

· 书 评 ·
文/姚熊亮

一种无网格粒子法探究 ——《光滑粒子流体动力学》评介

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法是一种无网格拉格朗日型的粒子方法, 由 Lucy 与 Gingold、Monaghan 在 1977 年分别提出, 一开始用于解决三维开放空间的天体物理学问题, 目前被广泛应用于流体动力学、固体力学及其他工程学科各种问题的数值仿真中。SPH 方法克服了基于网格的数值方法计算中网格畸变带来的许多困难, 因而成为数值分析的一种有效方法。目前对 SPH 方法的研究仍处于起步阶段, 近年来反映 SPH 方法研究成果的国内外学术论文虽不少, 但系统、全面介绍并总结现有学术成果的专著却不多。

《光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法》从 SPH 的基本方程、光滑函数的构造、SPH 在广义流体动力学问题中的应用、非连续的 SPH (DSPH)、SPH 在爆炸模拟中的应用、SPH 在水下爆炸冲击模拟中的应用、SPH 在具有材料强度的动力学中的应用、与分子动力学耦合的多尺度模拟、SPH 的计算机实现和 3D 实例程序等方面, 系统介绍了光滑粒子流体动力学方法, 以简明易懂的方式, 详尽、细致地论述了 SPH 方法的基本思想、算例研究、数值技术、程序实现等。

该书数学理论与数值方法紧密结合, 对 SPH 方法原理的论述, 基本概念清楚, 数学方法严谨, 两者相辅相成, 使读者易于领会和掌握。本书不像其他数值方法专著那样需要读者具有一定的高级数学水平, 也不需要读者具有如有限元法、有限差分法等基于网格的数值方法的背景知识, 但如果具有这些背景知识将有助于掌握、应用其中的方法和实施过程。

SPH 方法自身具有很多优势, 它通过“核函数”积分核进行“核函数估值”近似, 将流体力学基本方程组转换成数值计算的 SPH 方程。整个流场离散成一系列“粒子”, 所有力学家由这些粒子负载。这些粒子可按计算公式, 即按流体力学流动的规律任意流动。可以假设每个粒子都有质量、拉格朗日插值点、速度、内能, 而其它变量由插值或所构成的相互关系求得。这样, 流体粒子的运动历程能被自然地捕获, 并很

容易描绘出物质交界面、自由表面、运动交界面。

该书不仅有基础理论的详细介绍, 也有重要的实际应用结果, 给出了大量的算例和图解, 包括不可压缩流、自由表面流、高度可压流、高能炸药起爆、高能炸药爆炸、水下爆炸、水下冲击的缓解、高速冲击、穿甲和分子动力学耦合的多尺度模拟等, 并在此基础上将 SPH 方法扩展到舰船的抗爆抗冲击领域。

舰船水下爆炸是高温、高压、高速的多相物质流动问题, 涉及一系列复杂过程; 炸药爆轰气体的产生、扩张和塌陷、水中冲击波的产生与传播、流体对舰船外壳的冲击及耦合作用、舰船结构的响应等。这些过程大都呈现瞬态性和非线性, 同时各个过程通常相互耦合, 外加舰船本身的结构非常庞大和复杂, 提高了分析难度。传统的拉格朗日法 (如有限元法), 能捕获与物质点相联系的爆炸过程。但由于在爆炸过程中会产生大变形, 令网格发生严重变形, 导致无效的极小时间步长产生, 有时甚至会导致计算崩溃, 所以很难将传统的拉格朗日法应用于实际。传统的欧拉法 (如有限差分法、有限元法), 能很好求解在全局运动过程中的大变形问题, 但由于固定于空间的欧拉网格不能对粒子的时间历程进行追踪, 且对粒子的信息记录很模糊, 故应用传统的欧拉法很难分析爆炸流动的细节。SPH 方法的无网格特性能克服在计算中与大变形相关的困难, 且易与冲击波物理中的相关理论相结合, 可描述在船体表面形成的由于冲击波的反射、透射产生的复杂波系的相互作用现象, 使 SPH 方法非常适宜处理舰船水下爆炸的复杂过程, 将 SPH 方法应用到舰船抗爆抗冲击的防护和设计成为可能。

该书包含了一些关于其他方面有用的技术信息, 例如修正的 SPH 方法、张力不稳定问题、边界条件处理、物质交界面处理、非连续的 SPH 方法、SPH 方法与分子动力学的耦合等, 并给出了大量有关数值计算参数的参考值, 包括支持域尺寸参数、人工粘度参数、边界虚粒子的排斥力参数、物质交界面的惩罚力参数等。这些参数在



G. R. Liu, M. B. Liu 著, 韩旭, 杨刚, 强洪夫 译, 湖南大学出版社, 2005 年 11 月第 1 版, 定价: 50.00 元

理论上通常没有最佳值, 其取值往往与所研究的具体问题和所采用的具体算法密切相关。

该书的另一重要特色是理论方法和计算机实施相结合, 给出了用 Fortran 77 语言编写的三维 SPH 程序的源代码、SPH 程序的主要结构及变量说明。程序展示了许多与 SPH 方法相关的数值概念和处理技巧, 并通过算例详细讲述了程序的使用方法。作为一个结构化的程序, SPH 程序能根据读者的特殊要求进行相应修改或插入、调用相应的子程序, 例如通过修改函数及其方程组的核近似法或粒子近似法, 能很容易扩展到其他 SPH 方法的改进或修正形式; 通过使用恰当的本构模型和状态方程能轻易地将程序修改应用于具有材料强度的动力学问题。这方便读者掌握 SPH 方法的程序实现, 节省大量开发程序的时间, 使读者能更快理解、接受和将 SPH 方法应用到实际中, 解决实际的科学和工程问题。

该书所论述的方法、相关的应用和源程序代码, 有助于力学、土木、船舶、航空航天、海洋工程等进行计算流体力学、计算固体力学的研究及应用, 特别是针对爆炸模拟、水下爆炸冲击模拟、穿甲与反穿甲模拟、流固耦合模拟等工程实际问题具有较高的实际应用价值。而且从中不仅能获得对 SPH 方法的全面了解和掌握, 还能得到其他无网格方法研究和应用的有益启示。

本文作者 姚熊亮, 哈尔滨工程大学船舶工程学院教授。

栏目主持人 尹传红,《大众科技报》主任编辑, 电子信箱: asimov@126.com。

(责任编辑 陈广仁)