 为振荡频率。

振荡频率 ω 可由衰减频率 k 决定

$$k = \omega c / (2U_\infty) \tag{11}$$

其中 c 为翼型弦长, U_∞ 为无穷远处来流速度。

本文算例设置 $\alpha_0 = 2.99^\circ$, $\alpha_m = 2.01^\circ$, $\phi_a = 0^\circ$, $k = 0.208$, U_∞ 由来流马赫数 $Ma = 1.6$ 决定。

由于该问题属于小变形问题,所以基于改进

弹性体法 $E=0.6E_1+0.4E_2$,翼型按照变化规律可发展成非定常稳态的周期解,选取第3~5个周期内的计算结果,其升力系数 C_l 和力矩系数 C_m 随攻角变化如图 11 所示。

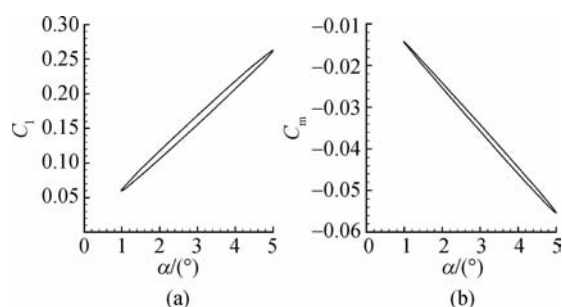


图 11 NACA 0006 翼型气动参数随攻角的变化

Fig. 11 Aerodynamic parameters of NACA 0006 airfoil varying with attack of angle

图 11 与文献[25]的结果相对比,发现数据结果基本一致,说明该改进弹性体法得到的网格在实际数值模拟中具有较好的稳定性和精度。

在工程应用中,可根据具体情况选择最优的改进弹性体法,也可以在不同的变形区间内选择不同的控制参数,进一步增强弹性体法的通用性和鲁棒性。

6 结 论

本文简要介绍了 3 种经典弹性体法的基本思想,通过分析方法特性总结了应用策略,并结合工程案例进行验证,最后整合各方法的优势提出了改进弹性体法。主要有以下结论:

- 1) 两种非线性弹性体法均优于线弹性体法,网格变形的鲁棒性明显增强。
- 2) 基于面积的弹性体法适用于加密型网格。其参考网格大小,可充分保持动边界区域网格的一致性,往往得到更佳的平均网格质量。
- 3) 基于距离的弹性体法适用于均匀型网格。其参考网格分布,更有利于统筹全场网格,往往得到更佳的最小网格质量。
- 4) 本文提出的改进弹性体法可以整合各经典弹性体方法的优势,在实际数值模拟中具有较好的稳定性和精度,可进一步增强弹性体法的通用性和鲁棒性。

参考文献:

[1] 张伟伟,高传强,叶正寅.气动弹性计算中网格变形方法研究进展[J].航空学报,2014,35(2):303-319.

ZHANG Weiwei, GAO Chuanqiang, YE Zhengyin. Research progress on mesh deformation method in computational aeroelasticity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 303-319. (in Chinese)

- [2] 朱冰,祝小平,周洲,等.基于非结构网格的多体分离数值仿真研究[J].空气动力学学报,2013,31(2):181-185.
ZHU Bing, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Simulation of unsteady multi-body flowfield involving relative movement based on unstructured mesh[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(2): 181-185. (in Chinese)
- [3] 王军利,白俊强,詹浩.非结构网格在三维可动边界问题中的应用研究[J].航空计算技术,2005,35(3):12-16.
WANG Junli, BAI Junqiang, ZHAN Hao. Dynamic unstructured grids method with applications to unsteady flows involving moving boundaries[J]. Aeronautical Computer Technique, 2005, 35(3): 12-16. (in Chinese)
- [4] Yang Z, Mavriplis D J. Unstructured dynamic meshes with higher-order time integration schemes for the unsteady Navier-Stokes equations[R]. AIAA-2005-1222, 2005.
- [5] 周璇,李水乡,孙树立,等.非结构网格变形方法研究进展[J].力学进展,2011,41(5):547-561.
ZHOU Xuan, LI Shuixiang, SUN Shuli, et al. Advances in the research on unstructured mesh deformation[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(5): 547-561. (in Chinese)
- [6] Tezduyar T E. Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations[J]. Advances in Applied Mechanics, 1992, 28(1): 1-44.
- [7] Johnson A A, Tezduyar T E. Simulation of multiple spheres falling in a liquid-filled tube[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 134(3/4): 351-373.
- [8] Johnson A A, Tezduyar T E. Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces[J]. Cognitive Systems, 1994, 119(1/2): 73-94.
- [9] Behr M, Tezduyar T. The shear-slip mesh update method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 174(3/4): 261-274.
- [10] Löhner R. Adaptive remeshing of transient problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1989, 75(1/2/3): 195-214.
- [11] Stein K, Tezduyar T E, Benney R. Automatic mesh update with the solid-extension mesh moving technique[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(21/22): 2019-2032.
- [12] Cavallo P A, Sinha N, Feldman G M. Parallel unstructured mesh adaptation for transient moving body and aeropropulsive applications[R]. AIAA-2004-1057, 2004.
- [13] Nielsen E J, Anderson W K. Recent improvements in aerodynamic design optimization on unstructured meshes[J]. AIAA Journal, 2002, 40(6): 1153-1163.
- [14] Bkaer T J. Mesh movement and metamorphosis[J]. Engineering with Computers, 2002, 18(3): 188-198.

[15] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[16] Löhner R. Applied computational fluid dynamics techniques-an introduction based on finite element methods [M]. Fairfax, US: John Wiley and Sons Limited, 2008.

[17] Deconinck H, Dick E. Computational fluid dynamics[M]. Berlin: Springer, 2006: 401-406.

[18] Stein K, Tezduyar T, Benney R. Mesh moving techniques for fluid-structure interactions with large displacements [J]. Journal of Applied Mechanics, 2003, 70(1): 58-63.

[19] 刘瑜. 量热完全气体/化学非平衡气体流动 ALE 有限体积计算方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

LIU Yu. Numerical research of ALE finite volume method for calorically perfect gas/chemical nonequilibrium gas flow[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

[20] Baker T, Cavallo P. Dynamic adaptation for deforming tetrahedral meshes[R]. AIAA 99-3253, 1999.

[21] 高传强, 张伟伟, 蒋跃文, 等. 两种典型非结构网格变形方法特性对比研究[J]. 航空工程进展, 2014, 5(2): 212-219.

GAO Chuanqian, ZHANG Weiwei, JIANG Yuewen, et al. A comparative study on two typical unstructured grid deformation methods[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(2): 212-219. (in Chinese)

[22] 郭正, 李晓斌, 瞿章华, 等. 用非结构动网格方法模拟有相对运动的多体绕流[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(3): 310-316.

GUO Zheng, LI Xiaobin, QU Zhanghua, et al. Simulation of flows past multi-body in relative motion with dynamic unstructured method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2001, 19(3): 310-316. (in Chinese)

[23] 胡世良, 鲁传敬, 何友声. 平板流固耦合振动的数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(10): 1487-1493.

HU Shiliang, LU Chuanjing, HE Yousheng. Numerical analysis of fluid-structure interaction on vibration for plate [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(10): 1487-1493. (in Chinese)

[24] Liaghat T, Guibault F, Nennemann B, et al. Two-way fluid-structure coupling in vibration and damping analysis of an oscillating hydrofoil[R]. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2004-38441, 2004.

[25] 王军利. 基于非结构动网格的非定常气动力计算[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

WANG Junli. Calculation of unsteady aerodynamic based on unstructured dynamic grid. [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)