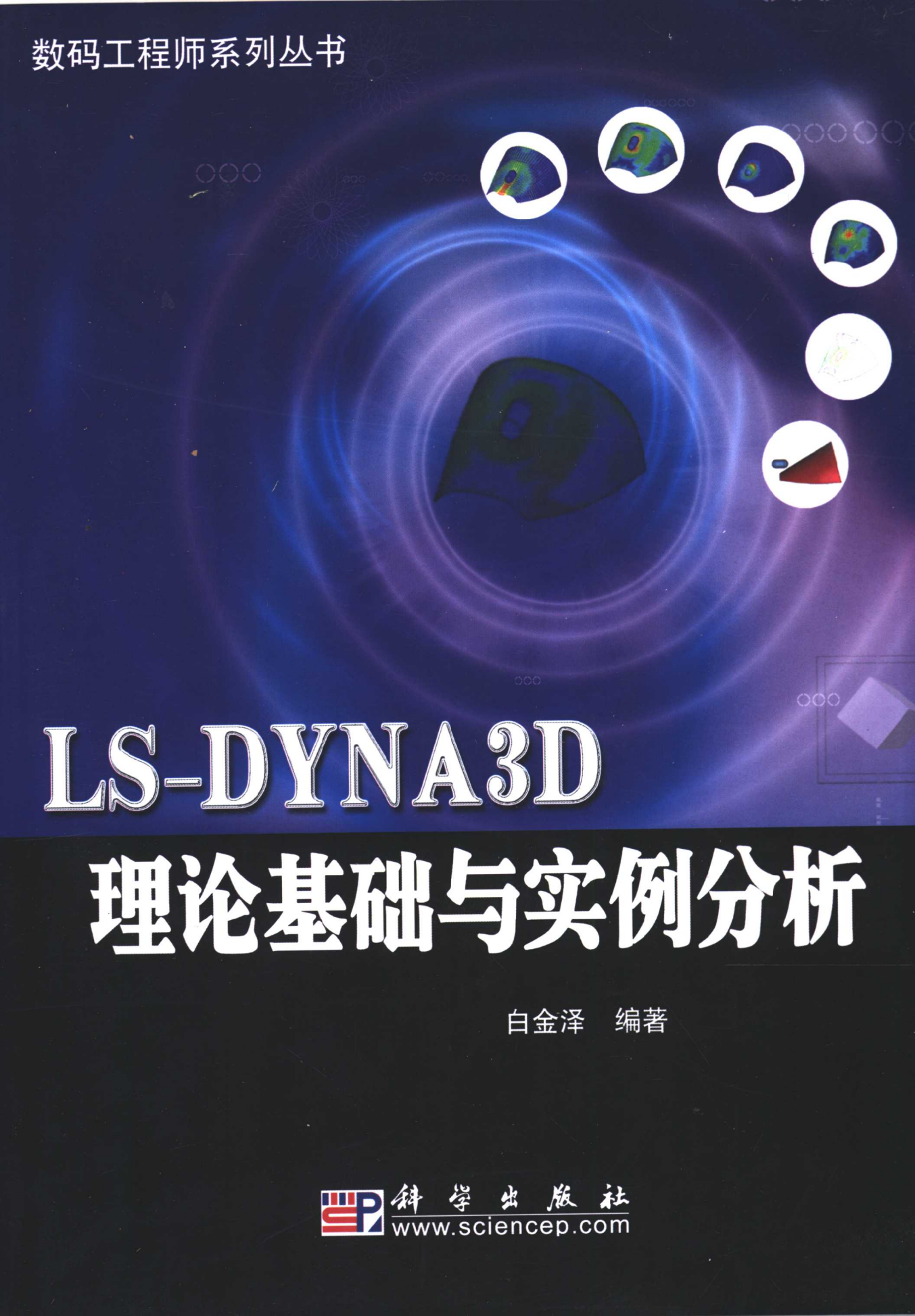


数码工程师系列丛书

The background of the cover features a large, central, glowing blue sphere with concentric rings, suggesting a dynamic simulation. Surrounding this central sphere are several smaller circular insets, each containing a different 3D simulation result, such as stress distributions, fluid flow, or structural deformations. The overall color scheme is dark blue and purple, with bright highlights from the simulation results.

LS-DYNA3D

理论基础与实例分析

白金泽 编著



科学出版社

www.sciencepress.com

数码工程师系列丛书

LS-DYNA3D

理论基础与实例分析

白金泽 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

LS-DYNA3D 软件是功能齐全的几何非线性、材料非线性以及摩擦和接触分离等界面状态非线性有限元数值计算程序,是军用和民用相结合的通用结构分析非线性有限元程序。

本书通过实例详细阐述了非线性力学理论、有限元离散方法及其在 LS-DYNA3D 软件中的具体实现;分析了软件操作步骤,系统讲解了有限元模拟过程以及相关注意事项;由浅入深地帮助读者理解分析非线性有限元的基本思想,积累实际操作经验,以便不断提高分析处理问题的能力。

本书可供汽车、航空航天、国防军工、岩土工程、土木工程、电子、石油、船舶以及建筑等行业的科技人员进行力学分析与产品开发使用,也可以作为大学本科与研究生学习非线性力学及有限元课程的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

LS-DYNA3D 理论基础与实例分析/白金泽编著. —北京:科学出版社, 2005

(数码工程师系列丛书)

ISBN 7-03-015250-6

I. L… II. 白… III. 有限元分析-应用程序, LS-DYNA 3D
IV. 0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 025064 号

责任编辑:吕建忠 陈砾川/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 5 月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—4 000 字数:347 000

定价:35.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

销售部电话 62136131 编辑部电话 62138978-8001(B101)

前 言

LS-DYNA3D 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)以及摩擦和接触分离等界面状态非线性有限元数值计算软件。它以 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、流固耦合功能;以非线性动力分析为主,兼有静力分析功能。凡是涉及接触—碰撞、爆炸、穿甲与侵彻、应力波传播、金属加工、流固耦合等问题,LS-DYNA3D 都可以进行求解。目前,该软件在全球拥有 1000 多家用户,遍布世界各国的研究机构、大学和工业部门,在航空航天、汽车、国防、石油、核工业、电子、船舶、建筑、体育器材等领域中均获得了广泛的应用。

本书共分为 10 章。第 1 章和第 2 章是全书最重要、最基础的两章。

第 1 章介绍了 LS-DYNA3D 的历史及与 ANSYS 软件的关系,同时,介绍了该软件能做哪些事情,这对于试图使用该软件解决本行业问题的工程师、研究人员有着重要的参考价值。

第 2 章是本书的入门章节。如果读者以前没有接触过非线性有限元软件,可以按照提示做完这样一个题目——弹性杆的撞击,同时对本题目进行反复研究。

第 3 章为理论基础,简要介绍了弹性静力学、弹性动力学、大变形理论、塑性与粘性材料、接触—碰撞问题的基本理论、数值计算方法(有限元离散)、求解过程与关键技术,以及上述内容在 LS-DYNA3D 中的具体应用形式(理论所对应的关键字)。非线性有限元理论的学习与掌握是软件操作者进阶的必经之路。

第 4 章介绍鸟撞飞机风挡模拟,通过全面考察有限元模型的单元类型、结构尺寸、材料本构、边界条件等内容,分析如何建立一个优秀可信的数值计算模型。

第 5 章介绍了爆炸的三种数值模拟方法。

第 6 章给出了三种用户材料子程序及其算例验证。用户材料子程序的使用扩展了软件的使用范围,使之能够适应科研与工程问题中更复杂的材料本构模拟。

第 7 章介绍了刚体—弹性体转换、刚性墙以及接触实体等功能。在大规模计算问题中使用刚体可以适当简化模型,加快计算速度。

第 8 章与第 9 章介绍了一些高级技术与高级应用,包括自适应网格划分、壳—体单元之间的连接、裂纹扩展的模拟、沙漏控制、侵彻分析、热力耦合分析、SPH 算法、隐式求解特征值分析、旋压加工等内容。

第 10 章全面介绍了后处理软件 LS-PREPOST 的功能、使用方法与使用技巧。

附书光盘中包含了书中全部的实例源代码(关键字文件)以及后处理动态结果(AVI 格式),还包含了第 10 章所有图的彩图。限于篇幅,书中有些问题没有详尽展开,读者可以阅读相关软件理论手册、用户手册与关键字手册,这些手册在 LSTC 的官方网站(www.lstc.com)上可以付费获得。

入门容易提高难，对于 LS-DYNA3D 的使用尤其如此。希望读者在阅读本书以及学习软件操作的过程中，重视力学与有限元程序设计理论，积累数值模拟经验，只有这样才能更快地实现从软件操作者到高级科技人员的转变。

中国科学院力学研究所梁乃刚研究员、丁桦研究员以及西北工业大学航空学院孙秦教授为本书的写作提供了条件；中国科学院力学研究所邢静忠博士给予作者极大鼓励；北京理工大学软件技术开发有限公司技术支持部经理闫军博士，ANSYS 公司中国成都办事处雷先华技术经理、高级应用工程师罗涛为本书提供了一定的技术支持；本书部分实例来源于中国仿真互动网站（www.simwe.com）以及众多软件爱好者在互联网上发表的文章；另外，广西工学院汽车系主任向宇教授审阅了本书部分书稿并提出了宝贵意见。特在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，本书难免存在不足之处，热忱地希望广大读者和同行专家提出批评和指正。

白金泽

2004 年 12 月

于中国科学院力学研究所

目 录

第 1 章 LS-DYNA3D 简介	1
1.1 LS-DYNA3D 发展历程	1
1.2 LS-DYNA3D 能做哪些事情	1
1.3 LS-DYNA3D 的基本概念	4
1.3.1 标识 (ID 编号)	4
1.3.2 坐标系统	6
1.3.3 单位制	7
1.3.4 力与压力	7
1.3.5 用户定义后处理输出文件	7
1.4 ANSYS 与 LS-DYNA3D 的关系	9
第 2 章 弹性杆的撞击	12
2.1 概述	12
2.2 ANSYS 建模过程	12
2.3 ANSYS 源程序分析	14
2.4 LS-DYNA3D 计算输入文件分析	16
2.5 求解	23
2.5.1 求解时间的决定因素	25
2.5.2 求解中途退出的原因	25
2.6 计算结果后处理	26
2.7 总结	28
第 3 章 LS-DYNA3D 理论基础	30
3.1 概述	30
3.2 弹性静力学基本方程与数值计算方法	30
3.2.1 弹性静力学基本假设与基本方程	30
3.2.2 弹性静力学数值计算方法	31
3.2.3 弹性静力学有限元基本解法与求解过程	32
3.3 弹性动力学基本方程与数值计算方法	32
3.3.1 弹性小变形动力学基本方程	32
3.3.2 弹性动力学数值计算方法 (基于 Hamilton 变分原理)	33
3.3.3 弹性动力学有限元基本解法与求解过程	34
3.3.4 时间步长控制	37
3.4 大变形动力学基本方程与数值计算方法	37
3.4.1 大变形基本理论	38
3.4.2 大变形动力学数值计算方法	41

3.4.3	大变形动力学有限元基本解法与求解过程	44
3.4.4	大变形动力学有限元求解中的关键技术	45
3.5	材料非线性理论及其数值计算方法	47
3.5.1	塑性材料基本理论	47
3.5.2	粘弹性材料基本理论	48
3.6	接触—碰撞的数值计算方法	50
3.6.1	接触—碰撞的数值计算方法	51
3.6.2	接触—碰撞算法的有限元实现	52
3.6.3	接触类型	55
3.6.4	接触中的初始穿透	56
3.6.5	接触分析注意事项	56
3.7	鸟撞飞机风挡控制方程与数值计算方法	57
3.7.1	鸟撞飞机风挡问题基本控制方程	57
3.7.2	有限元离散后的运动微分方程	58
3.7.3	求解过程	58
3.8	总结	59
第4章	鸟撞飞机风挡	60
4.1	概述	60
4.2	ANSYS 源程序分析	61
4.3	LS-DYNA3D 关键字文件分析	63
4.4	求解与后处理	67
4.5	总结	69
4.5.1	鸟体单元类型的选择	69
4.5.2	风挡单元类型的选择	71
4.5.3	边界条件	72
4.5.4	思考	73
第5章	爆炸模拟	74
5.1	概述	74
5.2	方法1: 共用节点算法模拟爆炸	74
5.2.1	ANSYS 源程序分析	75
5.2.2	LS-DYNA3D 关键字文件分析	78
5.2.3	小结	83
5.3	方法2: 接触耦合算法模拟爆炸	83
5.3.1	ANSYS 源程序分析	84
5.3.2	LS-DYNA3D 关键字文件分析	87
5.3.3	小结	88
5.4	方法3: 流固耦合算法模拟爆炸	89
5.4.1	ANSYS 源程序分析	89
5.4.2	LS-DYNA3D 关键字文件分析	94

5.4.3	小结	99
5.5	不同方法计算结果对比	100
5.6	几种被爆炸物本构模型	101
5.6.1	弹性与塑性动力学模型	101
5.6.2	H-J-C 模型	102
5.6.3	弹性损伤模型	103
5.6.4	其他模型	103
第 6 章	用户材料子程序	104
6.1	概述	104
6.2	子程序的输入与输出变量	104
6.3	计算输入文件关键字定义	106
6.4	有限单元的破坏	106
6.5	用户材料实例 1: 各向同性线弹性材料	107
6.5.1	模型理论及其 UMAT	107
6.5.2	实例验证	109
6.6	用户材料实例 2: 各向同性强化双线性弹塑性材料	115
6.6.1	模型理论及其 UMAT	115
6.6.2	实例验证	117
6.7	用户材料实例 3: 带失效模式的概率型材料本构	118
6.7.1	模型理论及其 UMAT	118
6.7.2	实例验证	123
6.8	总结	124
第 7 章	刚体与刚性墙	125
7.1	概述	125
7.2	刚体—弹性体转换	125
7.2.1	重启动方法	126
7.2.2	自动转换方法	132
7.2.3	小结	133
7.3	刚性墙	134
7.3.1	平板刚性墙压缩方形管	134
7.3.2	块体撞击固定刚性墙	139
7.3.3	球撞击平板	140
7.3.4	小结	144
7.4	接触实体	144
7.5	总结	148
第 8 章	高级应用 (一)	150
8.1	概述	150
8.2	自适应网格划分	150
8.3	壳单元与体单元之间的连接	155

8.4	裂纹扩展模拟	160
8.5	沙漏控制	167
第 9 章	高级应用 (二)	175
9.1	概述	175
9.2	侵彻分析	175
9.3	热力耦合分析	180
9.4	SPH 方法	185
9.5	隐式求解特征值分析	192
9.6	旋压分析	197
第 10 章	后置处理软件 LS-PREPOST	204
10.1	LS-PREPOST 简介	204
10.2	下拉菜单	205
10.3	图形显示区及鼠标操作	206
10.3.1	图形显示区	206
10.3.2	鼠标操作说明	207
10.4	图形控制区	207
10.5	命令输入区与操作历史文本框	209
10.6	主菜单	210
10.6.1	Fcomp 功能按钮	211
10.6.2	Ident 功能按钮	212
10.6.3	History 功能按钮	212
10.6.4	PlotWindow 窗口中的功能按钮	213
10.6.5	Follow 功能按钮	215
10.6.6	Splitw 功能按钮	216
10.6.7	Explod 功能按钮	217
10.6.8	Output 功能按钮	217
10.6.9	Trace 功能按钮	218
10.6.10	Xyplot 功能按钮	219
10.6.11	Anno 功能按钮	220
10.6.12	Light 功能按钮	220
10.6.13	Splane 功能按钮	220
10.6.14	Setting 功能按钮	222
10.6.15	State 功能按钮	223
10.6.16	Range 功能按钮	223
10.6.17	Vector 功能按钮	224
10.6.18	Measure 功能按钮	224
10.6.19	Find 功能按钮	226
10.6.20	ASCII 功能按钮	226
10.6.21	Views 功能按钮	228

10.6.22	Appear 功能按钮	228
10.6.23	Color 功能按钮	228
10.6.24	Model 功能按钮	229
10.6.25	Blank 功能按钮	229
10.6.26	SelPar 功能按钮	231
参考文献		233
后记		234

第 1 章 LS-DYNA3D 简介

1.1 LS-DYNA3D 发展历程

1976 年, 美国 Lawrence Livermore National Laboratory 的 John Hallquist 发布了最早的 DYNA 软件。该软件在显式有限元发展过程中具有里程碑式的意义, 在推出后不久, 即在全世界的大学、政府与工业实验室中传播开来。20 世纪 80 年代, DYNA 软件首先被法国 ESI 公司商品化, 命名为 PAM-CRASH (直到今天, 这也是碰撞冲击仿真中重要的软件产品之一)。1989 年, John Hallquist 离开了 Lawrence Livermore, 开始经营他自己的公司 Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 推广商业版 DYNA 软件: LS-DYNA。

在此之后, LS-DYNA 陆续推出了 930 版 (1993 年)、936 版 (1994 年)、940 版 (1997 年)、950 版 (1999 年)、960 版 (2001 年), 目前最新的版本是 2003 年推出的 970 版。MSC 公司与 ANSYS 公司先后购买了 LS-DYNA 软件的使用权, 形成了 MSC/DYTRAN 以及 ANSYS/LS-DYNA 等产品。

LS-DYNA 软件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) 以及摩擦和接触分离等界面状态非线性程序。它以 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、流固耦合功能; 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。

1.2 LS-DYNA3D 能做什么事情

LS-DYNA 在全球拥有 1000 多家用户, 遍布世界各国的研究机构、大学和工业部门, 在航空航天、汽车、国防、石油、核工业、电子、船舶、建筑、体育器材等领域中均获

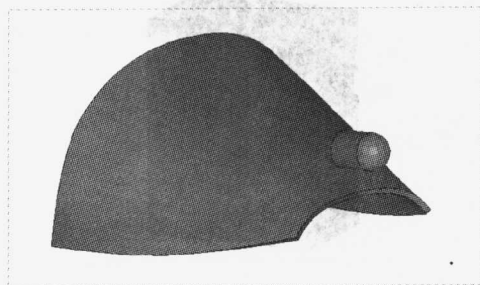


图 1.1 鸟撞飞机风挡模拟

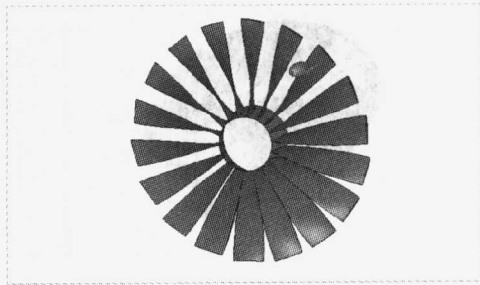


图 1.2 鸟撞发动机叶片, 叶片包容分析

得了广泛的应用。凡是涉及接触碰撞、爆炸、穿甲与侵彻、应力波传播、金属加工、流固耦合等问题，LS-DYNA 都可以进行求解。图 1.1~图 1.22 显示了 LS-DYNA3D 在部分行业的应用情况，所有图形均为真实的有限元模型。

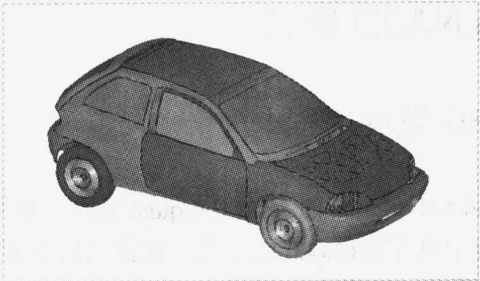


图 1.3 汽车在路面的行驶振动分析

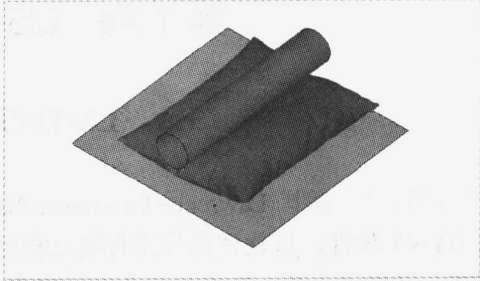


图 1.4 汽车安全气囊的展开

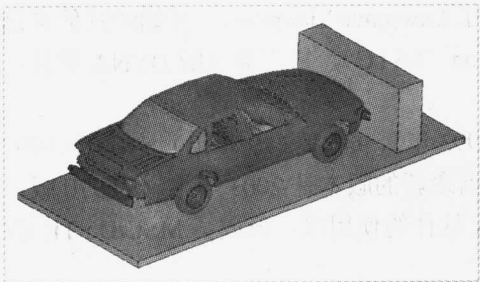


图 1.5 汽车碰撞刚性墙模拟

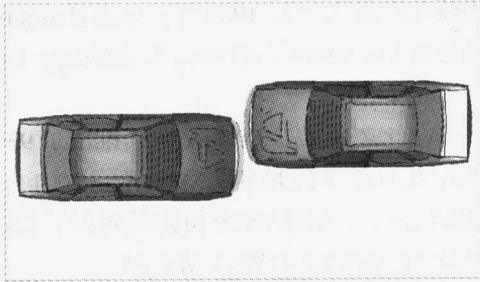


图 1.6 两辆车之间的碰撞，交通事故模拟



图 1.7 驾驶员在碰撞过程中的响应

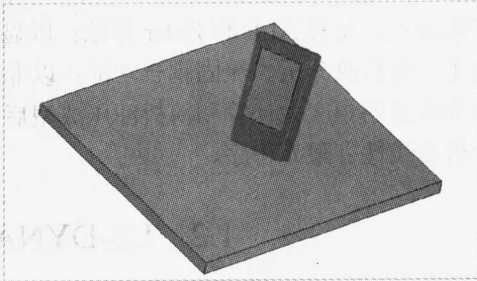


图 1.8 家电产品跌落仿真

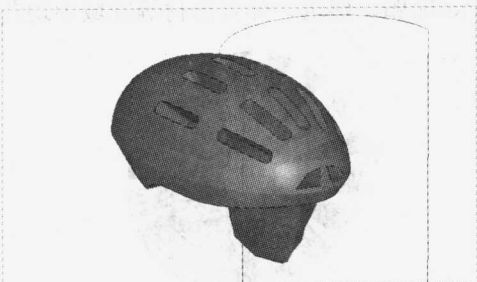


图 1.9 头盔抗撞能力模拟

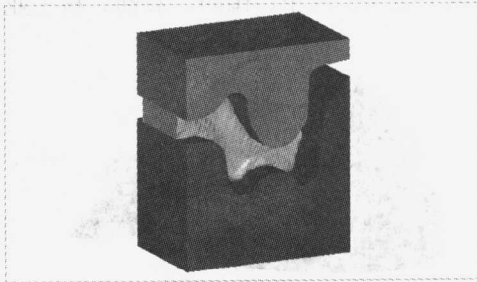


图 1.10 流固耦合算法模拟锻压

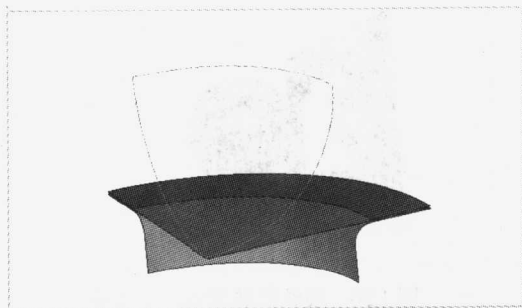


图 1.11 金属成型模拟

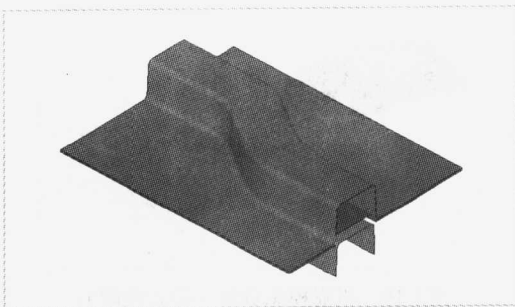


图 1.12 钣金成型模拟

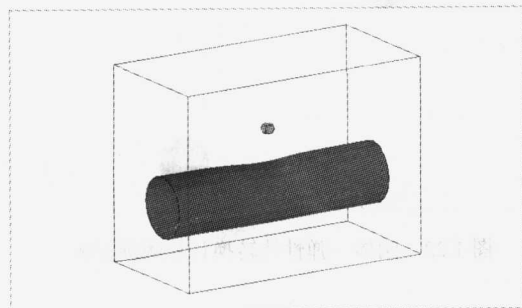


图 1.13 流固耦合算法计算水下爆破

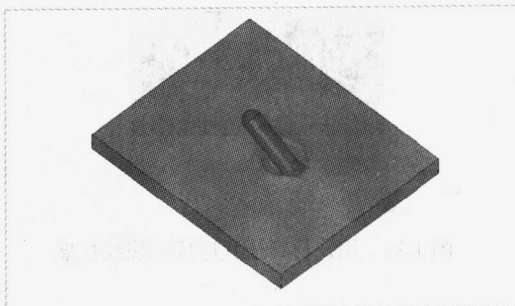


图 1.14 炮弹侵入金属板

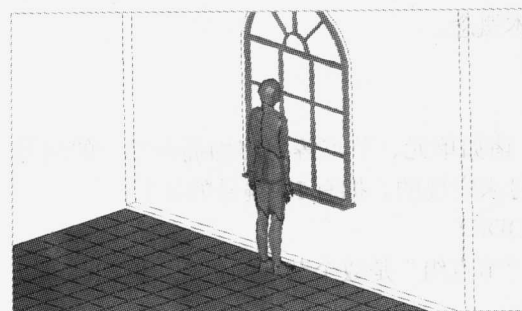


图 1.15 窗户抗风模拟

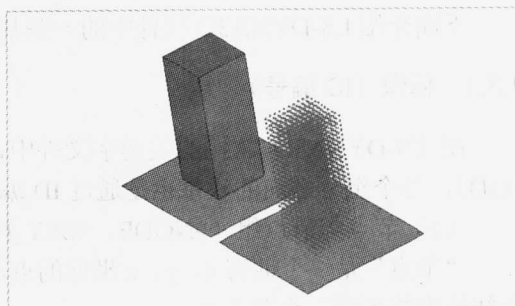


图 1.16 SPH 无网格方法的应用

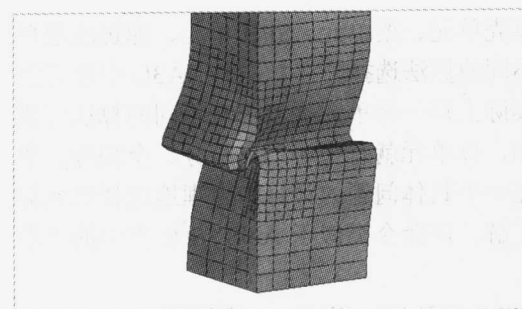


图 1.17 方管压缩中的自适应网格

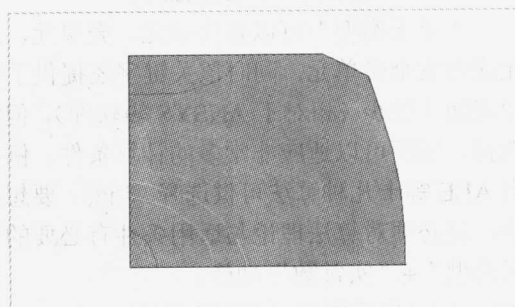


图 1.18 热力耦合分析

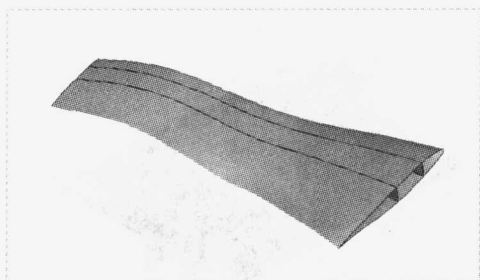


图 1.19 机翼模态分析（隐式求解）

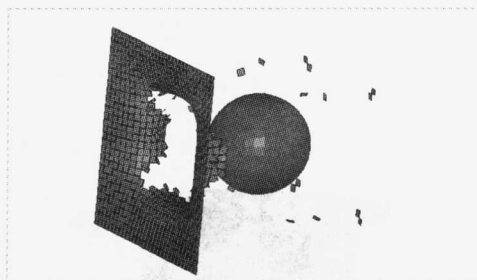


图 1.20 裂纹扩展形成碎片飞溅

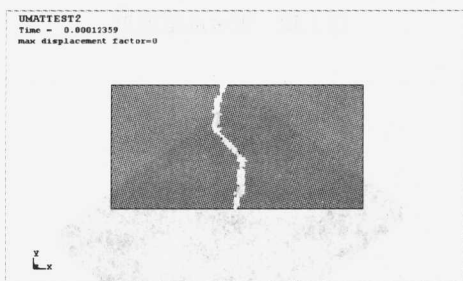


图 1.21 用户材料子程序模拟裂纹扩展

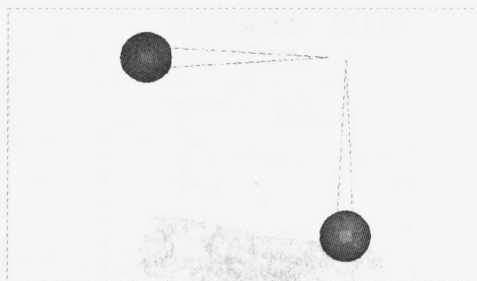


图 1.22 刚体—弹性体转换计算两球正碰

1.3 LS-DYNA3D 的基本概念

下面介绍 LS-DYNA3D 软件中的一些基本概念。

1.3.1 标识（ID 编号）

在 LS-DYNA3D 软件的关键字文件中，诸如单元、节点等内容均拥有唯一的编号（ID），各个组分之间的联系也是通过 ID 编号来实现的。拥有 ID 编号的如下。

（1）节点与节点组（*NODE, *SET_NODE）

“节点”是一个拥有 x、y、z 坐标的点，“节点组”是数个节点的集合。例如，可以把初速度施加给一个节点组。

（2）单元类型（*SECTION_option, option=SOLID、SHELL、TSHELL、BEAM、SPH、DISCRETE、SEATBELT）

“单元类型”可以是体单元、壳单元、厚壳单元、梁单元、SPH 单元、弹簧阻尼单元或者安全带单元，同时该关键字还提供了不同的算法选择。在 LS-DYNA3D 中单元类型表面上较少（相对于 ANSYS 等软件），但实际上每一种单元类型都有不同的算法可供选择，因而可以适应非常多的计算条件。例如，体单元就有中心单点积分、全积分、单点 ALE 等十几种算法可供选择。当然，要想在一个具体问题的计算中合理地选择单元算法，就必须对算法理论与适用条件有必要的了解。该命令类似于 ANSYS 软件中的“单元类型”+“实常数”功能。

（3）单元类型（*ELEMENT_option, option=SOLID、SHELL、TSHELL、BEAM、SPH、DISCRETE、SEATBELT、MASS、INERTIA）

表明单元类型以及该单元由哪些节点组成。相对于*SECTION_option 关键字,本单元类型的种类增加了质量单元(MASS)与惯性单元(INERTIA),这两种单元中每个单元仅包含一个节点,不需要选择算法,因此没有相应的*SECTION 关键字。LS-DYNA3D 软件中也存在单元组的概念(例如*SET_SOLID),但是应用较少。

(4) 材料类型与参数(*MAT_option)

例如,线弹性材料的定义为*MAT_ELASTIC,相应的材料参数,如弹性模量、泊松比等写在该关键字下面。如果模型中存在另外一种线弹性材料,但是材料参数不相同,则必须定义两个材料 ID,以保证每一种材料的 ID 都是唯一的。

(5) PART 与 PART 组(*PART, *SET_PART)

一个 PART 包含材料、单元类型等信息,除了质量与惯性单元外,每个单元必然从属于一个 PART。在 ANSYS 划分网格前,需要指定单元类型、实常数以及材料信息,在 LS-DYNA 中完全相同,LS-DYNA 将这些信息“组装”成 PART,并将该 PART ID 作为属性赋给单元。

(6) SEGMENT(*SET_SEGMENT)

一个 SEGMENT 是若干单元在某一方向的面上的集合,注意不是所有单元面的集合。例如在弹性杆碰撞问题中,A、B 杆接触面上的单元,在撞击法向所有的单元面就可以组成一个 SEGMENT,如图 1.23 和图 1.24 所示。

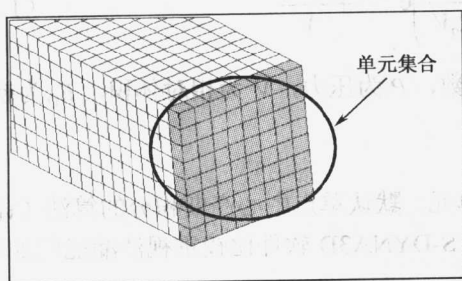


图 1.23 接触面上的单元

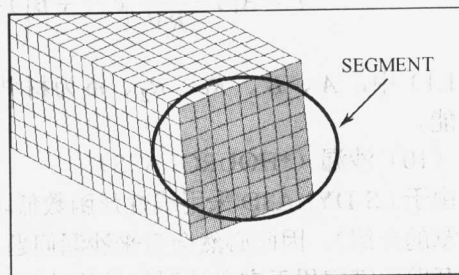


图 1.24 单元在某个方向上面的集合

(7) 盒子(*DEFINE_BOX)

例如,两个复杂物体之间的接触,如果事先能够判断接触发生的区域,就可以定义一个 BOX(见图 1.25),在 BOX 外认为不可能出现接触,这样可以大大降低接触算法搜索区间,提高问题的求解速度。

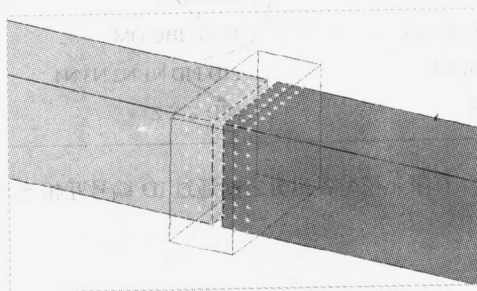


图 1.25 使用 BOX 定义接触

(8) 曲线 (*DEFINE_CURVE)

例如，定义加载曲线时，就必须定义曲线关键字。图 1.26 为三角波的定义方式与三角波波形曲线。

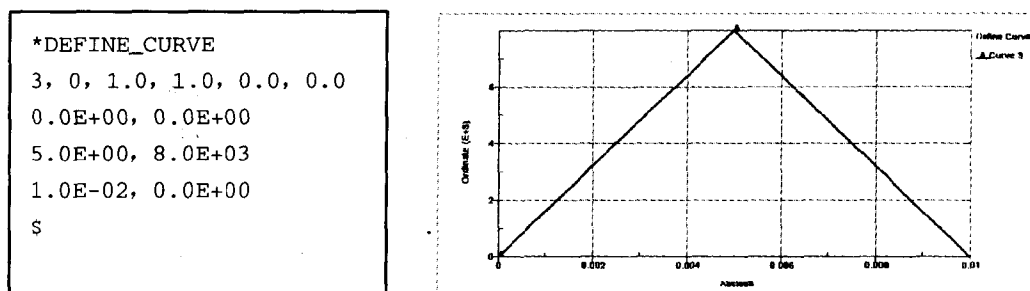


图 1.26 三角波定义方式与三角波波形曲线（使用 LS-PREPOST 绘制）

(9) 状态方程 (*EOS)

状态方程一般用来描述压力与体积的关系。例如，炸药爆炸时的压力—体积膨胀关系就可以使用 *EOS_JWL 状态方程来描述：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 中， A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数， P 为压力， V 为相对体积， E_0 为初始比内能。

(10) 沙漏 (*HOURGLASS)

由于 LS-DYNA3D 采用线性形函数低阶单元，默认单点中心高斯积分的算法（详见第 3 章的介绍），因此必然会带来沙漏问题。LS-DYNA3D 软件比较重视沙漏能的处理，专门开辟关键字用于定义沙漏能量的处理方法。

图 1.27 显示了有限元模型各组分之间是如何通过 ID 编号互相联系的。

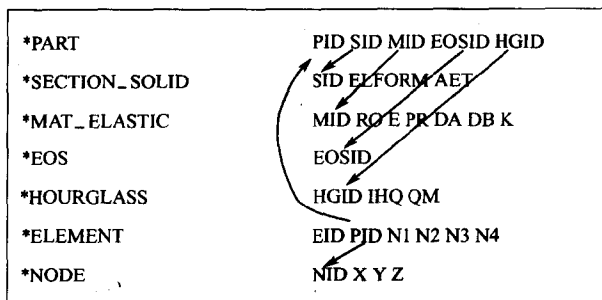


图 1.27 有限元模型各组分之间通过 ID 编号互相建立联系

1.3.2 坐标系统

在 ANSYS 中，存在多种坐标系统：笛卡儿坐标（直角坐标）、圆柱坐标、球面坐标

等，但是 LS-DYNA3D 软件中仅有直角坐标系统。

1.3.3 单位制

在使用 LS-DYNA3D 软件进行计算时，要求不同物理量的单位之间必须协调或者说单位制要统一，其含义是指基本物理量的单位和由其导出的其他物理量的单位必须统一。

对于结构分析，基本物理量只有三个：长度、质量和时间。对于热问题，还应加上温度。LS-DYNA3D 在计算过程中并不限定必须使用哪一种单位制（甚至用户可以自己创造一种单位制系统），只要单位之间是协调的，那么计算结果的单位就是确定的。例如，在结构分析中使用 m、kg、s，那么计算得出的应力单位就一定是 Pa。表 1.1 列出了常用的单位制。

表 1.1 常用单位制

基本物理量			导出物理量			
长度	质量	时间	密度	重力加速度	应力	力
m	kg	s	kg/m ³	9.81m/s ²	Pa	N
mm	t	s	t/mm ³	9810mm/s ²	MPa	N
mm	kg	s	kg/mm ³	9810mm/s ²	kPa	mN
mm	kg	ms	kg/mm ³	0.00981mm/ms ²	GPa	kN
mm	ton	ms	t/mm ³	0.00981mm/ms ²	10 ⁶ MPa	MN
mm	10 ⁶ kg	s	10 ⁶ kg/mm ³	9810mm/s ²	GPa	kN
mm	g	ms	g/mm ³	0.00981mm/ms ²	MPa	N

1.3.4 力与压力

在帮助文档与软件界面中，所使用的术语全部为英文。需要说明的是，在接触力的计算、显示中，“Pressure”指的是压强（Pa），而“Interface Force”指的是力（N）。

1.3.5 用户定义后处理输出文件

在 LS-DYNA3D 求解过程中，系统将自动输出一系列后处理文件，如 Message、d3plot、d3dump、d3hsp 文件等。只要计算过程中不出现异常错误，这些文件将全部出现在工作目录中。除此之外，用户还可以通过自定义方式输出各种计算结果信息，如第 2 章中使用关键字*DATABASE_RCFORC 输出了节点力文件 RCFORC，该文件内容可以直接使用文本编辑器查看，也可以通过 LS-PREPOST 后处理软件绘制曲线图。表 1.2 中列出了用户经常使用的自定义文本文件输出。