

复杂构型水滴收集率的拉格朗日计算方法

任靖豪¹, 易 贤^{1,2}, 王 强^{1,2}, 刘 宇¹, 李维浩¹

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了完善拉格朗日法在求解三维复杂外形液滴收集率的过程中存在的普适性缺陷, 发展了一种鲁棒且高效的三维收集率计算方法。该方法中采用基于非平面交叉判定的粒子定向查找算法, 实现了多面体网格下的水滴快速定位功能。基于笛卡儿网格自适应和壁面网格投影技术, 克服了复杂迎风面收集率计算的困难。对比传统求解方式, 具有算法复杂度低、计算效率高的优势。同时, 利用径向基函数插值技术, 改进了三维壁面收集率的表征方法。通过典型算例测试, 计算结果与实验值误差均在 15% 以内, 且在同等计算精度的条件下, 计算所需的水滴轨迹数大幅减小。验证了该方法具备较高的准确性和良好的鲁棒性, 能够为飞机结冰机理研究以及防除冰系统设计提供参考。

关 键 词: 液滴撞击特性; 收集率; 径向基函数 (RBF); 粒子追踪; 拉格朗日法

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Lagrangian simulation method of droplet collection efficiency for complex configuration

REN Jinghao¹, YI Xian^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, LIU Yu¹, LI Weihao¹

(1. Low Speed Aerodynamics Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. State Key Laboratory of Aerodynamics,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: A robust and efficient algorithm was developed for calculating the droplet collection efficiency and overcoming the non-universal defect in the Lagrangian method. A point-locating scheme based on a non-plane intersection determination algorithm was used to achieve the fast localization of droplets in polyhedron mesh. Using mesh adaptive refine techniques and curve projection algorithm, the difficulty of calculating collection efficiency on complex configuration was avoided. This step effectively reduced the complexity of the algorithm. The analysis results discretely distributing in the spatial configuration was interpolated to the model surface by radial basis function. Some cases valuated the improved algorithm. The testing report showed that the deviation of the calculating results using the proposed method from the experimental data was not more than 15% and the necessary trajectories for calculation significantly decreased compared with the traditional model. It shows that the this method has high engineering practice value and popularization sense.

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11472296); 四川省科技厅应用基础研究项目(2019YJ0271)

作者简介: 任靖豪(1993—), 男, 研究实习员, 硕士, 主要从事飞机结冰与防护研究。E-mail: 1838776274@qq.com

引用格式: 任靖豪, 易贤, 王强, 等. 复杂构型水滴收集率的拉格朗日计算方法[J]. 航空动力学报, 2020, 35(12): 2553-2561. REN Jinghao, YI Xian, WANG Qiang, et al. Lagrangian simulation method of droplet collection efficiency for complex configuration[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(12): 2553-2561.

Key words: droplet impact characteristics; collection efficiency; radial basis function (RBF); particle tracking; Lagrange method

数值计算是研究飞机结冰致灾问题和适航审定技术^[1]的重要手段,经过多年的发展,已经形成了一些比较成熟的软件^[2-3]。业内针对水滴撞击问题采用的数值计算方法可分为两类:拉格朗日法和欧拉法。欧拉法基于水滴场的连续介质假设,针对三维复杂构型的计算具有优势。然而,欧拉法在低液态水含量、以及考虑粒子动力学的算例中存在明显不足。拉格朗日法跟踪每个运动粒子,适合低液态水含量和考虑水滴动力学特性的计算,但在进行三维计算时,会遭遇粒子轨迹计算量大、撞击面收集率计算困难等问题。

关于水滴撞击特性的拉格朗日计算研究,国外起步较早,取得了不错的工程进展^[4-5]。但是受限于算法复杂度和计算精度,只能用于简单外形的计算。国内相关研究工作也多停留在解决二维或简单三维问题^[6],针对复杂构型的计算普遍采用欧拉法进行分析^[7-9]。为了解决复杂构型水滴撞击的拉格朗日计算问题,Hamed^[10]提出了打靶算法,很大程度降低了算法复杂度,提高了算法的鲁棒性。近些年,软件 LEWICE3D 开发团队发展了 MontCarlo 算法,实现了考虑湍流影响的水滴颗粒运动过程模拟^[11-12]。然而,为了达到精度

要求,两者都需要计算大量运动轨迹。Widhalm 等^[13]提出了一种利用网格表征水滴阵列的描述方法,可以减少一定的轨迹计算数量。

本文搭建了适用于复杂三维构型水滴收集率计算的拉格朗日算法框架,发展了粒子定向寻址算法,建立了基于网格自适应加密和投影技术的撞击面水滴收集率的计算方法,实现了基于径向基函数(RBF)插值的物面水滴收集率表征方法。基于上述算法框架,开发了计算程序,计算了三维圆柱、圆球等典型算例,通过对比计算与实验结果,验证了算法的准确性。最后模拟了某型发动机短舱及翼身组合体的水滴撞击特性,用于验证程序在三维复杂构型下的计算能力。

1 计算流程

图 1 给出了水滴撞击特性计算模块的程序框架图,计算流程分为三步:①液滴初始化;②运动轨迹计算;③壁面收集率计算。在开始计算飞机水滴特性前,需要计算空气流场的物性参数。本文空气流场采用中国空气动力研究与发展中心自主研发的 PHengLei 解算器计算,相关理论介绍可参阅文献[14]。

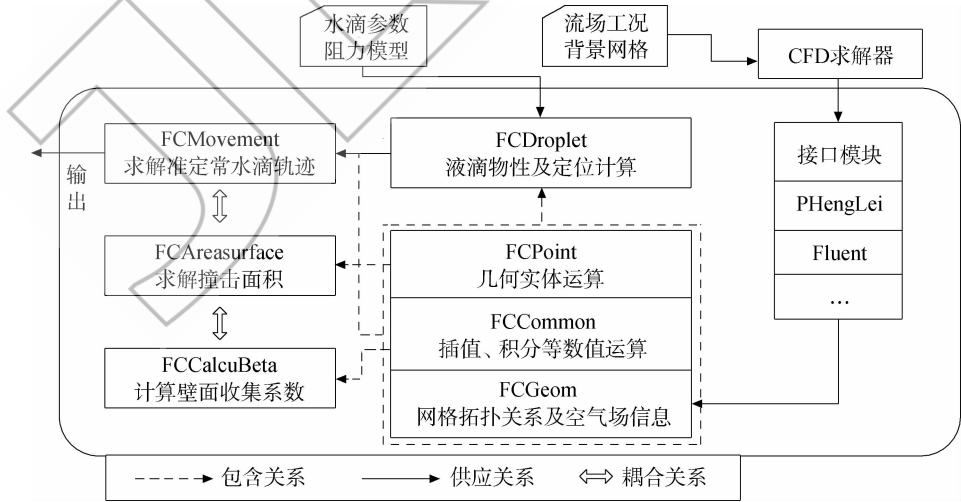


图 1 程序框架示意图
Fig. 1 Illustration procedural framework

2 基本方程

基于球形假设,水滴运动的控制方程表达式如下:

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{(\rho_d - \rho_a)}{\rho_d} g + \frac{C_d \cdot Re}{24} \cdot \frac{18\mu_a}{\rho_d \cdot D^2} (u_a - u_d) \tag{1}$$

式中等号右侧第一项表示水滴所受的重力和浮

力,第二项表示水滴运动过程中所受的阻力。组合参数 $C_d \cdot Re/24$ 作为修正系数,仅由相对雷诺数决定^[15]。

$$\frac{C_d \cdot Re}{24} = 1.0 + 0.197Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38} \tag{2}$$

$$Re = \frac{\rho_a \cdot \|u_a - u_d\| \cdot D}{\mu_a} \tag{3}$$

式(1)为 1 阶常微分方程,在水滴初始速度已知的前提下,方程的解是存在且唯一的。可采用龙格库塔方法推进求解。

3 水滴定位方法

在采用拉格朗日法进行粒子演化计算的过程中,需要在各时刻获取水滴所处网格单元编号,以方便获取当地的流场信息。目前针对非结构网格的粒子定位方法有:笛卡儿背景网格法、映射法和邻面查找法等。然而,当网格量较大或出现严重变形时,上述方法会花费较多的时间。本文采用定向查找算法,在空间中以最优路径定位出水滴颗粒所在单元。

定向查找算法的基本思路是:在明确起始点 P_n 所处网格单元编号的前提下,连接终止点 P_{n+1} ,根据连线与网格面的交叉情况,依次确定连接线穿越的网格编号,直至终点。定向查找算法示意图如图 2 所示。该方法的优势:①适用于复杂的空间多面体网格;②粒子穿过壁面时,无需其他特殊判定;③避免了对冗余单元的查找,有很高的搜寻效率。

$$\alpha_i = \frac{(r_c - r_p) \cdot n}{t \cdot n} \tag{4}$$

式(4)给出了针对一般平面与线段的交叉判定公式^[16],其中 r_c 表示网格单元面心坐标矢量, n 表示该面法向矢量, r_p 表示当前时刻粒子的坐标矢量, t 表示从当前时刻粒子指向下一时刻粒

子的距离矢量。通过遍历网格单元所有面,选取 α_i 最小且小于 1 的面作为线段穿出口。

Haselbacher 论文中采用双线性贴片模型求解非平面交点,计算过程复杂^[17]。并且,进行出入面判定需要遍历网格所有面元,计算效率低。本文采用三角形平面分解法进行粒子定位计算。

如图 3 所示,将非平面单元三角化,分解成多个空间面元,逐一判断线段是否与有限平面存在交点。首先确定点 P_n 所处网格编号

$$n_{ij} \cdot (r_i - P_n) \geq 0 \tag{5}$$

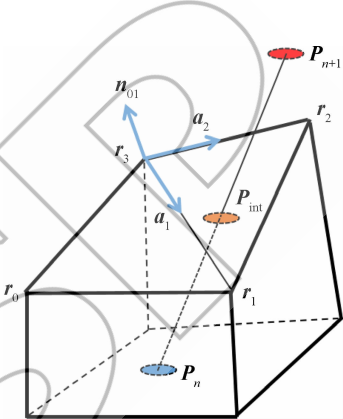


图 3 线段与非平面的交点
Fig. 3 Intersection point between segment and non-planar face

若网格所有面元均满足式(5),则认为粒子处于当前网格内。已知 P_{int} 满足

$$P_{int} = P_n + \alpha_i \cdot t \tag{6}$$

$$P_{int} = r_3 + u a_1 + v a_2 \tag{7}$$

求解上述方程组,可以得到 u 和 v 的值,若 u 和 v 分别满足

$$\begin{cases} u \geq 0 \\ v \geq 0 \\ u + v \leq 1 \end{cases} \tag{8}$$

即可判断出 P_{int} 在当前面元上。为了避免产生间隙,对非平面面元在其左右两侧相邻网格单元内的分解形式需保持统一。上述改进方法无需遍历所有面进行交叉判定,仅需满足式(8)便可跳出循环。表 1 给出了本文方法与 Haselbacher 方法和 LA(Lohner-Ambrosiano)方法^[18]的对比,表中 D 、 M 、 A 分别表示除法运算、乘法运算、加法运算, k 表示多面体网格被三角分解后的面个数, N_c^i 表示起止点穿过网格的数量。当背景网格为多面体网格时,本文方法较另外两种方法有更高的计算效率。

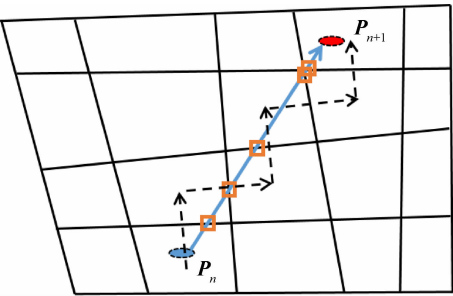


图 2 定向查找算法示意图

Fig. 2 Illustration of directional search algorithm

表 1 交叉判定运算量统计

Table 1 Operation count for cross-judgment algorithms

方法	最小运算量	最大运算量
LA	$N_c^{LA}(3kD+27kM+51kA)$	
Haselbacher	$N_c^H[1D+3(k+1)M+(5k+2)A]$	$N_c^H[(k-1)D+3(2k-1)M+(7k-2)A]$
本文算法	$N_c^B(3D+10M+6A)$	$N_c^B[3(k-1)D+(10k-7)M+(9k-4)A]$

4 水滴收集率计算方法

根据三维水滴收集率的定义:液滴在壁面与远场处单位面积上的质量通量比值。基于流管假设理论,可以利用流管撞击壁面前后的面积比率等效评估壁面水滴收集率,如图 4 所示。

$$\beta = S_0 \cdot \cos\alpha / S_i \tag{9}$$

式中 S_0 表示流管初始空间平面面积, S_i 表示流管撞击壁面围成的曲面面积, α 表示来流攻角。然而,在三维曲面面积计算和识别物面遮蔽区等问题上,目前还未得到有效的解决。这一直是困扰拉式方法向复杂构型拓展的重要因素之一。本文针对上述困难,设计了一种网格投影算法,用于计算复杂曲面的面积。同时,采用笛卡儿网格自适应加密技术,改进三维液滴撞击区间的识别能力。

撞击域面积。

计算过程共分为 4 步:①获取并记录壁面面网格信息;②求解撞击曲面包络线;③壁面面单元分类;④三角化求和计算。

本文方法的优势在于,当壁面网格邻居信息和投影方向确定后,能够快速投影出一条确定的分段曲线,这一过程基本不会耗费计算资源。当撞击点个数大于等于 3 时,可使投影曲线封闭,进而确定出封闭曲线内部的面单元编号。相比于二分逼近法求面积,可以减少大量水滴轨迹的计算。

4.2 液滴撞击与遮蔽区域识别方法

在远场垂直来流方向的空间平面上建立二维笛卡儿网格,用来表征初始液滴阵列,每个网格节点标记为一个液滴。通过初始液滴阵列的撞击情况,进行网格自适应加密,以获取更精细的撞击区描述能力。例如,对于四边形网格单元组成的流管模型,当有且仅有 1~3 条液滴轨迹与壁面发生碰撞,则对网格单元进行细分,将原始单元平均分割成 4 份,计算新增节点处释放的液滴轨迹。

当求解多体模型或迎风面外形变化较大的构型时,要求精确识别出壁面水滴遮蔽区。由于多体模型内边界编号不同,液滴撞击在不同部件上很容易识别。然而,针对同一编号的部件,辨别遮蔽区会遇到一些困难。本文对此提出了两种判断技巧:①大尺度模型。比如翼身组合体,当水滴分别撞击在机头和机翼上时,此时收集率计算结果会非常小。因此,对收集率非常小的流管模型进行细分。②积冰冰角。仅依靠壁面收集率不易用来区分遮蔽区,此时可以利用壁面网格单元法向量与水滴入射速度方向向量进行判定,这一判定方法与欧拉框架下的背风面判定条件类似。当被投影曲线包络的面单元的法向矢量与水滴入射速度方向点乘大于零时,认为此处可能出现遮蔽,进行细分。

5 壁面收集率插值

文中第 4 节中计算得到的收集率仅存于各个

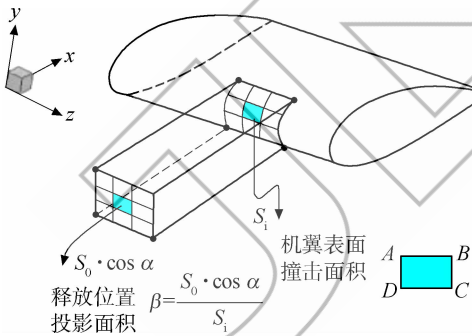


图 4 三维水滴收集率计算示意图[6]

Fig. 4 Illustration of the 3D water droplet collection efficiency computational[6]

4.1 壁面网格投影

三维空间中任意封闭曲面面积 A 的表达式可以写成

$$S_{\text{surface}} = \int_A \sqrt{J_1^2 + J_2^2 + J_3^2} d\xi d\eta \tag{10}$$

式中 J_1, J_2, J_3 表示的是曲面微元面矢量在笛卡儿坐标系上的投影坐标。CFD 求解器提供的网格单元作为近似描述曲面的基本单元,可以通过计算出撞击区域内包络的网格单元面积和来表示

流管撞击壁面后形成的撞击单元中心。需要将拉格朗日水滴场的计算结果投影到壁面网格上,建立起与欧拉空气流场间联系,才能进行后续传热分析。本文采用径向基函数插值技术实现局部载荷插值的计算功能。

径向基函数插值的基本表达式如下:

$$F(\mathbf{r}_{\text{tar}}) = \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi(\|\mathbf{r}_{\text{tar}} - \mathbf{r}_i\|) \tag{11}$$

式中 n 为支撑点个数, $\varphi(\|\mathbf{dr}\|)$ 为基函数。文献[19]在载荷插值和网格变形等问题中对径向基函数进行了大量的验证,认为 Wendland's C2 函数是非常适合解决此类问题的插值函数。

$$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^4 (4\eta + 1) \tag{12}$$

$$\eta = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i\|/d \tag{13}$$

式中 d 表示插值半径,当两点间距离大于插值半径时 $\varphi(\eta) = 0$ 。将基函数带入式(11)中,根据样本值计算出样本点的插值权重 ω_i ,也称作插值系数。

$$\mathbf{F}_{\text{sample}} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{W}_{\text{vertex}} \tag{14}$$

式中 $\mathbf{F}_{\text{sample}}$ 表示每个样本点上的收集率矩阵, $\mathbf{\Phi}$ 表示径向基函数矩阵, $\mathbf{W}_{\text{vertex}}$ 表示权值系数向量。求得 RBF 插值系数后,代入式(11)可以很容易解得壁面网格单元各节点的收集率。

6 算例与分析

6.1 三维圆柱撞击特性计算

为验证算法准确性,本节计算直径为 10.16 cm 的三维圆柱水滴收集率。自由来流速度为 80 m/s,空气密度为 1.097 kg/m³,远场静压为 89867 Pa。计算结果如图 5 所示。

图 6 给出了不同粒径条件下的收集率分布。

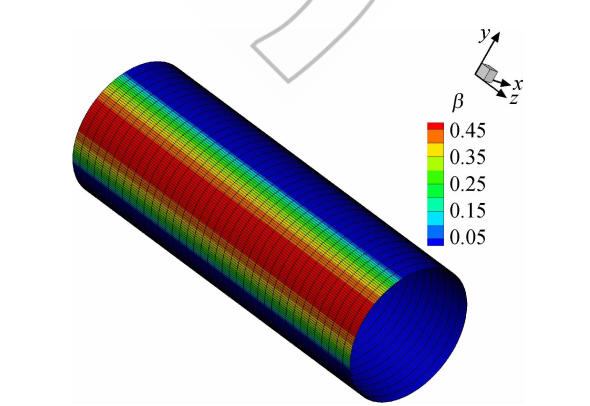


图 5 三维圆柱壁面水滴收集率

并按照 Langmuir-D 分布原则,修正了 16.0 μm 水滴粒径(MVD,量符号记为 D_{mv})的收集率曲线,结果如图 7 所示,图中横坐标 S 表示到驻点的弧长距离、纵坐标为收集率。显而易见,满足 Langmuir-D 分布的收集率曲线较单一粒径的计算结果更加接近实验数据^[20],预测的撞击极限位置与实验结果基本吻合。

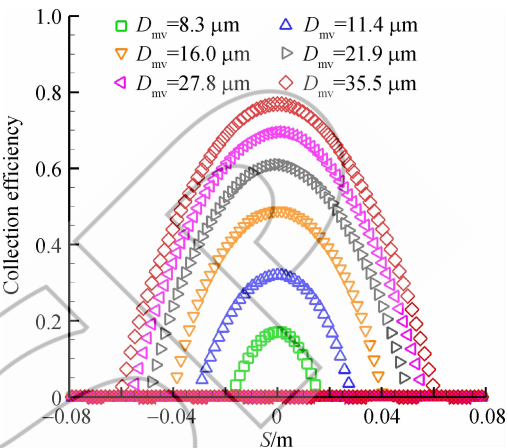


图 6 不同粒径下的收集率曲线

Fig. 6 Collection efficiency distribution curves under different MVD conditions

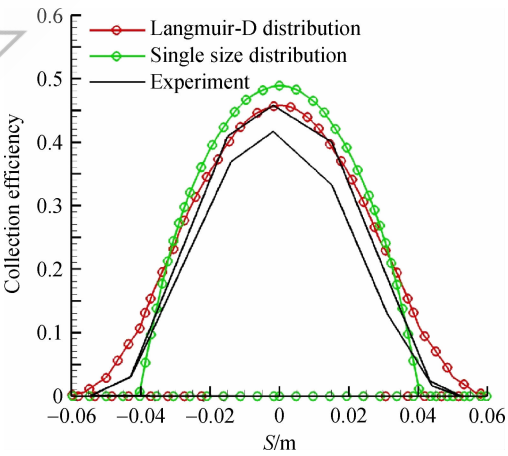


图 7 圆柱收集率曲线计算与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of computational and experimental collection efficiency of the cylinder case

6.2 三维圆球撞击特性计算

圆球直径为 15.04 cm,空气流场环境为不可压缩理想气体,空气密度为 1.097 kg/m³,液态水含量为 1 g/cm³,远场来流速度为 75 m/s,静压为 95840 Pa,分别取水滴直径为 11.5 μm 和 18.6 μm 进行计算,并参考实验结果^[21]进行对比。

图 8 中给出了笛卡儿网格加密技术对水滴撞

Fig. 5 Contour of the collection efficiency of the cylinder case

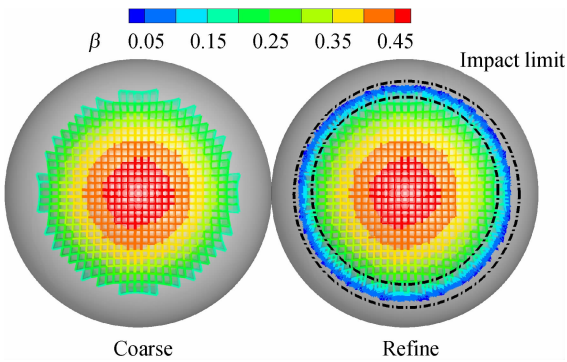
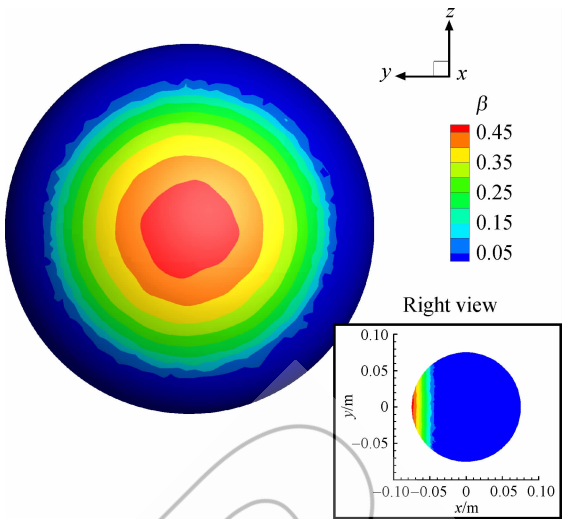


图 8 预测圆球撞击极限

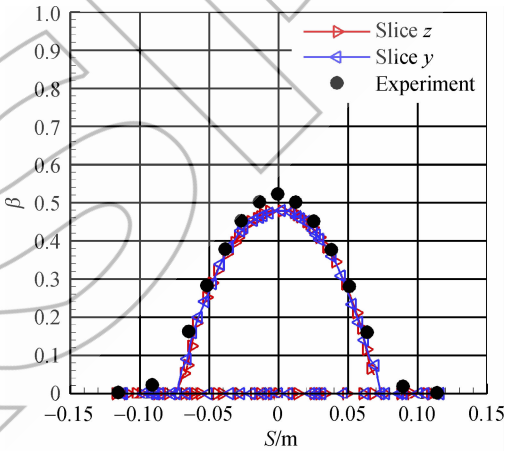
Fig. 8 Predictive result of impact limit of sphere case

击极限的预测结果。初始设置的 3 600 条水滴轨迹,撞击到壁面的只剩 553 条,不能直接用来表征最终的撞击区域。在已知撞击域边缘进行 3 次加密后,边缘预测结果较左图更加光滑,收集率最小值小于 0.05,基本能够确定为此模型的撞击极限。

图 9 给出了 3 条工况的插值结果及其与实验的对比,从截面收集率分布的结果来看,两者有良



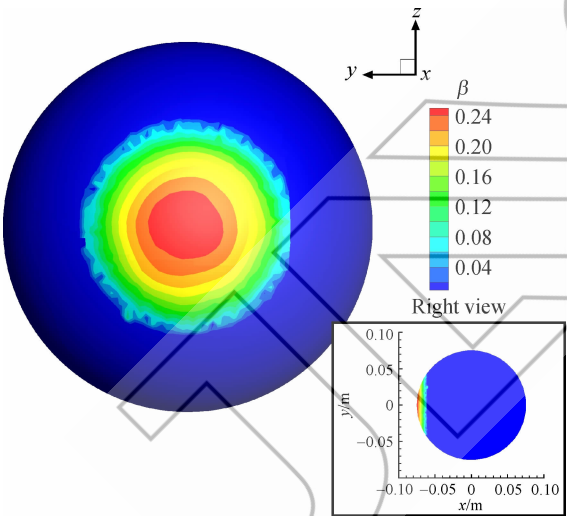
(c) 18.6 μm 粒径下的水滴收集率分布云图



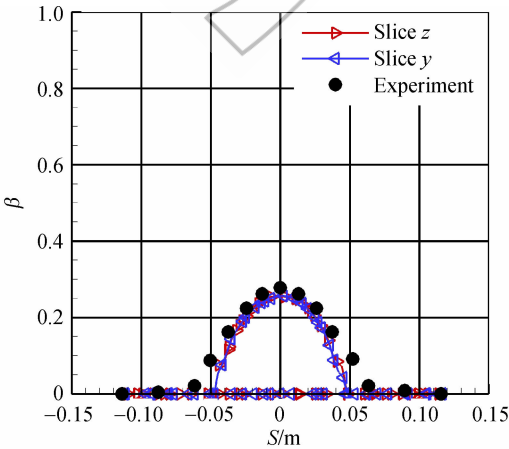
(d) 18.6 μm 粒径下对称截面上的水滴收集率分布曲线与实验值的对比结果

图 9 圆球收集率计算结果

Fig. 9 Results of the collection efficiency of the sphere case



(a) 11.5 μm 粒径下的水滴收集率分布云图



(b) 11.5 μm 粒径下对称截面上的水滴收集率分布曲线与实验值的对比结果

好的一致性。

6.3 某型发动机短舱算例

本节算例是一个典型的多旋成体模型,用于验证本文方法在计算复杂三维构型算例时是否具有鲁棒性。计算工况:马赫数为 0.23,攻角为 0°,雷诺数为 4.8×10^6 ,液态水质量为 1 g/cm^3 ,水滴直径为 16.45 μm 和 44.5 μm 。此算例不考虑液滴的动力学特性以及发动机吸气。

计算轨迹前,在模型前方放置一块水滴个数为 60×60 的水滴阵列;根据初始液滴阵列的撞击情况对其进行删减,得到一个有效的液滴释放区;多次加密阵列后,便可识别出壁面的撞击极限。图 10 中给出了模型细分 3 次后的“释放水滴阵列”和“水滴撞击位置”。可以很清晰地观察到,此时液滴大部分撞击在短舱唇口前缘内侧和整流锥

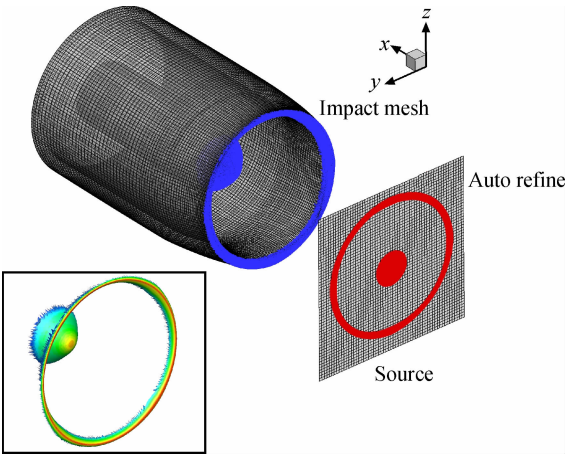
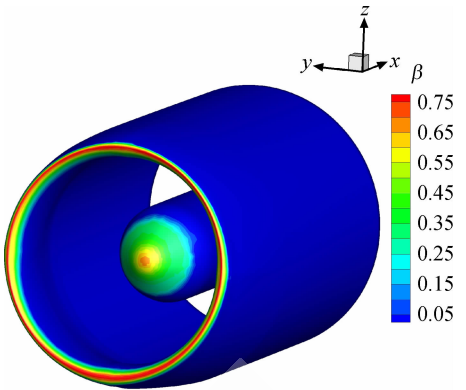


图 10 物面识别及加密过程

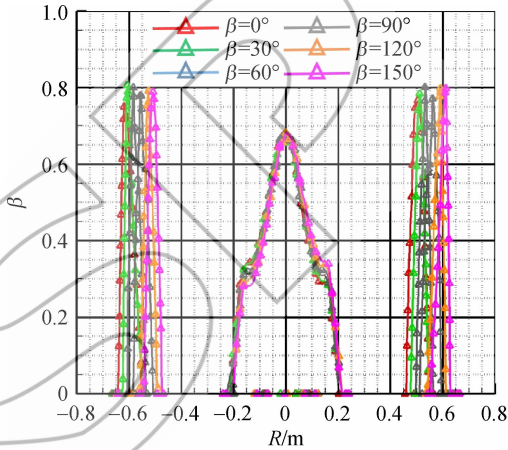
Fig. 10 Process of identifying model surfaces and refining the source mesh

前部段,这与同类模型实验现象^[21]一致。

壁面水滴收集率分布云图如图 11 所示,图中横坐标 R 为到转子驻点的距离。可见,发动机整流罩的水滴收集率变化受水滴尺度影响更加敏感,且在靠近前缘点附近,收集率曲线斜率出现拐点。

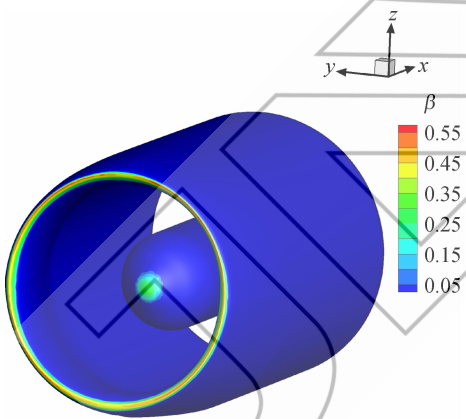


(c) 44.5 μm 粒径下的水滴收集率分布云图

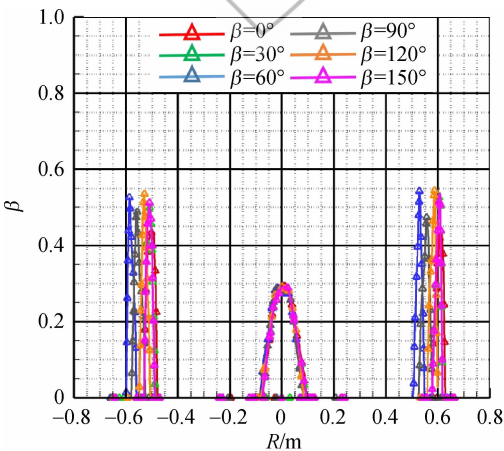


(d) 44.5 μm 粒径下 $y=0$ m 截面上的水滴收集率分布曲线

图 11 某型发动机短舱壁面收集率计算结果
Fig. 11 Results of the collection efficiency of the engine nacelle model



(a) 16.45 μm 粒径下的水滴收集率分布云图



(b) 16.45 μm 粒径下 $y=0$ m 截面上的水滴收集率分布曲线

6.4 翼身组合体撞击特性计算

翼身组合体具有典型的三维流动特性,且在机翼与机身连接处存在遮蔽区。为验证本文算法求解此类算例的鲁棒性,本节研究了一套简化的翼身组合模型的水滴撞击特性。计算工况如下:马赫数为 0.23;攻角为 0° ;雷诺数为 6.0×10^5 ;远场静温为 288.15 K;液滴直径为 $20 \mu\text{m}$ 。

液滴阵列的释放范围和空间位置分别由数模的外接盒体尺寸和来流速度方向预估得到,阵列密度采用 60×60 的笛卡儿网格表示。图 12 给出了加密 3 层后的收集率分布结果。并截取了机翼站位在 15%、35%、55%、75%、90% 处的弦向收集率分布曲线。

从图 13 可以发现,受流动三维效应影响,沿机翼展向,越靠近翼梢水滴收集率越大。对比各截面最大收集率,翼梢比翼根处高出了近 30%。

图 14 给出了翼身接合处的水滴轨迹,从图中可以很明显地观察到在翼根处出现局部的水滴场

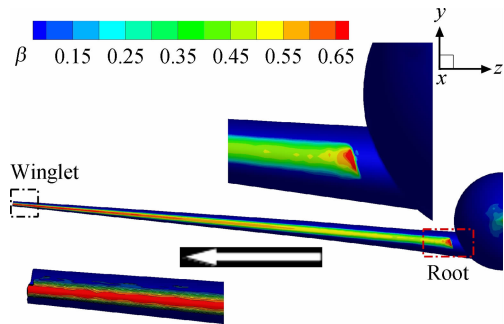


图 12 翼身组合体模型收集率分布

Fig. 12 Counter of collection efficiency of the wing-body model

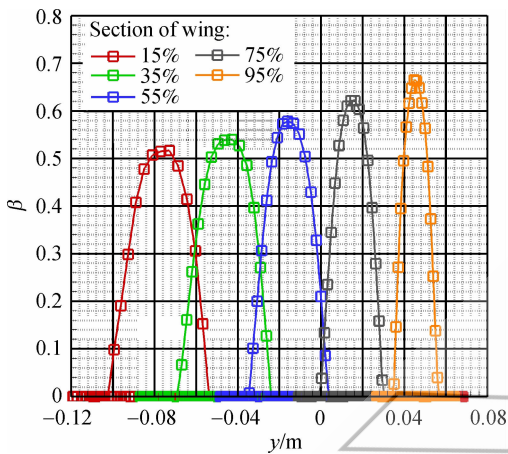


图 13 机翼沿弦向不同站位的收集率分布

Fig. 13 Distribution of collection efficiency along the chord in different sections of wing

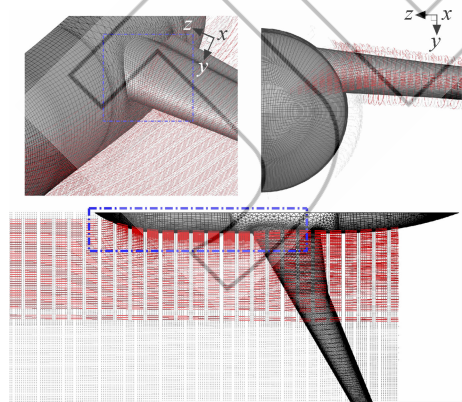
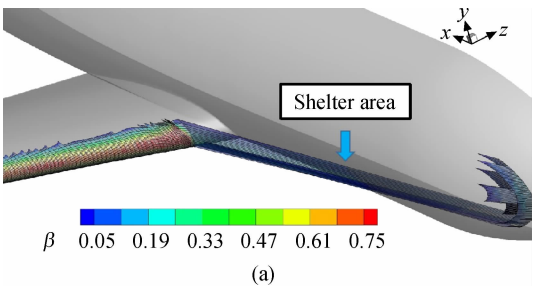
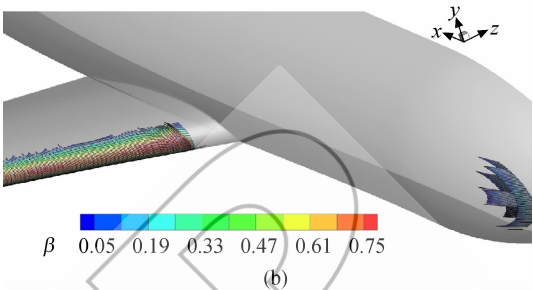


图 14 机翼机身接合处水滴轨迹

Fig. 14 Droplet trajectories of the wing-body model nearby the joint



(a)



(b)

图 15 翼身组合体模型水滴撞击网格

Fig. 15 Impingement mesh of the wing-body model

一点证明了本文采用的算法具备模拟复杂构型收集率的能力。

7 结 论

1) 本文发展的粒子定位方法在多面网格下寻址较 Haselbacher 方法有更高的效率,减少了轨迹计算所耗占的计算资源。

2) 笛卡尔网格自适应加密技术有效地完善了传统方法在识别撞击极限和遮蔽区存在的不足,提高了拉格朗日方法的计算能力。同时本文设计的网格投影算法,解决了复杂构型下的三维收集率计算问题,并采用径向基函数插值技术,实现了拉格朗日方法对壁面收集率的表征能力。

3) 文中计算结果与实验测试数据吻合良好,表明本文方法具备常规粒径(即粒径在 15~50 μm 范围内)下的数值模拟能力。同时,该方法在发动机短舱和翼身组合体模型的水滴收集率计算中,表现出良好的鲁棒性,满足工程应用条件。

致谢

感谢中山大学谢亮副教授提供的帮助。

参考文献:

[1] 高郭池,丁丽,李保良. 气动除冰类飞机结冰风洞试验适航审定技术[J]. 实验流体力学, 2019, 33(2): 85-94.
GAO Guochi, DING Li, LI Baoliang. Airworthiness certification technology about icing wind tunnel test for pneumatic de-icing aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(2): 85-94. (in Chinese)
[2] WILLIAM B W. Validation results for LEWICE 3.0[R].

遮蔽区域。图 15 分别给出了传统方法和本文方法计算得到的“撞击网格”,图 15(a)为未识别遮蔽区结果,图 15(b)为识别遮蔽区后结果。本文算法在计算收集率时,有效地避开了对遮蔽区面积的统计,从而不会出现非物理的插值结果。这

- AIAA 2005-1243,2005.
- [3] REID T, BARUZZI G, OZCER I. FENSAP-ICE simulation of icing on wind turbine blades; Part 1 performance degradation[R]. AIAA 2013-0750, 2013.
- [4] SAEED F, BRETTE C, FREGEAU M. A three-dimensional water droplet trajectory and impingement analysis program[R]. AIAA 2005-4838, 2005.
- [5] POTAPCZUK M G, BIDWELL C S. Swept wing ice accretion modeling[R]. AIAA-90-0756, 1990.
- [6] 孙志国, 朱春玲. 三维机翼表面水滴撞击特性计算[J]. 计算物理, 2011, 28(5): 677-685.
- SUN Zhiguo, ZHU Chunlin. Calculation of water-droplet impingement on wing surface[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(5): 677-685. (in Chinese)
- [7] 易贤, 王开春, 林业伟. 结冰面水滴收集率欧拉计算方法研究及应用[J]. 空气动力学报, 2010, 28(5): 596-601.
- YI Xian, WANG Kaichun, GUI Yewei. Study on Eulerian method for icing collection efficiency computation and its application[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2010, 28(5): 596-601. (in Chinese)
- [8] 陈希, 招启军. 考虑遮蔽区影响的旋翼三维水滴撞击特性计算新方法[J]. 航空学报, 2017, 38(6): 120745. 1-120745. 12.
- CHENG Xi, ZHAO Qijun. New method for predicting 3-D water droplet impingement on rotor considering influence of shadow zone[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(6): 120745. 1-120745. 12. (in Chinese)
- [9] 张文英, 常士楠, 蒋斌. 基于 VOD 方法的大水滴袋状破碎的仿真研究[J]. 空气动力学报, 2018, 36(4): 605-612.
- ZHANG Wenying, CHANG Shinan, JIANG Bing. Numerical simulation of large droplets in bag breakup regime based on VOF method [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2018, 36(4): 605-612. (in Chinese)
- [10] HAMED A. Numerical simulations of ice droplet trajectories and collection efficiency on aeroengine rotating machinery[R]. AIAA 2005-1248, 2005.
- [11] BIDWELL C S. Particle trajectory and icing analysis of the E3 turbofan engine using LEWICE3D (version 3) [R]. NASA/TM-2012-217696, 2012.
- [12] CHAO Q, LOTH E. Numerical study of droplet trajectory and collection efficiency in IRT with large blockage effects [R]. AIAA 2017-4376, 2017.
- [13] WIDHALM M, RONZHEIMER A, MEYER J. Lagrangian particle tracking on large unstructured three-dimensional meshes[R]. AIAA 2008-472, 2008.
- [14] 赵钟, 张来平, 何磊, 等. 适用于任意网格的大规模并行 CFD 计算框架 PHengLei[J]. 计算机学报, 2019, 11(11): 2368-2383.
- ZHAO Zhong, ZHANG Laiping, HE Lei, et al. PHengLei: a large scale parallel CFD framework for arbitrary grids [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 11(11): 2368-2383. (in Chinese)
- [15] JOHN R. Droplet size distribution effects on aircraft ice accretion[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(6): 503-508.
- [16] HASELBACHER A. An efficient and robust particle-localization algorithm for unstructured grids[J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225(2): 2198-2213.
- [17] RAMSEY S, POTTER K, HANSEN C. Ray bilinear patch intersections[J]. Journal of Graphics Tools, 2004, 9(3): 41-47.
- [18] LOHNER R, AMBROSIO J. A vectorized particle tracer for unstructured grids [J]. Journal of Computer Physics, 1990, 91(1): 22-31.
- [19] WANG G. Improved point selection method for hybrid-unstructured mesh deformation using radial basis functions [J]. AIAA Journal, 2014, 53(4): 1016-1025.
- [20] TONG X L, LUKE A. Eulerian simulations of icing collection efficiency using a singularity diffusion model [R]. AIAA 2005-1246, 2005.
- [21] BIDWELL C S. Collection efficiency and ice accretion calculations for a sphere, a swept MS(1)-317 wing, a swept NACA-0012 wing tip, an axisymmetric inlet and a Boeing 737-300[R]. AIAA 95-0755 1995.

(编辑: 李岩梅、王碧琚)