

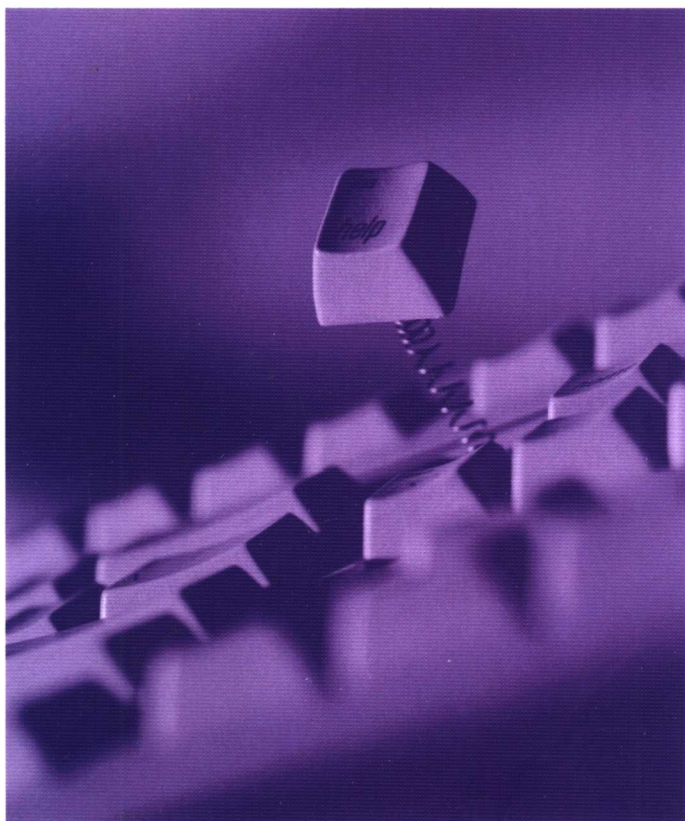
万水
ANSYS 技术丛书

ANSYS 10.0

LS-DYNA

基础理论与工程实践

李裕春
时党勇 编 著
赵 远



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践

李裕春 时党勇 赵 远 编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了大型非线性有限元程序 LS-DYNA 的接触碰撞、隐式分析、热传递、流固耦合、不可压缩流场、自适应网格、重启动、SPH 及 EFG 方法等功能的基本理论,详细解释相关关键字的含义和使用方法及注意事项,并对 ANSYS/LS-DYNA 在诸多工程领域的应用给出相应的分析实例,内容涉及电路板受力分析、手机壳体振动分析、水下爆炸分析、汽车碰撞分析、气囊展开分析、水箱跌落分析、弹丸侵彻分析、摩擦生热分析、振动模态分析、金属成形、薄板冲压等。本书算例模型准确,步骤简明扼要,可操作性强,读者可以参照书中实例举一反三。

本书可以作为理工院校、科研院所相关专业高年级学生、研究生及教师学习使用 ANSYS/LS-DYNA 的教材或参考用书,也可以作为汽车、国防军工、电子、航空航天、土木、机械等行业的工程技术人员学习 ANSYS/LS-DYNA 的参考资料。该书不仅可以为 LS-DYNA 新用户提供大量帮助,也可作为 LS-DYNA 中高级用户的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 / 李裕春等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2006

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 7-5084-3644-X

I. A... II. 李... III. 有限元分析—应用程序, ANSYS 10.0/LS-DYNA
IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 021645 号

书 名	ANSYS 10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践
作 者	李裕春 时党勇 赵 远 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 27.75 印张 680 千字
版 次	2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着计算机软、硬件技术的迅猛发展, CAD/CAM/CAE 技术日趋成熟, 计算机应用遍及各类工程和技术研究领域。有限元软件是数学、力学及计算机技术完美融合的结晶, 在土木、机械、电子、能源、冶金、制造、国防军工、航空航天等诸多领域均得到极为广泛的使用。LS-DYNA 是著名的非线性动力分析程序, 在世界范围内拥有广泛的用户群。自从 20 世纪 90 年代引入国内以来, LS-DYNA 在各个大学、科研院所和公司企业得到越来越广泛的应用。

目前国内 LS-DYNA 的中文参考资料较少。笔者从 20 世纪 90 年代中期开始, 一直使用 LS-DYNA 从事教学和科研实践活动, 对 LS-DYNA 有较为深入的学习和研究, 积累了相当多的学习经验和心得。考虑到广大用户的需求, 本着理论性丰富、可操作性好、实用性强、内容尽量广泛的原则, 整理编写了本书。本书内容涵盖 LS-DYNA 用户关心的诸多工程领域, 包括电路板受力分析、手机壳体振动分析、水下爆炸分析、汽车碰撞分析、气囊展开分析、水箱跌落分析、弹丸侵彻分析、自摩擦生热分析、振动模态分析、金属成形、薄板冲压等方面, 所有计算实例都经过精心选择和设计, 希望能为 LS-DYNA 有限元软件在国内工程界的应用推广起到一定的促进作用。

全书共分为 10 章, 第 1 章对 LS-DYNA 软件功能进行简明扼要的介绍, 第 2 章至第 10 章均针对 LS-DYNA 软件的特定功能进行理论介绍和实例分析, 并对相关关键字进行详细解释, 主要包括 LS-DYNA 的接触碰撞、隐式分析、热分析、流构耦合、不可压缩流体、重启动、自适应网格、SPH 和 EFG 方法等内容, 涉及到 LS-DYNA 软件的绝大部分功能。

LS-DYNA 的学习基本上可以分为三个层次:

(1) 掌握 LS-DYNA 求解的基本过程, 能按照书中提示、求解步骤完成各计算实例的建模、求解、后处理。

(2) 熟悉关键字含义、不同问题的求解思路、算法, 能参照书中实例完成类似问题的求解。

(3) 能熟练阅读、理解各类 LS-DYNA 参考文献, 对各式新问题能形成自己的解题思路。

对初学者而言, 不必贪多求快、贪大求全, 一定要认真揣摩实例 K 文件的含义, 学会改写 K 文件为自己的算例求解提供方便, “真正的 LS-DYNA 用户自己编写 K 文件, 聪明的 LS-DYNA 用户改写别人的 K 文件”。

由于教学、科研任务繁重, 成书时间仓促, 加之水平有限, 不当之处在所难免, 恳请广大读者批评指正 (可发邮件到: liyuchunmail@sina.com、sdyys2004@sina.com)。

编 者

2005 年 12 月

江苏·南京

目 录

前言

第 1 章	LS-DYNA 简介	1
1.1	有限元思想	1
1.2	LS-DYNA 发展概况	4
1.3	LS-DYNA 功能特点	5
1.4	ANSYS 10.0/LS-DYNA 计算流程	21
第 2 章	电子产品分析	35
2.1	电子产品分析概述	35
2.1.1	问题种类	36
2.1.2	典型分析	37
2.2	电视机壳体跌落分析	40
2.2.1	问题描述	40
2.2.2	求解分析	41
2.2.3	计算步骤	42
2.2.4	输入文件	49
2.2.5	后处理	53
2.3	手机壳体振动分析	56
2.3.1	问题描述	56
2.3.2	求解分析	57
2.3.3	输入文件	58
2.3.4	后处理	59
2.4	电路板受力分析	63
2.4.1	问题描述	63
2.4.2	求解分析	64
2.4.3	输入文件	65
2.4.4	后处理	69
第 3 章	接触碰撞分析	72
3.1	接触碰撞分析概述	72
3.1.1	接触碰撞的类型	72
3.1.2	接触碰撞的基本算法	73
3.1.3	接触界面定义及控制	78
3.1.4	接触分析注意事项	87

3.1.5	接触分析相关关键字	88
3.2	长杆弹体侵彻靶板分析	112
3.2.1	问题描述	112
3.2.2	求解分析	112
3.2.3	输入文件	113
3.2.4	后处理	116
3.3	简易汽车碰撞分析	119
3.3.1	问题描述	119
3.3.2	求解分析	120
3.3.3	输入文件	120
3.3.4	后处理	125
3.4	气囊展开分析	128
3.4.1	问题描述	128
3.4.2	求解分析	129
3.4.3	输入文件	129
3.4.4	后处理	136
第 4 章	隐式分析	140
4.1	LS-DYNA 隐式分析概述	140
4.1.1	隐式分析的特点和功能	140
4.1.2	隐式分析理论基础	142
4.1.3	隐式分析相关关键字	150
4.1.4	隐式分析相关概念	163
4.2	汽车保险杠受撞分析	170
4.2.1	问题描述	170
4.2.2	求解分析	171
4.2.3	输入文件	173
4.2.4	后处理	176
4.3	手机壳体特征值分析	181
4.3.1	问题描述	181
4.3.2	求解分析	181
4.3.3	输入文件	182
4.3.4	后处理	185
第 5 章	流构耦合分析	188
5.1	流构耦合分析概述	188
5.1.1	ALE 方法简介	188
5.1.2	ALE 方法理论基础	190
5.1.3	ALE 方法相关关键字	200

5.2	金属挤压成型分析	227
5.2.1	问题描述	227
5.2.2	求解分析	228
5.2.3	输入文件	229
5.2.4	后处理	233
5.3	近水面爆炸效应分析	235
5.3.1	问题描述	235
5.3.2	求解分析	235
5.3.3	输入文件	237
5.3.4	后处理	242
5.4	水箱跌落分析	244
5.4.1	问题描述	244
5.4.2	求解分析	245
5.4.3	输入文件	246
5.4.4	后处理	249
第 6 章	热分析	252
6.1	热传导分析概述	252
6.1.1	如何应用 LS-DYNA 进行热传导分析	252
6.1.2	热传导基本理论	254
6.1.3	热传导分析相关的关键字	257
6.1.4	典型的热相关问题	271
6.2	热固耦合分析	273
6.2.1	问题描述	273
6.2.2	建模分析	273
6.2.3	求解步骤	274
6.2.4	输入文件	284
6.2.5	后处理	290
6.3	摩擦生热问题	294
6.3.1	问题描述	294
6.3.2	求解分析	295
6.3.3	输入文件	296
6.3.4	后处理	300
6.4	薄板冲压的热问题分析	303
6.4.1	问题描述	303
6.4.2	求解分析	303
6.4.3	输入文件	304
6.4.4	后处理	309

第 7 章 不可压缩流场分析	314
7.1 不可压缩流场分析概述	314
7.1.1 不可压缩流场分析的特点	314
7.1.2 不可压缩流场分析的理论基础	315
7.1.3 不可压缩流分析相关关键字	324
7.2 不可压缩流场实例分析	335
7.2.1 问题描述	335
7.2.2 求解分析	336
7.2.3 输入文件	336
7.2.4 后处理	343
7.3 管鞘流动分析	346
7.3.1 问题描述	346
7.3.2 求解分析	347
7.3.3 输入文件	347
7.3.4 后处理	351
第 8 章 重启动分析	353
8.1 重启动分析概述	353
8.2 简单重启动	354
8.3 小型重启动	354
8.4 完全重启动	355
8.5 重启动分析关键字	355
8.6 重启动分析实例	358
8.6.1 改变载荷	358
8.6.2 改变速度	361
8.6.3 增加新的材料	366
第 9 章 自适应网格方法	371
9.1 自适应网格方法概述	371
9.2 h-adaptive 方法和 r-adaptive 方法	372
9.3 自适应网格划分实例	374
9.3.1 圆管碰撞	374
9.3.2 泰勒杆冲击	379
9.3.3 弹体侵彻	384
第 10 章 SPH 和 EFG 方法	389
10.1 无网格方法概述	389
10.2 SPH 方法的特点和基本理论	392
10.3 SPH 方法实例分析	394
10.3.1 弹体侵彻靶板的 FE/SPH 耦合计算	394

10.3.2 两梁碰撞	416
10.4 EFG 方法的特点和基本理论	420
10.5 EFG 方法实例分析	422
附录 1 单位制	426
附录 2 LS-DYNA 材料模型应力-应变数据类型	427
附录 3 LS-DYNA ver.970 rev.5434a (2005/01) 接触类型一览	430
附录 4 金属在大变形、高应变率和高温条件下的本构模型和数据	432
参考文献	433

第 1 章 LS-DYNA 简介

LS-DYNA 作为世界上最著名的以显式为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成形等非线性动力冲击问题,同时可以求解传热、流体及流固耦合问题,是显式有限元理论和程序的鼻祖,在工程应用如汽车安全性设计、武器系统设计、金属成形、跌落仿真等领域被广泛认可为最佳的分析软件包。

1.1 有限元思想

有限元分析是一种模拟设计载荷条件,并且确定在载荷条件下各类响应的方法。它用被称为“单元”的离散块体来模拟实物。模型中所有单元响应的“和”给出了设计的总体响应。单元中未知量的个数是有限的,因此称为“有限单元”。

有限元法建立在固体流动变分原理基础之上。被分析物体离散成为许多小单元后,给定边界条件、载荷和材料特性,求解线性或非线性方程组,就可以得到分析对象的位移、应力、应变、内力等结果。借助现代的计算机技术,这些步骤都可以较快完成,并可使用图形技术显示计算结果。

这种包含有限个未知量的有限单元模型,只能近似反映具有无限未知量的实际系统的响应,但即便是这样,实际计算中往往只要求满足一定的精度要求就足够了,所以有限元法的这种近似方法目前得到了极为广泛的使用,因为绝大多数实际问题都是非常难于获得解析解的。怎样做到最好的“近似”,依赖于所模拟的对象和模拟所采用的方式,例如图 1-1 (a) 所示实物,可近似简化为图 1-1 (b) 所示结构系统来进行有限元建模。

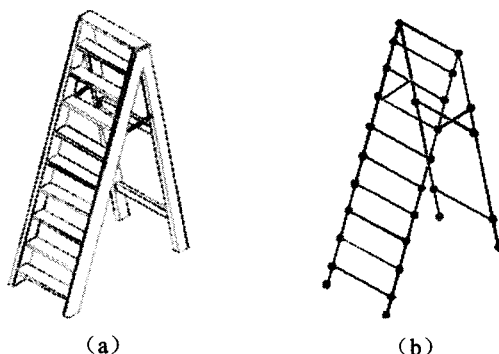


图 1-1 实物简化

有限元求解一般分为隐式分析、显式—隐式分析、显式分析三种。如图 1-2 所示结构分析为典型的静力分析, $\Sigma F=0$, 采用隐式求解。

如图 1-3 所示为金属成形分析, 是典型的准静态问题, $\Sigma F \approx 0$, 采用显式—隐式求解。

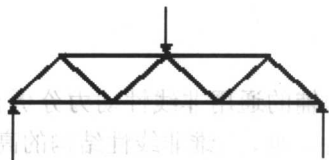


图 1-2 静力分析

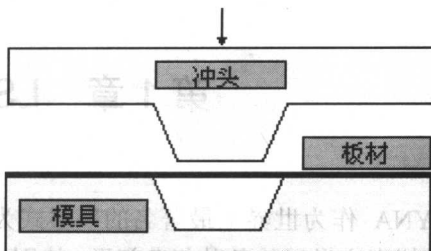


图 1-3 准静态分析

图 1-4 所示碰撞分析，是典型的动力分析， $\Sigma F=ma$ ，采用显式求解。

进行有限元分析的主要原因基本上可以概括如下：

- 无法或不必要获得精确解。
- 缩减试验次数。
- 进行不适合原型试验的设计（如图 1-5 所示汽车碰撞分析）。
- 节省费用和时间，缩短产品开发周期。

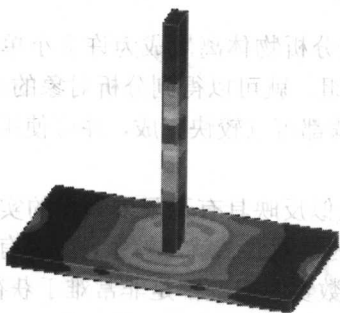


图 1-4 动力分析

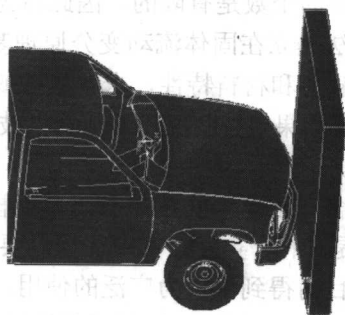


图 1-5 汽车碰撞分析

主流有限元软件主要有 MSC 系列软件和 ANSYS 两大类，它们的特点、功能综述如下。

MSC.NASTRAN：功能最全面、应用最广泛的大型通用结构有限元分析软件、工业标准的 FEA 源代码程序及国际合作和国际招标中工程分析和校验的首选工具。

MSC.PATRAN：世界公认最佳的集几何访问、有限元建模、分析求解及数据可视化于一体的新一代框架式软件系统，主要作为 MSC.NASTRAN 及其他 MSC 软件的前后处理软件，界面如图 1-6 所示。

MSC.DYTRAN：求解高度非线性、瞬态动力学、流体及流-固耦合等问题。

MSC.FATIGUE：专用耐久性疲劳寿命分析软件系统。

MSC.MARC：是处理高度组合非线性结构、热及其他物理场和耦合场问题的利器，具有极强的结构分析能力，可以处理各种线性和非线性结构分析。

MSC.MVISION：现阶段国内外惟一全面的商品化材料数据信息系统。

MSC.Construct：基于 MSC.PATRAN 和 MSC.NASTRAN 用于拓扑及形状优化的概念化设计软件系统。

MSC.Marc AutoForge：2D 和 3D 成型过程仿真的专用软件。

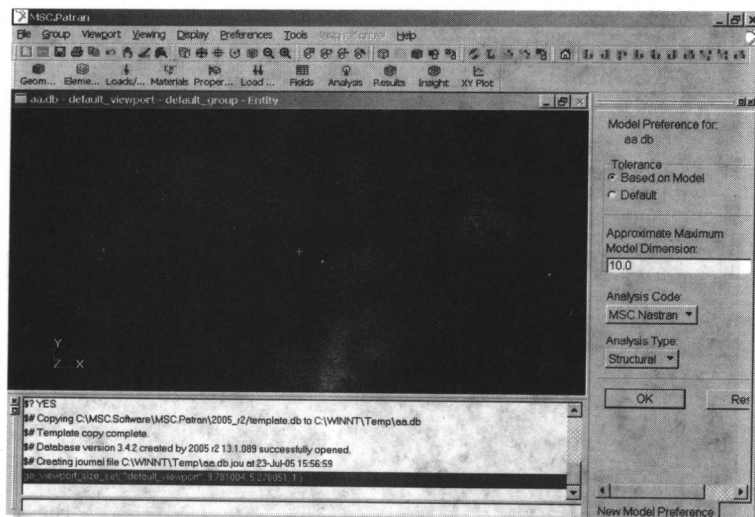


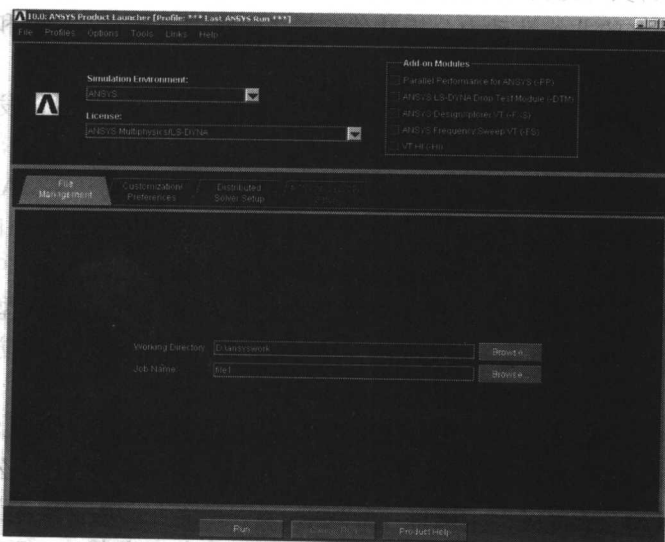
图 1-6 PATRAN 界面

MSC.SuperForge: 锻造工艺过程数值仿真系统。

MSC.VisualNastran Desktop: 集有限元分析优化、机构运动学与动力学和可视化技术为一体的虚拟仿真系统。

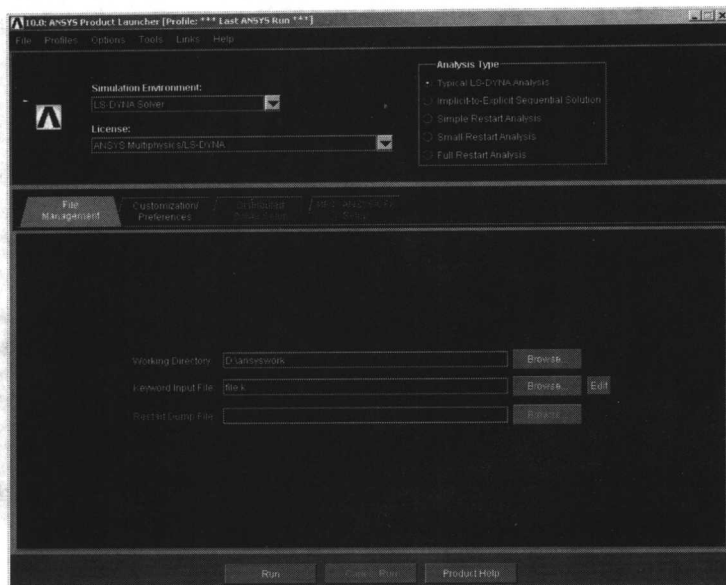
ADAMS: 集建模、求解、可视化技术于一体的虚拟样机软件, 是世界上目前使用范围最广、最负盛名的机械系统仿真分析软件。

ANSYS: 融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件, 具有独一无二的多场耦合分析功能, 对自然界四大场——力场、流场、热场、磁场实现全面分析。大多数 LS-DYNA 用户采用 ANSYS 作为构建有限元模型的工具。ANSYS 登录界面及 LS-DYNA 求解界面如图 1-7 所示。



(a) ANSYS 登录界面

图 1-7 ANSYS 功能界面



(b) DYNA 求解界面

图 1-7 续图

1.2 LS-DYNA 发展概况

LS-DYNA 的历史可以追溯到 20 世纪 70 年代。LS-DYNA 程序最初称为 DYNA 程序，由 J.O.Hallquist 博士于 1976 年在美国 Lawrence Livermore National Laboratory（美国三大国防实验室之一）主持开发完成，其目的主要是为武器设计提供分析工具。软件推出后深受广大用户的青睐。以后经过 1979、1981、1982、1986、1987、1988 年版的功能扩充和不断改进，DYNA 程序已经成为国际著名的非线性动力分析软件，在武器结构设计、内弹道和终点弹道、军用材料研制等方面得到了广泛的应用。

1988 年 J.O.Hallquist 博士创建 LSTC 公司，DYNA 程序走上商业化发展历程，并更名为 LS-DYNA。LS-DYNA 程序系列主要包括显式 LS-DYNA2D、LS-DYNA3D，隐式 LS-NIKE2D、LS-NIKE3D，热分析 LS-TOPAZ2D、LS-TOPAZ3D，前后处理 LS-MAZE、LS-ORION、LS-INGRID、LS-TAURUS 等商用程序。为进一步规范和完善 DYNA 程序的研究成果，LSTC 公司陆续推出 930 版（1993 年）、936 版（1994 年）、940 版（1997 年）、950 版（1998 年），增加了汽车安全性分析（汽车碰撞、气囊、安全带、假人）、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 LS-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 等程序合成一个软件包，称为 LS-DYNA（940 版），PC 版的前后处理采用 ETA 公司的 FEMB，新开发的前后处理器为 LS-PREPOST。目前，国内 LS-DYNA 的商业用户已超过 100 家。

2001 年 5 月 LSTC 公司推出 LS-DYNA960 版，2003 年 3 月推出 LS-DYNA970 版，在这之后相继发布了修订版。LS-DYNA 版本发布情况如表 1-1 所示。

表 1-1 LS-DYNA 版本发布情况一览

版本	发布时间
LS-DYNA960 v270	2001.05
LS-DYNA960 v350	2001.06
LS-DYNA960 v447	2001.07
LS-DYNA960 v760	2001.10
LS-DYNA960 v1106	2002.01
LS-DYNA960 v1488	2002.06
LS-DYNA960 v1647	2002.11
LS-DYNA970 v3535	2003.03
LS-DYNA970 v3858	2003.08
LS-DYNA970 v5434	2004.09
LS-DYNA970 v5434a	2005.01
LS-DYNA970 v6763	2005.10

LS-DYNA 的最新版本是 2005 年 10 月推出的 970 v6763 版, 隐式功能进一步增强, 增加了一些新的材料模型和新的接触计算功能, 改善了单元算法和计算效率, 修正了以前版本中的一些错误, 分析能力更为强大。

1.3 LS-DYNA 功能特点

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) 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), 如图 1-8 至图 1-11 所示, 是军用和民用相结合的通用结构分析非线性有限元程序。

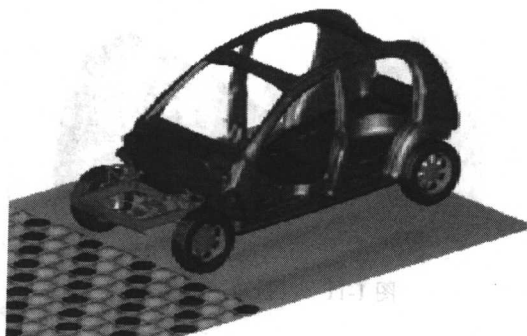


图 1-8 汽车在虚拟石子路上行驶试验

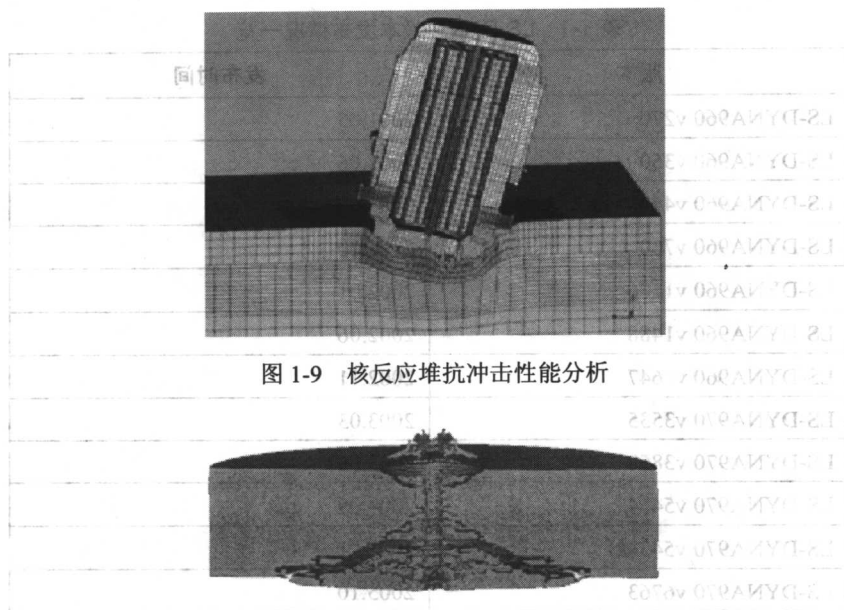


图 1-9 核反应堆抗冲击性能分析

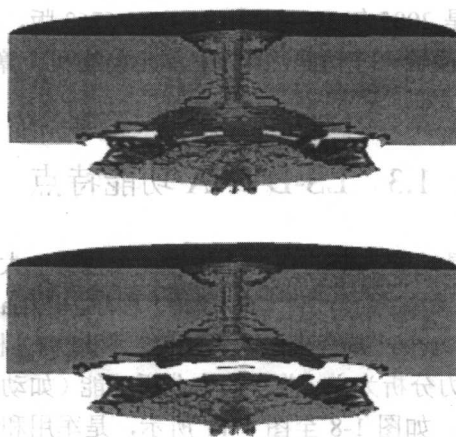


图 1-10 射弹侵入混凝土靶板

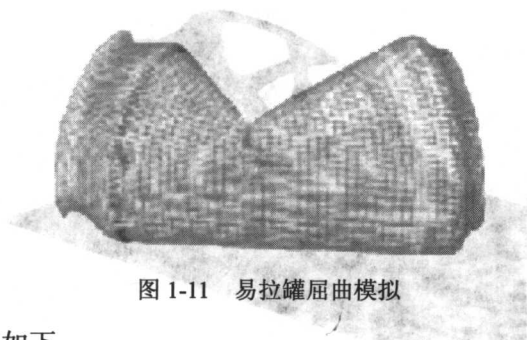


图 1-11 易拉罐屈曲模拟

LS-DYNA 功能特点如下:

1. 分析能力 (LS-DYNA Capability)

LS-DYNA 具有很广泛的分析功能, 如图 1-12 至图 1-14 所示, 可模拟许多二、三维结构

的物理特性:

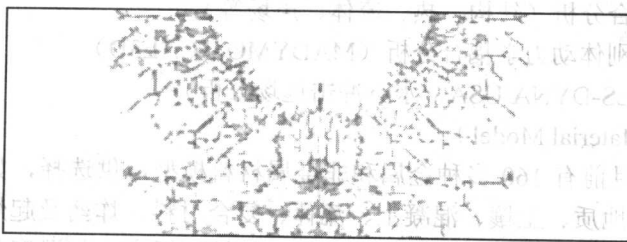


图 1-12 爆炸作用下岩石裂纹扩展

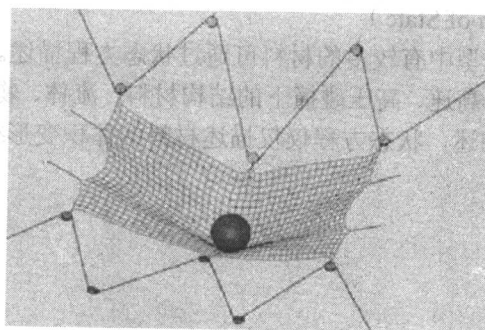


图 1-13 安全网分析

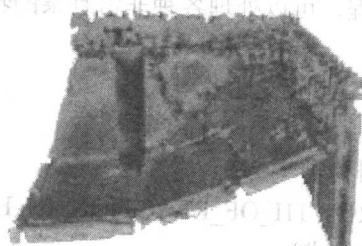


图 1-14 爆炸作用下钢筋混凝土结构破坏

- 非线性动力分析
- 多刚体动力学分析
- 热分析
- 失效分析
- 裂纹扩展分析
- 接触分析
- 准静态分析 (钣金成型等)
- 欧拉场分析
- 任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 分析
- 流体-结构相互作用分析
- 不可压缩流体 CFD 分析

- 实时声场分析
- 多物理场耦合分析（结构、热、流体、声场等）
- 有限元—多刚体动力学耦合分析（MADYMO, CAL3D）
- 水下冲击（LS-DYNA/USA, 水下冲击远场分析）

2. 材料模型（Material Model）

LS-DYNA 程序目前有 160 多种金属和非金属材料模型可供选择，如弹性、弹塑性、超弹性、泡沫、玻璃、地质、土壤、混凝土、流体、复合材料、炸药及起爆燃烧、刚性及用户自定义材料（UDM），并可考虑材料失效、损伤、粘性、蠕变、与温度相关、与应变率相关等性质。

3. 状态方程（Equation of State）

在 LS-DYNA 的材料模型中有较多的材料可通过状态方程描述。常规条件下的结构材料一般不使用状态方程，但对于高速、高压碰撞下的结构材料、流体、物质燃烧等有化学反应的过程都必须采用状态方程来描述，状态方程仅仅描述材料的体积变形行为：

$$p=f(v, r, E, T)$$

p : 压力

v : 相对体积

r : 密度

E : 内能

T : 温度

LS-DYNA 有 14 种状态方程，可以处理各种非常复杂的物理现象和材料特性，常用的状态方程如下：

*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL（线性多项式）

*EOS_JWL（炸药）

*EOS_GRUNEISEN（结构材料）

*EOS_IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE（推进剂燃烧）

*EOS_TABULATED（列表方式）

4. 单元库（Element Formulation）

LS-DYNA 程序现有 16 种单元类型，有二维、三维单元，薄壳、厚壳、体、梁单元，ALE、Euler、Lagrange 单元等。各类单元又有多种理论算法可供选择，具有大位移、大应变和大转动性能，单元积分采用沙漏粘性阻尼以克服零能模式，单元计算速度快，节省存储量，可以满足各种实体结构、薄壁结构和流体-固体耦合结构的有限元网格剖分的需要。

- 薄壳算法选择。

（1）四边形壳元。

- ◆ Hughes-Liu
- ◆ Belytschko-Tsay（缺省）
- ◆ S/R Hughes-Liu
- ◆ S/R 旋转 Hughes-Liu
- ◆ Belytschko-Leviathan 壳
- ◆ Belytschko-Wong-Chiang