The logo features a large, stylized red letter 'A' with a black outline and a red swoosh extending from its top left. To the right of the 'A', the text 'NSYS/LS-DYNA' is written in white, uppercase letters on a red rectangular background.

ANSYS/LS-DYNA

在爆炸与冲击 领域内的工程应用

石少卿 康建功 汪 敏 刘 云 李秀地 等编著

A large, colorful abstract graphic at the bottom of the cover, consisting of overlapping, curved bands of various colors including yellow, orange, red, purple, and blue, creating a sense of motion and energy.

中国建筑工业出版社

ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与 冲击领域内的工程应用

石少卿 康建功 汪敏 刘云 李秀地 等编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用/石少卿等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-112-12741-2

I. ①A… II. ①石… III. ①有限元分析-应用程序, ANSYS/LS-DYNA IV. ①0241. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 247976 号

本书共 10 章, 1~8 章介绍了 LS-DYNA 的基本功能, 9~10 章重点给出了 LS-DYNA 在爆炸和冲击领域中的多个应用算例, 并附有 K 文件, 以方便读者学习及参考使用。

本书可供从事国防与民用建筑受爆炸冲击作用分析的技术人员参考使用。也可供该软件学习与使用者参考。

* * *

责任编辑: 王 梅
责任设计: 张 虹
责任校对: 马 赛 王雪竹

ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用

石少卿 康建功 汪 敏 刘 云 李秀地 等编著

*

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

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 256 千字

2011 年 3 月第一版 2011 年 3 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12741-2

(20009)

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

本书主要介绍了 ANSYS/LS-DYNA 程序的功能特点、单元特性及定义、材料模型的应用、几何模型的建立方法、网格划分、PAPT 的建立和接触的定义、荷载约束与边界条件的施加、求解与求解控制以及后处理等方面的内容。重点对 ANSYS/LS-DYNA 软件在爆炸与冲击领域内的典型工程应用进行叙述，给出了四个典型算例的求解过程。算例主要包括爆炸冲击波在坑道内传播规律的数值模拟、炮弹在土中爆炸的数值模拟、弹体侵彻六边形钢管混凝土的数值模拟以及落石冲击钢丝绳网的数值模拟。算例计算步骤简明扼要，可操作性强，所有算例均附有命令流及 K 文件。

本书可供读者学习和熟练掌握 ANSYS/LS-DYNA 软件时使用，为读者应用 ANSYS/LS-DYNA 软件分析冲击和爆炸领域内的相关问题打下基础。可作为高等院校相关专业的本科生、研究生及教师学习 ANSYS/LS-DYNA 软件的教材，也可供从事爆炸与冲击领域内相关研究的人员作参考。

参加本书编写的人员有后勤工程学院的石少卿、康建功、汪敏、李秀地以及西藏农牧学院的刘云等。本书得到了总部科研课题 BY206C002 和 BY208J045 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 ANSYS/LS-DYNA 简介	1
1.1 LS-DYNA 程序的发展历程	1
1.2 LS-DYNA 的功能特点	2
1.3 ANSYS/LS-DYNA 程序的理论简介	5
1.4 ANSYS/LS-DYNA 界面简介	7
第 2 章 ANSYS/LS-DYNA 的单元特性及定义	9
2.1 ANSYS/LS-DYNA 单元概述	9
2.2 ANSYS/LS-DYNA 的单元特性	9
2.3 ANSYS/LS-DYNA 的单元定义	17
第 3 章 ANSYS/LS-DYNA 的材料模型简介及使用	20
3.1 材料模型概述	20
3.2 线性材料模型	20
3.3 非线性材料模型	23
3.4 状态方程	27
3.5 离散单元材料	28
3.6 刚体材料模型	28
3.7 材料模型的使用	29
第 4 章 ANSYS/LS-DYNA 几何模型的建立	32
4.1 几何模型建立的流程	32
4.2 ANSYS 建模的常用方法	35
4.3 几何模型建立的注意事项	42
第 5 章 网格划分、PART 建立及接触定义	43
5.1 网格划分的步骤	43
5.2 网格划分的方法	44
5.3 PART 的建立	46
5.4 LS-DYNA 的接触定义	47
第 6 章 荷载、约束与边界条件	52
6.1 荷载的施加	52
6.2 初始条件的施加	57
6.3 边界条件的施加	58
6.4 约束的施加	60
第 7 章 求解与求解控制	64
7.1 求解基本参数的设定	64

7.2	输出文件控制	65
7.3	LS-DYNA 求解过程与重启动	66
7.4	K 文件的生成与修改	70
第 8 章	ANSYS/LS-DYNA 后处理	74
8.1	LS-PREPOST 程序界面简介	74
8.2	LS-PREPOST 程序功能介绍	75
第 9 章	ANSYS/LS-DYNA 在爆炸领域中的应用实例	82
9.1	应用 ANSYS/LS-DYNA 分析爆炸问题概述	82
9.2	爆炸冲击波在坑道内传播规律的数值模拟	82
9.3	炮弹在土中爆炸的数值模拟	110
第 10 章	ANSYS/LS-DYNA 在冲击领域中的应用实例	122
10.1	应用 LS-DYNA 分析冲击问题概述	122
10.2	弹体侵彻六边形钢管混凝土的数值模拟	122
10.3	落石冲击钢丝绳网的数值模拟	142
	参考文献	157

第1章 ANSYS/LS-DYNA 简介

1.1 LS-DYNA 程序的发展历程

LS-DYNA 是一种基于显式的大型非线性有限元程序。有限元法是解决工程实际问题的一种有力的数值计算工具，它是一种将弹性理论、计算数学和计算机软件有机地结合在一起的一种数值分析方法；在计算机问世之前，传统的结构分析是建立在手算的基础之上。由于受到计算手段的限制，计算对象只能局限于一些小型问题。20 世纪 50 年代，随着喷气飞机逐步取代螺旋桨飞机，飞机的结构愈加复杂，这对航空设计部门提出了更高的要求。以美国波音公司的 M. J. Turner、英国伦敦大学的 J. H. Argyris 为代表，提出了结构矩阵分析方法。结构矩阵分析是结构力学的一种分析方法，他认为整体结构可以看作是由有限个小单元相互连接而组成的集合体，每个单元的力学特性可以比作建筑物中的砖瓦，装配在一起就能提供整体结构的力学特性。1960 年美国加州大学伯克利分校的 R. W. Clough 在总结前人工作的基础上，首先正式使用“有限单元”（Finite Element）这一术语，并用有限元的思想求解了平面弹性问题。从此，不但工程技术人员开始认识有限元法的功效，数学家和力学家也看到了有限元法的巨大前景，相继从理论上对有限元法进行了深入的探讨，使有限元法建立在更为坚实的理论基础之上。在工程技术人员和理论工作者的共同努力下，有限元法成为解决各种力学问题的最有效的方法之一。图 1-1 是用有限元方法分析飞机机翼的网格划分图。

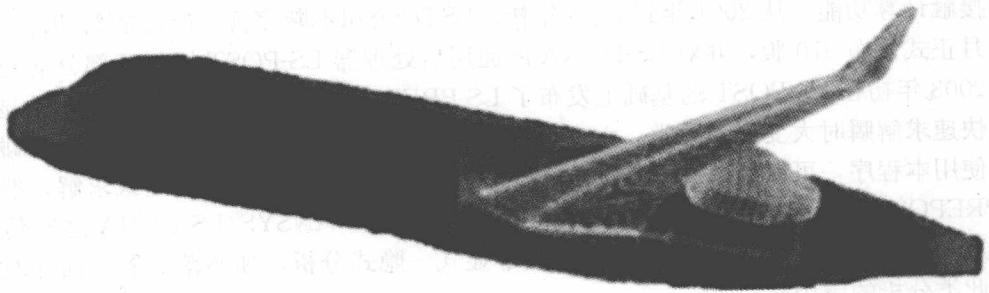


图 1-1 飞机机翼的有限元网格

显式有限元方法的研究工作最早是由 Wilkins 于 1964 年开始的。1967 年 Costantino 开发了可能是第一个显式有限元程序。经过多年众多学者的潜心研究，显式有限元技术取得了突破性的进展。

LS-DYNA 程序最初称为 DYNA 程序，它是 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，参与研究的人员主要还包括：Berkeley 的 Jerry Goundreau、Bob Taybor、Tom Hughes 和

Juan Simo 等研究人员。当时主要用于求解三维非弹性结构在高速碰撞、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核武器弹头设计开发分析工具。其时间积分采用中心差分格式，软件推出后深受广大用户的青睐。随后经历了 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、爆炸与冲击分析等方面得到了广泛的应用。

1988 年底，J. O. Hallquist 博士创建了 LSTC 公司，大大加快了软件开发的步伐，DYNA 程序走上了商业化发展历程，并更名为 LS-DYNA，同时将 LS-DYNA 的应用由国防军工推广到民用产品。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、前后处理等商用程序。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），增加了汽车安全性分析、薄板冲压成形过程模拟、ALE 和 Euler 算法、流固耦合分析等新功能，使得 DYNA 程序在国防和民用领域的应用范围不断扩大，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-TOPAZ-3D 等程序合为一个软件包，称为 LS-DYNA（940 版）。由于 LS-DYNA 计算功能强大，世界上十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。LS-DYNA 的 PC 版前后处理器采用 ETA 公司的 FEMB，新开发的后处理器为 LS-POST。1996 年 LSTC 公司与 ANSYS 公司合作推出 ANSYS/LS-DYNA，大大增强了 LS-DYNA 的分析能力，用户可以充分利用 ANSYS 的前后处理和统一数据库的优点。

1999 年 8 月 LSTC 公司推出 LS-DYNA950 版。2001 年 5 月，LSTC 公司推出了 960 版，在 950 版的基础上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。从 2001 年到 2003 年初，LSTC 公司不断完善 960 版的新功能，2003 年 3 月正式发布 970 版，并对 LS-DYNA 的通用后处理器 LS-POST 增加了部分前处理功能，2003 年初在 LS-POST 的基础上发布了 LS-PREPOST1.0 版。用 LS-DYNA 的显式算法能快速求解瞬时大变形动力学、大变形和多重非线性准静态问题以及复杂的接触碰撞问题。使用本程序，可以用 ANSYS 建立模型，用 ANSYS/LS-DYNA 做显式求解，然后用 LS-PREPOST 后处理来观看结果。也可以在 ANSYS 和 ANSYS/LS-DYNA 之间传递几何信息和结果信息以执行连续的隐式—显式/显式—隐式分析，如坠落实验、回弹及其他需要此类分析的应用。

1.2 LS-DYNA 的功能特点

LS-DYNA 程序作为世界上最著名的通用显式动力分析程序，可以模拟任何复杂的结构计算问题，特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、侵彻和爆炸冲击等非线性动力问题，同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。

LS-DYNA 是功能齐全的几何非线性（大位移、大转动和大应变）、材料非线性和接触非线性程序，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、流体-结构耦合分析功能；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形后的回弹计算）。它计算的可靠性已经被无数次试验所证明，在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析程序，也是军用和民用相结合的通用非线性有限元程序。主要功能特点如下：

1. 分析功能强大

应用 LS-DYNA 可以进行的分析包括：

- (1) Nonlinear dynamics 非线性动力学
- (2) Rigid body dynamics 刚体动力学
- (3) Quasi-static simulations 准静态模拟仿真
- (4) Normal modes 一般模型
- (5) Thermal analysis 温度场分析
- (6) Fluid analysis 流体分析 Fluid-structure interactions 流固交互作用分析
- (7) FEM-rigid multi-body dynamics coupling 有限元与刚体动力学耦合分析
- (8) Underwater shock 水下冲击分析
- (9) Failure analysis 失效分析
- (10) Crack propagation 裂纹扩展分析
- (11) Real-time acoustics 实时声场分析
- (12) Design optimization 优化设计
- (13) Multi-physics coupling 多物理场耦合分析
- (14) Structural-thermal coupling 结构-温度场耦合作用
- (15) Smooth particle hydrodynamics 光滑粒子杂交动力学
- (16) Element-free meshless method 无单元的无网格法分析

2. 单元类型众多

LS-DYNA 程序的单元类型众多，仅显式单元有：杆单元、梁单元、二维实体单元、薄壳单元、三维实体单元、无质量弹簧阻尼单元、集中质量单元、索单元、10 节点四面体单元等九种类型（详见第 2 章单元类型）。各类单元又有多种理论算法可供用户选择。

3. 材料模型丰富

LS-DYNA 拥有十分丰富的材料模型数据库，图 1-2 显示了 LS-DYNA 中的材料类型树形目录。

每一个树形目录下还有多种材料模型，详细介绍见第 3 章。使用者也可以自行定义材

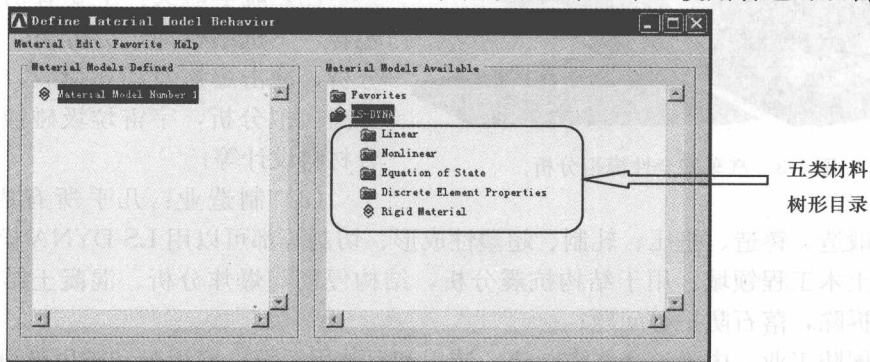


图 1-2 LS-DYNA 中的材料类型树形目录

料模型库，具有强大的扩充性。

4. 接触 (Contact) 分析功能齐全

LS-DYNA 程序的全自动接触分析功能齐全，易于使用，非常有效，有 50 多种选择。可以求解下列接触问题：变形体对变形体的接触、变形体对刚体的接触、刚体对刚体的接触、板壳结构的单面接触、与刚性墙接触、表面与表面固连、节点与表面固连、壳边与壳面的固连、流体与固体的界面等，并可考虑接触表面的静动摩擦力和固连失效。这种技术成功地用于整车碰撞研究、乘员与柔性气囊或安全带接触的安全性分析、薄板与冲头和模具接触的金属成型、水下爆炸对结构的影响等。

5. 荷载、初始条件和约束功能全面

LS-DYNA 程序中，荷载、初始条件和约束功能全面，主要包括：

- (1) 初始速度、初应力、初始动量；
- (2) 高能炸药起爆设置；
- (3) 节点荷载、压力荷载、体力荷载、热荷载、重力荷载；
- (4) 循环约束、对称约束、透射边界；
- (5) 给定节点运动、节点约束；
- (6) 铆接、焊接；
- (7) 两个刚性体之间的连接——球形连接、旋转连接、柱形连接、平面连接、平移连接；
- (8) 位移/转动之间的线性约束、壳单元与固体单元之间的固连；
- (9) 带失效的节点固连。

6. 应用领域广泛

ANSYS/LS-DYNA 的用户主要是各个国家的研究机构、大学和世界各地的工业部门，如航空航天、交通运输、零件制造和军事工业等部门。应用领域主要有：

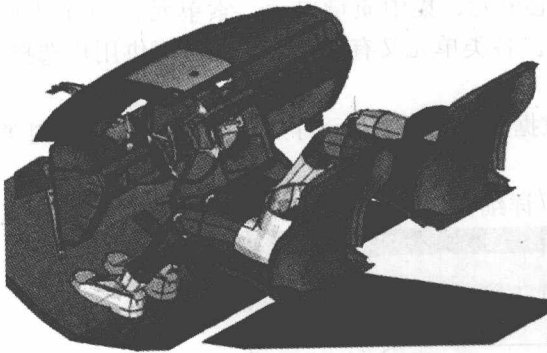


图 1-3 汽车安全性模拟分析

(1) 汽车工业：碰撞分析，气囊设计，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）部件加工等，图 1-3 为汽车安全性模拟分析有限元模型图；

(2) 航空航天：主要有鸟撞，叶片包容，飞机结构冲击力分析，碰撞坠毁分析，冲击爆炸及动态荷载，火箭级间分离模拟分析，宇宙垃圾碰撞，特种复合材料设计等；

(3) 制造业：几乎所有成型过程，如冲压、锻造、铸造、挤压、轧制、超塑性成形、切割等都可以用 LS-DYNA 模拟；

(4) 土木工程领域：用于结构抗震分析，结构侵彻与爆炸分析、混凝土结构性能研究，爆破拆除，落石防护等问题；

(5) 国防工业：内弹道和终点弹道，装甲和反装甲系统，穿甲弹和破甲弹设计，战斗部结构设计，冲击波传播，爆炸过程，高速弹丸对板靶的穿甲模拟，侵彻和开坑，空气、

水与土壤中爆炸,核废料容器设计等;

(6) 电子领域: 跌落分析, 包装设计, 热分析, 电子封装;

(7) 石油工业: 液体晃动, 管道设计, 爆炸切割, 事故模拟, 海上平台设计;

(8) 其他应用: 玻璃成型, 生物医学, 体育器材设计分析(如高尔夫杆、高尔夫球、棒球杆、头盔), 磁悬浮分析(图 1-4)等;

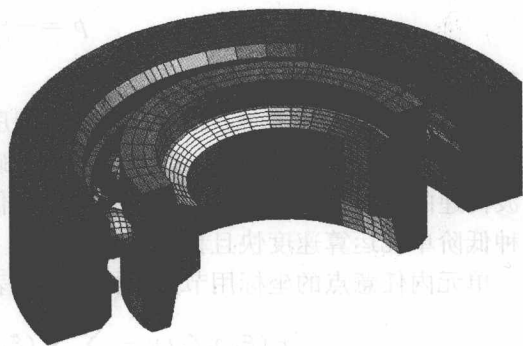


图 1-4 磁悬浮转子的模拟

由此可见, LS-DYNA 在很多领域都有其应用实例, 有力促进了这些行业的技术发展, 影响十分深远。

ANSYS/LS-DYNA 强大功能的基础是求解器的理论基础和丰富算法。下面对其基本理论进行简要介绍。

1.3 ANSYS / LS-DYNA 程序的理论简介

1.3.1 基本控制方程

LS-DYNA3D 程序的主要算法采用 Lagrangian 描述增量法。

取初始时刻的质点坐标为 $X_i (i = 1, 2, 3)$, 在任意 t 时刻, 该质点坐标为 $x_i (i = 1, 2, 3)$ 。这个质点的运动方程是

$$x_i = x_i(X_j, t) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1-1)$$

在 $t = 0$ 时, 初始条件为

$$x_i(X_j, 0) = X_i \quad (1-2)$$

$$\dot{x}_i(X_j, 0) = V_i(X_j, 0) \quad (1-3)$$

式中, V_i 为初始速度。

(1) 动量方程

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (1-4)$$

式中, σ_{ij} 表示 Cauchy 应力; f_i 为单位质量体积力; \ddot{x}_i 为加速度。

(2) 质量守恒方程

$$\rho V = \rho_0 \quad (1-5)$$

式中, ρ 为当前质量密度; ρ_0 为初始质量密度; $V = |F_{ij}|$ 为相对体积; $F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$ 为变形梯度。

(3) 能量方程

$$\dot{E} = VS_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} - (p+q)\dot{V} \quad (1-6)$$

用于状态方程和总的能量平衡计算。式中, V 为现时构形的体积; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量; q 为体积黏性阻力。偏应力 S_{ij} 和压力 p 的表达式如下:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + (p+q)\sigma_{ij} \quad (1-7)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} - q \quad (1-8)$$

1.3.2 空间有限元的离散化

在实体单元的计算时，LS-DYNA3D 程序曾经采用 20 节点 $2 \times 2 \times 2$ 高斯积分实体单元，但在工程计算中发现，高阶单元虽能准确计算低频动力响应，但用于高速碰撞以及应力波传递的动力分析问题，它的运算速度过低而不实用。现采用 8 节点六面体实体单元，这种低阶单元运算速度快且精度高。

单元内任意点的坐标用节点坐标插值可表示为

$$x_i(\xi, \eta, \zeta, t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_j^i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1-9)$$

式中， ξ, η, ζ 为自然坐标； $x_j^i(t)$ 为 t 时刻第 j 节点的坐标值；形状函数 $\phi_j(\xi, \eta, \zeta)$ 为

$$\phi_j(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_j)(1 + \eta\eta_j)(1 + \zeta\zeta_j) \quad j = 1, 2, \dots, 8 \quad (1-10)$$

式中， (ξ_j, η_j, ζ_j) 为单元第 j 节点的自然坐标。

式 (1-9) 也可用矩阵表示为

$$\{x(\xi, \eta, \zeta, t)\} = [N] \{x\}^e \quad (1-11)$$

式中，单元内任意点坐标矢量

$$\{x(\xi, \eta, \zeta, t)\}^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3] \quad (1-12)$$

单元节点坐标矢量

$$\{x\}^{eT} = [x_1^1, x_2^1, x_3^1, \dots, x_1^8, x_2^8, x_3^8] \quad (1-13)$$

插值矩阵为

$$[N(\xi, \eta, \zeta)] = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \dots & \phi_8 & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & \dots & 0 & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & \dots & 0 & 0 & \phi_8 \end{bmatrix}_{3 \times 24} \quad (1-14)$$

1.3.3 简化积分单元与沙漏控制

非线性动力分析程序用于工程计算，最大的困难是耗费机时过多。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。除了计算时间，简化积分单元对于处理大变形分析很有效。LS-DYNA3D 程序采用单点高斯积分，可以极大地节省数据存储量和运算次数。但是简化积分单元有两个缺点：1. 应力结果的精确度与积分点直接相关。2. 可能引起零能模式，即沙漏模式。

沙漏是一种以比结构全局响应高得多的频率震荡的零能变形模式。下面以 4 节点双线性二维单元为例来说明沙漏模式。4 节点双线性二维单元有 8 个自由度，可能出现如图

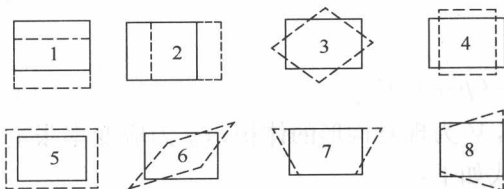


图 1-5 四节点双线性二维单元的位移模式

1-5 所示的 8 种独立的位移模式。图中第 1、2、3 种模式为刚体运动，对它们来讲，不管积分公式如何，其应变能总是等于 0；第 4、5、6 种模式为常应变模式，对它们来讲，总有应变能大于 0，与采用的积分公式无关；第 7、8 种模式为弯曲模式，采用单

点积分时,也有应变能等于0。由此可见,所谓零能模式,就是指某些位移模式,在积分时,对应变能没有任何抵抗,通常会引起极大的振荡,甚至使计算无法进行。沙漏模式将导致一种在数学上是稳定的,但在物理上是一种不可能的状态。沙漏的出现会导致结果无效,应尽量避免和减小。LS-DYNA3D 程序中采用沙漏阻尼以控制零能模式。

1.3.4 时间积分和时间步长控制

LS-DYNA3D 程序的运动方程考虑阻尼影响后为:

$$M\ddot{x}(t) = P - F + H - C\dot{x} \quad (1-15)$$

式中, M 为总体质量矩阵; P 为总体载荷矢量; F 由单元应力场的等效节点力矢量组集而成; H 为总体结构沙漏黏性阻尼力; $C = cM$, 为阻尼系数矩阵, 其中 c 为阻尼常数。

采用显式中心差分法时间积分的算式为:

$$\left. \begin{aligned} x(t_n) &= M^{-1}[P(t_n) - F(t_n) + H(t_n) - c\dot{x}(t_{n-\frac{1}{2}})] \\ \dot{x}(t_{n+\frac{1}{2}}) &= \dot{x}(t_{n-\frac{1}{2}}) + \frac{1}{2}(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n)\ddot{x}(t_n) \\ x(t_{n+1}) &= x(t_n) + \Delta t_n\dot{x}(t_{n+\frac{1}{2}}) \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

式中, $t_{n-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(t_n + t_{n-1})$; $t_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(t_{n+1} + t_n)$; $\Delta t_{n-1} = (t_n - t_{n-1})$; $\Delta t_n = (t_{n+1} - t_n)$; $\ddot{x}(t_n)$, $\dot{x}(t_{n+\frac{1}{2}})$, $x(t_{n+1})$ 分别是 t_n 时刻的节点加速度矢量、 $t_{n+\frac{1}{2}}$ 时刻的节点速度矢量、 t_{n+1} 时刻的节点坐标矢量。

1.4 ANSYS / LS-DYNA 界面简介

启动 ANSYS 就进入到 ANSYS/LS-DYNA 的分析操作界面, 如图 1-6 所示。

ANSYS/LS-DYNA 分析操作界面从上至下, 从左至右分别有以下几个分区:

1. 菜单栏: 通过菜单栏可实现工作管理、外部接口、实体选择、文件信息列表、图形界面的显示控制、工作平面的设置与转换、参数的设定与输入、外部宏的设置、菜单样式管理及帮助文件查询等工作。

2. 快捷菜单: 快捷菜单可实现快速文件管理与输出。如快速打开文件、快速保存文件、快速打印当前窗口图片、快速寻求帮助等功能。

3. 命令输入窗口: 通过该窗口与 APDL 参数化语言可实现 ANSYS/LS-DYNA 全部的操作与分析。它是 ANSYS/LS-DYNA 操作分析的一种全面而快捷的方式, 但困难的地方在于需要掌握 APDL 语言。相比图形界面操作方式 (GUI), 它的优点在于快速、高效, 而缺点是上手比较困难、操作过程不直观、需要对 APDL 语言及整个分析问题具有较高程度的把握才行。

4. 工具栏: 该栏的主要功能与快捷菜单基本相同, 它可以定义一些使用频率比较高

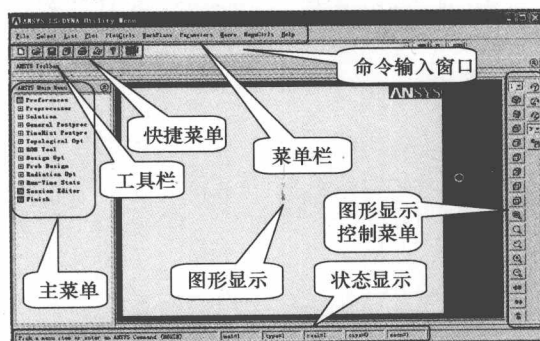


图 1-6 ANSYS/LS-DYNA 分析操作界面

的操作命令，方便操作者快速、高效进行操作。减少点击寻找菜单的时间。

5. 主菜单：主菜单是整个图形界面（GUI）操作的核心，它的编排顺序与有限元分析顺序相同。主要分为前期模块筛选（Preferences）、前处理模块（Preprocessor）、计算分析模块（Solution）、后处理（通用后处理 General Postproc，时间历程后处理 TimeHist Postproc）及其他一些分析模块。

6. 图形显示模块：以图像的形式显示当前操作产生的结果。

7. 图形显示控制菜单：控制图形显示区内图形的显示方式，如完全显示、局部放大、正面投影、侧面投影、45度三维显示、图像向左移动、向右移动、沿各个坐标轴旋转等等。

8. 状态显示栏：及时显示当前操作命令、所进行操作对应的坐标系、材料模型、实常数、单元类型等信息。便于操作者核对所进行的操作是否正确。这些界面如何运用将在后面章节再作详细介绍。



第2章 ANSYS/LS-DYNA 的 单元特性及定义

2.1 ANSYS/LS-DYNA 单元概述

LS-DYNA 程序提供了丰富的单元库，包括体单元、薄壳单元、厚壳单元、梁单元、杆单元、惯性与质量单元、弹簧阻尼单元等类型。这些单元均是采用线性位移插值函数的低阶单元，默认算法为缩减积分算法。这种线性位移插值函数和单点积分算法的显式动态单元可以很好地用于各种大变形以及材料失效等高度非线性问题的分析中。在 ANSYS/LS-DYNA 程序中，共提供了如下 9 种类型的显式分析单元，其选项覆盖了 LS-DYNA 求解器的大部分单元算法，如表 2-1 所示。

ANSYS/LS-DYNA 显式分析的单元类型

表 2-1

单元名称	单元描述及应用场合
LINK160	三维杆单元，只承受轴向荷载，可用于各类桁架结构的弹性及塑性分析
BEAM161	三维梁单元，可用于产生有限应变和刚体旋转等情况
PLANE162	二维实体单元，用于模拟平面问题或空间轴对称问题
SHELL163	薄壳单元，有弯曲和膜特征，可加平面和法向荷载
SOLID164	三维实体单元，可以退化为具有重节点的楔形、锥形、四面体单元
COMBI165	无质量弹簧-阻尼单元，可为线弹簧或旋转弹簧
MASS166	集中质量单元，由一个单节点和质量值（质量或者转动惯量）定义
LINK167	仅承受拉伸的显式单元，可用于模拟索
SOLID168	10 节点四面体单元，适用于处理不规则几何模型的网格划分

上述每一种单元可通过不同的选项设置来实现不同的算法。除 SOLID168 之外，各种单元类型默认的算法是缩减积分算法，仅包含一个积分点。下面将针对 ANSYS/LS-DYNA 中各类单元的定义以及选项设置进行简单介绍。

2.2 ANSYS/LS-DYNA 的单元特性

2.2.1 LINK160 杆单元

LINK160 单元是 3D 圆杆单元，用 3 个节点定义，每个节点有三个自由度，并且只能承受轴向荷载。图 2-1 所示为 LINK160 杆单元的几何形状和节点位置。它可以支持显式动力学分析的所有非线性特征。

LINK160 单元的基本特性如下：

(1) 该单元通过两个节点 I 、 J 定义，杆的长度必须大于 0，因此节点 I 、 J 不能重合。另一个节点 K 为辅助节点，仅在定义单元横截面的方位时使用。

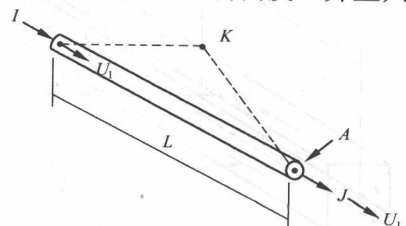


图 2-1 LINK 160 单元

(2) 它是一个均匀截面的等值杆单元，单元横截面积可以通过实参数定义（图 2-2），且横截面积必须大于 0。

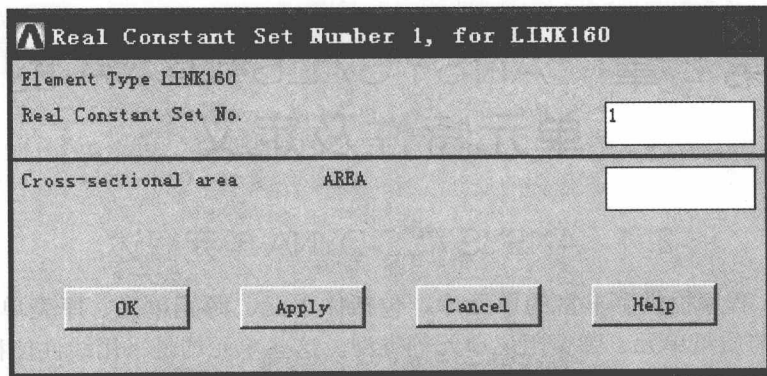


图 2-2 LINK 160 单元实参数定义对话框

(3) 对这种单元，可以选择三种材料模型：各向同性弹性材料、随动塑性材料和双线性随动硬化材料。

(4) 只能承受轴向的荷载，可以处理各类桁架结构的弹性以及塑性定义。

(5) 使用 EDLOAD 命令施加节点荷载（位移、力等）。也可以使用 EDLOAD 命令在刚性体上施加荷载。

(6) 由于采用线型的形函数，因此单元中的应力为均匀分布。

(7) LINK160 的输出数据为轴向力，可以使用 ETABLE 命令输出数据。在 ITEM 栏，填写 SMISC。在 COMP 栏，对轴向力来说填写“1”。之后就可以使用 PRETAB 命令输出数据。输出结果项目中的 VX、VY、VZ 和 AX、AY、AZ 为节点速度和加速度，以自由度的形式存储以备后处理，但它们实际上并不是物理意义上的自由度。

2.2.2 BEAM161 梁单元

BEAM161 梁单元用 3 个节点定义，由于不产生应变，因此适用于刚体旋转，可以用来处理许多实际应用中产生有限应变的情况。图 2-3 给出了单元几何图形、节点位置及标系统，K 节点用来定义截面初始方向，这个单元仅用于显式动力学分析且支持所有非线性特性。

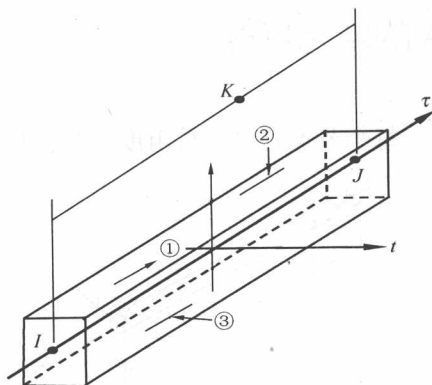


图 2-3 BEAM 161 单元

使用这种单元时应该注意以下几点：

(1) 该单元用三个节点定义，由 I 和 J 确定梁的轴向，K 确定横截面主轴方位，节点 K 也用来定义单元坐标系，不能与节点 I、J 共线。

(2) 用 EDLOAD 命令施加荷载，压力可以作为面荷载作用于图 2-3 中带圆圈数字所示的单元表面上，即面①、面②、面③上，但这一压力实际上是作为一个牵引荷载作用于单元中心线上。用 EDLOAD 命令施加压力荷载，输入单位长度上的压力值，压力正向指向单元内部，该单元不能承受体荷载。

(3) 使用 BEAM161 梁单元，材料可选用：弹性各向同性材料、双线性随动材料、塑性随动材料、黏弹性材料和分段线形塑性材料等。

(4) 在 BEAM161 Element Type Options 对话框中提供了多种可供选择的选项（图 2-4）包括单元方程、积分算法、横截面积分规则、横截面类型。

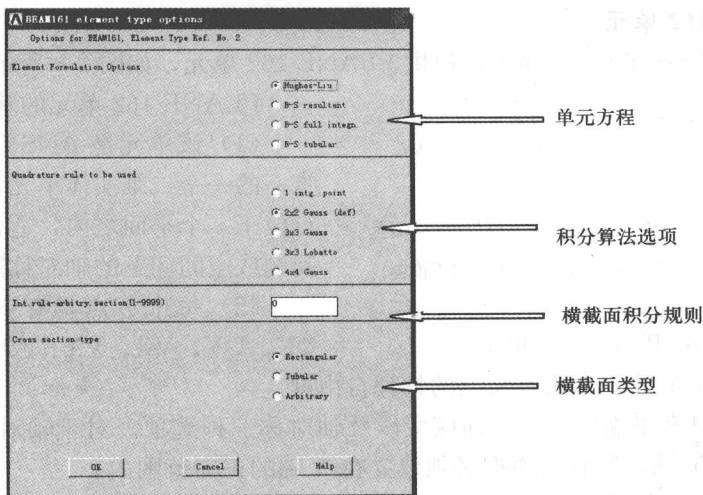


图 2-4 BEAM161 梁单元选项

(5) 单元方程默认为 Hughes-Liu 截面积分，同时还提供了 Belytschko-Schwer 合成梁、Belytschko-Schwer 全截面积分、Belytschko-Schwer 截面积分圆柱梁。积分算法默认为 2×2 高斯积分，同时提供了单点积分、 3×3 高斯积分、Lobatto 积分、 4×4 高斯积分。横截面积分规则有标准积分选项和用户定义规则选项两种，其中用户定义积分规则选项有效范围为 $1 \sim 9999$ ；横截面类型则分成了矩形截面（图 2-5）、圆形截面（图 2-6）、任意截面（用户定义积分规则）或标准截面（图 2-7）三种类型。

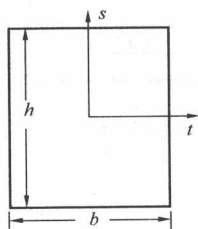


图 2-5 矩形截面

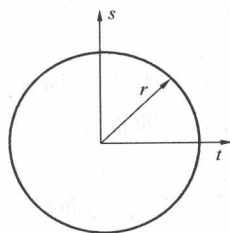
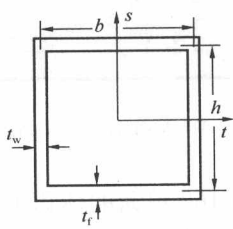


图 2-6 圆形截面

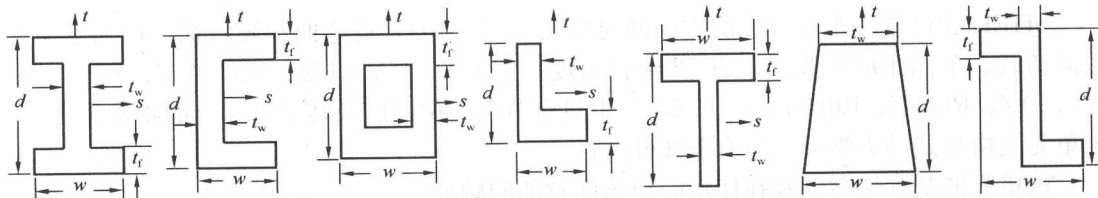
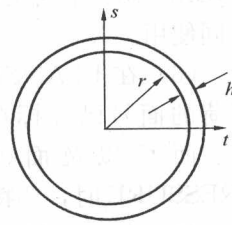


图 2-7 其他形式的截面