



ANSYS/LS-DYNA

**工程结构抗震、抗撞击
与抗连续倒塌分析**

刘成清 何 斌 陈 驰 李俊君 编著
叶列平 主审

中国建筑工业出版社

ANSYS /LS-DYNA 工程结构抗震、 抗撞击与抗连续倒塌分析

刘成清 何 斌 陈 驰 李俊君 编著
叶列平 主审



本书由国家自然科学基金项目面上项目（编号：51278428）资助出版

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗震、抗撞击与抗连续
倒塌分析/刘成清等编著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2014. 9.

ISBN 978-7-112-16949-8

I. ①A… II. ①刘… III. ①有限元分析-应用
软件 IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 119661 号

ANSYS/LS-DYNA 是功能强大的大型显式动力分析软件, 其算法非常适合分析各类复杂动力学问题, 如抗震、抗撞击、抗连续倒塌、抗冲击、金属加工成型等高度非线性问题。

本书通过 3 篇 10 章系统地介绍了 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析方法及其在工程抗震、抗撞击、抗连续倒塌分析方面的主要问题。工程实例部分涉及新型建筑结构体系中的竖向斜交网格建筑结构抗震时程分析、落石冲击被动柔性防护网的高度非线性数值分析、屋盖为一拱形钢屋架承重结构的单层厂房排架结构的连续倒塌仿真分析。在内容安排上, 深入浅出、循序渐进, 兼顾初学者、一般使用者以及科研和工程高级分析人员的实际需要。

本书适合作为土木、机械、航天、航空、工业设计以及力学等相关专业研究生或高年级本科生学习工程结构动力学问题的数值分析, 也可供从事国防工程与民用结构抗震、抗撞击、抗倒塌分析的技术人员参考使用, 亦可供 ANSYS/LS-DYNA 软件学习与使用者参考。

责任编辑: 王砾瑶

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 赵颖

ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗震、抗撞击与抗连续倒塌分析

刘成清 何斌 陈驰 李俊君 编著
叶列平 主审

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
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{1}{4}$ 字数: 350 千字
2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月第一次印刷
定价: 43.00 元

ISBN 978-7-112-16949-8
(25737)

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)

序 言

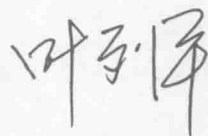
随着我国科学技术的迅猛发展和计算机软硬件技术的日趋成熟完善，数值模拟技术已广泛应用于土木、机械、电子、能源、冶金、国防军工、航天航空等诸多领域，并已对这些领域产生了深远而积极的影响。

ANSYS/LS-DYNA 作为世界上最著名的通用显式非线性动力分析程序，能够模拟各种复杂几何非线性、材料非线性和接触非线性问题，其强大的数值模拟能力正引起业界的广泛关注。刘成清博士长期使用 ANSYS/LS-DYNA，并在教学及科研工作中取得突出的成果和业绩，在国内该领域具有一定的影响。他主要专注于工程抗震及抗冲击研究，对 ANSYS/LS-DYNA 在结构抗震、抗撞击及抗连续倒塌等方面的应用，有较为深入的研究，并积累了相当多的应用经验和心得。现在他将自己在 ANSYS/LS-DYNA 工程实践中的应用成果和工程经验系统地整理成书，是一件很有意义的工作，弥足珍贵，可为我国相关科研人员和从事该领域的研究生提供有益的帮助。

该书在内容安排上由浅入深，涵盖了软件基本操作、算法原理和工程应用三方面，理论性强、可操作性好、实用性强且内容丰富。本书首先深入介绍了 ANSYS/LS-DYNA 软件所涉及的基础知识、应用方法及要点，主要包括：ANSYS/LS-DYNA 的发展过程及功能特点、单元特性及定义、材料模型及其选用、有限元建模技术、加载与约束、求解及控制、后处理、关键字文件等。然后，详细阐述了 ANSYS/LS-DYNA 常用算法理论，使读者进一步熟悉软件的常用理论基础，以选用合适的算法解决工程难题。最后，给出了一系列 ANSYS/LS-DYNA 工程实例的分析过程，内容涉及结构抗震、抗撞击以及抗连续倒塌等具体的工程领域，所有计算实例均经精心选择和设计，对读者进一步巩固和掌握软件的基本概念、基本操作及应用帮助巨大。我深信，该书对 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件在今后我国结构抗震、抗撞击及其他相近各项岩土工程、隧道工程的科技进步均会有所助益，各方面的重要借鉴价值也是可以预期的。

这里，我还想写一些在日常交往中对作者的一点印象。刘成清博士作为国家自然科学基金项目评议人及教育部科研基金和科技奖励评审专家，长期从事教学科研，勤奋严谨，在工作岗位上默默奉献、锲而不舍，具有强烈的事业心和责任心，他淡泊名利，潜心钻研学术研究，善于理论联系实际，并已经取得了有价值的研究与技术成果。

本书最大特点是理论与实践的结合，具有很强的可读性和实用性，可供工程结构抗震与防灾减灾领域的技术人员和研究生学习使用，共同促进我国工程结构抗震防灾的科技进步。



2014年6月18日

前 言

将工程结构的真实动荷载计算、设计、分析和非线性有限元结合在一起，对于工程结构研究人员和设计工程师来说，将有非常大的帮助。尽管 ANSYS/LS-DYNA 作为一个高端动力分析软件能将此实现，但编者深感缺乏一本基于动力非线性有限元算法和具体操作使用方法相结合，并应用于工程结构抗震、抗撞击、抗连续倒塌等研究领域的计算分析教程。基于此，本书系统地介绍了 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析方法及其在工程结构抗震、抗撞击、抗连续倒塌分析中的应用。

本书分为 3 篇，第 1 篇为基础篇，以 ANSYS/LS-DYNA 的基本使用流程为主线，先扼要地介绍了 ANSYS/LS-DYNA 的发展过程、应用领域、基本理论、功能特点、计算流程，接着详细介绍如何建模、施加荷载与边界条件、如何求解及其控制，最后介绍了在计算结束之后如何对计算结果进行提取和处理。

第 2 篇为提高篇，由于采用 ANSYS/LS-DYNA 建模、施加荷载或约束、进行求解控制和求解，实际上都是向 LS-DYNA 计算程序递交一个格式相对固定的关键字文件。为此，本篇重点介绍关键字使用与生成及修改、算法理论与控制，以帮助大家深入理解动力有限元分析，为灵活应用于工程结构抗震、抗撞击、抗连续倒塌分析打下扎实的基本功。

第 3 篇为工程结构实例分析篇，在工程实践中的分析也许是最有效地巩固基础篇知识的方法，或许也是能最快理解和掌握关键字文件和算法理论及其控制的途径。为此，本篇精选了一系列在抗震、抗撞击、抗连续倒塌等研究领域中的工程结构进行 ANSYS/LS-DYNA 动力计算分析。

需要特别说明的是，西南交通大学的赵世春教授对本书的研究工作给予了大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

参加本书编写工作的还有西南交通大学研究生倪向勇、陈林雅、夏春兰、马开强、周庆林、杨巍、邓永祥等。由于时间比较仓促，认识水平有限等原因，难免有错误出现，读者在阅读时发现错误后，请通知作者（邮件地址：lcqjd@swjtu.cn），不胜感激。也希望就 ANSYS/LS-DYNA 的问题和广大读者继续探讨。

2014 年 5 月于成都

目 录

第1篇 基础篇

第1章 ANSYS/LS-DYNA 概述	2
1.1 LS-DYNA 发展过程	2
1.2 LS-DYNA 的应用领域	3
1.2.1 LS-DYNA 在汽车碰撞技术中的应用	3
1.2.2 LS-DYNA 在板料成形模拟中的应用	4
1.2.3 LS-DYNA 在 MPP 的应用	4
1.2.4 LS-DYNA 在隐式计算中的应用	4
1.2.5 LS-DYNA 在气囊、ALE 和 SPH 中的应用	5
1.2.6 LS-DYNA 在 EFG、频域分析、流体及流固耦合的应用	5
1.3 LS-DYNA 的理论简介	5
1.4 LS-DYNA 的功能特点	6
1.4.1 分析能力强大	7
1.4.2 材料模型丰富	8
1.4.3 单元库便捷实用	8
1.4.4 接触方式全面	8
1.4.5 数值处理技术	8
1.4.6 求解控制技术	8
1.5 LS-DYNA 的计算流程	8
1.5.1 前处理	9
1.5.2 求解	9
1.5.3 后处理	9
第2章 ANSYS/LS-DYNA 建模	11
2.1 几何模型	11
2.1.1 常用基本概念	11
2.1.2 ANSYS 实体建模	19
2.1.3 从 CAD 系统中导入实体模型	30
2.2 ANSYS /LS-DYNA 的单元特性	32
2.2.1 LINK160 杆单元	33
2.2.2 BEAM161 梁单元	34
2.2.3 SHELL163 薄壳单元	36
2.2.4 SOLID164 实体单元	39
2.2.5 COMB1165 弹簧阻尼单元	40
2.2.6 MASS166 质点质量单元	42

2.2.7	LINK167 索单元	42
2.3	材料模型	44
2.3.1	ANSYS/LS-DYNA 材料模型概述	44
2.3.2	弹性材料模型	45
2.4	接触设置	63
2.4.1	LS-DYNA 的接触类型	63
2.4.2	接触界面的定义与控制	66
2.5	网格划分	72
2.5.1	控制网格密度	72
2.5.2	网格拖拉与扫掠	76
第3章	ANSYS/LS-DYNA 荷载与边界条件	80
3.1	施加荷载	80
3.1.1	显式分析荷载的类型	80
3.1.2	定义数组参数、荷载曲线	80
3.1.3	施加显式分析荷载	83
3.2	施加初始条件	84
3.2.1	对节点组元施加初始速度	84
3.2.2	对部件(集)施加初始速度	86
3.3	施加约束	87
3.3.1	特殊约束	87
3.3.2	焊接约束	89
3.3.3	耦合与约束方程	89
3.4	施加边界条件	90
3.4.1	零位移边界条件	90
3.4.2	滑移或循环对称边界	91
3.4.3	非反射边界条件	92
第4章	ANSYS/LS-DYNA 求解及其控制	94
4.1	求解的基本参数设定	94
4.1.1	终止条件控制	94
4.1.2	输出文件控制	95
4.1.3	高级求解控制	97
4.2	LS-DYNA 求解过程	98
4.2.1	求解过程的描述	98
4.2.2	求解过程的监控	99
4.3	重启动	99
4.3.1	新的分析	100
4.3.2	简单重启动	100
4.3.3	小型重启动	100
4.3.4	完全重启动	101
第5章	ANSYS/LS-DYNA 后处理	102
5.1	ANSYS 后处理	102
5.1.1	通用后处理 POST1	102

5.1.2	时间历程后处理器 POST26	107
5.2	LS-PREPOST 后处理	112
5.2.1	鼠标键盘操作	112
5.2.2	LS-PREPOST 程序界面	112
5.2.3	下拉菜单	112
5.2.4	图形绘制	113
5.2.5	图形控制区	113
5.2.6	动画控制区	114
5.2.7	主菜单	115

第2篇 提高篇

第6章	ANSYS/LS-DYNA 关键字文件	123
6.1	节点关键字	123
6.2	单元关键字	123
6.2.1	定义单元的关键字段	123
6.2.2	定义单元选项的关键字段	126
6.3	部件与材料关键字	129
6.3.1	定义部件的关键字段	129
6.3.2	定义材料的关键字段	130
6.4	接触定义关键字	131
6.5	初始条件及边界条件关键字	132
6.5.1	初始条件关键字	132
6.5.2	边界条件关键字	132
6.6	载荷及约束关键字	133
6.6.1	载荷定义关键字	133
6.6.2	约束定义关键字	134
6.7	其他常用关键字	134
6.7.1	* CONTROL 关键字	134
6.7.2	* SET 关键字	135
6.7.3	* DEFINE 关键字	135
6.7.4	* DATABASE 关键字	135
6.7.5	* INTEGRATION 关键字	135
6.7.6	* ALE 关键字	136
6.8	关键字文件的生成与修改	136
6.8.1	关键字文件的数据格式	136
6.8.2	关键字文件的修改	137
第7章	ANSYS/LS-DYNA 常用算法理论介绍	138
7.1	基本显式积分算法	138
7.1.1	基本方程和控制条件	138
7.1.2	有限元空间离散	138
7.1.3	单点高斯积分与沙漏控制简介	139
7.1.4	显示时间积分与时步控制	140

7.2 动态接触算法	141
7.2.1 常用基本概念	141
7.2.2 接触算法	143
7.2.3 接触中的穿透问题及解决措施	144
7.2.4 接触分析注意事项	145

第3篇 分析篇

第8章 ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗震分析	147
8.1 LS-DYNA 在工程结构抗震中的应用概述	147
8.1.1 采用时程分析方法求解结构对地震波的响应	147
8.1.2 提供多种土木工程建筑材料模型	147
8.1.3 提供多样的初始条件、载荷和约束功能	148
8.2 工程结构弹性时程抗震实例分析	148
8.2.1 问题描述与分析过程规划	148
8.2.2 建模与加载	149
8.2.3 结果分析与后处理	156
第9章 ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗撞击分析	162
9.1 LS-DYNA 分析撞击问题概述	162
9.2 落石冲击被动柔性防护网的数值分析	162
9.2.1 问题描述	162
9.2.2 建模与求解	163
9.2.3 结果后处理分析	175
第10章 ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗连续倒塌分析	185
10.1 问题描述与分析过程规划	185
10.2 建立分析模型	186
10.3 求解与结果分析	208
10.3.1 LS-DYNA 程序求解	208
10.3.2 读入结果文件	208
10.3.3 设置视图方向	209
10.3.4 失效节点处位移时程曲线	209
10.3.5 动态显示结构变形情况	210
10.3.6 动态显示应力等值线	210
参考文献	211

第1篇 基础篇

本篇以 ANSYS/LS-DYNA 的基本使用流程为主线，先扼要地介绍了 ANSYS/LS-DYNA 的发展过程、应用领域、基本理论、功能特点、计算流程，接着详细介绍如何建模、施加荷载与边界条件、如何求解及其控制，最后介绍了在计算结束之后如何对计算结果进行提取和处理。

第1章 ANSYS /LS-DYNA 概述

1.1 LS-DYNA 发展过程

LS-DYNA 是世界上最著名的通用显式动力分析程序,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、爆炸和金属成型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。在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析软件包,与实验的无数次对比证实了其计算的可靠性。

——DYNA 程序系列最初是 1976 年在美国 Lawrence Livermore National 国家实验室由 J. O. Hallquist 博士主持开发完成的,主要目的是为武器设计提供分析工具,后经 1979、1981、1982、1986、1987、1988 年版的功能扩充和改进,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 创建 LSTC 公司,推出 LS-DYNA 程序系列,并于 1997 年将 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 LS-DYNA 默认前后处理采用 ETA 公司的 FEMB,另外还包括另一个前后处理软件为 LS-PREPOST。1999 年 8 月 LSTC 发布 LS-DYNA950 版本,该版本增加了 LS-NIKE2D、LS-NIKE3D 隐式分析模块。2001 年 5 月, LSTC 发布 LS-DYNA960 版本,增加了不可压缩流体求解程序,并增加了一些新的材料模型和新的接触算法。随后, LSTC 又发布了 LS-DYNA970 和 971 版本,同时每个版本还有更细的分类,如: LS-DYNA 971 R3. 1. exe 和 LS-DYNA 971 R4. 2. exe 等,这些分类是依据求解器的版本分类的,目前 LS-DYNA 的最新版本是 LS-DYNA R7。

在 LS-DYNA 发展历程中,与 ANSYS 的合作是具有重要意义的事件之一。1996 年 LSTC 与 ANSYS 公司合作推出 ANSYS/LS-DYNA,以 ANSYS 作为前后处理,以 LS-DYNA 程序的求解器(即为 ls960. exe or ls970. exe 等, ANSYS/LS-DYNA 的版本不同,对应的求解器不同,求解器在 ANSYS 安装目录 bin \ intel 文件夹下),这个求解器和 LSTC 公司发行的 LS-DYNA 对应的版本求解器版本没有任何区别。ANSYS/LS-DYNA 目前是功能最丰富,全球用户最多的有限元显式求解程序,其用户主要是发达国家的研究机构、大学和世界各地的工业部门(航空航天、汽车、造船、零件制造和军事工业等)。应用领域包括:高速碰撞模拟(如飞机、汽车、火车、船舶碰撞事故引起的结构动力响应和破坏)、乘客的安全性分析(保护气囊与假人的相互作用,安全带的可靠性分析)、零件制造(冲压、锻压、铸造、挤压、轧制、超塑性成形等)、罐状容器的设计、爆炸过程、高速弹丸对靶板的穿甲模拟、生物医学工程、机械部件的运动分析等。ANSYS/LS-DYNA 强大功能的基础是求解器的理论基础和丰富算法。使用 ANSYS/LS-DYNA 程序进行动力分析,这样既能充分利用 LS-DYNA 强大的非线性分析能力,又能很好地利用 AN-

SYS 程序完善的前后处理能力。ANSYS/LS-DYNA 程序的架构如图 1-1 所示。

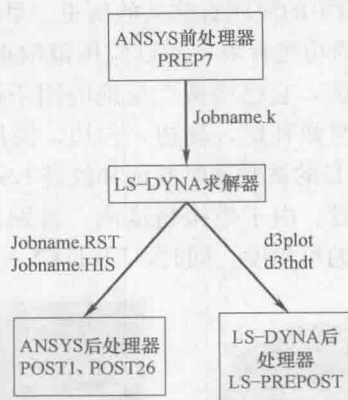


图 1-1 ANSYS/LS-DYNA 程序的架构

1.2 LS-DYNA 的应用领域

为解决理论分析和实验中不易处理的问题，LS-DYNA 已经被广泛引入到工业领域中，并对促进行业技术发展产生了深远的影响。表 1-1 为 LS-DYNA 的应用领域及相关的行业技术问题。

LS-DYNA 显示动力分析的应用领域

表 1-1

工程应用领域	具体的行业应用
汽车工业	具备模拟汽车碰撞结构时破损和乘员安全性分析的全部功能；假人系统进行碰撞仿真、气囊设计、乘客被动安全、部件加工、轮胎在积水路面排水性和动平衡分析
铁路机车领域	车辆防撞特性及乘员安全性分析、车辆零部件加工过程仿真以及加工工艺优化设计等
电子电器行业	跌落冲击分析、包装设计、热分析、电子封装
国防与军工	内弹道和终点弹道，装甲和反装甲系统，穿甲弹与破甲弹设计，战斗部结构设计，冲击波传播，侵彻与开坑，空气、水、土壤与容器中爆炸，爆炸成形，爆炸分离，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，核废料容器设计等
航空航天	鸟撞模拟、叶片包容性分析、发动机异物损伤、飞机结构冲击、碰撞、冲击爆炸及动态载荷、火箭级间分离模拟、宇宙垃圾碰撞、星际探测、特种复合材料设计、航空航天器零部件制造工艺仿真及优化等
土木建筑行业	地震安全、公路桥梁设计、路防装置设计、混凝土结构、爆破拆除
制造业	冲压、锻造、铸造、切割、点焊、铆接、螺纹连接结构的分析等
石油及海洋工程	液体晃动、完井射孔、管道设计、爆炸切割、事故模拟、海上平台设计

下面将从几个方面介绍 LS-DYNA 在其中一些领域中的应用情况。

1.2.1 LS-DYNA 在汽车碰撞技术中的应用

在汽车工业中，LS-DYNA 被广泛地应用于汽车设计领域。LS-DYNA 能够准确地预测出汽车的碰撞特性，以及汽车碰撞对乘客的影响，如图 1-2 所示。LS-DYNA 在汽车碰撞方面的开发致力于帮助汽车业界实现虚拟验证和减少汽车研发周期的目标。为满足预测碰撞分析准确性的要求，LS-DYNA 主要着重于材料失效，点焊和汽车设计的精确几何描述。

1.2.2 LS-DYNA 在板料成形模拟中的应用

LS-DYNA 在板料成形模拟中的应用有悠久的历史。早在 20 世纪 90 年代初，它就被应用于实际生产中。当时软件的功能有限，所以应用范围也很小。经过多年的发展，LS-DYNA 已经增加了许多新的功能，它已经被广泛地应用于模拟板料变形的各个过程，比如，成形性分析，回弹预测，回弹补偿，翻边，包边，液压涨形，热成形，等等，如图 1-3 所示。LSTC 公司也通过大量的试验及时验证和改进 LS-DYNA 软件，这样使 LS-DYNA 成为这一领域的技术领先者。由于模拟精度高，特别是准确对回弹的预测，使 LS-DYNA 在这一领域建立了很高的可信度。同时，LS-DYNA 的用户也得到大量增加。

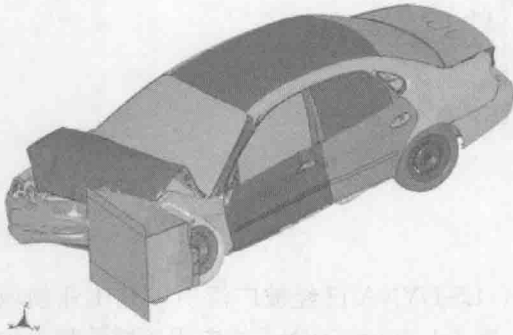


图 1-2 LS-DYNA 模拟汽车碰撞



图 1-3 LS-DYNA 模拟板料成形

1.2.3 LS-DYNA 在 MPP 的应用

为了提高计算能力，大规模并行处理技术 MPP (Massively Parallel Processing) 的概念被引入并付诸研发和制造。MPP 的机器可分为两种类型。一种是用网络连接数个功能强大的计算机，这种类型的计算机多采用 MIMD (多指令多数据) 的程序；另一种是利用许多简单的处理器做大量的类似计算，通称为 SIMD (单指令单数据)。为了获得最佳的计算性能，研发新的数值算法来配合这些硬件是绝对必要的。LS-DYNA 充分利用当前的多核芯片技术，支持并不断优化其分布式求解器 MPP 并行格式。LS-DYNA 可在单节点和多节点两种硬件环境下运行。此版本使用 MPI 在节点间传递信息，以实现运行的高效率。多年来对于并行计算的不断优化，使得 LS-DYNA/MPP 可维持线性的加速比到数百个芯片。随着 LS-DYNA 在国内汽车业的成熟和广泛的应用，为了达到更精确的仿真结果，从而减少碰撞试验的次数，建模的规模将越来越大，而 LS-DYNA/MPP 也日渐成为不可或缺的工具。

1.2.4 LS-DYNA 在隐式计算中的应用

长期以来，LS-DYNA 一直以强大的动态显式功能而闻名于世，用户常常求助 LS-NIKE3D 来进行隐式计算。多种软件给用户造成很多不便。从 1998 年开始，LS-NIKE3D (R) 被并入 LS-DYNA。从此以后，LS-DYNA 开始拥有显示和隐式计算功能。刚开始时，它的隐式计算功能的主要应用是板料的回弹计算。经过多年的改进，隐式计算功能已经得到了广泛的使用。在板料成形中，隐式计算在重力加载及压边圈合拢的模拟中已经成为常规算法；在汽车碰撞及安全模拟中，隐式计算已被应用于假人及整车的重力加载及碰

撞的模拟。另外, LS-DYNA 的隐式功能在疲劳、噪声及振动等方面的预测也开始得到很大的应用。可以预见, 随着时间的发展, LS-DYNA 的隐式计算功能将会得到越来越多的应用。

1.2.5 LS-DYNA 在气囊、ALE 和 SPH 中的应用

CPM 方法是一种基于运动分子理论来针对空气动力学模拟的多尺度方法。在 CPM 方法中, 每个颗粒代表一团空气分子。空气压力由离散的颗粒与气囊碰撞产生。空气的动力学效应由颗粒与颗粒之间的碰撞模拟。CPM 方法已经代替 ALE 方法成为处理异位气囊 (Out-of-Position), 帘气囊 (Curtain Airbag) 和多室气囊 (Multiple Chamber) 的标准模拟方法。

ALE 方法及其附属的流固耦合方法, 旨在模拟一系列流体与固体间具有较大动量和能量转换特点的瞬态工程问题。ALE 多材料单元模式允许同一网格中多种流体共存。进而它所带的流固耦合算法可分析固体结构与各单个流体之间的相互作用。这种优点使得它被广泛用于分析多种工程领域的问题。LS-DYNA 可优秀地解决携带较大动量或能量密度的流体撞击, 侵入结构这一类工程问题。

SPH 法, 作为一种无网格拉格朗日的颗粒方法, 有着它自身的优点。作为无网格方法, 它可以自然处理极端变形, 移动边界, 自由表面和可变形边界。作为拉格朗日方法, 物质点的物理变量随时间的变化可无需特殊处理而被轻易提取; 自由表面和移动边界, 以及物质界面的边界条件也自然满足。作为颗粒方法, 它可以自然地运用接触算法来处理流体和固体间的相互作用。SPH 方法在以下领域内被广泛使用: 高速冲击, 高能爆炸, 水下爆炸, 土壤侵入, 金属切削和成型, 复合材料, 飞鸟撞击, 不可压流, 自由边界流, 多相流, 油箱液体晃动, 油箱跌落, 热传导, 摩擦搅拌焊, 脆性断裂等。

1.2.6 LS-DYNA 在 EFG、频域分析、流体及流固耦合的应用

LS-DYNA 具有成熟的 EFG 实体, 板壳单元和自适应网格重分模块, 能运用于高精度模拟汽车碰撞, 零部件加工成形和材料断裂破坏等工程问题; LS-DYNA 在新的频域分析功能, 包括频率响应函数、稳能振动, 随机振动, 随机疲劳, 反应谱分析, 有限元和边界元声学等; LS-DYNA 中新增加可压缩流体, 不可压缩流体及流固耦合的计算模块和电磁场的数值计算模块使其能更好地运用于流体及流固耦合的分析中去。

1.3 LS-DYNA 的理论简介

目前, LS-DYNA 程序的主要算法常采用 Lagrangian 描述增量法来分析和处理问题。拉格朗日方法计算式把网格固定在材料上, 可以追踪物质的运动, 能够清楚地识别材料的边界和交界面, 因此能记录和表现材料性质的时间历史, 准确地反映材料的本构关系, 更重要的是此种方法具有较高的计算速度和精度。

LS-DYNA 程序基本理论大致可分为四部分, 一是建立基本方程, 确立控制条件。对初始时刻位于空间点 (x_1, x_2, x_3) 的物质质点运动轨迹进行跟踪, 其运动轨迹方程为:

$$x_i = x_i(X, t)$$

然后, 综合质量守恒、动量守恒和能量守恒等理论, 并结合变形率、本构关系、边界条件和运动初始条件等, 来进行状态方程和总的能量平衡计算。

二是有限元空间离散过程，由于动量守恒条件要求在求解区域内处处满足，上述求解很难实现，故可从微分方程的弱形式出发，只要求动量方程在内积意义下满足，推导出虚功率方程，并经有限元离散化后，得到节点位移方程，进而求得当前时刻的结构应变与应力。

三是简化积分单元与沙漏控制，由于有限元空间离散过程的计算式非线性动力方程数值计算，故耗费机时过多且计算过程也极其复杂。在显式积分的每一时步，单元计算的机时占总机时的主要部分。由于单元积分点的个数与 CPU 时间成正比，因此简化积分单元是解决耗时过多的有效方法。为此，LS-DYNA 程序采用单点高斯积分。

但是，采用单点高斯积分来简化积分单元有两个缺点，应力结果的精确度与积分点直接相关，并且可能引起零能模式。所谓零能模式就是指某些位移模态，在积分时，对应变能没有任何抵抗，通常会引起极大的震动，甚至使计算无法进行，因此，需要控制零能模式。

四是显式时间积分与时步控制，LS-DYNA 的离散化结构运动方程为（计入阻尼影响）：

$$M\ddot{X} = P - F + H - C\dot{X}$$

其中 $P = f^{ext}$ ， $F = f^{int}$ ，其时间积分采用显式中心差分方法。

由于采用集中质量阵，因此运动方程组求解是非耦合的，无需集成总体矩阵，可提高计算效率，但显式差分不是无条件稳定的，为保证效率，LS-DYNA 采用变步长积分法，每一时刻的积分步长由当前构形的稳定性条件控制。

至于具体的算法理论将于第 7 章详细介绍。

1.4 LS-DYNA 的功能特点

LS-DYNA 程序 971 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（200 多种材料动态模型）和接触非线性（50 多种）程序。它具有多种求解算法，以 Lagrange 算法为主，兼有 ALE、Euler 算法、SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）光顺质点流体动力算法和边界元法 BEM（Boundary Element Method）；以显式求解

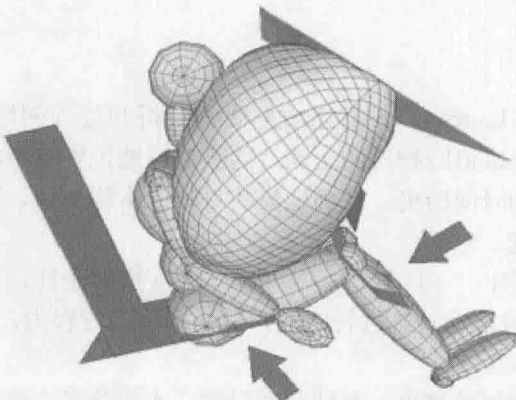


图 1-4 汽车安全气囊模拟分析

为主，兼有隐式求解功能，适合于求解高度非线性问题；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；极好的并行计算能力，包括分布式并行算法（MPP）和共享内存式并行（SMP）；良好的自适应网格剖分技术，包括自适应网格细分和粗化；行业化的专用功能：如针对汽车行业的安全带单元、滑环、预紧器、牵引器、传感器、加速计、气囊等。图 1-4~图 1-7 是 LS-DYNA 在结构非线性分析中的实例。

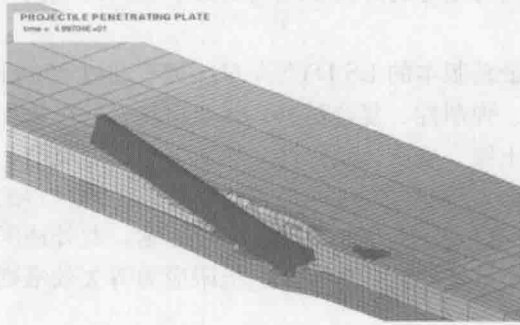


图 1-5 侵蚀接触

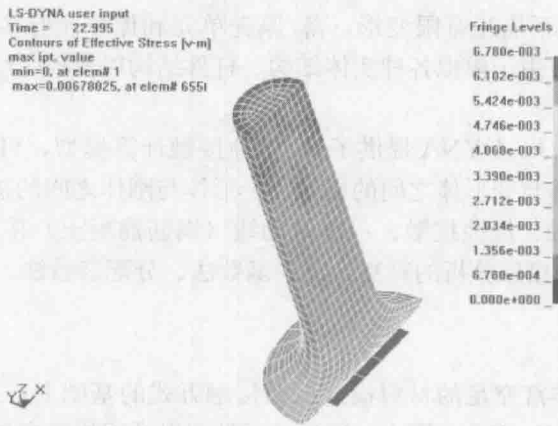


图 1-6 泰勒杆冲击

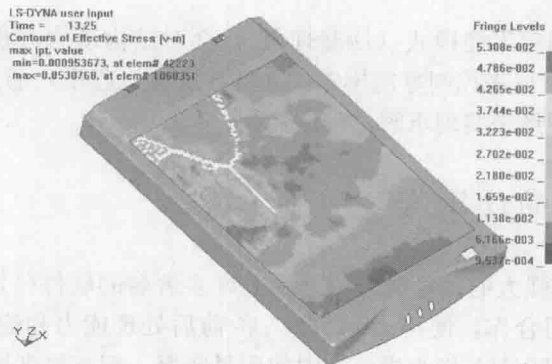


图 1-7 飞机跌落分析

LS-DYNA 主要的功能特点如下所述。

1.4.1 分析能力强

最新版本的 LS-DYNA 是一个能够进行多场分析的程序，其不仅具有非线性动力学分析、多刚体动力学分析等显示分析，还具有静态分析、瞬态动力学分析、线性分析、屈曲分析等隐式分析；不仅具有热分析、流体分析，还具有热-热、热-结构、流固耦合分析；

不仅具有优化设计，还具有很好的并行处理（SMP、MMP）等。

1.4.2 材料模型丰富

在材料模型方面，最新版本的 LS-DYNA 目前拥有超过 200 种的金属和非金属材料的本构模型，涵盖了弹性、弹塑性、复合材料、蜂窝材料、丝织物、胶类物、生物肌体、炸药、推进剂、混凝土、土壤、地质、超弹性、橡胶、泡沫、玻璃、粘性流体、刚体等各种材料模型，提供了流体动力材料可附加状态方程，可以考虑材料的失效、损伤、粘性、松弛、各向异性、温度相关以及应变率相关等动力学因素，此外还配有材料主应力、等效应力、主应变、剪切应变、等效应变、静水压、极限应力等失效准则。

1.4.3 单元库便捷实用

LS-DYNA 的单元类型众多，具有体单元、薄/厚壳单元、梁单元、焊单元、离散单元束、索单元、安全带单元、节点质量单元以及 SPH 单元等。其中，所有的结构单元采用 Co-Rotation 坐标系描述有限变形，薄/厚壳单元和体单元有多种算法，包括单点积分和缩减积分算法，可用于模拟各种实体结构、杆件结构以及板壳结构等。

1.4.4 接触方式全面

在接触分析方面，LS-DYNA 提供了 50 多种接触计算模型，可以分析各种分析对象的接触行为，如变形体与变形体之间的接触、变形体与刚体之间的接触、离散体与变形体之间的接触、单面接触、侵蚀接触、一维滑动线（钢筋混凝土）接触等。此外，LS-DYNA 程序还提供了三种接触分析的算法，即罚函数法、分配参数法、节点约束法，可用于各类接触分析。

1.4.5 数值处理技术

LS-DYNA 在其丰富充足的材料模式以及接触方式的基础上，采用以 Lagrange 算法为主，兼有先进的 ALE、Euler 算法，通过并行处理以及网格畸变处理使计算过程无收敛迭代，依靠小时步保证计算精度；采用集中质量矩阵，无总体刚度矩阵，计算速度快。

1.4.6 求解控制技术

由于单点积分可引起零能模式（沙漏现象），会对结构动力分析产生影响，因此 LS-DYNA 采用沙漏粘性阻尼来控制零能模式，并且在求解过程中，通过子循环、质量缩放、重新启动、交互式实时图形来实现求解过程的控制。

1.5 LS-DYNA 的计算流程

LS-DYNA 由于其强大的计算能力，世界上许多著名的软件公司（如 ANSYS、ETA 等）纷纷与 LSTC 公司合作，使得 LS-DYNA 的前后处理能力和通用性得到了极大的加强。其中 ANSYS/LS-DYNA 作为当前国内使用最频繁、拥有最多用户的软件，用户可以利用 APDL 语言快速创建完全参数化的显式分析模型，利用内置的显式分析菜单功能进行显示分析参数设置，输出关键字文件并递交 LS-DYNA 求解，生成图形文件和时间历程文件，再利用 ANSYS 两个后处理器 POST1 和 POST26 进行计算结果分析，或利用 LS-DYNA 自带的后处理程序 LS-PREPOST 进行计算结果的可视化处理。一般情况下，在 ANSYS/LS-DYNA 中，计算流程可归结为前处理、求解、后处理三个基本操作环节。

下面对显示分析的基本过程予以简单的阐述。