



工业和信息化部“十二五”规划教材

爆炸冲击数值 模拟技术基础

门建兵 蒋建伟 王树有 编著 ●

FUNDAMENTALS OF
NUMERICAL SIMULATION FOR
EXPLOSION AND SHOCK PROBLEMS



工业和信息化部“十二五”规划教材

爆炸冲击数值 模拟技术基础

门建兵 蒋建伟 王树有 编著

FUNDAMENTALS OF
NUMERICAL SIMULATION FOR
EXPLOSION AND SHOCK PROBLEMS



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

数值模拟是研究和解决爆炸与冲击等非线性问题的有力工具。本书介绍了数值模拟的基本原理、建模原则、常用算法基础理论、材料模型及典型应用,强调理论与实践的结合。全书共有7章,第1章为爆炸冲击数值模拟概述;第2章重点介绍了数值模拟前处理建模流程、模型构建原则与方法;第3~5章介绍了拉格朗日算法、欧拉算法以及常用替代算法的基础理论知识,同时基于AUTODYN软件针对各算法的典型应用实例给出了具体指导,有助于读者了解算法的应用;第6~7章介绍了爆炸冲击数值模拟常用材料模型及其参数测定方法,帮助读者正确理解并科学选用材料模型。

本书可作为高等学校工科类高年级本科生、研究生的教材,也可供从事相关专业的工程技术人员和研究人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

爆炸冲击数值模拟技术基础 / 门建兵, 蒋建伟, 王树有编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-5682-0919-9

I. ①爆… II. ①门… ②蒋… ③王… III. ①爆炸力学-冲击动力学-数值模拟
IV. ①O38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 162888 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 11.75

彩 插 / 4

字 数 / 270 千字

版 次 / 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 封 雪

尹 珏

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

本书的编写基于编写组开设的本科生“弹药工程虚拟实验技术”和研究生“非线性动力学数值仿真”“大型工程分析软件与应用”等课程,并结合了多年的课程讲义和相关科研项目数值模拟实践应用经验。

现有爆炸冲击数值模拟方面教材中关于非线性软件通用操作的指导书较多,大多基于特定软件(如 LS-DYNA)针对典型非线性问题讲述具体的软件实现过程,对学生应用软件的实际操作能力培养具有细致的指导作用,但对于为什么这样操作、如何控制建模和数值模拟过程中的计算误差、提高计算精度等问题缺乏理论基础及应用经验方面的讲述。

鉴于上述原因,本书将较系统地介绍非线性动力学问题数值模拟的建模原则、常用算法基础理论与应用方法,解决读者在数值模拟应用方面的困惑。书中的离散化建模、材料模型选取及参数测定等内容结合了编者多年的教学实践经验和科学研究成果,具有一定的指导意义。同时书中部分章节基于有代表性的 AUTODYN 软件,针对特定算法在爆炸冲击问题中的典型应用,详细介绍如爆炸冲击波传播、动能侵彻、聚能射流成型等算例的操作流程,以便读者能够结合应用实例快速掌握数值建模和求解的基本流程,加深对数值模拟软件应用的认识。

全书共分 7 章,第 1 章介绍爆炸冲击数值模拟方法、主要软件及其发展趋势;第 2 章重点介绍数值模拟前处理建模流程、模型构建原则与方法;第 3~5 章介绍拉格朗日算法、欧拉算法及常用替代算法的基础理论知识,同时结合典型问题给出应用示例模拟过程的具体指导;第 6~7 章介绍爆炸冲击数值模拟常用材料模型及其主要模型参数测定方法,帮助读者正确理解并科学选用材料模型。

本书编写分工情况:门建兵编写第 1~3 章,王树有编写第 4 章和第 7 章,蒋建伟负责其他章节及全书统稿工作。博士生王旻阳、南宇翔,硕士生周渝捷、胡洋成、肖辉朗等在实例应用指导和编排方面付出了辛勤的劳动。同时,本书的编写得到了张连生副教授在实验测试方法方面的支持和帮助。北京理工大学宁建国教授、南京理工大学李向东教授在百忙之中对全稿进行了审查,并提出了宝贵的建议,编者谨向他们表示衷心感谢。另外,本书参考了国内外相关的文献资料,在此向所有引用文献作者表示感谢。

由于数值模拟技术发展迅速,加之编者水平和专业所限,书中错误和纰漏之处在所难免,敬请各位专家和广大读者批评指正。

编 者
2015 年 1 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 概述	001
1.1 引言	001
1.2 科学认识数值模拟	003
1.3 爆炸冲击数值模拟常用软件	004
1.3.1 AUTODYN 软件	004
1.3.2 LS-DYNA 软件	006
1.3.3 MSC. Dytran 软件	007
1.3.4 PAM-CRASH 软件	009
1.3.5 ABAQUS 软件	010
1.3.6 SPEED 软件	010
1.3.7 Impa3D 软件	011
1.4 数值模拟技术的发展与展望	012
1.4.1 数值模拟技术发展趋势	012
1.4.2 国内现状分析	016
第 2 章 数值模拟前处理建模	018
2.1 数值模拟解决工程问题的基本流程	018
2.2 数值模拟程序组成	019
2.2.1 前处理 (Preprocessing)	020
2.2.2 求解计算 (Solution)	020
2.2.3 后处理 (Postprocessing)	020
2.3 前处理建模基本流程及模型格式信息	020
2.3.1 前处理建模基本流程	020
2.3.2 数值模型格式信息	021
2.3.3 数值模拟误差分析	023
2.4 网格基本分类	023
2.4.1 按维数分类	023
2.4.2 按排列形式分类	024
2.5 网格模型构建原则	025

2.5.1	网格尺寸对数值模拟精度的影响	025
2.5.2	网格模型的构建原则	028
2.6	网格模型构建方法	028
2.6.1	网格模型常用构建算法	028
2.6.2	网格模型的构建软件	029
2.6.3	TrueGrid 构建网格模型	031
2.6.4	ICEM 构建网格模型	033
第3章	拉格朗日算法及其应用	040
3.1	引言	040
3.2	控制方程	040
3.3	拉格朗日计算循环	043
3.3.1	网格单元变量	044
3.3.2	网格单元体积和应变率	045
3.3.3	压力和应力	051
3.3.4	节点力	053
3.3.5	节点加速度、速度和位移	058
3.3.6	边界条件	059
3.3.7	时间步长	060
3.4	克服拉格朗日网格过度扭曲的方法	061
3.5	拉格朗日算法小结	063
3.6	典型应用示例	063
3.6.1	破片穿靶模拟	063
3.6.2	多点起爆 EFP 成型过程模拟	070
第4章	欧拉算法及其应用	075
4.1	引言	075
4.2	控制方程	076
4.3	欧拉计算循环	076
4.3.1	欧拉网格	077
4.3.2	求解过程	080
4.3.3	人工黏性	082
4.3.4	材料输运	082
4.3.5	混合单元的处理	082
4.3.6	时间步长	083
4.4	欧拉算法小结	083
4.5	典型应用示例	084
4.5.1	聚能射流形成模拟	084
4.5.2	爆炸冲击波传播过程模拟	091

第 5 章 拉格朗日与欧拉的替代算法及其应用	097
5.1 任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 算法	097
5.2 耦合算法	099
5.3 光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法	101
5.4 壳单元 (Shell) 算法	105
5.5 梁单元 (Beam) 算法	105
5.6 典型应用示例	107
5.6.1 炸药水中爆炸模拟	107
5.6.2 接触爆炸对混凝土结构的损伤	115
5.6.3 超高速碰撞模拟	122
5.6.4 动能杆侵彻钢筋混凝土	128
第 6 章 材料模型	136
6.1 材料平衡状态区域图	136
6.2 状态方程	137
6.2.1 理想气体状态方程	137
6.2.2 线性状态方程	138
6.2.3 Mie-Gruneisen 形式状态方程	138
6.2.4 多项式状态方程	139
6.2.5 Shock 状态方程	140
6.2.6 p - α 模型	141
6.2.7 高能炸药状态方程	142
6.3 本构模型	144
6.3.1 弹性模型	144
6.3.2 弹塑性模型	145
6.3.3 Johnson-Cook 模型	146
6.3.4 Zerilli-Armstrong 模型	146
6.3.5 Steinberg-Guinan 模型	147
6.3.6 HJC 模型	147
6.3.7 RHT 模型	148
6.4 失效模型	152
6.4.1 失效类模型	152
6.4.2 体积 (各向同性) 失效模型	153
6.4.3 方向性失效模型	153
6.4.4 累积损伤模型	156
6.5 材料模型的选取	157
第 7 章 典型材料模型参数试验测定方法	160
7.1 典型材料特性试验方法	160

7.1.1	材料静态拉伸和扭转试验	160
7.1.2	泰勒杆试验	162
7.1.3	霍普金森压杆试验	163
7.1.4	平板撞击试验	165
7.1.5	圆筒试验	166
7.2	典型材料模型参数的获取	168
7.2.1	金属材料的冲击状态方程参数获取	168
7.2.2	金属材料的 Johnson-Cook 本构模型参数拟合	171
7.2.3	炸药 JWL 状态方程参数获取	173
参考文献		176

第1章

概 述

1.1 引言

爆炸与冲击问题的研究在国防和民用经济领域有着广泛的应用。常规武器设计、工程爆破、爆炸加工、工程防护、高压合成新材料和爆炸灾害的防护等问题都涉及爆炸与冲击。从理论上可以将爆炸与冲击问题归结为以下主要类型：

- (1) 含能材料在各种形式初始冲能作用下的起爆；
- (2) 爆轰的传播与控制；
- (3) 爆轰产物的运动；
- (4) 爆炸对介质的驱动加速；
- (5) 爆炸加载下应力波的传播及材料的破坏；
- (6) 含能材料在空气、水、岩土等介质中的爆炸；
- (7) 高速碰撞，弹丸、长杆及射流对目标的侵彻；
- (8) 爆炸加载下材料的反应及相变。

爆炸与冲击问题，特别是爆炸问题具有如下显著特点：

- (1) 三高（高速、高温、高压）；
- (2) 单次性；
- (3) 瞬时性；
- (4) 破坏性与危险性。

以上这些特点决定了爆炸与冲击问题是一类非常典型的非线性瞬态动力学问题，所涉及的过程通常需要用流体力学和弹塑性动力学模型来描述。根据具体情况可采用一维或多维空间，综合化学反应方程、反应率方程、热传导方程和材料本构关系等，列出包含有线性和非线性偏微分方程、常微分方程、积分方程、泛函方程及代数方程的一个封闭方程组，连同不同的初始条件和边界条件求解。然而这些方程只有在极其简化的情况下才可以得到一些解析解，一般只限于包含两个自变量的平面问题。这种方法在特定的情况下是可行的，但是过多的简化可能导致过大误差，甚至产生错误的结果。随着科学技术的发展，解析解已经远远不符合要求，人们把注意力转向寻求数值解，因为数值解对控制方程的限制宽泛得多，可以得到更接近实际情况的解。因此，人们在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上，借助现代科学技术的产物——计算机来获得满足工程要求的数值解，这就是数值模拟技术。数值模拟是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。

爆炸、冲击及其对目标的作用是矛和盾耦合于一体的复杂系统,包含着高温、高压、高能量输运和气一流一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,涉及理论和应用力学的几乎所有分支。关于爆炸、冲击与效应的研究,无论是物理、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。

目前,解决爆炸冲击问题主要采用以下方法。

1. 理论分析(Theoretical Analysis)

理论分析方法基于基本原理,利用质量守恒、动量守恒和能量守恒,同时在模型建立之初会采取必要的简化(例如,一维行为、早期、稳定状态或后期效应的考虑)或假设(波传播形式、流场模式等)。完全的理论分析只适用于一些简单的和理想化的问题。例如应用著名的 Gurney 公式来计算炸药对金属壳体驱动形成的破片初速,应用 PER 理论计算聚能射流的头部速度,以及应用空腔膨胀理论计算动能弹丸的侵彻深度等。

理论分析中还有一类半经验数据分析技术(Semiempirical Analysis)。这种分析技术基于一些基础理论,并从大量实验中得到数据支撑,可以在更大的范围内尝试建立某些经验关系,其中的自变量可以包括动量、质量、速度、弹体和靶板尺寸等参数。用于破片侵彻效应预估的 THOR 方程就是这种方法的典型代表。该方程根据大量的数据,以无量纲参数(可能是通过直觉、相似分析或其他考虑而得到的)间的关系式来表征侵彻能力。很显然,像材料屈服强度这种对材料性能有直接影响的参数应该在公式中有所体现。这种分析方法的优点是对现有的实验数据进行补充并降低实验成本,是在有限的实验数据或特定假设条件下建立的,因而应用范围较窄,特别是不能外推,否则很可能导致严重的错误甚至危险的后果。如果随后还有更多的实验数据补充到现有的数据库中,那么经验关系必须重新校验。

同时许多研发机构采用这种半经验数据图表分析技术,开发了用于计算特定领域问题的计算机程序。例如德国 Numerics GmbH 公司的破片战斗部设计专家系统 SPLITX、美国海军武器中心的空中爆炸冲击波参数计算程序 Blast 等。

2. 实验研究(Experimental Study)

许多问题本身不好分析,唯一有效的办法就是实验测量,但对爆炸冲击问题来说,这是既耗时又昂贵的。在测试过程中会出现许多不可预见的状况,为了得到一个有效的数据点,往往需要进行多次重复性实验。例如,仅仅为了得到简单的弹道极限(弹体穿透指定厚度靶板的最小速度)信息,完成单发实验室尺度模型的冲击实验就需要几千美元。如果为了从一个冲击实验中得到更多的数据信息,则需要增加实验的复杂性和实验仪器,随之而来的就是成本的持续增加。因此,如果既需确定靶板是否被贯穿又需得到剩余质量、速度和弹体入射方向、靶板上孔的轮廓、靶板后碎片的特性(质量、速度和方向)等结果,那么每发实验成本可能达到 20 000 美元甚至更高。对于全尺寸实验,成本可能还会高一个量级。

实验结果最直接反映真实物理现象,因而实验对爆炸和冲击问题研究起着至关重要的作用,然而除成本因素之外,受测试仪器和测试条件的限制,实验往往只能表征初始状态和最终结果,很难直观地观测到现象发生中间过程中的一些机理现象,因而也无法帮助研究人员

了解问题的实质。

3. 数值模拟 (Numerical Simulation)

数值模拟软件工具的出现为爆炸与冲击问题等高速瞬态现象的研究提供了一种新的途径,该方法根据系统的守恒控制方程、材料本构模型和状态方程联立求解,可对系统作用全过程进行模拟和观测,因而该方法比分析技术具有更广的应用范围。其主要优点是可以忽略研究对象几何尺寸上的任何限制,且可以考虑高度非线性。它的缺点是处理从简单和特定的问题到复杂和一般性问题的过程中通常需要很多的数据。

数值模拟技术的应用不仅极大地节省了实验经费,同时也可使研究人员获得完美的数字化虚拟实验结果,更容易观测到在实验中无法观测到的现象和参数,已成为科学技术研究不可或缺的手段。

1.2 科学认识数值模拟

数值模拟作为一种综合应用计算力学、计算数学、信息科学等相关科学和技术的综合工程技术,是支持工程技术人员进行创新研究和创新设计的重要工具与手段。它对教学、科研、设计、生产、管理、决策等部门都有很大的应用价值,为此世界各国均投入了相当多的资金和人力进行研究。其重要性具体体现在以下几个方面。

从广义上讲,数值模拟本身就可以看作是一种基本实验。比如计算机模拟弹体的侵彻与炸药爆炸过程以及各种非线性波的相互作用等问题,实际上是求解含有很多线性与非线性偏微分方程、积分方程以及代数方程等的耦合方程组。利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的,一般只能考虑一些很简单的问题。利用实验方法不仅费用昂贵,还只能表征初始状态和最终状态,中间过程无法得知,因而也无法帮助研究人员了解问题的实质。而数值模拟在某种意义上比理论与实验对问题的认识更为深刻、更为细致,不仅可以了解问题的结果,而且可随时连续动态地、重复地显示事物的发展,了解其整体与局部的细致变化过程。

数值模拟可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象,容易被人理解和分析。除此之外,还可以显示任何实验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。例如弹体在不均匀介质侵彻过程中的受力和偏转;爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程。同时,数值模拟可以替代一些危险的、昂贵的甚至是难以实施的实验,如反应堆的爆炸事故、核爆炸的过程与效应等。

数值模拟可以促进实验技术的发展。侵彻、爆炸等实验费用极其昂贵,并且存在一定的危险,应用数值模拟可对实验方案的科学制定、实验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供更可靠的理论指导;因此数值模拟不但有很大的经济效益,而且可以加速理论、实验研究的进程。

一次投资,长期受益。虽然数值模拟大型软件系统的研制需要花费相当多的经费和人力资源,但和实验相比,数值模拟软件是可以进行复制移植、重复利用的,并可进行适当修改而满足不同情况的需求。据相关统计数据显示,应用数值模拟技术后,开发期的费用占开发成本的比例从80%~90%下降到8%~12%。

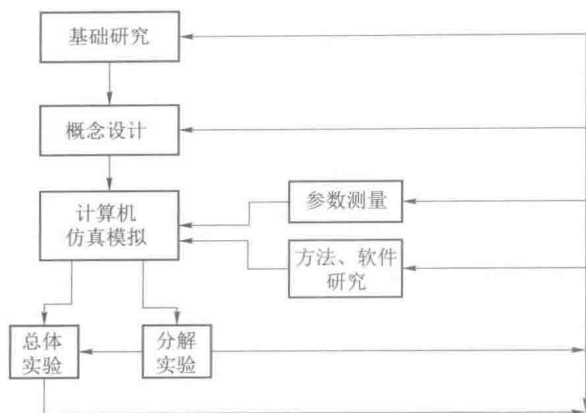


图 1.1 数值模拟与实验关系图

总之，数值模拟已经与理论分析、实验研究一起成为科学技术探索研究的三个相互依存、不可缺少的手段。

图 1.1 所示为数值模拟与实验关系图，从图中可以看出，数值模拟必须与实物实验相结合，数值模拟结果的正确性必须以描述出正确的物理现象为基础，需要理论（物理、数学）和实验研究支持。数值模拟不能代替实验，但完全可减少实验的数量。特别是在方案论证阶段，可进行多方案的相对比较，优选出结构方案。

1.3 爆炸冲击数值模拟常用软件

数值模拟是爆炸与冲击领域必不可少的研究手段。20 世纪 70 年代，美国、法国、德国等国家的学者敏锐地觉察到数值模拟的重要性和必要性，相继开始编写相关程序，进行软件的研发。以下重点介绍在爆炸冲击方面应用较为广泛的典型商业软件。

1.3.1 AUTODYN 软件

1. AUTODYN 软件发展历史及特点

非线性动力分析软件 AUTODYN 是由美国世纪动力公司（Century Dynamics Inc.）研制订开发的商用软件。该公司在 1986 年首次推出了二维版本 AUTODYN-2D，并在 1991 年推出了三维软件 AUTODYN-3D。2005 年 1 月，AUTODYN 软件被 ANSYS 公司收购，现已融入 ANSYS 协同仿真平台。在过去的 20 多年里，AUTODYN-2D/3D 软件得到了持续发展，功能日趋完善，应用更为方便，目前最新版本为 2013 年发布的 R15.0 版本。该软件从开发至今一直致力于军工行业的研发，已成为国际上爆炸力学、高速冲击碰撞领域研究的最著名数值模拟软件之一，占据国际军工行业应用的主要市场。美、英等西方发达国家的国防研究机构均配备了该软件，用于宇航器、弹药战斗部等的辅助设计。

AUTODYN 程序是一种多用途型工程软件包，主要采用有限差分、定容及有限元技术来解决固体、流体及气体动力方面的问题。其研究现象的基本特点在于时间高度独立于几何非线性（如大扭曲及变形）和材料非线性（如塑性、失效、应变硬化及软化、分段状态方程）。AUTODYN 包括了几种不同的数值技术以及广泛的材料模型，从而为解决非线性动态问题提供了一个功能强大的系统；另外，AUTODYN 软件还是一个包含前处理、后处理及求解程序分析引擎的完全集成化的软件包。交互式、菜单驱动允许用户在同一环境下建立、求解问题并演示结果，在分析的每一阶段及问题的计算过程中都伴随有图形显示，并最终可以以幻灯片的形式提供计算过程和结果。AUTODYN 软件在求解、功能以及使用方面的特点如下：

（1）前处理、主程序（解算器）和后处理集成在同一个软件内，具有可视化特点（使用

方便);

(2) 应用菜单驱动、交互式图形界面和定制模型的几何图形(直观、建模简便);

(3) 软件包含了下列不同的数值处理器(可对不同的问题进行优选):

① 拉格朗日(Lagrange)处理器:用于模拟固体及结构;

② 欧拉处理器(Euler):用于模拟流体、气体及大变形,包括一阶及二阶精度方案;

③ 任意的拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrange Euler, ALE)处理器:用于特定的流体模型;

④ 薄壳(Shell)处理器:用于模拟薄壁构件;

⑤ 光滑粒子流体动力(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH)处理器:用于陶瓷及脆性材料。

(4) 具有网格重分(Rezoning)和侵蚀(Erosion)功能(拓宽拉格朗日处理器的功能);

(5) 拉格朗日处理器(含Shell、SPH)与欧拉处理器可以进行耦合(解决流体固体相互作用问题);

(6) 具有先进的自动动态接触逻辑算法(无须定义滑移面);

(7) 从一维到二维到三维映射计算数据(节省计算时间);

(8) 包含多种材料模型(状态方程、强度模型)并内置材料数据库;

(9) 具有带方向的和累积损伤破坏模型,可处理材料破坏问题;

(10) 对用户开放程序接口,便于用户进行二次开发;

(11) 广泛应用于个人计算机、工作站及巨型机上;

(12) 软件经过全套验证和质量控制,符合ISO 9000国际质量体系认证标准;

(13) 具有世界范围内的技术支持和活跃的用户集团。

2. AUTODYN 软件应用范围

AUTODYN 软件集成了有限差分、计算流体动力学和流体编码的多种处理技术,可模拟各类冲击响应、高速/超高速碰撞、爆炸及其作用问题,广泛应用于工业、科研实验室及教育部门,尤其在国防领域特色突出(典型应用参见图1.2)。其典型的应用包括以下方面。

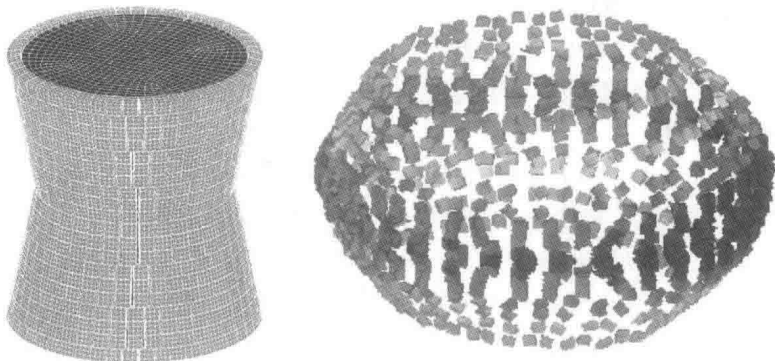


图1.2 AUTODYN 软件模拟破片战斗部爆炸过程(见彩插)

国防:冲击/侵彻、装甲及反装甲系统、动能和化学能装置、水下冲击和爆炸、弹药战斗部设计、聚能战斗部射流形成及对靶板的侵彻模拟、爆炸成型侵彻体(EFP)形成与侵彻模

拟、破片式（整体、全预制、离散杆）战斗部爆炸过程模拟、穿甲弹侵彻靶板过程及结构强度模拟、动能及半穿甲侵彻战斗部侵彻靶板过程模拟、爆破战斗部及炸药空气中爆炸冲击波场模拟、破片对靶板侵彻过程模拟、冲击波传播及对结构的动态响应模拟、战斗部装药撞击安全性模拟、战斗部结构动态强度（发射及撞击）计算、子母战斗部母弹开舱、子弹抛撒过程模拟、水下爆炸及冲击波对结构的响应。

航空与宇航：鸟对飞机的撞击、冲击，太空垃圾对飞行器的冲击，爆炸分离器设计。

石油化工：气体和粉尘爆炸、事故模拟、石油射孔弹。

核工业：管道断裂及激励、流体喷射、流体结构相互作用。

运输业：车辆及隧道中的爆炸、防撞性、安全性。

教育：固体、流体及气体动力学，应力及冲击波研究。

1.3.2 LS-DYNA 软件

1. LS-DYNA 软件发展历史及特点

LS-DYNA 软件最初由美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（美国三大国防实验室之一）的 J. O. Hallquist 博士主持完成开发，主要用于求解三维非线性结构在高速碰撞、爆炸冲击下的大变形动力响应，其目的主要是为北约组织的武器结构设计提供分析工具，1976 年发布时称为 DYNA 程序。1988 年，J. O. Hallquist 博士创建 LSTC 公司，DYNA 程序走上了商业化发展历程，并更名为 LS-DYNA。后来公司陆续推出 930 版（1993 年）、936 版（1994 年）、940 版（1997 年）、950 版（1999 年）、960 版（2001 年）、970 版（2003 年）、971 版（2009 年）。可以看出，LS-DYNA 软件版本升级速度一直很快。

从升级内容上来看，LS-DYNA 软件的表现同样可圈可点。1988 年增加了汽车安全性分析、薄板冲压成型过程模拟以及流体与固体耦合（ALE 和欧拉算法）等新功能，使得 DYNA 程序在国防和民用领域的应用范围扩大，并建立了完备的质量保证体系。1997 年 LSTC 公司将 LS-DYNA2D、LS-DYNA3D、LS-TOPAZ2D、LS-TOPAZ3D 等程序合并为一个软件包——LS-DYNA（940 版），而由于 LS-DYNA 计算功能强大，世界上 10 余家著名数值模拟软件公司（如 ANSYS、MSC.Software、ETA 等）纷纷与 LSTC 公司合作，极大地加强了 LS-DYNA 的前后处理能力和通用性。2001 年 5 月，在 950 版的基础上，LSTC 公司推出了 960 版，增加了不可压缩流体求解程序模块，并增加了一些新的材料模型和新的接触计算功能。2003 年 3 月正式发布 970 版，对 LS-DYNA 的通用后处理器 LS-POST 增加了部分前处理功能，并发布了 LS-PREPOST 1.0 版。

LS-DYNA 程序 970 版是功能齐全的几何非线性（大位移、大转动和大应变）、材料非线性（140 多种材料动态模型）和接触非线性（50 多种接触模式）程序，以 Lagrange 算法为主，兼有 ALE 和 Euler 算法；以显式求解为主，兼有隐式求解功能；以结构分析为主，兼有热分析、流体结构耦合功能；以非线性动力分析为主，兼有静力分析功能（如动力分析前的预应力计算和薄板冲压成型后的回弹计算），是军用和民用相结合的通用结构分析非线性有限元程序。

目前 LS-DYNA 软件最新版本为 2013 年发布的 R7 版本，该版本主要增加了三个新的求解算法：电磁求解（EM）、可压缩流体求解（CESE）以及不可压缩流体求解（ICFD）。2015 年 1 月，ARUP 公司在英国 LS-DYNA 用户会议上宣布 R8 版本将在 2015 年择日发布。

LS-DYNA 源程序曾在北约的局域网 Pubic Domain 上公开发行, 因此广泛传播到世界各地的研究机构和大学。从理论上和算法上而言, LS-DYNA 是目前所有的显式求解程序的鼻祖和开发基础。

2. LS-DYNA 软件应用范围

自创立以来, 由于 LS-DYNA 程序具有强大的数值模拟功能, 受到了美国能源部的大力资助, 一直是非线性动力分析的核心软件, 在民用领域和国防领域有广泛的应用 (典型应用参见图 1.3)。

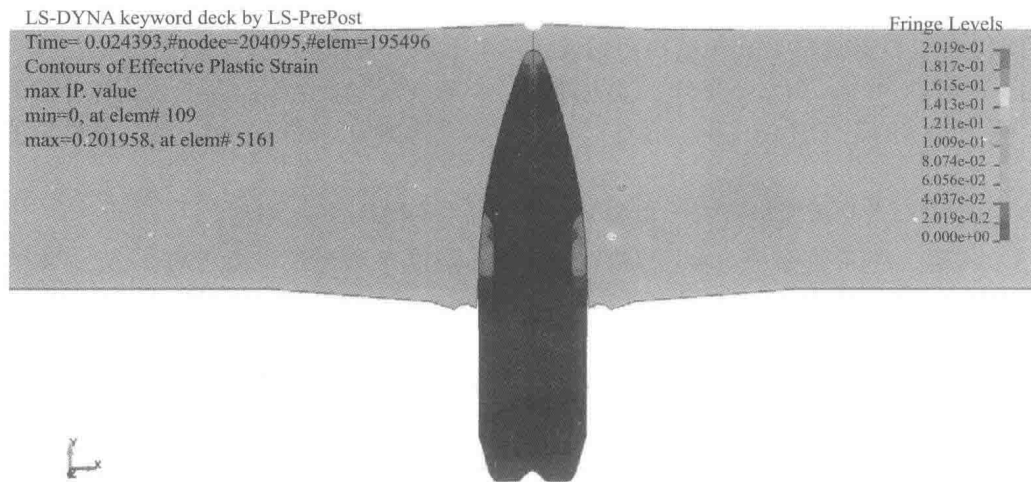


图 1.3 LS-DYNA 软件模拟穿甲弹侵彻靶板过程 (见彩插)

民用领域: 汽车、飞机、火车、轮船等运输工具的碰撞分析; 金属成型 (滚压、挤压、铸造、锻压、挤拉、超塑成型、薄板冲压、深拉伸等); 金属切割; 汽车零部件的机械制造; 塑料成型; 生物医学和工程; 地震工程; 混凝土结构、公路桥梁设计; 消费品、建筑物、乘员、高速结构等的安全性分析; 流体-结构相互作用; 运输容器设计; 爆破工程的设计分析; 电子产品跌落分析、包装设计、热分析、电子封装; 石油工业中的管道设计、爆炸切割、事故模拟、海上平台设计等。

国防领域: 战斗部结构设计分析; 内弹道发射对结构的动力响应分析; 终点弹道的爆炸驱动和破坏效应分析; 侵彻过程与爆炸成坑模拟分析; 军用设备和结构设施受碰撞和爆炸冲击加载的结构动力分析; 介质 (包括空气、水和地质材料等) 中爆炸及爆炸作用对结构作用的全过程模拟分析; 军用新材料 (包括炸药、复合材料、特种金属等) 的研制和动力特性分析; 超高速碰撞模拟分析。

1.3.3 MSC. Dytran 软件

1. MSC. Dytran 软件发展历史及特点

MSC. Dytran 软件由 MSC. Software 公司主持研发。1988 年, MSC. Software 公司在结构瞬态动力响应软件 DYNA3D 框架下开发了 MSC. DYNA。1991 年, MSC. Software 公司收购了荷兰 PICES International 公司的著名流体动力学和流固耦合仿真软件 PICES。此后, 利用两年的时间将二者充分融合, 于 1993 年发布了 MSC. Dytran 软件的第一个商业版本。MSC.

Dytran 软件集 MSC. DYNA 和 MSC. PICES3D 之大成, 拉格朗日算法和欧拉算法优势互补, 成为第一个能够模拟复杂流固耦合问题, 集高度非线性、流固耦合、瞬态动力响应仿真于一体的大型商用软件。2003 年 MSC. Software 公司与 LSTC 公司达成全面合作协议, 将 LS-DYNA 当时最新版本程序完全集成入 MSC. Dytran, 将最强的拉格朗日技术和最强的欧拉技术相结合, 为用户提供功能强大的显式积分非线性瞬态动力学仿真软件。目前 MSC. Dytran 软件的最新版本是 2013 年发布的 Dytran 2013 版, 该版本增加了冲击波载荷从一维/二维到三维的映射功能, 实现了不同点火时间的多起爆点设置。

2. MSC. Dytran 软件应用范围

目前 MSC. Dytran 软件典型的应用领域包括以下几个方面:

(1) 爆炸与冲击, 如水下爆炸、地下爆炸、容器中爆炸对结构的影响及破坏分析, 爆炸成型、爆炸容器的设计优化分析, 爆炸对建筑物等设施结构的破坏分析, 战斗部结构的设计分析;

(2) 水下/空中弹体发射过程, 机弹相容性, 火炮制推器动态模拟;

(3) 高速、超高速穿甲, 如飞弹打击或穿透靶体 (单个或复合靶体) 及侵彻过程等问题;

(4) 结构的强度分析, 如汽车、飞机、火车、轮船等运输工具的碰撞分析, 船体搁浅、飞机着陆、飞机水面迫降、鸟体撞击飞机结构、航空发动机包容性、汽车轮胎受冲击、饮料瓶罐受载分析等;

(5) 金属弹、塑性大变形成型, 如钣金冲压成型、三维锻造成型等;

(6) 跌落过程仿真;

(7) 流体动力分析, 如液体、气体的流动分析, 储液容器晃动分析;

(8) 安全防护分析, 如安全头盔设计, 安全气囊膨胀分析等;

(9) 高速列车行驶的轮、轨动力学, 高速列车穿隧道的冲击波响应, 车辆过桥的动态响应。

图 1.4 所示为应用 MSC. Dytran 软件计算人体与安全气囊作用过程图。

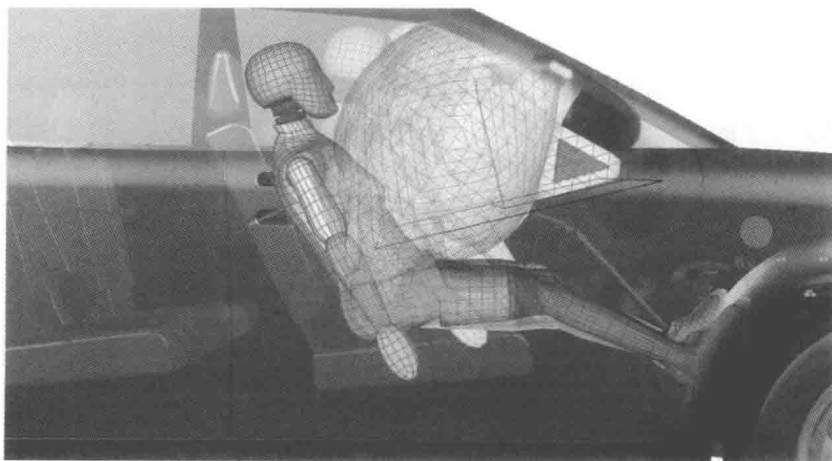


图 1.4 MSC. Dytran 软件计算人体与安全气囊作用过程图 (见彩插)

由于 MSC. Dytran 本身是一个混合物,在继承了 LS-DYNA3D 与 PICES 的优点的同时,也继承了不足。首先,材料模型不丰富,对于岩土类材料处理较差,虽然提供了用户材料模型接口,但由于程序本身的缺陷,难以将反映材料特性的模型加上去;其次,没有二维计算功能,轴对称问题也只能按三维问题处理,使计算量大幅度增加;再次,在处理冲击问题的接触算法上远不如当前版的 LS-DYNA3D 全面。

1.3.4 PAM-CRASH 软件

1. PAM-CRASH 软件发展历史及特点

PAM-CRASH 软件是 ESI 集团研发的碰撞模拟分析软件。1978 年,ESI 集团首先在德国工程师协会上展示了军用战斗机事故的数值模拟方法,进而德国汽车制造商开始利用并进一步研发这项技术,实现汽车碰撞实验的模拟。PAM-CRASH 软件就是在此基础上发展而来的。2007 年,ESI 集团发布了 PAM-CRASH 2G 版本,此版本在虚拟碰撞环境、产品集成、模拟精确度等方面均有了显著提高。

PAM-CRASH 软件是一款基于显示有限元算法的计算机三维碰撞冲击模拟系统,能够在大位移、大旋转、大应变、接触碰撞等问题进行十分精确的模拟(图 1.5)。软件主要有以下显著特点:



图 1.5 PAM-CRASH 软件模拟汽车碰撞过程(见彩插)

- (1) 能够简便地处理异常复杂的边界约束;
- (2) 支持多 CPU 并行计算(DMP 和 SMP),运算效率高;
- (3) 三维图形显示属性灵活控制,色彩多样逼真;
- (4) 灵活控制计算的时间步长;
- (5) 动态分配内存,无须用户设置;
- (6) 自动消除初始穿透;
- (7) 灵活搜寻接触区间;
- (8) 可设定材料的断裂失效条件;
- (9) 简便地定义焊点、铆钉等约束及其断裂条件;
- (10) 可设置阻尼以加快求解弹性接触时的收敛;
- (11) 针对汽车碰撞特设指标整形、输出、比较模块;
- (12) 针对大变形材料可采用特有的 Adaptive Mesh、Frozen Matric、Non-linear Contact