

一种基于流场物理信息的CFD网格密度优化方法

刘江, 曾志勇

引用本文

刘江, 曾志勇. 一种基于流场物理信息的CFD网格密度优化方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(11A): 230200019-8.

LIU Jiang, ZENG Zhiyong. CFD Mesh Density Optimization Method Based on Characteristic Flow Distributions [J]. Computer Science, 2023, 50(11A): 230200019-8.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于字频差算法与左切分词库构建的专利文献组件名称识别方法](#)

Recognition Method of Component Names in Patent Documents Based on the Algorithm of Word Frequency Difference and Library of Left-segmentation Words

计算机科学, 2023, 50(7): 229-236. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500068>

[基于GPU的并行DILU预处理技术](#)

GPU-based Parallel DILU Preconditioning Technique

计算机科学, 2022, 49(6): 108-118. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210300259>

[基于眼前节相干光断层扫描成像的核性白内障分类算法](#)

Classification Algorithm of Nuclear Cataract Based on Anterior Segment Coherence Tomography Image

计算机科学, 2022, 49(3): 204-210. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201100085>

[OpenFoam中多面体网格生成的MPI + OpenMP混合并行方法](#)

Hybrid MPI+OpenMP Parallel Method on Polyhedral Grid Generation in OpenFoam

计算机科学, 2022, 49(3): 3-10. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700060>

[基于用户兴趣词典和LSTM的个性化情感分类方法](#)

User Interest Dictionary and LSTM Based Method for Personalized Emotion Classification

计算机科学, 2021, 48(11A): 251-257. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201200202>

一种基于流场物理信息的 CFD 网格密度优化方法

刘江^{1,2} 曾志勇¹

1 重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065

2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 重庆 400722

(liujiang@cigit.ac.cn)

摘要 CFD 计算网格的生成及优化技术是计算流体力学数值计算的关键技术之一,很大程度上决定了数值计算的最终精度及计算效率。CFD 模拟实际工程问题所采用的网格规模可达千万级别,在给定的计算时间内获得更高的数值计算精度,是当前 CFD 急需发展的关键技术。已有研究表明,不同类型的流场误差产生的主要区域与其特征物理量的梯度正相关。有鉴于此,提出了一种基于流场物理信息的网格密度优化方法,使用该方法以及 OpenFOAM 与 cfMesh 工具对不可压缩流体案例、燃烧流案例和多相流案例分别进行数值计算。实验结果表明,对于具有不同特征的案例,基于所提方法优化的网格均能够在计算时长差别不大的情况下,比较明显地提升计算精度。

关键词: CFD; 网格优化; 特征物理量; OpenFOAM

中图分类号 TP311

CFD Mesh Density Optimization Method Based on Characteristic Flow Distributions

LIU Jiang^{1,2} and ZENG Zhiyong¹

1 School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400722, China

Abstract The generation and optimization of CFD mesh is a key technology in numerical computation of CFD, which significantly determines the final accuracy and efficiency of numerical simulation. The scale of the mesh used in CFD simulation of practical engineering problems can be tens of millions. How to obtain higher numerical accuracy within a given calculation time is a key technology urgently needed to develop CFD. It is shown that the errors of numerical simulation are positively correlated with the gradients of their characteristic physical quantities. In this paper, a mesh density optimization method based on the gradients of characteristic flow distributions is proposed. The mesh density optimization method, the OpenFOAM and cfMesh tools are used to simulate an incompressible fluid, a combustion flow, and a multiphase flow. Simulation results show that for various cases with different characteristics, the optimized mesh by the proposed method can significantly improve the calculation accuracy within almost same calculation time.

Keywords CFD, Mesh optimization, Characteristic physical quantity, OpenFOAM

1 引言

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是一种以计算机为工具,通过对流场区域进行网格划分,并使用各种数值方法计算流场中物理量分布的方法^[1]。与大多数物理实验相比,CFD 具有更少的人力资源消耗,价格便宜以及可重复性等优点^[2]。网格技术是制约 CFD 发展的关键技术之一,因此高效且高精度的网格的生成及优化技术也是近年来国内外 CFD 学者的主要研究目标之一^[3]。

网格生成及优化技术,对 CFD 数值模拟过程的精度及求解时间有着至关重要的影响。网格划分得过密,会导致求解

时间过长;网格划分得过于稀疏,会导致计算结果存在较大误差^[4]。因此,研究相对高效且满足精度要求的网格生成和优化技术是一项巨大的挑战。迄今为止,科学界提出了各种基于不同思想的网格生成及优化方法。Laplacian^[5]平滑根据邻域节点的位置加权平均完成顶点移动,平滑速度快,但优化能力有限。超限插值法^[6]将内部节点的位移简单计算为边界节点位移乘以比例因子,计算效率很高,但鲁棒性较差,并且只适用于结构性网格。Zhao^[7]提出单独通过距离最近的边界节点计算内部节点位移的方法,该方法将内部节点的位移设置为与之对应的边界节点位移和间距的函数,能够将边界变形传递到远场区域。径向基函数插值法^[8]通过边界节点位移计

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0116704);中国科学院科技服务网络计划区域重点项目(KFJ-STQ-QYZD-2021-01-001);国家自然科学基金(61672488);雷达资料同化关键技术及数值预报客观订正技术研究(E190600801)

This work was supported by the National Key R & D Program of China(2018YFC0116704), Science and Technology Service Network Initiative(KFJ-STQ-QYZD-2021-01-001), National Natural Science Foundation of China(61672488) and Research on Key Techniques of Radar Data Assimilation and Objective Correction of Numerical Forecast(E190600801).

通信作者:曾志勇(mailzengzhiyong@gmail.com)

算得出其余节点的网格变形位移。Delaunay 背景网格插值法^[9]在计算区域内生成 Delaunay 背景网格,通过背景网格的位移直接映射得到内部节点位移。相比于径向基函数插值法, Delaunay 背景网格插值法适用于简单边界变形。但对于复杂边界变形问题, Delaunay 背景网格插值法会产生网格单元重叠问题^[7]。以上这些方法各有千秋,同时拥有较高计算精度和较少计算时间的网格优化方法是 CFD 数值模拟的一个巨大挑战。

通过研究流场的特征物理量发现,在不同类型的案例中,数值模拟误差与案例的特征物理量梯度成正相关关系^[10-11]。例如,在燃烧流案例中,数值模拟误差主要来自于温度梯度较大的区域^[12];在多相流案例中,数值模拟的误差主要来自于两相的界面处,即密度梯度较大的区域^[13]。基于此,本文提出一种基于流场物理信息的网格密度优化方法,使得网格依据流场特征物理量梯度自适应优化,在特征物理量梯度较大的区域分布更多的网格,从而降低计算误差。本文基于 OpenFOAM 及 cfMesh 软件实现网格的生成及优化过程,利用 OpenFOAM 案例目录下的 smallPoolFire 案例、multiphasePipeFlow 案例以及 propeller 案例进行数值模拟。实验结果表明,本文提出的方法能够在保证网格质量基本不变的情况下,降低计算误差,其计算精度约为 6~9 倍网格数量的计算精度。

2 基础知识

2.1 网格质量度量

大量数值模拟实验结果表明,网格质量对数值模拟精度有着重要的影响,网格质量较好有助于加快数值计算收敛速度,提升数值计算精度^[14]。网格的质量评判标准不是唯一的,主流数值模拟网格生成商业软件 ICM-CFD 中对网格的质量检测在于网格单元顶点体积的计算^[15]。软件 Gridgen 对网格质量的检测也会涉及网格单元顶点体积的计算。与 ICM-CFD 软件中网格质量检测方法不同的是, Gridgen 软件在计算出顶点体积后,再依据其顶点体积计算出网格单元的体积^[16]。

开源软件 OpenFOAM 采用非正交性、扭曲度和非均匀度对网格质量进行评判,如图 1 所示,其定义^[17]如下。

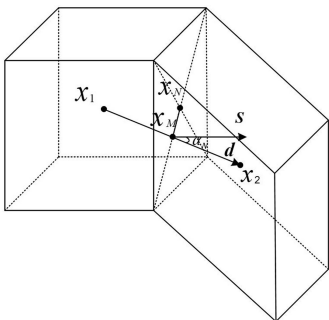


图 1 非正交性、扭曲度和非均匀度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-orthogonality, distortion and non-uniformity

(1)非正交性

非正交性是网格界面法向量与相邻网格形心连线间的夹角,用 α_N 表示:

$$\alpha_N = \arccos \frac{\mathbf{d} \cdot \mathbf{s}}{|\mathbf{d}| \cdot |\mathbf{s}|} \quad (1)$$

其中, \mathbf{s} 为两相邻网格交面的法向矢量, \mathbf{d} 为相邻网格形心连线矢量,其方向由小体积网格指向大体积网格。 α_N 尽可能等于 0,当 $\alpha_N = 0$ 时,网格的非正交性最好。

(2)扭曲度

当两相邻网格的形心连线不经过两网格交面的形心时,网格具有一定的扭曲度。扭曲度 ψ 的定义为:

$$\psi = \frac{|x_M x_N|}{|\mathbf{d}|} \quad (2)$$

其中, $|x_M x_N|$ 表示两相邻网格公共面形心与形心连线同公共面的交点之间的距离。当扭曲度 $\psi = 0$ 时,网格扭曲度最好。

(3)非均匀度

非均匀度是衡量网格均匀性的一种度量方式,记为 f_x 。其定义如下:

$$f_x = \frac{|x_i x_M|}{|\mathbf{d}|} \quad (3)$$

其中, $|x_i x_M|$ 表示网格形心与形心连线同公共面的交点之间的距离(图 1 中, $i=1,2$)。当 $f_x = 0.5$ 时,网格的非均匀度最好。

为了方便对网格点密度分布自适应程度进行衡量,引入 GVR(Gradient to Volume Ratios)来表示网格单元几何中心处的特征物理量梯度与该网格单元的体积之比。给定网格单元 V_i ,在 V_i 上关于特征物理量 ϕ 的 GVR 定义如下:

$$GVR(\phi, V_i) = \frac{\nabla \phi_{V_i}}{vol(V_i)} \quad (4)$$

其中, $vol(V_i)$ 表示网格单元 V_i 的体积, $\nabla \phi_{V_i}$ 表示网格单元 V_i 的几何中心处的特征物理量的梯度,其计算格式采用高斯-格林梯度,计算公式如下:

$$\nabla \phi_{V_i} = \frac{1}{V} \sum_{f \in F(V_i)} \phi_f S_f \quad (5)$$

其中, f 代表网格单元 V_i 的某个界面, $F(V_i)$ 是网格单元 V_i 所有界面构成的集合, S_f 是界面 f 的表面向量, ϕ_f 表示界面 f 几何中心处的特征物理量。使用式(6)定义的方差 $\sigma^2(GVR(\phi))$ 来度量网格密度的分布与特征物理量梯度的契合度。

$$\sigma^2(GVR(\phi)) = \frac{\sum_{0 < i \leq N} (GVR(\phi, V_i) - \overline{GVR(\phi)})^2}{N} \quad (6)$$

其中, $\overline{GVR(\phi)} = \frac{\sum_{0 < i \leq N} GVR(\phi, V_i)}{N}$, N 表示网格单元的数量。

当 $\sigma^2(GVR(\phi))$ 越小时,表示网格的密度与特征物理量梯度的契合程度越高。

2.2 自适应网格

网格是 CFD 的基础,其单元数量、分布和形状等因素对数值模拟的精度都可能产生重要影响^[18]。然而在解决实际问题时,往往面对的是非定常问题,生成适用于全计算过程的初始网格是很难做到的。若采用非常密的均匀网格又会造成计算资源的巨大浪费,因为流场通常仅在某些局部区域会产生较大的梯度,在这些区域加密网格就可以大幅降低全局的计算误差。自适应网格根据流场的物理信息建立适应于该流场的网格,以保证数值模拟的精度,并提高求解效率^[19]。

大约从 20 世纪 70 年代开始,网格自适应相关的研究工作开始逐步兴起,如图 2 所示,其主要实现途径可分为两大类。

(1)h-type^[20],即加密与稀疏网格单元。h-type 自适应网格优化是通过在流场中自适应地调整网格单元的尺寸和密度来适应流场的特征。它通过增加或减小网格单元的数量和

尺寸,使网格更加密集或稀疏,以捕捉流场中的流动现象。具体而言,h-type自适应网格优化的过程是根据预先定义的误差控制策略,评估当前的网格划分的精度,并根据误差分布情况自适应地调整网格单元的大小和数量^[21]。

(2)r-type^[22],即移动网格法。r-type自适应网格优化是一种常用的自适应网格技术,它通过移动网格节点的位置来适应流体的运动并提高计算精度。r-type自适应网格优化具有较好的适应性,可以很好地适应不同的流动现象,包括湍流、分离流和旋涡等。此外,相对于其他自适应网格方法,r-type自适应网格优化具有计算量较小的优点。然而,r-type自适应网格优化也存在一些缺点。例如,它可能会导致网格失衡和奇异性问题,而且相对于h-type自适应网格优化,它的适应性有一定的限制,不适用于某些复杂的流动情况。

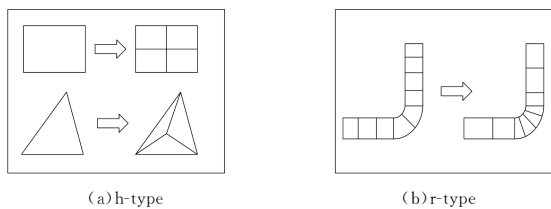


图2 h-type 自适应和 r-type 自适应
Fig. 2 h-type adaptive and r-type adaptive

3 基于流场物理信息优化网格密度

3.1 网格密度对数值模拟的影响

CFD的模拟就是用计算机数值方法,求解控制流体运动的包含初边值问题的偏微分方程^[23]。若不考虑模型误差,数值计算中代入的误差主要为“用有穷表示无穷而产生的截断误差”^[24]。

CFD计算实质上是将连续的初边值问题离散化,转化为离散的初边值问题。常见的离散方法有有限元、有限体积、有限差分等,理论上都是网格数越多,结果越接近真值。当网格无限多且无限小时,差分方程将变成精确的理论解^[25]。

实际上,网格不可能无限制加密。主要的问题有:首先,网格越密,则计算量越大,计算周期也越长,通常计算资源总是有限的;其次,随着网格的加密,为了计算的收敛时间步长也必须减小^[26]。

在文献^[27]中的继电器内部剖流案例中,作者研究了继电器出口相对静压随网格数的变化。从实验结果来看,出口相对静压随着网格数量的增加逐步趋近于理论值,但其计算花费时长也随着网格数增加而增加。因此,如何兼顾计算精度和计算时间,是本文所需解决的问题。

3.2 网格点位移

特征物理量梯度通常能够较好地表征流动特征。一般情况下,多相流案例中的两相交界面处、燃烧流案例的外焰区域、不可压缩流动的激波及紊流区域产生的计算误差较大,对应区域的特征物理量梯度较大。特征物理量梯度和计算误差成正相关关系,为了兼顾计算精度和计算效率,我们希望在误差大的区域分布更多网格点,误差小的区域分布更少网格点。因此,本文提出如下网格点移动策略:遍历每个内部网格点,依据特征物理量梯度对网格点进行自适应调整。

如图3所示,假设网格 M 中存在一节点 m ,节点 n_1, n_2, n_3 为节点 m 的相邻节点,节点 m 的位移受到周围各节点的

位移及周边压力梯度的影响,因此节点 m 与其相邻节点 n 的位移矢量关系式为:

$$\vec{r}_{m,k} = \frac{\sum_{n=1}^R |\nabla\phi_{mn}| \vec{r}_{n,k}}{\sum_{n=1}^R |\nabla\phi_{mn}|} \quad (7)$$

其中 $\vec{r}_{m,k}$ 和 $\vec{r}_{n,k}$ 分别为第 k 轮迭代的网格 M_k 上的网格点 m 的位移矢量和网格点 n 的位移矢量, R 表示与网格点 m 相邻的网格点数量, $\nabla\phi_{mn}$ 为节点 m 和节点 n 之间的特征物理量梯度。因此,节点 m 移动前后的位置关系为:

$$x_m' = x_m + \vec{r}_m \quad (8)$$

其中, x_m 和 x_m' 分别表示节点 m 在位置调整前后的坐标。

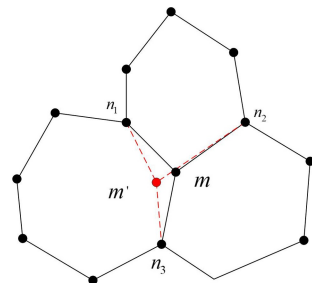


图3 内部网格点空间位置重分配
Fig. 3 Reallocation of internal mesh points

3.3 基于特征物理量梯度优化网格

本文依据特征物理量梯度来进行网格密度优化。网格节点位移的基本方式为如式(8)所示。网格优化过程的基本步骤如下:

(S1)给定一套初始网格 M_0 以及对应流场上的物理量分布 $f_0(M_0)$;

(S2)计算网格 M_0 的特征物理量梯度方差 $\sigma^2(GVR)_0$;

(S3)从 $k=0$ 开始,为 M_k 的每个内部网格点 m 构建多面体单元的子系统,并计算内部网格点 m 与其相邻网格点 n 组成的边上的特征物理量梯度 $\nabla\phi_{mn}$;由网格点构建的多面体单元子系统指的是包括网格 M_k 中的目标网格点 m 在内以及所有与目标网格点 m 邻接的网格点 n 共同组成的子系统,该子系统用以计算网格点 m 附近的特征物理量梯度 $\nabla\phi_{mn}$,其计算公式如下:

$$\nabla\phi_{mn} = \frac{\phi_m - \phi_n}{d_{mn}} \quad (9)$$

其中, ϕ_m 和 ϕ_n 分别表示网格点 m 及其相邻网格点 n 处的特征物理量; d_{mn} 表示网格点 m 和网格点 n 之间的距离; $\nabla\phi_{mn}$ 表示网格点 m 和网格点 n 之间的特征物理量梯度。

(S4)依据(S3)中计算出的特征物理量梯度 $\nabla\phi_{mn}$,根据式(7)计算出每个内部网格点 m 在第 k 轮迭代中的位移矢量 $\vec{r}_{m,k}$;

(S5)依据(S4)中的计算结果,根据式(8)更新网格,得到 M_{k+1} ;

(S6)依据更新前网格 M_k 上的物理量分布 $f_k(M_k)$ 插值计算更新后的网格 M_k 上的物理量分布 $f_{k+1}(M_{k+1})$ 。计算网格 M_{k+1} 的特征物理量梯度方差 $\sigma^2(GVR)_{k+1}$,判断网格是否满足终止条件,若满足,则根据终止条件输出网格 $M^* = M_k$ 或 $M^* = M_{k+1}$,以及流场分布 $f^*(M^*) = f_k(M_k)$ 或 $f^*(M^*) = f_{k+1}(M_{k+1})$,停止迭代;否则令 $k = k + 1$,并跳转至步骤(S3)。

网格 M_k 及其网格上的物理量分布 $f_k(M_k)$ 来插值计算

更新之后的网格 M_{k+1} 上的物理量分布 $f_{k+1}(M_{k+1})$ 。对于网格上的网格点 m , 存在两种基本情况:

(C1) 若网格 M_{k+1} 上的点 m 恰好与 M_k 上的网格点 n 重合, 则:

$$f_{k+1}(m) = f_k(n) \quad (10)$$

其中, $f_{k+1}(m)$, $f_k(n)$ 分别表示网格 M_{k+1} 上的网格点 m 和网格 M_k 上的网格点 n 上的物理量。

(C2) 若网格 M_{k+1} 上的点 m 与 M_k 上的网格点 n 不重合, 则:

$$f_{k+1}(m) = \frac{\sum_{n=1}^N \omega_{mn} f_k(n)}{\sum_{n=1}^N \omega_{mn}} \quad (11)$$

其中, $f_k(n)$ 表示网格 M_k 上的网格点 n 处的物理量; n 表示 \overline{ab} 所属的两个网格中用以加权计算 $f_{k+1}(m)$ 的网格点, 根据情况不同, 所取得点也不同, 具体情况见下述 (a) (b) 两种情况; N 表示网格边 \overline{ab} 所属的两个网格的网格点数量; ω_{mn} 表示加权平均的权重, 其计算公式为:

$$\omega_{mn} = \frac{1}{d_{mn}} \quad (12)$$

其中, d_{mn} 表示网格点 m 和网格点 n 之间的距离。

(C2. a) 若网格 M_{k+1} 上的点 m 恰好落在网格 M_k 的网格边 \overline{ab} 上, 其中, a, b 为网格 M_{k+1} 上相邻的两个网格点, 则存在以下两种情况:

① 网格边 \overline{ab} 上存在悬挂节点。悬挂节点指的是位于网格边上的点, 图 4 给出了悬挂节点的几种情况。

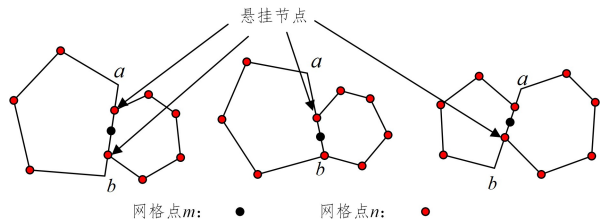


图 4 悬挂节点的 3 种情况
Fig. 4 Three cases of hanging nodes

M_{k+1} 上的网格点 m 点的物理量 $f_{k+1}(m)$ 计算公式见式 (11), 其中 n 表示两个网格中除开公共边上的网格点以外的网格点以及公共边上网格点 m 两侧距离 m 最近的网格点 (图 4 中红色节点)。

② 网格边 \overline{ab} 上不存在悬挂节点。如图 5 所示, 网格点 m 的物理量 $f_{k+1}(m)$ 计算公式见式 (11), 其中 n 表示网格边 \overline{ab} 所属的两个网格上网格点 (图 5 中红色点)。

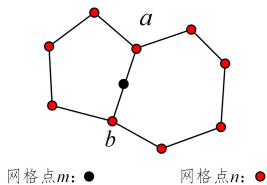


图 5 不存在悬挂节点的情况
Fig. 5 There are no suspended nodes

(C2. b) 若 M_{k+1} 上的网格点 m 落在网格 M_k 的某一个网格内, 如图 6 所示, m 点的物理量 $f_{k+1}(m)$ 计算公式见式 (11), 其中 n 表示网格点 m 在 M_k 中所属网格的网格点 (图 6 中红色节点)。

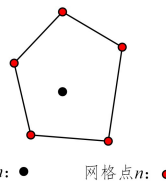


图 6 网格点 m 落在某一网格内的情况
Fig. 6 Grid point m falls within a grid

插值计算完 M_{k+1} 上所有网格点坐标后, 计算 M_{k+1} 上的物理量分布 $f_{k+1}(M_{k+1})$ 。该算法利用特征物理量梯度进行优化, 其流程伪代码如算法 1 所示。

算法 1 基于特征物理量梯度的网格密度优化方法

```

输入:  $M_0, f_0(M_0)$ 
输出:  $M^*, f^*(M^*)$ 
1.  $\sigma^2(\text{GVR})_0 \leftarrow \frac{\sum(\text{GVR} - \overline{\text{GVR}})^2}{N}$ 
2.  $k \leftarrow 0$ 
3. do  $\nabla P_{mn} \leftarrow \frac{P_m - P_n}{d_{mn}}$ 
4.  $\vec{r}_{m,k} \leftarrow \frac{\sum_{n=1}^R |\nabla \phi_{mn}| \vec{r}_{mn}}{\sum_{n=1}^R |\nabla \phi_{mn}|}$ 
5.  $x_{m,k-1} \leftarrow x_{m,k-1} + \vec{r}_{m,k}$ 
6. Update  $M_k$  to  $M_{k+1}$ 
7. Update  $f_k(M_k)$  to  $f_{k+1}(M_{k+1})$ 
8.  $k \leftarrow k + 1$ 
9. while  $(\sigma^2(\text{GVR})_{k+1} \geq \sigma^2(\text{GVR})_k \& \& \sigma^2(\text{GVR})_{k+1} - \sigma^2(\text{GVR})_k \leq \epsilon_q) \vee (\sigma^2(\text{GVR})_{k+1} < \sigma^2(\text{GVR})_k)$ 
10. if  $\sigma^2(\text{GVR})_{k+1} \geq \sigma^2(\text{GVR})_k \& \& \sigma^2(\text{GVR})_{k+1} - \sigma^2(\text{GVR})_k \leq \epsilon_q$ 
    then
11.  $M^* \leftarrow M_{k+1}$ 
12.  $f^*(M^*) \leftarrow f_{k+1}(M_{k+1})$ 
13. else if  $\sigma^2(\text{GVR})_{k+1} < \sigma^2(\text{GVR})_k$  then
14.  $M^* \leftarrow M_k$ 
15.  $f^*(M^*) \leftarrow f_k(M_k)$ 
16. end if

```

3.4 动态优化网格

动网格技术指在计算过程中, 网格随着计算过程的推进进行改变, 以适应各种复杂的流动过程。也就是说, 网格的变形依赖于上一步的计算结果。本文采用动网格技术, 借助 OpenFOAM 工具进行计算, 其基本步骤如下。

(1) 给定初始网格 M^0 , 以及对流场区域的物理量分布 $f^0(M^0)$ 。

(2) 从时间迭代步 $timeStep = 1$ 开始, 计算此时的流场物理量分布 $f^{timeStep}(M^{timeStep})$;

(3) 若此时 $timeStep < endTimeStep$, 则执行步骤 (4), 否则计算停止;

(4) 计算特征物理量梯度方差 $\sigma^2(\text{GVR})_{timeStep}$, 若此时方差大于设置阈值, 即 $\sigma^2(\text{GVR})_{timeStep} > \sigma^2(\text{GVR})_{\epsilon_q}$, 执行算法 1, 对网格进行优化。

(5) 令 $timeStep = timeStep + 1$, 跳转至 (2)。

该算法流程的伪代码如算法 2 所示。

算法 2 基于 GVR 的动网格方法

```

输入:  $M^0, f^0(M^0)$ 
输出:  $f(M)$ 

```

1. timeStep \leftarrow 1
2. while timeStep $<$ endTimeStep then
3. calculate $f^{\text{timeStep}}(M^{\text{timeStep}})$
4. calculate GVR^{timeStep}
5. if $\sigma^2(GVR)^{\text{timeStep}} > \sigma^2(GVR)_{\epsilon_q}$ then
6. Algorithm1
7. end if
8. timeStep \leftarrow timeStep + 1S
9. end while

该算法利用动网格思想对网格进行优化,以使得在计算过程中网格与特征物理量梯度契合程度较好。在CFD数值模拟中,对于非稳态案例的计算,通常将时间段划分为若干个 Δt ,计算过程随着时间依次向后迭代。在计算完一个 Δt 的结果后,对此时的网格 $\sigma^2(GVR)$ 进行计算,若此时的 $\sigma^2(GVR)$ 不满足阈值,则执行Algorithm 1对网格 $\sigma^2(GVR)$ 进行优化,若满足,则直接进入下一 Δt 的流场计算。

4 数值实验

本文采用OpenFOAM对螺旋桨案例、甲烷燃烧案例和实验和气流两相流案例进行数值实验,其分别代表不可压缩流案例、燃烧流案例和多相流案例3类不同类型的案例。实验均采用OpenFOAM中的snappyHexMesh工具生成初始网格,通过工具cfMesh实现本文所述的优化网格方法。实验采用的OpenFOAM版本为OpenFOAM-9,cfMesh版本为cfMesh-v1.1.2,实验采用的硬件配置为CPU:11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11370H @ 3.30 GHz(3302 MHz)。

4.1 螺旋桨案例

首先通过螺旋桨案例实验验证本文方法对不可压缩流的优化效果。本案例采用压力梯度对网格进行自适应优化,实验案例目录为\tutorials\multiphase\interFoam\RAS\pB-Gropeller,其压力云图如图7所示,流场和求解器的部分参数如表1所列。

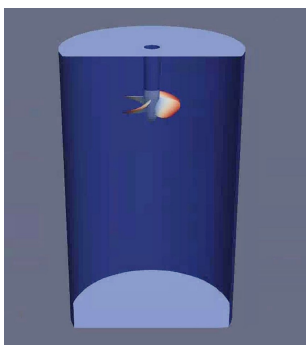


图7 螺旋桨案例压力场

Fig. 7 Propeller case pressure field

表1 螺旋桨案例中的流场及求解器部分参数

Table 1 Flow field and solver parameters in propeller case

初始网格数量/万	流体粘性系数	螺旋桨角速度/(rad/s)	求解器	时间步长
约18	1×10^{-6}	158	interFoam	1×10^{-5}

将由snappyHexMesh生成的初始网格、本文提出的基于压力梯度优化(GVR)后的网格,以及3套对初始网格加密后的网格分别用于案例计算。由于案例没有解析解,因此本文采用加密网格3的计算结果作为数值模拟的参考基准,实验

所采用的网格数量及计算时间($TimeStep = 100$)如图8所示,平均压力误差和平均速度误差如图9所示。

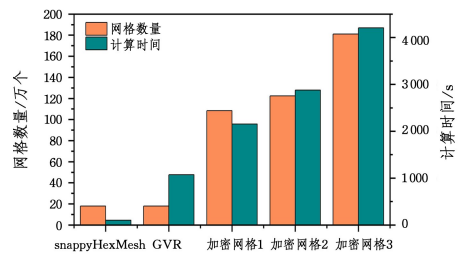


图8 螺旋桨案例网格数量及计算时间

Fig. 8 Number of propeller case grids and calculation time

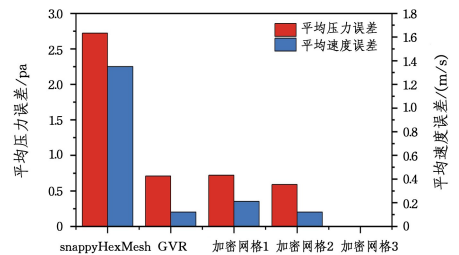


图9 螺旋桨案例计算误差

Fig. 9 Propeller case calculation error

本案例初始网格约为18万,根据图8和图9,加密网格1的平均压力误差与本文方法GVR的平均压力误差接近,加密网格2的平均速度误差与本文方法GVR的平均速度误差接近,但是GVR方法的计算时间均比这两套网格少。与初始网格snappyHexMesh生成的初始网格相比,GVR方法能够大幅降低计算误差。GVR方法和snappyHexMesh方法的网格数量相同,但是计算时间比snappyHexMesh方法多1046.9s,这部分时间消耗主要是由于网格迭代调整。根据实验结果,本文优化方法对可压缩流案例优化效果明显。

4.2 甲烷燃烧案例

接下来通过甲烷燃烧案例实验验证本文方法对燃烧案例的优化效果,本案例采用温度梯度对网格进行自适应优化,实验案例目录为\tutorials\combustion\buoyantReactingFoam\RAS\smallPoolFire,其温度云图如图10所示,流场和求解器的部分参数如表2所列。

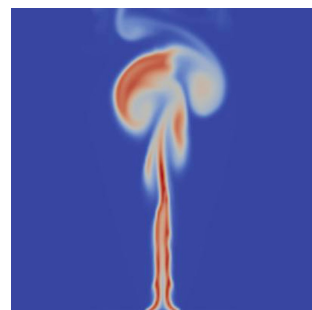


图10 甲烷燃烧案例温度场

Fig. 10 Methane combustion case temperature field

表2 甲烷燃烧案例的计算时间及平均误差

Table 2 Calculation time and mean error of methane combustion cases

初始网格数量/万	氧气含量/%	氮气含量/%	求解器	时间步长
约2.2	23.3	76.7	Buoyant Reacting Foam	1×10^{-3}

将由 snappyHexMesh 生成的初始网格、本文提出的基于温度梯度优化(GVR)后的网格,以及 3 套对初始网格加密后的网格分别用于案例计算。由于案例没有解析解,因此本文采用加密网格 3 的计算结果作为数值模拟的参考基准,实验所采用的网格数量及计算时间($TimeStep = 17$)如图 11 所示,平均温度误差和平均速度误差如图 12 所示。

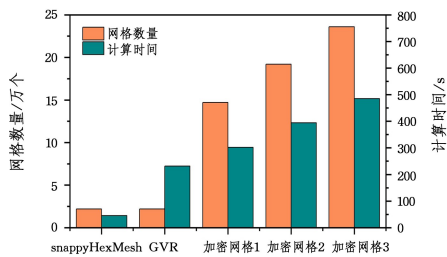


图 11 甲烷燃烧案例网格数量及计算时间

Fig. 11 Methane combustion case grid number and calculation time

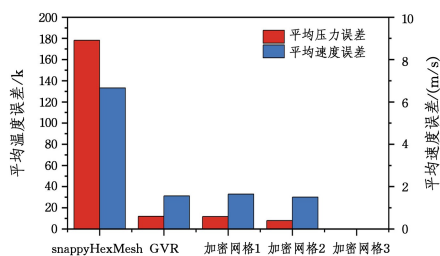


图 12 甲烷燃烧案例计算误差

Fig. 12 Methane combustion case calculation error

本案例初始网格约为 2.2 万,根据图 11 和图 12,加密网格 1 的平均温度误差与本文方法 GVR 的平均温度误差接近,加密网格 2 的平均速度误差与本文方法 GVR 的平均速度误差接近,但是 GVR 方法的计算时间均比这两套网格少。与初始网格 snappyHexMesh 生成的初始网格相比,GVR 方法能够大幅降低计算误差。GVR 方法和 snappyHexMesh 方法的网格数量相同,但是计算时间比 snappyHexMesh 方法多 186.0s,这部分时间消耗主要是由于网格迭代调整。根据实验结果,本文优化方法对燃烧案例优化效果明显。

4.3 气液两相管流案例

本节通过气液两相管流案例实验验证本文方法对多相流案例的优化效果,本案例采用密度梯度对网格进行自适应优化,实验案例目录为:\tutorials\multiphase\interFoam\laminar\multiphase\PipeFlow,其密度云图如图 13 所示,流场和求解器的部分参数如表 3 所列。

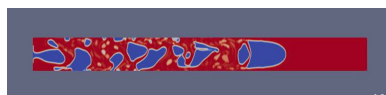


图 13 气液两相管流案例示意图

Fig. 13 Gas-liquid two-phase pipe flow case diagram

表 3 气液两相管流案例的流场及求解器部分参数

Table 3 Flow field and partial parameters of solver in gas-liquid two-phase pipe flow case

初始网格数量/万	气体粘性系数	液体粘性系数	入口速度	求解器	时间步长
约 3.7	1.5×10^{-5}	1×10^{-6}	(1,0,0)	interFoam	2×10^{-3}

将由 snappyHexMesh 生成的初始网格、本文提出的基于

密度梯度优化(GVR)后的网格,以及 3 套对初始网格加密后的网格分别用于案例计算。由于案例没有解析解,因此本文采用加密网格 3 的计算结果作为数值模拟的参考基准,实验所采用的网格数量及计算时间($Time = 17$)如图 14 所示,平均温度误差和平均速度误差如图 15 所示。

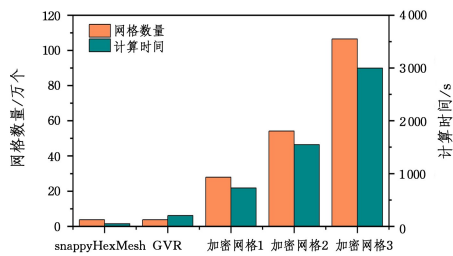


图 14 气液两相管流案例网格数量及计算时间

Fig. 14 Case grid number and calculation time of gas-liquid two-phase pipe flow

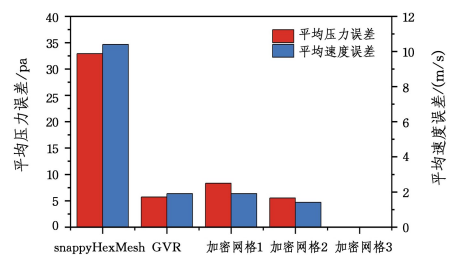


图 15 气液两相管流案例计算误差

Fig. 15 Gas-liquid two-phase pipe flow case calculation error

本案例初始网格约为 3.7 万,根据图 14 和图 15,加密网格 1 的平均压力误差与本文方法 GVR 的平均压力误差接近,加密网格 2 的平均速度误差与本文方法 GVR 的平均速度误差接近,但是 GVR 方法的计算时间均比这两套网格少。与初始网格 snappyHexMesh 生成的初始网格相比,GVR 方法能够大幅降低计算误差。GVR 方法和 snappyHexMesh 方法的网格数量相同,但是计算时间比 snappyHexMesh 方法多 187.9s,这部分时间消耗主要是由于网格迭代调整。根据实验结果,本文优化方法对燃烧案例优化效果明显。

4.4 网格质量变化

为了分析基于流场物理量梯度优化网格方法对网格质量的影响,统计本文实验的 3 个案例中网格优化前后的非正交性、非均匀度以及扭曲度,如表 4—表 6 所列。

表 4 螺旋桨案例网格质量变化

	非正交性	扭曲度	非均匀度
初始网格	14.89	0.21	0.47
优化后网格	13.25	0.18	0.38

表 5 甲烷燃烧案例网格质量变化

	非正交性	扭曲度	非均匀度
初始网格	7.68	0.28	0.43
优化后网格	7.32	0.31	0.35

表 6 气液两相管流案例网格质量变化

	非正交性	扭曲度	非均匀度
初始网格	3.24	0.25	0.45
优化后网格	3.51	0.23	0.42

根据实验数据,3个案例的非正交性、扭曲度优化前后变化不大,非均匀度有小幅度的提升。总体来说,本文方法对网格质量影响不大。

统计网格优化过程中3个案例的特征物理量梯度方差变化,其变化过程如图16所示。

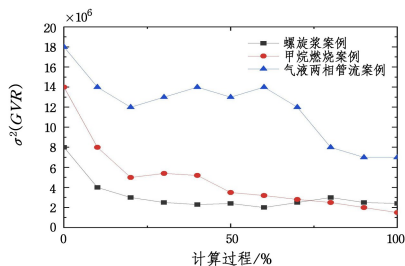


图16 $\sigma^2(GVR)_0$ 变化过程

Fig. 16 $\sigma^2(GVR)_0$ change process

根据实验数据可以看出,螺旋桨案例和甲烷燃烧案例的 $\sigma^2(GVR)_0$ 基本成下降趋势,但是气液两相流的 $\sigma^2(GVR)_0$ 出现了先上升再下降的趋势。这是因为物理规律通常要求物理量在流场中的变化是平滑的,但是在实际计算中,由于网格分辨率、数值精度及流场中的涡旋等因素的影响,有时可能会出现先上升再下降的情况。总的来说,在计算过程中,对网格的动态优化过程会使特征物理量方差最终减小。这意味着网格密度与特征物理量梯度的分布契合程度更好,即网格点分布更合理。

结束语 本文提出了一种CFD中基于流场物理信息的网格密度优化方法。该方法在保证网格数量和网格拓扑结构不变的情况下,基于流场特征物理量梯度对网格系统进行调整,使得网格的分布更加合理,误差尽可能均分到每一个网格上。本文方法对网格进行调整后,会使得网格点朝着特征物理量梯度大的区域移动,这样在误差大的区域分布更多的网格点,以减小计算误差。本文基于OpenFOAM对本文优化方法进行数值模拟实验,采用cfMesh对网格进行优化,对螺旋桨案例、甲烷燃烧案例以及气液两相管流案例分别基于压力梯度、温度梯度以及密度梯度进行调整。实验结果表明,本文提出的方法能够在保证网格质量基本不变的情况下降低计算误差,其计算精度约为6~9倍网格数量的计算精度。

基于特征物理量梯度的网格调整方法主要是对网格密度的调整,使得网格点的分布能够自适应地匹配流场物理量的分布。除此之外,网格形状对离散过程中产生的交叉扩散误差有着重要影响。因此,网格形状的自适应调整也是接下来的重要研究方向。

参考文献

[1] DOMANIN M, VERGARA C, BISSACCO D, et al. Computational fluid dynamics to assess hemodynamic forces in abdominal aortic aneurysm[J]. *Vascular and Endovascular Surgery*, 2022, 56(3): 349-349.

[2] LIAO J W, ZHANG L T, ZHOU X, et al. Improvement of dynamic mesh relaxation method based on double mesh [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(1): 37-41.

[3] WANG B J, LI H, YANG X Y, et al. Application of CFD numerical simulation technology in droplet microfluidic multiphase

flow characteristics [J]. *Chemical Industry Progress*, 2021, 40(4): 1715-1735.

- [4] YANG D, HAN J, PAN L. A method of heat exchange structure optimization of the cricoid plastic parts[J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 163(1): 301-307.
- [5] FIELD D A. Laplacian smoothing and delaunay triangulations [J]. *Communications in Applied Numerical Methods*, 1988, 4(6): 709-712.
- [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] ZHAO Y, FORHAD A. A general method for simulation of fluid flows with moving and compliant boundaries on unstructured grids[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192(39/40): 4439-4466.
- [8] SELIM M M, KOOMULLIL R. Incremental matrix inversion approach for radial basis function mesh deformation[C]// *Proceedings of the Fifteenth Annual Early Career Technical Conference*. 2015.
- [9] LIU X, QIN N, XIA H. Fast dynamic grid deformation based on delaunay graph mapping[J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 211(2): 405-423.
- [10] WANG Y, QIN N, ZHAO N. Delaunay graph and radial basis function for fast quality mesh deformation[J]. *Journal of Computational Physics*, 2015, 294: 149-172.
- [11] TANG J. Research on adaptive technology of unstructured mesh for engineering[D]. Xi'An: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [12] SEO I H, LEE H J, WI S H, et al. Validation of an air temperature gradient using computational fluid dynamics in a semi-open type greenhouse and determination of kimchi cabbage physiological responses to temperature differences[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2021, 62(5): 737-750.
- [13] HUANG M, HÖHNE T. Numerical simulation of multicomponent flows with the presence of density gradients for the upgrading of advanced turbulence models[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2019, 344: 28-37.
- [14] WANG N H, ZHANG L P, MA R, et al. Influence of unstructured mesh quality on gradient reconstruction and invisco-free flow simulation accuracy[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(5): 555-563.
- [15] DE SCHRYVER R, EL CHEIKH K, LESAGE K, et al. Numerical reliability study based on rheological input for bingham paste pumping using a finite volume approach in OpenFOAM[J]. *Materials*, 2021, 14(17): 5011.
- [16] LI Y F, WANG Y W, DU C. Performance simulation of plate heat exchanger based on ANSYS ICEM[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 546(5): 052046.
- [17] WILHELMSSEN N C A, ANFINSEN H, AAMO O M. Minimum time observer designs for $n+m$ linear hyperbolic systems with unilateral, bilateral or pointwise in-domain sensing[J]. *European Journal of Control*, 2021, 61: 50-67.
- [18] LI J, ZHU S. On distributed H1 shape gradient flows in optimal shape design of stokes flows; convergence analysis and numerical applications[J]. *Journal of Computational Mathematics*, 2022, 40(2): 232-258.

- [19] YAN C, YU J, XU J L, et al. Progress and prospect of CFD simulation methods[J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(5): 562-589.
- [20] EMILIA F, MARIASOLE B, SANDRO T. Automation technology and computer technology[J]. *China Radio Electronics Abstract*, 2010, 26(1): 152-234.
- [21] GHIASI P, NAJAFI G, GHOBADIAN B, et al. Analytical and numerical solution for H-type darrieus wind turbine performance at the tip speed ratio of below one[J]. *International Journal of Renewable Energy Development*, 2021, 10(2): 269-281.
- [22] LÖHNER R, BAUM J D. Adaptive h-refinement on 3D unstructured grids for transient problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1992, 14(12): 1407-1419.
- [23] DWYER H A. Grid adaptation for problems in fluid dynamics [J]. *AIAA Journal*, 1984, 22: 1705-1712.
- [24] LI J, ZHU S. Shape optimization of the Stokes eigenvalue problem[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2022, 45(2): A798-A828.
- [25] GRASSO G, WU H, ORESTANO S, et al. CFD-based prediction of wall-pressure spectra under a turbulent boundary layer with adverse pressure gradient [J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2021, 12(1): 125-133.
- [26] KHAYRULLINA A, VAN HOOFF T, ALANIS RUIZ C, et al. Minimum momentum flux ratio required to prevent air curtain breakthrough in case of cross-curtain pressure gradients: CFD versus analytical equation[J]. *Building Simulation*, 2020, 13(4): 943-960.
- [27] LIU M L, ZHANG S Q, LI S N. Analysis of influence of grid on CFD simulation results[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2016, 2(4): 41-47.



LIU Jiang, born in 1979, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computability theory, formal methods and computer algorithms.



ZENG Zhiyong, born in 1998, postgraduate. His main research interests include computational fluid dynamics and CFD mesh optimization.