

计算流体力学非结构混合网格高精度格式研究现状

The Research Status of the High-Order Accuracy Methods for CFD with Unstructured Hybrid Meshes

雷国东 / 中国航空研究院航空数值模拟技术研究应用中心

摘要:介绍了航空CFD技术中的非结构混合网格高精度格式的基本理论和方法,国内外研究现状,几种非结构混合网格高精度格式。

关键词: 航空CFD技术; 非结构混合网格; 高精度格式

Keywords: aerospace CFD; unstructured hybrid mesh; High-Order accuracy methods

0 引言

飞行试验、风洞试验和计算流体力学(CFD)技术是获取飞行器气动力数据的三大手段。CFD技术因其代价低廉、实施周期短、精度可控,能得到飞行试验和风洞试验无法得到的某些关键数据和详细数据而在越来越多的领域替代飞行试验和风洞试验,可大幅度消减飞行器设计周期和设计费用,因而引起了国内外广泛重视。

现代战斗机的大迎角特性是其空中格斗和争夺制空权的重要战技指标,是发挥战斗机使用潜力,保证飞行安全的重要技术基础。第三代战斗机能够实现驾驶员眼望窗外“无忧虑”机动,第四代战斗机能够实现大量的“过失速”机动,这些都是充分的大迎角特性飞行试验基础上发展起来的。因此在现代战斗机的设计阶段必须充分考虑战斗机的大迎角飞行特性。而大迎角流动状态下对非定常、复杂涡流、分离流、激波以及这些流动结构之间相互作用的计算对现代CFD技术提出了相当大的挑战。

对于各种现代战斗机进行CFD计算,采用传统二阶格式必须以极大的网格数量且需要反复多套网格多轮计算,关键部位位置以及局部网格加密需要经验和通过对流场结果的分析。对于高超声速侦察机和导弹复杂的激波体系,传统二阶格式预报其准确位置和厚度代价较大,这些部位的位置和网格加密同样需要流场计算结果的分析,多套网格尝试,以极大的网格数量和计算量,多轮计算(包括自适应技术)才能逼近网格无关解,以得到准确的气动力数据,但是对于非定常计算,特别是激波和接触间断处于运动状态的情况下,反复的局部加密和加粗网格(包括自适应技术)的策略会导致计算量剧增,而且非定常动态自适应难以保证并行计算的负载均衡。

高精度格式是一种从本质上解决求解器对网格依赖性的方法,不仅可以较好地计算出运动中的间断,还可以完美地保证各个并行分区计算的负载均衡。因为高精度格式可以不通过局部网

格加密的策略来捕捉复杂流动结构,如激波和接触间断,在实际工程应用中也降低了CFD用户对某种飞机构型计算,特别是非定常计算的经验的要求。另外,大迎角状态下的CFD计算,高级湍流模型DES/LES可以更为真实地捕捉黏性流场中关键的旋涡、激波、分离,但是DES/LES对网格分辨率,对气动力影响较大的关键部位的网格密度(激波、旋涡、分离等流动结构),边界附近的网格密度要求也相当高(如图1),因为二阶格式的网格依赖性,即使配合DES/LES也很难算准关键部位的流动状态,高精度格式削弱和解除了网格依赖性,配合这些高级湍流模型可以以较粗的网格得到真实的网格无关解。

1 国内外研究现状

国内对于结构网格体系下的高精度格式研究比较成熟,非结构/混合网格技术目前并没有得到很好的推广,而非结构/混合网格是现在和未来空气动力学计算的主流,国内也有少部分研究

飞机构型				
	全机构型 高升力,半模构型	民机全机构型	战斗机全机构型	直升机全机构型
计算目标	气动力	尾迹涡	大迎角涡流	尾迹相互干扰,噪声振动
网格点数量	1500万~2000万	4000万	>3000万	4000万~4500万

图1 二阶格式对网格密度的要求

人员开始了非结构网格下的高精度格式(DG,LS-FV等)研究。中科院的肖锋研究员提出了一种CIP/MM的高精度格式应用于可压缩流计算,从其发表的文献看,目前主要应用于结构化网格研究。清华大学的任玉新教授、雷国东博士、李万爱博士等人在非结构网格最小二乘高精度有限体积法以及高精度非结构网格限制器方面做了比较深入的研究。南京大学的邱建贤教授对WENO格式,RKDG方法进行了深入的研究,加入了欧盟自适应高精度研究方法项目ADIGMA,参与了该项目对WENO RKDG方法的研究。

2 国外研究现状

国外对高精度格式研究的代表是欧盟的ADIGMA项目及其后续IDIHOM项目。

ADIGMA(Adaptive High-Order Variational Methods for Aerodynamic Application in Industry)项目自2006年启动,持续36个月,总经费超过488万欧元,其中欧盟提供320万欧元。该项目认为CFD技术是未来的航空工业新产品设计中的一项关键技术。在航空产品开发的所有阶段的数值模拟技术中,物理建模和数值算法的重大革新与计算机硬件能力的大幅度提升同等重要。该项目的重点是开发新颖的自适应高精度格式以应用于求解高雷诺数的N-S方

程。主要目标是:可压缩流的高精度空间离散格式;非定常流包括运动边界的高精度时间空间离散方法;可靠的自适应技术,包括误差估计,目标指向的各向同性、各向异性网格加密技术;自适应与局部变阶数混合策略;将新颖的自适应高精度格式应用于航空及其他涉及空气动力学的行业中,并就其工业中的应用与现有的艺术级二阶格式求解器作对比。

IDIHOM(Industrialization of High-Order Methods)项目是ADIGMA的后续项目,主要集中于自适应高精度格式的基础理论研究,该项目更加关注在欧盟航空航天工业中推进CFD辅助设计、分析应用高精度格式软件和复杂构型(包括内流和外流)中应用高精度格式的情况。该项目主要目标:推动现有的高精度方法应用于复杂的工业流动计算;展示高精度格式对于工业内流和外流的计算能力和增效作用;展示高精度格式应用于多学科计算的效果,包括气动声学(降噪)和气动弹性(降低飞机重量,改善飞机安全性);推进高精度格式技术成熟度从3级到5级;在多个工业领域应用高精度格式,包括燃烧模拟、燃气轮机、直升机、地面运输工具以及欧盟的“清洁天空”项目。国外对于高精度格式的研究正处于百家争鸣阶段,离工程实用有较大的距离。一些专业研究机构如NASA、DLR、

FOI还没有公布他们的非结构网格高精度格式CFD软件。

3 几种非结构混合网格高精度格式简介

高精度格式是在求解器高精度插值和高精度积分的基础上解决流动细节的分辨,是从本质出发解决问题。各种方式的非结构混合网格自适应技术已经相当成熟,现已成功应用于各种非结构混合网格商用CFD软件,如Fluent、CFX、CFD++、Star-CCM+等,以及各种著名的非结构混合网格In-House代码,如NASA USM3D、FUN3D、DLR TAU等。从各种公开的文献和资料来看,非结构混合网格高精度格式在各种非结构混合网格商用CFD软件和各种著名的非结构混合网格In-House代码上还没有成功应用的案例。

在结构网格上(如二维的四边形、三维的六面体)实现高精度格式(高精度差分法或者高精度有限体积法)相对比较容易,因为结构网格的IJK拓扑关系给出了邻居网络的连接关系,包含较大模板的高精度差分格式可以方便的实施,但是对于复杂求解域结构网格的生成比较复杂,往往耗时巨大。与结构网格相比,非结构混合网格对于复杂求解域的划分较为容易,但是缺乏结构网格的IJK拓扑关系。结构网格上成熟的一系列高精度格式因为需要IJK拓扑关系很难在非结构混合网格上实施,结构网格上成熟的各种限制器,特别是高精度格式限制器同样需要IJK拓扑关系,因而很难实施于非结构混合网格。为了在越来越复杂的工业实践,特别是航空航天工业中应用高精度格式求解实际问题,就必须应用非结构混合网格离散这些复杂求解域,以降低CFD工作者前处理的工作量,因为对于实际CFD应用

人员来说,这些前处理工作量占整个CFD求解工作量的80%以上,这样就必须开发相应的非结构混合网格高精度格式。下面介绍三种非结构混合网格上的高精度格式:间断迎辽金法(DG),最小二乘高精度有限体积法(LS-FV)和谱体积法。

3.1 间断迎辽金法

间断迎辽金法(DG)是加权余量法的一种,权函数采用重构基函数;有限体积法可以被视作加权余量法中的子域法,即在控制体内权函数为1,控制体外权函数为零。DG方法通过控制体本身及少量邻居控制体实现对控制体内部的高阶精度重构,模板具有紧致的优点,利于并行计算和高阶边界条件的处理。

DG方法中场变量重构可采用Lagrangian或者Hermite方法,即采用变量及其各阶导数重构(图2)。以二维守恒型控制方程为例,采用正交归一的重构基函数,考虑控制方程的弱解积分形式,权函数仅仅是空间坐标的函数,进行分部积分,则有如下积分方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_N \end{bmatrix} = \frac{1}{V} \left[\int_{\Omega} R \begin{bmatrix} B_1^p \\ B_2^p \\ \dots \\ B_N^p \end{bmatrix} dV - \int_{\Gamma} [(F, G) \cdot \bar{n}] \right]$$

$$\begin{bmatrix} B_1^p \\ B_2^p \\ \dots \\ B_N^p \end{bmatrix} dA - \int_{\Omega} (F, G) \cdot \nabla \begin{bmatrix} B_1^p \\ B_2^p \\ \dots \\ B_N^p \end{bmatrix} dV$$

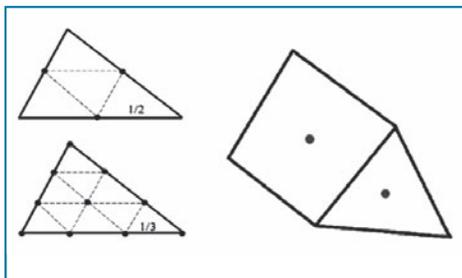


图2 拉格朗日插值与厄尔米特重构

上述方程可以采用各种时间离散格式求解,如龙格库塔方法,则此时DG方法被称为RK-DG。文献[1]中给出了对Ma=3超声速进气道计算结果的分析,依次采用FV(1)(二阶有限体),DG(1)(二阶DG),DG(2)(三阶DG)格式(图3)。

3.2 最小二乘高精度有限体积法

笔者在此法上进行了一定的研究,给出了一种通用的重构模版选择方法如图4(a)和普通

的模版选择如图4(b),并将非结构网格高精度FV的结果与DG的计算结果进行了对比^[2],见图5~图8。这里只讨论基于网格的有限体积法,每一个基本网格单元被称为控制体,通过每一个控制体与其一系列邻居控制体建立重构多项式,这是一种拉格朗日插值,如采取如下重构^[3,4]:

$$R(\bar{r} - \bar{r}_c) = a_{00} + a_{10}(x - x_c) + a_{01}(y - y_c) + a_{20}(x - x_c)^2 + a_{11}(x - x_c)(y - y_c) + a_{02}(y - y_c)^2$$

重构系数采用中心控制体和邻居控制体通过最小二乘方法给出,DG方法同步给出了场变量平均值和重构系数,最小二乘有限体积法虽没有同步给出,但是随着中心控制体和邻居控制体场变量平均值的给出,相当于隐式同步给出了场变量的重构,因而不存在所谓重构延迟的问题。数值通量的计算与前

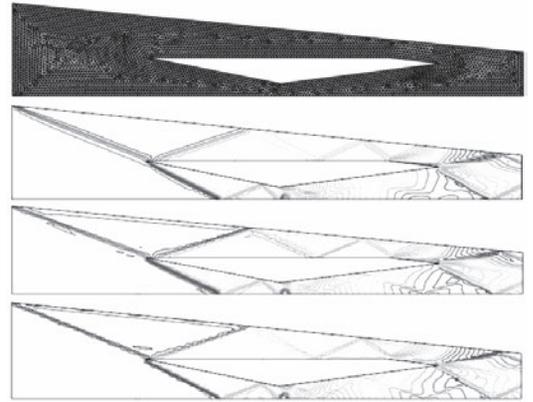


图3 Ma=3超声速进气道马赫数等值线对比,从上到下依次是FV(1),DG(1),DG(2)

面DG方法类似,但是基函数取1,对于控制体内部的插值,例如,求解近似黎曼问题时控制体界面上的数值通量计算,采用左右两侧控制体的重构多项式进行。

这种方法的缺点是进行高阶重构需要较多的邻居网格,这对于MPI并行和高阶边界条件的处理较为不利;最新的发展是采用Hermite重构,即结合DG方法,低阶导数采用DG方法算出,高阶导数采用中心网格及其少量邻居网格的场变量平均值和低阶导数值进行Hermite重构得到。这种方法结合了LS-FV和DG方法各自的优点,削弱了各自的缺点。

下面给出了对于前台阶算例,这是一个运动间断地计算问题,马赫数为3的气流冲击了直角台阶,产生运动的反射激波和接触间断,二阶格式Bath-Jespersen限制器,三阶和四阶格式WENO

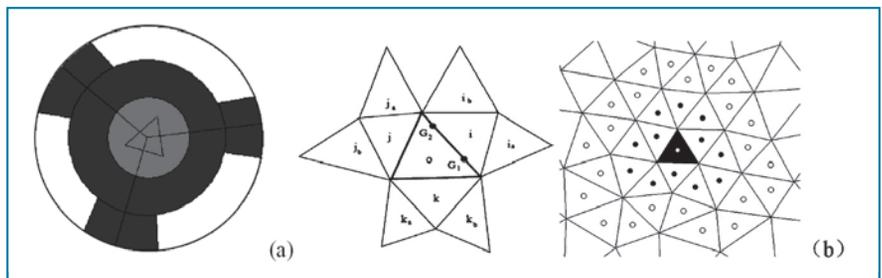


图4 最小二乘重构邻居网格的选择,数量控制的方法

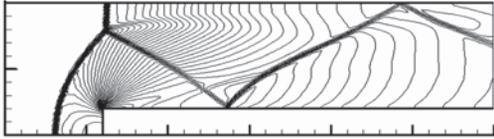


图5 二阶格式,基于顶点的梯度重构,BJ限制器

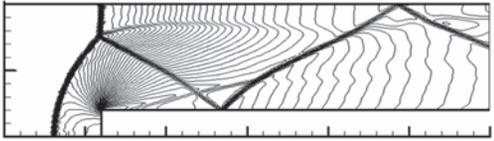


图6 三阶LS重构,WENO限制器

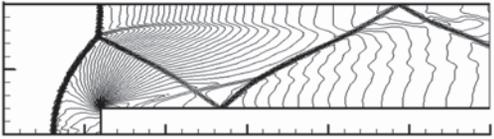


图7 四阶LS重构,WENO限制器

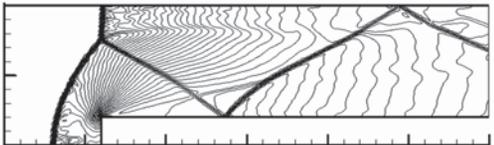


图8 三阶DG (2)重构,WENO限制器

限制器计算结果如图6~图8,在同一网格上(三角形单元),高精度格式(三阶和四阶)不论对激波还是接触间断的计算都要明显好于传统二阶格式,但是高阶DG方法在间断后产生了明显的非物理振荡,这是DG方法必须解决的问题。

3.3 谱体积法

网格基本单元如二维的三角形和三维

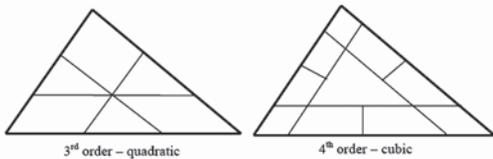


图9 谱单元和控制体

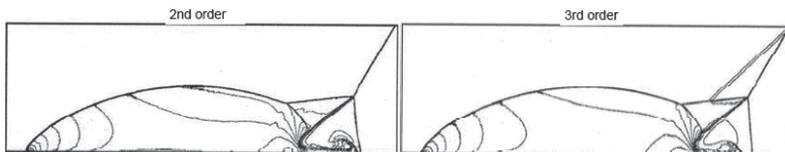


图10 SV方法,TVD限制器计算的双马赫反射算例密度场

四面体被称为谱单元(SVs),每一个谱单元被分解为若干个控制体(CVs),见图9,对于每一个谱单元,通过对其所有控制体上场变量平均值的拉格朗日插值,便可以得到谱单元内部的重构多项式,控制体中的场变量的平均值即为谱体积法的自由度。对于每一个控制体均可以建立类似有限体积法的积分方程,不同的是控制体在谱单元内部的分界面上的数值通量的计算可以通过谱单元内部的重构多项式直接给出,而不是求解近似黎曼问题;而控制体在谱单元之间的交界面上的数值通量计算则必须求解近似黎曼问题。图10所示为文献[5]中对于双马赫反射算例二阶和三阶格式的计算结果。

4 结束语

非结构混合网格高精度格式对于复杂求解域可压缩流计算中出现的各种流动结构的捕捉明显优于传统二阶格式,是一种从本质上解决计算精度的方法。而二阶格式要达到相同的精度,必须在关键位置加密网格,这就存在两个问题,一是关键位置往往必须算过才知道,二是如果是非定常流动,关键位置是运动的。反复的手工或者自适应加密或者放粗显然体现了传统二

阶格式求解器对网格的依赖性,是一种费时费力的策略,动态自适应则破坏了并行计算的负载平衡,而高精度格式却能在不破坏负载平衡的条件下降低求解器对于网格的依赖性。

开展非结构混合网格高精度格式的CFD软件的研究,对于开展国际合作,引进更先进技术服务于军事航空工业,降低国外商业CFD软件的倾销价格等方面无疑有着极大的作用。

AST

参考文献

- [1] Hong Luo, Joseph D Baum, Rainald Lohner. Fast p-Multigrid Discontinuous Galerkin Method for Compressible Flows at All Speed[J]. AIAA Journal, 2008, 46(3).
- [2] 雷国东,李万爱,任玉新. 基于WENO限制器和旋转Riemann求解器的通用高精度非结构网格有限体积法[C]. 上海: 大型客机与高精度计算方法会议, 2010.
- [3] Carl Ollivier-Gooch, Amir Nejat, and Krzysztof Michalak. On Obtaining High-Order Finite-Volume Solutions to the Euler Equations on Unstructured Meshes[R]. AIAA 2007-4464.
- [4] 李荫藩. 双曲型守恒律的高阶、高分辨率有限体积法[J]. 力学进展 2001, 31(2).
- [5] John A Ekaterinaris. On the Use of High Order Methods for Complex Aerodynamic Problems[R]. AIAA 2004-431.

作者简介:

雷国东,博士,高级工程师,主要从事CFD技术研究。