



国防科技图书出版基金

C 计算爆炸力学

Computational Explosion Mechanics

宁建国 马天宝 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

计算爆炸力学

Computational Explosion Mechanics

宁建国 马天宝 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

计算爆炸力学 / 宁建国, 马天宝著. —北京: 国防工业出版社, 2015. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 10036 - 5

I. ①计... II. ①宁... ②马... III. ①计算爆炸力学
IV. ①038

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032199 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 318 千字

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

在武器弹药的研制设计和工业重大爆炸灾害预防与救援的研究中,包含了大量的爆炸与冲击问题。由于爆炸与冲击问题是一个几何、材料和边界条件均为非线性的强流固耦合问题,涉及高速、高压、高温条件下气体、液体和固体等多种介质间的相互耦合作用,这使得理论和实验研究遇到相当大的困难,而数值模拟则成为研究爆炸与冲击问题的重要手段。作为爆炸力学、材料动力学与计算数学、计算机技术相交叉而产生的新的学科分支——计算爆炸力学已成为独立于理论与实验的重要科学研究方法。

计算爆炸力学研究的问题属于多维不定常问题,除采用双曲型方程组描述外,还有诸如强间断处理,化学反应,材料大变形和运动,多介质和多相内界面清晰处理,材料的动态损伤和断裂等特殊要求,比其它计算流体动力学与计算结构动力学问题要复杂得多,是爆炸力学的前沿与挑战性课题。

在爆炸力学数值计算方法方面,根据不同类型爆炸与冲击问题的特点和要求,先后发展了 Lagrange 法、Euler 法、ALE 法以及无网格法等数值方法。由于 Euler 法可以自然地反映多介质大变形流动,特别适合于爆炸冲击波的传播以及爆轰产物与介质相互作用等复杂爆炸流场的计算,尤其对求解三维复杂爆炸力学问题更是具有其它方法无可比拟的优势,因此本书重点介绍爆炸力学 Euler 数值方法。书中以 Euler 法为主线,系统地介绍了模拟爆炸与冲击问题所涉及的相关内容,包括控制方程的建立、有限差分方法、典型 Euler 程序、复杂结构网格生成、数据分析及可视化、大规模数值计算等,并针对多物质界面处理这一 Euler 法的主要难题进行了重点研究。由于材料模型和参数是影响爆炸与冲击问题数值模拟的重要因素,书中特别针对典型材料的动态本构模型进行了系统的总结。最后给出了采用自主开发的 Euler 软件计算的典型爆炸与冲击问题数值算例。

本书所涉及的内容是当前计算爆炸力学基础研究领域重点关注的方向,这些研究内容与材料动力学、计算数学、计算机科学等研究领域密切相关,是作者长期在北京理工大学从事计算爆炸力学研究以及在教学工作的基础上整理完成的,突出反映了近十多年来在计算爆炸力学基础研究的一些领域取得的进展。本书不仅有完整的理论模型和算法,而且有一系列与此相关的爆炸与冲击问题的算例展示给读者,这些计算结果全部是由作者结合工程实际问题采用自主开

发的软件进行模拟的。由于本书所涉及的内容比较广泛,加上作者水平有限,书中难免会有错误和不足之处,恳请同行专家及读者批评指正。

作者感谢国防科技图书出版基金和国家自然科学基金重大项目(11390363)的资助。

本书内容论述完整,物理概念清晰,特别是有详细的算例,可作为爆炸力学、弹药工程、安全工程等专业的科研人员和工程技术人员的理论参考书,也可作为相关专业本科生和研究生的教材与参考书。

宁建国 马天宝

2014年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算爆炸力学研究进展	1
1.2 国内外爆炸力学仿真程序研究概况	3
参考文献	6
第 2 章 Euler 形式的动力学基本方程组	9
2.1 三维 Descartes 直角坐标系中的流体力学方程组	9
2.2 三维曲线坐标系中的流体力学方程组	15
2.2.1 球坐标系中动力学基本方程组	19
2.2.2 柱坐标系中动力学基本方程组	20
2.3 流体弹塑性欧拉方程组	22
2.4 小结	23
参考文献	23
第 3 章 有限差分方法基本理论	24
3.1 定解问题的有限差分离散	24
3.1.1 定解区域的离散	24
3.1.2 控制方程的离散	25
3.1.3 初边界条件的离散	27
3.2 抛物型方程的差分格式	29
3.3 双曲型方程的差分格式	33
3.4 差分方程的相容性、收敛性和稳定性	40
3.4.1 相容性	40
3.4.2 收敛性	41
3.4.3 稳定性	43
3.4.4 赖克斯 (Lax) 定理	54
3.5 差分方程的耗散性和色散性	55
3.6 非线性发展方程	60

3.6.1	非线性发展方程基本性质	60
3.6.2	非线性发展方程间断解性质	63
3.6.3	守恒型方程的广义解	63
3.6.4	弱解的唯一性条件	64
3.7	小结	69
	参考文献	69
第4章	典型差分程序	70
4.1	质点网格法	70
4.1.1	流体方程组	71
4.1.2	网格与变量配置	71
4.1.3	压力效应计算	72
4.1.4	质点坐标的确定	73
4.1.5	输运计算	74
4.1.6	炸药爆炸效应	75
4.1.7	稳定性	76
4.1.8	PIC 方法的改进	76
4.1.9	质点映射算法	77
4.2	标志网格法	81
4.2.1	控制方程组	81
4.2.2	网格与变量配置	81
4.2.3	求预估值 $\bar{u}, \bar{v}$	81
4.2.4	示踪点计算	82
4.2.5	标志网格法的应用	83
4.3	流体网格法	83
4.3.1	网格设置与控制过程	83
4.3.2	压力效应步	84
4.3.3	输运步	85
4.3.4	稳定性	87
4.3.5	总能量守恒检验	87
4.3.6	PLIC 方法讨论	88
4.4	HELP 和 MOCL 方法	88
4.4.1	控制方程组	88
4.4.2	程序总框	91
4.4.3	守恒方程分裂	93
4.4.4	弹塑性效应和屈服判据	94

4.4.5	材料界面计算	95
4.4.6	HELP 程序应用及改进	98
4.4.7	MOCL 方法	98
4.5	MMIC 方法	99
4.5.1	守恒方程组	99
4.5.2	应力应变关系	99
4.5.3	计算域和方程组的离散	100
4.5.4	算子分裂	101
4.5.5	人工粘性	103
4.5.6	应力偏量的计算	103
4.5.7	压力效应步	104
4.5.8	输运步	106
4.6	小结	108
	参考文献	108
第 5 章	多物质界面处理方法	110
5.1	VOF 方法	110
5.1.1	Hirt Nichols 的 VOF 方法	111
5.1.2	二维 Youngs 方法	112
5.1.3	SLIC 方法	113
5.1.4	三维 Youngs 方法	114
5.2	模糊界面方法	120
5.2.1	体积比计算	120
5.2.2	网格分类	122
5.2.3	输运量的计算	123
5.2.4	模糊输运表及输运方法	124
5.3	Level Set 及 Particle Level Set 方法	126
5.3.1	Level Set 方法	127
5.3.2	Particle Level Set 方法	139
5.4	小结	146
	参考文献	147
第 6 章	Euler 有限差分方法的并行化方法	148
6.1	并行计算技术	148
6.1.1	并行程序概论	149
6.1.2	MPI 简介	151

6.2 Euler 方法并行化的关键问题	152
6.2.1 数据相关性分析	153
6.2.2 子区域边界虚网格(层)数量的确定及数据通信实现	154
6.2.3 并行程序中的变量	155
6.3 Euler 并行程序测试及并行性能评价	156
6.3.1 空中爆炸算例测试	156
6.3.2 聚能射流算例测试	158
6.3.3 MMIC-3D 并行性能测试	160
6.4 动态并行技术	162
6.4.1 动态并行程序实现方法	163
6.4.2 动态并行程序测试及并行性能分析	164
6.5 小结	166
参考文献	166
第7章 大规模计算的网格自动生成与数据挖掘技术	167
7.1 大规模数值计算的网格自动生成技术	168
7.1.1 结构化网格	169
7.1.2 非结构化网格	170
7.1.3 笛卡儿网格	170
7.1.4 三维有限差分网格	174
7.1.5 网格消隐及显示	181
7.1.6 网格生成实例	183
7.2 三维大规模数据场可视化技术	185
7.2.1 直接体绘制方法	186
7.2.2 流线可视化技术	191
7.2.3 可视化技术在爆炸场中的应用	194
7.3 小结	196
参考文献	197
第8章 材料动态本构模型	199
8.1 建立本构方程的一般原则	199
8.2 流体状态方程	200
8.2.1 空气的状态方程	200
8.2.2 水的状态方程	200
8.3 炸药状态方程	201
8.3.1 经验型状态方程	201

8.3.2	炸药化学反应模型	203
8.3.3	涉及化学反应的爆轰产物状态方程	204
8.4	金属材料本构模型	207
8.4.1	经验本构模型	207
8.4.2	以物理意义为基础的本构模型	209
8.4.3	流体弹塑性模型	211
8.4.4	本构方程的实验验证	212
8.4.5	固体高压状态方程	212
8.5	土的本构模型	219
8.5.1	Mohr - Coulomb 条件	219
8.5.2	Drucker - Prager 条件	219
8.5.3	泡沫模型	220
8.5.4	帽盖模型	220
8.6	陶瓷及混凝土等脆性材料本构模型	222
8.6.1	JH - 2 模型	222
8.6.2	HJC 模型	224
8.6.3	TCK 模型	227
8.6.4	基于细观力学理论的混凝土材料动态本构模型	228
8.7	微裂纹演化与汇合的本构模型	232
8.7.1	翼型裂纹扩展	232
8.7.2	本构方程	234
8.7.3	微裂纹汇合	236
8.7.4	模型验证	237
8.8	橡胶材料的本构模型	241
8.8.1	BLATZ - KO 橡胶模型	241
8.8.2	Mooney - Rivlin 橡胶模型	242
8.9	小结	242
	参考文献	242
第9章	EXPLOSION - 2D/3D 仿真软件的工程应用	244
9.1	基于质点类方法的侵彻问题数值模拟	245
9.1.1	计算模型及材料参数	245
9.1.2	侵彻过程及结果分析	246
9.2	地下工事爆炸数值模拟研究	248
9.2.1	计算模型及材料参数	248
9.2.2	数值模拟结果分析	250

9.3 聚能射流的数值模拟研究	252
9.3.1 聚能射流形成的数值模拟研究	252
9.3.2 锥角对射流形成的影响研究	255
9.4 小结	257
参考文献	257
第 10 章 展望与发展趋势	259

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Research progress of computational explosion mechanics	1
1.2	Research work of explosion mechanics simulation software at home and abroad	3
	References	6
Chapter 2	The Euler dynamics equations	9
2.1	Three – dimensional fluid mechanics equations in Descartes rectangular coordinate system	9
2.2	Three – dimensional fluid mechanics equations in curvilinear coordinate system	15
2.2.1	Dynamics equations in spherical coordinates	19
2.2.2	Dynamics equations in cylindrical coordinates	20
2.3	Fluid elastic – plastic Euler equations	22
2.4	Summary	23
	References	23
Chapter 3	The basic theory of finite difference method	24
3.1	The finite difference discretization of definite problem	24
3.1.1	The discretization of the definite region	24
3.1.2	The discretization of control equations	25
3.1.3	The discretization of initial and boundary conditions	27
3.2	The finite difference scheme of parabolic equation	29
3.3	The finite difference scheme of hyperbolic equation	33
3.4	Consistency, convergence and stability of the finite difference equation	40
3.4.1	Consistency	40
3.4.2	Convergence	41

3.4.3	Stability	43
3.4.4	Lax theorem	54
3.5	Dissipation and dispersion of the finite difference equation	55
3.6	Nonlinear evolution equation	60
3.6.1	Basic properties of nonlinear evolution equation	60
3.6.2	Discontinuous solution properties of nonlinear evolution equation	63
3.6.3	The generalized solution of conservation equation	63
3.6.4	The unicity condition of weak solution	64
3.7	Summary	69
	References	69

Chapter 4 Typical finite difference hydrocodes 70

4.1	Particle in Cell method	70
4.1.1	Fluid equations	71
4.1.2	Grid and variable configuration	71
4.1.3	Pressure effect calculation	72
4.1.4	Particle's coordinates determination	73
4.1.5	Transport calculation	74
4.1.6	Explosion effect	75
4.1.7	Stability	76
4.1.8	Improvement of the PIC method	76
4.1.9	Particle mapping algorithm	77
4.2	Marker and Cell method	81
4.2.1	Governing equations	81
4.2.2	Grid and variable configuration	81
4.2.3	Solution of the forecasts of $\tilde{u}, \tilde{v}$	81
4.2.4	Marker calculation	82
4.2.5	The application of Marker and Cell method	83
4.3	Fluid in cell method	83
4.3.1	Grid settings and control process	83
4.3.2	Pressure effect step	84
4.3.3	Transport step	85
4.3.4	Stability	87
4.3.5	Total energy conservation inspection	87
4.3.6	Discussion of the PLIC method	88

4.4	HELP method and MOCL method	88
4.4.1	Governing equations	88
4.4.2	Framework of the hydrocode	91
4.4.3	Splitting of the conservation equation	93
4.4.4	Elastic – plastic effect and yield criterion	94
4.4.5	Material's interface calculatiton	95
4.4.6	Applications and improvements of the HELP hydrocode	98
4.4.7	MOCL(Marker On Cell Line) method	98
4.5	MMIC method	99
4.5.1	Conservation equations	99
4.5.2	Stress – strain relationship	99
4.5.3	The discretization of the computational domain and equations	100
4.5.4	Operator splitting	101
4.5.5	Artificial viscosity	103
4.5.6	Stress deviator calculation	103
4.5.7	Pressure effect step	104
4.5.8	Transport step	106
4.6	Summary	108
	References	108

Chapter 5 Multi – material interface treatment method 110

5.1	VOF(Volume of Fluids) method	110
5.1.1	The VOF method of Hirt&Nichols	111
5.1.2	Two – dimensional Youngs method	112
5.1.3	SLIC method	113
5.1.4	Three – dimensional Youngs method	114
5.2	Fuzzy interface method	120
5.2.1	Volume ratio calculation	120
5.2.2	Grid classification	122
5.2.3	Transport quantity calculation	123
5.2.4	Fuzzy transport table and transport method	124
5.3	Level Set and Particle Level Set method	126
5.3.1	Level Set method	127
5.3.2	Particle Level Set method	139