

湍流大涡数值模拟的现状与展望

Status and Prospects of Large Eddy Numerical Simulation of Turbulent Flow

万曦 / 中国航空研究院航空数值模拟技术研究应用中心

摘要:近年来,随着计算机技术和计算流体力学(CFD)技术的发展,大涡数值模拟(LES)越来越多地应用于解决湍流流动问题。本文介绍了当前LES研究与应用的主要领域以及取得的成果,分析了LES的局限及实施的难点,并对LES未来的研究方向和重点进行了总结。

关键词: 湍流; 大涡模拟

Keywords: turbulent flow; large eddy simulation

0 引言

多年来,实际工程问题中广泛应用的湍流数值模拟方法一直是雷诺平均N-S方程(RANS)法,其缺点是只能提供湍流场的平均流动信息。与之相对的,直接数值模拟(DNS)方法求解完全N-S方程能够得到完整的湍流能谱,但同时需要很高的空间和时间分辨率,在目前的计算条件下,只能用于模拟雷诺数较低的简单湍流运动。在这种情况下,大涡模拟(LES)应运而生。LES作为一种新的湍流数值模拟方法,首次出现于1969年,其主要思想是:通过过滤将湍流流动分解为大尺度运动和小尺度脉动,其中大尺度运动直接采用数值方法求解,而小尺度湍流脉动对大尺度运动的作用则通过模型模拟。随着计算机技术的快速发展,以及集成了LES与混合LES/RANS方法的生产级代码的可用性,使得LES逐渐成为湍流数值模拟的热门课题。本文通过阐述LES方法当前在科研与应用中取得的进展以及存在的问题,对LES方法的应用前景以及研究方向进行展望。

1 LES的研究与应用

十年前,LES的主要应用领域是相对简单的外形和较低雷诺数的流动,发

展到今天,LES已经在更广阔的领域得以应用。

在格式方面,Fureby等人在LES求解器中植入非结构算法,并以从相对简单的标模流动到航空及航海应用中复杂外形的流动为算例,对非结构算法进行了研究,取得了很好的结果。作为一种近年来引起重视的新兴的LES技术,非结构算法在LES的工程化应用上有很好的前景。

在将LES算法应用于主动流动控制问题方面,Rizzetta等人进行了若干年的研究并取得了一些成果,其中包括将基于等离子体的流动控制应用于涡轮机内的流动。该类非定常问题很难用RANS方法精确模拟,而采用LES方法则是很好的选择。

LES被广泛应用的一个领域是气动声学模拟,尤其是用于预测由发动机产生的喷气噪声。由于LES能够直接计算出产生声波的大尺度压力脉动,相比RANS方法,LES具有更高的模拟精确度。这一点已为Tucker等人的研究所证实。此外,LES在气动声学领域的应用还包括预测由起落架、武器舱以及高升力装置等诱发的噪声场。

在气动推进领域,将LES应用于预测燃烧流场已成为现实。在多数情况下,

燃烧流场的流动中,湍流速度脉动往往达到与平均流动速度相同的量级,对这类由大尺度湍流支配的燃烧模拟问题,LES是比RANS更为适合的数值方法。

LES在模拟包含大分离流动或尾迹流动问题上也有广泛的应用,范围涉及人体运动产生的尾迹流动、飞行器和其他交通工具的气动力、船舶和潜艇的水动力等。同时,在诸如气动弹性分析、气动光学等多学科交叉问题上,LES方法也引起了越来越多的研究兴趣。

2 LES的局限与难点

尽管LES的研究与应用已取得了很多有价值的成果,但依然存在以下一些问题。

1) 受计算能力与资源的限制

目前LES方法的应用主要集中在以大尺度湍流为主远离壁面的流动中。对于工程设计问题中所涉及的雷诺数范围,用LES方法来捕捉壁面效应,以现有的计算能力和资源尚难以实现。

2) 网格敏感性问题

对于LES方法,由于过滤尺度由网格尺度决定,越细密的网格通常能模拟出越小尺度的湍流运动,因此LES方法往往不像RANS方法一样具有网格收敛

性。理想状况下,精确的LES计算不止对网格精度具有敏感性,而且还受到网格长宽比、时间离散形式、亚格子模型和边界条件等因素的影响。随着LES的广泛应用,有必要在数值解的模拟精度和满足工程设计需要之间取得折衷。

3) 非结构网格在LES中的应用

对于复杂的几何外形,生成非结构的计算网格是一种更简单易行的方法,因此近期在LES中采用非结构网格的应用逐渐增多,在Mavripilis的一篇文献中对这方面的应用进行了综述。将非结构网格应用于LES计算,最大的挑战是推导出高阶的非结构算法,目前处于进展中的工作主要有谱体积(SV)法和在不连续伽辽金(DG)法。其中DG方法极具吸引力,它能够在固定网格中进行压力修正,从而提高计算精度。

4) LES中的迎风格式

几乎所有的生产级RANS求解器都采用迎风格式,但对于LES来说,采用迎风格式是否合适依然存疑。迎风格式具有较大的耗散性,因此在早期对低雷诺数简单流动的数值模拟研究中,不适合在LES计算中采用迎风格式。随着LES与混合LES/RANS方法越来越多地用于模拟工程设计中的复杂流动问题,尤其是对于流场中存在诸如激波这类的间断面时,迎风格式无疑能更好地保证数值解的稳定性。但是低阶迎风格式常常无法准确分辨湍流结构。因此,高阶迎风格式的开发是LES应用中的难点之一。

5) 亚格子模型的设计

对于早期LES研究的相对简单的流动问题,亚格子模型的作用以及需要模拟的尺度范围都易于确定,然而,随着LES与混合LES/RANS方法处理的流动和外形越来越复杂,亚格子模型和数值格式提供的数值粘性的作用越来越难以确定。对于诸如燃烧和多相流等涉及发

生在小于可解尺度内的物理过程问题,亚格子模型的设计与选择尤为重要。

6) 混合LES/RANS方法

过去十年间,作为LES方法与RANS方法的一种折中,混合LES/RANS方法得到了快速发展。到目前为止,该方法主要有两条发展途径,其一是在LES计算区域和RANS计算区域之间设定明显的分界,根据不同的湍流长度尺度采用不同的湍流模型,RANS区域只为LES区域提供流动的平均物理量;其二是从RANS区域到LES区域采用统一的湍流模型,在两种区域的交界处连续过渡。第一类方法较为简单易行,其不足在于RANS区与LES区之间存在不连续性,同时,可能因不恰当的网格密度产生模型应力损耗,造成非物理的分离。第二类方法虽然可以避免以上问题,但RANS与LES的交界区,模拟的湍流应力往往对保持LES的非定常湍流特性来说过大,而又不足以有效代替RANS的所有湍流应力。因此,如何推导出适合的连续模型是混合LES/RANS方法的一大难点。

3 总结

未来,LES将应用于范围更广阔的流动问题以及包括更多学科交叉的复杂问题。因此,推进LES方法发展应进行以下工作。

1) 进一步发展壁面-边界层的亚格子模型,以便应用LES模拟高雷诺数下边界层内的流动。

2) 在混合LES/RANS领域,找到正确处理RANS与LES交界区域的新方法。

3) 进一步开展将高阶非结构算法应用于LES的工作,目前,DG方法有很好的发展前景。

4) 继续开展高阶迎风格式以及混合中心/迎风格式的研究工作,使得模拟包含激波的流动问题时,既保持湍流

模拟的空间精度,又不降低激波附近的数值稳定性。

5) 对如何构造适合LES计算的网格(包括结构网格和非结构网格)开展深入研究。

AST

参考文献

- [1] 张兆顺,崔桂香,许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2008.
- [2] C.Fureby. Toward the Use of Large Eddy Simulation in Engineering[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(6): 381-396.
- [3] D.P.Rizzetta, M.R.Visbal, P.E.Morgan. A High-Order Compact Finite Difference Scheme for Large-Eddy Simulation of Active Flow Control[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(6): 397-426.
- [4] P.Tucker. The LES Model's Role in Jet Noise[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(6): 427-436.
- [5] D.J.Mavripilis, J.Pelaez, O.Kandil. Large Eddy and Detached Eddy Simulations Using an Unstructured Multigrid Solver[C]. Proceedings of the Third AFOSR International Conference on DNS/LES: C. Liu, L. Sakell, T. Beutner, Greyden, Columbus, OH, Aug. 2001.
- [6] Nicholas J. Georgiadis, Donald P. Rizzetta, Christer Fureby. Large-Eddy Simulation: Current Capabilities, Recommended Practices, and Future Research[R]. AIAA, 48(8): 1772-1784.

作者简介:

万曦,博士,高级工程师,主要从事湍流数值模拟研究。