

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS LS-DYNA

非线性动力分析 方法与工程应用

◎熊令芳 胡凡金 等 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS LS-DYNA 非线性动力分析方法与工程应用

熊令芳 胡凡金 等 编著



中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 简 介

LS-DYNA 是全球著名的结构非线性动力计算程序,以显式算法为主也兼有隐式算法,被广泛用于模拟工程领域的各种高度非线性的瞬态结构受力行为。本书以 LS-DYNA 的关键字为主线,详细介绍了 LS-DYNA 的理论基础,基于 ANSYS 传统界面及 Workbench 的前处理、求解以及重启动,基于 LS-PREPOST 的前后处理等内容,结合一系列典型计算实例介绍了 LS-DYNA 在结构模态分析、流固耦合分析、动态接触与冲击分析、侵彻分析、多体动力学分析等方面的应用。

本书适合于工科相关专业研究生及高年级本科生在学习结构数值分析、非线性有限元方法等内容时作为参考书使用,也可供相关专业的技术人员学习 LS-DYNA 动力分析技术时参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS LS-DYNA 非线性动力分析方法与工程应用/
熊令芳等编著. —北京:中国铁道出版社,2016. 1

(ANSYS 仿真分析系列丛书)

ISBN 978-7-113-21247-6

I. ①A… II. ①熊… III. ①非线性—结构动力分析—
应用软件 IV. ①0342-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 314790 号

ANSYS 仿真分析系列丛书

书 名:ANSYS LS-DYNA 非线性动力分析方法与工程应用

作 者:熊令芳 胡凡金 等

策 划:陈小刚

责任编辑:陈小刚

编辑部电话:010-51873193

封面设计:崔 欣

责任校对:苗 丹

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京铭成印刷有限公司

版 次:2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:22.75 字数:559 千

书 号:ISBN 978-7-113-21247-6

定 价:58.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

LS-DYNA 是全球著名的结构非线性动力计算程序,以显式算法为主也兼有隐式算法,被广泛用于模拟工程领域的各种高度复杂的非线性瞬态结构受力过程。本书以 LS-DYNA 的关键字为主线,详细介绍了 LS-DYNA 的理论基础,基于 ANSYS 传统环境界面以及 ANSYS Workbench 的前处理方法、求解以及重启方法,基于 LS-PREPOST 的前后处理方法等内容,结合一系列典型计算实例介绍了 LS-DYNA 计算软件在复杂结构模态分析、流固耦合动力分析、结构动态接触与冲击分析、侵彻分析、机构运动及多体动力学分析等方面的具体应用,便于读者对照自学。

本书各章的具体内容安排如下:

第 1 章对 LS-DYNA 计算程序进行了总体介绍,包括 LS-DYNA 的发展历程和技术特色、LS-DYNA 的主要计算能力及工程应用领域以及 LS-DYNA 的理论基础知识三部分内容。第 2 章介绍 LS-DYNA 计算程序的使用入门知识,首先介绍以关键字为核心的 LS-DYNA 计算程序的运行要素及计算过程,随后以一个简单动力学问题为例阐释了 LS-DYNA 程序的计算实现过程。第 3 章详细介绍了 LS-DYNA 关键字文件的语法、组织结构及常用关键字的使用,涉及节点、单元、部件、材料、状态方程、算法与特性、接触、约束方程与连接、初始条件、边界条件、荷载、求解以及输出设置等具体的关键字。第 4 章介绍基于 ANSYS Mechanical APDL 的 LS-DYNA 前处理方法,内容包括 Mechanical APDL 界面中的 LS-DYNA 前处理概述、建立 LS-DYNA 分析模型、定解条件分析选项的设置与关键字的导出。第 5 章介绍在 ANSYS Workbench 环境下 LS-DYNA 结构分析前处理方法,以 Explicit Dynamics(LS-DYNA Export)系统的使用为主线,介绍了 Workbench 中的相关组件 Engineering Data、DM 以及 Mechanical 的具体使用方法和操作要点。第 6 章介绍基于 ANSYS LS-DYNA 环境的一般求解以及三类重启分析的具体操作方法。第 7 章介绍 LS-PREPOST 前后处理器的使用方法,包括功能及界面、后处理操作、前处理操作三部分内容。第 8 章介绍 LS-DYNA 求解器的隐式分析技术,重点介绍了结构模态分析的实现方法,并结合一个球面网壳结构模态计算例题进行讲解。第 9 章介绍 LS-DYNA 的 ALE 算法以及流固耦合技术,内容包括 ALE 及流固耦合技术简介、基于 ALE 的液面晃动分析实例以及钢板落水过程

流固耦合分析实例。第 10 章结合实例介绍 LS-DYNA 的动态接触及冲击分析方法,包括刚性物块撞击柔性板以及钢管的冲击屈曲分析等计算实例。第 11 章以一个子弹击穿双层钢板的动力问题分析为例介绍 LS-DYNA 侵彻分析及重启动分析的实现方法。第 12 章以一个凸轮机构的动力学分析为例介绍了 LS-DYNA 的多体动力学分析实现过程。附录部分介绍了 LS-DYNA 计算单位系统的协调问题、LS-DYNA 材料模型关键字、ANSYS 前处理器支持的材料模型、ANSYS 显式分析命令与 LS-DYNA 关键字的对应关系、ANSYS LS-DYNA 的单元特性等内容。

本书适合于工科相关专业研究生及高年级本科生在学习数值分析、非线性有限元方法等内容时作为参考书使用,也可供相关专业的技术人员学习 LS-DYNA 动力分析技术时参考阅读。

本书主要由熊令芳、胡凡金等编著,参与本书实例测试和文字整理工作的还有石彬彬、夏峰、王文强、张永刚、王海彦、刘永刚、张永芳、李宝聚、岳鸿志、王睿、李冬、赵晓红、郭金辉、赵素芳、赵爱平、赵振军、张海丽、赵小军、李平、张明明、李保成、郭剑叶、郭晓芳等,是大家的共同付出,才使本书得以顺利编写完成。此外,还要感谢中国铁道出版社的编辑老师对本书的支持和帮助。

由于 LS-DYNA 功能十分全面,涉及大量复杂的技术领域,加之成书仓促以及作者水平所限,本书的不当和错误之处在所难免,在此恳请各位读者批评指正。与本书相关的技术问题咨询或讨论,欢迎发邮件至邮箱:consult_dyna@126.com。

作者

2015 年 9 月

目 录

第 1 章 LS-DYNA 计算软件概述	1
1.1 LS-DYNA 的发展历程和技术特色	1
1.2 LS-DYNA 的数值计算能力及应用领域	2
1.3 LS-DYNA 的理论基础知识	6
第 2 章 LS-DYNA 程序的基本使用入门	10
2.1 LS-DYNA 计算程序运行要素及过程	10
2.2 LS-DYNA 运行简单实例	12
第 3 章 LS-DYNA 关键字文件	16
3.1 LS-DYNA 关键字文件的组织结构及基本语法	16
3.2 节点及单元关键字	18
3.3 部件、材料及单元选项关键字	33
3.4 接触关键字	56
3.5 约束方程及连接关键字	59
3.6 初始条件、边界条件与荷载关键字	61
3.7 求解以及输出控制关键字	62
第 4 章 ANSYS 传统界面前处理	65
4.1 ANSYS 传统界面前处理概述	65
4.2 建立分析模型	80
4.3 定解条件、计算选项设置与关键字导出	102
第 5 章 ANSYS Workbench 前处理	113
5.1 Workbench 环境与 LS-DYNA 前处理系统概述	113
5.2 Engineering Data 组件的使用	118
5.3 建立几何模型	120
5.4 建立分析模型	151
5.5 初边值条件、加载与关键字导出	165

第 6 章 ANSYS LS-DYNA 的求解及重启动	177
6.1 一般求解的操作方法	177
6.2 重启动分析操作方法	180
第 7 章 LS-PREPOST 的使用方法	182
7.1 LS-PREPOST 功能及操作界面简介	182
7.2 LS-PREPOST 的后处理操作	188
7.3 LS-PREPOST 前处理操作简介	193
第 8 章 LS-DYNA 隐式分析方法与例题	202
8.1 LS-DYNA 隐式分析技术简介	202
8.2 隐式分析例题:网壳结构的模态分析	203
第 9 章 ALE 算法及流固耦合分析	211
9.1 ALE 算法及流固耦合分析技术简介	211
9.2 ALE 分析实例:液面晃动分析	214
9.3 流固耦合分析实例:钢板落水模拟	220
第 10 章 动态接触与冲击分析例题	231
10.1 刚性块与柔性挡板之间的撞击	231
10.2 钢管冲击屈曲分析	248
第 11 章 侵彻分析例题	268
11.1 问题描述	268
11.2 建立分析模型	268
11.3 第一次分析	275
11.4 重启动分析	283
11.5 关键字文件	289
第 12 章 多体动力学分析例题:凸轮机构	301
12.1 问题描述	301
12.2 建立分析模型	302
12.3 施加边界条件	315
12.4 分析设置	317

12.5 求解及后处理.....	323
12.6 凸轮分析的关键字文件.....	328
附录 A LS-DYNA 的计算单位问题	333
附录 B LS-DYNA 材料模型关键字	334
附录 C ANSYS 前处理支持的材料模型	343
附录 D ANSYS ED 系列命令与对应的关键字	345
附录 E ANSYS LS-DYNA 单元简介	348
参考文献.....	356

第 1 章 LS-DYNA 计算软件概述

LS-DYNA 是著名的非线性动力学结构数值计算程序,本章对 LS-DYNA 计算程序进行了总体介绍,包括 LS-DYNA 的发展历程和技术特色、LS-DYNA 的主要计算能力及工程应用领域以及 LS-DYNA 的理论基础知识等三部分内容。

1.1 LS-DYNA 的发展历程和技术特色

LS-DYNA 软件是目前国际上最著名的通用非线性有限元分析软件,可以用于模拟真实世界中的各种复杂问题。LS-DYNA 的算法以显式方法为主,代表了现阶段非线性显式算法领域工程研究和应用的最高成就。LS-DYNA 分析程序的前身为美国 Lawrence Livermore 国家实验室 J. O. Hallquist 博士于 1976 年主持开发完成的 DYNA 程序系列,DYNA 程序时域积分采用显式的中心差分格式,用于分析爆炸与高速冲击等过程中的大变形动力响应问题,当时开发 DYNA 程序的主要目的是为武器设计提供分析工具。1986 年,部分 DYNA 源程序在 Public Domain(北约局域网)发布,在研究和教育机构中广泛传播,因此 DYNA 被公认为是显式有限元程序的先导,成为目前所有显式求解程序的基础代码。

Hallquist 博士后来创建了 LSTC 公司(Livermore Software Technology Corporation),推出 LS-DYNA 系列软件,并陆续发布软件的 930 版本、940 版本、950 版本、960 版本、970 版本。LS-DYNA 软件的发展策略也被逐步确定为以显式为主,隐式为辅,通过一个求解核心解决 Implicit(隐式)与 Explicit(显式)问题。LSTC 公司通过不断的研发逐步规范和完善 LS-DYNA 程序的功能,逐步增加汽车安全性分析、金属板冲压成形分析、流固耦合分析(ALE 算法和 Eluer 算法)、边界元方法及 SPH 方法、新材料模型、新接触算法、隐式分析等功能,使得 LS-DYNA 程序系列的应用范围不断得到扩大,并建立起完备的软件质量保证体系。目前 LS-DYNA 程序的最新版本为 971 V8 版本。

前后处理方面,LS-DYNA 在早期 PC 版本的前处理采用 ETA 公司的 FEMB,同时开发了后处理程序 LS-POST。后来 LSTC 在 LS-POST 后处理器的基础上发布了 LS-PREPOST1.0 版,使得该程序具备了一定的前处理功能。目前 LS-PREPOST 的最新版本为 4.0 版本。

在 LS-DYNA 发展历程中,与 ANSYS 公司的合作是具有里程碑意义的事件之一。1996 年,Hallquist 教授创建的 LSTC 公司和 ANSYS 公司开始进行技术和市场方面的合作,共同推出了 ANSYS LS-DYNA 软件的第一个版本,当时 ANSYS 前后处理程序版本为 5.5。ANSYS LS-DYNA 结合了 ANSYS 界面的前后处理功能、统一的数据库与 LS-DYNA 求解器的强大的非线性分析能力。对于熟悉 ANSYS 前后处理功能的软件用户来说,通过 ANSYS LS-DYNA 来求解各种高度非线性的瞬态问题无疑是最理想的选择。目前,ANSYS 系列软件的最新版本已经发展到 16. X,其前处理器支持最新的 LS-DYNA971 求解器的主要分析功能。

在结构分析领域,LS-DYNA 计算程序最显著的技术特色在于处理高度非线性问题以及

高速瞬态问题两方面。

所谓高度非线性问题,是指分析的问题中包含有边界条件随时间的动态改变过程(如部件之间的动态接触和撞击)、大变形(如金属板的起皱变形)、非线性材料行为(如应变率相关塑性行为)等因素。

所谓高速瞬态问题,是指问题中包含持续时间很短的高速瞬态动力学过程,其中的惯性作用至关重要,典型的过程如:水雷或聚能装药的爆炸、各种冲击问题、金属成形过程等,LS-DYNA 采用显式的中心差分时间积分算法来计算各时间步的系统动态响应。

此外,在最新版本的 LS-DYNA 中,LS-DYNA 的求解范围不再仅限于结构分析,而是已经被拓展到包含不可压缩流体、可压缩流体以及电磁场的多物理场分析,而且支持共享内存以及分布式内存的并行计算,适用于 Unix、Linux 以及 Windows 等各种系统平台。

1.2 LS-DYNA 的数值计算能力及应用领域

1.2.1 LS-DYNA 的数值计算能力简介

LS-DYNA 程序的计算能力十分强大,本节对计算功能、材料本构模型、单元类型、接触算法、硬件系统适应性等进行简要的介绍。

1. LS-DYNA 的主要计算功能

在非线性结构分析方面,LS-DYNA 是一个显式为主,隐式为辅的非线性结构分析程序。显式时间积分算法是 LS-DYNA 最主要的算法,包括 2D 及 3D 结构显式分析能力,可计算材料非线性、大变形、动态接触、裂纹扩展分析、失效分析等各种复杂的非线性动力学问题及瞬态结构-热耦合问题。此外,LS-DYNA 还提供 ALE 算法(任意 Lagrangian-Eulerian)、自适应网格重划分算法、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)及 EFG(Element Free Galerkin)算法,这些算法能够较好地处理各类高度非线性和大变形的的问题。LS-DYNA 的隐式分析可作为显式分析能力的补充,主要包括模态分析、隐式结构分析、热传导分析等。

LS-DYNA 目前可以交替使用隐式求解和显式求解,如:进行薄板冲压成型的回弹计算、结构动力分析之前施加预应力等。与传统的显式求解相比,隐式算法和显式算法的联合应用可明显提高计算效率,从而大大节省了时间和成本。

在多体动力学分析方面,LS-DYNA 提供了刚体动力学及 FEM-rigid 多体动力学耦合分析,可以分析各种机构的运动学以及动力学问题。

在多物理场耦合分析方面,LS-DYNA 之前所具有的 Eulerian 算法、ALE 算法可用于流动问题以及流固耦合动力问题的计算。在最近的几个版本中,基于其解决多场耦合问题的目标,LS-DYNA 又逐步增加了不可压缩流体动力学分析(Incompressible CFD)、电磁场分析(Electromagnetics)以及基于守恒元解元的可压缩流体及化学反应分析(CESE/ Compressible CFD and Chemistry)等求解方法。这些新增算法极大地增强了 LS-DYNA 的多物理场分析能力,开辟了更为广阔的应用领域。

2. LS-DYNA 的材料本构模型

在材料的本构模型方面,LS-DYNA 求解器提供了一个非常全面的材料库,可用的材料模型包括:弹性、塑性、热弹塑性、黏弹性、超弹性、弹塑性流体、应变率相关、徐变、损伤、失效、刚

体、复合材料、织物、蜂窝、泡沫、混凝土和土壤、高能炸药等 200 余种材料模型及一系列状态方程模型,这些模型可以很好地模拟各种实际材料的复杂力学行为。除了这些已有的本构模型外,LS-DYNA 还提供了用户自定义材料子程序功能,可用于开发新的材料模型。

3. LS-DYNA 的单元类型

在单元技术方面,LS-DYNA 程序提供的单元类型包括 Shell(Membrane)、Solid、Beam、Truss、Spring、Damper、Mass 等,如图 1-1 所示。其中,Shell 单元可以是三角形或四边形的壳或薄膜。Solid 单元可以是 4 或 10 节点四面体、6 节点棱柱体或 8 节点六面体,且包含 20 余种算法。厚壳(Thick Shell)单元是一种 8 节点的壳元,各节点仅有线位移,可用于 Solid 和 Shell 之间的过渡。Beam 单元包括标准梁单元、桁架、离散单元、索单元、焊接单元等 10 多种算法。Spring(弹簧)和 Damper(阻尼器)单元可以是轴向的或旋转的,统称离散单元,可定义包括锁定和分离在内的各种非线性行为。Mass 单元可以是集中惯性或集中质量。

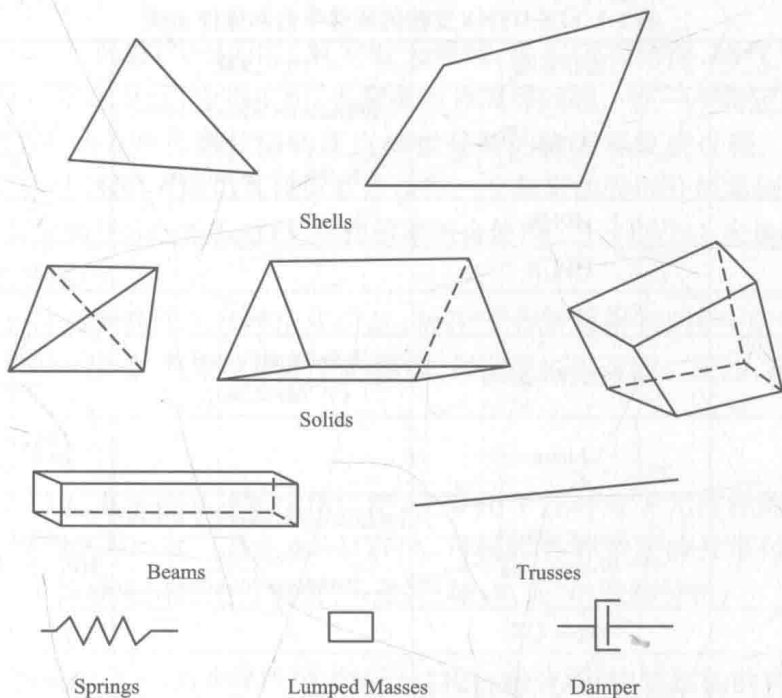


图 1-1 LS-DYNA 单元类型

除了图中这些单元外,还提供了 SPH 单元、加速度计、传感器、安全带、预紧器、牵开器、滑环单元等具有特殊分析用途的单元类型。

4. LS-DYNA 的接触算法

在接触算法方面,LS-DYNA 提供超过 20 种接触算法类型,包括:仅有滑动的流体/结构或气体/结构界面、绑定界面、滑移冲击摩擦界面、单面接触、离散节点冲击表面、节点与表面的绑定、Shell 边与 Shell 表面的绑定、节点与表面焊接、绑定失效界面、单面滑移冲击摩擦接触、Shell 自动接触、单表面与梁的任意方向接触、面面侵蚀接触、节点表面侵蚀接触、单面侵蚀接触、面面对称约束方法、节点表面约束方法、刚体之间接触、节点刚性体与刚体的接触、边边接触、压延筋接触。大部分接触类型支持界面间摩擦分析。

基于这些算法,LS-DYNA 可以处理如下类型的接触问题:

- (1) 柔性体接触;
- (2) 柔性体与刚性体的接触;
- (3) 刚性体与刚性体的接触;
- (4) 边与边接触;
- (5) 侵蚀接触;
- (6) 绑定界面接触;
- (7) 压延筋接触。

5. LS-DYNA 的硬件系统适应性

LS-DYNA 软件具备良好的硬件系统适应性,可以在 AMD、CRAY、HP、IBM、SGI、Intel 以及 SUN 等不同硬件供应商提供的硬件平台以及 Windows、Linux 等操作系统下良好地运行。LS-DYNA 支持的硬件和系统情况列于表 1-1 中。

表 1-1 LS-DYNA 支持的硬件平台和操作系统

供应商	操作系统	HPC 互联	MPI 软件
AMD Opteron	Linux	InfiniBand(SilverStorm) MyriCom PathScale InfiniPath	LAM/MPI, MPICH, HP MPI, SCALI
HP PA8000	HPUX		
HP IA64	HPUX		
IBM Power 4/5	AIX 5.1, 5.2, 5.3		
INTEL IA32	Linux, Windows	InfiniBand(Voltaire) MyriCom	Open MPI, MPICH, HP MPI, SCALI
INTEL IA64	Linux		Open MPI, MPICH, HP MPI
INTEL Xeon	Linux x86-64 Windows 64	InfiniBand(Topspin, Voltaire) MyriCom PathScale InfiniPath	Open MPI, MPICH, HP MPI, INTEL ICR, SCALI
NEC SX6	Super-UX		
SGI Mips	IRIX 6.5 X	NUMalink	MPT
SGI IA64	SUSE 9 w/Propack4 RedHat w/Propack 3	NUMalink InfiniBand(Voltaire)	MPT, Intel MPI, MPICH
SUN Sparc	5.8 and above		HPC Tool
SUN x86-64	5.8 and above		LAM/MPI

1.2.2 LS-DYNA 的应用领域简介

LS-DYNA 计算程序因其强大的计算分析能力在众多工程领域都有应用,如:汽车工程、航空航天、土木建筑、国防军工、金属加工、生物工程等。下面对 LS-DYNA 计算程序的部分工程应用领域及与之相关的具体工程问题进行简单的介绍。

1. 汽车工程领域

LS-DYNA 软件提供了安全带、滑环、预紧器、卷收器、传感器、加速度计、安全气囊、混合 III 型假人模型等一系列专用分析功能,加上其强大的动态接触分析能力和显式求解能力,因此

LS-DYNA 程序非常适合被应用于汽车工程设计及研发领域。汽车生产厂商及零部件供应商可以通过 LS-DYNA 程序的仿真技术对汽车及零部件的设计方案进行评估,以替代费用高昂的原型试验,显著降低研发费用,缩短研发周期。

在汽车工程领域,LS-DYNA 程序应用的最重要的方面是可以准确地预测车辆在动态撞击过程中的力学响应以及对乘员的影响,即所谓的耐撞性及乘员安全性分析。

2. 金属加工领域

金属加工成形分析是 LS-DYNA 的主要工程应用领域之一。LS-DYNA 程序能够准确地预测成形过程中金属的应力和塑性变形并分析金属是否会失效。LS-DYNA 支持网格的自适应重划分技术,如果必要的话,在计算过程中将会重划分以提高精度和节约计算时间。

在金属加工成形领域,LS-DYNA 程序应用的具体工程问题主要包括金属冲压、液压成形、锻造、铸造、多阶段过程、金属切削等。

3. 航空航天领域

LS-DYNA 程序目前被广泛应用于航空航天领域,模拟诸如鸟撞、喷气发动机叶片包容、冲击过程、复合材料结构设计、异物损伤、火箭级间分离等问题。在一个特定的仿真分析中,可组合使用 LS-DYNA 的各种仿真分析功能以模拟复杂的物理现象或过程。NASA 喷气推进实验室的火星探路者探测器着陆仿真模拟就是这样一个典型的模拟分析案例,此模拟分析了太空探测器利用气囊辅助登陆的复杂过程,在模拟中组合使用了 LS-DYNA 大量的仿真分析功能。

4. 国防军工领域

LS-DYNA 程序在国防军工领域应用广泛,被用于分析穿甲与防护、穿甲弹的设计、战斗部设计、爆炸冲击波的传播、在空气或水中的爆炸、侵彻模拟等问题。此外,在反恐破坏模拟方面也有应用。

5. 电子产品领域

LS-DYNA 程序在电子产品领域应用广泛,主要用于各种电子元件性能的辅助分析及模拟产品跌落的仿真测试等问题。基于 LS-DYNA,可模拟各种角度的及带包装的产品跌落过程,通常情况下需要按触地情况进行所谓“一点、三棱、六面”的跌落分析。

6. 民用工程领域

在民用工程领域中,LS-DYNA 应用于桥梁结构抗震分析、建筑结构的抗撞击与抗倒塌分析、工程爆破、结构非线性屈曲分析、支护结构防撞设计、爆炸冲击波破坏玻璃幕墙、岩土工程动力分析等问题。

7. 石油工程领域

LS-DYNA 在石油工程领域的应用涉及储油罐体的液晃问题分析、钻孔模拟、输油管道设计、爆炸模拟、海洋平台在复杂工作环境下的结构分析等方面。

8. 其他应用领域

从目前公开发表的文献资料可知,LS-DYNA 工程应用还涉及如下的一系列领域:

- (1) 机械工程的机构分析与多体动力分析;
- (2) 装运集装箱设计;
- (3) 玻璃成形过程分析;
- (4) 塑料、模具及吹塑成形分析;
- (5) 爆炸切割等工艺模拟;

- (6) 各类失效分析(如:焊点失效);
- (7) 体育器材(如:高尔夫球杆击球、棒球杆击球、头盔撞击等);
- (8) 生物力学(如:心脏瓣膜);
- (9) 流体分析与流固耦合分析;
- (10) 核工业领域。

综上所述,LS-DYNA 的应用涉及十分众多的行业及领域。此外,由于 LS-DYNA 具备高度的灵活性和广泛的适用性,其潜在的应用领域也十分广泛,通过定制开发可以很好地适用于不同的工程领域。

1.3 LS-DYNA 的理论基础知识

本节对 LS-DYNA 算法相关的理论基础知识进行简单的介绍。

1.3.1 LS-DYNA 显式时间积分算法

根据动力学问题的有限元方法,离散化的结构动力方程为:

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

式中, $\mathbf{M}$ 为结构质量矩阵(在 LS-DYNA 中采用集中质量矩阵); $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 和 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 分别为节点的加速度向量和节点的速度向量; $\mathbf{P}(t)$ 、 $\mathbf{F}(t)$ 、 $\mathbf{H}(t)$ 分别为荷载向量、内力向量和沙漏阻力向量。沙漏阻力向量的施加方法见下节,内力向量和荷载向量由以下两式计算:

$$\mathbf{F}(t) = \sum_e \int_{V_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV$$

$$\mathbf{P}(t) = \sum_e \left(\int_{V_e} \mathbf{N}^T \mathbf{f} dV + \int_{\partial_{2e}} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{T}} dS \right)$$

式中, $\mathbf{f}$ 为体力向量; $\bar{\mathbf{T}}$ 为表面力向量; ∂_{2e} 为应力边界条件。

以上各式中的下标 e 表示各单元相应的量按总体自由度编号进行叠加,不应理解为简单的求和。

对于上述离散化的动力方程,LS-DYNA 采用显式的中心差分方法求解,其基本递推格式如下:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{x}}(t_n) = \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{P}(t_n) - \mathbf{F}(t_n) + \mathbf{H}(t_n) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t_{n-1/2})] \\ \dot{\mathbf{x}}(t_{n+1/2}) = \dot{\mathbf{x}}(t_{n-1/2}) + \ddot{\mathbf{x}}(t_n) (\Delta t_{n-1} + \Delta t_n) / 2 \\ \mathbf{x}(t_{n+1}) = \mathbf{x}(t_n) + \dot{\mathbf{x}}(t_{n+1/2}) \Delta t_n \end{cases}$$

式中, $t_{n-1/2} = (t_n + t_{n-1}) / 2$, $t_{n+1/2} = (t_{n+1} + t_n) / 2$, $\Delta t_{n-1} = t_n - t_{n-1}$, $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$; $\ddot{\mathbf{x}}(t_n)$, $\dot{\mathbf{x}}(t_{n+1/2})$ 和 $\mathbf{x}(t_{n+1})$ 依次为 t_n 时刻的节点加速度向量, $t_{n+1/2}$ 时刻的节点速度向量, t_{n+1} 时刻的节点位置坐标向量,其余参数的意义可类推。

采用集中质量矩阵的动力方程组是解耦的,按照中心差分方法计算时无需计算总体矩阵,也无需进行平衡迭代,通过前面时间步的响应结果,可得到后面时间步的响应,因此这种方法是一种显式的方法。显式方法尽管无需迭代,但是这种算法却不是无条件稳定的,为保证数值稳定性,LS-DYNA3D 采用变步长积分法,每一时刻的积分步长由当前时刻的稳定性条件控制,积分步长必须小于某个临界值。一般情况下,积分步长取决于网格中最小单元的尺寸。

各种单元类型的临界积分步长可以表述为如下的统一形式,即:

$$\Delta t^e = \alpha (l^e / c)$$

式中, Δt^e 表示单元 e 的临界时间步长; α 为时间步因子, 缺省为 0.9; l^e 为单元 e 的特征尺寸; c 是纵波的波速。不同单元类型的单元特征尺寸和纵波波速计算公式列于表 1-2 中。

表 1-2 不同类型单元的特征尺度与纵波波速

单元类型	特征尺度	纵波传播速度
SOLID	V_e / A_{emax}	$\sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1-\mu^2)\rho}}$
BEAM	单元轴向长度	$\sqrt{E/\rho}$
SHELL	$\frac{(1+\beta)A_e}{\max(L_1, L_2, L_3, (1-\beta)L_4)}$	$\sqrt{\frac{E}{(1-\mu^2)\rho}}$
TSHELL	V_e / A_{emax}	

1.3.2 沙漏及其控制

由于 LS-DYNA 在单元计算中采用缩减积分, 因此会引起所谓沙漏变形, 本节介绍沙漏的概念及 LS-DYNA 的沙漏控制方法。

以 3D 的 8 节点 SOLID 单元为例, 单元内任意点的坐标和速度可通过 8 个节点的坐标和速度按形函数插值得到, 各节点在自然坐标系的形函数为:

$$\varphi_k(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi_k \xi) (1 + \eta_k \eta) (1 + \zeta_k \zeta)$$

其中, ξ, η, ζ 为单元的自然坐标, 各节点的自然坐标值列于表 1-3 中。

表 1-3 8 节点 SOLID 单元的各节点自然坐标

节点号 k	1	2	3	4	5	6	7	8
ξ_k	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
η_k	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
ζ_k	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1

单元内任一点的速度可由节点速度进行插值得到, 即:

$$\dot{x}_i(\xi, \eta, \zeta, t) = \sum_{k=1}^8 \varphi_k(\xi, \eta, \zeta) \dot{x}_i^k(t)$$

将形函数代入上式, 用向量形式表达为:

$$\ddot{x}_i(\xi, \eta, \zeta, t) = \frac{1}{8} (\Sigma^T + \Lambda_1^T \xi + \Lambda_2^T \eta + \Lambda_3^T \zeta + \Gamma_1^T \xi \eta + \Gamma_2^T \eta \zeta + \Gamma_3^T \xi \zeta + \Gamma_4^T \xi \eta \zeta) \{\dot{x}_i^k(t)\}$$

其中: $\Sigma, \Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 和 Γ_4 由各节点的自然坐标计算得到:

$$\Sigma = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

$$\Lambda_1 = [-1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1]^T$$

$$\Lambda_2 = [-1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1]^T$$

$$\Lambda_3 = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

$$\Gamma_1 = [1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1]^T$$

$$\Gamma_2 = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1]^T$$

$$\Gamma_3 = [1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1]^T$$

$$\Gamma_4 = [-1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1]^T$$

以上矢量分别代表不同的变形模式, Σ 反映单元的刚体平移, Λ_1 反映单元的拉压变形, Λ_2 、 Λ_3 反映单元的剪切变形, Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 和 Γ_4 为沙漏基矢量(Hourglass Base Vectors)。计算内力向量所需的应力增量 $\sigma \Delta t$ 由应变率 $\dot{\epsilon}$ 按本构关系计算, 而应变率可由单元的速度场对坐标的导数表示, 又由于单元速度场是由节点速度按形函数插值得到, 因此需计算形函数关于坐标的导数。由于采用单点缩减积分, 因此只需计算单元中心处的导数值:

$$\partial \varphi_k / \partial \xi |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} (\Lambda_{1k} + \Gamma_{1k} \eta + \Gamma_{3k} \zeta + \Gamma_{4k} \eta \zeta) |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} \Lambda_{1k}$$

$$\partial \varphi_k / \partial \eta |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} (\Lambda_{2k} + \Gamma_{1k} \xi + \Gamma_{2k} \zeta + \Gamma_{4k} \xi \zeta) |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} \Lambda_{2k}$$

$$\partial \varphi_k / \partial \zeta |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} (\Lambda_{3k} + \Gamma_{2k} \eta + \Gamma_{3k} \xi + \Gamma_{4k} \xi \eta) |_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} \Lambda_{3k}$$

式中, Λ_{1k} 、 Λ_{2k} 、 Λ_{3k} 为向量 Λ_1 、 Λ_2 、 Λ_3 的第 k 个分量。

由上面的导数表达式可以看出, 在采用单点高斯积分时, 沙漏模态不能够发挥作用, 相应的变形能被丢失, 因此沙漏模态又被称为零能模态。在动力响应计算中, 沙漏模态将不受控制, 导致出现计算结果的数值震荡。因此, 必须对沙漏变形进行控制。

LS-DYNA3D 采用增加沙漏黏性阻力的办法来解决沙漏问题, 提供 Standard(缺省算法)、Flanagan-Belytschko 等黏性阻尼算法。以 Standard 算法为例, 沙漏阻力的计算方法如下。

在各个节点沿 x_i 轴方向引入的沙漏阻尼力:

$$f_{ik} = -a_k \sum_{j=1}^4 h_{ij} \Gamma_{jk}$$

式中, Γ_{jk} 为沙漏基矢量的分量; h_{ij} 按下式计算:

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^8 \dot{x}_i^k \Gamma_{jk}$$

系数 a_k 由按下式计算:

$$a_k = Q_{hg} \rho V_e^{2/3} C / 4$$

式中, Q_{hg} 为用户指定的常数(一般取 0.05~0.15); C 为材料的声速(压缩波速度); ρ 为质量密度。

1.3.3 动态接触算法

LS-DYNA 采用基于主、从表面的动态接触算法。接触分析中可能发生接触的两个表面被称为主表面和从表面。在主表面上, 对于壳单元, 由 3 或 4 个节点组成一个段, 对于体单元由一个面上的 3 个或 4 个节点组成一个段, 如图 1-2 和图 1-3 所示。

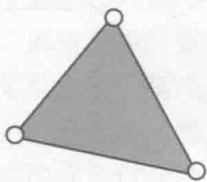


图 1-2 壳单元的段

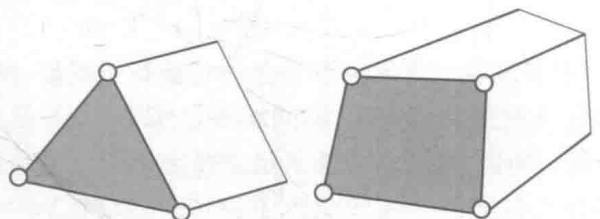


图 1-3 体单元表面的段

LS-DYNA3D 程序的缺省接触算法是对称罚函数法,程序在每一时步分别对从节点和主节点进行穿透检查。以从节点为例,如果当前时间步发生了穿透,则在从节点上施加法向接触力,按下式计算:

$$f_s = k_i \Delta_i$$

式中, Δ_i 为穿透量; k_i 为接触刚度因子,按下式计算:

$$k_i = f K_i A_i^2 / V_i$$

其中, K_i 、 V_i 和 A_i 分别是主段 S_i 所在单元的体积模量、体积和主段的面积; f 是接触刚度罚因子,缺省值为 0.10,取 f 过大可能造成不稳定。

在从节点上施加法向接触力 f_s 后,根据作用反作用原理,在主段的接触点上作用一个反方向的力 f_s ,将这个反作用力按形函数等效分配到主段包含的各个主节点上即可。

对于有摩擦的情况,从节点施加法向接触力 f_s 后,其最大摩擦力为 $F_y = \mu |f_s|$, μ 为摩擦系数。根据反作用力原理,计算分配到对应主段上各个主节点的摩擦力。

若静摩擦系数为 μ_s 、动摩擦系数为 μ_d ,则用指数插值函数来使二者平滑过渡:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-DC|V|}$$

式中, V 为接触表面之间的相对速度; DC 是衰减系数。