

Research on the Progress of CFD Simulation Methods

Wenjun Yang

Zhongshan Zhongzhu Drainage Canal Project Management Center, Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract

The paper summarizes the computational fluid dynamics (computational fluid dynamics, abbreviation to as CFD), especially the development achievements in the field of water conservancy in the past four years, discussed from the aspects of grid technology, meshless technology, calculation method and calculation model.

Keywords

computational fluid dynamics; grid technology; numerical format; turbulence model; large eddy simulation

CFD 模拟方法的研究进展

杨文君

中山市中珠排洪渠工程管理中心, 中国·广东 中山 528400

摘要

论文综述了计算流体力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD), 尤其是在水利领域的近四年内的发展成果, 分别从网格技术、无网格技术、计算方法以及计算模型等方面进行了论述。

关键词

计算流体力学; 网格技术; 数值格式; 湍流模型; 大涡模拟

1 引言

计算流体力学是流体力学的一个分支, 用来求解固定几何形状空间内的流体的动量、热量和质量方程以及相关的其他方程, 并通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关信息。技术的发展促进了计算流体力学不断发展^[1]。

2 网格技术的研究

网格技术方面, 网格的合理设计和高质量的生成是 CFD 计算的前提条件。计算网格可分为以下几类: (1) 结构网格; (2) 非结构网格; (3) 基于充分发挥结构网格和非结构网格各自优点的思想的混合网格; (4) 重叠网格。

朱金和等采用基于混合网格的有限控制体积法对杜家台蓄滞洪区进行数值模拟^[2]。由于四边形结构网格能较好顺应水流方向同时减少网格数量, 非结构三角形网格能较好处理分洪民垸的复杂地形、顺应蓄滞洪区围堤走向及对围堤附近的局部网格进行加密。并根据实测资料进行验证计算, 发现混合网格的有限控制体积法对蓄滞洪区水流运动进行计算可以

减小计算工作量并且获得精度尽可能高的计算成果。张细兵等采用基于混合网格的有限控制体积法对荆江分洪区进行洪水演进过程中泥沙输移和河床冲淤变形的同步模拟^[3]。因为非结构三角形网格能较好拟合复杂的水域边界, 并能自由对重点区域进行加密处理, 所以能模拟分洪过程。国际上许多学者的分蓄洪区洪水演进的研究大都采用结构化网格, 一般未考虑河床冲淤变形问题, 该文的创新之处在于采用非结构网格并且考虑了河床冲淤变形问题。其中, 在 CNKI 上将主题词或关键词限制为重叠网格, 将时间限制为 2010 年至 2014 年, 未找出重叠网格在水利方面的应用, 大多数集中在航天领域。

在网格技术方面上, 水利方面近年发展的较多的网格是混合网格, 这种网格技术优点比较突出: 计算精度和效率高、网格生成简单、人工工作量小。重叠网格的优点比较适合航空航天领域的领域, 在水利方面的研究较少。

3 无网格技术的研究

20 世纪 70 年代发展起来的无网格方法, 由于其节点间

没有拓扑连接关系,避免了传统方法在求解时不断重分网格所带来的精度降低及计算复杂性增加等问题。目前,无网格方法的研究与应用主要集中在计算固体力学等领域,在计算流体力学领域的应用仍处于摸索阶段。目前已经提出了一系列无网格方法,从近似函数的逼近方案可将其分为以下几类。

第一,基于核近似的无网格方法,如光滑质点流体力学方法(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)、再生核粒子方法、移动粒子半隐式方法等(Moving Particle Semi-Implicit, MPS)。缪吉伦等人建立了高速滑坡块体运动模型对高速滑坡产生的巨大涌浪进行全程预测^[4],对滑坡冲击产生的水体运动,根据可压缩流连续方程和 Navier-Stokes 方程由 SPH 法求解,将所得初始涌浪高度、波浪爬坡高度与其他理论方法得到的结果进行了比较,结果表明该方法能够模拟滑坡涌浪运动过程,SPH 法适合模拟具有瞬时大变形等物理力学问题。何涛等在流体微可压缩的假定下,运用 SPH 方法模拟了二维自由表面流动问题,发现计算结果与实验数据吻合,计算精度理想,且消除了流体粒子附着在边界上的不合理现象。张驰等将 SPH 方法和 MPS 方法模拟溃坝问题的比较分析^[5],发现 SPH 方法易于给出更为清晰、光滑的自由面形状,而 MPS 方法给出的粒子分布较为凌乱;在收敛性上,随着初始粒子间距的减小,SPH 和 MPS 均趋于收敛,但 MPS 方法收敛得更快些;对于时间步长,在满足 CFL 条件且计算稳定的情况下,对结果影响不是很大;在计算效率上,SPH 方法具有较高的效率,适合求解大型复杂流动问题,而 MPS 方法计算量较大,为具体问题计算选用不同的无网格粒子方法提供了选择依据。

第二,基于最小二乘近似的无网格方法,如扩散单元法、无网格 Galerkin 方法、有限点方法、局部边界积分方程法、无网格局部 Petrov-Galerkin 方法、最小二乘无网格方法、最小二乘配点无网格方法以及加权最小二乘无网格方法等。

第三,基于径向基函数近似的无网格方法,如局部径向点插值方法等。

第四,基于单位分解法近似的无网格方法,如单位分解方法等^[6]。

在无网格方面上,水利使用的较多的方法是光滑粒子流体力学方法(SPH),无网格方法在水动力学领域的应用刚刚起步。

4 计算方法的研究

计算方法(或称计算格式)方面,理想的 CFD 计算方法应该是高精度、高效率、高可靠性。CFD 格式尽管种类繁多、发展迅速,但是认为典型的 CFD 空间离散方法主要包括两个方面。

第一,插值方法。例如, WENO 格式、紧致格式。武从海等针对 WENO 格式的构造,得到了新的 WENO 权因子计算方法。发现新的 WENO 格式对于连续波形的模拟要优于原格式。王坪等建立了一种基于投影法的求解不可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程的高精度紧致差分格式^[7]。在时间上采用 Kim 和 Moin 二阶投影法离散,在空间上采用高精度紧致格式离散,并提出了一种新的离散压力边界的紧致格式,同时对计算结果进行分析以验证该投影法的精度和格式稳定性。发现 Kim 和 Moin 投影法能使得压力场和速度场均达到时间二阶精度,且高精度紧致格式投影法也具有空间高阶精度。驱动方腔数值模拟结果显示,对 N-S 方程的离散格式具有很好的可靠性,适用于对复杂流体流动的小尺度问题的数值模拟和研究^[8]。

第二,通量计算方法。通量计算方法大致分为中心格式和迎风格式,这类方法主要反映的是流动的物理性质。郑国栋等选取上游流量下游水位的边界条件和上游水位下游流量的边界条件两种不同边界条件的经典算例,建立一维非恒定流明渠模型,分别采用 Abbott 六点中心格式、Preissmann 格式以及柯朗格式对算例进行模拟计算^[9]。数值试验比较发现,Abbott 六点中心格式对边界条件类型有较高的要求,为了保持格式的稳定和准确性常常要避免上游水位、下游流量的边界条件类型^[10]。

在计算方法方面上,水利在完善计算方法上希望达到高精度、高效率以及高可靠性的目标。

5 计算模型的研究

在计算模型方面有两大模式:(1)湍流模式。王春凌的硕士论文中采用不同的湍流模型对水下重力流进行数值计算模拟,并将湍流模型模拟数据与实验数据进行对比从而确定模拟水下重力流的最佳湍流模型。(2)大涡模拟模型。白静的博士论文建立了悬移质泥沙输移的大涡模型及边界条件,对水流运动、细颗粒泥沙在长槽道中的净淤积和冲刷的情况

进行模拟^[11]。

在计算模型方面上,湍流模型上不存在普遍适用的优秀湍流模型,在工程计算中存在多种湍流模型,但大都有适用的范围。大涡模型在水利方面可以计算得出水流和泥沙运输的瞬时规律^[12]。

参考文献

- [1] 余金伟. 计算流体力学发展综述 [J]. 现代制造技术与装备, 2013(06):25-28.
- [2] 朱金和. 基于混合网格的蓄滞洪区水流运动数值模拟 [A]. 第11届全国水动力学学术会议暨、第24届全国水动力学研讨会并周培源诞辰110周年纪念大会文集 [C]. 海洋出版社, 2012:1221-1276.
- [3] 张细兵. 基于非结构网格的分蓄洪区水沙演进数学模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2011(04):75-79.
- [4] 张小华. 无网格方法在计算流体力学中的应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [5] 缪吉伦. 库岸滑坡涌浪二维光滑粒子动力学数值模拟 [J]. 水土保持通报, 2013(03):175-179.
- [6] 何涛. 二维自由表面流动的光滑粒子动力学方法数值模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2011(10):1425-1429.
- [7] 张驰. SPH方法和MPS方法模拟溃坝问题的比较分析 [J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2011(06):736-745.
- [8] 武从海. 基于新光滑因子的WENOS格式 [J]. 计算数学, 2011(03):257-267.
- [9] 王坪. 基于投影法求解不可压缩流的高精度紧致格式 [J]. 工程数学学报, 2010(02):225-231.
- [10] 郑国栋. 浅析明渠非恒定流计算 Abbott六点中心格式 [J]. 广东水利水运, 2010(04):15-18.
- [11] 王春凌. 适用于模拟水下重力流的湍流模型比较研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2012.
- [12] 白静. 悬移质泥沙输移的大涡模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.