

爆炸冲击现象数值模拟

Numerical Simulation for Explosion and Phenomena



杨秀敏 编著

朱兆祥 郑哲敏 审校

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

爆炸冲击现象数值模拟

Numerical Simulation for Explosion and Phenomena

杨秀敏 编著

朱兆祥 郑哲敏 审校

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

爆炸冲击现象数值模拟/杨秀敏编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,
2010.10

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02713-0

I. ①爆… II. ①杨… III. ①爆炸力学—研究 IV. ①O38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 129942 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 24

彩插 12

字数 425 千

版次 2010 年 10 月第 1 版

印次 2010 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—2000 册

定价 78.00 元

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

序

《爆炸冲击现象数值模拟》是一本理论和应用紧密结合的科学专著,它详尽地阐述了关于爆炸、冲击与毁伤效应的计算模型、数值方法和模拟仿真技术,是一本十分难得的有关爆炸力学数值模拟方法和技术的图书,作为本书的首批读者,笔者感到无比荣幸。

爆炸力学是现代力学的重要分支,主要研究爆炸、冲击与毁伤效应的理论和应用技术。爆炸、冲击与毁伤是矛和盾两者耦合于一体的复杂系统,包含着高温、高压、高能量输运和气-流-固耦合以及高速撞击、高应变率碎裂等强非线性行为的动力学问题,涉及理论和用力学的几乎所有分支。关于爆炸、冲击与毁伤效应的研究,无论是在物理、力学机理和模型,试验和量测技术,还是在数值模拟方法及其软件研制技术等方面,都存在诸多的科学和技术难题,相关的研究已经成为当今物理、力学和数学的热门研究领域。因此,加强爆炸、冲击和毁伤效应的研究以及相关理论、方法和技术成果的传播,不仅具有重大的科学意义,而且具有显著的经济和社会价值;其成果不仅可以应用于军事、国防及民防工程,也可以应用于大型土木、建筑工程,例如废弃建筑物和土石工程的爆破与拆除等。

本书作者杨秀敏院士,长期从事爆炸力学及防护工程研究工作,在防护工程和爆炸冲击数值模拟的研究与应用方面,做出了突出贡

献,是该领域的一位著名专家。本书是他在总结过去研究成果和指导博士生编制相关软件的基础上撰写而成的。

本书几乎涵盖了爆炸、冲击与毁伤效应数值模拟的所有内容,从数学力学的基本概念,应力、应变及应力应变关系,到统一描述空气、流体和固体力学行为的连续介质力学的控制方程, Euler 方程、Lagrange 方程及其在各种坐标系下的表示形式;从基本的(对于爆炸空气冲击波计算而言)特征线法、人工黏性差分法,到高精度、高分辨率的 WENN 差分格式;从基本的(对于爆炸、冲击效应数值模拟而言)动力有限元时程积分法,到算子分裂法、PLIC 多物质算法以及 Euler-Lagrange 耦合算法;从通常的有限元法到无网格方法——光滑粒子法(对于高速撞击、侵彻、爆炸成坑等强非线性、高应变率、动态、大变形的数值模拟而言),包括光滑粒子法的基本理论、算法流程以及光滑粒子法与动力有限元法的耦合技术等;从理论模型、算法,到实际的数值模拟技术和经验,例如常规武器爆炸的弹片形成机理、飞散规律以及弹片与冲击波复合后破坏效应的实际计算技术;书中附有大量具有较强工程背景的实际算例。除了基本理论和计算方法外,本书还重点陈述了爆炸、冲击效应数值模拟软件(EP3D)的研制技术,包括其系统结构、材料模型库、建模和可视化技术,共享式并行技术,以及适用于高性能计算集群的分布式并行技术等。

本书除集中了作者本人及合作者的研究成果外,还收集了国内外专家,特别是国内专家的相关成果。

综上所述,本书的内容覆盖了从基本理论、数学模型、计算方法、算法过程,到数值模拟软件研制和工程数值仿真的全过程。全书内容丰富、结构合理、文字简练,是从事爆炸、冲击与毁伤效应研究和应用工作的科技人员、专家、教授和研究生值得认真阅读的一本科技专著。

伴随着物理、力学和数学的发展,特别是计算技术的飞速进步,

在爆炸、冲击和毁伤效应研究的三种手段(理论、试验、数值模拟)中,数值模拟变得越来越重要,显示出越来越强大的作用和生命力。本书在推动爆炸、冲击与毁伤效应数值模拟的理论研究和工程应用方面,定将发挥出越来越突出的科技、经济和社会效益。

作为首批读者,笔者诚恳热忱地祝贺本书出版。

崔俊芝

2010年2月21日

前 言

1960~1965年,我在中国科学技术大学近代力学系爆炸力学专业学习。爆炸力学主要研究高强瞬时动载作用下的棱变形状态,它显然是起源于战场环境,又服务于战略需求的。我毕业后穿上军装,先后在总参工程兵所属的研究所和设计所工作,致力于武器爆炸效应及其工程防护对策研究。在同班同学中算是所学专业与需求最对口者之一。毕生从事爆炸力学相关工作,有幸见证了这一新兴学科的发展进程。现将从事爆炸冲击效应数值计算的工作经验整理成书,作为向母校五十华诞的献礼,并被纳入“中国科学技术大学校友文库”,我感到十分荣幸。

20世纪六七十年代,正是世界两大阵营对峙的冷战时期,面对美苏双方核讹诈的严重威胁,我国不得不花费巨大的人力、物力开展防御核袭击的准备工作。为此,必须首先搞清核武器在不同袭击条件下的毁伤因素及其破坏规律,进而找出有效的工程防护对策。我毕业后即加入到这一工程防护的研究队伍行列之中,并于1972年被派到中科院力学所协作两年多,在郑哲敏先生的指导下求解在封闭爆炸条件下的岩体应力波传播规律问题。

按照传统理论,岩体介质受核爆压力作用只产生剪切畸变的弹塑性变形,由此计算得出的爆炸空腔体积明显小于实测数据。郑先生认为,在高温高压条件下,岩体中存在压实(密度增大)效应。据

此,他首次提出用流体弹塑性模型来描述岩体本构关系,从而合理解释了封闭爆炸空腔的形成机理。我回到本单位后,又将流体弹塑性模型应用于触地核爆炸的理论研究之中,编制出二维轴对称流体弹塑性波动问题的有限差分程序,形象地描绘出爆炸弹坑及岩体破坏分区的形成过程,并得出了二维弹塑性应力波随距离而衰减的传播规律。

前苏联解体后,世界形势发生了巨大变化,核战争的威胁逐渐降低,却爆发了多次利用精确制导常规武器实施远距离打击的高技术局部战争。因此,20世纪90年代后的防护工程研究重心逐步转移到常规弹头击中目标后的各种破坏效应方面。我从1997年开始为本单位培养这一专业领域的博士生,至今已毕业十名,他们分别完成了有关弹丸侵彻、弹丸冲击、弹片飞散、爆炸震塌、隔土爆炸、钻地爆炸、室内爆炸以及重复打击等弹着点近区的破坏机理研究,进行了相关破坏现象的数值模拟和现场试验,基本摸清了精确制导常规武器的各种主要破坏效应规律,并找出了降低工程毁伤等级的有效防护措施,改写了相应的工程设计规范,为增强我军战场生存能力提供了有力支持。

当研究重点集中到弹着点近区的破坏机理时,介质的大畸变特征就显得十分突出,相邻质点之间可能会发生碰撞、错动甚至飞散,成为典型的几何非线性问题,还会出现多种物质相互交换、混合等界面非线性问题。在此种条件下,传统的弹塑性解析方法已经无能为力,规则网格前提下的有限差分求解手段也无法保证其计算精度,因而必须寻找能适应复杂几何形状和非线性界面的新型数值求解方法。我的博士生们利用改进的动力有限元法、有限体积法、无网格(光滑粒子)法以及这些方法的耦合计算技术,前后历时十年,终于编制成功爆炸冲击效应数值计算系列软件包(EP3D),从而为我军武器破坏效应研究提供了具有自主知识产权的数值仿真平台。

早年与力学所协作时,郑先生指导下的课题组定期召开研讨会,从力学模型到求解方案都要经过大家反复讨论和争辩,以求集思广

益和去伪存真,这种工作方式使我受益良多。为了在研讨会上能清晰表达自己的观点,我必须抓紧时间刻苦读书,不断收集整理有关爆炸力学的基础理论知识,从而养成了积累读书笔记的习惯。回到本单位后,这种习惯一直被坚持下来,并于1978年手抄完成了30万字的读书笔记,详细汇集了有关爆炸动力学的基本概念,并将弹性、塑性、流体三类材料都归纳为连续介质,导出了统一的动力学方程组及其在不同坐标系统中的表达形式。后来培养博士生时,遂将这本读书笔记在内部印刷,取名为《爆炸冲击波基础理论知识》,成为年轻人的主要阅读教材。

基于自编大型计算机软件的经验,我对《爆炸冲击波基础理论知识》讲义内容进行较大增删,改写成《爆炸冲击现象数值模拟》一书。本书主要探讨相对半无限体的爆炸近区效应和防护结构破坏机理,重点阐述大变形、多物质问题的数值求解方法(包括其基本思路、控制方程、离散处理和程序化过程);删去了原讲义中有关层状介质弹性波传播理论和一维杆件中的波动问题等部分,相关内容可参阅介绍地震波的众多论著和王礼立教授的《应力波基础》等书。原讲义中的计算图形多为手绘,新书则由模拟计算机软件直接绘出破坏效应的三维动态演变图像。

全书共分8章。前四章首先引入连续介质的基本概念和理论基础,然后介绍传统有限差分法的应用实例。在弹塑性变形条件下,利用笛卡儿坐标来描述介质运动比较简单直观,进而可以很方便地导出各不同方向上的有限差分方程。后四章转入介绍弹着点近区的非线性畸变问题求解方法,此时若仍沿用前四章的普通数学符号,必将增加大量的繁杂冗长公式,增加阅读困难,此时改用张量坐标来描述质点空间运动则相对方便些,物理概念清晰且阅读流畅,而空间坐标与笛卡儿坐标之间的变换关系将被隐含于计算程序之中。

第1章详细归纳了有关应力状态和应变状态的基本概念,列出了不同形式的弹塑性介质应力应变关系和流体状态方程。

第2章重新推导了 Euler 系统和 Lagrange 系统中不同坐标条件

下的动力学基本方程组,并给出了波阵面前后各参量之间的守恒关系表达式。

第3章介绍空气冲击波流场。首先回顾经典的空中点爆炸自模拟理论,借助该理论可以快速描绘一维不定常流场的波阵面参数变化图像;然后重点介绍空气冲击波流场计算程序EF3D,它是依据高精度、高分辨率差分格式WENN和贴体坐标而编制出来的,利用这个有限差分计算程序,可以模拟得出不同爆炸方式、不同入射反射背景条件下的各种空气冲击波流场参数变化规律。

第4章介绍岩土中的弹塑性波。首先给出无限介质中不同坐标下的弹性波动方程及其通解;然后用积分变换法求解平面一维黏弹性波,用特征线法求解平面一维弹塑性波,用有限差分法求解封闭爆炸球面一维弹塑性波;最后重点剖析触地爆炸引起的轴对称二维流体弹塑性波。对于触地爆炸问题,书中描绘了爆炸弹坑及岩体破坏分区(液化区、破碎区、破裂区)的形成过程,给出了二维弹塑性应力波(包括纵向和径向的正应力和剪应力)随距离而衰减的传播规律。

第5章专门介绍能处理几何非线性和多物质混合的数值解法。其中包括动力有限元基本原理、冲击效应的侵蚀接触求解方法、基于算子分裂和PLIC多物质算法的爆炸效应计算技术、Euler-Lagrange耦合算法等。Euler方法容易处理介质扭曲变形,在爆炸近区有较大优势;Lagrange方法可跟踪质点运动轨迹,在远区使用更为方便。将上述各种算法组合起来,就可实现从弹头侵蚀到结构动力响应的全过程数值仿真。

第6章单独介绍光滑粒子解法。该方法基于Lagrange描述但不需要网格,能够方便地处理自由表面和运动边界,可以精确描述复杂材料的本构行为等,节省了为模拟边界畸变和跟踪裂缝发展而耗费的机时,在爆炸冲击效应计算中具有良好的发展潜力。本章着重阐述光滑粒子法的基本理论及其计算流程,作为应用实例,给出了高速碰撞、冲击贯穿、爆炸成坑等模拟图像。

第7章介绍弹片效应。常规武器战斗部空中爆炸后,将产生高

速飞散的密集弹片群,对附近的暴露人员和轻型武器装备造成杀伤破坏作用。本章简要叙述弹片的形成机理及其与空气冲击波的相对关系,考虑重力和空气阻力后的弹片飞散规律,当弹片撞击到结构墙面后会引发结构变形,若出现弹片与冲击波同时作用到墙体的情况,则有可能产生最不利的复合破坏效应。

第8章介绍 EP3D 软件程序结构,主要包括建模、求解、可视化三部分。求解模块又含有弹丸冲击、装药爆炸、冲击爆炸耦合、光滑粒子等多个求解器。本章着重介绍主程序之外的三个辅助模块:基于映射方法和索引空间的建模软件、基于 OpenGL 和 VTK 库的可视化软件、基于 OpenMP 并行环境的共享式并行版本和基于 MPICH 并行环境的分布式并行版本。本章还提供了几种常用材料模型数据,仅供采用 EP3D 程序计算时的取值参照。最后以附录的形式给出了 20 组数值模拟工程实例,基本囊括了爆炸冲击效应的各种不同领域。其中,弹丸与结构构件的相互作用、水下爆炸的涌浪等图像,在同类资料中尚属少见。

本书编写过程中参阅了大量相关资料,为此在文末列出了详尽的参考文献目录。书中前四章是作者多年科研工作的总结,所涉及的研究课题是由我与本研究室及协作单位同仁共同完成的,其中包含曾一道工作过的曾惠泉、李茂生、洪锦如、张守保、王家浚、陈文俊、张六一、陈志林、张德良、刘育魁、李荫凡、焦云鹏等同志的辛劳。后四章归纳了我的几名博士生的研究成果,他们是王安宝、杨科之、邓国强、董军、周布奎、胡金生等,特别是杨科之在编制 EF3D 软件、邓国强在编制 EP3D 软件过程中的贡献尤大。前四章插图由林晨绘制,后四章插图则主要由邓国强用计算机完成。作者在此一并表示衷心的感谢。

读书笔记《爆炸冲击波基础理论知识》内部印刷前,为避免内容存在谬误之处,我曾呈送我的老师朱兆祥先生审阅,朱先生对有关基本概念作了详细订正,并提醒要注意保持常用参量在各章中出现时的统一性等。本书正式出版前,我又将样书呈送郑哲敏院士,郑先生

以抱病之身仔细审阅了全部书稿。两位老先生都是我读科大时的启蒙老师,他们的严谨治学态度令我永远难以忘怀。最后,作者对在百忙中仔细审阅本书并为之作序的崔俊芝院士以及参与校审书稿的中国科学技术大学李永池教授等深致谢意。

杨秀敏

2010年2月24日

目 次

总序	(I)
序	(III)
前言	(VII)
第 1 章 连续介质静力学的基本概念	(1)
1.1 应力状态	(3)
1.2 应变状态	(15)
1.3 弹性介质的应力应变关系	(25)
1.4 塑性介质的应力应变关系	(31)
1.5 流体介质的状态方程	(45)
第 2 章 连续介质动力学基本方程	(52)
2.1 Euler 形式的动力学基本方程	(53)
2.2 Lagrange 形式的动力学基本方程	(61)
2.3 一维运动方程组的另一种表达方式	(66)
2.4 流体动力学方程组的再推导	(72)
2.5 波阵面前后各参量之间的关系	(78)
第 3 章 空气中的冲击波	(92)
3.1 理想气体的一维不定常运动	(92)
3.2 点爆炸空气冲击波自模拟解	(99)
3.3 空气冲击波反射规律	(113)
3.4 空气流场三维有限差分数值计算	(122)

第 4 章 岩土中的弹塑性波	(139)
4.1 无限介质中的弹性波	(139)
4.2 平面一维黏弹性波	(151)
4.3 平面一维弹塑性波	(158)
4.4 球对称一维弹塑性波	(169)
4.5 轴对称二维流体弹塑性波	(179)
第 5 章 爆炸冲击效应的动力有限元解法	(197)
5.1 动力有限元(FEM)法的基本理论	(197)
5.2 弹丸冲击效应的 FEM 法计算	(214)
5.3 装药爆炸效应的 FVM 法计算	(227)
第 6 章 冲击爆炸效应的光滑粒子解法	(258)
6.1 光滑粒子(SPH)法的基本理论	(259)
6.2 光滑粒子法与动力有限元法耦合	(272)
6.3 应用光滑粒子法求解冲击爆炸效应	(275)
第 7 章 常规弹头爆炸后的弹片效应	(286)
7.1 弹片形成机理	(286)
7.2 弹片飞散计算程序	(290)
7.3 弹片飞行速度	(298)
7.4 弹片对壁面的破坏效应	(302)
第 8 章 爆炸冲击效应三维计算程序	(306)
8.1 程序研制概况	(306)
8.2 建模软件	(309)
8.3 可视化软件	(316)
8.4 并行计算技术	(321)
8.5 材料本构模型及数据库	(329)
8.6 计算程序应用实例	(350)
附录 爆炸冲击效应计算图集	(351)
参考文献	(375)

第 1 章 连续介质静力学的基本概念

连续介质力学最基本的假定是把研究对象介质视为连续而均质的,这就意味着该介质无间断地充满整个限定空间,而且其性质是各向相同的。这样我们就可以从中分割出一个微小体元,用来代替整体加以研究。这个微元的体积虽很小,但相对介质分子而言又足够大,足以包含大量分子数。通常所说连续介质某质点的物理量,是指整个体元而非单个分子的物理参数。许多连续介质如空气、水、金属等,它们的力学性质沿着不同的方向相同或基本相同,我们称之为各向同性介质。土和岩石有时虽呈现出各向不同性甚至不均匀的特性,但与典型的非均质或各向异性材料相差甚远,因而仍可近似地视之为均质和各向同性介质。

研究连续介质力学,特别是研究在爆炸冲击荷载作用下的连续介质力学行为,一般说来须从三个出发点入手:一是动力学分析,二是几何变形,三是介质本构关系。在物体中取一个微小体元,通过建立该体元在外力和内力作用下的运动方程,可以得出其应力状态的表达式;考察微体在外力作用下的变形情况,从而得出其应变状态的表达式;根据介质的物理特性,可以建立物体内部同一体元的应力状态与应变状态之间的关系表达式。连续介质力学的几个分支如流体力学、弹性力学、塑性力学等的差异,主要表现为它们的应力应变关系不一样。因而,本章内容主要包括下述三个方面:应力状态描述方法、应变状态描述方法、应力应变关系的不同表达形式。

在质点系力学中,为了描述各个质点的运动情况,我们可将每个质点依次命名,如 $A, B, C, D, \dots$;在桁架结构力学中,为了描述各个构件的内力和变形,可将每个构件依次命名为 $AB, BC, CD, \dots$ 。在连续介质力学中,为了