一种复杂几何自适应笛卡尔网格快速生成方法

汤其楠[1]，刘剑明[1]，张朔[2]，陈航[2]，田琳琳[2]，王镇明[2]，赵宁[2]

（1. 江苏师范大学，徐州 221009； 2. 南京航空航天大学，南京 210016）

一、研究背景与技术挑战

▶ **复杂外形高雷诺数模拟挑战：**贴体网格生成已成为制约计算流体力学（CFD）求解效率的主要瓶颈之一。面对日益复杂的几何外形与多尺度流动，传统手工/半自动贴体划分耗时巨大且难以保证局部网格质量与正交性。

▶ **自适应笛卡尔网格（AMR）优势：**在背景直角网格上叠加局部自适应加密，绕开工业 CFD“网格瓶颈”；依据几何与流动特征动态调整分辨率，将算力精准投放到激波、剪切层、尾迹等大梯度区域。

▶ **网格类型判断与壁面距离计算：**流固边界处理必须频繁将单元分类为：外部流体单元、内部固体单元以及相交单元（切割单元）。壁面距离不仅用于湍流模型和边界层加密，还直接参与相交裁剪与内外判别，是动态自适应的核心支撑。

▶ **传统 KD 树几何加速瓶颈：**KD 树按空间坐标划分，单个三角面片易被分割并存储在多个节点中，导致网格求交时需在多个节点间重复搜索，逻辑复杂且效率受限；STL 网格变形时 KD 树需完全重建，动态更新成本高；当查询点位于分割面上时，浮点舍入误差易导致漏判或出错。

【核心研究动机】

针对现有自适应笛卡尔网格生成中几何探查的计算耗时过载与浮点鲁棒性瓶颈，发展一种改进的加速树生成与空间检索处理方法，全面优化网格类型判断、几何相交判定与物面距离计算，突破传统 KD 树的效率上限。

改进树结构相较传统 KD 树的核心算法优势

✔ **消除重复求交：**基于图元包络组织层次，杜绝三角面片被割裂存储在多个节点造成的冗余遍历

✔ **杜绝奇异退化：**多向投影与自适应相交确诊消除分割面上浮点舍入误差导致的漏判与误判

✔ **极速几何探查：**相交判断、壁面距离及内外判定全链路协同提速，部分算例实现 10 倍以上加速

二、改进树结构与几何加速方法

▶ **1. 改进加速树组织与极速构建：**以离散物体包围盒为底层基元组织加速层次结构，彻底避免 KD 树空间刚性分割导致的图元跨节点切割与重复存储；采用轻量高效的划分启发式，单次线性遍历图元建立包络，将构树时间显著压缩，实现百万级面片秒级装配与高效动态更新。

▶ **2. 高效空间最短壁面距离计算：**建立动态收缩探测盒与种子继承机制，自顶向下递归快速裁剪无交叠子树空间分支；快速锁定最小法向壁距及对应的极近物面三角面片，为湍流模型及边界层加密提供高精度支撑。

▶ **3. 稳健相交判定与预剪枝：**结合自适应临界距离门限预剪枝快速过滤大量远场背景单元；仅对可能碰撞的近壁单元调用分离轴定理（SAT）确诊，彻底消除无效相交测试。

▶ **4. 鲁棒流固内外属性甄别：**采用包围盒射线相交粗剪枝拦截脱靶枝干，结合多向正交投影穿透判定与奇偶计数律，严格消除传统射线法在物面棱边及顶点处的数值退化与浮点舍入误判。

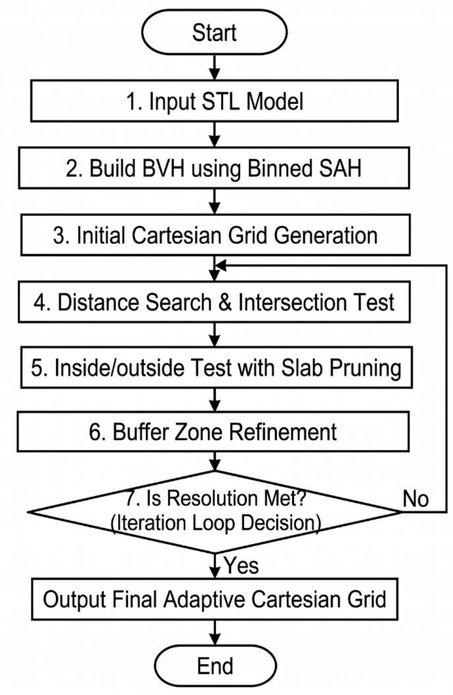


图 1：自适应笛卡尔网格优化算法流程图

三、性能基准测试与算例验证

模型	STL 三角形数	加密总网格数	方法	相交及壁面距离计算(秒)	内外判断(秒)	几何处理总时间(秒)
JAS39	17,037	236,797	**KD 树**	12.88	0.01	13.40
JAS39	17,037	236,783	本文	**0.22**	0.01	**0.79 (17.0×)**
M6	17,844	3,373,000	**KD 树**	12.77	0.07	15.06
M6	17,844	3,371,922	本文	**2.40**	0.08	**4.87 (3.1×)**
X37B	16,227	4,915,779	**KD 树**	42.53	0.18	45.32
X37B	16,227	4,912,097	本文	**21.51**	0.17	**24.38 (1.9×)**

• 算例分析：在 JAS39 等复杂航空构型中，相交与壁距计算从 12.88s 降至 0.22s，提速达 58 倍，几何处理总耗时实现 17 倍加速！

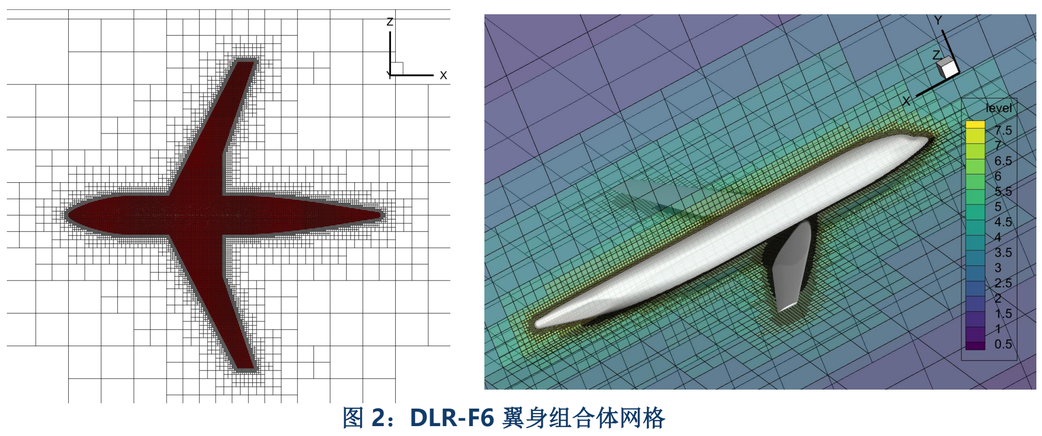


图 2：DLR-F6 翼身组合体网格

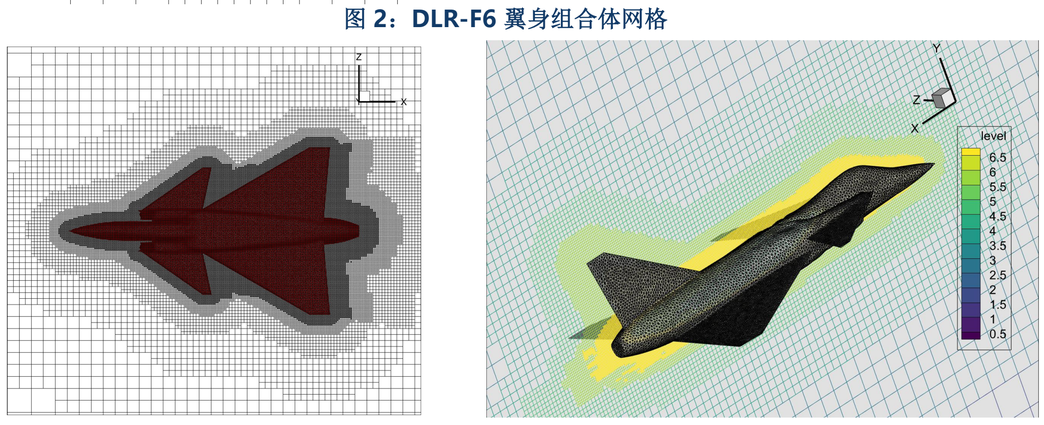


图 3：JAS39几何自适应笛卡尔网格

四、主要结论与软件集成

✔ **1. 突破几何探查瓶颈：**针对复杂几何笛卡尔网格生成，发展了一种改进的加速树快速生成方法，显著加速了相交判断与壁面距离计算，在部分算例中实现最高 17.0 倍的几何处理整体加速。

✔ **2. 显著提升数值鲁棒性：**克服了传统 KD 树在空间分割面处的浮点敏感性与漏判隐患，结合鲁棒相交确诊与多向投影甄别，有效解决边界退化与流固内外误判难题。

✔ **3. 大规模并行软件集成：**相关算法已成功集成到南京航空航天大学自主研发的大规模并行自适应笛卡尔网格 CABA 软件中，有力支撑航空航天复杂几何外形的高性能高保真数值模拟。

✔ **4. 参考文献 (References)：**

[1] 杨子璇, 齐昕宇, 王镇明, 田琳琳, 刘剑明, 赵宁. 自适应笛卡儿网格并行生成加速优化方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 104611.

[2] Hang CHEN, Zhenming WANG, Linlin TIAN, Jianming LIU, Ning QIN, Ning ZHAO. A dynamic partition weight strategy for accelerating parallel adaptive Cartesian grid generation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2026, 39(7), 103921.

[3] 赵宁, 刘剑明, 田琳琳, 王镇明. 可压缩流动问题笛卡尔网格模拟方法研究进展与展望. 力学学报, 2025, 57(2): 285-314.

[4] Hang Chen, Zhenming Wang, Linlin Tian, Jianming Liu, Ning Qin, and Ning Zhao. Coupling immersed boundary method with wall function for high Reynolds number compressible flows on adaptive Cartesian grids. Physics of Fluids, 2025, 37, 016143.

【致谢与学术交流】

• 基金资助：感谢国家数值风洞、国家自然科学基金等科研项目的资助支持。

• 会议交流：2026 全国网格生成及应用研讨会（MEGAS 2026，厦门）。

• 欢迎各位专家学者与同行莅临展位交流指导！