

ANSYS 软件 在LNG储罐有限元分析中的应用

ANSYS RUANJIAN ZAI LNG CHUGUAN
YOU XIANYUAN FENXI ZHONGDE YINGYONG

张超 主编



国防工业出版社

ANSYS 软件在 LNG 储罐 有限元分析中的应用

主 编 张 超
编 者 扬 帆 黄志新 寇晓东 肖 立
段品佳 单彤文 毕晓星 屈长龙
张 丹 张轶彬

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是关于大型有限元软件 ANSYS 在 LNG 储罐有限元分析计算中的实际案例分析集。以国内某已建的 16 万 m³ LNG 储罐为例,全书详细讲解了 ANSYS 软件在 LNG 储罐有限元分析中的使用方法与使用技巧,工程实例丰富、讲解详尽,内容安排循序渐进、深入浅出。

全书共包括 8 章。第 1 章重点介绍了 ANSYS 软件的发展变化、软件功能模块及土木工程应用。第 2 章重点介绍了 LNG 储罐的分类及大型 LNG 储罐的仿真研究现状。第 3 章详细介绍了 LNG 储罐有限元建模的技巧和方法,并进行了实例讲解。第 4 章和第 5 章分别介绍了 LNG 储罐的线性静力分析及线性动力分析,不但详细讲解了分析技巧,也进行了实例分析的讲解。第 6 章进行了 LNG 储罐的热分析计算讲解。第 7 章重点介绍了 LNG 储罐载荷组合方法及各种工况下的计算结果分析校核。第 8 章讲解了 LNG 储罐的局部结构分析,包括施工门洞和泵筒套管的分析实例的讲解。全书根据 LNG 储罐的实际工程应用而提供相应的实例讲解,并对 LNG 储罐进行了相关的结果评价研究,这样能更好地帮助读者理解仿真分析计算的意义,并迅速应用到工程和科研的实践中去。

本书特别适合于从事 LNG 储罐相关研究工作的学者及工程技术人员阅读,也可作为利用 ANSYS 软件进行 LNG 储罐计算分析的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 软件在 LNG 储罐有限元分析中的应用 / 张超主编.
—北京:国防工业出版社,2014.4
ISBN 978-7-118-09467-1

I. ①A… II. ①张… III. ①天然气罐-有限元分析-应用软件 IV. ①TE972-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 072435 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售



*

开本 710×1000 1/16 印张 15¼ 字数 292 千字
2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

序

石油、煤炭等传统能源一直是推动人类生存和发展的重要支撑因素,而由于煤、石油等化石燃料及炼制品在燃烧过程中会造成对大气的污染,因此它们在推动人类社会进步的同时,也成为全球气候变暖和生态环境恶化的主因。如何寻找替代能源,在不减缓发展速度的同时减少化石油、煤炭等化石燃料的使用,成为包括中国在内的世界各国积极思考的问题。而天然气因其高效、安全、环保的特性,其燃烧产生的温室气体要远远少于同等热值的石油和煤炭,成为世界各国能源发展的新热点。

随着“美丽中国”构想的提出,中国的液化天然气(LNG)产业呈现蓬勃发展之态,天然气液化厂、LNG接收站、LNG加注站等LNG项目在全国各地林立。LNG储罐作为LNG接收站中投资最大的设备,也是整个LNG产业链中的关键核心设备之一,储罐技术的突破也成为LNG产业和技术突破发展的关键因素之一。

大型LNG储罐不同于其他盛装普通常温液体或气体的储罐,其内存放介质的超低温和容积的超大规模,对储罐的耐低温、高抗震性等设计要求提出了极高的标准,其高额的投资也对储罐的高安全性提出了严格的要求,高标准和严要求决定了大型LNG储罐技术的高难度,也决定了这项技术必然成为石化工业中较尖端的技术之一。

为了最大限度地在设计阶段保证储罐结构的安全性,随着计算机硬件和数值仿真技术的快速发展及有限元软件的出现,使我们可以设计阶段,通过软件模拟各种设计参数在不同的工况条件下对储罐可能造成的影响,从而完成设计的改良优化,实现最优、最安全可靠的结构设计。有限元软件强大的前后处理功能、丰富的单元类型,以及其非线性分析和瞬态动力分析的功能,在大型LNG储罐的计算分析中有着不可取代的作用和地位。特别是热动力计算分析,作为大型LNG储罐的整个技术体系中的核心之一,需要充分依靠并正确应用有限元分析技术才能做到准确有效、万无一失。可以说,有限元软件为我们全面理解掌握储罐技术,完成可靠、安全、优质的储罐设计提供了强大的助力。

本书借鉴了发展理论模型和工程应用实践的宝贵经验,汇集了编者在使用 ANSYS 这一经典有限元软件及应用该软件进行 LNG 储罐设计计算方面的经验,必然使读者受益。希望本书的出版有助于中国 LNG 储罐技术整体技术水平的提升,从而进一步推动中国 LNG 储罐技术的自主发展,为中国 LNG 产业技术的发展贡献微薄之力。相信在不久的将来,在中国制造的 16 万 m^3 、20 万 m^3 甚至更大型的 LNG 储罐之上,会有本书小小的“烙印”。

王曉

ANSYS 亚洲专家组组长

前 言

ANSYS 是全球最知名的大型通用有限元软件,曾经就是有限元 CAE(Computer Aided Engineering,计算机辅助工程)分析的代名词,在结构、流体、电场、磁场、声场分析中均有广泛应用。

无论是上游基本负荷型 LNG 液化工厂还是下游 LNG 接收终端,都需要配备 LNG 储罐来储存 LNG,因此在整个 LNG 产业链中,LNG 的储存是非常重要的一个环节。而 LNG 储罐大量、安全的储存能力,可为稳定供气起到高效的缓冲作用,是 LNG 产业链中十分关键的重要设施。LNG 储罐的设计核心就是进行热学和力学计算,通用有限元软件是必备工具。多数工程公司都选择了 ANSYS 作为 LNG 储罐模拟计算的工具,其通用性和实用性很高,完全适合于 LNG 储罐计算分析使用。

本书从建模开始,一步步地讲解利用 ANSYS 进行 LNG 储罐的有限元分析方法。全书更侧重于方法的讲解,以及工程中的应用,逐步讲解静力、动力、模态、瞬态、子单元等高级分析问题。对于具体的分析问题,每章给出了 LNG 储罐的分析实例。

书中内容基于 ANSYS 14.5 版本编写,其绝大部分内容适用于其他版本。本书更多地侧重于论述分析的理论和方法,对于具体的操作过程,读者可以参考其他工程类有限元分析类工具书解决。

本书共设 8 个章节,包括:

第 1 章:ANSYS 的基本功能,主要分析模块和基本应用情况等;

第 2 章:介绍 LNG 储罐的基本情况以及 CAE 研究的现状;

第 3 章:介绍应用 ANSYS 进行 LNG 储罐建模的基本方法;

第 4 章:介绍 ANSYS 线性静力分析的基本方法,并给出了一个储罐静力分析的实例;

第 5 章:介绍 ANSYS 线性动力分析的基本方法,并给出了一个储罐模态分析的实例;

第 6 章:介绍热分析的方法和过程,以及稳态和瞬态的计算理论;

第 7 章:介绍载荷组合和输入分析的方法;

第 8 章:介绍有限元子模型分析方法,进行 LNG 储罐的局部结构分析。

本书力求在理论方面论述 LNG 储罐应用 ANSYS 进行有限元分析的方法,但是众所周知,有限元的分析方法有很多,甚至同一软件对于同一问题都有不同的分析方式和分析结果,一本书很难将这些方法全部论述清楚。我们旨在为工程技术人员和科研人员提供帮助,使其了解 LNG 储罐的有限元分析方法和理论,同时书中的分析原理也可以为其他专业人员提供参照。

有限元理论庞大复杂,限于编者水平,而对于工程分析方法个人认识有所不同,书中错漏在所难免,恳请读者批评指正,并欢迎读者和编者进行交流。

目 录

第 1 章 ANSYS 软件综述	1
1.1 ANSYS 软件简介	1
1.2 ANSYS 软件的模块与功能	2
1.2.1 结构仿真系列软件	2
1.2.2 流体仿真系列软件	11
1.2.3 协同仿真与仿真工程管理	13
1.3 ANSYS Mechanical 软件功能与工程应用	14
1.3.1 ANSYS Mechanical 高级结构力学分析功能介绍	14
1.3.2 ANSYS Mechanical 软件在土木工程上的应用	17
第 2 章 LNG 储罐介绍及仿真研究现状	19
2.1 LNG 储罐分类	19
2.1.1 按容量分类	19
2.1.2 按绝热方式分类	20
2.1.3 按形状分类	20
2.1.4 按安装位置分类	20
2.1.5 按包容性分类	21
2.1.6 按承压大小分类	22
2.2 LNG 大型储罐介绍	22
2.2.1 单容罐	22
2.2.2 双容罐	23
2.2.3 全容罐	23
2.2.4 薄膜罐	24
2.3 大型 LNG 储罐的仿真研究现状	25
2.3.1 LNG 储罐静力分析研究现状	25
2.3.2 LNG 储罐动力分析研究现状	26

第 3 章 LNG 储罐有限元建模	28
3.1 LNG 储罐有限元建模技术概述	28
3.1.1 ANSYS 有限元建模概述	28
3.1.2 单元类型与技术描述	34
3.2 储罐钢筋混凝土结构建模	42
3.2.1 预应力钢筋混凝土外罐墙体建模实例	42
3.2.2 钢筋混凝土承台建模实例	44
3.2.3 钢筋混凝土外罐顶建模实例	44
3.3 钢结构建模	47
3.3.1 内罐建模实例	47
3.3.2 穹顶钢梁框架和顶面板建模实例	48
3.3.3 吊顶系统建模实例	49
3.4 绝热保温系统建模	50
3.4.1 罐壁绝热保温系统结构建模实例	50
3.4.2 罐底绝热保温系统结构建模实例	51
3.5 罐内液体模拟	53
3.5.1 罐内液体的模拟方法	53
3.5.2 液固耦合建模实例	54
3.6 桩群基础及桩土相互作用建模	54
3.6.1 桩土相互作用数值模拟方法	54
3.6.2 桩土相互作用简化建模实例	56
3.7 LNG 储罐整体模型装配	59
3.7.1 ANSYS 网格装配技术	59
3.7.2 储罐各部分的装配关系及装配实例	64
第 4 章 LNG 储罐线性静力分析	68
4.1 线性静力分析概述	68
4.1.1 线性静力分析基本概念	68
4.1.2 线性静力分析的求解步骤	69
4.2 储罐静力分析载荷描述及施加方法	70
4.2.1 永久载荷	70
4.2.2 可变载荷	70
4.3 静力分析实例	73

第 5 章 LNG 储罐线性动力分析	84
5.1 线性动力分析概述	84
5.2 模态分析	84
5.2.1 模态分析的概念与应用	84
5.2.2 模态分析方法	85
5.2.3 模态分析基本过程	85
5.2.4 储罐模态分析实例	86
5.3 响应谱分析	89
5.3.1 响应谱分析的概念与应用	89
5.3.2 响应谱分析方法	90
5.3.3 单点响应谱分析基本过程	90
5.3.4 储罐响应谱载荷的确定方法	91
5.3.5 储罐响应谱分析实例	95
5.4 瞬态动力分析	107
5.4.1 瞬态动力分析的概念与应用	107
5.4.2 瞬态动力分析方法	108
5.4.3 完全法瞬态动力分析基本过程	109
5.4.4 储罐爆炸及冲击载荷分析实例	111
第 6 章 LNG 储罐热分析	118
6.1 热分析简介	118
6.2 热分析方法与过程	118
6.3 稳态热分析	118
6.4 瞬态热分析	120
6.5 热辐射分析	121
6.6 储罐热分析实例	121
6.6.1 正常及泄漏情况下的温度分析模型及温度载荷计算	121
6.6.2 基于 ISO 标准建立火灾过程温度场分析模型及 火灾温度分布	130
6.6.3 临罐燃烧热辐射模拟火灾过程温度场分布	133
第 7 章 储罐载荷组合	138
7.1 ANSYS 载荷组合方法	138

7.2	储罐载荷组合工况	139
7.2.1	SLS 载荷组合	139
7.2.2	ULS 载荷组合	141
7.3	储罐载荷组合的结果分析及强度验算	143
7.3.1	SLS 状态各个工况计算结果及强度验算	143
7.3.2	ULS 状态各个工况计算结果及强度验算	173
第 8 章	储罐局部结构分析	205
8.1	ANSYS 子模型分析方法	205
8.2	储罐施工门洞结构强度分析实例	209
8.2.1	模型信息	209
8.2.2	施工工况 1 的门洞局部模型计算结果	210
8.2.3	施工工况 2 的门洞局部模型计算结果	212
8.2.4	施工工况 3 的门洞局部模型计算结果	215
8.3	储罐穹顶泵筒套管结构强度分析	219
8.3.1	模型信息	219
8.3.2	泵筒正常运行工况的载荷和计算结果	220
8.3.3	泵筒 SSE 地震工况的计算结果	222
8.3.4	泵筒在组合工况下计算结果及强度评价	228
	参考文献	231

第 1 章 ANSYS 软件综述

1.1 ANSYS 软件简介

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁和声学于一体的大型通用有限元分析软件,广泛用于石油化工、土木工程、能源、核工业、铁道、航空航天、机械制造、汽车交通、国防军工、电子、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究中。

ANSYS 公司成立于 1970 年,总部位于美国宾西法尼亚州的匹兹堡,是世界 CAE(Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程)行业最著名的公司之一,员工人数超过 2400 人。40 多年来,ANSYS 公司一直致力于工程仿真软件的开发及分析咨询服务,为全球工业界所广泛接受,并拥有了全球最大的用户群体。许多国际化大公司均采用 ANSYS 软件作为其设计分析标准和主要的分析、技术交流平台。ANSYS 公司在世界范围有很高的声誉和业界广泛认可的服务支持能力。

最新版本的 ANSYS 软件充分体现了 CAE 领域的发展趋势:首先,通过开发或并购最先进的技术,将其集成到一体化可定制仿真平台中,使工程师能够高效地执行复杂的多物理场仿真工作;其次,提供系统服务,用以管理仿真进程和数据。这样,工程师和产品开发人员就能集中精力进行产品设计、完善产品质量,而不必为软件使用和数据搜索花费过多时间。其融结构、热、流体、电磁、声学于一体的多物理场耦合仿真的功能,集中代表了用于“虚拟样机”的 CAE 技术;与 CAD 软件无缝的几何模型传递接口是 CAD/CAE 整体化的发展方向;在网络中各种计算机软硬件平台上自动浮动使用方便了用户。

在 40 多年的发展过程中,ANSYS 不断改进提高,功能不断增强,目前最新的版本已发展到 15.0 版本。ANSYS 软件所提供的 CAE 仿真分析类型非常全面,而且这些分析类型具有耦合特性(相关性),在整个 CAE 行业,ANSYS 系列软件的优势是全方位的,主要体现在:

1. 宽广的分析范畴

ANSYS 系列软件全面涵盖了通用结构力学、高度非线性结构动力学、计算流体动力学、计算电磁学、多物理场耦合分析、协同仿真平台、专用软件体系等最全面的范围,具备了完整的工程仿真产品体系。在 ANSYS 环境下,无需其他任何软件的帮助,用户就可以完成他想要做的几乎任何 CAE 分析工作。

2. 耦合场分析

在耦合场分析方面,目前只有 ANSYS 系列软件能提供这样一个既满足各领域

要求又能相互进行耦合分析的 CAE 软件系统,而不是仅局限于某一学科领域的分析。ANSYS 软件充分体现了 CAE 领域的发展趋势。它可以融结构、热、流体、电磁于一体的多物理场耦合仿真的功能,集中代表了用于仿真分析的最先进的 CAE 技术;ANSYS 的软件产品不仅涵盖了 CAE 通用的结构、传热、流体、电磁等通用领域,也包括了针对行业特点的专业化产品软件。其独一无二的流固耦合场分析技术;CFX、FLUENT 和 ANSYS 的结构模块能方便地实现流固耦合计算。

在机械结构(含热)、流体力学(含温度场)、电磁场的 CAE 应用领域里,ANSYS 软件的产品都是本领域最好的产品之一。

通用结构力学 CAE 分析方面: ANSYS mechanical、LS - DYNA 等。

流体动力学 CFD 分析方面: FLUENT、CFX、ICEM CFD 等。

电磁场 CAE 分析方面: ANSYS MAXWELL 等。

3. 协同仿真

全新的 ANSYS Workbench 协同仿真平台,整合了企业的 PRO/E、CATIA、UG 等 CAD 设计软件与 ANSYS 等分析软件,并且形成了方便易用的通用软件平台。为用户提供了参数化分析、CAD/CAE 双向参数驱动、自动定义接触和装配、高效优化设计等独一无二的最新 CAE 技术。目前已经在国内外企业中得到了广泛的应用,并成为新一代 CAE 软件平台的标准。

ANSYS 软件从 1971 年开始的 2.0 版本发展到今天的 15.0 版本,从用户交互图形界面到计算模块、应用数值方法和计算优化上都有了巨大的改进。经过多年的发展,ANSYS 逐渐成为国际国内分析设计技术交流的平台。ANSYS 独具特色的多物理场结合的分析技术和涵盖优化设计、随机有限元分析等在内的一体化处理技术充分体现了 CAE 领域的最新发展成就。在国际上,它是第一个通过 ISO9001 质量认证的分析设计软件,美国机械工程师协会(ASME)、美国核安全局(NQA)及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。在国内,第一个通过了中国压力容器标准化技术委员会认证并在国务院 17 个部委推广使用,目前在国内有着广大用户群。

1.2 ANSYS 软件的模块与功能

ANSYS 系列工程仿真软件是融合结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用工程仿真软件,用来模拟求解各种结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。目前主要有两大系列软件:结构仿真系列软件、流体仿真系列软件。

1.2.1 结构仿真系列软件

1. 多物理场仿真分析: ANSYS Multiphysics

ANSYS 不仅提供结构、流体、热、电磁单场分析功能,而且这些分析还可以实现在统一模拟环境和同一数据库中进行。通过多场耦合处理工具 Multiphysics,便

可以实现复杂的多物理耦合分析。经过多年的不断发展和完善,ANSYS Multiphysics 现已成为世界领先的多物理场模拟工具,以先进的分析技术和理念引领着多物理场及耦合仿真的发展方向。同时,它也可以与 ANSYS 的新一代高端计算流体动力学分析软件 CFX 进行双向流固耦合分析,分析类型不受任何限制,可充分发挥 Multiphysics 与 CFX 各自的独特优势。

2. 高端结构及热分析:ANSYS Mechanical

作为 ANSYS 的核心产品,ANSYS Mechanical 是顶级的通用机械仿真分析系统,在全球拥有超过 13000 家用户群体,是世界范围应用最为广泛的 MCAE 软件,在中国亦占据了超过 40% 的市场份额。产品包含通用结构力学分析(ANSYS Structural 模块)、热分析(ANSYS Professional 模块)及其耦合分析功能。产品具有一般静力学、动力学和非线性分析能力,也具有稳态、瞬态、相变等所有的热分析能力以及结构和热的耦合分析能力,可以处理任意复杂的装配体,涵盖各种金属材料 and 橡胶、泡沫、岩土等非金属材料(图 1-1)。ANSYS Mechanical 的耦合场分析功能具有声学分析、压电分析、热/结构耦合分析和热/电耦合分析能力。ANSYS Mechanical 也可与 ANSYS CFX 专业流体分析模块进行实时双向的流固耦合分析。

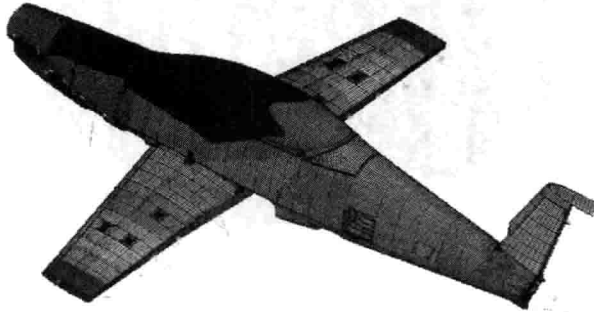


图 1-1 高端结构分析

3. 通用结构力学分析:ANSYS Structural

ANSYS Structural 是 ANSYS 产品家族中的结构分析模块,秉承了 ANSYS 家族产品的整体优势,更专注于结构分析技术的深入开发(图 1-2)。除了提供常规结构分析功能外,强劲稳健的非线性、独具特色的梁单元、高效可靠的并行求解、充满现代气息的前后处理是该模块的四大特色。ANSYS Structural 分析模块提供结构分析的完整工具,具有一般静力学、动力学和非线性分析能力以及复合材料、断裂、疲劳、优化等分析功能。

4. 结构线性及热分析:ANSYS Professional

ANSYS Professional 是一种先进的易于使用的结构与热分析工具(图 1-3),提供了线性静力学、高级线性动力分析和非线性分析的基本功能,以及稳态、瞬态、相变等所有的热分析能力,还可以进行结构和热耦合分析。

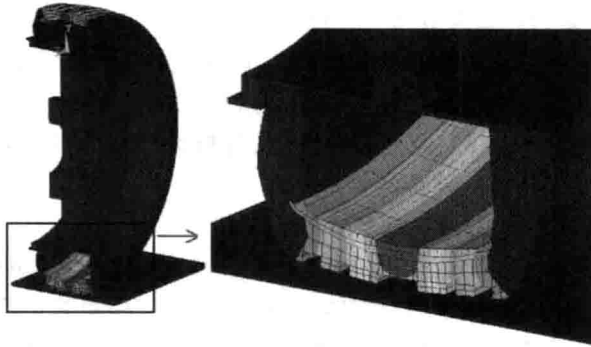


图 1-2 通用结构力学分析

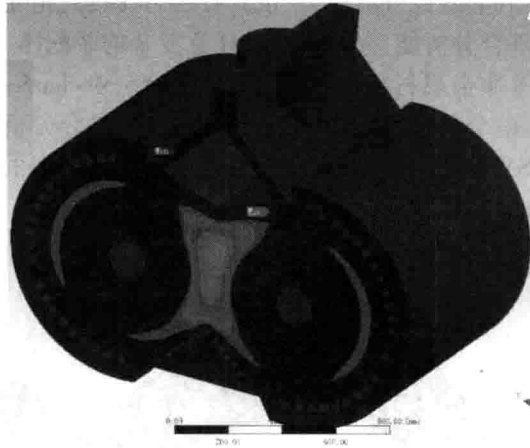


图 1-3 结构线性及热分析

5. 刚体动力学分析: ANSYS Rigid Body Dynamics

ANSYS Rigid Body Dynamics 是 ANSYS Structural(或更高级的 ANSYS Mechanical 或 Multiphysics) 产品的一个附加模块(图 1-4), 它集成于 ANSYS Workbench 环境下, 在 ANSYS Structural 所具有的柔性体动力学(瞬态动力学)分析功能的基础上, 基于全新的模型处理方法和求解算法(显式积分技术), 专用于模拟由运动体和弹簧连接起来的刚性组件的动力学响应。

6. 复合材料专用前/后处理: ANSYS Composite PrepPost

ANSYS Composite PrepPost(ACP) 是集成于 ANSYS Workbench 环境的全新的复合材料前/后处理模块(图 1-5), 可以与 ANSYS 其他模块实现数据的无缝连接, 在处理层压复合材料结构方面具有强大的功能。该模块可以直观地定义复合材料铺层信息, 如铺层顺序、铺层材料属性等, 同时提供铺层截面信息的检查和校对功能以及丰富的复合材料失效分析方法和准则。该模块还具有强大的结果后处

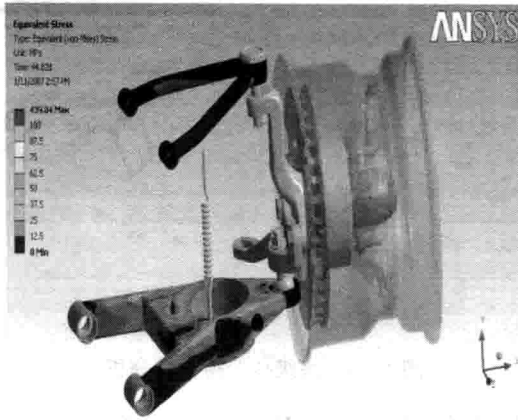


图 1-4 刚体动力学分析

理功能,可获得各种分析结果,如层间应力、应力、应变、最危险的失效区域等,还能够实现多方案的对比分析等。

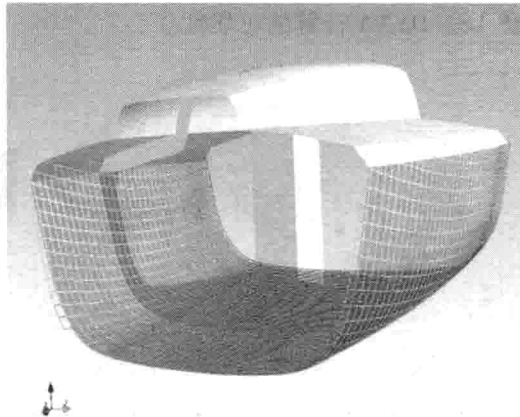


图 1-5 复合材料专用后处理

7. 高级疲劳耐久性分析:ANSYS nCode DesignLife

ANSYS nCode DesignLife 是 ANSYS Workbench 集成 nCode 国际公司高级疲劳分析软件 nCode DesignLife 的产品(图 1-6)。该产品实现了无缝读取 ANSYS 结果文件,可与 ANSYS 共享材料数据库。同时,以流程图的形式集成了高级 CAE 分析与信号处理工具,操作界面友好,与 ANSYS Workbench 融于一体。凭借其在疲劳耐久性设计领域的完备功能和易用性,ANSYS nCode DesignLife 已成为现代企业在产品设计过程中考虑疲劳耐久性设计的首选工具。

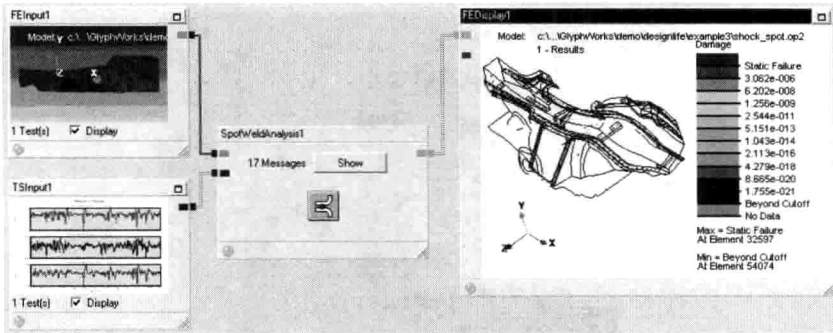


图 1-6 高级疲劳耐久性分析

8. 通用非线性显式动力学分析: ANSYS LS-DYNA

ANSYS LS-DYNA 是世界上最著名的通用显式非线性有限元分析程序(图 1-7),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、三维非线性结构的碰撞、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。通过与实验的无数次对比证实了 ANSYS LS-DYNA 计算的可靠性。

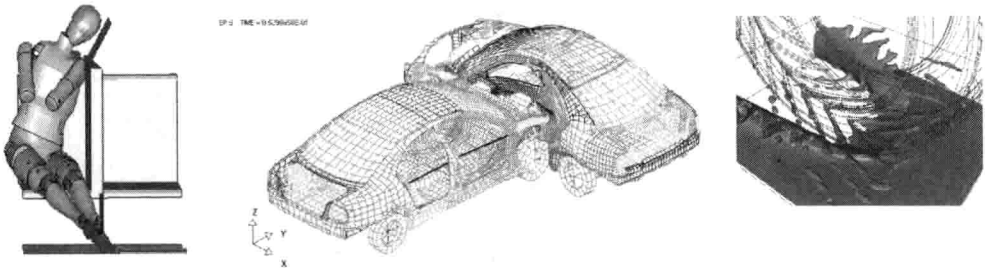


图 1-7 非线性显式动力学分析

9. 专用高度非线性显式动力学分析: ANSYS AUTODYN

ANSYS AUTODYN 是一个显式有限元分析程序(图 1-8),用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题。AUTODYN 完全集成在 ANSYS WorkBench 中,充分利用 ANSYS WorkBench 的双向 CAD 接口、参数化建模以及方便实用的网格划分技术,还具有自身独特的前/后处理和模块。而且为了保证最高的计算效率,可以采取高度集成环境架构,在 Microsoft Windows 和 Linux/Unix 系统中以并行或者串行方式运行,支持共享内存和分布式集群。

10. 瞬态非线性显式动力学快捷分析: ANSYS Explicit STR

ANSYS Explicit STR 是基于 ANSYS Workbench 仿真平台环境的结构高度非线性显式动力学分析软件(图 1-9)。可以求解二维、三维结构的跌落、碰撞、材料成