

**SMOOTHED PARTICLE
HYDRODYNAMICS:
A MESHFREE
PARTICLE METHOD**

G.R.Liu M.B.Liu[著]

**光滑粒子流体动力学
——一种无网格粒子法**

韩旭 杨刚 强洪夫[译]

湖南大学出版社
HUNAN UNIVERSITY PRESS

SMOOTHED PARTICLE

HYDRODYNAMICS:

A MESHFREE

PARTICLE METHOD

光滑粒子流体动力学

——一种无网格粒子法

G.R.Liu M.B.Liu[著]

韩旭 杨刚 强洪夫[译]

图字:18-2005-124

Copyright © 2003 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore

图书在版编目(CIP)数据

光滑粒子流体力学——一种无网格粒子法/G. R. Liu M. B. Liu 著;

韩旭, 杨刚, 强洪夫译. —长沙: 湖南大学出版社, 2005. 10

ISBN 7-81053-998-1

I. 光... II. ①G. R. Liu... ②M. B. Liu... ③韩...

④杨... ⑤强... III. 粒子—流体力学—汉、英 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 119727 号

光滑粒子流体力学

——一种无网格粒子法

Guanghua Lizi Liuti Donglixue

——Yizhong Wuwangge Lizifa

著 者: G. R. Liu M. B. Liu

译 者: 韩旭 杨刚 强洪夫

责任编辑: 严小涛

封面设计: 吴颖辉

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-8821691(发行部), 8821334(编辑室), 8821006(出版部)

传 真: 0731-8649312(发行部), 8822264(总编室)

电子邮箱: press@hnu.cn

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装: 湖南大学印刷厂

总 经 销: 湖南省新华书店

开本: 880×1230 32开 印张: 14.25

字数: 345千

版次: 2005年11月第1版 印次: 2005年11月第1次印刷 印数: 1~3000册

书号: ISBN 7-81053-998-1/TB·4

定价: 50.00元

版权所有, 盗版必究
湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

内 容 简 介

本书是第一本详细论述光滑粒子流体动力学方法的理论背景、数值方法、程序实施及其在许多领域应用的专著。全书共分十章,即:绪论、基本概念和基本方程、光滑函数的构造、在广义流体动力学问题中的应用、非连续的光滑粒子流体动力学方法、在爆炸模拟中的应用、在水下爆炸冲击模拟中的应用、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和计算机实现及一个 3D 实例程序。书中提供了以 FORTRAN 77 编写的源程序,并给出了详细的描述。

本书适用于高年级的本科学生、研究生、在工程和科学方面的研究人员和专业人员。本书所论述的方法、相关的应用和样本程序对于在计算流体和计算固体力学领域中进行研究的力学、土木、航空和航天等专业的学生、工程师、研究人员和专业人员来说都是非常有用的,特别是针对爆炸模拟、水下爆炸冲击模拟、穿甲与反穿甲模拟等工程实际问题具有较高的实际应用价值。

前 言

背景

计算机数值模拟逐渐成为解决现代工程和科学分析问题的一条重要途径。数值模拟能为理论提供测试和检验,有助于对复杂的物理问题的认识,还能帮助我们解释和发现新现象。基于网格划分的数值方法,例如有限差分法(FDM)和有限元法(FEM),已经被广泛地应用于计算流体动力学(CFD)和计算固体力学(CSM)的各个领域,并且现在已经成为工程和科学研究中求解问题的主要数值模拟方法。

尽管基于网格的数值方法已经获得了巨大的成功,但仍有一些方面存在缺陷,例如基于网格的方法应用于许多复杂问题时受到了限制。由于整个系统的描述都是基于网格划分的,故需要耗费大量的时间和过程来产生或再生具有良好品质的网格。网格的使用导致这些方法难以处理具有以下性质的问题:自由表面、变形边界、运动交界面(存在于FDM中)以及极大变形问题(存在于FEM中)。

近年来,新一代数值方法——无网格法(meshfree methods)引起了人们的极大兴趣,这种方法在许多应用中都优于传统的基于网格的FDM和FEM等数值方法。大量的无网格方法已被提出并应用于解决不同的问题,详见G. R. Liu (2002)关于无网格方法的最新专著。这些无网格方法有一些共同的特性,但却有不同的函数近似方法、不同的构造离散化系统方程的方法和不同的实施过程。

本书将主要介绍一类特殊的无网格粒子方法(meshfree particle methods (MPMs)),特别是光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics (SPH))方法及其衍生方法。专门为 SPH 方法著书的原因如下:

(1) SPH 方法能够处理具有自由表面、变形边界、运动界面以及极大变形的问题;

(2) SPH 方法作为最早的 MPMs,现在正以极快的速度达到成熟阶段;

(3) 由于不断的改进和修正,SPH 方法的精度、稳定性以及自适应性都已达到了实际工程应用的允许范围;

(4) SPH 方法的应用范围相当广泛,无论是从微观到宏观甚至到天文学尺度,还是从离散体系到连续体系都适用;

(5) 一些商用软件已将 SPH 处理过程嵌入到它们的软件包中,并且在许多的实际应用中获得了成功。

本书作者及其研究小组从 1997 年就已经开始致力于 SPH 方法的研究,当时他们的目的是寻找一种可用于模拟高能炸药爆炸和水下爆炸等方面的数值方法。他们曾经应用 FEM, FVM 和 ALE 等方法来模拟与爆炸相关的工程(Lam 和 Liu 等人,1996; Liu 和 Lam 等人,1998; Zhao 等人,1998; Chong 等人,1998a, 1998b, 1999;等等)。由于相关问题的网格发生失真,使得他们常常遇到一些无法预料的计算中断。因此,他们不断地调整程序中的各种参数,并重复运行模拟计算,希望能成功地运行并得到其结果。使用这些方法进行相关的研究工作实在是没有什么效果,但是又没有其他选择。因此,作者迫切地需要寻找一种不需要网格的替换方法来求解这些问题,这就使得他们开始了无网格方法的尝试研究。

由于上面所提及的原因,SPH 方法被选作一种替换的方法。SPH 方法在许多与爆炸相关的问题上的成功应用极大地鼓舞了

作者及其研究小组成员,使他们进一步将 SPH 方法应用于高速冲击和穿透问题的模拟研究中。在系统性的论述 SPH 方法的基本思想、理论以及不同形式的 SPH 方法的构造后,本书将详细地论述其具体应用。

关于本书

以书的形式详细论述 SPH 方法还是第一次。本书的目的是为那些有志于学习、使用或进一步发展此方法的读者提供 SPH 方法的介绍。因此,书中包括了 SPH 方法的理论背景、数值方法、程序的实施过程和许多不同的应用。

本书适用于高年级的本科学生、研究生、在工程和科学方面的研究人员和专业人士。本书所论述的方法、相关的应用和所附程序对于在 CFD 和 CSM 领域中进行研究的力学、土木、航空和航天等专业的学生、工程师、研究人员和专业人员来说都非常有用。

本书通俗易懂,因此理工科院校的三年级学生应该能读懂本书所讨论的大部分内容。读本书不需要具有如 FEM(参阅如 Liu 和 Quek, 2003)和 FDM 这些基于网格的数值方法的背景知识,但如果有上述背景知识的话将会有助于阅读和理解本书中的方法和实施过程。具有 CFD 的基本知识对阅读本书也有很大的帮助。因此,我们在书中提供了一节关于控制流体运动基本方程的内容,为阅读本书的学生准备基础知识。

在理论方面,我们论述了连续形式的核近似法和离散化形式的粒子近似法,因为这两种近似方法构成了 SPH 方法的基础。同时,我们也研究了 SPH 近似方法的再生性,并系统地推导了连续和离散形式的一致性条件。连续一致性条件为构造解析的光滑函数提供了广义的方法,并在 SPH 公式的形式中起着重要的作用。离散化一致性条件为传统 SPH 方法中的粒子不连续缺陷提供了修复方法,并促进了修正光滑粒子法(corrective smoothed particle

method (CSPM)) 的发展。非连续 SPH (discontinuous SPH (DSPH)) 方程用于模拟非连续现象, 如冲击波。DSPH 公式修正了边界缺陷问题, 并修复了非连续区域的一致性问题。在本书中, 我们还将介绍一种更好的光滑特征定向的自适应 SPH 方法 (adaptive SPH (ASPH))。

在数值方法方面, 对于一些详细的处理过程, 例如人工粘度、人工热量、物理粘度、可变光滑长度、零能模式问题、人工压缩率、固壁边界处理、时间步长的选择等问题都将进行论述。这些处理过程都是为了能够提高计算的稳定性和结果的精度。

在应用方面, 本书给出了许多让人感兴趣的实例。实例分布在不同的章节中, 与所论述的主题相对应。除了一些用于检测 SPH 方法的常规例子外, 书中给出的其他实例都是难以用基于网格的数值方法模拟的。其中包括不可压缩流、自由表面流、高度可压缩流、高能炸药 (high explosive (HE)) 的引爆和爆炸、水下爆炸、爆炸冲击和爆炸冲击波的水介质缓冲问题、高速冲击和穿透, 以及与分子动力学方法耦合的多尺度模拟。所讨论的这些数值算例充分地说明了 SPH 方法的强大能力, 并为进一步将 SPH 方法进行改进并扩展到更加复杂的实际工程和科研应用中提供了充分的准备。

在实施方面, 本书讨论了计算机程序实现 SPH 方法的一些重要问题, 其中包括了基本的并行程序。书中提供了以 FORTRAN 77 编写的源程序, 并给出了详细的描述。

应用 SPH 方法进行数值模拟是一个较新的研究领域, 并且仍在不断发展中。在 SPH 方法中仍有许多问题有待改进。这些问题的存在为研究者提供了充分的机会来开发更加先进的粒子方法, 即新一代的数值方法。作者希望本书所提供的方法和源程序能给读者一个指引, 令读者能高效地学习、测试、练习和进一步发展 SPH 方法。

内容摘要

本书对 SPH 方法及其衍生方法(如 CSPH, DSPH 和 ASPH)作了全面介绍,共分十章,主要内容如下:

第 1 章 介绍数值模拟的背景知识。讨论了基于网格的数值方法的特性和局限。简要叙述了无网格粒子法的基本思想以及无网格粒子法的一般特性,特别是光滑粒子流体动力学方法的特性。同时也简要介绍了 SPH 方法的提出、发展、应用和扩展。

第 2 章 给出了 SPH 方法的基本方程,如 SPH 方程的基本概念和基本形式。这些基本方程在随后的章节将非常有用。

第 3 章 介绍了构造无网格方法(包括 SPH)的光滑函数的解析式的一般方法。这些方法不仅系统地推导了光滑函数的构造条件,还论述了在 SPH 方法中相关的粒子一致性问题。通过利用已存在的不同光滑函数,也包括最新构造的光滑函数,来论证这些方法的效率。

第 4 章 论述了 SPH 方法在 Navier-Stokes 方程上的实施,并给出了一些在广义流体动力学问题方面的应用。对一些相关的数值概念,例如人工粘度、人工热量、物理粘度、可变光滑长度、零能模式问题、人工压缩率、固壁边界处理、时间步长的选择等都将进行论述。同时也对最近相邻粒子搜索法(Nearest neighbor particle searching (NNPS))和成对相互作用法进行了论述,并应用已开发的三维 SPH 程序来求解不同的流动问题。

第 5 章 提出了优于传统 SPH 方法的新的光滑粒子流体动力学方法和修正光滑粒子法(corrective smoothed particle method (CSPM))用于模拟间断(非连续)现象。通过使用这些方程,邻近边界和间断区域处的精度将得到改进。

第 6 章 展示了 SPH 方法在高能炸药的引爆过程和随后的膨胀过程中的模拟应用。为了满足模拟大变形和爆炸情况的需要

而引进了估算光滑长度的自适应处理过程。除了一些基本的数值算例,本章也应用了 SPH 方法来模拟锥孔炸药的爆炸,并展示了一些相关的计算结果。

第 7 章 介绍了 SPH 方法应用于模拟如水下爆炸产生冲击波等早期现象。引入了粒子到粒子 (particle-to-particle) 的交界面处理方法,即允许对来自不同材料的粒子进行核粒子近似,并对穿透粒子施加一个特殊的惩罚力。同时也对高能炸药的真正模型和人工模型,以及这两种模型对整个水下爆炸冲击模拟的影响进行了比较研究。本章也给出了应用 SPH 方法对水介质缓冲问题的研究,其中分别对接触水介质缓冲和非接触水介质缓冲问题进行了研究。并与没有水介质缓冲的情况进行对比来研究水介质缓冲对水下爆炸冲击的影响。

第 8 章 在这一章中同时应用了 SPH 方法和自适应 SPH (ASPH) 方法来研究具有材料强度的流体动力学问题。并给出了在有材料强度情况下的流体动力学中 SPH 和 ASPH 之间的比较研究及它们的应用。材料的基本模型和物质的状态方程都在 SPH 和 ASPH 方程中得到体现。本章给出了两个数值测试算例:冲击和穿透问题。

第 9 章 通过 SPH 和分子动力学 (MD) 结合提出了一种将长度尺度进行耦合 (coupling length scale (CLS)) 的方法。其中将分子动力学应用于原子尺寸的区域以达到精度要求,而将 SPH 方法应用于其周边区域以提高效率。MD/SPH 的交接处理是通过允许 SPH 粒子和 MD 原子之间的相互作用来实现的。通过对简单的 Poiseuille 流和 Couette 流的模拟,对这种新颖的粒子对粒子的 CLS 方法的有效性进行了验证。

第 10 章 论述了与 SPH 方法的计算机实施相关的问题。介绍了拉格朗日粒子模型的一般处理过程。同时论述了 SPH 方法在串行和并行计算机上的执行。本章给出了一个 SPH 程序实例,

并且对实例程序的主要特性以及相关的源程序和子程序都给予了详细的描述。程序展示了大量与 MPMs 和 SPH 相关的概念、方法和实施技巧。

第 1 章到第 4 章是 SPH 方法的基础知识,读者可以在阅读其他章节前先阅读前 4 章。第 5 章到第 9 章主要是 SPH 方法的应用和一些专题论述。这些章节都是独立的,读者可根据自己的需要和兴趣选择阅读,而不必按顺序阅读。各章节中有些基本内容和问题是相同的,可以相互对照。第 10 章给出了 SPH 程序及其详细描述,已阅读完前四章的初学者或对源程序感兴趣的专业人士都可以阅读此章。

致谢

作者在无网格粒子法领域的研究深受 Prof. J. J. Monaghan, L. D. Libersky, L. Lucy, W. Benz, J. K. Chen 及在此领域的其他研究人员的研究工作的影响。没有他们的巨大贡献,此书不可能得以完成。

感谢作者的同事以及学生在作者准备写作此书的时候给予的支持和帮助。特别要感谢 K. Y. Lam 教授, H. F. Qiang 博士, Z. R. Li 先生, G. L. Chin 先生, X. Han 博士, Z. Zong 博士, 等等。他们不仅提供了书中的一些算例,而且帮助审阅初稿,并一起合作研究了许多与 SPH 相关的项目。同时特别感谢 Y. Liu 帮忙审阅此书并给予了許多有用的编程建议。

最后,感谢新加坡 A*STAR 和新加坡国立大学,感谢他们对作者和作者的研究小组在与本书相关的研究上给予的资金资助。

目 次

第 1 章 绪论	1
1.1 数值模拟 /1	
1.1.1 数值模拟的作用 /1	
1.1.2 一般数值模拟的求解过程 /1	
1.2 基于网格的方法 /5	
1.2.1 拉格朗日网格 /7	
1.2.2 欧拉网格 /9	
1.2.3 拉格朗日网格和欧拉网格的结合 /11	
1.2.4 基于网格的数值方法的局限性 /12	
1.3 无网格法 /13	
1.4 无网格粒子法(MPMs) /19	
1.5 MPMs 的求解策略 /23	
1.5.1 粒子描述法 /23	
1.5.2 粒子近似 /24	
1.5.3 MPMs 的求解过程 /26	
1.6 光滑粒子流体动力学(SPH) /27	
1.6.1 SPH 方法 /27	
1.6.2 SPH 方法简史 /29	
1.6.3 本书中的 SPH 方法 /33	
第 2 章 SPH 的概念和基本方程	35
2.1 SPH 的基本思想 /35	
2.2 SPH 的基本方程 /37	
2.2.1 函数的积分表示法 /37	

2.2.2	函数的导数积分表示法 /40	
2.2.3	粒子近似法 /42	
2.2.4	推导 SPH 公式的一些技巧 /45	
2.3	其他基本概念 /47	
2.3.1	支持域和影响域 /47	
2.3.2	物理影响域 /51	
2.3.3	particle-in-cell(PIC)方法 /52	
2.4	结论 /56	
第 3 章	光滑函数的构造	58
3.1	引言 /58	
3.2	构造光滑函数的条件 /67	
3.2.1	场函数的近似 /68	
3.2.2	场函数导数的近似 /70	
3.2.3	核近似的连续性 /77	
3.2.4	粒子近似的连续性 /79	
3.3	构造光滑函数 /83	
3.3.1	构造多项式光滑函数 /83	
3.3.2	一些相关的问题 /84	
3.3.3	光滑函数构造举例 /86	
3.4	数值测试 /92	
3.5	结论 /100	
第 4 章	SPH 方法在广义流体动力学问题中的应用	102
4.1	引言 /103	
4.2	拉格朗日型的 Navier-Stokes 方程 /104	
4.2.1	有限控制体与无穷小流体单元 /105	
4.2.2	连续性方程 /107	
4.2.3	动量方程 /108	
4.2.4	能量方程 /110	

4.2.5	Navier-Stokes 方程 /111	
4.3	用 SPH 公式解 Navier-Stokes 方程组 /112	
4.3.1	密度的粒子近似法 /112	
4.3.2	动量方程的粒子近似法 /115	
4.3.3	能量方程的粒子近似法 /117	
4.4	流体动力学的 SPH 数值相关计算 /121	
4.4.1	人工粘度 /121	
4.4.2	人工热量 /123	
4.4.3	物理粘度 /124	
4.4.4	可变光滑长度 /125	
4.4.5	粒子间相互作用的对称化 /127	
4.4.6	零能模式 /128	
4.4.7	人工压缩率 /132	
4.4.8	边界处理 /134	
4.4.9	时间积分 /137	
4.5	粒子的相互作用 /138	
4.5.1	最近相邻粒子搜索法(NNPS) /138	
4.5.2	粒子对的相互作用 /142	
4.6	数值算例 /145	
4.6.1	在不可压缩流的应用 /145	
4.6.2	在自由表面流的应用 /155	
4.6.3	SPH 对可压缩流的应用 /161	
4.7	结论 /165	
第 5 章	非连续的 SPH(DSPH)	166
5.1	引言 /166	
5.2	修正光滑粒子法 /169	
5.2.1	一维情况 /169	
5.2.2	多维情况 /171	

5.3	模拟非连续现象的 DSPH 公式 /173	
5.3.1	DSPH 公式 /173	
5.3.2	非连续的确定 /178	
5.4	数值性能研究 /179	
5.5	冲击波的模拟 /184	
5.6	结论 /188	
第 6 章	SPH 在爆炸模拟中的应用	190
6.1	引言 /191	
6.2	HE 爆炸和控制方程 /192	
6.2.1	爆炸过程 /192	
6.2.2	HE 的稳态爆轰 /193	
6.2.3	控制方程 /195	
6.3	SPH 公式 /197	
6.4	光滑长度 /199	
6.4.1	粒子的初始分布 /200	
6.4.2	光滑长度的更新 /201	
6.4.3	优化和松弛过程 /202	
6.5	数值算例 /203	
6.6	应用 SPH 方法模拟锥孔炸药 /216	
6.7	结论 /239	
第 7 章	SPH 在水下爆炸冲击模拟中的应用	241
7.1	引言 /242	
7.2	水下爆炸和控制方程 /244	
7.2.1	水下爆炸冲击的物理特性 /244	
7.2.2	控制方程 /246	
7.3	SPH 公式 /249	
7.4	交界面处理 /250	
7.5	数值算例 /252	

7.6	真实爆炸模型与人工爆炸模型的比较研究 /267
7.7	水介质缓冲模拟 /274
7.7.1	背景 /274
7.7.2	模拟设置 /277
7.7.3	模拟结果 /279
7.7.4	小结 /288
7.8	结论 /291
第 8 章	SPH 方法在具有材料强度的动力学中的应用 293
8.1	引言 /293
8.2	具有材料强度的动力学 /295
8.2.1	控制方程 /295
8.2.2	本构模型 /296
8.2.3	状态方程 /297
8.2.4	温度 /297
8.2.5	声速 /298
8.3	具有材料强度的动力学 SPH 公式 /298
8.4	张力不稳定问题 /300
8.5	自适应光滑粒子流体动力学(ASPH) /302
8.5.1	为什么需要 ASPH 方法 /302
8.5.2	ASPH 的主要思想 /304
8.6	对具有材料强度的动力学的应用 /307
8.7	结论 /323
第 9 章	与分子动力学耦合的多尺度模拟 324
9.1	引言 /324
9.2	分子动力学 /326
9.2.1	分子动力学的基本原理 /326
9.2.2	经典分子动力学 /329
9.2.3	经典 MD 模拟 /335

9.2.4	Poiseuille 流的 MD 模拟 /336	
9.3	MD 与 FEM 和 FDM 的耦合 /338	
9.4	MD 与 SPH 的耦合 /339	
9.4.1	模型 I : 双重功能(具有重叠区域的模型) /340	
9.4.2	模型 II : 力桥(没有重叠区域的模型) /341	
9.4.3	数值测试 /343	
9.5	结论 /347	
第 10 章	SPH 方法的计算机实现和一个 3D 实例程序	348
10.1	拉格朗日粒子模拟的一般流程 /349	
10.2	串行处理计算机的 SPH 程序 /350	
10.3	并行处理计算机的 SPH 程序 /351	
10.3.1	并行结构和并行计算 /351	
10.3.2	SPH 程序的并行化 /354	
10.4	求解 N-S 方程组的三维 SPH 程序 /359	
10.4.1	三维 SPH 程序的主要特性 /360	
10.4.2	按 FORTRAN 的习惯命名变量 /361	
10.4.3	SPH 程序的描述 /362	
10.4.4	两个标准的测试程序的算例 /368	
10.4.5	FORTRAN 源程序 /372	
参考文献		405
译后记		433