

AUTODYN GONGCHENG DONGLI FENXI JI
YINGYONG SHILI

AUTODYN

工程动力分析及

应用实例

石少卿 汪 敏 孙 波 方祥位 刘颖芳 编著

中国建筑工业出版社

AUTODYN 工程动力分析及应用实例

石少卿 汪 敏 孙 波 方祥位 刘颖芳 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

AUTODYN 工程动力分析及应用实例/石少卿等编
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-112-13800-5

I. ①A… II. ①石… III. ①有限元分析-应用软件,
Autodyn IV. ①0241. 82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 264810 号

全书共分 10 章, 主要介绍了 Autodyn 发展概况, Autodyn 的功能特点、界面菜单以及工程动力分析的基本过程, 并对拉格朗日算法、欧拉 2D Multi-material 算法、ALE 算法、欧拉 3D Multi-material 算法、SPH 算法等作了较为系统的介绍, 重点是详细给出了 AUTODYN 在工程中的多个应用实例, 算例步骤简明扼要, 可操作性强, 可供读者学习与参考应用。

本书可以作为理工科院校本科高年级学生和研究生学习 AUTODYN 的教材或参考书, 也可以作为相关行业工程技术人员的工程设计的参考手册。

* * *

责任编辑: 王 梅
责任设计: 张 虹
责任校对: 张 颖 陈晶晶

AUTODYN 工程动力分析及应用实例

石少卿 汪 敏 孙 波 方祥位 刘颖芳 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 227 千字
2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月第一次印刷

定价: 26.00 元

ISBN 978-7-112-13800-5

(21583)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

AUTODYN 是一个显式有限元分析程序，用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题，它提供了金属、陶瓷、水泥、岩土、炸药、水、空气以及其他固体、流体和气体等丰富的材料模型和数据，目前已成为世界范围各研究机构进行结构动力学、快速流体流动以及爆炸和冲击波响应分析的重要研究平台。

全书共分 10 章，主要介绍了 AUTODYN 发展概况、AUTODYN 的功能特点、界面菜单以及工程动力分析的基本过程，并对拉格朗日算法、欧拉 2D Multi-material 算法、ALE 算法、欧拉 3D Multi-material 算法、SPH 算法等作了较为系统的介绍，重点是详细给出了 AUTODYN 在工程中的多个应用实例，包括长方体柱撞击刚性墙、边坡在炸药作用下的爆炸粒子分析、钢弹丸水平冲击带铝板内衬的陶瓷装甲、爆炸冲击波对壳体作用、空气中爆炸波传播规律、落石冲击柔性防护网以及利用废旧轮胎降低落石冲击等应用实例，算例步骤简明扼要，可操作性强，可供读者学习与参考应用。

本书可以作为理工院校本科高年级学生和研究生学习 AUTODYN 的教材或参考书，也可以作为相关行业工程技术人员的工程设计的参考手册。

本书得到了国家科技支撑计划课题 2012BAK05B02、重庆市自然科学基金重点项目 cstc2012jjB30001、总后勤部课题 BY208J045 项目、重庆市研究生教育优质课程项目以及火灾、爆炸安全防护重庆市重点实验室的资助。

目 录

第 1 章 AUTODYN 软件的基本特点	1
1.1 AUTODYN 软件简介.....	1
1.2 AUTODYN 软件的功能特点.....	2
1.3 AUTODYN 软件在多行业的应用简介.....	4
第 2 章 AUTODYN 软件工程动力分析的基本过程	8
2.1 AUTODYN 的基本原理.....	8
2.2 AUTODYN 的重要特性及功能特点.....	8
2.3 AUTODYN 界面菜单.....	9
2.4 AUTODYN 一般问题的分析步骤	10
第 3 章 AUTODYN 软件的算法简介	16
3.1 拉格朗日方法.....	16
3.2 欧拉方法.....	16
3.3 ALE 方法	17
3.4 SPH 方法	18
3.5 多物质流固耦合方法.....	18
第 4 章 长方体柱撞击刚性墙的 AUTODYN 实现	20
4.1 问题描述及建模分析.....	20
4.2 AUTODYN 建模分析过程	20
4.2.1 拉格朗日方法建模分析过程.....	20
4.2.2 欧拉方法的建模分析过程.....	27
4.2.3 ALE 方法建模分析过程	31
4.2.4 三种计算方法的结果输出.....	31
4.3 本章小结.....	37
第 5 章 爆炸粒子飞散过程模拟	38
5.1 爆炸粒子飞散过程问题描述.....	38
5.2 模型分析及算法选择.....	39
5.2.1 模型分析.....	39
5.2.2 算法选择.....	40
5.3 AUTODYN 建模分析过程	40
5.4 本章小结.....	51
第 6 章 钢弹丸水平冲击带铝板内衬的陶瓷装甲	53
6.1 钢弹丸水平冲击带铝板内衬的陶瓷装甲.....	53
6.2 算法选择.....	54

6.3	AUTODYN 建模分析过程	54
6.4	本章小结	69
第 7 章	爆炸冲击波对壳体作用分析	70
7.1	爆炸冲击波对壳体作用问题描述	70
7.2	模型分析及算法选择	70
7.2.1	模型分析	70
7.2.2	算法选择	70
7.3	AUTODYN 建模分析过程	71
7.4	本章小结	81
第 8 章	空气中爆炸冲击波传播规律的数值分析	82
8.1	空气中爆炸冲击波传播规律的问题描述	82
8.2	模型分析及算法选择	83
8.3	AUTODYN 建模分析过程	84
8.4	本章小结	92
第 9 章	落石冲击环形网的 AUTODYN 和 LS-DYNA 分析	93
9.1	落石冲击环形网问题描述	93
9.2	模型分析	94
9.3	ANSYS 前处理模块建模过程	95
9.4	LS-DYNA 软件和 AUTODYN 软件的对比分析	107
9.4.1	LS-DYNA 软件的计算过程	107
9.4.2	AUTODYN 软件的计算过程	108
9.4.3	AUTODYN 和 LS-DYNA 软件计算结果的输出及特点	111
9.5	本章小结	114
第 10 章	利用废旧轮胎降低落石冲击的数值模拟	115
10.1	废旧轮胎降低落石冲击的问题描述	115
10.2	模型的建立	116
10.2.1	废旧轮胎受落石冲击的有限元分析简介	116
10.2.2	材料特性分析	117
10.2.3	几何模型的简化及建立思路	118
10.3	ANSYS 前处理模块中模型的建立	120
10.4	AUTODYN 软件计算过程	134
10.5	本章小结	140

第1章 AUTODYN 软件的基本特点

1.1 AUTODYN 软件简介

AUTODYN 是 ANSYS 子公司 Century Dynamics 公司研发的软件产品，是一个显式有限元分析程序，用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题。它提供了很多高级功能，在多个行业尤其是在国际军工行业占据 80% 以上的市场。经过不断的发展和行业应用，AUTODYN 已经具有完整、独特的分析能力，主要包括以下功能：有限元，用于计算结构动力学；有限体积运算器，用于快速瞬态计算流体动力学（CFD）；无网格/粒子方法，用于大变形和碎裂（SPH）；多求解器耦合，用于多种物理现象耦合情况下的求解等。此外，AUTODYN 软件还具有丰富的材料模型，同时包括本构模型和热力学状态方程，可提供金属、陶瓷、玻璃、水泥、岩土、炸药、水、空气以及其他固体、流体和气体的材料模型和数据。目前，AUTODYN 软件已经被集成到 ANSYS12.0 软件中，可以利用 ANSYS12.0 中的功能软件进行前后处理的相关操作，极大地方便了 AUTODYN 的应用，拓展了 AUTODYN 软件的应用前景，图 1.1 为 AUTODYN 软件界面。

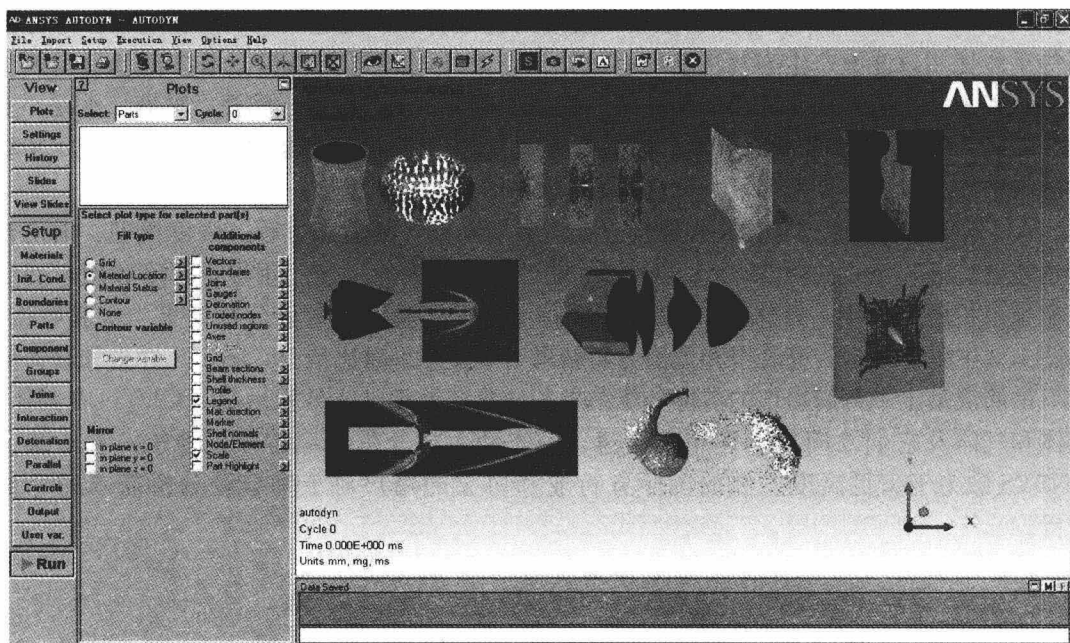


图 1.1 AUTODYN 软件的界面特点

1.2 AUTODYN 软件的功能特点

AUTODYN 有别于一般的显式有限元或者计算流体动力学软件。从一开始,就致力于用集成的方式自然而有效地解决流体和结构的非线性行为,这种方法的核心在于把复杂的材料模型与流体结构程序的无缝结合。在性能方面,AUTODYN 软件的新一代有限元求解器允许在更短的运行时间内求解更大型模型,并且能更好地与其他有限元求解器和 CAE 软件结合,从而大大提高 AUTODYN 的灵活性,此外对振动和爆炸的应用案例求解提供了更高的精确度。

为了满足用户希望在更短的时间内解决更复杂的仿真问题的迫切需求,新版本的 AUTODYN 在 64 位 Linux 平台支持以及基层数据结构方面作了重点开发。它提供了两倍以上于旧版本的解决大型仿真问题的能力,同时也在新材料模拟及前后处理能力方面有了很大进步。目前的 AUTODYN 软件的主要特色功能有:

- 流体、结构的耦合响应分析;
- 拥有 FE、CFD 和 SPH 等多个求解器,并且 FE 可以和其他的求解器耦合;
- 高度可视化的交互式 GUI 界面;
- 求解器与前、后处理器的无缝集成;
- 完善的材料数据库,同时包含有热力学和本构响应;
- 在共享内存和分布式内存系统上的并行和串行运算方式;
- 直观的用户界面;
- 对于大量实验现象的验证。

AUTODYN 软件具有便捷、务实和复杂的造型特点。通过映射、重新启动、部分激活等手段使用户能够产生高解析度的有效结果。此外,AUTODYN 具有广泛的材料模型库,可模拟几乎所有固体、液体和气体(例如:金属、复合材料、陶瓷、玻璃、水泥、土壤、炸药)。几乎所有的状态方程、强度和失效/损伤材料模型都集成到了 AUTODYN 软件的材料库中,图 1.2 显示了 AUTODYN 软件部分的材料模型。

AUTODYN 软件具有开放式架构。大多数的功能,如状态方程、强度模型、损伤模型均能够实现开放式的功能。AUTODYN 软件允许用户通过使用用户子程序和用户变量来实施可扩展的功能。另外,AUTODYN 提供可反复验证的数值分析结果与实验数据,如图 1.3 中弹体冲击陶瓷装甲和数值分析结果与试验结果对比情况,图 1.4 冲击和爆炸荷载下钢筋混凝土中钢筋损伤的数值分析结果和试验结果对比情况等。AUTODYN 在固体、液体和气体及它们之间耦合作用的高速、瞬态动力学分析领域占领领先地位,它持续了 ANSYS 致力于满足高度发展的国际各行业和协会的用户对于耦合场分析需求的一贯宗旨。

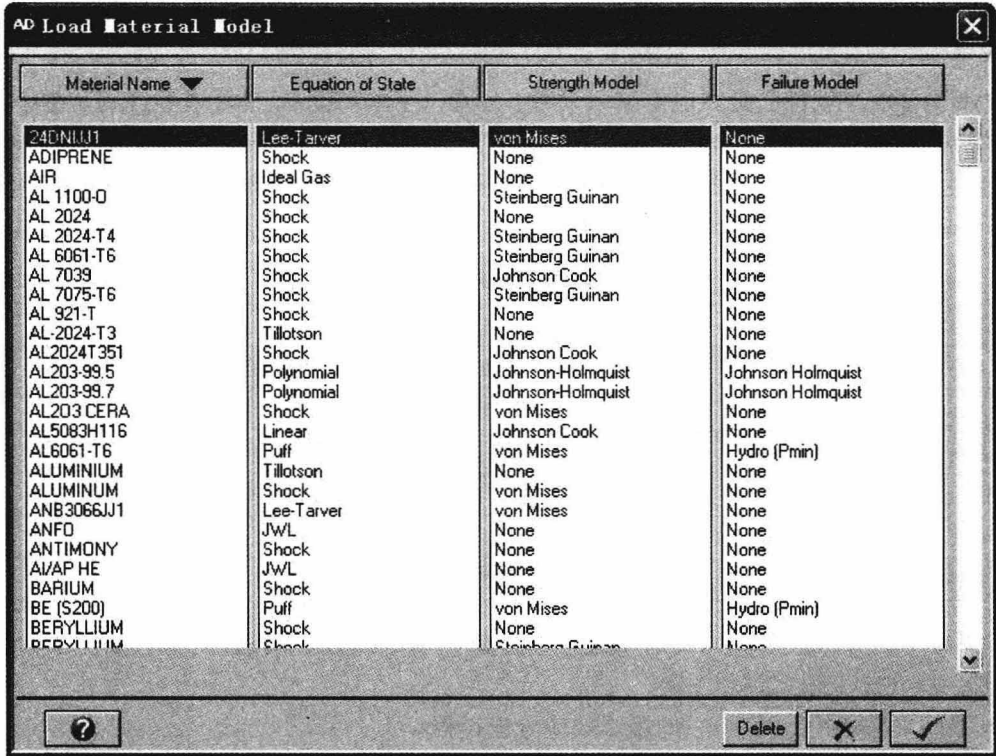


图 1.2 AUTODYN 软件部分的材料模型

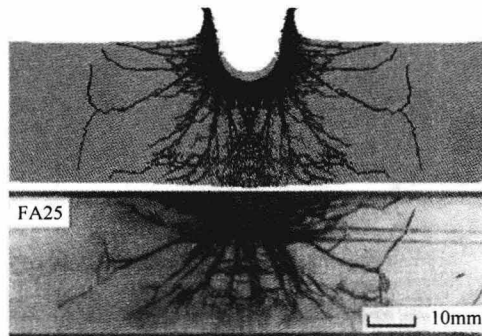


图 1.3 弹体冲击陶瓷装甲和数值分析结果（下面）与试验结果（上面）

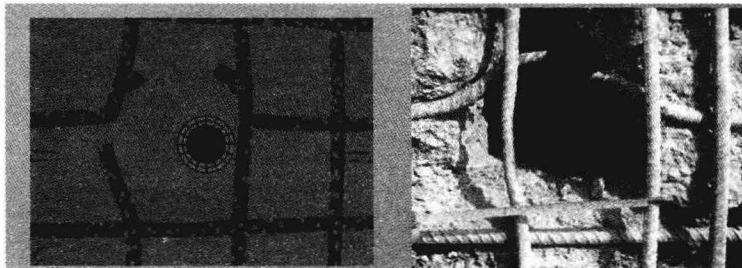


图 1.4 冲击和爆炸荷载下钢筋混凝土中钢筋损伤的数值结果（左）和试验结果（右）

1.3 AUTODYN 软件在多行业的应用简介

AUTODYN 软件已经在航空航天领域、军事工程领域、工业领域等得到了深入广泛的应用，解决了许多理论分析和试验不容易解决的问题，有力地促进了这些行业的技术发展，产生了深远的影响。表 1.1 中给出了 AUTODYN 软件在各种工程领域中的应用和涉及的一些具体行业性技术问题。

AUTODYN 显式动力分析的工程应用领域

表 1.1

工程应用领域	具体的行业问题
航空航天	飞机结构冲击动力学仿真分析、火箭级间分离模拟
土木工程领域	工程爆破拆除、混凝土结构分析
国防工业	侵彻动力学分析、战斗部结构分析、爆炸冲击效应分析
加工制造业	金属以及塑料的切割、冲压、挤压/拉伸成型过程的模拟
电子工业	电子产品的跌落测试分析
材料工程	新材料的研制和变形特性分析

AUTODYN 已经被应用在大量的工程中，分析高度非线性、高速冲击荷载作用等问题。以下是一些实际工程案例和图示。

- 图 1.5 给出了城市中心的爆炸效应分析过程

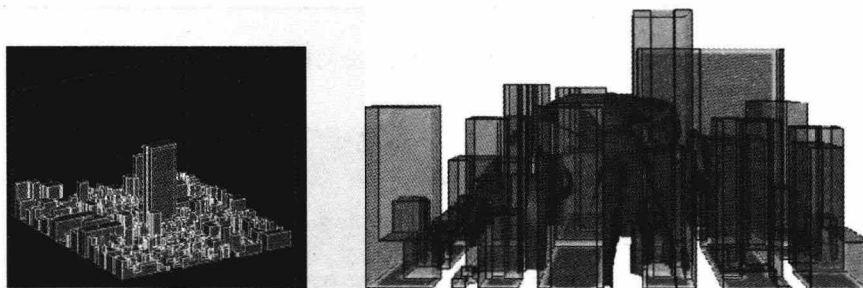


图 1.5 城市中心的爆炸效应分析过程

- 图 1.6 给出了爆炸冲击波对钢筋混凝土靶板的作用

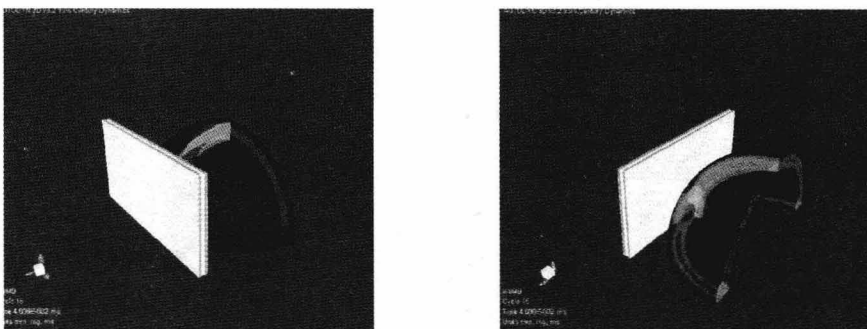


图 1.6 爆炸冲击波对钢筋混凝土靶板的作用

- 图 1.7 给出了水下爆炸对舰船的毁伤分析评估过程

- 图 1.8 给出了炮弹对钢筋混凝土结构侵彻时的裂缝扩展过程

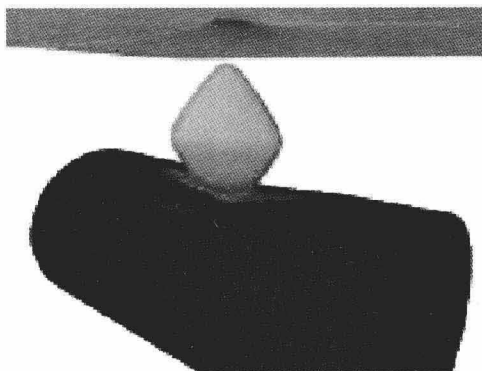


图 1.7 水下爆炸对舰船的毁伤分析评估过程

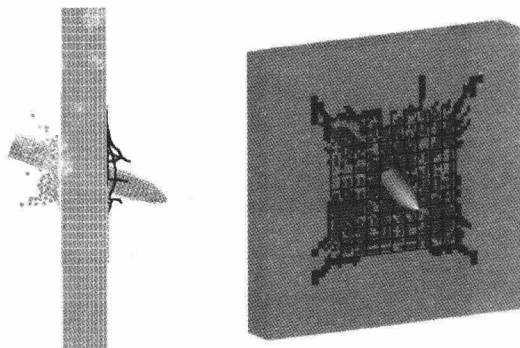


图 1.8 炮弹对钢筋混凝土结构侵彻时的裂缝扩展过程

- 图 1.9 和图 1.10 给出了爆炸荷载下砖墙以及框架结构的响应、破碎和倒塌过程

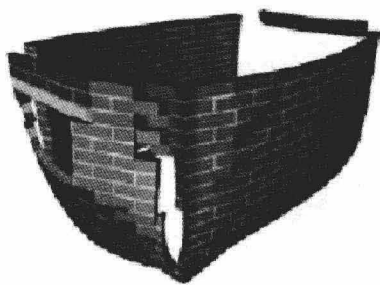
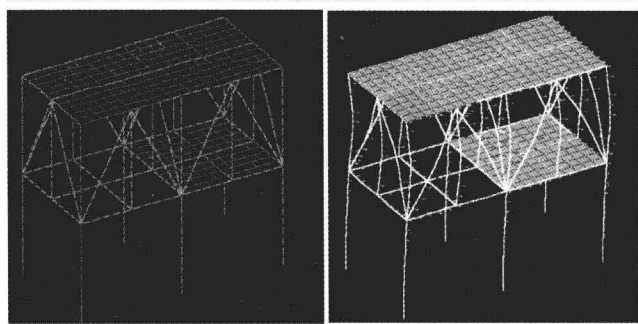


图 1.9 内部爆炸砖结构建筑的损伤和崩塌



AUTODYN Introductory Training Course

图 1.10 爆炸荷载下框架结构的响应和倒塌分析

- 图 1.11 给出了爆炸引发岩石破碎的过程图
- 图 1.12 给出了飞机撞击防撞墙的分析过程图

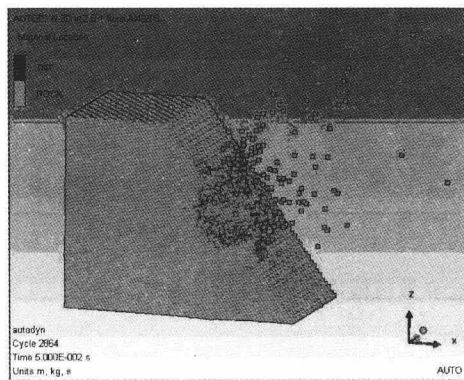


图 1.11 爆炸引发岩石破碎的过程图

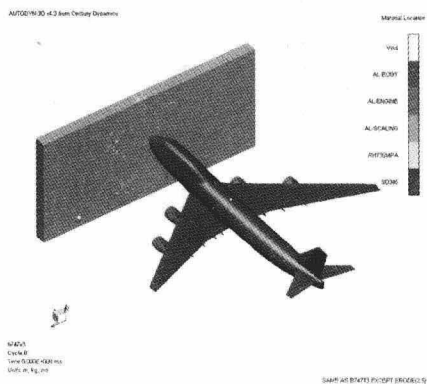


图 1.12 飞机撞击防撞墙的分析过程图

- 图 1.13 给出了对不同装甲结构的穿孔和装甲背后碎片的分析过程图

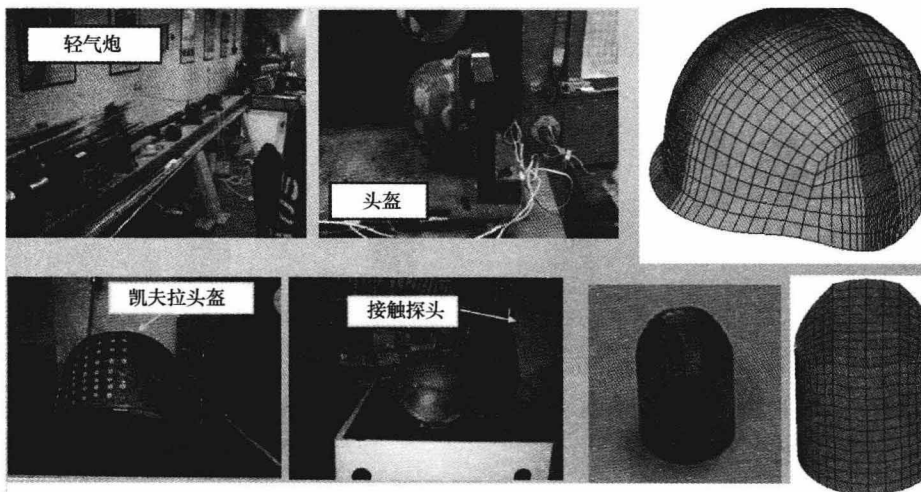


图 1.13 不同装甲结构的穿孔和装甲背后碎片的分析过程图

- 图 1.14 给出了炮弹穿甲过程的数值模拟过程图形

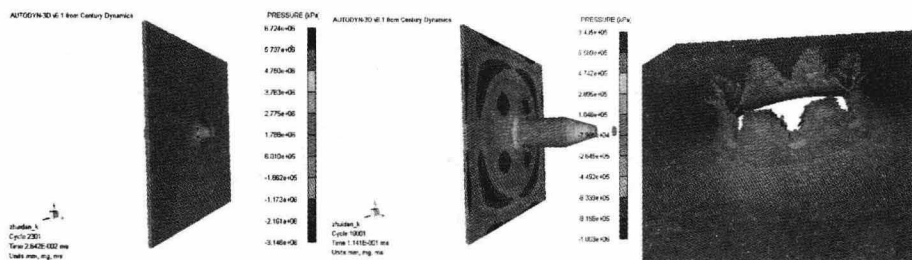


图 1.14 炮弹穿甲过程的数值模拟过程图形

- 图 1.15 给出了炮弹爆炸后破片的试验和数值模拟分析过程图

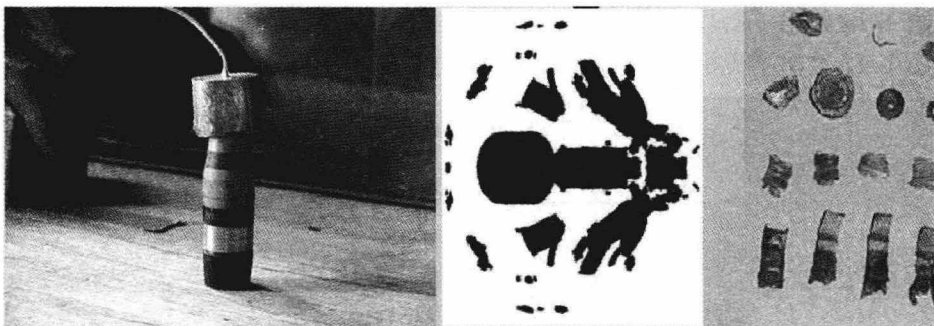


图 1.15 炮弹爆炸后破片的试验和数值模拟分析过程图

- 图 1.16 给出了鸟群对飞行器的撞击后破坏图

总体来说, AUTODYN 适合结构动力学、快速流体流动、材料模型、冲击以及爆炸和冲击波响应分析, 它是目前模拟结构在瞬态荷载作用过程中的变化规律和破坏形态最

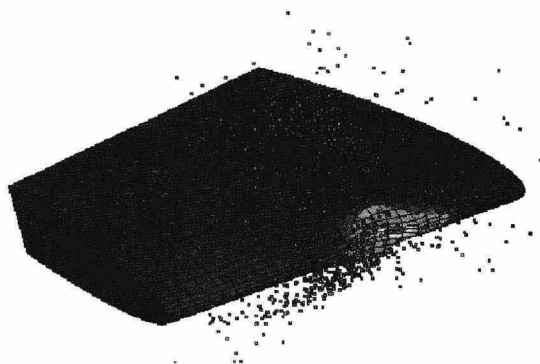


图 1.16 鸟群对飞行器的撞击后破坏图

好、最清晰的软件，已成为世界范围各研究机构广泛采用的分析平台，具有良好的应用前景。

第2章 AUTODYN 软件 工程动力分析的基本过程

2.1 AUTODYN 的基本原理

AUTODYN 软件是美国 Century Dynamics 公司开发的用于处理几何和材料大变形的非线性瞬态动力分析数值模拟软件。其前后处理和主解算器集成于一体，采用交互菜单操作。具有欧拉 (Euler)、拉格朗日 (Lagrange)、任意拉格朗日欧拉 (ALE) 和光滑粒子流体动力 (SPH) 等处理方法及混合处理方法。AUTODYN-2D/3D 软件集成了有限元、计算流体动力学 (CFD) 等多种处理技术，可模拟各类冲击响应、高速/超高速碰撞、爆炸及其作用问题。AUTODYN 软件计算的基本原理如下：

- 通过质量守恒、动量守恒、能量守恒、材料模型、模拟的物理模型的初始条件和边界条件建立连续介质运动方程；
- 在 AUTODYN 软件中，方程通过显式积分和不同的计算方法来实现求解过程；
- 对于不同的求解器，方程形式都是基本相同的，具体的求解过程根据求解器而定。

2.2 AUTODYN 的重要特性及功能特点

与其他的有限元软件相比较，AUTODYN 有限元软件有着自身的重要特性，主要表现在以下几个方面：

- 流体、结构的耦合响应
- 拥有拉格朗日 (Lagrange)、欧拉 (Euler)、任意拉格朗日欧拉 (ALE) 和光滑粒子流体动力 (SPH) 等多个求解器
- 除了流体和气体，其他有强度的材料（如金属）可以运用于所有的求解器
- 高度可视化的交互式 GUI 界面
- 求解器与前、后处理器的无缝集成
- 完善的材料数据库，同时包含有热力学和本构响应
- 在共享内存和分布式内存系统上的并行和串行运算方式
- 资深开发者的直接指导
- 直观的用户界面
- 对于大量实验现象的验证

AUTODYN 软件拥有多种材料模型和状态方程：

强度模型包括：弹性、黏塑性、应变硬化模型、应变率硬化模型、热软化模型、多孔压缩模型、混凝土/土壤、陶瓷/玻璃等；程序自带的状态方程包括线性方程、理想气体、炸药等；程序自带的失效模型包括：最大应力/应变、有效应力/应变、剪切损伤、正交各向异性损伤、Johnson Cook、正交各向异性应力/应变、裂纹软化、随机性模型等。此外，

程序还允许用户指定模型，同时所有的模型可在每一种求解器中使用，所有的模型都可以带侵蚀（单元死亡）使用。

AUTODYN 软件拥有多种分析技术：

主要包括：显式分析、瞬态动力学、条件稳定性、亚弹性、非线性、可压缩流体、动力松弛（用于准静态分析）、自动接触、自动流体-结构耦合等。

AUTODYN 软件拥有多种求解器类型：

主要包括：流体求解器、Lagrange 求解器、ALE 求解器、Euler 求解器、高精度单物质 Euler-FCT 求解器等，此外 AUTODYN 软件还可以实现单个求解器的独立运行和多求解器之间的耦合分析。

2.3 AUTODYN 界面菜单

AUTODYN 软件的整体界面如图 2.1 所示，分为下拉菜单、导航栏、工具栏、对话框、信息栏、状态栏、对话框和视图面板。

下拉菜单的使用范围较广，几乎能够覆盖 AUTODYN 软件的所有操作命令。主要包括 File、Import、Setup、Execution、View、Options、Help 七个类别的下拉菜单。为了对 AUTODYN 软件的下拉菜单有一个全面的了解，下面主要对 File、Import、Setup 这三个菜单的主要功能进行介绍。

File 下拉菜单主要包括 Open Results File、Save Project、Export to Version、Save settings、Load settings、Print、Export PostScript、Export VRML、Export Formatted、Import Formatted、Close AUTODYN 等选项。图 2.2 中给出了 File 下拉菜单各选项的说明。



图 2.2 File 下拉菜单各选项的说明

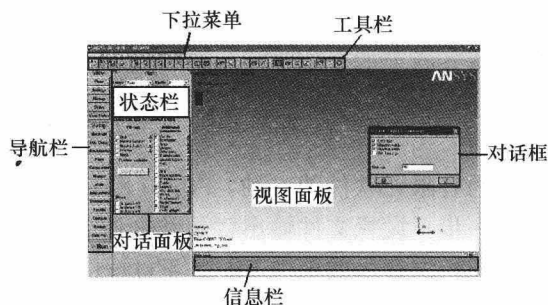


图 2.1 AUTODYN 的整体界面

Import 下拉菜单主要包括 from TrueGrid (.zon)、from ICEM-CFD (.geo)、from LS-DYNA (.k)、from MSC Nastran BDF (.dat)、Convert IJK Parts to Unstructured 五个选项。图 2.3 中给出了 Import 下拉菜单各选项的说明。

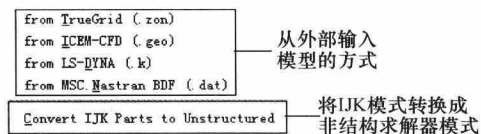


图 2.3 Import 下拉菜单各选项的说明

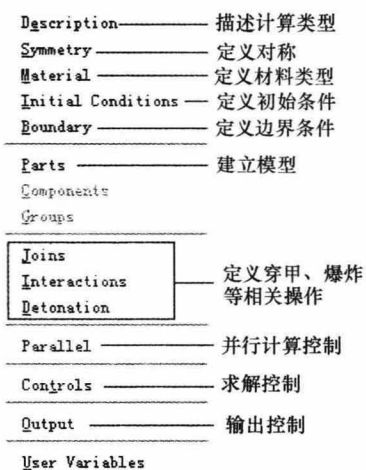


图 2.4 Setup 下拉菜单各选项的说明

者选择的具体选项；视图面板是具体的模型图形。关于导航栏、工具栏、对话面板、信息栏、状态栏、对话框和视图面板的相关操作及意义，将在后续各章节的介绍中逐步进行说明。

2.4 AUTODYN 一般问题的分析步骤

作为有限元软件的一种，AUTODYN 软件进行问题分析常按照以下的步骤进行操作：

第一步 设置文件输出目录和文件名

在开始求解之前单击 File> Export to Version> Version 5.0.01.c (或者 5.0.02b \ 6.0.01c \ 11.0.00a \ 12.0.01a)，弹出如图 2.5 所示对话框，分别设置文件输出目录和文件名。

第二步 设置工作名称、单位制

在下拉菜单上依次点击 Setup>Description，弹出如图 2.6 所示对话框，并按图设置工作名称和单位制。

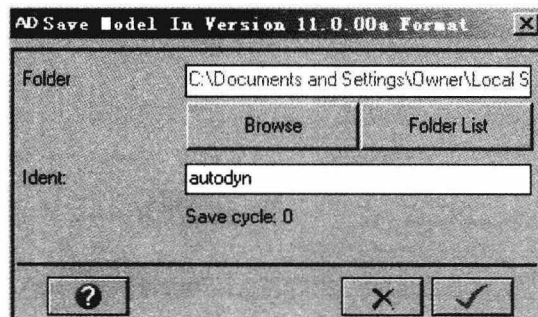


图 2.5 设置文件输出目录和文件名

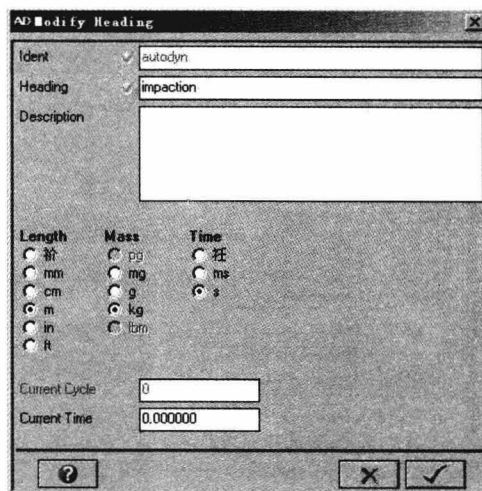


图 2.6 设置工作名称和单位制

第三步 设置模型的对称条件

在下拉菜单上依次点击 Setup>Symmetry, 弹出如图 2.7 所示对话框, 并按图设置模型的对称方式。

第四步 定义材料

单击导航栏中的 Materials 按钮，在对话面板中单击 New 按钮用户便可以自己定义材料参数，如图 2.8 所示。也可以对话面板中单击 Load 按钮，从 AUTODYN 软件的材料库中导入材料的参数，如图 2.9 所示。

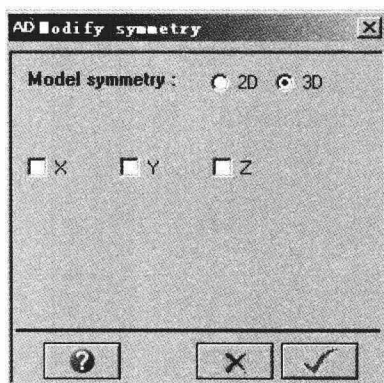


图 2.7 设置模型的对称方式

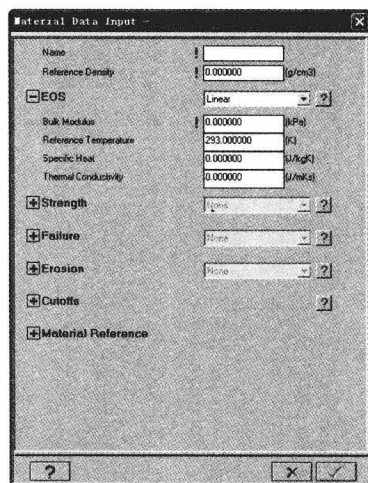


图 2.8 用户自定义材料参数

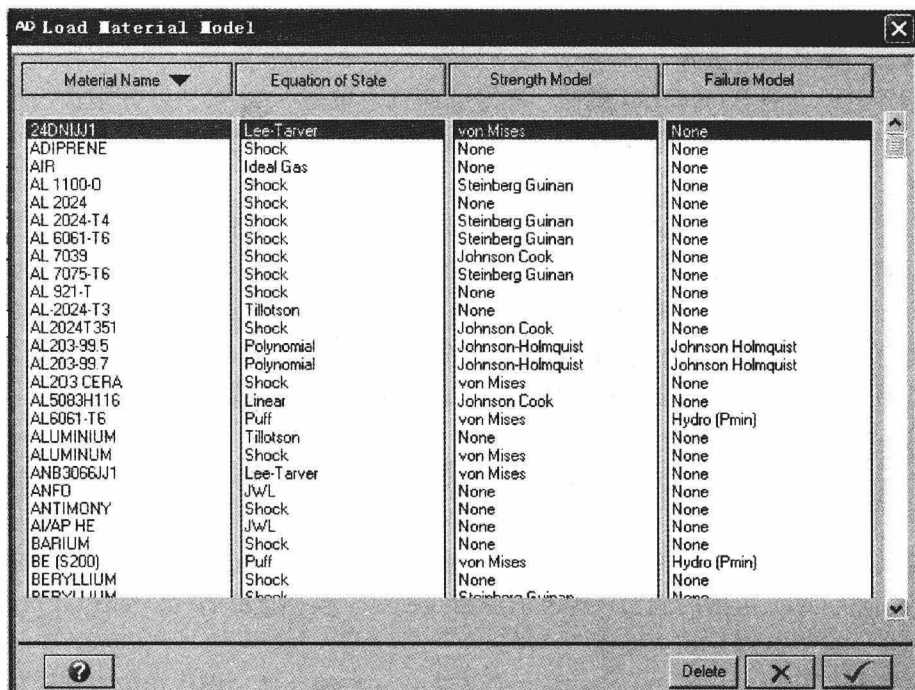


图 2.9 从 AUTODYN 软件中导入材料参数