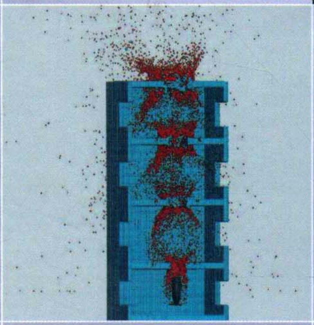
光滑粒子流体动力学新方法及应用

强洪夫　著



科 学 出 版 社

光滑粒子流体动力学新方法及应用

强洪夫　著

科学出版社
北京

内 容 简 介

光滑粒子流体动力学(SPH)方法是近年来兴起并逐渐得到广泛应用的一种数值模拟方法，对该方法进行研究具有很大的科学价值和实际意义。本书是论述SPH新方法及应用方面的一本专著，汇集了作者及其研究团队近20年来的研究成果和研究经验，系统阐述SPH方法基础理论、完全变光滑长度SPH方法、无网格局部间断伽辽金方法、SPH拉伸不稳定问题、SPH-FEM耦合算法、SDPH-FVM耦合算法、基于CSF模型的表面张力算法以及SPH方法固壁边界模型等一系列新方法、新模型的思想和实现途径，开拓了SPH方法在爆炸模拟、冲击动力学、水动力学、流体碰撞雾化问题以及铸造充型等新领域中的应用。本书叙述力求简明扼要，重点突出。

本书所论述的方法和应用对于在计算流体力学和计算固体力学领域中进行机械、土木、动力、材料、水利、工程热物理和航空航天等专业研究的人员来说实用性较高，可作为高年级的本科生、研究生以及工程科学方面的研究人员和技术人员的参考用书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

光滑粒子流体动力学新方法及应用/强洪夫著. —北京：科学出版社，2017.6

ISBN 978-7-03-053348-7

Ⅰ.①光…　Ⅱ.①强　Ⅲ.①粒子-流体动力学-研究　Ⅳ.①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第132725号

责任编辑：宋无汗　杨　丹　罗　娟／责任校对：邹慧卿
责任印制：张　倩／封面设计：陈　敬

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
北京通州皇家印刷厂 印刷
科学出版社发行　各地新华书店经销
*
2017年6月第　一　版　开本：720×1000　1/16
2017年6月第一次印刷　印张：22 3/4
字数：460 000
定价：145.00元
(如有印装质量问题，我社负责调换)

序

近几十年来，以计算流体力学为基础的数值模拟技术取得了巨大成功，成为继理论研究和实验研究两种传统方法之外的第三种关键手段。针对国防工程领域中极端复杂的流动问题，一些原来认为难以解决的问题，在数值模拟技术的帮助下都能够迎刃而解。无网格数值方法由于可以从本质上解决网格法在求解大变形和自由表面流动过程时遇到的网格扭曲、缠绕或者界面追踪的技术难题，已迅速成为计算力学方法研究的一个热点。光滑粒子流体动力学便是这类方法中发展最为迅速、应用最为广泛的一种方法。

SPH 最早由 Lucy、Gingold 和 Monaghan 提出并用于解决三维开放空间的天体物理学问题，随后逐渐应用于高速冲击、爆炸、自由表面流以及多相流等领域，虽然解决了这些领域中的很多实际问题，但同时暴露出越来越多的局限性，一定程度上制约了 SPH 的发展。

强洪夫教授就是在此背景下，于 2002 年 9 月到新加坡国立大学在我创建的工程科学先进计算中心（ACES）做 Research Fellow，参与了我的 SPH 团队的研究工作。他在自适应光滑粒子流体动力学（ASPH）方法的理论和应用研究方面取得了不少进步。回国后，他组建并带领自己的团队继续从事 SPH 的基础理论及其在火箭发动机、战斗部毁伤效能评估、水动力学以及微流体领域内的应用研究，取得了丰硕的研究成果，为 SPH 的研究和发展做出了重要贡献。该书对这些内容均进行了详细的呈现。

该书是作者在该领域取得的研究成果的基础上，经过系统分析整理撰写而成的。该书注重从实际工程角度出发，提炼制约 SPH 在各领域内应用的关键问题，并对这些问题进行深入分析，从算法本质角度出发提出最有效的解决方法。该书取材丰富，体系完整，逻辑性强，完整反映了当前 SPH 方法研究的全貌。书中不仅包含翔实的数据、图表和算例，同时还列出很多重要的参考文献，可供读者进一步深入研究。

因此，该书的出版对从事计算力学研究、应用和教学的科学工作者及其相关工程技术人员都有重要的参考价值。

G. R. Liu

美国辛辛那提大学宇航工程与工程力学系教授，俄亥俄州杰出学者，

亚太计算力学学会主席，国际计算力学学会执行委员

前　言

光滑粒子流体动力学(SPH)是 20 世纪 70 年代提出并逐渐发展起来的一门数值计算方法，由于具有自适应性、无网格性、拉格朗日性以及粒子性等特性，其在求解大变形、自由表面流、复杂界面运动等过程中具有较大优势，已广泛应用于天体物理、冲击爆炸、水动力学等领域。伴随着高性能计算机以及虚拟现实、互联网、云计算等新兴技术的快速发展，以 SPH 为代表的新一代数值模拟方法必将迎来新的发展机遇。同时，发展以新的数值仿真技术为核心的计算机辅助工程必将为提升我国的工业信息化水平发挥重要作用。因此，撰写一本详细论述 SPH 方法和应用方面的著作非常必要。

当前有关 SPH 方法的书籍，主要关注 SPH 的概念、基础理论、基础应用层面的内容。但是，随着研究的深入，相关书籍已无法满足学者更深层次的学习要求。本书是为具有一定研究背景的科研群体所撰写，重点针对 SPH 方法的重难点问题、与其他成熟类数值方法的耦合问题、在高新技术领域中的应用等方面进行详细阐述，具有较强专业性，将有力提升读者在 SPH 领域的研究水平。

本书阐述作者及其研究团队近 20 年来在 SPH 方法及应用方面取得的最新研究成果，这些研究成果不仅涵盖 SPH 方法研究的主要领域，而且集中对 SPH 方法前沿问题和尖端问题进行探讨，详细论述对这些问题的解决方案，同时引入新的理论，开拓新的应用领域，不仅有助于读者快速解决在 SPH 研究方面存在的难题，指导相关领域内的研究工作，而且有助于加快读者在该方法方面的创新，取得更大的理论突破。

全书分为两大部分：方法篇和应用篇，共十四章，其中第 1～9 章讲述方法，第 10～14 章介绍应用。第 1 章主要阐述无网格法的兴起、发展现状、局限和发展趋势；第 2 章主要论述 SPH 方法的基本思想及其积分插值理论，介绍四种常用的核函数，针对考虑黏性和多相流界面时应采用的 SPH 方法及具有强冲击波和极大变形的 HVI 问题进行重点阐述；第 3 章建立一组新的 SPH 方程组，修正 SPH 密度演化方程、动量方程以及能量方程与变光滑长度方程的关联效应，消除变光滑长度所引入的偏差；第 4 章阐述一维守恒律问题的无网格局部间断伽辽金方法基本理论及其算法格式，并将该方法同 SPH 方法联系起来，重新构建出与传统 SPH 方法相容的间断伽辽金型 SPH 方法，通过求解经典的一维间断问题算例对算法进行数值验证；第 5 章主要研究不同核函数、不同动量方程离散形式和不同扰动波长下 SPH 的稳定性；第 6 章对 SPH 和 FEM 的耦合计算进行深入分析，阐述一系列

SPH-FEM 耦合算法；第 7 章推导 SPH 粒子属性与颗粒属性间的关系式，将 SPH 改造成适于离散相求解的 SDPH 方法，建立 SDPH 与 FVM 耦合的新方法；第 8 章论述从 CSF 模型出发，在 Morris 提出的表面张力 SPH 方法基础上，采用能够很好解决边界核插值问题的 CSPM 方法对表面张力算法进行修正的算法；第 9 章对 SPH 固壁边界的施加方法进行探讨，分析罚函数方法及虚粒子方法施加固壁边界的基本思想及具体施加方法；第 10 章用完全变光滑长度和多相流 SPH 方法来解决密度变化剧烈及多相流动问题，模拟 TNT 板条爆轰、锥孔炸药爆炸、聚能射流形成和爆轰波绕射等过程；第 11 章论述 SPH 方法在具有材料强度冲击动力学中的应用；第 12 章对溃坝问题、液体搅拌问题、物块落水问题及小球撞击水问题进行数值模拟；第 13 章在第 8 章提出的一系列表面张力算法的基础上，结合 SPH 粒子分裂算法，对流体碰撞雾化问题进行详细的模拟计算；第 14 章主要研究 SPH 算法在铸造充型中的应用。

本书的撰写和出版得到了火箭军工程大学和科学出版社的大力支持，得到了有关学者与专家的关心和帮助，在此表示衷心感谢。同时，感谢在作者初期进行 SPH 研究中给予指导的 G. R. Liu 教授和 F. S. Chung 教授，感谢新加坡国立大学 ACES 研究中心、新加坡南洋理工大学 CEE 高性能计算中心以及作者的学生陈福振、韩亚伟、刘虎、石超、高巍然、张志春、傅学金、范树佳、刘开、王坤鹏、张林涛、郑华林、张国星、孙新亚等在作者撰写本书时给予的极大支持。另外，对本书涉及的相关国内外文献作者表示感谢。SPH 方法是一个较新的研究领域，还在不断发展中，仍有许多问题有待改进，希望本书能为 SPH 相关研究领域的科研和工程实践提供帮助，对 SPH 方法的创新和新的应用领域的开拓起到促进作用。

特别感谢国家自然科学基金项目(51276192)和火箭军工程大学 2110 工程对本书的资助。

书中如有遗漏和不妥之处，还望广大读者予以批评指正。

目　录

第1章　绪　　论

1.1　网格法的局限

20世纪60年代发展起来的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),即通过计算机求解流动方程来模拟解决复杂的流动问题,它将流体力学实验研究与理论分析联系在一起,改变了此前工程师和科学家只能单方面利用实验或理论的手段来研究流动问题的局限,尤其是随着近年来计算机技术的高速发展及各种高性能CFD算法的不断提出和改进,一些原来认为难以解决的问题,如超声速流动、湍流、燃烧流等,在CFD的帮助下迎刃而解。伴随着工程实践和研究需要,计算流体力学已经发展成为一门独立学科,它与实验和理论流体力学方法相互补充、互相完善,不断革新人们对工程问题及复杂流动现象的设计方法和研究手段,同时还带动了计算数学、并行计算技术、虚拟现实等关联的学科和技术发展[1-3]。

计算流体力学研究的一个主要方面是数值模拟方法,它历经了求解拉普拉斯方程、跨音速小扰动方程、全位势方程、欧拉(Euler)方程和Navier-Stokes方程等发展阶段。20世纪80年代以前,由于受到计算机性能的限制,计算流体力学的数值模拟研究主要以求解拉普拉斯方程、小扰动方程、全位势方程为主;随后的30年中,在工程需求牵引、计算机技术以及CFD算法的共同发展推动下,计算流体力学在求解欧拉方程和Navier-Stokes方程以及数值模拟复杂流场等方面都取得了重大突破。

现今的CFD方法以有限差分法、有限体积法和有限元法为代表,这些方法均采用类似的手段对复杂的流动方程组进行数值离散:对一个给定的求解区域,先将其划分为若干个无重叠的网格或单元,然后将需要求解的流动方程组在划分好的网格上进行数值离散,网格质量的好坏决定了计算结果的准确性以及精度。这种思路在CFD算法几十年发展历史中取得了巨大成功,并解决了很多工程问题。然而,随着近年来工程实践的不断拓展以及理论研究的深入,这些传统基于网格的方法遇到越来越大的挑战,网格的生成和管理已成为CFD计算中一项十分艰巨的任务,严重制约CFD的发展。尤其此类算法的计算必须依赖于无重叠、扭曲以及缠绕的网格划分,网格的质量决定仿真的成败,这对于当前工程实践非常关注的运动边界和界面不连续问题,如流体力学大变形、流-固耦合、爆炸冲击等,继续采用此类算法求解将面临越来越多的困难。

流体力学中对流动的描述方法可以分为两大类：欧拉(Euler)描述法和拉格朗日(Lagrange)描述法，它们对应 CFD 方法中两类不同的离散化网格：欧拉网格和拉格朗日网格。欧拉网格固定在模拟对象所处的空间上，模拟的对象则在固定网格单元上运动，如图 1.1 所示。当物质流过网格时，所有网格节点单元固定在空间中，不随时间的改变而改变。通过计算物质质量、动量和能量经过网格单元边界的通量，确定这些场变量在空间中的分布，而在整个计算过程中网格单元的形状和体积保持不变。

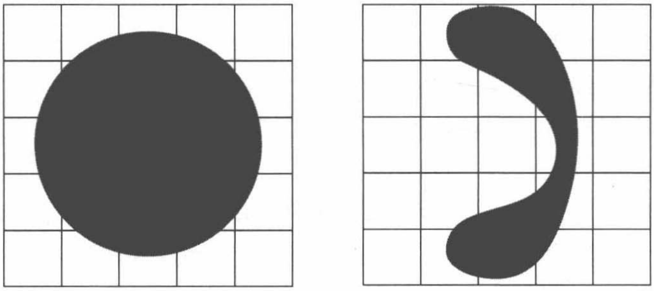


图 1.1　欧拉网格

由于欧拉网格在时间和空间上都是固定的，物体的大变形不会引起网格本身的变形，比较适合大变形问题的模拟。早期的高速冲击和爆炸问题，一般采用欧拉网格法[4-6]。目前基于欧拉网格法开发且应用较为广泛的商业软件有 FLUENT、CFX、POLYFLOW 以及开源软件 OPENFOAM 等。然而欧拉网格法仍然存在诸多缺点：

(1) 不能通过固定在物质上的网格来追踪物质的运动，很难分析物质上固定点场变量的时间历程，只能得到空间上固定的欧拉网格场变量的时间历程。

(2) 很难处理材料/介质几何图形不规则或复杂的情况。

(3) 欧拉网格法追踪的是流过网格单元边界的质量、动量和能量的通量，很难精确确定自由表面、变形边界和运动物质交界面的位置。

(4) 为了实现物质在欧拉网格中的流动，欧拉网格的设置通常需要超过整个计算域，计算量较大。

拉格朗日网格在整个计算过程中是固定或附着于物质上的，网格会随着物质的运动而运动，如图 1.2 所示。由于网格节点是随着网格上的物质运动的，相连节点的相对运动能够导致网格单元的膨胀、压缩和变形。质量、动量和能量随着网格单元的运动而传播。由于每个单元的质量保持不变，因此质量不会流过网格单元边界，当材料变形时网格也相应地跟着变形。基于拉格朗日网格的计算具有如下特点：

(1) 相关偏微分方程不存在迁移项，程序不必耗时处理迁移项，程序设计相对简单并且运行较快。

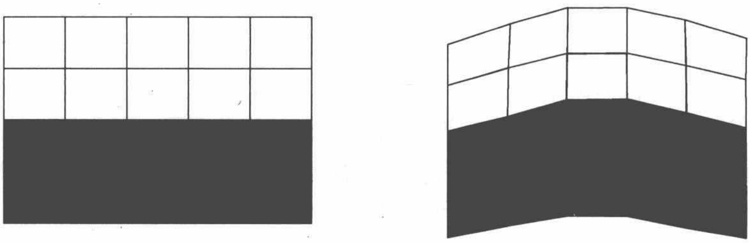


图 1.2　拉格朗日网格

(2) 网格固定在运动的物质材料上,物质点上场变量的时间历程很容易追踪。

(3) 自由表面、运动边界和材料交界面可以根据网格节点的运动而自动施加和追踪。

(4) 只需要在问题域内设置网格,计算效率较欧拉网格高。

由于上述优点,拉格朗日网格法被成功地应用于计算固体力学。目前基于拉格朗日网格法开发且应用较为广泛的商业软件有 ANSYS、ABAQUS、ADINA、MSC、NASTRAN、COMSOL 等。然而基于拉格朗日网格的方法难以应用于具有极大网格变形的情况,当网格变形太大时,计算的精度会受到很大影响。而且积分运算的时间步长与模型的最小单元尺寸相关,当网格变形太大时,局部单元尺寸会变得很小,影响时间历程的效率,甚至导致计算失败。

使用拉格朗日网格法计算大变形一个可行的方法是对网格重新划区或者对问题域重新划分网格。网格的重新划分即采用新的不失真的网格替代旧的失真的网格,使得接下来的计算在新的网格上完成。通过计算欧拉描述下物质的质量、动量和能量传输,由旧的网格单元近似得到新网格单元的物理特性。使用拉格朗日网格法对网格重新划分,不仅明显地增加了计算量,而且每次重新分网都会导致一些物质扩散和历史记录的丢失。因此使用拉格朗日网格法模拟具有极大变形的问题,会造成数值计算上的困难[4-6]。

由于拉格朗日网格法和欧拉网格法具有不同却互补的性质,把这两种方法结合起来,可以得到两种同时应用拉格朗日描述和欧拉描述的更高性能的算法:耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)方法[6]和任意的拉格朗日-欧拉(ALE)方法[4,7,8]。

CEL 方法在问题域上同时使用拉格朗日网格法和欧拉网格法,通常使用拉格朗日网格离散固体,使用欧拉网格离散流体。拉格朗日区域和欧拉区域之间的相互作用是通过耦合模块实现的,通过在这两组网格之间的映射或交界面上的特殊处理实现耦合模块上计算信息的交换。

ALE 方法与拉格朗日网格重新划分紧密相关,使网格的运动独立于物质,达到网格畸变最小化的目的。ALE 方法中,在每个时间步的初始时刻都要计算拉格朗日运动,随后进行网格重新划分,即在未划分网格的区域划分网格(拉格朗日描

述),或者将网格按照初始形状划分(欧拉描述),或者将网格划分为有利于计算的形状(介于拉格朗日描述和欧拉描述之间)。

以上这两种方法在获得稳定解方面取得了大量成果,并且在商用软件 MSC/Dytran[9]、DYNA2D 和 DYNA3D[10,11]、LS-DYNA[12] 以及 AUTODYN[13] 中都已将 CEL 和/或 ALE 嵌入软件内,以便对具有流-固相互作用特性动力学现象进行耦合分析。但是尽管使用了 CEL 和 ALE 方法,在网格高度畸变的情况下数值模拟结果仍会产生严重错误[4,7,8],主要是由于材料发生极大变形时,产生极小的拉格朗日/欧拉单元或者负密度,导致时间步长太小而终止计算。

基于上述特点,尽管传统的基于网格的数值方法已经在计算固体力学和计算流体力学的各个领域得到了广泛应用,然而由于其在很多方面存在不足,在很多问题的应用上仍然受到限制。传统的基于网格的数值模拟方法不能很好地解决下列这些工程实际问题:①结构大变形问题,如高速冲击、爆炸、工业材料成型、铸造等问题;②结构破坏问题,如动态裂纹扩展等问题;③相变问题;④流固耦合问题;⑤自适应计算问题;⑥非线性强振荡问题等。因此,进一步发展更为灵活的计算流体力学数值模拟方法,突破网格对 CFD 方法求解的限制,以适应工程对复杂流动问题模拟的需求,是当前计算流体力学方法研究的一项重要课题。

1.2　无网格法的兴起

为克服网格法存在的不足,近十多年来,一类基于节点的无网格法应运而生,并迅速成为计算力学方法研究的一个热点,特别是在计算固体力学方面,由于此类算法计算不依赖网格,因此能够从根本上解决网格法在求解大变形问题时遇到的网格缠绕,以及在模拟如断裂等界面不连续问题时的界面处理困难,而且相比网格法它还有近似函数连续性高、增删节点容易、容易实现自适应技术、易于处理复杂几何外形等优点。

目前已经提出的无网格法有二十余种[14-17],主要区别在于所采用的无网格近似算法(核函数近似、移动最小二乘近似、单位分解近似、径向基函数近似等)和数值离散的方法(配点法、全局伽辽金方法、局部伽辽金方法等)。无网格法的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代对广义有限差分法[18]的研究,这一方法尝试了在随机离散的节点上求解偏微分方程的近似解。1977 年提出的光滑粒子流体动力学[19,20](smoothed particle hydrodynamics,SPH)方法,是目前应用最为广泛的一类配点型拉格朗日粒子方法。它早期应用于解决无边界的天体物理问题,随后以 Monaghan[21,22]、Libersky 等[23,24]为代表的学者对 SPH 方法的理论和应用进行了深入研究,提出一系列 SPH 改进算法,并使该方法成功地扩展并应用于自由表面流动[25]、爆炸冲击[23,26]等传统网格方法难以模拟的力学问题;1992 年 Nayroles

等[27]运用移动最小二乘(moving least square,MLS)法来替代有限元技术中广泛采用的分片插值近似,从而建立一类新的方法——扩散单元法(diffuse element method,DEM),并应用它分析了 Poisson 方程和弹性问题,开创了全局连续型伽辽金无网格法的研究,现在很多无网格法都是基于移动最小二乘法提出的;Belytsehko等[28]则在借鉴 DEM 思想的基础上提出了无单元伽辽金(element free Galerkin,EFG)法,这是目前在固体力学领域应用最广的无网格法,这个方法的精度和收敛速度都高于有限元法,具有比 SPH 更好的稳定性,但计算量大,且需要借助背景网格进行积分;Liu 等[29]利用积分重构函数思想,提出了再生核粒子法(reproducing kernel particle method,RKPM),并对此类方法做了大量的研究工作。Onate 等[30]于 1996 年利用移动最小二乘法来构造近似函数,并采取配点方法进行离散,提出了有限点法(finite point method,FPM),该方法不需要背景网格积分,效率比较高,但是同样存在不稳定的缺点;Durate 等[31]则利用移动最小二乘法建立单位分解函数,再通过连续伽辽金法建立离散格式,提出了 HP 云(HP-cloud)法;Belytschko 等[32]则又将无网格中近似函数的构造技术返回网格有限元方法,从而建立特别适合求解断裂问题的拓展有限元方法(extended finite element method,XFEM);Atluri 等[33]提出了连续型局部弱形式的离散方法,提出了局部边界积分方程(local boundary integral equation,LBIE)法[34]和无网格局部彼得洛夫-伽辽金(meshless local Petrov-Galerkin,MLPG)方法[33],这类方法在积分时不需要全局背景网格,只需要进行局部数值积分,该方法的提出还在一定程度统一了无网格法的构造方法。

无网格法在计算力学领域应用的优势十分明显,例如:

(1) 工程领域中需要求解的流场一般都具有复杂的几何外形,如对航空航天器外气动模拟、汽车内部空调设计等,这种情况下高质量的计算网格生成较困难,并且需要大量人工参与,由于无网格法在计算时只需要节点而不依赖节点连接关系(网格),不存在网格缠绕或扭曲的问题,相比网格法具有更加优异的几何灵活性,因此它在处理复杂外形 CFD 计算方面有很大的优势。

(2) 目前工程领域普遍遇到的运动边界问题计算中,以固体火箭发动机燃烧室工作过程仿真为例,如果采用网格算法进行计算,那么必须使用动网格等技术将计算边界贴合固体推进剂的燃面,以便准确地施加边界条件。由于受到网格拓扑结构和生成质量的限制,在流场边界运动较大以及几何拓扑结构复杂的情况下,即使采用动网格技术也不可避免地会遇到网格扭转变形和拉伸等困难,而采用无网格算法则只涉及离散点的运动,自然不存在网格拉伸和扭转变形的限制。因此,无网格法在运动边界问题方面的计算具有显著的优势。

(3) 在对自由表面流动、液滴碰撞破碎等流体大变形问题中,采用拉格朗日无网格法既能够自然地描述物质界面,又能够完全避免拉格朗日网格法中网格扭曲