

全自动超声速流动计算架构及实现

刘君^{1*}, 陈洁¹, 卢俊宇², 汪骥³, 徐春光²

(1. 大连理工大学 航空航天学院, 辽宁大连 116024; 2. 中山大学 航空航天学院, 广东深圳 510275;
3. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要:实现 CFD 计算流程中网格生成及计算流程的自动化,能显著提高 CFD 仿真效率,具有重要应用价值。以扎染算法为基础的全自动 CFD 模拟技术架构,实现输入实体模型后无须几何清理,即可自动生成网格、快速开始无黏超声速流场计算的功能。通过二维数值算例验证了该技术的计算精度和非结构有限体积法相当,但计算效率明显提升;开发出基于手绘模型实时开始计算的 Auto-CFD 软件,理论上能对二维任意外形进行全自动模拟计算;将该技术从二维空间推广到三维,以激光扫描汽车得到的不规则点云作为外形演示了本技术对复杂外形问题的适应能力。基于扎染算法发展的 Auto-CFD 技术架构,兼容主流差分格式,具有良好的网格适应性,有望解决现有 Auto-CFD 软件存在的技术问题。

关键词:非结构网格有限差分法;笛卡儿网格;网格生成;软件自动化;扎染算法

中图分类号:V211.3 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-083-11



论文
拓展

Automatic computing framework and implementation for supersonic flow

LIU Jun^{1*}, CHEN Jie¹, LU Junyu², WANG Ji³, XU Chunguang²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 510275, China;

3. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The process of grid generation and flow field simulation in CFD calculation can be automated to enhance the efficiency of CFD simulation, which has a great potential for applications. An Auto-CFD technology framework based on the tie-dye algorithm which can generate grids automatically and initiate inviscid supersonic flow field calculation quickly without geometry clean-up after inputting solid models. A 2D numerical example verifies that the calculation accuracy of this technology is comparable to that of the unstructured finite volume method, but with a significant improvement in calculation efficiency. An Auto-CFD software that can start the calculation in real time based on hand-drawn models was developed in theory, which can automatically simulate any two-dimensional irregular shape. The Auto-CFD technology was also extended from 2D to 3D space, and the irregular point cloud obtained by laser scanning the car was used as the solid model to demonstrate the adaptability of this technology to complex shape problems. The Auto-CFD technology framework developed based on the tie-dye algorithm is compatible with mainstream difference schemes and has good mesh adaptability, which is expected to solve the technical problems existing in existing Auto-CFD software.

Keywords: unstructured grid finite difference method; Cartesian grid; grid generation; software automation; tie-dye algorithm

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件的计算流程可分为网格生成、方程求解器和流场显示三个相互独立的模块。在这一流程中,网格生成耗费人工时间最多,可占据整个计算周期人力时间的60%左右^[1],如果还进行网格自适应等处理,会耗费多至90%人工时间^[2]。美国NASA发布的咨询报告^[3]指出,由于网格生成的

自动化程度低,CFD软件难以融入多学科设计优化(multidisciplinary design and optimization, MDAO)的工作流程,是影响CFD在航空航天领域应用效率的主要瓶颈。减少计算流程中特别是网格生成阶段人工干预,发展自动化CFD(automatic computational fluid dynamics, Auto-CFD)技术,能够显著降低CFD软件的使用门槛,

收稿日期:2022-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11872144)

*第一作者:刘君(1965—),男,内蒙古包头人,教授,博士,博士生导师,E-mail:liujun65@dlut.edu.cn

引用格式:刘君,陈洁,卢俊宇,等.全自动超声速流动计算架构及实现[J].国防科技大学学报,2025,47(1):83-93.

Citation:LIU J, CHEN J, LU J Y, et al. Automatic computing framework and implementation for supersonic flow[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 83-93.

这在工程需求中较为迫切。

目前,国外的 Auto-CFD 软件已开始商业化应用,譬如 Karalit 公司^[4]的 KARALIT CFD 软件,可以直接从计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型自动生成计算网格,并与求解器衔接,自动开始计算,显著提高了计算效率;坤道公司^[5]开发的 FloEFD 软件,具备“输入 CAD 输出 CFD”功能,可以实现导入 CAD 模型后自动计算输出气动数据;Sharc-Harpoon^[6]软件,消除网格生成所需的人工步骤,实现了网格的全自动生成,显著提高了网格处理效率。

尽管 Auto-CFD 软件取得了很大进展,但在工程应用中,特别是涉及黏性、湍流、复杂流动等问题时,常规 CFD 软件仍然占主流地位。

本文旨在研究并提出一种新的 Auto-CFD 技术,通过分析现有 Auto-CFD 软件的技术问题,结合非结构网格有限差分法和扎染算法,设计并实现了一种基于扎染算法的 Auto-CFD 框架。最后,利用数值算例对其在复杂外形应用中的适用性和稳定性进行了验证。

1 Auto-CFD 软件存在的主要技术问题

从几款主流 Auto-CFD 软件^[4-6]来看,空间采用笛卡儿网格,壁面通常采用切割单元或浸入边界进行处理。这一技术路线的优点是:空间笛卡儿网格生成简单,易于自动生成;切割单元或浸入边界法,解决了笛卡儿网格不贴体的问题。但这一技术路线也存在难以克服的困难,切割单元和浸入边界法在处理黏性、湍流等复杂流动问题时难以适应,限制了 Auto-CFD 软件的应用。

切割单元法^[7]利用物面将与其相交的笛卡儿边界网格单元切割,如图 1 所示,将边界单元分为了内、外两部分,位于物体内的网格不参与计算。切割单元形成的边界点和线构成了实际的计算边界,并通常利用插值方法,给新边界点赋值,从而将笛卡儿网格边界转换为贴体网格边界。该方法解决了笛卡儿网格无法贴体的难题,与空间笛卡儿网格相匹配,成为 Auto-CFD 软件处理边界问题的主要方法之一。

切割单元法具有较高的计算精度和适应性,获得了较为广泛的应用,但该方法也存在明显的不足。首先,相交算法需要进行复杂的查找、计算,同时切割后形成的单元大小、形状各不相同,增加了处理算法的复杂度,不利于流场收敛,降低了计算效率,甚至影响计算精度;其次,切割网格时还会产生微小单元,往往会引起刚性问题,甚至

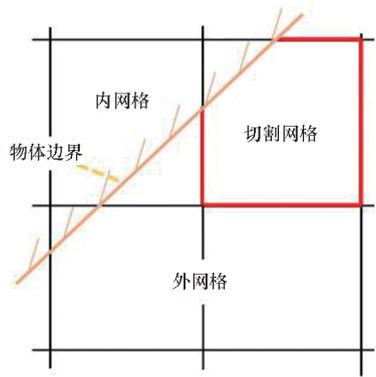


图 1 笛卡儿网格下边界上的切割单元

Fig. 1 Cut cells on boundaries in Cartesian grid

会在边界处产生非物理振荡^[8];再次,切割形成的网格单元为非结构网格,通常采用有限体积法^[9],虽然在界面附近的几何精度比较高,但其受限于有限体积法,难以发展成高阶计算方法;最后,对于黏性问题,切割单元形成的附面层网格变化极其不规则,不符合黏性附面层网格的要求^[10]。

浸入边界法由 Peskin 在 1972 年提出^[11],基本原理是把固体对流体的影响体现为加载在流体节点上的力,然后作为源项加入方程进行计算,大致可以分为两类^[12]:①显式力源法,根据物面附近流场直接预测给出分布力,并作为源项加到 N-S 方程的动量方程;②隐式力源法,采用虚拟流体点(ghost point)或虚拟单元(ghost cell)把物面附近固体内部的笛卡儿网格点也看作流动点,采用镜像原理或其他外插算法重构得到这些虚拟点的流动参数,满足多点格式的应用需求。为便于区别,文献[12]将前者称为 Immersed Body Option,后者称为 Embedded Surface Option。

浸入边界法最初用于求解不可压缩流动方程,其主要应用领域至今仍是不可压缩流动中的流固耦合问题,笛卡儿网格下浸入边界法描述如图 2 所示。几十年来,研究人员一直探索把隐式力源法拓展到可压缩流动^[13-17],但外插算法重构虚拟流体点可能增强极值导致计算发散,而镜像原理很难描述物面曲率变化对流场的影响,至今还不是非常成功。此外,该方法还存在以下问题:首先,物面附近网格通常采用各向同性加密,随着物面网格尺寸减小,网格量会显著增加,对于大尺度、复杂外形的应用,所需网格量巨大,不具有实用性;其次,无论是重构流场内的映射点参数(图 2 中的 C 点),还是对虚拟单元进行赋值(图 2 中的 B 点),通常都采用插值方法,必然会引入插值误差,进而影响边界计算精度;最后,与切割单元法相同,浸入边

界法通常也采用有限体积法进行计算,限制了高格式的应用。

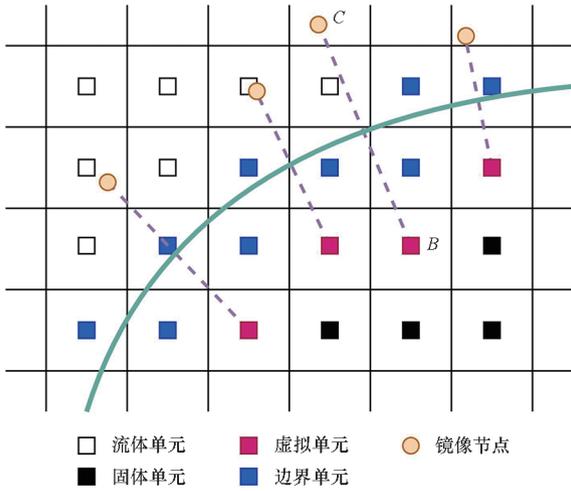


图 2 笛卡儿网格下浸入边界法描述

Fig. 2 Description of immersed boundary method under Cartesian grid

上述问题的存在,使得现有 Auto-CFD 软件在面对复杂流动问题时,无法处理或难以达到常规 CFD 软件的计算精度,限制了其在工程领域的推广应用。发展新型 Auto-CFD 技术架构,解决壁面处理中存在的问题,对于 Auto-CFD 软件的发展至关重要。下文介绍一种扎染算法,并基于该方法提出新的 Auto-CFD 技术架构。

2 基于非结构网格有限差分法的扎染算法

刘君等^[18]提出了一种基于非结构网格有限差分法的扎染算法,可以在非结构网格上应用有限差分,拓展了有限差分法的适用范围,同时为 Auto-CFD 中笛卡儿网格非贴体问题的解决提供了新思路。

2.1 非结构网格有限差分法

传统有限差分法沿着网格线离散,从物理空间 (x, y) 映射到计算空间 (ξ, η) 至少需要离散点与周围 4 个邻点连成 4 条网格线。如图 3 所示的非结构网格,离散点 0 和周围 3 个邻点只能连成 3 条网格线,无法采用传统有限差分法进行计算。非结构有限差分的原理,就是将围绕 0 点的三条线段,变换为围绕 0 点的 4 条等价线段,从而应用差分运算。

实际计算中,从物理空间到计算空间的映射系数是采用差商得到的数值解,影响数值解的是网格坐标的相对位置。例如,采用二阶中心差商求解,图 3 中 1-0-2 三点连成曲线的斜率和 1-2 两点直线段斜率一样,因此把 1-2 线段平移

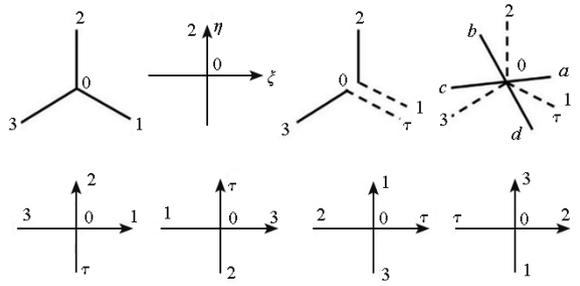


图 3 二维坐标变换对应关系^[18]

Fig. 3 Corresponding relationship of 2D coordinate transformation^[18]

到 $d-b$ 不影响斜率。同样处理 1-0-3 三点连成的曲线,得到对应的线段 $a-c$ 。围绕离散点 0 的 a, b, c, d 这 4 个点构成的网格可以得到坐标变换系数数值解,结果与 1, 2, 3 三点构成的网格是一样的。从物理空间变换到计算空间的度量系数 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ 和雅可比行列式 J 表示为:

$$\begin{cases} \hat{\xi}_x = J^{-1} \xi_x = y_\eta \\ \hat{\xi}_y = J^{-1} \xi_y = -x_\eta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \hat{\eta}_x = J^{-1} \eta_x = -y_\xi \\ \hat{\eta}_y = J^{-1} \eta_y = x_\xi \end{cases} \quad (2)$$

$$J = \left| \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} \right| = (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \quad (3)$$

其中, $x_\xi, x_\eta, y_\xi, y_\eta$ 为逆变换度量系数。

上述处理是将 0-2 映射成计算空间 η 轴的正向、0-3 映射成计算空间 ξ 轴的负向、0-1 则多重映射成计算空间 ξ 轴的正向和 η 轴的负向。实际计算中多重映射的网格线的选取以及多重映射成的坐标轴方向存在多种可能,计算中需对各映射结果进行平均。文献[18]结果表明,基于上述原理发展的非结构网格有限差分法,能将有限差分法应用到非结构网格,具有良好的适应性和计算精度,兼容目前所有的差分格式,比切割单元和浸入边界法更具普适性。

非结构网格有限差分法采用多重映射-平均的方式进行计算,不仅需要局部坐标系,而且坐标变换组合的多样性使得计算量大大增加,直接用于全场网格计算,计算量大、效率低,不具有实用价值,但该方法具有良好的灵活性,使其适用于复杂外形流场计算。为此,刘君等^[19]在非结构网格有限差分法的基础上,进一步提出了一种扎染算法,通过在空间笛卡儿网格基础上局部采用非结构网格有限差分法的策略,解决实际应用中的计算效率问题。

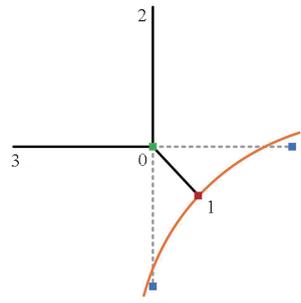
2.2 扎染算法原理介绍

为便于图形表达,本文采用二维模型介绍扎

染算法,扎染算法网格生成示意图如图 4 所示。首先,把笛卡儿背景网格节点分为三类:外部节点(位于物体外部,无标记)、内部节点(位于物体内部或表面附近点,图 4(a)中蓝色圆点)和过渡节点(有相邻节点为内部节点的外部节点,图 4(a)中绿色方点)。

对于物面附近的过渡节点,差分模板中包含内部节点,不能直接使用笛卡儿网格邻居节点进行计算。寻找与过渡节点距离最近的物面点,并进行标记,即图 4(b)中红色圆点,然后以过渡节点为中心建立局部坐标系,如图 4(b)橙色曲线。取出任意一个非结构网格有限差分法的局部坐标系,如图 4(c)所示。对于图 4(c)所示的过渡节点及其 3 条连线建立的局部坐标系,可按照非结构网格有限差分法^[18]进行计算。

扎染算法将网格点分类计算,过渡节点采用



(c) 过渡节点
(c) Transition nodes

图 4 扎染算法网格生成示意图

Fig. 4 Tie-dye algorithm grid generation schematic

前文介绍的非结构网格有限差分法;外部节点则采用传统的有限差分法直接进行计算,无须坐标变换和特殊处理。

在外部笛卡儿网格点的计算过程中,为减少逻辑判断,采用遍历整个区域所有网格点的策略,即对图中正方形区域的所有笛卡儿网格点均进行计算,不对网点类别进行判断。计算前标记网格点属性:

$$m = \begin{cases} 1 & \text{外部节点} \\ 0 & \text{其他节点} \end{cases} \quad (4)$$

在时间推进时,采用如下计算式更新节点(i, j)处的流场:

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot m_{i,j} \cdot R_{i,j} \quad (5)$$

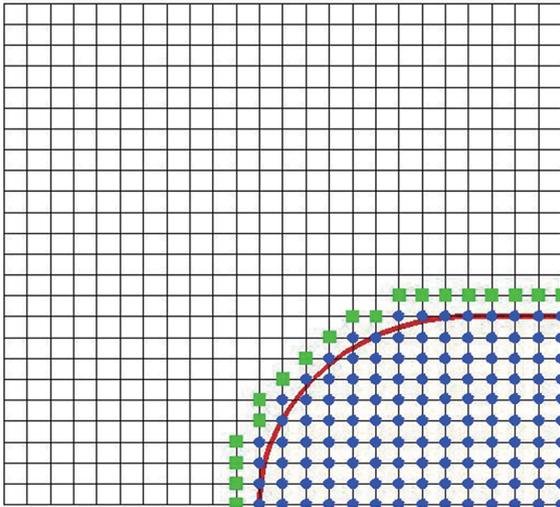
其中, U 为守恒变量, Δt 为时间步长, Δx 表示笛卡儿网格间距, R 为空间离散计算得到的残差, n 和 $n+1$ 分别表示第 n 和 $n+1$ 个迭代步。上式表明时间推进时,只更新流场中的外部节点信息,其他节点不更新。

通过上述处理,扎染算法将计算网格点分为了笛卡儿网格点和非结构过渡节点,笛卡儿网格点采用传统有限差分法,提高计算效率;非结构过渡节点采用非结构网格有限差分法,提高处理的灵活性。这一技术路线中,空间采用笛卡儿网格,生成简单,网格质量高;过渡区网格采用过渡节点与物面点直接相连的方法生成,同时非结构网格有限差分法不涉及面通量计算,即不需要生成网格面,也没有网格线不能交错的限制,显著降低了物面附近网格生成的难度,可作为一种新的 Auto-CFD 技术架构。

3 基于扎染算法的 Auto-CFD 架构

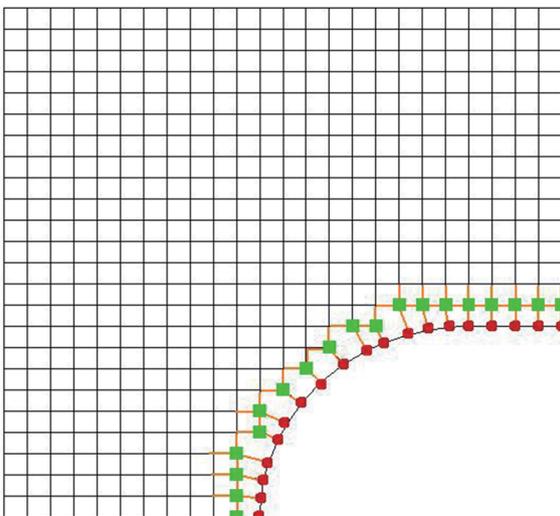
3.1 扎染算法特点

通过对扎染算法的计算原理和步骤进行深入分析,作者认为扎染算法具有发展成 Auto-CFD 的



(a) 结构网格节点标记

(a) Tag the structured grid nodes



(b) 过渡节点与边界节点

(b) Transition nodes and boundary nodes

应用潜力,分析如下:

1) 扎染算法网格采用笛卡儿背景网格加上壁面附近非结构网格,与常规算法的非结构网格或多块结构网格相比网格构造简单,生成较为容易。

2) 扎染算法和浸入边界法的网格技术非常接近,均在笛卡儿背景网格基础上实现 Auto-CFD 技术,但二者数学原理存在明显差异。显式力源法处理边界源项的算法和计算内部点的有限差分法不同,应用范围受限;隐式力源法无论是采用外插算法,还是采用镜像原理重构虚拟流体点都会引入额外误差,影响计算精度。扎染算法基于局部坐标系直接差分离散,是一种普适性的算法,不仅适用于不可压缩流动和可压缩流动的欧拉和 N-S 方程,而且在求解热传导方程和浅水波方程方面也取得了成功。

3) 浸入边界法的隐式求解算法构造困难,扎染算法兼容目前所有的差分格式,包括时间隐式算法。对于笛卡儿背景网格的隐格式,仅需调整线性方程的系数矩阵,解除空间点和过渡节点在隐式求解中的关联特性,这种编码有序的求解器是有限差分法中计算效率最高的。对于物面附近的非结构网格,可以采用成熟的下-上对称高斯-赛德尔(lower-upper symmetric-Gauss-Seidel, LU-SGS)算法^[20]进行隐式求解。

4) 在重叠网格技术中,需要在洞边界处进行流场插值,这可能引入数值误差,从而降低计算精度;而在多块拼接网格技术中,网格生成过程复杂,并且可能产生悬空点,这些点通常需要特殊处理。相比之下,扎染算法能够有效避免上述结构网格技术在应用中所面临的难题。

3.2 架构实现

扎染算法具有实现 Auto-CFD 的潜力,但目前仅实现了简单外形模拟^[19]。本文发展出以扎染算法为基础的 Auto-CFD 技术架构,实现输入实体模型,自动生成网格、开始流场计算的功能。

通过对扎染算法原理的分析,可以看出基于该算法不仅能实现自动生成网格,还可将几何网格和计算网格深度耦合,生成几何网格时即建立了计算网格数据,减少了网格转化过程。计算网格生成过程中的以下两个步骤至关重要:

1) 根据节点与几何外形的拓扑关系,将笛卡儿背景网格节点标记为外部节点、内部节点、过渡节点;

2) 求出过渡节点到几何外形最近的点,并建立非结构网格。

通过上述两步骤即可完成扎染算法计算网格的构建。针对给定的外形,只需满足以下条件即可成功建立扎染算法的计算网格:对于空间中任意一点,该外形能够明确标识其位于外形的内部或外部,并且能够确定与该点最近的物面点的位置。

CAD 模型按照几何表示,可分为网格格式和 B-Rep 格式。基于 CAD 外形自动生成网格时,需要选择合适的外形作为起点。本文所述软件能够直接基于点云外形生成网格,即输入的几何外形为点的几何坐标数据,无须对其进行排序或降噪预处理。本文以点云作为计算外形,验证本文软件自动生成网格时,不仅不要求几何外形水密,甚至不需要拓扑、连接等几何属性。以图 5 中二维图片转化的点云外形为例,对本文软件的网格生成过程进行说明。

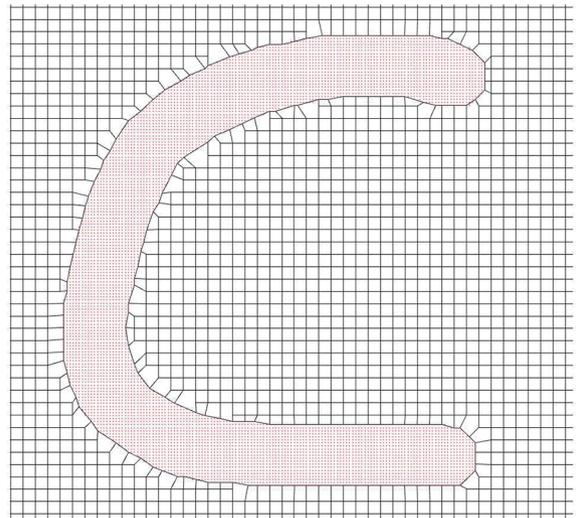


图 5 基于像素点云的扎染网格生成

Fig. 5 Tie-dye grid generation based on pixel point cloud

将图片像素点经过缩放和坐标转换,生成用于流场计算的外形点云 Ω (图 5 中红色坐标点集),为了提高搜索效率,采用 $k-d$ 树存储点云数据;生成正交结构背景网格,设置最小距离参数 d_{\min} ,对于背景网格节点 $n_{(i,j)}$,求出点云 Ω 中与之最近的点 $p_{(i,j)}$,并求出 $n_{(i,j)}$ 和 $p_{(i,j)}$ 之间的距离 $d_{(i,j)}$,若 $d_{(i,j)} \leq d_{\min}$,则 $n_{(i,j)}$ 为内部节点,否则为外部节点;所有节点标记完成后,在外部节点中识别出过渡节点,并建立起物面非结构网格连接关系。

实际应用时,对于可解析描述的 CAD 外形,可先生成表面网格的点云,再进行网格生成,也可直接根据解析关系完成网格生成步骤;对于其他来源的无序点云外形,常规算法难以自动生成网格,本文的 Auto-CFD 架构仍然能够正常实现全自动流场计算。

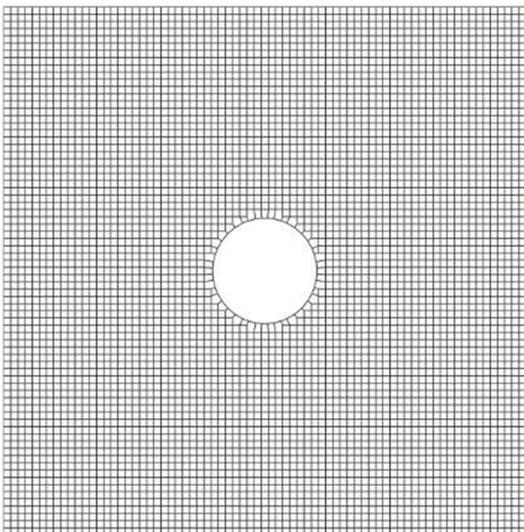
4 数值算例

本章首先以二维超声速圆柱绕流为例,通过与非结构有限体积法计算结果对比,验证本文技术的计算精度。结果表明,当网格量和计算格式精度相当时,扎染算法的结果与非结构有限体积法差别不大,同时省去了人工网格生成步骤,实现了 Auto-CFD 功能。然后以手绘二维任意外形、三维任意解析外形和激光扫描复杂外形得到的三维点云外形为例,进一步验证本文 Auto-CFD 技术架构的适应性,这些算例的传统计算方法难以甚至无法生成网格进行计算,因此不再进行结果对比。本节中物面节点均使用无黏固壁边界条件进行计算,为了表述方便,长度、流动参数、时间等物理量均采用无量纲。

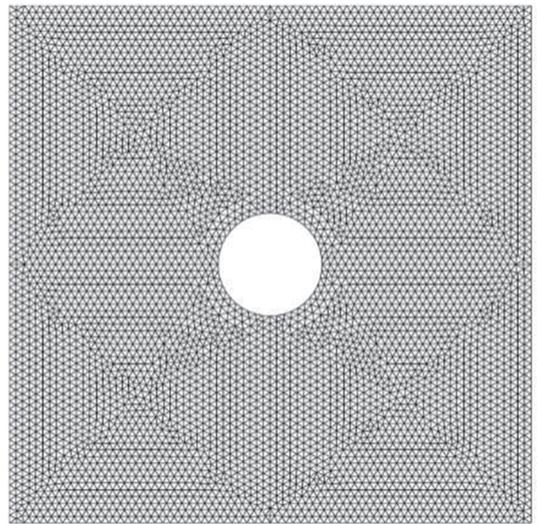
4.1 二维超声速圆柱绕流算例

本节模拟二维超声速圆柱绕流,比较本文技术和常规非结构有限体积法,对比分析新算法的计算精度和效率。算例结果如图 6 所示,边长为无量纲长度 1 的正方形计算域中心放置半径 $r = 0.1$ 的二维圆柱;初始流场的流动参数为 $(\rho, u, v, p) = (1.4, 3, 0, 1.0)$,其中 ρ 为密度, u, v 分别为速度在 x 和 y 方向的速度分量, p 为压力,来流马赫数 $Ma_\infty = 3.0$;计算域左侧为超声速入口边界,流场固定为初始流场,上下两侧以及右侧均为超声速出口边界,流场变量由内部节点外推获得。

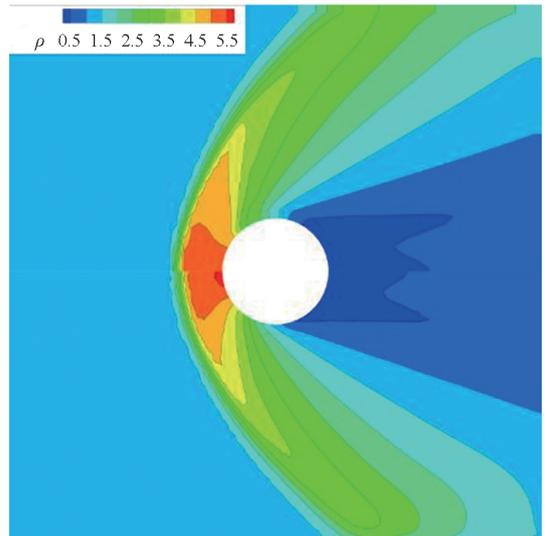
扎染算法网格如图 6(a)所示,共有 5 520 个网格节点,给定曲线函数后自动生成网格,并自动开始流场计算,耗时几乎可以忽略。非结构网格如图 6(b)所示,节点数为 5 488 个,采用网格生成软件得到非结构网格。从设置到输出,至少需



(a) 扎染算法网格
(a) Tie-dye algorithm grid



(b) 非结构网格
(b) Unstructured grid



(c) 密度云图
(c) Density cloud map

图 6 超声速圆柱绕流

Fig. 6 Supersonic flow around a cylinder

要十几分钟,网格生成和流场计算是两个独立的过程,运行求解器重新读取网格数据文件时还需要人工干预。

两种网格节点数近似,网格规模具有可比性,计算过程的其他参数完全相同,时间采用一阶显格式,空间采用一阶迎风格式,通量分裂为 VanLeer。在完全相同的计算环境下,采用串行计算方法。两种方法计算结果基本一致,图 6(c)是密度云图对比,上半部分为扎染算法结果,下半部分为非结构有限体积法结果,激波位置相同,但是扎染算法计算得到的激波宽度较薄,符合理论预测。由此可知,在同等网格量条件下,本文技术的计算精度能够达到常规非结构有限体积法的水平。计算中的

CPU 时间如图 7 所示,可以看出本文技术的计算时间比非结构有限体积法减少了 43.20%。考虑测试算例只统计了程序运行的 CPU 时间,并未统计网格生成人工参与时间,以问题求解流程总耗时计算,本文的 Auto-CFD 技术所耗时大大减少。

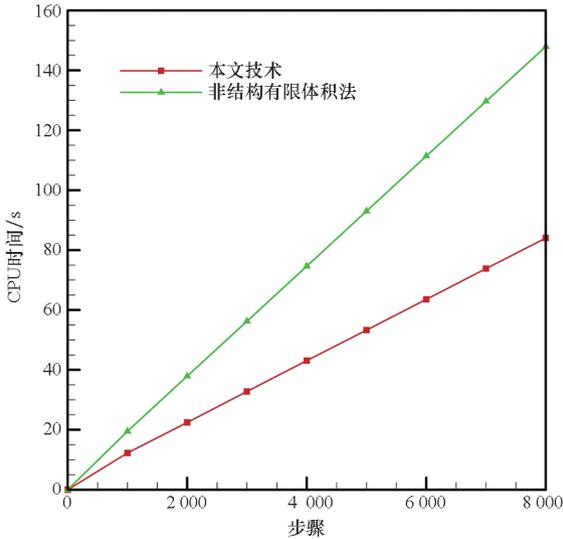
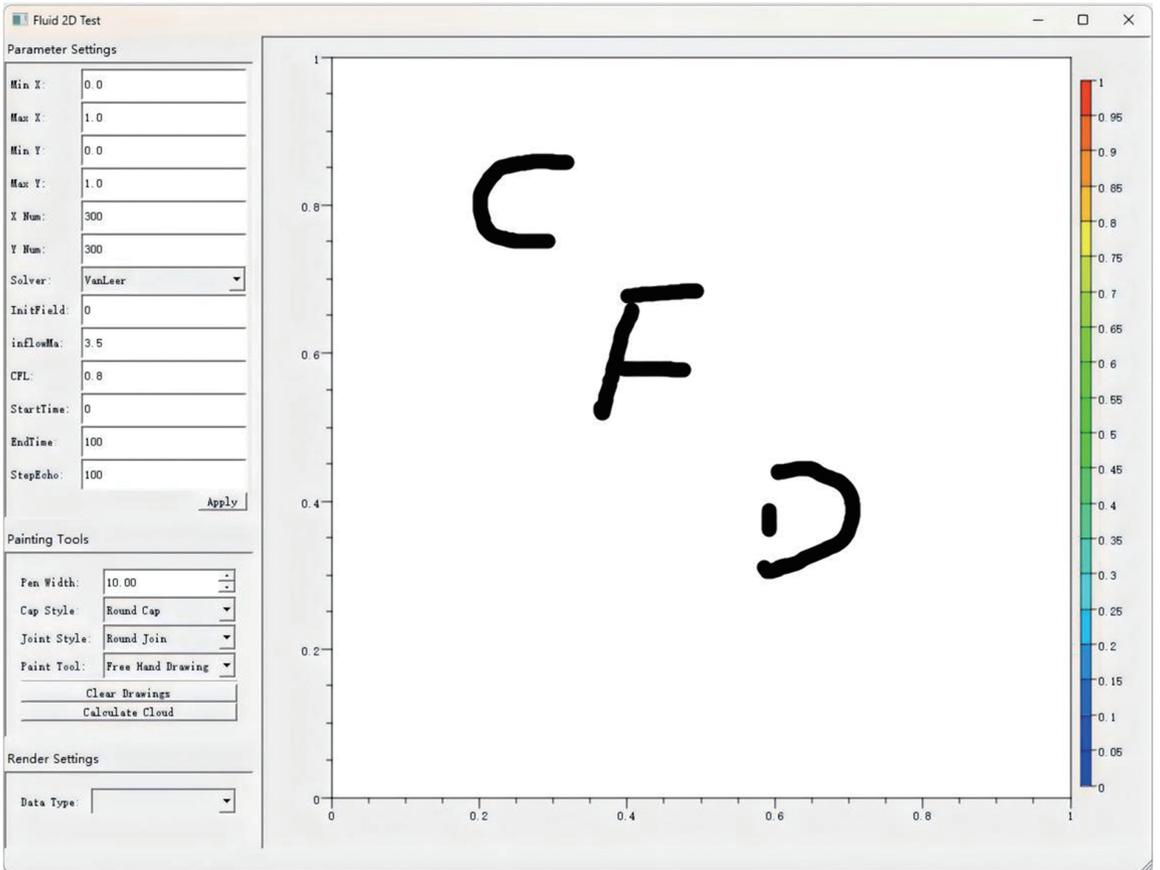


图 7 收敛过程的计算时间

Fig. 7 Computation time of the convergence process

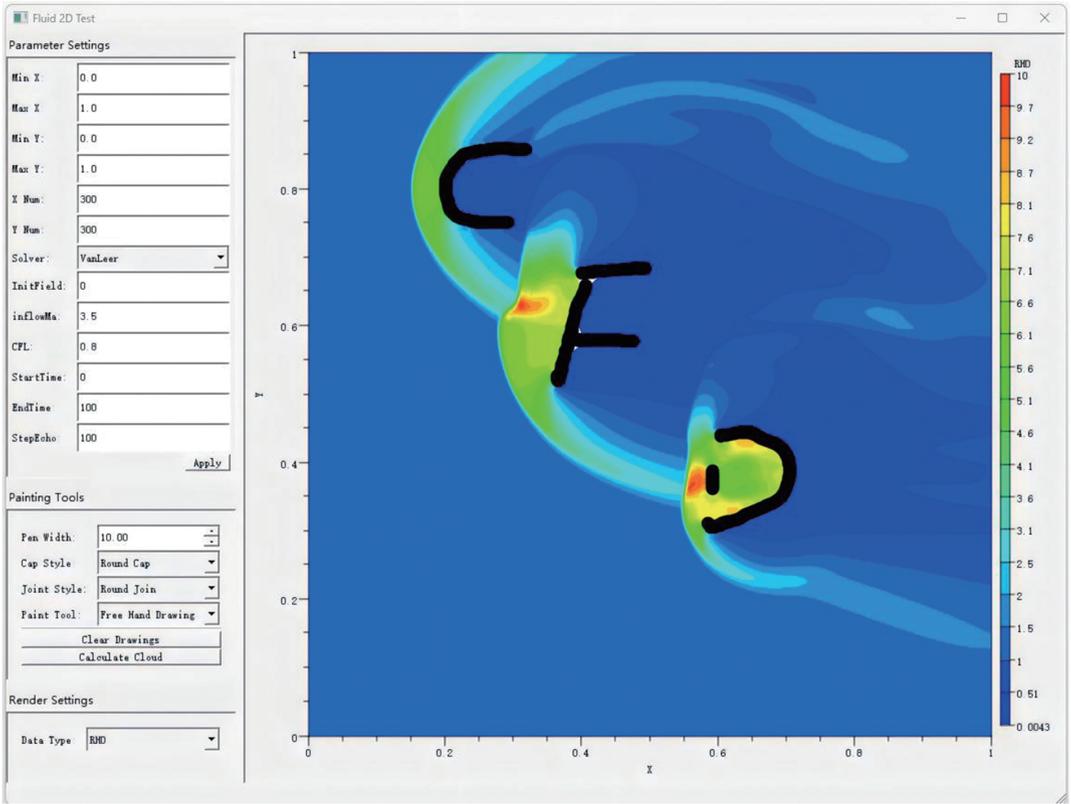
4.2 二维任意外形算例

基于上述 Auto-CFD 技术原理,开发出通过鼠标绘图输入任意几何图形,并自动开始流场计算的演示程序。程序界面如图 8(a)所示,在左上侧的控制框内,包括计算区域大小及其笛卡儿网格节点数目等 6 个几何参数设置;在计算笛卡儿网格时,本文技术兼容目前所有的通量分裂格式和差分格式,程序给出了通量分裂格式和差分格式 2 个选择按钮,对应的还有 CFL 条件等 2 个流场计算参数;其余 4 个是计算过程控制参数。为便于边界处理,进口边界固定参数的超声速,两侧边界和出口边界直接外推,流场参数只需设置马赫数。右侧方框为实时显示的计算区域,通过鼠标或其他设备输入任意图形,点击计算按钮就可以进行流场模拟,计算开始后时间推进步数满足设置参数条件,存储流场信息并且更新界面内流场云图显示,中间结果和收敛结果如图 8(b)和图 8(c)所示。该算例表明,对于二维任意复杂外形,基于扎染算法的 Auto-CFD 具有良好的适应性。



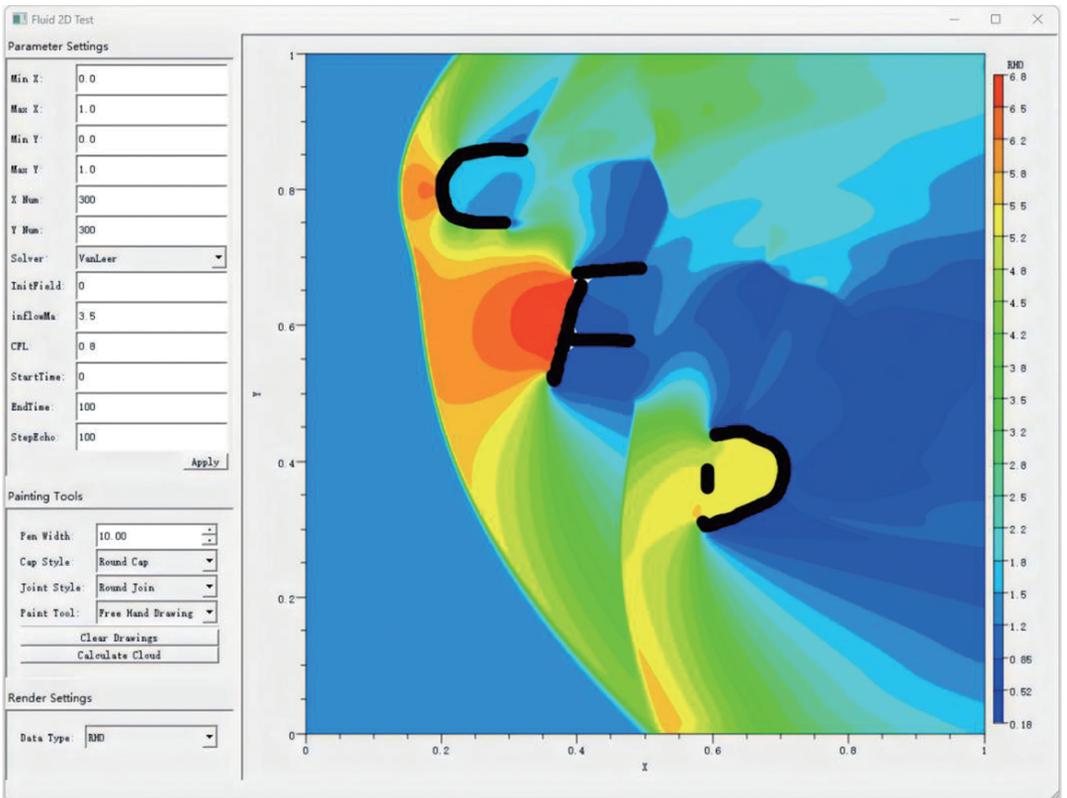
(a) 开始界面

(a) Start interface



(b) 中间结果

(b) Intermediate result



(c) 收敛结果

(c) Convergence results

图 8 二维 Auto-CFD 技术演示

Fig. 8 2D Auto-CFD technology demonstration

4.3 三维解析外形算例

扎染算法的三维验证算例及参数设置参见文献[19],该文献使用单个半球为外形进行三维扎染算法验证。本文进一步开展了多个三维物体情况下的 Auto-CFD 计算,验证相关方法对三维复杂场景的适应性。

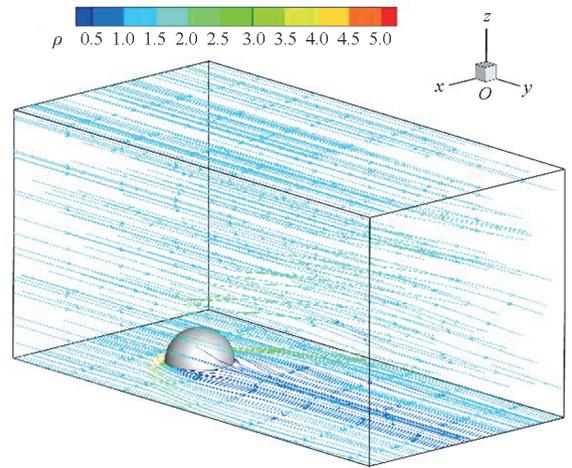
计算域设置为长方体,采用正方形网格生成空间网格,只需要一个几何参数就能生成扎染算法的笛卡儿背景网格。在生成全场笛卡儿网格点的几何位置后,很容易判断和得到流场内的过渡节点和物面点,能够直接开始流场计算,结合图形显示程序实时显示流场的变化和收敛过程。可以输入任意给出解析表达式的几何外形,本文采用仅需要输入半径和球心位置的简单球体,演示基于扎染算法的 Auto-CFD 的能力。

三维 Auto-CAD 技术演示如图 9 所示,计算域为长、宽、高分别为 $6 \times 3 \times 3$ 的长方体,左侧边界面作为超声速入口,流场参数固定为: $(\rho, u, v, w, p) = (1.4, 0, 3.0, 0, 1.0)$,其中 w 为速度在 z 方向的速度分量,来流马赫数 $Ma_\infty = 3.0$ 。下边界设置为无黏流动的固壁边界,其余边界面设置为超声速出口,流场参数采用一阶外推得到。长方体计算域的结构网格数目设置为 $301 \times 151 \times 151$ 。

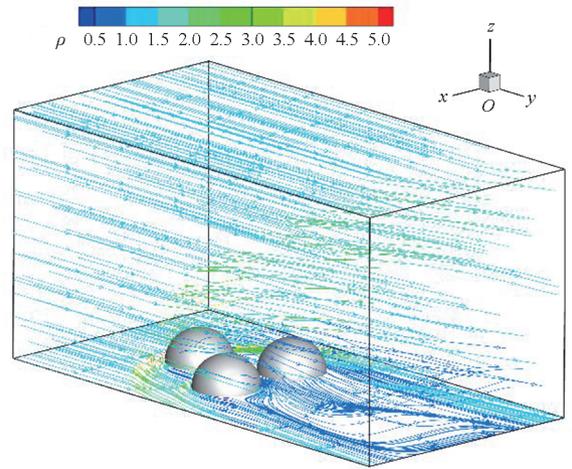
在下边界上放置半径 $r = 0.4$ 的半球,设置为固壁边界。采用本文 Auto-CFD 技术,可实现随意输入球心坐标和半径就能开始流场模拟。球表面点及其附近过渡节点数目会随着球位置不同而略有变化。图 9(a) 为球心坐标 $O_1 = (1.5, 1.5, 0)$ 的流场示意图,将流线颜色设置为当地密度云图等级即可得出流线图。

在此基础上,可以实现多个球体自动流场模拟。具体地,放置 3 个半径 $r = 0.4$ 的半球,其球心坐标分别为 $O_1 = (1.5, 1.5, 0)$ 、 $O_2 = (1.0, 2.5, 0)$ 和 $O_3 = (2.0, 2.5, 0)$,自动流场计算得到的流线示意图如图 9(b) 所示;放置 3 个半径分别为 $r_1 = 0.6$ 、 $r_2 = 0.3$ 、 $r_3 = 0.4$ 的半球,其球心坐标分别为 $O_1 = (1.5, 1.5, 0)$ 、 $O_2 = (1.2, 2.5, 0)$ 、 $O_3 = (1.8, 3.3, 0)$,自动流场计算得到的流线示意图如图 9(c) 所示。

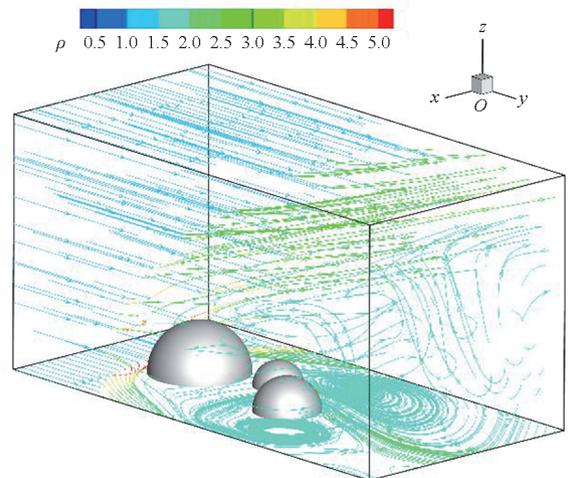
该算例展示了本文提出的 Auto-CFD 技术架构在三维复杂场景中的适应性。在该算例中,三维球体的物面点由解析表达式生成,但实际使用的仅是物面的离散点信息,无须使用封闭的物面。这一技术特点在实际工程应用中具有显著优势:可以直接从 CAD 模型提取物面离散点,自动完成 CFD 计算,而无须进行 CAD 模型物面的检查、水



(a) 1 个半球
(a) 1 hemisphere



(b) 3 个相等半径半球
(b) 3 hemispheres of equal radius



(c) 3 个不等半径半球
(c) 3 hemispheres of unequal radius

图 9 三维 Auto-CFD 技术演示

Fig. 9 3D Auto-CFD technology demonstration

密处理等传统网格生成过程中不可避免的复杂操作,从而大幅减少人工干预。关于 CAD 模型物面

的直接离散化,课题组已开展相关工作,限于篇幅本文不做进一步阐述。

4.4 三维激光扫描外形算例

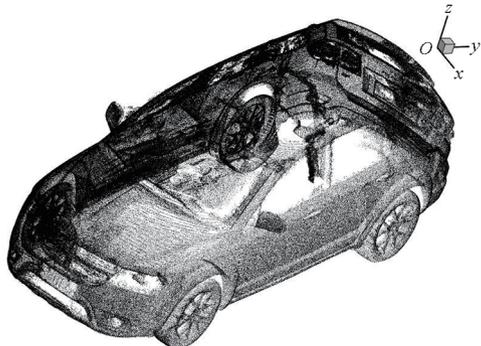
目前 3D 激光扫描定位技术已经非常成熟,利用激光扫描实体模型得到的点云数据直接进行流场模拟,将改变 CFD 的应用场景。譬如,扫描安装在风洞中的飞行器缩比模型、洞壁及其支撑机构等部件表面,实时自动化进行建模和流场仿真,在超级计算机环境下有望实现计算/试验的实时交互验证,使目前还处于概念阶段的风洞试验数字孪生技术变为现实。

图 10(a)是激光扫描汽车得到的原始点云数据。由于车顶和有些部位没有扫描,而且没有进行数据处理,因此,存在明显几何误差和噪声毛刺。原始扫描点云采用立体光刻 (stereo lithography, STL) 文件格式存储,包含 1 774 758 个三角形面片与 5 324 274 个节点。受计算机硬件限制,对原始扫描点云进行删减:每 5 个三角形面片取 1 个,并且每个三角形面片只取 1 个节点作为外形点云,形成用于计算的外形点云,如图 10(b)所示,共包含 95 759 个点。

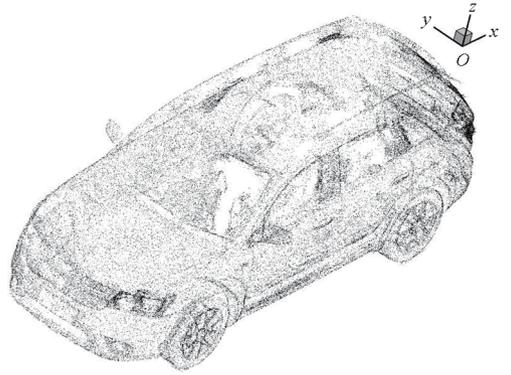
上述操作仅对点云数量进行删减,无噪点去除等更多外形处理。处理后外形点云包围盒为: $(x, y, z)_{\min} = (7.032, -17.703, -73.039)$ 、 $(x, y, z)_{\max} = (12.446, -15.353, -71.015)$ 。

将计算域设置为 $x \in [6, 14]$ 、 $y \in [-18, -15]$ 、 $z \in [-72.95, -71]$ 的长方体;背景网格为 $(n_i, n_j, n_k) = (160, 60, 40)$ 的正交结构网格。同样根据 3.2 节中结构网格节点到外形点云的距离将结构网格节点标记为外部节点、内部节点与过渡节点,通过过渡节点在外形点云中寻找距其最近的坐标点作为物面点,建立三维非结构网络连接关系,从而生成扎染网格。

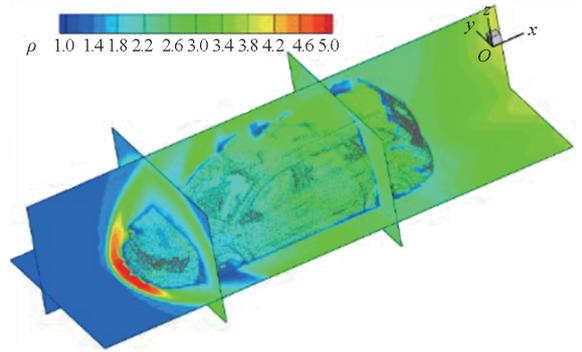
作为 Auto-CFD 流程的验证算例,本节仍然采用超声速流场计算,来流参数设置为 $(\rho, u, v, w,$



(a) 原始扫描点云
(a) Original scan point cloud



(b) 处理后的外形点云
(b) Processed shape point cloud



(c) 密度云图
(c) Density cloud map

图 10 三维激光扫描汽车点云

Fig. 10 Point cloud from 3D laser scanning the car

$p) = (1.4, 3.0, 0, 0, 1.0)$ 。

读入点云数据后,软件自动生成网格并进行计算。计算出的密度云图如图 10(c)所示,流场定性基本正确,在车头部分出现脱体激波。验证了本文 Auto-CFD 技术的正确性和适应性。

5 结论

本文基于扎染算法发展的 Auto-CFD 技术架构,可以从无序点云数据出发自动生成计算网格,其中空间采用笛卡儿网格,壁面附近生成非结构网格。在此过程中仅需要建立结构节点和模型的连接关系,不需要模型表面网格,因而消除了模型表面网格生成流程,使得自动 CFD 求解成为可能。此外,本文算法在保持差分格式精度的同时,具有较高计算效率。算例演示结果表明,本文技术具有良好的复杂外形和复杂场景适应能力,具有实现复杂工程算例自动化 CFD 计算的应用前景。

在此基础上,团队正在发展适用于 N-S 方程求解的相关技术,以期实现 Auto-CFD 技术在黏性、湍流、复杂流动等场景中的应用。

参考文献 (References)

- [1] 张来平, 常兴华, 赵钟, 等. 计算流体力学网格生成技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 314 - 315.
ZHANG L P, CHANG X H, ZHAO Z, et al. Mesh generation techniques in computational fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2017: 314 - 315. (in Chinese)
- [2] COTTRELL J A, HUGHES T J R, BAZILEVS Y. Isogeometric analysis: toward integration of CAD and FEA [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 2 - 4.
- [3] SLOTNICK J P, KHODADOUST A, ALONSO J, et al. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences [R]. Washington: NASA, 2014.
- [4] Karalit. Simplicity without compromise [EB/OL]. [2021 - 09 - 29]. <http://www.karalit.com>.
- [5] 坤道. 全球唯一无缝嵌入 CAD 环境的流体/传热分析软件 [EB/OL]. [2021 - 09 - 29]. www.simu-cad.com/userfiles/FloEFD.pdf.
SIMUCAD. The only fluid/heat transfer analysis software in the world that seamlessly embeds in the CAD environment [EB/OL]. [2021 - 09 - 29]. www.simu-cad.com/userfiles/FloEFD.pdf. (in Chinese)
- [6] Sharc. Harpoon key benefits [EB/OL]. [2022 - 08 - 29]. http://www.sharc.co.uk/html/key_benefits.htm.
- [7] ZARIFI O, BATTY C. A positive-definite cut-cell method for strong two-way coupling between fluids and deformable bodies [C] // Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2017.
- [8] UDAYKUMAR H S, MITTAL R, RAMPUNGOON P, et al. A sharp interface Cartesian grid method for simulating flows with complex moving boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 2001, 174(1): 345 - 380.
- [9] CHANG C H, DENG X L, THEOFANOUS T G. Direct numerical simulation of interfacial instabilities: a consistent, conservative, all-speed, sharp-interface method [J]. Journal of Computational Physics, 2013, 242: 946 - 990.
- [10] 胡偶. 可压缩复杂流动笛卡尔网格方法研究及应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
HU O. Development of Cartesian grid method for complex compressible flows and its applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] PESKIN C S. Flow patterns around heart valves: a numerical method [J]. Journal of Computational Physics, 1972, 10(2): 252 - 271.
- [12] 谢胜百, 单鹏. 两种浸入式边界方法的比较 [J]. 力学学报, 2009, 41(5): 618 - 627.
XIE S B, SHAN P. Comparisons of two types of immersed boundary methods in numerical simulations of a cylinder in uniform incompressible flows [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(5): 618 - 627. (in Chinese)
- [13] WANG J J, GU X Y, WU J. A sharp-interface immersed boundary method for simulating high-speed compressible inviscid flows [J]. Advances in Aerodynamics, 2020, 2(1): 23.
- [14] 刘剑明. 可压缩流体计算中的浸入边界方法及其应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU J M. The immersed boundary method in compressible flows and its applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [15] 李自启. MWENO 格式与 Ghost Cell 方法在笛卡尔网格中的应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
LI Z Q. Application of multi-weighted essentially non-oscillatory scheme with Ghost Cell method on Cartesian grid [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [16] 杜银杰, 舒昌, 杨鲤铭, 等. 扩散界面浸入边界法结合壁面模型在湍流模拟中的应用 [J]. 航空学报, 2021, 42(增刊1): 54 - 64.
DU Y J, SHU C, YANG L M, et al. Wall model based diffuse-interface immersed boundary method and its application in turbulent flows [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(Suppl 1): 54 - 64. (in Chinese)
- [17] 王力, 田方宝. 浸入边界法及其在可压缩流动中的应用和进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(9): 196 - 204.
WANG L, TIAN F B. Recent progress of immersed boundary method and its applications in compressible fluid flow [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(9): 196 - 204. (in Chinese)
- [18] 刘君, 陈洁, 韩芳. 基于离散等价方程的非结构网格有限差分法 [J]. 航空学报, 2020, 41(1): 123248.
LIU J, CHEN J, HAN F. Finite difference method for unstructured grid based on discrete equivalent equation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 123248. (in Chinese)
- [19] 刘君, 魏雁昕, 陈洁. 基于非结构网格有限差分法的扎染算法 [J]. 航空学报, 2021, 42(7): 124557.
LIU J, WEI Y X, CHEN J. Tie-dye algorithm based on finite difference method for unstructured grid [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 124557. (in Chinese)
- [20] 刘君, 徐春光, 白晓征. 有限体积法和非结构动网格 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
LIU J, XU C G, BAI X Z. Finite volume method and unstructured dynamic grid [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)