2015 第四期(双月刊)

有限元资讯

LS-DYNA

LS-DYNA 用户大会大会主会

2015第二届中国LS-DYNA用户大会
会议及征文通知

LS-DYNA® DEM和SPH系列

LSTC
Livermore Software Technology Corp.

主办：美国 FEAINFORMATION.com

中文版网址: www.feainformation.com.cn

有限元资讯参加者

迪艾工程技术软件(上海)有限公司 (ETA)

奥雅纳工程咨询(上海)有限公司 (ARUP 中国)

上海恒士达科技有限公司 (HengStar)

大连富坤科技开发有限公司(Dalian Fukun)

势流科技股份有限公司 (Flotrend Corp.)

爱发股份有公司 (APIC)

FEA-INFORMATION 中文版《有限元资讯》的主要内容包括：LS－DYNA 最新发展动态，LS－DYNA 功能系列化介绍，LS－DYNA 应用实例交流，中国及华人地区 FEA 活动及年会信息，LS－DYNA 中国及华人地区销售和代理商介绍，LS－DYNA 培训课程内容介绍及代理商培训计划等。期刊为双月刊，每双月份第四周发刊。

衷心期望本期刊能够得到大家的关心和支持，并欢迎大家踊跃提供稿件和建议。

本期刊是电子版，免费发行。通过电子邮件订阅。

本期刊中文版网址: www.feainformation.com.cn

用户可以通过网站下载全部期刊

本期刊英文版网站: www.feainformation.com

www.feapublications.com

订阅投稿邮箱：yanhua@feainformation.com
订阅请注明主题：FEA Chinese sign up
投稿请注明主题：FEA Chinese Article

主办：美国 FEAINFORMATION.com
编辑：Marsha Victory, 赵艳华/Yanhua Zhao
特邀编辑：苏 敏/Grace Su

目　　录

有限元资讯参加者		1
2015第二届中国LS-DYNA用户大会__会议通知		3
2015第二届中国LS-DYNA用户大会__征文通知		4
2015第二届中国LS-DYNA用户大会__赞助商 - 参展商		5
2015第二届中国LS-DYNA用户大会__演讲嘉宾		6
2015第二届中国LS-DYNA用户大会__培训课程		8
1. LS-DYNA中的离散元法	滕海龙/Hailong Teng, 王季先/Jason Wang	8
2. 通过校准模型来改进离散元模拟的精度	Adrian Jensen, Kirk Fraser, George Laird	11
3. 利用LS-DYNA中的无黏结离散元模拟理想颗粒材料的平均应力状态	Michael T. Davidson1, Jae H. Chung1, Hailong Teng2, Zhidong Han2, Vinh Le1	21
4. LS-DYNA中的光滑粒子流体动力学（SPH）及其应用	许敬晓/Jingxiao Xu，王季先/Jason Wang	31
5. LS-DYNA中平滑粒子流体动力学（SPH）的一些最新进展	许敬晓/Jingxiao Xu，王季先/Jason Wang	36
6. LS-DYNA中多个SPH部件（流体，固体）间的相互作用方法	许敬晓/Jingxiao Xu，王季先/Jason Wang	39
LS－DYNA 中国代理商		49
1. 迪艾工程技术软件(上海)有限公司简介 (ETA)		50
2. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司 简介(ARUP中国)		50
3. 上海恒士达科技有限公司简介 (HengStar)		51
4. 大连富坤科技开发有限公司简介 (Dalian Fukun)		51
LS－DYNA 台湾代理商		52
代理商LS－DYNA 培训及活动信息		
1. 迪艾工程技术软件(上海)有限公司培训 (ETA)		53
2. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司培训(ARUP)		54
3. 上海恒士达科技有限公司培训 (HengStar)		55
国内会议信息快递	苏敏/Grace Su	58
LS－DYNA信息资源网址		59

*本刊所刊载资料，除特别注明出处外，其余所有资料，本刊均保留所有权，任何机构或个人，未经本刊授权，不得随意转载、引用。若有违反，本刊保留采取进一 步措施的权利。如对本刊有任何问题，请与编辑 Yanhua Zhao 联系。 Email: yanhua@feainformation.com

2015 第二届中国 LS-DYNA 用户大会

随着 CAE 技术在中国的迅速发展，作为业界著名的有限元软件，LS-DYNA®已经获得国内用户的广泛认可，并在汽车工业，模具工业，航空航天和电子电器等多种领域内得到广泛使用。

LSTC 是国际著名的有限元仿真软件公司，它的产品包括 LS-DYNA®， LS-PREPOST®, LS-OPT®等。继 2013 首届中国 LS-DYNA 用户大会成功举办后， LSTC 定于 2015 年 11 月 9-11 日在中国上海举办第二届中国 LS-DYNA 用户大会。大会将邀请海内外业内专家，LSTC 的技术骨干及广大客户，介绍软件的最新功能，并分享使用经验。中国 LS-DYNA 用户大会将继续定期举办，并成为相关领域的学者和工程技术人员交流研究成果和了解软件最新发展动态的一个重要平台。

主办单位：美国 Livermore Software Technology Corp.

中国 大连富坤科技开发有限公司

会议日期：2015 年 11 月 9-11 日

课程培训：本届 LS-DYNA 用户大会在会后提供技术培训。为期两天，11 月 12,13 日。

会议地点：上海锦江汤臣洲际大酒店

中国，上海 浦东新区 张杨路 777 号

会 议 费：1200 元　高校师生：800 元

会议网址：www.lsdyna.cn

联系我们： chinaconf@lstc.com

参加会议邀请和报名

本次大会的宗旨是促进软件开发者与用户之间以及用户与用户之间的互动及交流。我们真诚邀请并热诚欢迎学术界，工业界的专家学者，广大用户递交你们的技术论文，出席会议并分享你们的经验。欢迎合作伙伴出席和参加本次大会，设立展台展示您们的产品。

请到会议网页下载邀请函和报名表(参加本次大会和培训是同一张报名表)。报名表可发送邮件到：chinaconf@lstc.com 或发送传真至大连：0411-87538790。如需要邮寄邀请函或有任何会议问题，请联系我们。

联系人：史志鹏　　邮箱: chinaconf@lstc.com　手机: 13898415290

***大会的信息将随时发布在会议网站，请关注和查看会议网页。**

合办单位:

迪艾工程技术软件(上海)有限公司(ETA)
奥雅纳工程咨询(上海)有限公司(ARUP)
上海恒士达科技有限公司(HengStar)
美国 FEAINFORMATION Inc.

2015 第二届中国 LS-DYNA 用户大会_征文通知

本次大会中开发者与用户之间的互动和交流占非常重要的地位。为了促进 LS-DYNA 用户的技术交流并拓展 LS-DYNA 的应用领域，我们热诚欢迎来自各个领域使用 LS-DYNA 应用成果的技术论文，恳请各位不吝赐稿。优秀的论文作者，将被邀请作为此次大会的演讲嘉宾。

(1) 征稿范围:

Automotive crashworthiness 汽车碰撞
Occupant safety and CPM airbags 乘员安全和颗粒气囊
Metal forming 金属成形
Optimization 结构优化
Composites and other materials 复合材料及其它新材料
Robustness 可靠性
Spotwelding, bonding 点焊、粘结技术
Implicit 隐式算法
Pedestrian safety 行人安全
Impact, drop test 冲击、跌落实验
Ballistics and penetration 弹道和穿透
Fluid Structure Interaction and ALE 流固耦合分析和 ALE
Computational Fluid Dynamics 计算流体力学
CAE process integration CAE 流程整合
Vibration, noise and fatigue 振动、噪声和疲劳分析
Heat transfer 热流
Electro Magnetics 电磁耦合
DEM and SPH 离散单元法和 SPH

我们也欢迎涵盖下列领域内的论文：
Aerospace 航空
Manufacturing Processes 制造
Biomechanics 生物力学
Civil Engineering 土木工程
Nuclear Engineering 核工程
Seimic Engineering 地震工程
Ship Building/Offshore 造船，离岸工程
Transportation 交通工程

(2) 投稿方式:

请将摘要(1-2 页)或全文以电子邮件形式发送至电邮：chinaconf@lstc.com
语言：中文或英文。欢迎同时投递中英文稿件; 请写明通讯地址、邮编和电子邮件。

(3) 摘要提交截止日期：2015 年 9 月 10 日；

(4) 录用稿通知截止日期：2015 年 9 月 30 日;

(5) 正文提交截止日期：2015 年 10 月 20 日;

优秀论文英文将发表在“FEA Information Engineering Journal” (ISSN #2167-1273)英文版期刊。优秀论文中文将发表在 FEA Information 中文“有限元资讯”期刊。

大会主会场

2015 第二届中国 LS-DYNA 用户大会

赞助商 - 参展商

LSTC 是国际著名的有限元仿真软件公司，它的产品包括 LS-DYNA®，LS-PrePost®，LS-OPT®等。继 2013 首届中国 LS-DYNA 用户大会成功举办后，LSTC 定于 2015 年 11 月 9-11 日在中国上海举办第二届中国 LS-DYNA 用户大会。大会将邀请海内外业内专家，LSTC 的技术骨干及广大客户，介绍软件的最新功能，并分享使用经验。中国 LS-DYNA 用户大会将继续定期举办，并成为相关领域的学者和工程技术人员交流研究成果和了解软件最新发展动态的一个重要平台。

本次大会为了加强 LSTC 与在中国的合作伙伴的沟通和合作，同时给合作伙伴提供沟通，宣传平台，将设立赞助和展位。在此特向合作伙伴，企业征集活动合作和赞助。我们真诚邀请贵方成为第二届中国 LS-DYNA 用户大会的赞助和参展伙伴。欢迎出席和参加本次大会，设立展台展示您们的产品。

会议日期：2015 年 11 月 9-11 日

会议地点： 上海锦江汤臣洲际大酒店

中国，上海 浦东新区 张杨路 777 号

会议网址：www.lsdyna.cn　　**联系我们：**chinaconf@lstc.com

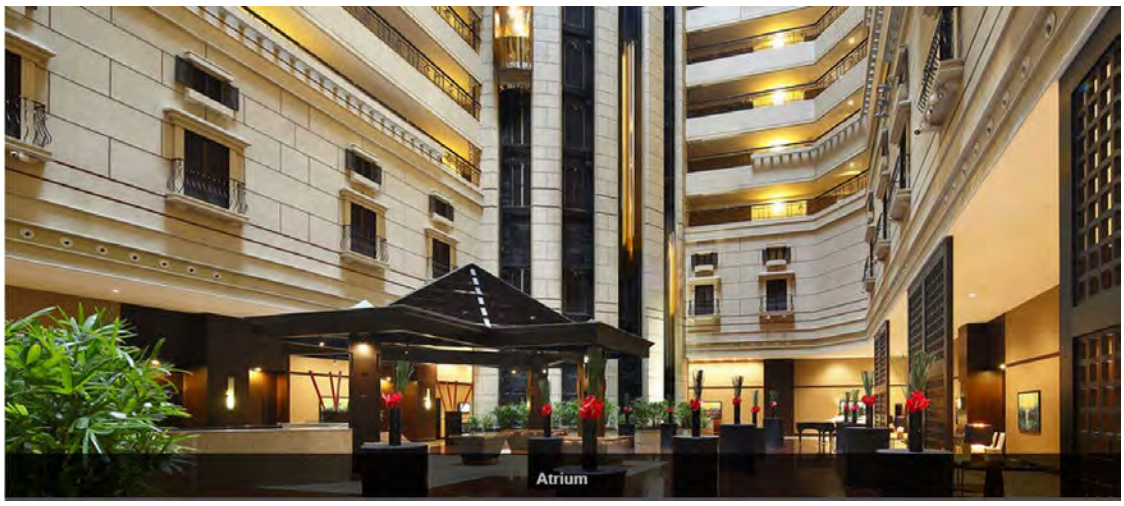
主办单位：美国 Livermore Software Technology Corp.

中国 大连富坤科技开发有限公司

合办单位:

迪艾工程技术软件(上海)有限公司(ETA)
奥雅纳工程咨询(上海)有限公司(ARUP)
上海恒士达科技有限公司(HengStar)
美国 FEAINFORMATION Inc.

有意加入赞助商和参展商，请与大会会务组联系。



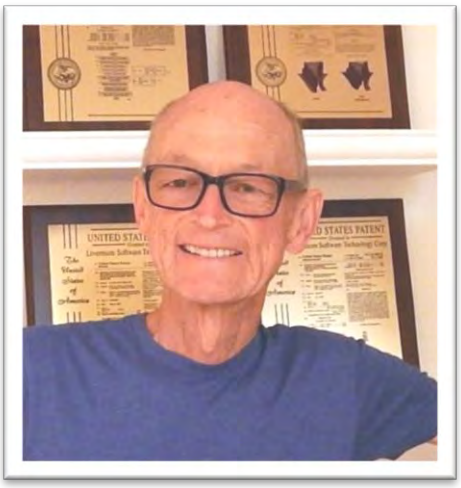
宾馆内大会展台区域

2015 第二届中国 LS-DYNA 用户大会

演讲嘉宾

Dr. John O. Hallquist

美国工程院院士，LSTC 公司创始人和总裁。在有限元计算业界, 他和他的团队研发的 LS-DYNA 软件令人瞩目，LS-DYNA 代表了非线性、 显式算法领域极高的工程研究和应用成就，Dr. John O. Hallquist 是有限元计算业界最受人尊敬的专家之一。



1974 年于 Michigan Technological University 获得博士学位后，Hallquist 博士进入 Lawrence Livermore 国家实验室，承担 DYNA 的研发工作。在他对显式有限元方法的一系列开创性工作，特别是成功地解决了接触处理问题之后，DYNA 软件开始被广泛传播并应用。1987 年，Hallquist 博士创立了 Livermore Software Technology Corporation (LSTC 公司)，并推出了 DYNA 的商业化版本 LS-DYNA®。秉承“一个软件，多种应用(One code, multi-physics)” 的理念，成功地将隐式计算，及许多其它功能引入 LS-DYNA®。现在，LS-DYNA®已经在汽车碰撞，制造，模具成形，航空，生物工程等许多领域得到广泛应用。基于他对以 DYNA 和之后的 LS-DYNA®为代表的显式有限元方法的杰出贡献，他在 2007 年当选为美国国家工程院院士。

自 1987 年 Dr. John O. Hallquist 创建 LSTC 公司，已推出 LS-DYNA, LS-PrePost, LS-OPT ,LS-TASC 等系列软件。

林忠钦

中国工程院院士，上海交通大学常务副校长，教授，博士生导师。1982 年毕业于上海交通大学船舶工程专业, 1989 年在上海交通大学获船舶结构力学博士学位。曾任机械与动力工程学院常务副院长等职务。近 20 年来主要从事“薄板产品制造与质量控制”，在汽车板精益成形技术、轿车车身制造质量控制、薄板产品数字化封样技术、复杂产品数字化设计等方面取得重要的理论和技术突破，研究成果在钢铁、汽车、机车、飞机和重大装备等领域得到广泛应用。林教授和他的团队长期使用 LS-DYNA，并积累了丰富的经验。

周青

清华大学教授，研究领域为汽车碰撞安全性、乘员和行人碰撞保护、车身轻量化、车身材料和结构在碰撞载荷下大变形失效。周教授长期使用 LS-DYNA，在汽车碰撞模拟、轻质材料大变形失效模拟、结构连接失效模拟等方面有诸多研究成果。周教授 1985 年毕业于北京大学力学专业，1988 年获北京大学固体力学专业硕士学位，1994 年获得麻省理工学院应用力学专业博士学位，在 MIT 就读期间还获得机械工程硕士学位，1994 年至 1999 年在美国通用汽车公司研发中心工作，1999 年至 2003 年在美国联邦政府交通部 Volpe 研究中心工作，2003 年回国，作为清华大学“百人计划”引进教授在汽车工程系任教。周教授还兼任中国汽车工程学会汽车安全技术分会主任委员，International Journal of Impact Engineering 副主编，是美国机械工程师学会（ASME）和美国汽车工程师学会（SAE International）会员。

James C Cheng

美国福特汽车公司汽车研究和创新中心高级经理。郑博士于 1979 年获得了台湾大学工程学学士学位，1982 年和 1986 年分别获得美国加州大学伯克利分校硕士学位和普渡大学的博士学位。他的学习和研究集中在工程力学和有限元方向。他于 1988 年加入福特汽车，26 年来一直从事碰撞安全性和乘员保护的方面。在福特汽车，郑博士由技术专家开始逐步成为部门主管，经理和高级经理。郑博士加入福特前 20 年任职于产品开发部。他在安全领域的设计，仿真，开发和测试方面经验丰富。自 2010 起，郑博士调职至福特汽车研究和创新中心，专注于先进的安全技术的发展，人体力学的研究，及针对未来汽车技术如先进的材料/储能；未来的交通系统和驾驶环境;驾驶辅助系统的安全考虑。

Uli Franz

德国 DYNAmore 的联合创始人。DYNAmore 是 LS－DYNA 在欧洲和德国的最大经销商，是 LSTC 的开发和合作伙伴。Uli Franz 已从事 LS-DYNA 工作近 20 年。在过去的 14 年，他担任 DYNAmore 的总经理。在此之前，他是有限元分析顾问和设计工程师。他曾就读于曼海姆应用科学大学的机械工程专业，达姆施塔特大学和牛津大学的研究数学专业。

2015 第二届中国 LS-DYNA 用户大会

培训课程

本届 LS-DYNA 用户大会在会后提供技术培训。为期两天，11 月 12,13 日。所有培训课程由美国 LSTC 资深专家讲授。这些专家都是多年从事 LS-DYNA 研究，开发和技术支持的专业人士。培训课课程内容及指导教师介绍等，请查看会议网页。(*如何下载安装，申请许可文件和运行 LS-Dyna 程序？)

（1）授课方式：课堂讲授。大多数课程包括上机实习，学员需要自带笔记本。LSTC 将为所有学员提供一个月的 LSDYNA 试用版许可(One month Free Demo License)。请随报名表将 LSTCLOG 文件发给我们。开课签到时，我们会给你许可文件。如报名时不能提供 LSTCLOG，请于开课前一周发给我们。

（2）颁发证书：参加培训的学员，可获得 美国 Livermore Software Technology Corp.颁发的证书 (LSTC LSDYNA Training Certification)。

（3）培训费用：每门课程费用 2000 元。

（4）报名方式：请填写 LSDYNA 技术培训报名表后，附加 LSTC Log 文件通过 E-mail 发至：chinaconf@lstc.com。

（5）报名截至日：2015 年 11 月 2 日。每门课程参加人数不超 30 人。少于 8 人不开课。

（6）联系方式：

电子邮件： chinaconf@lstc.com

（7）会议网址：http://www.lsdyna..cn
http://www.dalianfukun.com/conference

No 课程代号	Class Title 课程名称	Language 语言	Instructor 授课专家
C1	Crash and Safety 汽车碰撞与安全分析	Chinese/English 中文/英文	Isheng Yeh 葉益盛
C2	ALE and its Applications ALE 方法及其应用	Chinese 中文	Hao Chen 陈皓
C3	Lagrangian Particles Methods(DEM and SPH) in LS-DYNA and their Applications LS-DYNA® 颗粒法(DEM 和 SPH)及其工程应用	Chinese 中文	Jingxiao Xu hailong Teng 许敬晓，腾海龙
C4	Optimization using LS-OPT and LS-DYNA LS-DYNA 和 LS-OPT 优化设计及其应用	English 英文	Anirban Basudhar
C5	LS-DYNA® in Sheet Metal Forming Simulation LS-DYNA® 在板料成型模拟中的应用	Chinese 中文	Xinhai Zhu 朱新海
C6	NVH and Frequency Domain Analysis LS-DYNA 的 NVH 及频域分析	Chinese 中文	Yun Huang, Zhe Cui 黄云，崔喆

LS-DYNA 中的离散元法

滕海龙/Hailong Teng, 王季先/Jason Wang

Livermore Software Technology Corporation

LS-DYNA 的思想是一个程序来无缝地解决“多物理”、“多进程”、“多阶段”、“多尺度”问题 (Multi-physics, multiple stages and multi-processing in one software code) 。作为世界上最著名的通用非线性有限元分析程序，LS-DYNA 起初主要用于求解各种二维、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，在此基础上，LS-DYNA 又增加了可压缩流和不可压缩流的数值；电磁场的计算等功能模块。近年来，根据用户的需求， LS-DYNA 增加了离散元功能。 本文简要的介绍新增加的离散元方法，并对可能的领域进行初步的探讨。

离散元（discrete element method 或者 distinct element method)是一种无网格的数值计算方法，主要用来计算大量颗粒在给定条件下如何运动和相互作用。离散元显式的计算物理模型中每个颗粒的运动以及相互作用力，这样在数值模拟中它能提供任意时间步里每个颗粒的详细信息包括速度，位移，作用力等。现在离散元法在处理颗粒系统，不连续介质力学中被的认为是一种卓有成效的数值算法，广泛用于与岩土、矿冶、农业、食品、化工、制药和环境等领域。

离散元方法（DEM）首次于 1971 年由 Cundall 提出用于处理岩土力学问题， 后来 Cundall 与 Strack 又把这种方法应用到颗粒系统中。离散元方法的思想起源于分子动力学（molecular dynamics)，从本质上来讲，离散元和分子动力学方法类似，都是把整个介质离散成一系列独立运动的粒子（颗粒/原子）。在离散元和分子动力学中， 每个颗粒/原子都和邻近的颗粒/原子发生相互作用， 颗粒/原子的运动受经典运动方程控制，通过求解牛顿方程得到颗粒/原子的运动轨迹。然而二者还是有很大差别： 分子动力学计算原子之间的相互作用力通过对势函数的求导得出，而离散元中颗粒的相互作用力基于接触力学。此外，分子动力学中每个原子通常只有 3 个平动自由度，而离散元方法中每个颗粒有 6 个自由度，除了平动外通常还需要考虑颗粒体在外力作用下的旋转运动。另外离散元中颗粒的形状，颗粒尺寸分布，以及颗粒之间填充气体，液体对颗粒材料宏观性能都有很大的影响。

LS-DYNA 中每个颗粒为一个单元，单元形状采用圆球颗粒模型，简称为 DES (discrete element sphere)单元 ， 每个 DES 单元有 6 个自由度，包含 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。DES 单元本身是不可变形的，但是单元和单元之间允许有很小的假性重叠来提供惩罚接触力。基于 DES 单元的位置和速度， 所有单元的运动可以通过求解牛顿方程和欧拉方程得到

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum f_{ji}^c + f_i$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum r_i \times f_{ji}^c + M_i$$

其中m_i和I_i分别是 DES 单元的质量和转动惯量，v_i和ω_i分别是 DES 单元的速度和角速度，

f_i是外部作用在 DES 单元上的力，M_i是作用在 DES 单元上的力矩，f_{ji}^c为第 j 个 DES 单元对第 i 个 DES 单元的接触力, r_i是第 i 个 DES 单元中心到接触点的矢量

接触模型是离散元计算的核心。所谓接触模型就是确定颗粒接触时的相互作用力。离散元计算中首先把相互作用力分解为法向力和切向力（法向指的是两接触颗粒中心之间的连线），所以接触模型一般包含法向相互作用和切向相互作用。LS-DYNA 采用弹簧-阻尼器模型，其示意图如下：

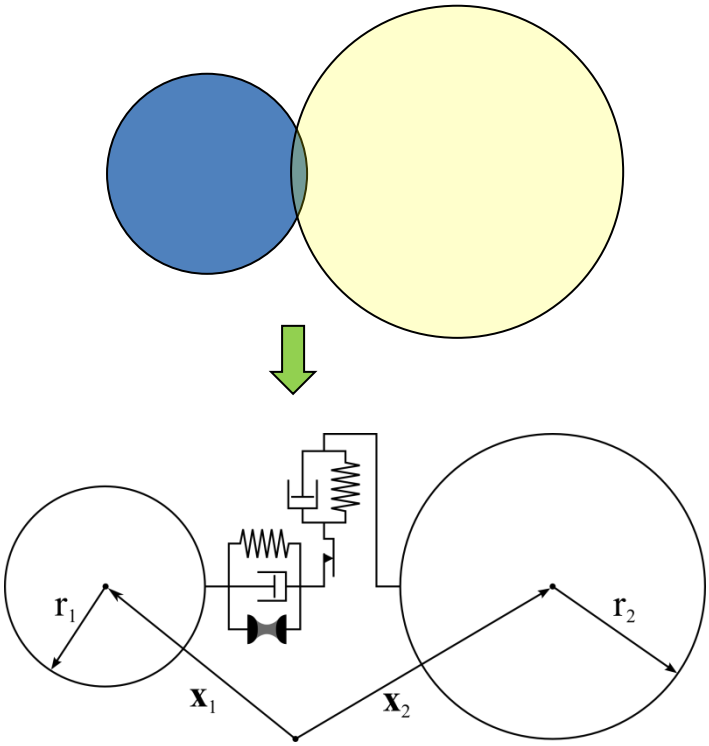


图 1 DES 接触模型

法向力和切向力可以根据两个单元的相对位移来计算：

$$f_n = -k_n\delta + d_n v_n$$

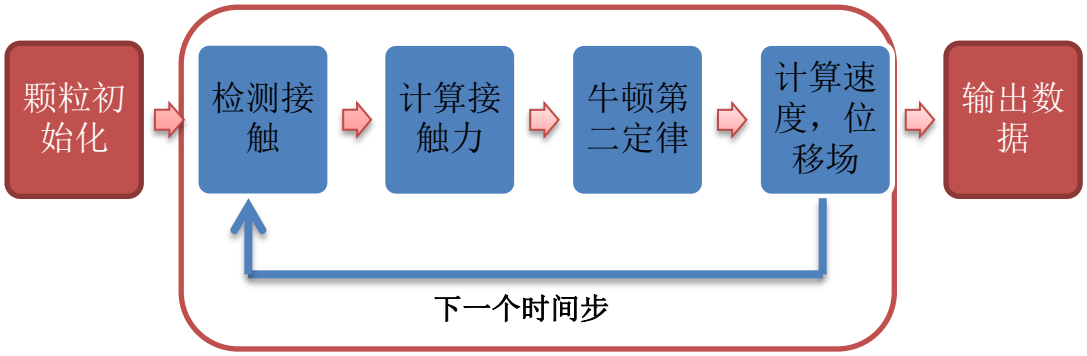
$$f_t = \min(\mu f_n, -\int k_t v_t dt + d_t v_t)$$

其中 k_n为法向刚度， k_t为切向刚度，d_n为法向阻尼，其中 d_t为切向阻尼，μ 为摩擦系数，通常根据试验或者经验定。

LS-DYNA 中 DES 的计算过程中主要包含以下几个过程：

1）接触判断，计算哪些颗粒间相互产生作用
2）根据相应的接触算法计算接触力。同时计算和其他单元的耦合力。(FEM,ALE,SPH, PBM…)
3）运动方程判断，单元物理量的更新。
4）计算时间增量，进入下一个时间步

其算法流程如下:



DES 功能的加入，符合 LS-DYNA 一个程序来提供无缝地解决“多物理”、“多进程”、“多阶段”、“多尺度”问题的目标(Multi-physics, multiple stages and multi-processing in one software code)。丰富了 LS-DYNA 的求解能力，拓展了 LS-DYNA 的应用领域。

在以后的系列中，将更详细的介绍 DES 相关的关键字设置，湿颗粒模型，DES 的键模型(BOND)来模拟连续介质力学问题, DES 和固体单元，板单元，以及梁单元的耦合，DES 和平滑粒子动力学(SPH)，任意拉格朗日欧拉法(ALE)，爆炸粒子法(PBM)等其他方法的耦合等计算功能及其应用。

参考文献

[1] P. A. Cundall, “A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems”,
in Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, France, 1(1971), paper No. II-8.

[2] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, “A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies”, Geotechnique, 29(1)(1979), pp. 47–65.

作者简介

***滕海龙/Hailong Teng** 博士毕业于加州大学洛杉矶分校。从 2008 年至今，在 LSTC 从事离散元，气囊粒子法(CPM)及爆炸粒子法(PBM) 的开发和研究。

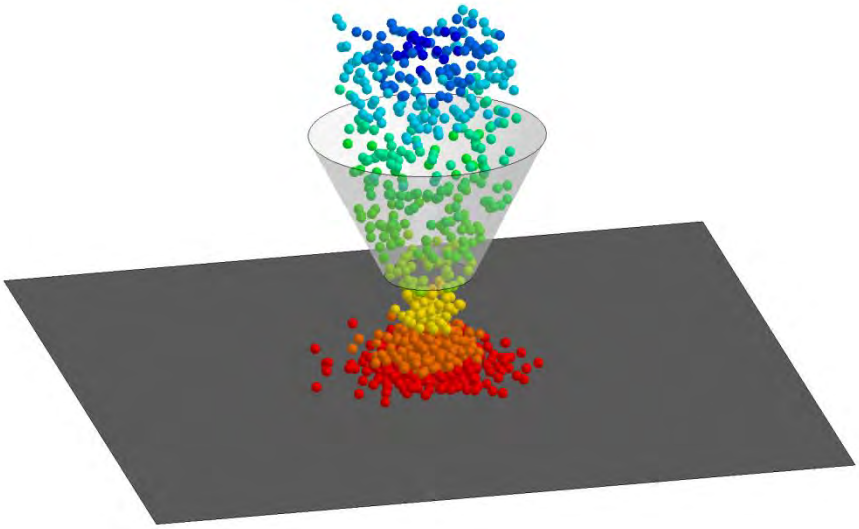
***王季先/Jason Wang** 博士毕业于加州伯克利大学， 1997 年加入 LSTC，负责任意拉格朗日欧拉法，（ALE），流固耦合（FSI），并行计算（MPP）及其它离散元方法如 Discrete Element, SPH, CPM 的开发和研究。

通过校准模型来改进离散元模拟的精度

Adrian Jensen[1]
Kirk Fraser[2,3]
George Laird[1]
[1]*Predictive Engineering, Portland Oregon*
[2]*Predictive Engineering, Quebec Canada*
[3]*University of Quebec at Chicoutimi*

Abstract: 离散单元法（DEM）正在迅速成为模拟颗粒材料流动的首选数值方法。这种强大的分析技术在采矿，农业，食品加工等领域有广泛的应用。在本文中，我们提出三个简单的校准模型作为用 DEM 模拟干燥和半干燥颗粒状物质的出发点。这三个测试被设计成尽可能的简单以减少测试模拟的运行时间。测试以特定的顺序运行并且提供一系列的不依赖多个未知变量的校准流程。

本文也将简要地讨论其他的标准测试方法，如旋转鼓和剪切单元（Jenike）测试。这些测试往往太复杂，涉及到多个未知变量以至于它们不适合作为初始数值模型的校准。不过，它们可以作为三个基本的测试模型的扩展。本文将帮助分析人员提高他们离散元建模的精确性和有效性。



关键字
离散元，校准，颗粒流，提高模拟精度

介绍

本研究的目的是通过三个简单的测试模型来改进离散元法（DEM）模拟的精度。每个测试模型都分离出颗粒材料的单一的物理特性这样分析人员只需要调整单个模型参数。通过这种方式可以尽量的减少调整的参数，可在最短的时间内产生最精确的模型。

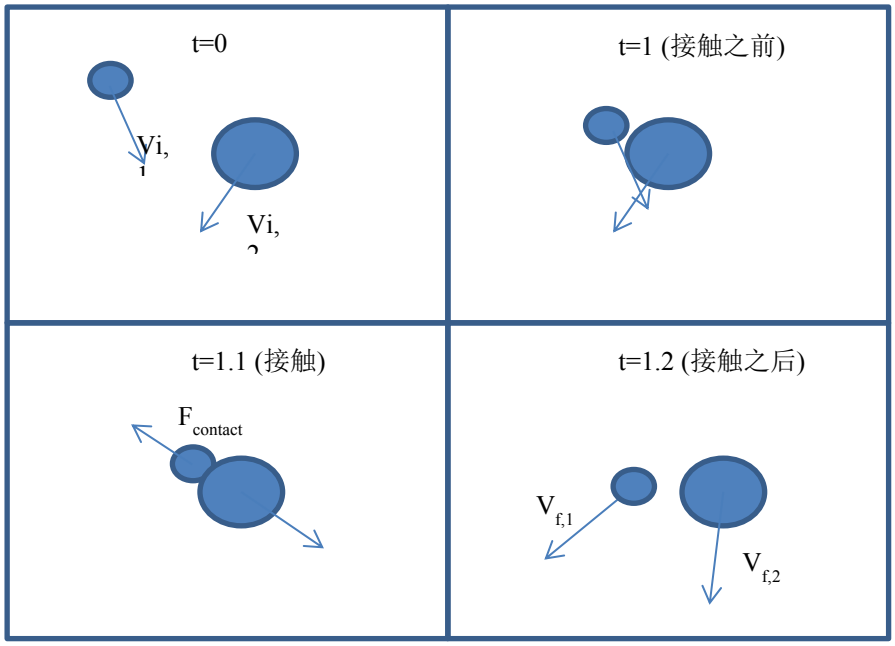
颗粒材料很难理想化，因为虽然单个颗粒是固体，但是散装材料的整体行为更像是流体。散装材料承受剪切应力的能力远远小于同种材料的单个颗粒。此外，散装材料的剪切强度可能更依赖于颗粒大小、形状而不是依赖于单个颗粒的剪切强度。常见的颗粒材料包括咖啡，砂，谷物，木屑，胡椒，土壤，豆类，球轴承，碎石等等。

离散元法是一种可用于模拟多种不同类型颗粒流动问题的有力工具。DEM 中很常见的一个应用就是将物体通过转移点从一个输送带传送到另一个输送带。Hastie 和 Wypnch[1] 使用 DEM 模拟这种流动问题并于基于连续介质模型的方法进行比较。近年来，把 DEM 与其它数值方法如 CFD 耦合可以求解热传导问题。 Bluhm-Drenhaus 等 [2] 使用 DEM-CFD 耦合法研究了石灰石到生石灰的转换。Grima 和 Wypnch[3] 勾勒出一个精细的校准方法，但他们的方法需要大量的设备设置。Coetzee Els [4] 提供了系统的二维 DEM 模拟的校准方法。我们工作的目的是提供一种简单快速的而且不需要显著设备设置的校准测试。

本文中所描述的方法适用于干燥颗粒材料。对于湿材料，这里列出的三个测试也是一个很好的起点，但需要更多的校准测试来完全捕捉湿颗粒之间存在的毛细力。湿颗粒可以用 LS-DYNA®创建 DEM 模型的时候在关键字* CONTROL_DISCRETE_ELEMENT 中设置 CAP=1。定义湿材料行为的参数可以参考 Rabinovich 等人提出的方程 [5，6]。另外一个关键假设是，该材料更有可能滑动而不是滚动。也就是说，这些方法的应用的最终目标是捕捉散装材料的流动，而不是单层颗粒的行为。

背景

在本文中所引用的离散元法在 1971 年由 Cundall 首先提出［7］，最初用于土壤、岩石力学的研究。离散元的基本概念是将颗粒材料理想化为小的刚性球体（一些代码允许模型是任意形状），并且利用这些球体之间的相互作用来捕获散装材料的行为。每个球单元的运动遵循牛顿定律。球体彼此之间以及与边界表面的相互作用是通过接触算法来处理。



在每个时间步粒子在空间中的运动（位置 s 和速度 v）由以下公式计算:

$$v = v_i + a(\delta t)$$

$$s = s_i + v_i(\delta t) + \frac{1}{2}a(\delta t)^2$$

当撞击时，接触力正比于粒子的的刚度，位置和速度。碰撞前后动量满足:

$$M_1 v_{i1} + M_2 v_{i2} = e(M_1 v_{f1} + M_2 v_{f2})$$

其中 “*e*” 是恢复系数(这取决于许多因素：摩擦，内聚力，粘合力等)。时间步必须足够小到确保粒子没有相互穿透，否则所施加的来分离球体的力会太大，并且系统将变得不稳定（节点爆炸）。

一个典型的 DEM 模拟的计算成本非常高; 一个有意义的模型通常包含上百万的颗粒，需要数天甚至数周来运行。最近在显卡上并行化 DEM 有了大量的进展。有许多研究小组正在研究如何加速 DEM。例如，Govender 等 [8] 用 CUDA C/ C ++写的非常快速和有效的多面体 DEM 求解器。

时间步

因为本文所有的模型都是基于显式求解器分析，所以需要计算一个稳定的时间步。为了确保数值方法的稳定性，可以利用 Raleigh, Hertz 或者 Cundall 的方法得到一个最小的时间步。 在本项目中，Cundall 时间步的 20%用来作为计算的时间步. LIGGGHTS 文献中提供了 Raleigh 和 Hertz 时间步的计算方法[9]:

Raleigh 时间步:

$$dt_{raleigh} = \frac{\pi\, r_{sphere}}{0.1631(\nu + 0.8766)} \sqrt{\frac{\rho}{E/[2(1+\nu)]}}$$

其中 r_{sphere} 是模型中最小粒子的半径， ρ 是密度， E 是杨氏模量， ν 是泊松比。

Hertz 时间步:

$$dt_{hertz} = 2.87 \left[\frac{(\rho(4/3)\,\pi\, {r_{shere}}^3)^2}{r_{sphere}\, E^2\, V_{max}} \right]^{0.2}$$

其中 V_{max} 模拟中最大相对速度(考虑到任何网格运动).

LS-DYNA DEM 代码中采用的是 Cundall 时间步 [10]:

$$dt_{cundall} = 0.2\,\pi \sqrt{\frac{\rho(4/3)\,\pi\, {r_{sphere}}^2}{\frac{E}{[3(1+2\nu)]}\, NORMK}}$$

NORMK 是一个刚度惩罚系数; 它通常取为 0. 1 至 0. 001。

数值方法的稳定性可以通过设置时间步等于前面提到的方法的最小值的 20%来保证。

$$dt = 0.2 \min(dt_{raleigh}, dt_{hertz}, dt_{cundall})$$

DEM 粒子尺寸

当选择离散元颗粒尺寸时，分析人员有许多因素需要考虑。首先要考虑的是所有单元的数量。为了保证一个合理的运行时间，在个人计算机上单元的数量受到限制，相对模拟复杂 DEM 问题的能力是比较新而且受限的。当用在本文中所描述的流程测试时，减少运行时间是最关键的，因为模型需要模拟多次才能收敛到一个精确的参数值。

理想的分析的情况是对于给定的计算机系统，实际的颗粒数目是一个合理的单元数量。在这种情况下，实际的颗粒尺寸可用于定义离散元尺寸。更常见的是，实际的颗粒尺寸要小得多，相应的颗粒的数量要大得多。这样如果使用实际颗粒的尺寸计算量将会不可接受。在这种情况下，可以用类似有限元的方法选择 DEM 颗粒尺寸的大小：为了准确的捕获系统的行为，必须使用足够多的单元，但是又不能用太多的单元以至于模拟无法在合理的时间内完成。

为了捕获材料的整体流动行为，我们建议在任何散料输送设备的宽度方向至少需要 8 个单元。即，离散元颗粒的直径应为不大于储料器、传送带、螺旋输送机、桶或其他容器宽度的 1/8。同样的经验法则也适用于当颗粒材料流过开口时：DEM 颗粒的最大直径应为开口直径的 1/8。当颗粒材料通过堆叠组装成一个圆锥形堆时，为了准确地捕捉材料的行为，堆的高度需要超过 DEM 粒子直径的 15 倍。

一般可以用两种方法查看这些颗粒大小准则：如果 DEM 颗粒直径保持恒定，必须调整模拟（储料器宽度，堆高度等）的几何形状以满足需求。如果提供了散装材料处理设备的几何形状，必须对 DEM 颗粒直径进行调整。本文采用并测试记录了第一种方法。

生成 DEM 颗粒

本文中所述的测试使用* DEFINE_DE_INJECTION 生成 DEM 颗粒。此方法允许用户定义一个平面，在给定质量流率、最小颗粒尺寸、最大颗粒尺寸的前提下离散元从该平面产生。另外，LS-PrePost®可以用球填冲引擎生成一组离散元。这要求用户提供一个用壳单元包围的封闭空间。根据用户定义的半径，球单元在此空间内产生 [11]。

校准测试流程

校准测试的概念很简单：给定三种颗粒材料性质（堆积密度，诱发流动角，注入堆积角），分析人员可以通过调整三个模型参数 (`*MAT_ELASTIC RO`, `*DEFINE_DE_TO_SURFACE_COUPLING FricS/FricD`, `*CONTROL_DISCRETE_ELEMENT Fric/FricR`）按顺序执行三种测试（体积测试，表面摩擦测试，内摩擦测试）来实现颗粒材料的精确理想化。这些测试的顺序是这样的，对于给定的测试，需要校准的特定参数在之前面的测试中影响不大。例如，在最后一个测试中（内摩擦测试 – 注入堆积角）堆积密度和表面摩擦都有可能对结果产生很大的影响，但此测试感兴趣的参数，内摩擦系数，对之前的测试影响不明显。

体积测试 –堆积密度

三个测试中的第一个是体积测试。给定堆积密度，分析人员可以利用该测试来调整颗粒的密度（用于 DEM 颗粒的密度）。通常，如果只知道堆积密度，单个颗粒的密度是未知的。然而，DEM 软件要求分析人员提供的不是堆积密度而是颗粒的密度。

这个模拟需要一个容器以容纳 DEM 颗粒、一个刮板以让 DEM 颗粒与容器的顶部持平、以及 DEM 颗粒。

这个测试包括三个不同的阶段:

- 喷射 –这个阶段生成 DEM 颗粒并填进容器

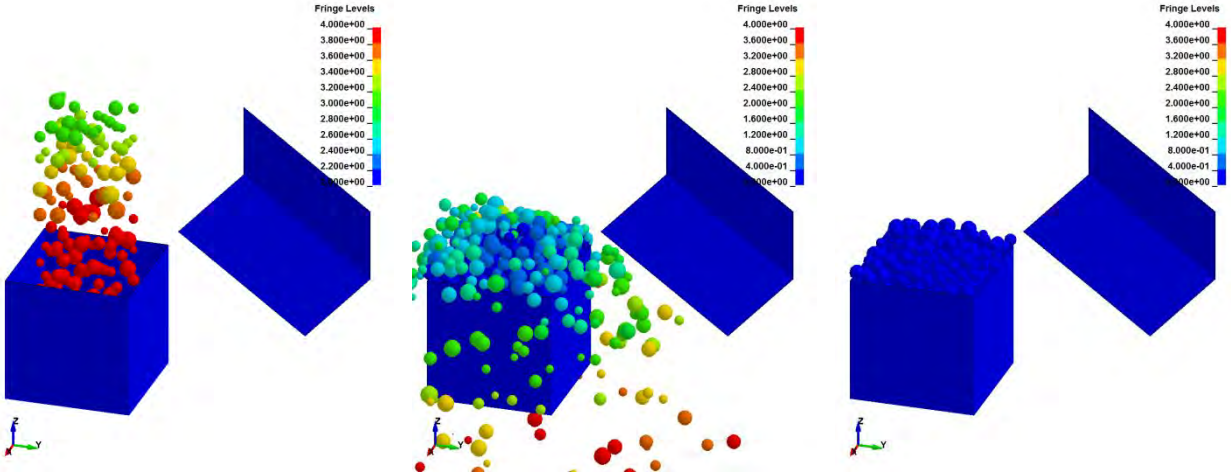
- 沉降–在这个阶段 DEM 颗粒达到静平衡状态
- 削平– 刮板横跨容器顶部运动并且去除多余的颗粒

在喷射和沉降阶段，通过振动容器来协助把单元填充到容器中。下表列出了模拟步骤的总结。

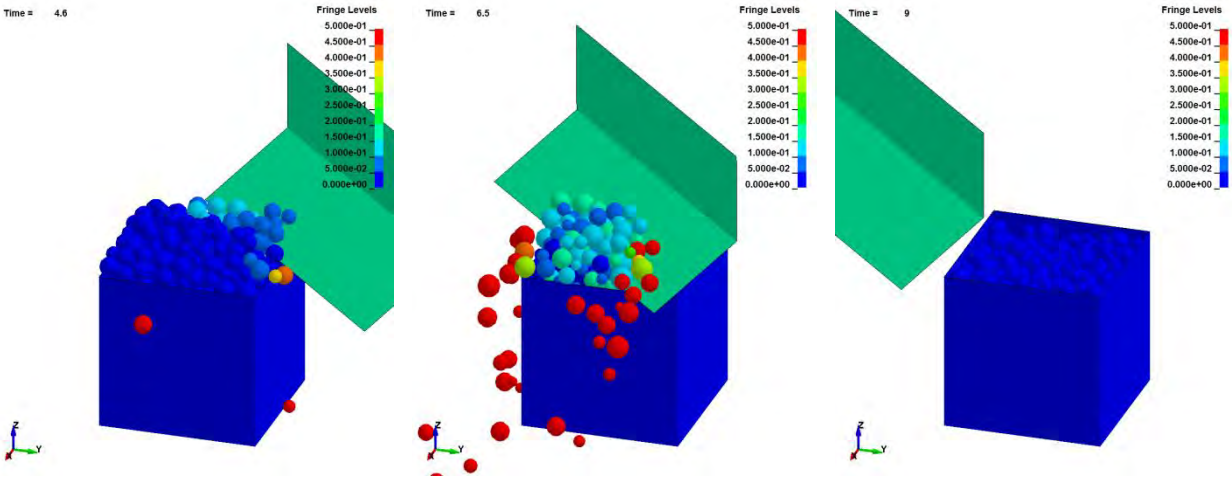
模拟步长	起始时间 (秒)	结束时间 (秒)	持续时间 (秒)
喷射	0.0	2.0	2.0
沉降	2.0	3.0	1.0
振动	0.0	2.5	2.5
削平	3.0	10.0	7.0

一旦刮板从容器中除去所有多余的材料，就可以计算出容器内的离散单元的质量。由容器内单元的总质量除以容器的体积就可以得到堆积密度。调整堆积密度是一个简单的过程，其中初始颗粒密度（* MAT_ELASTIC 卡上的 RO）通过从模拟计算得到的堆积密度和给定的实际堆积密度的比率进行缩放。不像其他的测试，这不是一个迭代过程，一旦调整材料的密度，堆积密度将匹配数据。

下面的一系列的图演示了过程中的喷射和沉降阶段。第一张图显示 DEM 喷射刚刚开始。接下来的图显示了当单元沉降到容器并溢出。最后一张图显示单元已经处在静平衡状态，准备开始削平的过程。



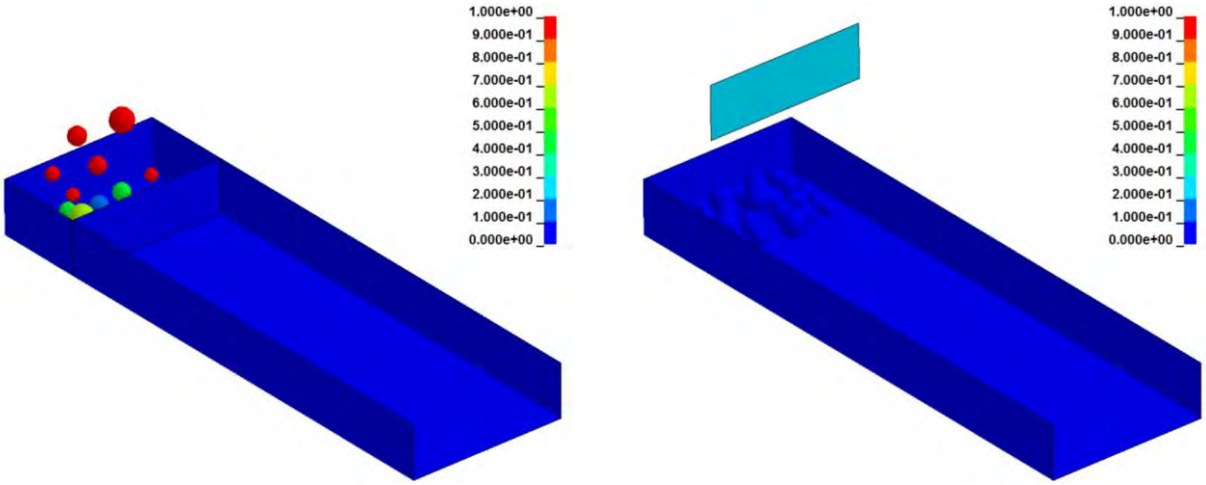
下一系列图像显示了削平的过程。刮板横跨容器顶部运动并且去除多余的颗粒。



表面摩擦测试 –诱发流动角

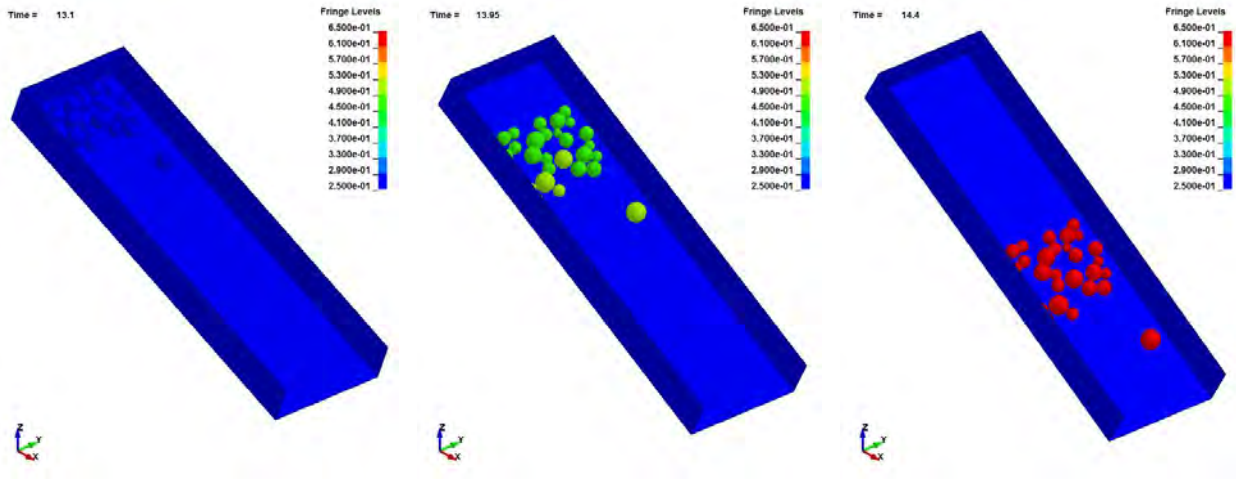
接下来是表面摩擦测试。这个阶段的校准流程预先设定了颗粒的大小，分布和密度。正如在背景部分中所介绍，如果预先设定 DEM 颗粒的大小，则有可能需要调整测试装置的几何尺寸以适应单元大小调整准则。

这个测试的目的是要校准 DEM 颗粒和它们将要接触的表面之间的摩擦系数。如果 DEM 模拟中 DEM 颗粒和多种材料接触，则应对每种材料进行这项测试。该测试由一个狭长的有侧壁的槽组成。当分析开始时，一个临时的门将 DEM 的颗粒聚集在斜槽的一端。一旦所有的 DEM 颗粒沉降在起始区，门被提起，滑槽慢慢旋转，直到槽的角度陡到 DEM 颗粒开始滑动。



该测试包含五个不同的阶段：

- 喷射–这个阶段生成 DEM 颗粒并填进容器
- 沉降–在这个阶段 DEM 颗粒达到静平衡状态
- 门运动–门被提起，此后对模拟没有任何作用
- 沉降– 第二个沉降过程，颗粒在没有门的情况下达到平衡状态
- 表面翻转 – 斜槽转动，直至颗粒开始滑动



类似于前面的模拟, 使用* BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID 对容器施加微小的正弦函数振动，振幅为 0.002 米。在本试验中，我们尽量避免压紧单元，而是

尽量减少了散装材料的能态。如果单元被压缩得太紧，有可能一旦门被抬起它们将很明显地移动，从而难以确定真正的导致滑动的斜槽角。下表列出了仿真步骤的总结。

模拟步长	起始时间 (秒)	结束时间 (秒)	持续时间 (秒)
喷射	0.0	1.0	1.0
沉降	1.0	3.0	2.0
振动	0.0	2.0	2.0
门移动	3.0	5.0	2.0
沉降	3.0	10.0	7.0
表面翻转	10.0	20.0	10.0

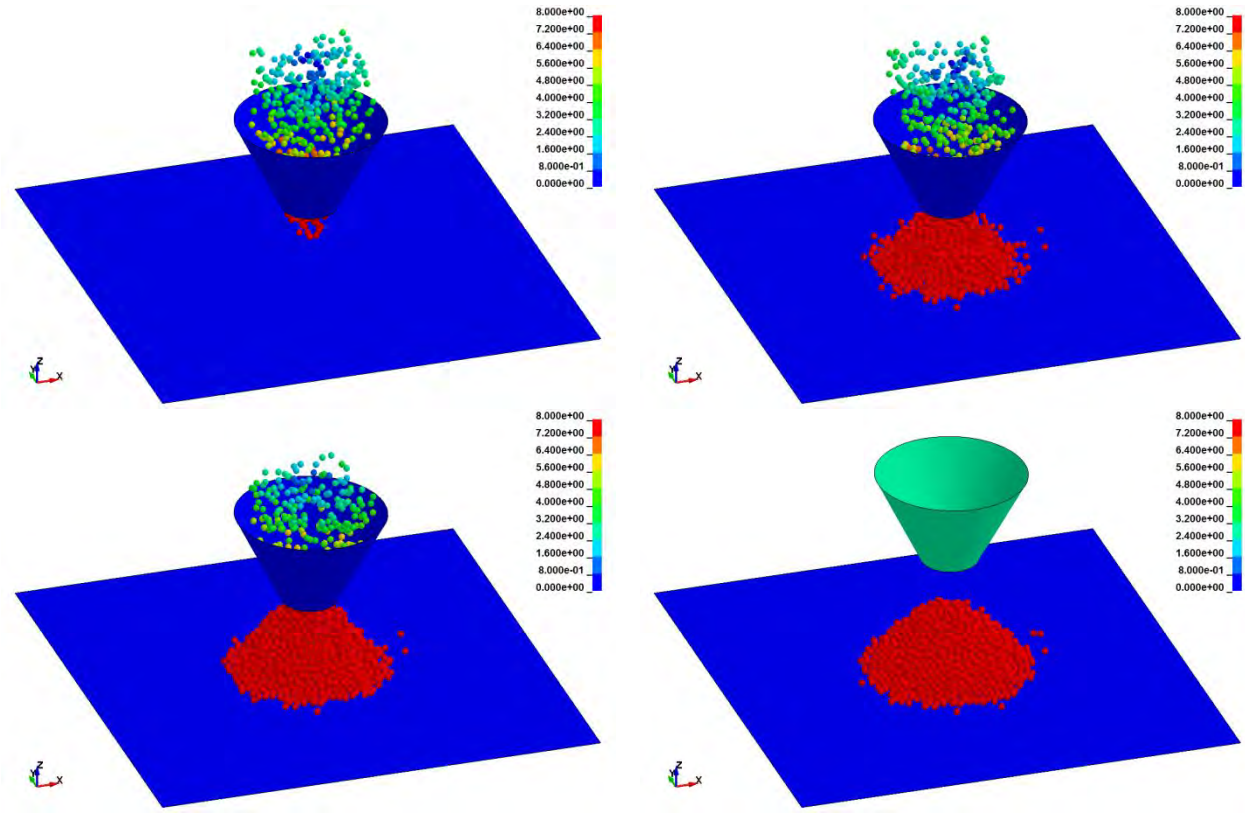
从这个模型中提取结果是难以置信的简单。一旦堆材料开始滑动，停止模拟，并且测定导致滑动的角度。关键是要确定散装材料的初始运动，并忽略任何不相关的运动诸如在斜槽翻转之前表面单个单元的滚动。不同于第一次测试，本测试测得的输出和要校准的参数之间的关系不是线性的。需要反复的迭代来发现 DEM 颗粒和表面之间的精确的摩擦系数。首先需要猜测一个初始值，随后的猜测由模拟出的导致滑动的角度与真实角度之间的差异指导。
这个反复的过程概要如下：

- 估计一个摩擦系数
- 数值模拟
- 确定导致颗粒滑动的斜槽临界角
- 计算模拟的斜槽临界角和期望的临界角之间的梯度
- 根据梯度估计一个新摩擦系数
- 重复步骤 2 到 5 直到获得一个合理的误差

在*DEFINE_DE_TO_SURFACE_COUPLING 卡中可以找到在此过程中需要改变的摩擦系数。在每次迭代中需要调整的参数是 FricS 和 FricD。正如在背景部分中所介绍，目标是捕捉散装材料的流动，因此滑动摩擦 (FricS) 和滚动摩擦 (FricD) 之间的差别可以忽略，两个参数使用相同的值。这一流程迭代过程收敛地相当迅速（通常 3 至 4 次迭代）。

内摩擦测试 – 注入堆积角

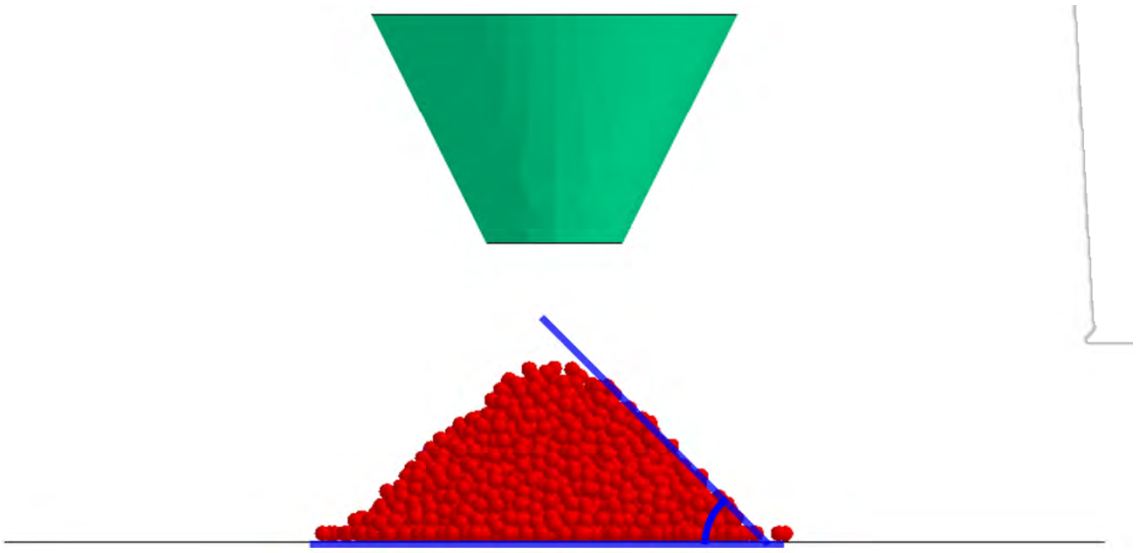
该系列中的第三个也是最后一个测试将帮助校准离散元之间的内部摩擦或摩擦。当开始分析时，一个圆锥被放置在水平板上方。当锥体上方生成 DEM 颗粒通过开口下落时，它们形成一个圆锥形堆。当到一定的程度后堆的顶部到达开口锥体的底部。这时把锥体向上移动使堆的增长不受抑制。



下表列出了模拟步骤的总结。

模拟步长	起始时间 (秒)	结束时间 (秒)	持续时间 (秒)
喷射	0.0	7.0	7.0
锥体移动	5.0	15.0	10.0
沉降	7.0	18.0	11.0

一旦沉降完成就可以测量圆锥形堆相对于平面的角度，这就是堆积角。类似于前面的测试，可能需要调整测试装置的尺寸以适应 DEM 颗粒的大小。在这种情况下，分析人员必须考虑所使用的装置的尺寸和颗粒的总体积，如果用太少的颗粒生成堆，堆积角会不准确甚至难以测量。尽管有提供的准则，对模拟结果目视检查就可判断是否有足够的单元。



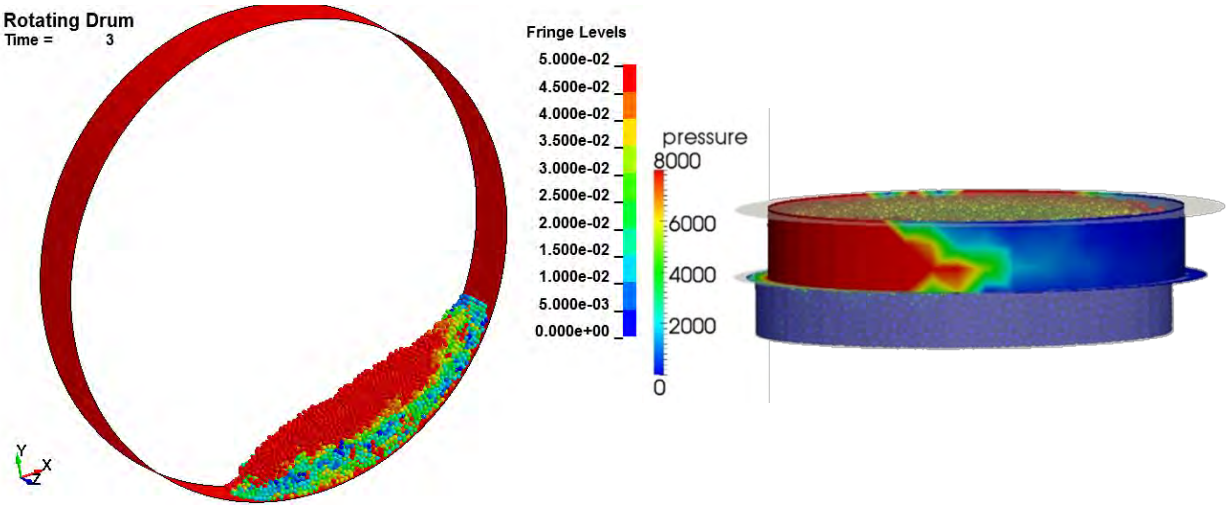
类似于表面摩擦测试，这个测试也是一个反复迭代的过程：

- 估计一个摩擦系数
- 数值模拟
- 确定 堆积角
- 计算得到的堆积角和期望的角度的梯度
- 根据梯度估计一个新摩擦系数
- 重复步骤 2 到 5 直到获得一个合理的误差

在* CONTROL_DISCRETE_ELEMENT 卡中可以找到在此过程中被改变的摩擦系数。在每次迭代中需要调整的参数是 Fric 和 FricR；两个参数应使用相同的值。

其他测试流程

虽然本文的目的是提出三个简单的测试以帮助提高离散元模拟的精确性，应注意的是也存在其他的校准测试。



旋转鼓

通常来说，振动，旋转或移动颗粒样本的堆积角与静态样本的不同。这个试验的目的是校准散体流的堆积角。上左图显示了一个侧旋转鼓测试的示例。

Jenike 剪切盒

此测试可用于确定散装材料的许多不同的参数，如内摩擦，壁摩擦系数等。试验的主要目的是确定材料的剪切强度。用该方法校准模型时需要涉及到大量的参数。因此，用这种方法校准的前提是已经运行了三个基本测试。上右图显示了一个 Jenike 剪切盒测试的示例。因为必须在剪切盒盖上施加力或位移控制条件，该测试很难用数值模拟实现。想了解更多有关该测试的信息的话可参考[12]。

结论

这些校准模型的目标是提高DEM 模拟的精度。该测试模型应该是紧凑和有效的，允许在较短的计算时间内完成多次迭代。我们所有的 DEM 咨询工作都是以这些校准模型作为出发点。如同所有的模拟，理想化假设的代价是损失了精确性。这些简单的校准模型可以用于改进 DEM 模拟输入参数的精度。

致谢

我们要感谢LSTC 的杰出团队，尤其要特别感谢王季先，滕海龙，韩志东。.

LS-DYNA 输入文件

对于任何感兴趣的人士，请联系作者获得输入文件。

参考文献

[1] Hastie DB, Wypych PW. Experimental validation of particle flow through conveyor transfer hoods via continuum and discrete element methods. Mechanics of Materials. 2010;42:383-94.
[2] Bluhm-Drenhaus T, Simsek E, Wirtz S, Scherer V. A coupled fluid dynamic-discrete element simulation of heat and mass transfer in a lime shaft kiln. Chemical Engineering Science. 2010;65:2821-34.
[3] Grima AP, Wypych PW. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle–structure interactions under impact conditions. Powder Technology. 2011;212:198-209.
[4] Coetzee CJ, Els DNJ. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. Computers and Electronics in Agriculture. 2009;65:198-212.
[5] Rabinovich Y, Esayanur M, Johanson K, Lin C-L, Miller J, Moudgil BM. Capillary Forces between Two Spheres with a fixed volume liquid bridge. 2005.
[6] Rabinovich Y, Esayanur M, Johanson K, Lin C-L, Miller J, Moudgil BM. The flow behavior of the liquid/powder mixture, theory and experiment. I. The effect of the capillary force (bridging rupture). Powder Technology. 2010;204:173-9.
[7] Cundall PA, Strack ODL. Discrete numerical model for granular assemblies. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1979;16:77.
[8] Govender N, Wilke DN, Kok S, Els R. Development of a convex polyhedral discrete element simulation framework for NVIDIA Kepler based GPUs. Journal of Computational and Applied Mathematics.
[9] C. Kloss PS, A. Aigner, S. Amberger, C. Goniva. LIGGGHTS User Manual. Austria2013.
[10] Wang J, Teng H, Han Z, Jensen MR. Discrete Element Method in LS-DYNA. Livermore, Ca.: LSTC; 2012.
[11] Karajan N, Han Z, Ten H, Wang J. Interaction Possibilities of Bonded and Loose Particles in LS-DYNA. 2013
[12] ASTM. ASTM-D6128-06 - Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2006.

利用LS-DYNA中的无黏结离散元模拟理想颗粒材料的平均应力状态

Michael T. Davidson[1], Jae H. Chung[1], Hailong Teng[2], Zhidong Han[2], Vinh Le[1]

[1] Bridge Software Institute, University of Florida, P.O. Box 116580, Gainesville, FL, 32611, USA
[2] Livermore Software Technology Corporation, 7374 Las Positas Rd., Livermore, CA, 94551, USA

引言

离散单元法（DEM）利用接触力学来研究微观粒子的动力学，目前已经被众多研究人员用来研究实验中颗粒材料表征单元体（REV）内所观测到的运动许可变形场。本研究用 LS-DYNA 内新近实现的离散元功能来模拟在准静态加载条件下理想颗粒体系的三维（3D）应力状态。在三维直角坐标系内，本文通过对接触力以及分支向量（来自 LS-DYNA 模拟得到的结果）的并积之和进行体积平均来研究单一尺寸无黏结离散元(UDES)系统内不同的区域内的应力分布，其中接触力是由作用在每个节点上的重力导致的。如果可行的话，我们将 LS-DYNA 数值模拟得到的应力结果和相应的手工计算进行比较。作为 LS-DYNA DEM 模块以及最近新增加的无黏结离散元应力计算算法的演示，本文在三个尺度上对体积平均应力进行研究：1) 小的颗粒体系中的单个球体；2) 实验室尺度上表征单元体的三轴压缩试验；3) 大的颗粒体系中不同位置的多个表征单元体。本文所展示的 LS-DYNA 离散元功能可以应用在初始地应力场模拟中，通过相关的微机械模型参数可以直接研究受限地压应力。

无黏结离散元概述

离散元法在 20 世纪 70 年代由 Cundall 首先提出，[1] 最近该方法被集成到 LS-DYNA 中 [2]. 如图 1 所示，UDES 模型包含几个流变元件（例如，弹簧，阻尼器，毛细管力）。重要的是，LS-DYNA 的 DEM 以惩罚法为基础，整个系统的运动由作用在离散元节点上的所有流变分量的合力驱动。

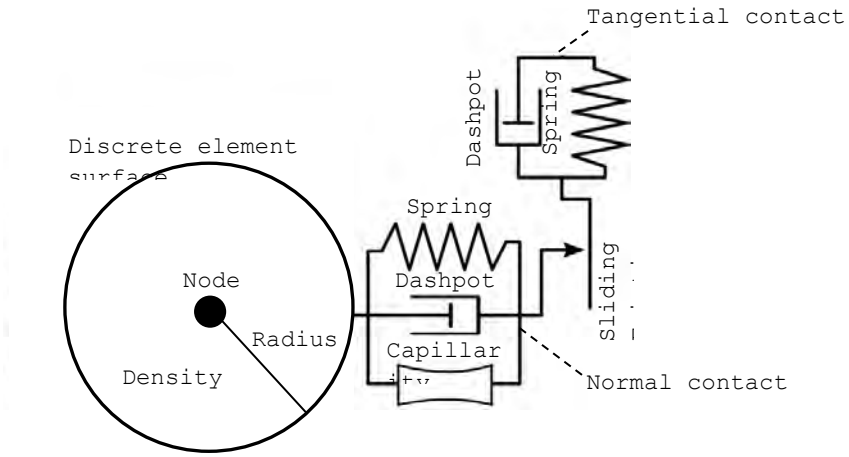


图 1：无黏结离散元模型示意图.

本文研究的是 UDES 无颗粒流动状态（力学稳定的状态）的行为。因此，本研究并没有充分利用所有的流变学部件（图 1）的功能，只研究部分的流变组件：法向接触刚度和滑动摩擦。在当前的研究中进行的所有数值模拟中，除非另有说明，都是采用表 1 中列出的参数。

微观参数	值	单位
半径	2.5E-03	米
密度 (重量)	25.51	千牛/米 ^{3}
体积模量	3.33E+07	千帕
弹簧刚度(法向接触)	4.17E+04	千牛/米
滑动摩擦	0.1 to 0.8	--

表 1：离散元参数.

单个离散元的体积平均应力

对于一个与其他单元有接触的单个 UDES， 应力是接触力向量（$\vec{f}$）以及相应的距离向量（$\vec{b}$）的函数， 其中距离向量的大小和方向由从球体中心到接触点来决定。对于每一个给定的 UDES, 应力张量是所有作用在该单元上的每个接触力和距离向量的并积之和的体积 (V) 平均 [3]:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{1}{V}\sum_{n=1}^{c}\vec{b}_n \otimes \vec{f}_n \tag{1}$$

应力计算示范

作为 LS-DYNA 提供的 UDES 应力计算功能的示范，我们首先研究如图 2 所示在重力作用下的 3 个球中顶端的球，底部的两个球是固定的。通过简单的运算可以得知，作用在顶部球体的两个接触力（F_1，F_2）大小和重力（F_B）相等，方向相对于水平面分别倾斜正负 60°。顶部球体的半径已知，相应的体积平均应力分量可以由公式 1 计算，表 2 比较了手工计算得到的体积平均应力分量和使用 LS-DYNA 计算得到的应力分量，两个结果吻合的很好（表 2）。

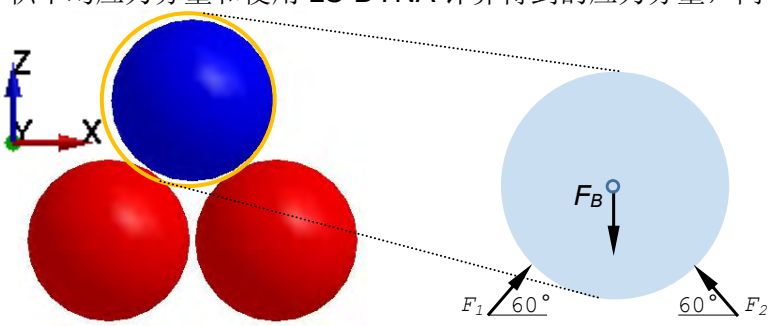


图 2：塔状的 3 个 UDES.

应力分量	手工计算 (千帕)	LS-DYNA (千帕)
X-应力	-1.84E-02	-1.85E-02
Z-应力	-5.52E-02	-5.52E-02
ZX-应力	-3.19E-02	-3.20E-02
XZ-应力	-3.19E-02	--

表 2:手工计算和 LS-DYNA 计算得到的应力比较.

三轴压缩试验模拟

和第 2 节中讨论的简单的演示模型（图 2，表 2）不同的是，本节主要研究的是较大尺度范围内随机填充并且力学稳定的单一尺寸 UDES 系统内的应力分布。作为从简单的组件（图 2）到相对更复杂的体系的过渡，同时还可以与手工计算的应力进行比较，本节用 LS-DYNA 模拟三轴压缩试验[4]（图 3）。

测试程序

本节用 LS-DYNA 数值模拟了一个直径 0.1 米长 0.2 米圆柱体的三轴压缩试验（图 3a）。数值测试过程分为三个阶段：1）试样制备（即采集离散元件球体）；2）准静态加压; 3）剪切。下面将详细介绍如何用 LS_DYNA 来模拟三轴压缩试验的各个阶段。

.

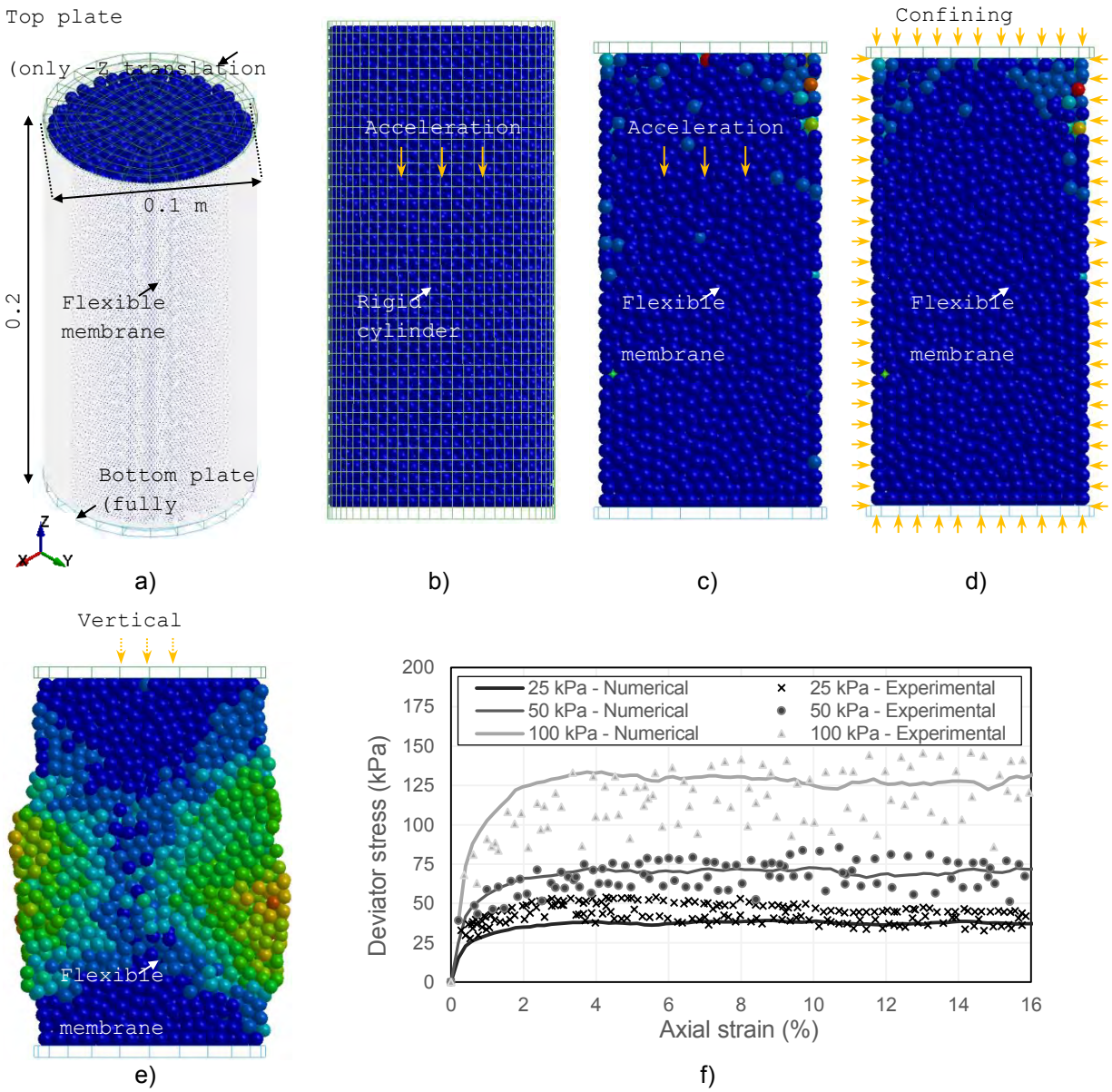


图 3：三轴压缩试验模型：a）堆积样品的等角视图；b）样品堆积；c）持续施加加速度场；d）施加受限压力；e）对顶部平板施压（显示位移场）；f）和 [6]比较.

三轴压缩试验模拟的第一阶段中， LS-PREPOST [5] 循环地利用离散元来填充封闭的刚性圆柱体，所填充的圆柱体略长于 0.2 米（图 3b）。第一阶段的每一次迭代都利用*

CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION [2] 准静态地在每个离散元件球体施加重力（9.81 米/秒^2）。当样品高度接近 0.2m 的时候第一个阶段结束，并记录稳态条件下各个离散球体的坐标。整体过程的第二阶段对第一阶段得到的离散元坐标进行试样的三轴压缩试验装置内初始化（即用顶板、底板、和柔性膜来包围试样）。本阶段同样利用 * CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION [2] 来准静态地在试样上施加重力场（图 3c）和受限压力（图 3d）。随后，在第三阶段，通过向下平移顶板可以形成任意取向的剪切面（图 3e）。

三轴压缩试验验证

本文比较了塑料珠在一系列受限压力（25 千帕，50 千帕和 100 千帕）情况下三轴压缩试验数值模拟（图 3）解和试验结果。表 3 列出了在 [6] 中给出的模型参数。如图 3F 所示，如果三轴压缩数值模拟：1）遵循 3.1 中给定的测试程序; 2）使用表 3 中列出的模型参数；那么数值模拟出的偏剪切应力与轴向应变关系曲线和试验结果一致。

微观参数	值	单位
半径	3.25E-03	米
密度 (重量)	9.03	千牛/米 ^{3}
弹簧强度 (法向接触)	2.00E+06	千牛/米
弹簧强度 (切向接触)	1.00E+06	千牛/米
摩擦系数	0.26	--

表 3:三轴试验模型中使用 DEM 参数.

多个离散单元的体积平均应力

在当前的研究中，试样所占据的直径 0.1 米长 0.2 米圆柱体空间（体积）被定义为 REV。另外，REV 内每个球单元的应力由一个体积平均应力张量决定 [3]:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1-\eta)\cdot\sum_{m=1}^{p}\frac{1}{V_p}\sum_{n=1}^{c}\vec{b}_n \otimes \vec{f}_n \tag{3}$$

其中, η 是空隙率. 和方程 1 不同的是，方程 3 对每个 p 球体累计求和，另外双求和也预先乘以$(1-\eta)$。方程 3 中之所以包含预乘数 $(1-\eta)$ 是因为 方程 3 用于计算总应力（相对于有效应力）。

通过研究三轴压缩试验 REV 内的体积平均应力，本文评估了 LS-DYNA 新近实现的 UDES 应力计算功能。更具体地讲，在做数值三轴压缩试验之前，对试件施加静水压条件。因此，数值模拟中，体积平均的 X，Y，和 Z 的应力分量等于所施加的静水压（忽略重力作用）。如表 4 中列出的，在三组不同的三轴压缩试验中，REV 内体积平均应力收敛到所施加的静水压。

受限压强 (千帕)	η	体积平均应力分量		
		X (千帕)	Y (千帕)	Z (千帕)
25	0.37	-25.0	-25.1	-26.0
50	0.37	-49.6	-49.8	-51.9
100	0.35	-98.1	-98.8	-106

表 4:施加的静水压以及相应的体积平均应力分量。

在体力作用下的无序堆积部件模拟

与第二节相对简单直观的计算小部件里面单个球体的体积平均应力不同，数值模型可以捕捉现场应力 （以及宏观现象）的能力，其相应的模型可能包含多达上百万的 UDES。 本文的剩余章节将研究单一尺寸 UDES 大型模型内特定区域内的体积平均应力。此外，还探讨了滑动摩擦（表 1）对准静态模拟无序堆积部件的效果。

模拟过程设置

使用表 1 中列出的微观特性，包括八组不同的摩擦系数（从 0.1 到 0.8），利用 LS-PREPOST [8] 在八个相应的刚性柱形容器内填充了大约 126 万个球（图 4）。通过使用*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION [2] 给刚性柱形容器内的所有球体施加重力（图 4b）。在八组不同的模拟中，只有滑动摩擦系数是变化的。本文研究了单一尺寸 UDES 系统当动态松弛过程收敛到力学稳定状态时的应力。

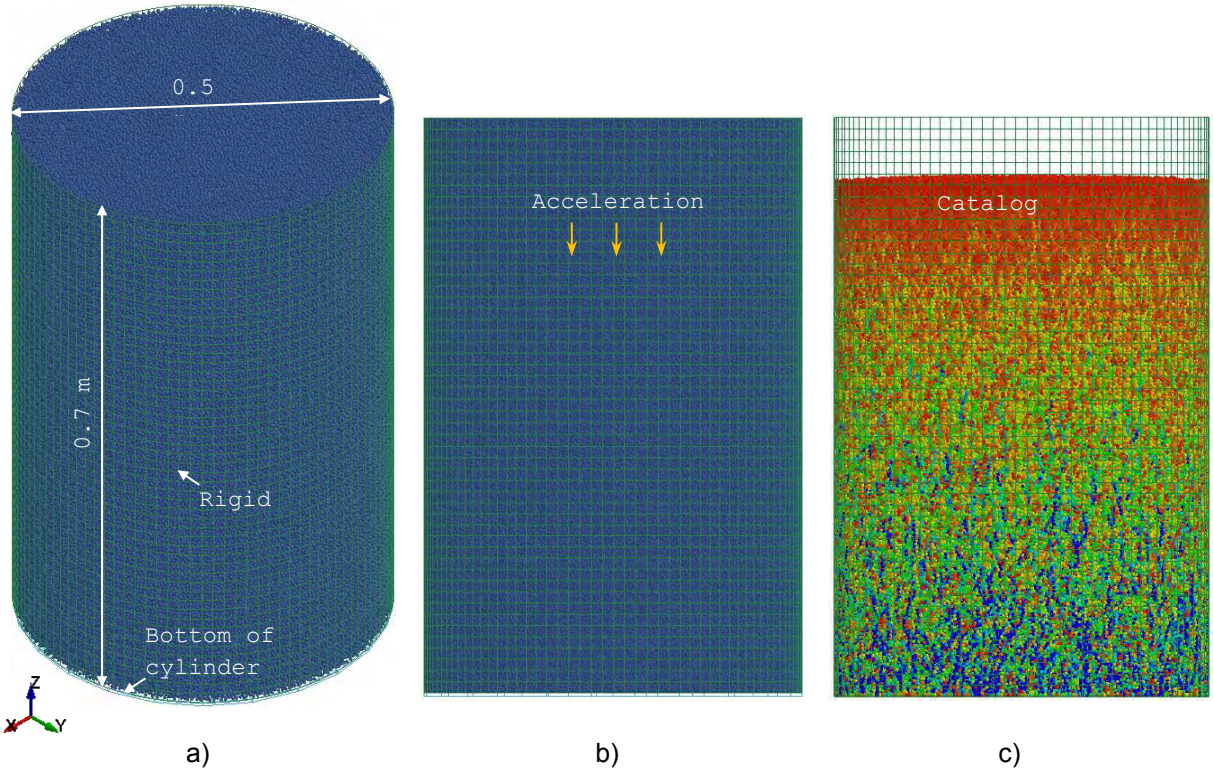


图 4：在重力作用下的单一尺寸 UDES 数值模拟：a）等角视图；b）施加加速度场；c）应力分类

模拟结果

表 4 中列出的八组模拟中完整组件的体积性质：高度(H_s)，总体积 (V_T)，固体体积 (V_S)，空隙体积(V_V)，空隙率(η)。正如所料，高度 (H_s) 和空隙率(η) 随着摩擦系数的增加而增加.

摩擦系数	H_s (m)	V_T (m^3)	V_S (m^3)	V_V (m^3)	η
0.1	0.695	1.36E-01	8.24E-02	5.41E-02	0.396
0.2	0.706	1.39E-01	8.24E-02	5.61E-02	0.405
0.3	0.712	1.40E-01	8.24E-02	5.74E-02	0.411

0.4	0.713	1.40E-01	8.24E-02	5.76E-02	0.411
0.5	0.715	1.40E-01	8.24E-02	5.80E-02	0.413
0.6	0.715	1.40E-01	8.24E-02	5.80E-02	0.413
0.7	0.718	1.41E-01	8.24E-02	5.85E-02	0.415
0.8	0.723	1.42E-01	8.24E-02	5.96E-02	0.420

表 5:不同摩擦系数下的体积性质

体积平均应力

图 5-6 显示了三个连续的 REV（REV1，REV2，REV3）的完整组件定义。其中 REV1，REV2 和 REV3 的尺寸和三轴压缩试验模型中的 REV 一致（第 3 节）。对于八组不同的模拟，每个圆柱形 REV 的尺寸为直径 0.1 米，长 0.2 米。为了尽量减少边界效应（由于刚性圆筒容器的存在），REV 们沿刚性圆筒容器（图 6）的中心轴线放置。表 6-8 列出了 REV 的（体积平均）水平（X）和垂直（Z）方向的应力。.

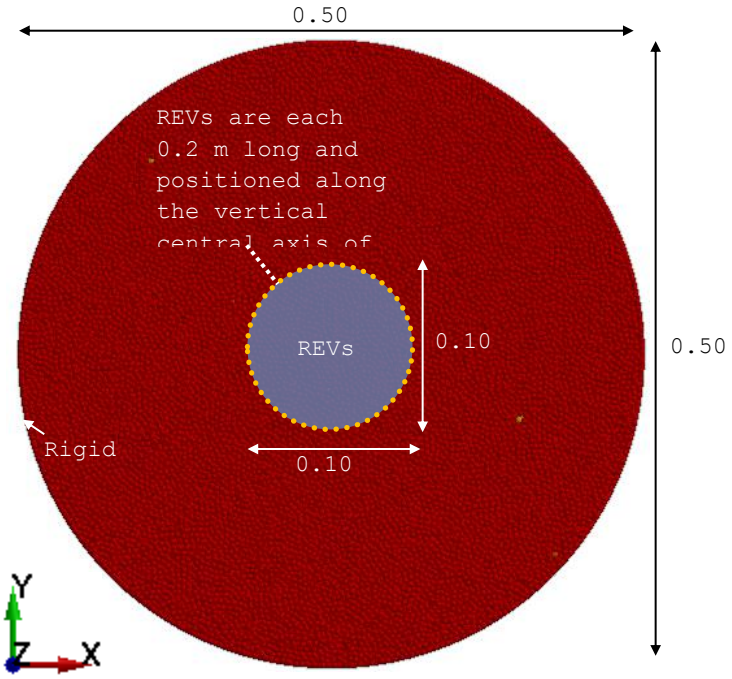
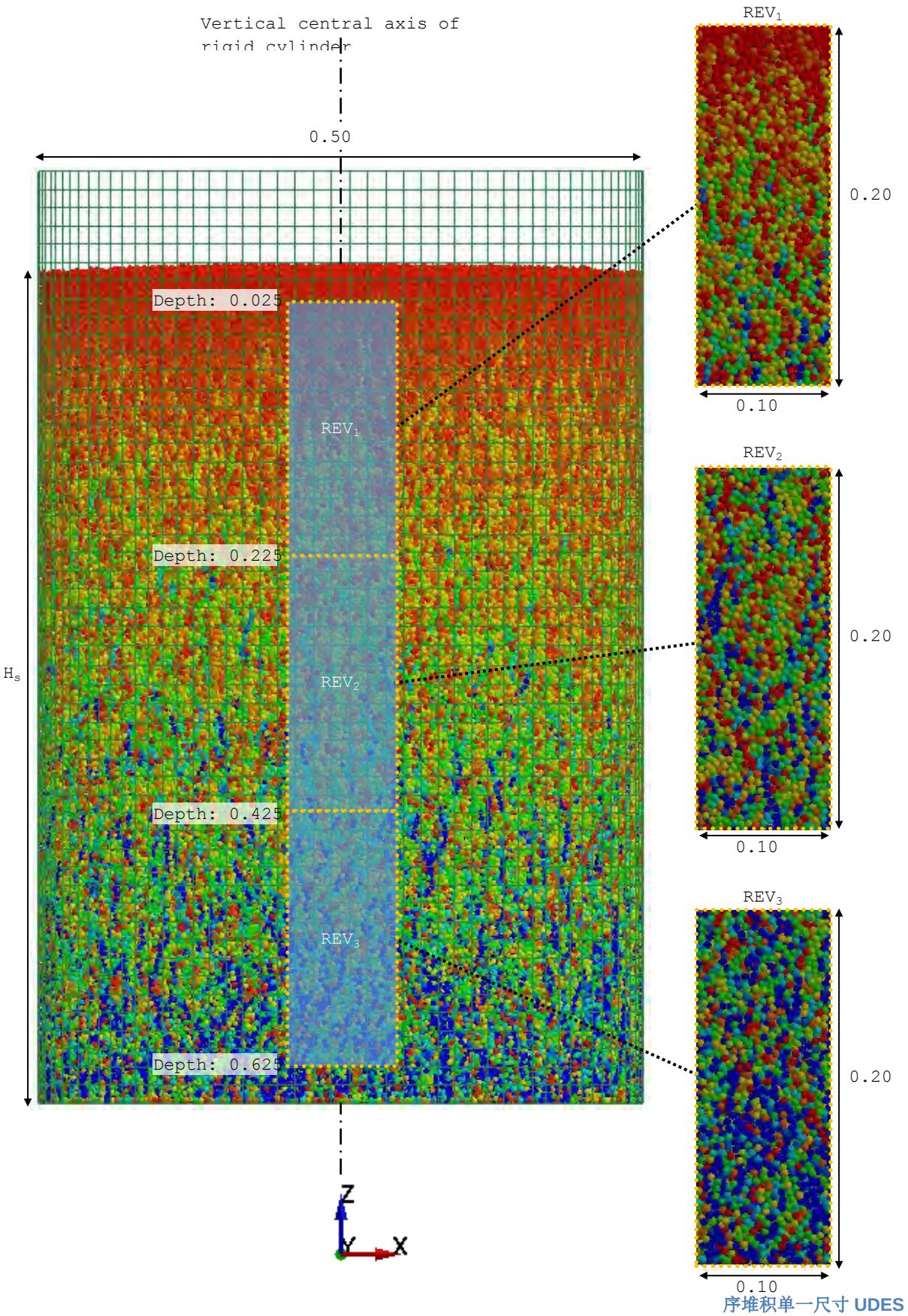


图 5: 无序堆积单一尺寸 UDES 中 REV 们的位置（平面图）



图图 6: 无序堆积单一尺寸 UDES 中 REV 们的位置（侧视图).

摩擦系数	X-应力 (千帕)	Z-应力 (千帕)	X-应力/ Z-应力
0.1	-1.21	-1.42	0.85
0.2	-1.35	-1.63	0.83
0.3	-1.37	-1.7	0.81
0.4	-1.47	-1.87	0.79
0.5	-1.57	-2.14	0.73
0.6	-1.23	-1.98	0.62
0.7	-1.26	-2.01	0.63
0.8	-1.18	-2	0.59

表 6:REV_1 体积平均的水平（X）和垂直（Z）应力.

摩擦系数	X-应力 (千帕)	Z-应力 (千帕)	X-应力/ Z-应力
0.1	-3.73	-4.17	0.89
0.2	-4.13	-4.70	0.88
0.3	-4.20	-4.98	0.84
0.4	-4.27	-5.16	0.83
0.5	-4.29	-5.22	0.82
0.6	-3.45	-4.47	0.77
0.7	-3.76	-4.87	0.77
0.8	-3.37	-4.60	0.73

表 7:REV_2. 体积平均的水平（X）和垂直（Z）应力

摩擦系数	X-应力 (千帕)	Z-应力 (千帕)	X-应力/ Z-应力
0.1	-6.24	-7.56	0.83
0.2	-6.46	-7.68	0.84
0.3	-6.47	-8.05	0.80
0.4	-6.69	-8.34	0.80
0.5	-6.96	-8.61	0.81
0.6	-6.31	-7.98	0.79
0.7	-6.66	-8.41	0.79
0.8	-5.65	-7.18	0.79

表 8: REV_3 体积平均的水平（X）和垂直（Z）应力.

图 7 对比了 REV1，REV2 和 REV3 中的体积平均水平（X）应力和滑动摩擦系数的关系。图 8 和图 9 显示了类似的体积平均垂直（Z）应力以及水平（X）相对于垂直（Z）应力的比率图。如所预期的，所计算的水平方向（图 7）和垂直（图 8）应力分量表明随着深度的增加体积平均应力也随着增加。此外，如图 9 所示，随着滑动摩擦的增加，体积平均水平（X）应力与垂直（Z）应力的比值相应的减小。

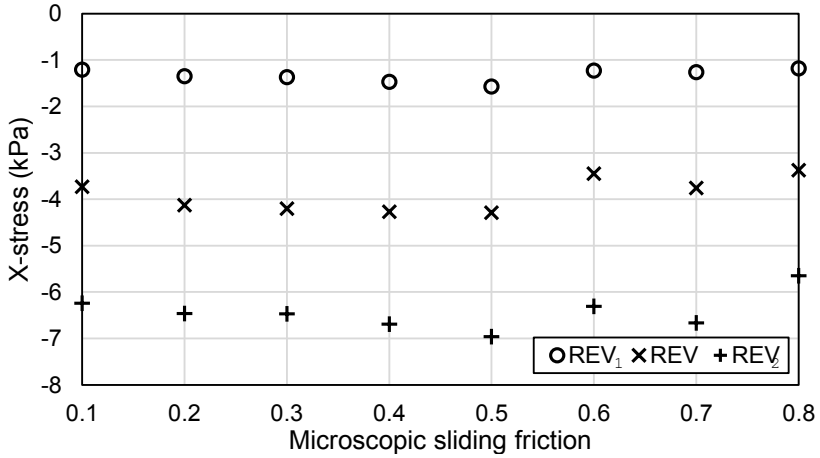


图 7：体积平均水平（X）应力分量 与摩擦系数关系图

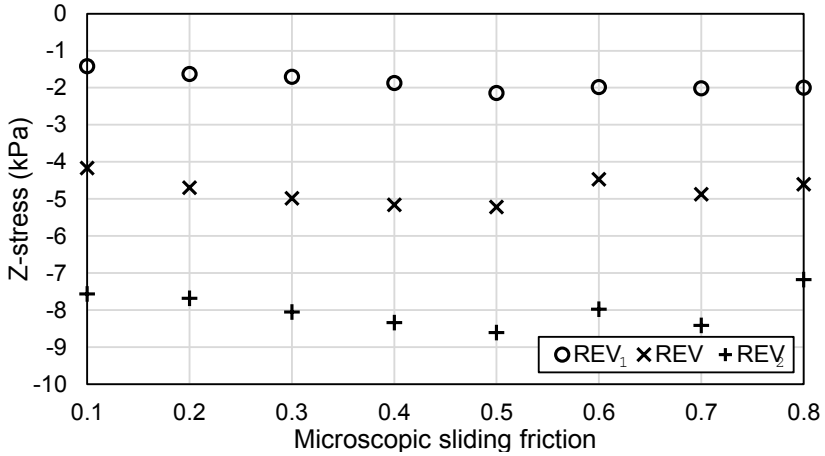


图 8：体积平均垂直(Z)应力分量 与摩擦系数关系图

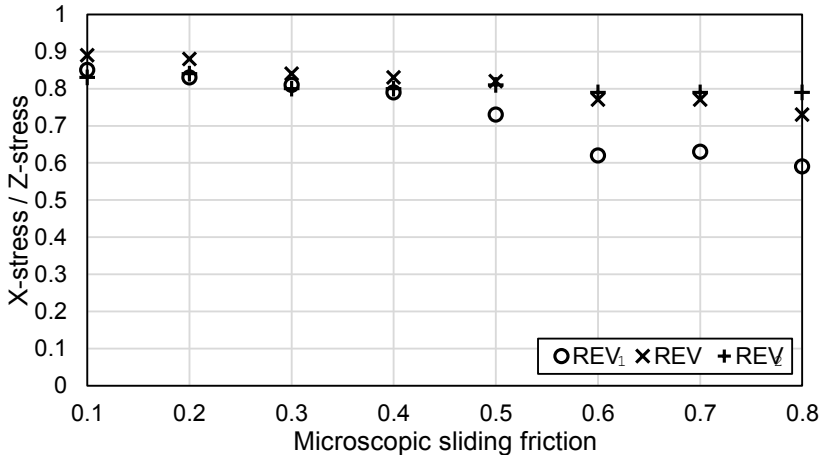


图 9：体积平均水平（X）与垂直(Z)应力分量比与摩擦系数关系图

总结

本文对在 LS-DYNA 新近实现的基于无黏结离散元的体积平均应力计算算法进行了研究。我们采用了几个不同的模型来比较从 LS-DYNA 数值模拟得到的体积平均应力和手工计算得到的应力。第一个实例是一个简单的三球组件模型。其中我们首先手工计算了顶部球的应力，结果和 LS_DYAN 获得的应力值一致。接下来在实验室规模的实验验证中，我们用了一系列不同的受限压力进行（物理）实验测量，测量结果被用于和数值模拟得到的体积平均应力进行对比。最后，我们模拟了在重力作用下的包含 100 多万个无黏结离散元系统在不同的参数化模型下的三维准静态应力状态。在表征单元体内所计算出的体积平均应力和深度以及摩擦系数的关系符合预期的趋势。总体来说，LS-DYNA 实现的离散元应力计算功能可以离散元功能可以应用在初始地应力场模拟中，通过相关的微机械模型参数可以直接研究受限地压应力。

参考文献

[1] Cundall, P. A., and Strack, O. D.: A discrete element model for granular assemblies. *Geotechnique* **29** (1979), 47-65.

[2] Livermore Software Technology Corporation (LSTC): *LS-DYNA Keyword User's Manual Vol. I*, (2015), Livermore, California, USA.

[3] Potyondy, D. O, and Cundall, P. A.: A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* **41** (2004), 1329-1364.

[4] ASTM: *Standard test method for consolidate drained triaxial compression test for soils D7181*, ASTM International, (2011), West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[5] Zhidong, H., Ten, H., and Wang, J.: Computer Generation of Sphere Packing for Discrete Element Analysis in LS-DYNA, (2011), *12th International LS-DYNA Conference*.

[6] Cil, M. B., and Alshibli, K. A.: 3D analysis of kinematic behavior of granular materials in triaxial testing using DEM with flexible membrane boundary. *Acta Geotechnica*, **9**(2). (2014), 287-298.

LS-DYNA 中的光滑粒子流体动力学（SPH）及其应用

许敬晓（Jingxiao Xu），王季先（Jason Wang）

Livermore Software Technology Corporation

引言

光滑粒子流体动力学（SPH）是一种无网格方法，适合于处理大变形及极大变形问题，变形边界，自由液面及运动交界面问题。同时 SPH 也是 Lagrange 动力学方法，可以方便跟踪物质的运动轨迹，适合描述流体界面的大变形运动过程及流体与固体之间相互作用。最早用于模拟天体物理问题，后来发现解决其它物理问题也是非常有用的工具，如连续体结构的解体、碎裂、固体的层裂、脆性断裂等。SPH 算法可以解决许多常用算法解决不了的问题，是一种非常简单方便的解决动力学问题的研究方法。由于它是无网格的，它可以用于研究很大的不规则结构。

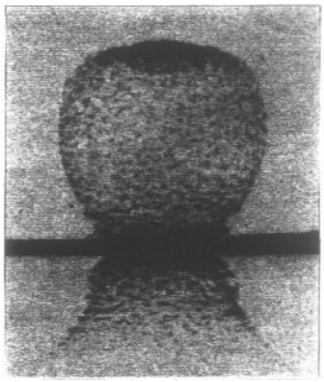
光滑粒子流体动力学方法 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)是近 20 多年来逐步发展起来的一种无网格方法，该方法的基本思想是将连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述，各个物质点上承载各种物理量，包括质量、速度等，通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道，求得整个系统的力学行为。这类似于物理学中的粒子云 particle-in-cell)模拟，从原理上说，只要质点的数目足够多，就能精确地描述力学过程。虽然在 SPH 方法中，解的精度也依赖于质点的排列，但它对点阵排列的要求远远低于网格的要求。由于质点之间不存在网格关系，因此它可避免极度大变形时网格扭曲而造成的精度破坏等问题，并且也能较为方便地处理不同介质的交界面。

最初的 SPH 方法是 Lucy、Gingold 和 Monaghan 首次于 1977 年分别提出的，Johnson 和 Beissel 提出了归一化的光滑函数算法，这一算法能够提高 SPH 的计算精度，并能通过分片试验。在冲击碰撞方面，Johnson 等采用类似于 SPH 的广义粒子算法（generalized particle algorithm）进行圆杆的撞击以及弹体侵彻的数值计算，Parshikov 等用改进的 SPH 方法分析了子弹冲击靶体的临界穿透速度，结果与实验吻合得较好。上述冲击碰撞算例中，冲击体与靶体都是固体结构，其发生的变形相对液体－固体的冲击碰撞要小的多，并且 SPH 粒子均采用规则建模，对于复杂三维模型分配粒子位置和质量时存在局限性。

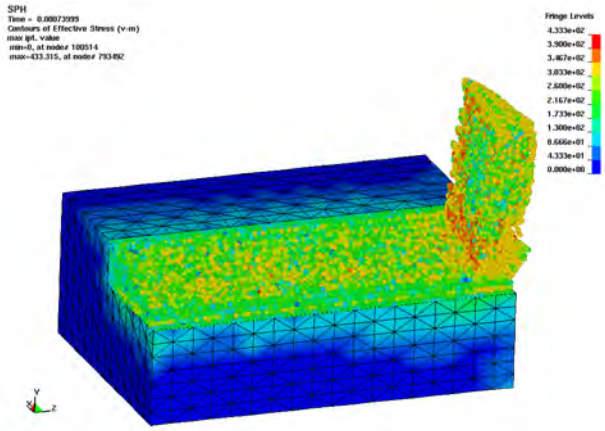
应用

SPH 方法大量用于工业材料模压，冲压成型问题，高速冲击碰撞（hvi），爆炸及水下爆炸问题，飞鸟撞机问题，岩土穿层问题，流固耦合问题，冲液容器的冲击响应，船舶与水体的相互作用问题，连续体结构的解体，碎裂，固体的层裂，脆性断裂问题。

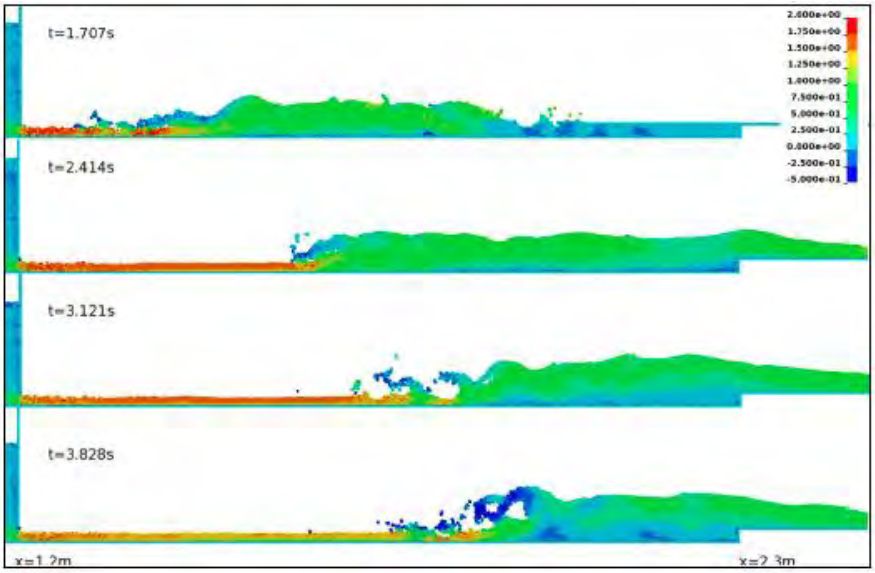
高速冲击碰撞模拟：



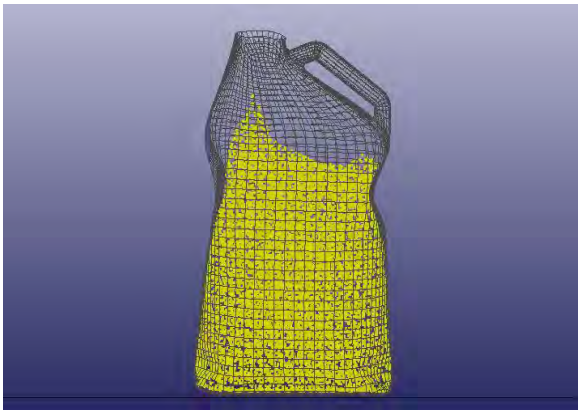
金属切削模拟 ：



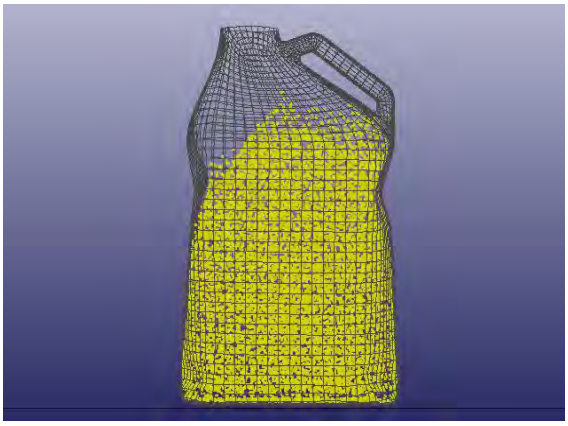
水跃模拟（Patrick Jonsson）：



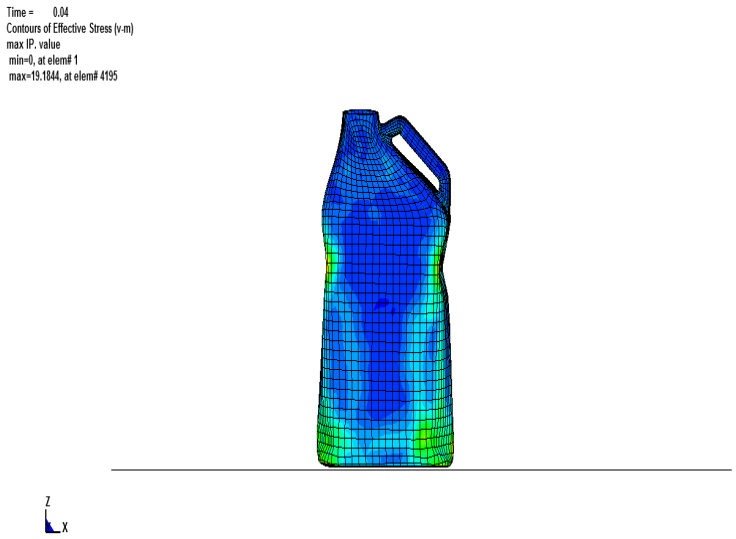
水瓶下跌试验：

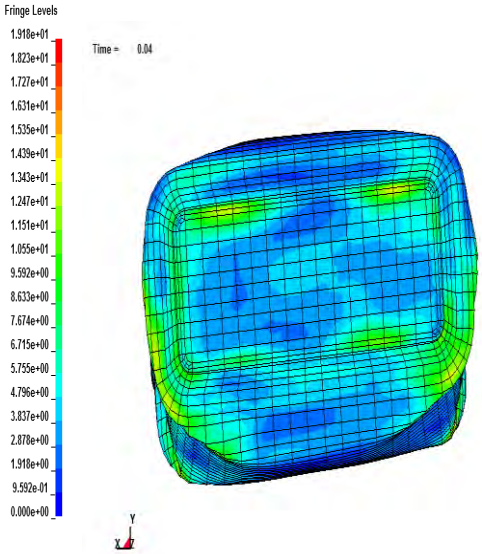


Time t=0.03 sec



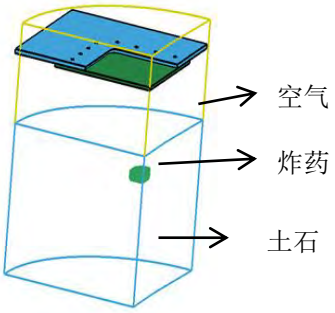
Time t=0.04 sec

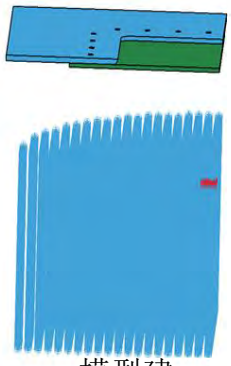




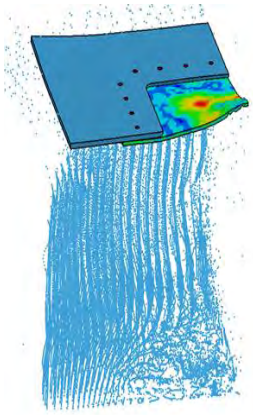
Time t=0.04 sec

土石爆炸试验：

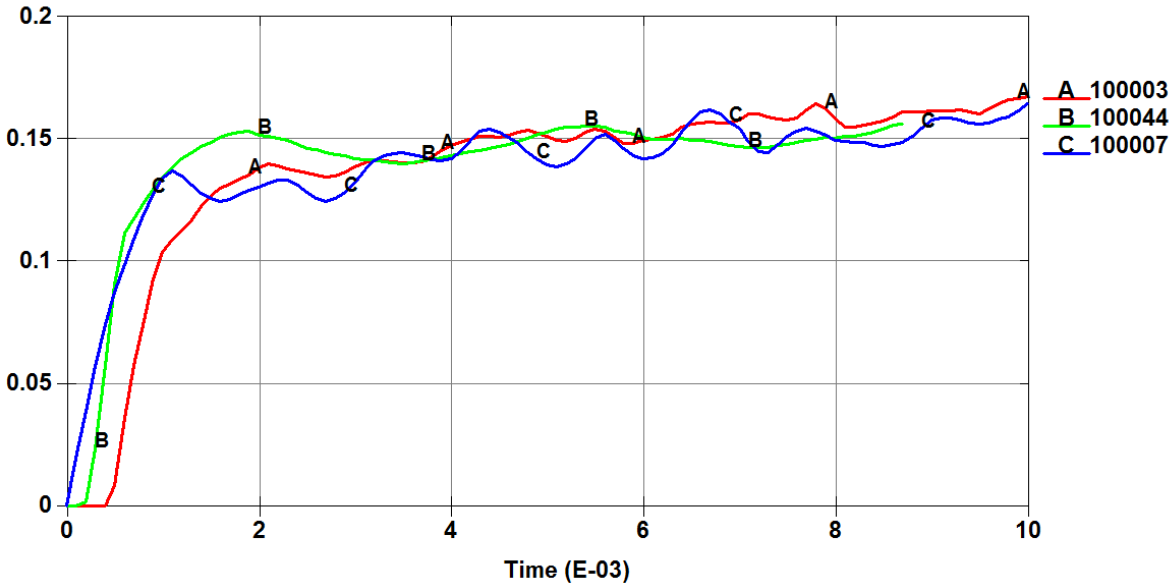




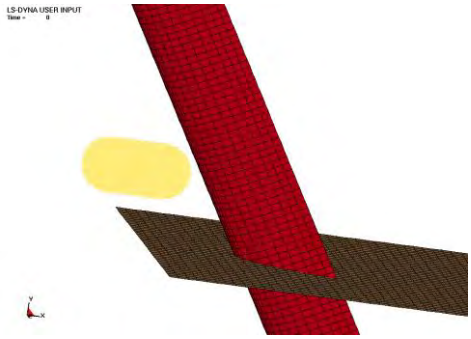
模型建



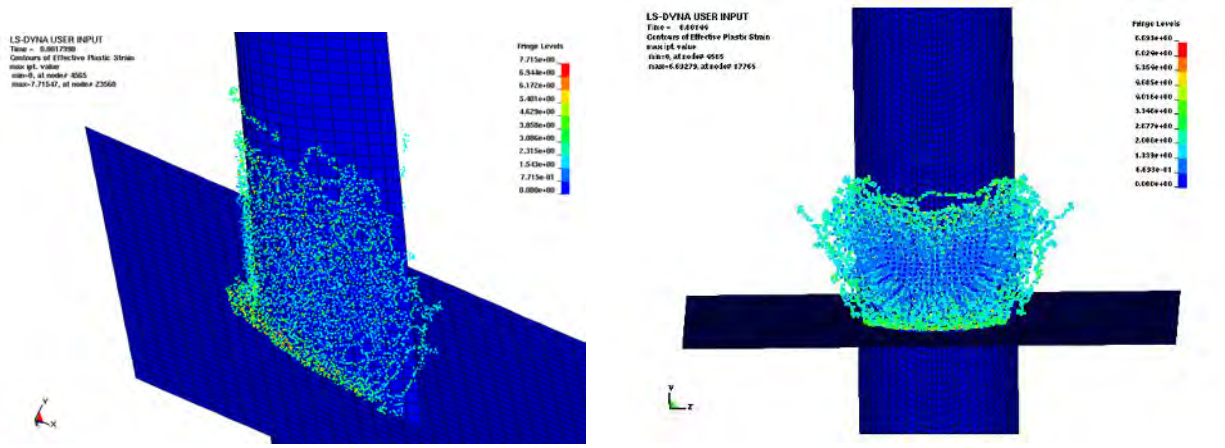
t=6ms 的变形



飞鸟撞机：



模型建立



撞击中鸟的变形

结论：

SPH 算法可以解决许多常用算法解决不了的问题，是一种非常简单方便的解决动力学问题的研究方法。由于它是无网格的，它可以用于研究很大的不规则结构。这一方法已经在 Ls-Dyna 中得以实现并且广泛应用于各种工程实际中如飞鸟撞机问题，岩土穿层问题，流固耦合问题等。

作者简介

***许敬晓** ／Jingxiao Xu 博士毕业于美国西北大学，1999 年获得 湖南大学固体 力学专业硕士学位， 并于 2004 年获得美国西北大学机械工程专业 博士学位。许敬 晓博士在国际期刊上发表多篇论文，在国际会议上发表十几篇论文。从 2004 年至 今，许敬晓博士在 LSTC 从事 LS-DYNA 软件的开发应用工作，主要在 LS-DYNA 中 实现 平滑粒子流体动力学（SPH）及其应用于解决工程中实际问题，比如挤压成 形，高速 碰撞穿透，爆炸，飞鸟撞机，摩擦焊接，流 体，流固耦合，热固耦合及断裂问题等。

***王季先/Jason Wang** 博士毕业于加州伯克利大学， 1997 年加入 LSTC，负责任意拉格朗日欧拉法，（ALE），流固耦合（FSI），并行计算（MPP）及其它离散元方法如 Discrete Element,SPH,CPM 的开发和研究。

LS-DYNA 中平滑粒子流体动力学（SPH）的一些最新进展

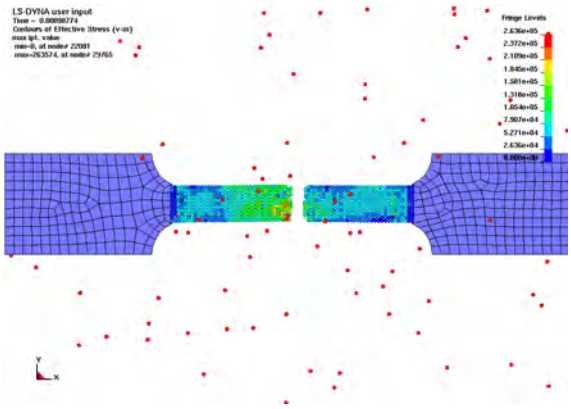
许敬晓（Jingxiao Xu），王季先（Jason Wang）

LSTC

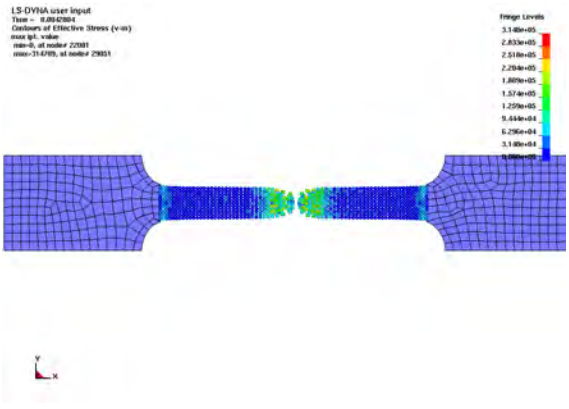
最近 LS-DYNA 中的平滑粒子流体动力学（SPH）一些新增的功能，在模拟高速冲击碰撞（hvi），爆炸及水下爆炸等大变形及极大变形问题中得到很大的应用。本文简要地介绍了这些最新进展及相应的关键字的应用。

1. 张力不稳定性问题。

张力不稳定性问题是指当 SPH 粒子处于拉伸应力状态时，有时粒子的运动会变的不稳定，这样导致计算过程中的 SPH 粒子凝集或完全奔溃。这个问题在固体的破坏或者断裂的计算中出现，会严重影响计算结果。现在不断有研究者提出一些关于改进或避免张力不稳定性问题的修正方法。在 LS-DYNA 中，通过在 CONTROL_SPH 关键字中的变量 FORM=7 或 8 的设定，用完全 Lagrangian 方程来避免张力不稳定性问题。在这个方程中，光滑函数（核函数）是建立在初始状态（t=0，即只在初始时计算），所以在模拟过程中每个 SPH 颗粒的紧支域所含的 SPH 颗粒数保持不变及相应的颗粒也保持不变。而在预置光滑函数（核函数）的计算过程中，该函数每个周期重新更新，以致每个颗粒的紧支域所含的 SPH 颗粒数及相应的颗粒保持变动中。下面例子显示了完全 Lagrangian 核函数用于颈缩现象的模拟。



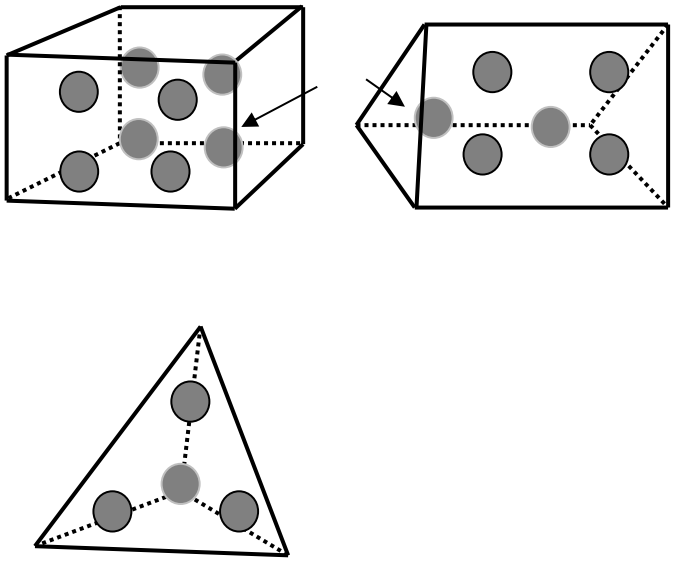
Form=0（张力不稳定性）



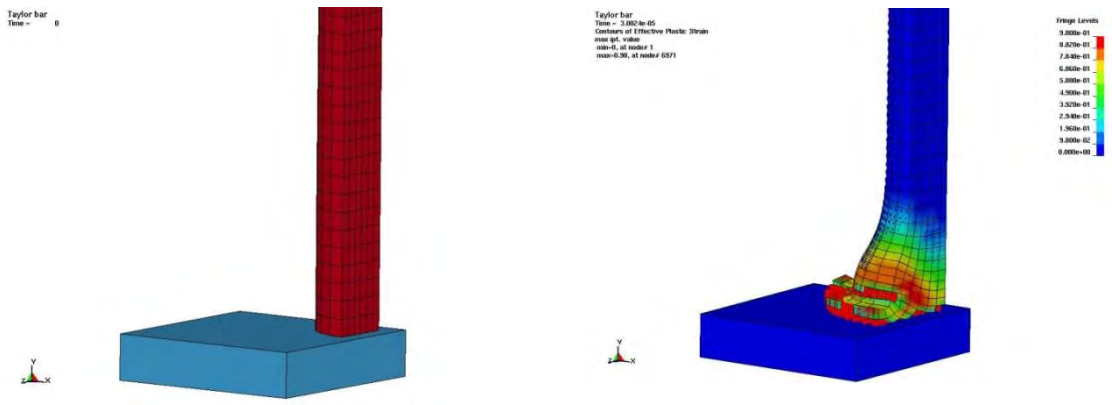
颈缩现象的模拟（Lagrangian 核函数）

2. 混合单元的应用（SPH 颗粒与固体单元间的耦合）

在传统有限元应用中，当固体单元受力而达到失效状态时，根据客户定义的失效准则（应力或朔性应变准则等），固体单元会从计算中除去。这将引起物理上材料人为空缺，从而引起邻近材料的回弹。最新发展的 SPH 选项之一可以把失效的固体单元转成 SPH 颗粒，同时允许转成的 SPH 颗粒与临近的固体单元进行耦合（合为一体）或者不耦合（碎片分析）。该功能的关键字是：*DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH.



如上图所示，固体单元转成的 SPH 颗粒均匀地分布在固体单元中。新产生的 SPH 颗粒即可属于原有的 SPH 颗粒部件或重新建立新的 SPH 部件。预置值中，SPH 颗粒独立存在不与邻近的固体单元进行耦合，这个选项可以用于断裂裂片分析。通过设置变量 ICPL=1，从固体单元转成的 SPH 颗粒可以与邻近的固体单元进行耦合，此选项适用于由于屈服而引起的材料软化过程（本构关系的改变）。变量 IOPT 的设置可以用于指定耦合开始的时间（只在 ICPL=1 时），预置值 IOPT=0 用于指定耦合从 t=0 时开始，耦合在这里作为一种限制，用于连接独立的 SPH 颗粒与固体单元。当设置变量值 IOPT=1 时，只有当固体单元失效时，新产生的 SPH 颗粒与固体单元才开始耦合作用。下面例子显示了 SPH 颗粒与固体单元的耦合应用于 taylor bar 测试。



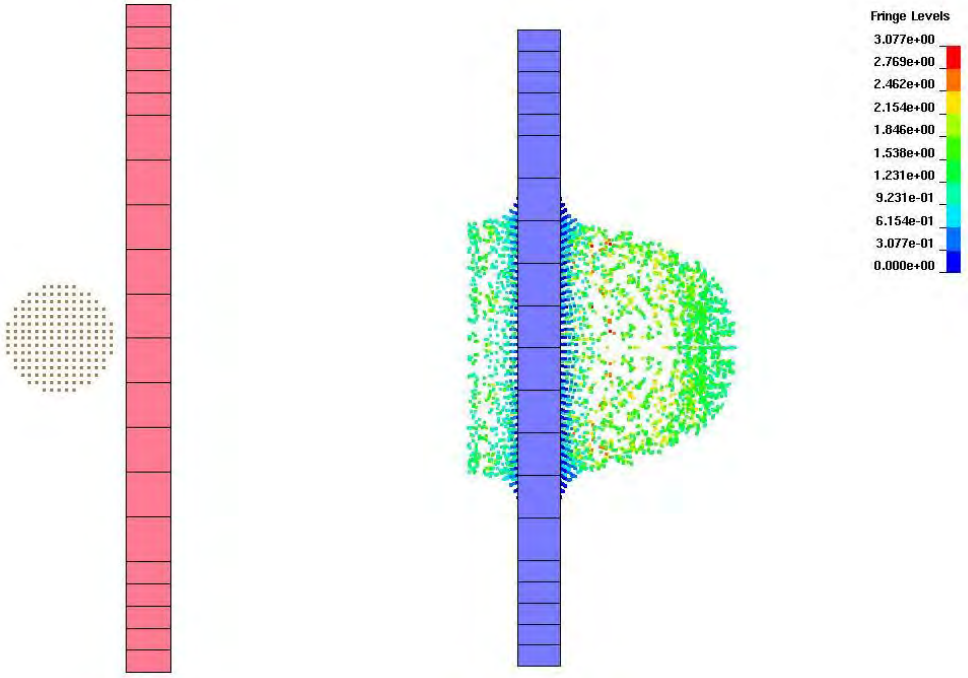
SPH 颗粒与固体单元耦合应用于 taylor bar 测试

3. SPH 颗粒与 SPH 颗粒之间的相互作用（接触处理）。

SPH 颗粒与同一部件的 SPH 颗粒或者其他部件的 SPH 颗粒之间的相互作用可以通过颗粒的近似插值来实现（传统方法）。通过这种方法实现的 SPH 颗粒间作用不仅在压缩向

有相互作用力而且在拉伸向也会存在着相互作用力。大多的 SPH 部件与 SPH 部件之间的接触作用只要求在压缩向有耦合作用力。最新发展的 SPH 关键词 *DEFINE_SPH_TO_SPH_COUPLING 可以解决这问题。该功能根据罚函数方法来处理不同部件间的 SPH 颗粒与 SPH 颗粒之间的接触与碰撞。根据平均光滑长度为接触准则，当俩球体 SPH 颗粒中心点的距离小于平均光滑长度时，则发生接触。接触力的大小是根据传统的接触与碰撞的计算方法，其值等于接触刚性乘于渗透距离。

下面的例子显示了 SPH 颗粒与 SPH 颗粒间的接触处理应用于高速冲击碰撞问题（hvi）.



t=0.0　　t=5.0 ms

LS-DYNA 中多个 SPH 部件（流体，固体）间的相互作用方法

许敬晓（Jingxiao Xu），王季先（Jason Wang）

LSTC

摘要

流体中的非常有趣和复杂的行为主要来源于流体颗粒之间相互作用过程。光滑粒子流体力学是无网格，拉格朗日粒子法，它可以简单而灵活地稳定地模拟流体流动和固体受力。它已被广泛应用于多相流体，热传导，高能炸药的问题等。在本文中，我们为不同 SPH 部件之间相互作用及 SPH 部件与固体部件之间的相互作用提供了不同关键字而应用于不同的问题中特别是应用于大密度比的 SPH 部件之间相互作用。通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用适用于高密度比的两 SPH 部件之间的相互作用，当不同 SPH 部件之间具有相似的密度和材料的特性时，通过标准的插值方法引起相互作用产生界面的结果更一致。不同的相互作用方法可以合并于一个模型以达到最佳效果。还有 SPH 粒子与固体部件之间的相互作用进行了讨论。一些例子用于展示如何使用不同的方法与 LS-DYNA 关键字的不同组合。

引言

光滑粒子流体动力学（SPH）是一种无网格方法，适合于处理大变形及极大变形问题，变形边界，自由液面及运动交界面问题。同时 SPH 也是 Lagrange 动力学方法，可以方便跟踪物质的运动轨迹，适合描述流体界面的大变形运动过程及流体与固体之间相互作。该方法的基本思想是将连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述，各个物质点上承载各种物理量，包括质量、速度等，通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道，求得整个系统的力学行为。这类似于物理学中的粒子云 （particle-in-cell）模拟。最初的 SPH 方法是 Lucy、Gingold 和 Monaghan 首次于 1977 年分别提出的，Johnson 和 Beissel 提出了归一化的光滑函数算法，这一算法能够提高 SPH 的计算精度。在冲击碰撞方面，Johnson 等采用类似于 SPH 的广义粒子算法（generalized particle algorithm）进行圆杆的撞击以及弹体侵彻的数值计算，Parshikov 等用改进的 SPH 方法分析了子弹冲击靶体的临界穿透速度，结果与实验吻合得较好。

作为拉格朗日方法，在 LS-DYNA 中可以很容易地通过一个普通点到表面的接触处理而达到 SPH 粒子和固体单元之间的相互作用。在 LS-DYNA 中，混合单元的提出，实现了 SPH 粒子和固体单元之间的耦合作用。在此方法中，混合单元被构造成便于固体部件和 SPH 粒子的耦合效应。当某一标准满足时这种方法可以用于自动地变换拉格朗日固体部件成为 SPH 粒子。

当模拟流体时，为了重现流体的真正现实的物理行为，必须准确地捕捉流体间的相互作用。光滑粒子动力学已被证明是一个简单而灵活的方法来模拟多流体问题。但是对于在光滑长度空间中的相邻颗粒的密度和质量变化很大的地方，高估或低估 SPH 界面的密度会导致错误的压力值，这个压力值可能会导致非天然加速度。错误的数值产生不良影响，引起非物理性密度和压力变化，和虚假和不自然的界面张力，甚至严重的数值不稳定性。通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用允许用户根据仿真问题，通过选择所需的惩罚比例因子来选择两 SPH 部件之间的期望的接触力从而避免由于在界面处的大密度比而引起的不稳定性。

LS-DYNA 中我们为不同 SPH 部件之间相互作用及 SPH 部件与固体部件之间的相互作用提供了不同关键字选项：标准 SPH 插值法（正常方式）；通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用（* DEFINE_SPH_TO_SPH_COUPLING）；通过关键字* SECTION_SPH_INTERACTION 来合并两个相

互作用方法；SPH 部件与固体部件之间的接触作用 （*CONTACT_ NODE_TO_SURFACE）；SPH 部件通过关键字* DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH 而与固体部件之间的耦合；SPH 粒子通过关键字* ALE_COUPLING_NODAL_PENALTY 与 ALE 方法之间的耦合等等。不同的相互作用方法可以并用于同一个模型以达到最佳效果。

1. 传统的SPH方法

考虑材料的弹塑性效应，全应力张量空间中的SPH 插值公式的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程分别表示为［1--3］

$$\frac{d\rho_i}{dt}=\rho_i\sum_j\frac{m_j}{\rho_j}\left(v_i^\beta-v_j^\beta\right)W_{ij,\beta} \tag{1}$$

$$\rho_i=\sum_j m_j W_{ij}$$

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt}=-\sum_j m_j\left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2}+\frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2}\right)W_{ij,\beta} \tag{2}$$

$$\frac{dE_i}{dt}=\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2}\sum_j m_j\left(v_i^\alpha-v_j^\alpha\right)W_{ij,\beta} \tag{3}$$

其中：ρ 为密度；m 为粒子质量；v 为粒子速度；σ α β 为应力张量（上角标α 和β 表示张量坐标）；e 为比内能；x 为位置矢量；W 为核函数；下标i 为粒子编号，下标j 为i 粒子的近邻粒子编号．核函数取最常用的三次B-Spline 函数：

$$W(x_i-x_j,h)=\frac{1}{h}\theta\left\{\frac{x_i-x_j}{h(x,y)}\right\} \tag{4}$$

$$\theta(d)=C\times\begin{cases}1-\frac{3}{2}d^2+\frac{3}{4}d^3 & \text{when } 0\le d\le 1\\ \frac{1}{4}(2-d)^3 & \text{when } 1\le d\le 2\\ 0 & \text{elsewhere}\end{cases} \tag{5}$$

其中：d = ｜ x － x’ ｜ /h，h 是光滑长度；函数的影响域｜ x ｜ = 2h.

1.1 多个SPH部件（流体，固体）

上面的等式（1） － （5）被设计为处理单个 SPH 部件，并且可以很容易地扩展到处理多个 SPH 部件（流体与固体），各个部件间可以具有不同的密度。但必须注意避免由于跨两 SPH 界面间的大密度比引起的界面不稳定性。

1.2 通过标准SPH插值的相互作用

如图 1 所示，处理不同的 SPH 部件之间的相互作用的标准方式来是通过 SPH 插值函数（即视不同 SPH 部件为一个 SPH 部件）并且不需要在不同 SPH 部件的界面上有接触处理。在

SPH 中，每个粒子有一个特殊空间距离（光滑长度），在其上它们的性质（如密度，压力）是由核函数做平均的。对于在光滑长度空间中的相邻颗粒的密度和质量变化很大的地方，由核函数做平均得到的值一般不精确。如 Muller 等人（2005）提出的对于混合流体的密度比大于 10，则不能通过标准 SPH 插值来做模拟。其原因是：在 SPH 中，高估或低估 SPH 界面的密度会导致错误的压力值，这个压力值可能会导致（Ihmsen 等人 2011）非天然加速度。错误的数值产生不良影响，引起非物理性密度和压力变化，和虚假和不自然的界面张力，甚至严重的数值不稳定性。

通过标准 SPH 插值引起不同 SPH 部件相互作用的另一个问题是：由于 SPH 函数插值，不同的 SPH 部件可能在相互作用后粘在一起。要激活这个标准 SPH 插值选项， 在* CONTROL_SPH 关键字中设 CONT 参数为 0，而且不同 SPH 部件之间不需要接触处理。

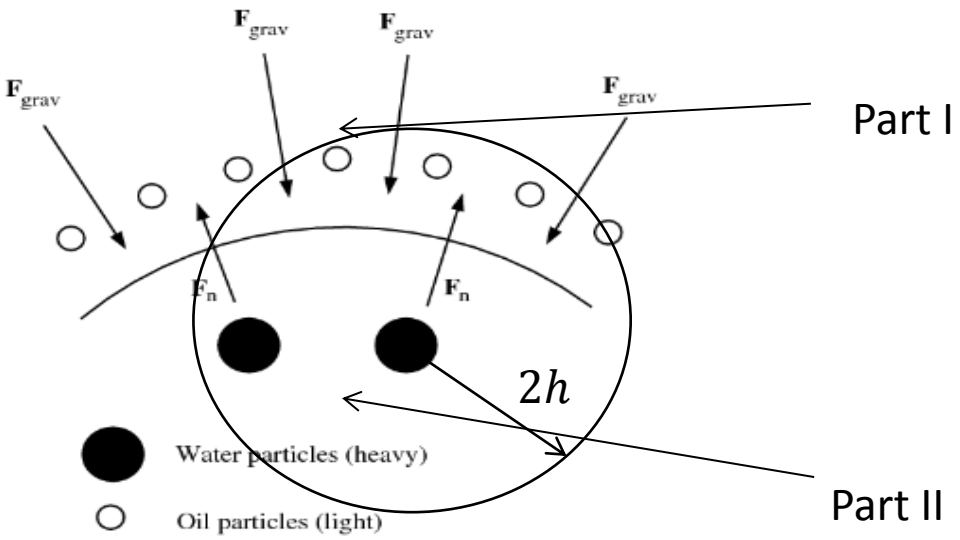


图 1. Interaction through SPH interpolation (treated as one part and no contact is needed)

1.3 通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用

一个点到点间的接触模型（基于罚函数接触算法）被引入到不同 SPH 部件间界面的相互作用上。如图 2 中，所有的 SPH 插值（密度，压力等）作用在各自 SPH 部件的局部区里进行。在这个模型中没有虚假和不自然的界面张力或界面的数值不稳定性。界面接口上需要一接触力，这个接触力将被施加到外力上。

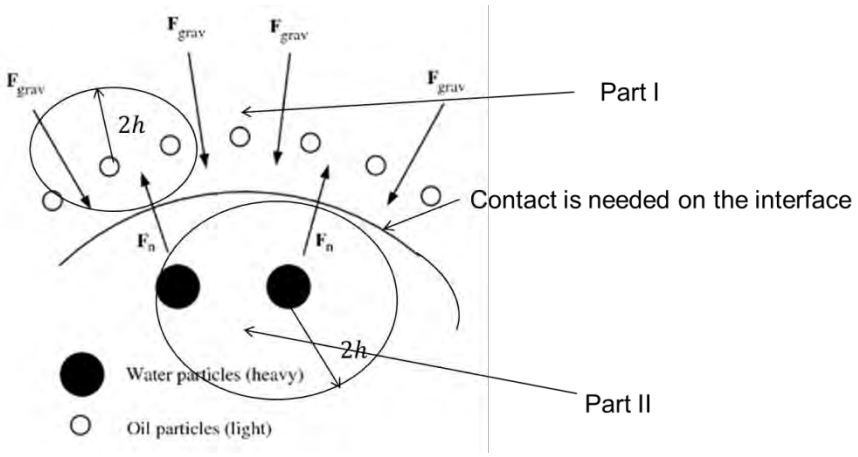


图 2. Interaction through node to node contacts

在这个系统中，作用于颗粒上的由于接触力F_c引起的接触斥力直接正比于颗粒之间的位移δ：

$$F_c = K_l \delta \tag{6}$$

这里$\delta = \mathrm{d} - 2\mathrm{h}$，$K_l$是线性弹簧常数或刚度。如果接触模型仅使用这种线性弹簧模型，没有能量将被消耗掉，接触模型是完全弹性。而在现实中，一些动能耗散于塑性变形中，或转换为热或声能。考虑到这些能量损失，引进基于缓冲器模型力接触阻尼：

$$F_d = \eta v \tag{7}$$

接触的阻尼力正比于接触颗粒的相对速度，其中η称为阻尼系数，$v = v_1 - v_2$ 。

对于任何两个 SPH 部件之间的接触相互作用必需定义关键字 * DEFINE_SPH_TO_SPH_COUPLING，而且在* CONTROL_SPH 中参数 CONT 需要被设置为 1 以停用 SPH 部件之间通过标准插值的相互作用。

1.4 通过标准SPH插值和通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用

在* CONTROL_SPH 关键字中设置 CONT = 1 选项与关键字* SECTION_SPH_INTERACTION 结合，一个模型中不同 SPH 部件之间即可通过正常的插值的相互作用也可通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用。所有带* SECTION_SPH_INTERACTION 关键字定义的 SPH 部件将彼此自动通过正常的插值方法而相互作用，任何不是通过* SECTION_SPH_INTERACTION 关键字定义的 SPH 部件之间的相互作用及通过* SECTION_SPH_INTERACTION 关键字定义 SPH 部件与非通过* SECTION_SPH_INTERACTION 关键字定义的 SPH 部件之间的相互作用需要定义颗粒与颗粒之间的接触作用（通过关键字 * DEFINE_SPH_TO_SPH_COUPLING）。

通常情况下，当不同 SPH 部件之间具有相似的密度和材料的特性时，通过标准的插值方法引起相互作用产生界面的结果更一致，但是对于在光滑长度空间中的相邻颗粒的密度和质量变化很大的地方，高估或低估 SPH 界面的密度会导致错误的压力值，这个压力值可能会导致非天然加速度。错误的数值产生不良影响，引起非物理性密度和压力变化，和虚假和不自然的界面张力，甚至严重的数值不稳定性。通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用允许用户根据仿真问题，通过选择所需的惩罚比例因子来选择两 SPH 部件之间的期望的接触力从而避免由于

在界面处的大密度比而引起的不稳定性。用户可以根据模型材料参数来选取所要的相互作用方式如图 3。

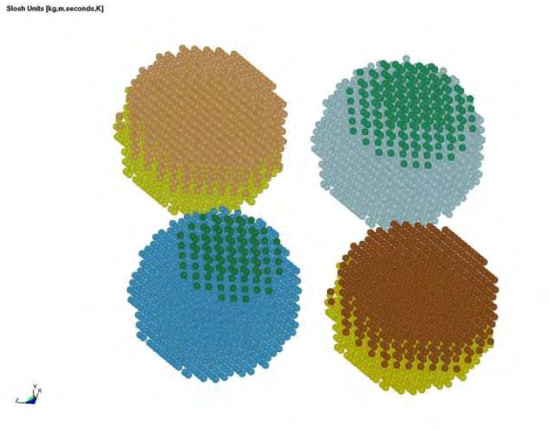
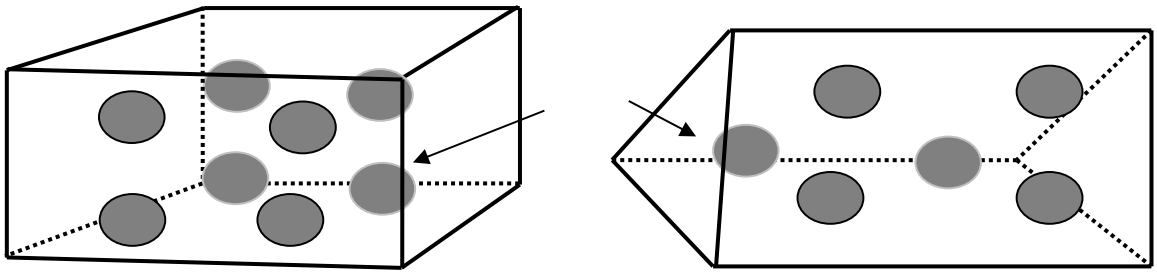


图3. Interaction through both standard interpolation methods and contact methods

2. SPH颗粒与固体单元间的耦合

在 SPH 部件和 FEA 元件（固体和壳单元）之间的相互作用，LS-DYNA 中可以用点到表面的接触作用来处理，因为这两种方法都基于拉格朗日描述。当模拟 SPH 颗粒流体在模型中流入 FEA 元件结构中，流体与固体之间的相互作用的问题可以容易地通过点到表面接触作用来处理。

在传统有限元应用中，当固体单元受力而达到失效状态时，根据客户定义的失效准则（应力或朔性应变准则等），固体单元会从计算中除去。这将引起物理上材料人为空缺，从而引起邻近材料的回弹。最新发展的 SPH 选项之一可以把失效的固体单元转成 SPH 颗粒，同时允许转成的 SPH 颗粒与临近的固体单元进行耦合（合为一体）或者不耦合（**碎片分析**）。该功能的关键字是：*DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH.



如上图所示，固体单元转成的 SPH 颗粒均匀地分布在固体单元中。新产生的 SPH 颗粒即可属于原有的 SPH 颗粒部件或重新建立新的 SPH 部件。预置值中，SPH 颗粒独立存在不与邻近的固体单元进行耦合，这个选项可以用于断裂裂片分析。通过设置变量 ICPL=1，从固体单元转成的 SPH 颗粒可以与邻近的固体单元进行耦合，此选项适用于由于屈服而引起的材料软化过程（本构关系的改变）。变量 IOPT 的设置可以用于指定耦合开始的时间（只在 ICPL=1 时），预置值 IOPT=0 用于指定耦合从 t=0 时开始，耦合在这里作为一种限制，用于连接独立的 SPH 颗粒与固体单元。当设置变量值 IOPT=1 时，只有当固体单元失效时，新产生的 SPH 颗粒与固体单元才开始耦合作用。下面例子显示了 SPH 颗粒与固体单元的耦合应用于 taylor bar 测试。

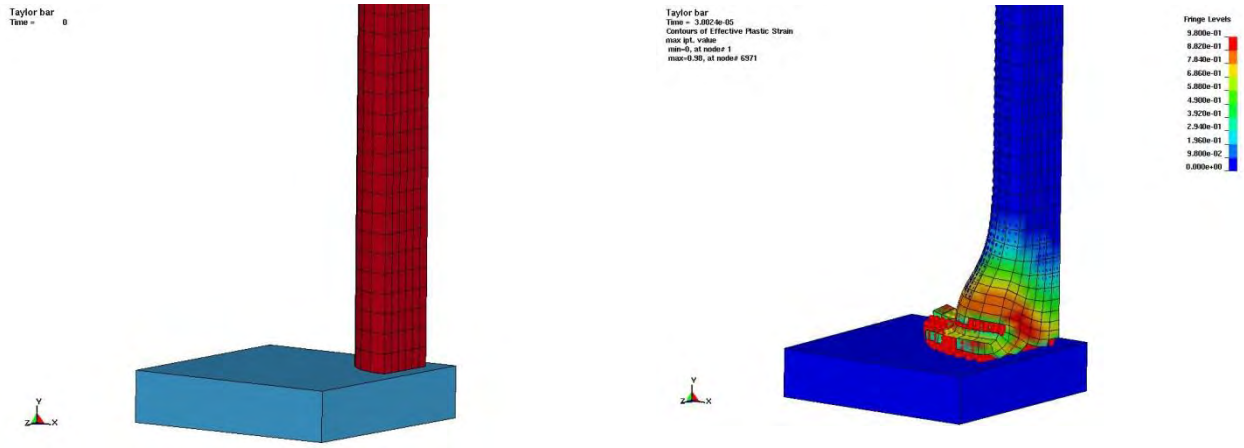


图 4: SPH 颗粒与固体单元耦合应用于 taylor bar 测试

当 ICPL = 1 和 IOPT = 0 ， 这个关键字将作为混合单元耦合 SPH 部件与固体单元部件（如图 5 ） 。

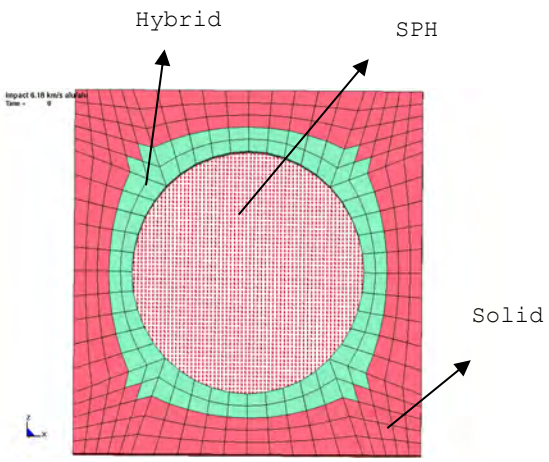


图5. Example of Hybrid elements a stransit layers between SPH particles and Solid elements

3. SPH颗粒与ALE， DEM方法的耦合方法

关键字* ALE_COUPLING_NODAL_PENALTY 可用于 SPH 粒子和 ALE 部件之间的一个基于罚函数接触算法的耦合方法。关键字* DEFINE_SPH_DE_COUPLING 定义了 SPH 粒子和 DEM 颗粒之间基于罚函数接触算法的耦合方法。

4. 算例

4.1 刚性环与水跟空气的冲击实验

3D 罐体，具有 1.0X0.8X0.01 的尺寸（图 6），用于计算验证 LS-DYNA 中多个 SPH 部件间（高密度比）通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用。在罐中的液体：水和空气（空气在顶部），这两个流体之间的密度比超过 1000，水和空气被设置为 SPH 粒子。刚性环（设为圆柱壳）在 Y 方向上以 50 的速度冲击罐中的流体。SPH 颗粒算法的结果与具有相同的尺寸和参数（见图 8 和图 9）的 ALE 方法的结果进行比较。

在模型中，*automatic_ node_ to_surface 接触法用于空气，水颗粒（SPH）和刚性壳之间的相互作用，空气粒子和水粒子之间相互作用则是通过颗粒与颗粒之间的接触方法。当两个 SPH 粒子之间的距离小于 SRAD *（两个粒子光滑长度总和）/2.0 时，两 SPH 粒子开始接触了。 SRAD 是从 0 到 1.0 的参数，这个参数用来调整检测接触标准，防止初始穿透。

标准的 SPH 插值引起的相互作用在这个例子（高密度比）中无法工作。选取一个适当的惩罚比例因子可以得到更好界面变形。如图 7，当取两倍的惩罚比例因子值作用于该模型中导致了两个 SPH 流体的界面周围具有更多的噪音。水的最终变形形状是与来自 ALE 方法（图 8）的结果相当。对于从 SPH 模型和 ALE 模型中的刚性环的速度历史进行比较， 如图 9，两个结果很接近。

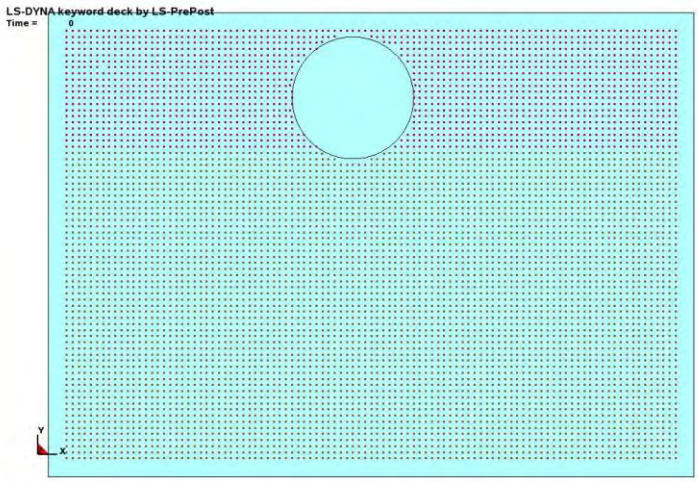


图 6. Problem set up of water impact

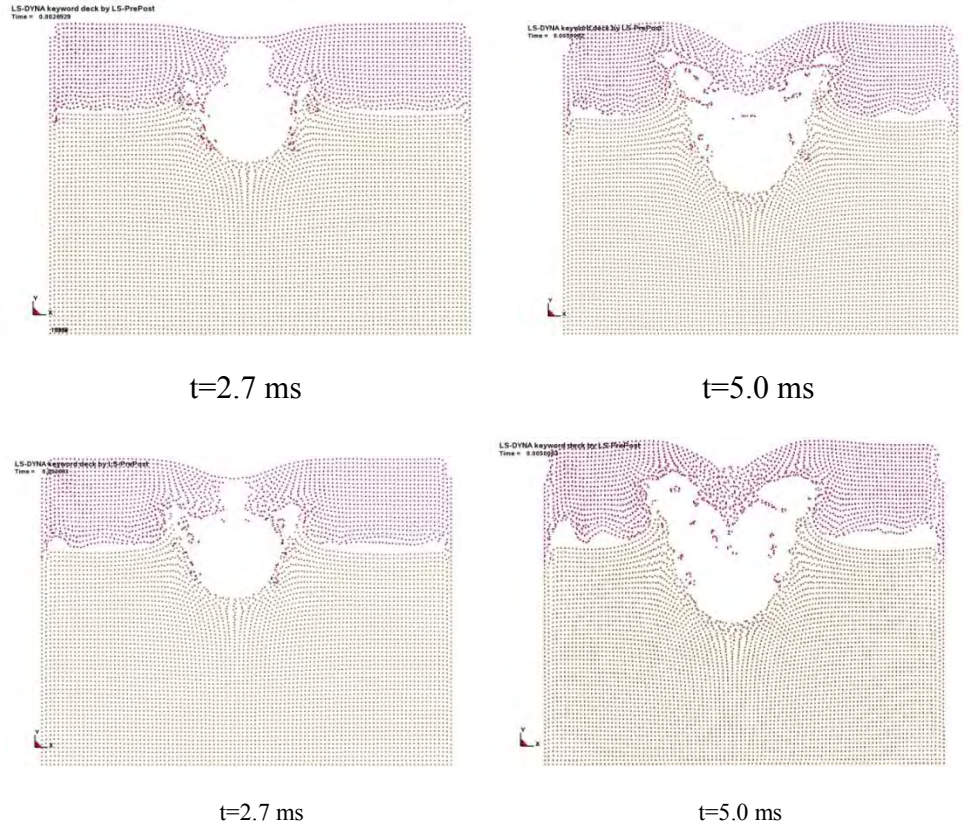


图 7. Upper: deformation shape for air and water model

Lower: deformation shape with double value of penalty scale factor

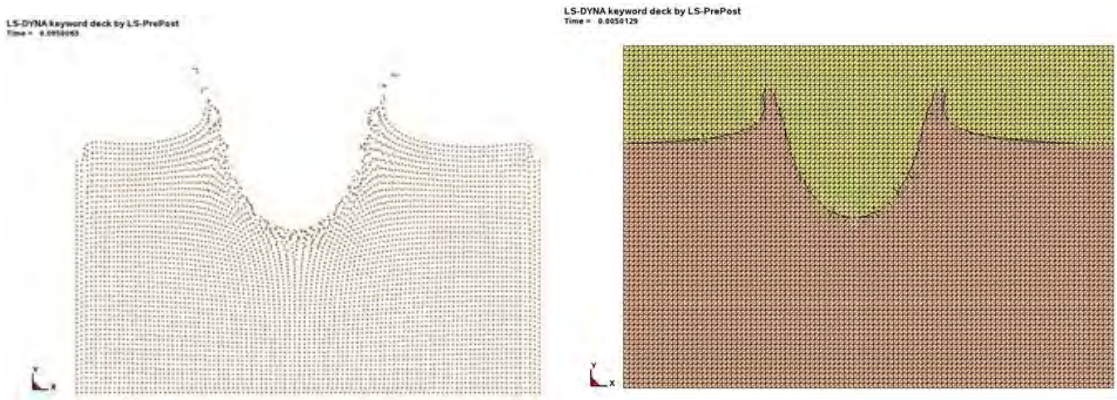


图 8. Final deformation shape from SPH model (left) compared to ALE model (right)

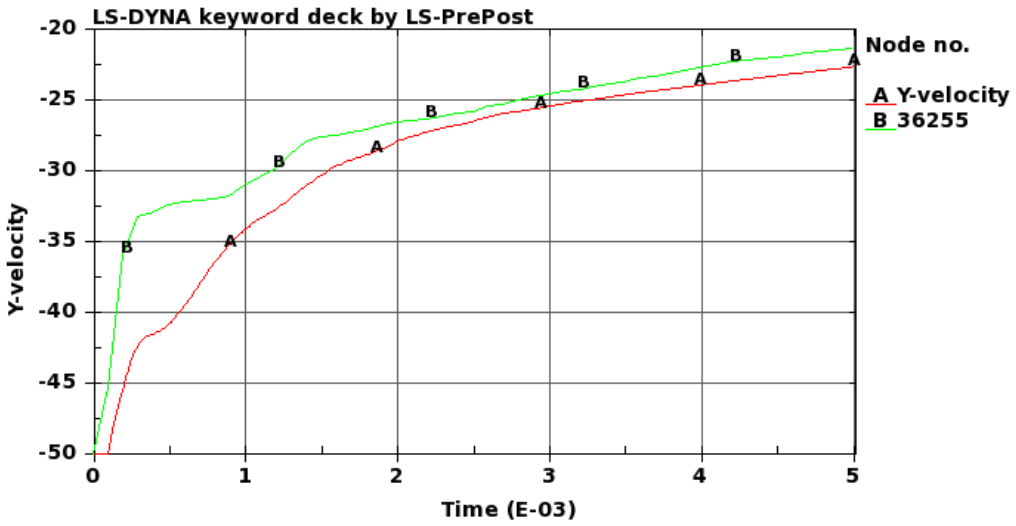


图 9. Impact velocity from SPH model (B) compared to velocity from ALE model (A)

5. 结论

LS-DYNA 中我们为不同 SPH 部件之间相互作用及 SPH 部件与固体部件之间的相互作用提供了不同关键字选项：标准 SPH 插值法（正常方式）；通过颗粒与颗粒之间的接触引起相互作用（*DEFINE_SPH_TO_SPH_COUPLING）；通过关键字* SECTION_SPH_INTERACTION 来合并两个相互作用方法；SPH 部件与固体部件之间的接触作用 （*CONTACT_ NODE_TO_SURFACE）；SPH 部件通过关键字* DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH 而与固体部件之间的耦合；SPH 粒子通过关键字* ALE_COUPLING_NODAL_PENALTY 与 ALE 方法之间的耦合等等。不同的相互作用方法可以并用于同一个模型以达到最佳效果。一些例子展示在 LS-DYNA 中如何使用不同的方法与不同的关键字的组合。

参考文献

L.B. Lucy, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, Astron. J. 82 (12) (1977) 1013.
R.A. Gingold and J.J. Monaghan, Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics, J. Comput. Phys. 46 (1982) 429-453.
L.D. Libersky and A.G. Petschek, Smooth particle hydrodynamics with strength of materials, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM.
J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, J. Comp. Phys. 110 (1994) 399-406.
Paul W. Cleary, Modelling confined multi-material heat and mass flows using SPH, Applied Mathematical Modelling, Volume 22, Issue 12, December 1998, Pages 981–993.
B. Solenthaler and R. Pajarola, Density contrast SPH Interfaces, Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Computer Animation, 2008.
Matthias Muller, Barbara Solenthaler, Richard Keiser and Markus Gross, Particle-Based Fluid-fluid Interaction, Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Computer Animation (2005), pp. 237-244. 1, 2, 4, 6.
Markus Ihmsen, Julian Bader, Gizem Akinci and Mathias Teschner, Animation of air bubbles with SPH, International Conference on Computer Graphics Theory and Application, 2011.

LS - DYNA中国代理商

迪艾工程技术软件(上海)有限公司 (ETA)

地址：上海市漕溪北路 18 号上海实业大厦 39/B

邮编：200030

电话： 86-21-6438 5725 传真： 86-21-6438 5752

网址:http://www.eta.com.cn/邮箱:lma@eta.com.cn

奥雅纳工程咨询(上海)有限公司 (ARUP 中国)

地址: 中国上海淮海中路 1045 号淮海国际广场 39-41 楼

邮编：200031

电话： 86-21-31188876 传真： 86-21-31188882

网址:http://www.arup.com/邮箱:stephen.zhao@arup.com

上海恒士达科技有限公司 (HengStar)

地址：上海市张江高科技园区郭守敬路 498 号 6 幢 11206 室

邮编：201203

电话： 86-21-6163 0122 传真：86-21-6163 0201

网址:http://hengstar.com/邮箱:hongsheng@hengstar.*com*

恒士达科技

Hengstar Tech.

大连富坤科技开发有限公司(Dalian Fukun)

地址: 大连经济技术开发区五彩城 A 区凯伦国际大厦 B 座 1308

邮编：116600

电话： 86-0411-8761 1110 传真： 86- 0411-8761 1110

网址:http://dalianfukun.com/邮箱: dlfkkj888@aliyun.com

迪艾工程技术软件（上海）有限公司公司简介
（以下简称 ETA-China）

Engineering Technology Associates, Inc. (简称：ETA) 公司成立于 1983 年，总部位于美国汽车城底特律，是一家致力于开发汽车、模具及 3C 产品等领域的最先进的 CAE 软件，并提供技术服务的工程公司。ETA 拥有高素质的专业技术人员，为客户提供全方位的技术服务。ETA 公司自 80 年代中期进入中国以来，随着国内汽车及模具行业的蓬勃发展，现已将亚太市场重心转移到中国，并于 2003 年先后在上海、南京设立独资公司，2007 年在北京设立分公司。

ETA-China 负责大中华地区的软件推广、应用和整个亚太地区的技术支持，为产品设计的 CAE 方法提供一整套的解决方案，包括：整车 CAE 分析，钣金成形 CAE 分析，3C 产品跌落冲击，航空航天、国防方面的 CAE 分析，尺寸工程分析、汽车概念分析等。

ETA-China 拥有全面的 CAE 分析和设计能力，专长于包括：整车碰撞安全分析、车身结构分析，内饰分析，底盘与悬挂分析，动力系统分析，整车耐久性分析，流体分析。

ETA-China 拥有超过 100 人的技术服务团队，为客户提供全方位的技术服务。

一、ETA-China 主要软件产品及服务

主要软件产品：

1. DYNAFORM 钣金冲压成形仿真软件
2. PreSys 前后处理软件
3. LS-DYNA 先进的非线性分析软件
4. 3DCS 尺寸工程软件

主要工程咨询服务：

1. CAE 技术咨询服务
2. SE 同步工程技术咨询服务
3. GD&T 尺寸工程技术咨询服务
4. CAE 软件二次开发服务

二 、业绩简介

ETA 公司（Engineering Technology Associates, Inc.）自 2000 年开始在中国分销 LS-DYNA 软件至今已有十几年，客户涵盖了汽车、模具、超级计算中心、轨道客车、钢铁、高校、电子电器、航空航天等领域，并为这些领域的重要客户长期提供技术支持及项目开发，建立了深厚的战略合作关系。

ETA-China 具有雄厚的技术实力，长期以来为客户提供优质的 LS-DYNA 技术服务，包括：

- 根据客户的需要提供 LS-DYNA 安装调试服务；
- 为客户提供 定期培训、多媒体培训以及针对客户要求的有偿培训服务；
- 为客户提供 CAE 高性能计算系统，用于碰撞、结构、NVH、疲劳、流体等计算；
- 为客户提供全面的从硬件到软件系统技术支持，对客户进行定期维护，解决客户在使用维护过程中遇到的问题。

奥雅纳工程咨询有限公司 （ARUP 中国)简介

ARUP 中国是著名国际工程咨询公司 ARUP 在中国的分公司，ARUP 在全球超过 40 多个国家拥有 80 多个办事处，10000 多名员工。

ARUP 在中国已为各行业提供长达 20 多年的专业工程咨询服务，在建筑，汽车，环境等行业赢得了广泛的认可和声誉，在香港，澳门，北京，上海，深圳，广州，武汉，天津和重庆设有办事处，香港现有 2000 多名员工，大陆现有 1000 多名员工。

ARUP 在 CAE 领域为广大客户提供造型，碰撞 ，NVH，耐久性，行人保护，强度和 CFD 等工程咨询业务，服务范围涵盖汽车，航空航天，铁路机车，通用机械和军工等领域，并作为 LSTC 全球最紧密的合作伙伴之一在英国，中国和印度销售 LS-DYNA 软件和提供专业技术支持，提供如下 LS-DYNA 软件相关产品，帮助客户真正应用 LS-DYNA 软件解决工程实际问题：

碰撞有限元模型，包括 MDB，ODB 壁障模型，行人保护模型和 DYNAMore 假人模型。

LS-DYNA 专业前后处理 OASYS 软件

FEMZIP 压缩软件

Hycrash 软件（碰撞分析中快速考虑钣金硬化效应软件）

Comet 软件（CAE 流程管理和任务自动化管理软件）

ARUP 在中国目前已完成大量的 CAE 工程咨询服务项目，积累了丰富的 CAE 工程咨询项目实施和管理经验，这些宝贵经验也为 LS-DYNA 软件的技术支持和服务提供了强有力保障，这正是众多客户选择 ARUP 中国作为 LS-DYNA 软件供应商的原因之一。

上海恒士达科技有限公司 (HengStar)

上海恒士达科技有限公司 www.hengstar.com 是一个以工程技术咨询，CAE 软件销售（LS-DYNA）、技术服务培训、及相关技术开发为一体的高新技术公司。公司主要从事汽车被动安全及碰撞仿真模拟，CAE 作业提交管理系统，CAE 流程自动化等相关的技术研究开发工作。公司位于上海市浦东区张江高科技园区。

公司本着“持之以恒，奋进博达”的宗旨和同国外软件开发公司、软件代理公司、咨询公司、培训中心等之间的良好合作关系，竭诚帮助汽车制造企业更好地借鉴和分享国内外先进汽车安全设计策略和设计方法，并更有效地运用汽车部件和整车试验，以及计算机辅助工程技术即 CAE 仿真模拟来提高汽车的安全性能。

同时公司进一步拓宽在其他高技术产品设计，制造，及生产方面的业务能力，利用 CAE 技术和公司技术团队，改进优化现有产品，开发新产品，为提高人民生活质量提供更环保，更可靠，更先进的优质产品。

目前公司代理的主要 CAE 软件为：

- LS-DYNA 软件包（LS-Prepost，LS-OPT，LS-TaSC，LSTC Dummies 和 Barrier 模型），
- 其他相关前处理 DynaX，Visual Environment（Visual Crash for Dyna，和 Visual Process），
- 优化软件 Genesis 和 VisualDOC，
- 发动机罩内板设计软件 EnkiBonnet,
- 金属成形软件 JSTAMP+LS-DYNA
- LS-DYNA 工作提交文件管理软件 d3View。

大连富坤科技开发有限公司简介（Dalian Fukun）

大连富坤科技开发有限公司是从事计算机软件的开发、销售、技术咨询服务企业，同时兼有技术进出口、贸易进出口的业务。自 2007 年以来和美国 Livermore Software Technology Corperation(LSTC)合作进行 LS-PrePost 的研发。LS-PrePost 是一款专门针对有限元求解器 LS-DYNA 开发的前后处理软件，它能够提供快速的后处理功能，强大的 LS－DYNA 关键字和输入模型管理功能。LSTC 和大连富坤科技合作之后，推出了新设计的 LS-PrePost 版本，新版本拥有完善的图形界面、几何处理模块、ALE、金属成形、气囊颗粒法设置等新功能。最近开发的图形处理技术，大大提高 LS－的图形处理速度。大连富坤科技开发有限公司开发部负责 LS-PrePost 的开发、维护、技术支持及其所有相关工作。目前拥有博士三人，硕士六人。

2010 年经美国 Livermore Software Technology Coorperation (LSTC)公司委托及授权允许大连富坤科技在中国直接销售 LS-DYNA 及相关软件产品。大连富坤科技销售 LS－DYNA 主要通过与其他推销商合作方式。

LS - DYNA台湾代理商

势流科技股份有限公司 (Flotrend Corp.)

地址：110 台北市信义区忠孝东路五段 550 号 13 楼 (任远大楼)

电话：886-2-2726 6269 (37)　　手机：886-958-090 220

传真：　886-2-2726 6265

网址: www.flotrend.com.tw　邮箱: flotrend@flotrend.com.tw

爱发股份有公司 (APIC)

地址: 台北市 104 松江路 71 号 11 楼

电话：886-2-2508 3066 (231)　手机：886-0938-187 943

传真：　886-2-2507 7185

网址: www.apic.com.tw　邮箱 jeffery.lee@apic.com.tw

鑫威資訊股份有公司 (SimW@re)

地址: 110 台灣台北市信義區虎林街 202 巷 46 號

电话：886-2-2728 1206

传真：　886-2-2728 1206

网址: www.simware.com.tw　邮箱 simware01@simware.com.tw

2015 年 LS-DYNA 公开课培训安排

ETA 公司（Engineering Technology Associates, Inc.）自 2000 年开始在中国分销 LS-DYNA 软件至今已有十几年，客户涵盖了汽车、模具、超级计算中心、轨道客车、高校、电子电器、航空航天等领域，并为这些领域的重要客户长期提供技术支持及项目开发，建立了深厚的战略合作关系。

ETA-China 希望通过开展不定期的公开课培训帮助广大客户及时了解最新的 CAE 技术及更好地使用 LS-DYNA 软件。

培训内容	培训天数	是否收费	2015 年培训时间安排											
			1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
LS-DYNA 基础知识培训	2 天	免费	√											√
LS-DYNA 在钣金冲压中的应用基础培训	2 天	免费			√									
LS-DYNA 在道路载荷提取的应用高级培训	2 天	免费			√							√		
LS-DYNA 整车碰撞分析的高级培训	2 天	收费				√						√		
LS-DYNA 在汽车约束系统中的应用高级培训	2 天	免费						√					√	
LS-DYNA 在 ALE-FSI 方面的应用培训	2 天	免费					√							
LS-DYNA 在钣金冲压中的应用高级培训	2 天	收费						√						
LS-DYNA 在跌落分析中的应用高级培训	2 天	免费							√					
LS-DYNA 回弹预测及回弹补偿应用培训	2 天	免费								√				
LS-DYNA 在隐式分析中的应用高级培训	2 天	收费									√			
LS-DYNA 隐式算法在钣金成形领域中的应用	2 天	免费											√	

培训时间会根据报名情况做相应调整，敬请留意每月简报或查看网页 www.eta.com.cn 以获取完整的课程内容及培训具体时间。

我们还可以根据客户的不同要求定制培训课程，如有需求请发邮件至 lsdyna@eta.com.cn

奥雅纳工程咨询（上海）有限公司
Arup 中国 2015 年度培训安排

奥雅纳工程咨询（上海）有限公司（简称 Arup China）为满足中国广大 LS-DYNA 用户的技术支持和培训需求，将安排每月一次的公开课培训，提供学习和交流的机会，提升双方的技术实力。

课程内容	是否收费	天 数	日 期
Oasys 软件 JavaScript 开发培训	免费	1 天	2015 年 4 月 3 日
Oasys 软件基础培训	免费	2 天	2015 年 5 月 21-22 号
LS-DYNA 隐式分析培训	收费	2 天	2015 年 6 月 2-3 日
LS-DYNA 破裂，损伤和失效分析培训	收费	2 天	2015 年 6 月 4-5 日
LS-DYNA 约束系统分析培训	收费	2 天	2015 年 7 月 23-24 日
LS-DYNA 鞭打分析培训	收费	2 天	2015 年 8 月 20-21 日
Oasys 软件行人保护分析培训	免费	2 天	22015 年 9 月 24-25 日
LS-DYNA 汽车碰撞高级培训	收费	2 天	2015 年 10 月 29-30 日
LS-DYNA 约束系统分析培训	收费	2 天	2015 年 12 月 17-18 日

届时每个月都将发布下个月的培训邀请函。详细培训课程内容请从 ARUP 公司网站（www.arup.com/dyna）下载，或发邮件至 stephen.zhao@arup.com 获得。

公司地址：上海市淮海中路 1045 号淮海国际广场 39-41 楼，30 楼，37 楼

电话：021-31188876

传真：021-31188882

上海恒士达科技有限公司
2015 年 LS-DYNA 相关高级技术培训

恒士达科技
Hengstar Tech.

2015 年	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
LS-DYNA 高级入门 （3 天） An Introduction to LS-DYNA					☺				☺			
汽车碰撞仿真模拟 （4 天） Crashworthiness Simulation with LS-DYNA										☺		
汽车被动安全及乘员约束系统设计 （3 天） Passive Safety and Restraint Systems Design						☺						
LS-Prepost, LS-DYNA MPP, 安全气囊分析(3 天） LS-Prepost, LS-DYNA MPP, Airbag Simulation					☺							
行人保护，汽车被动安全及乘员约束系统仿真分析模拟（LS-DYNA） （3 天） Pedestrian Safety and Passive Safety Simulation								☺				
汽车碰撞仿真分析理论和技术，及基于 LS-DYNA 仿真分析的优化（LS-OPT） （3 天） Crashworthiness Theory, Introduction of LS-OPT							☺					
混凝土，建筑材料模拟及爆破模拟 （2 天） Concrete & Geomaterial Modeling, Blast Modeling											☺	
根据美标，欧标的前碰约束系统统计 （2 天） Frontal Restraint Systems according to FMVSS 208 and Euro NCAP				☺								
车身碰撞性设计，模拟和优化 （2 天） Car Body Design, Simulation, Optimization							☺					
侧碰要求及实现策略 （2 天） Side-Impact Requirements, Development Strategies											☺	

课程内容和培训具体时间请查看网址 www.hengstar.com
地址：中国上海市张江高科技园区
郭守敬路 498 号 11 号楼 11205-11206 室
邮编：201203
电话：021-61630122
传真：021-61630201
邮箱：training@hengstar.com
联系人：沈禹 13524954631 yushen@hengstar.com

上海恒士达科技有限公司近期 LS-DYNA 相关技术培训

上海恒士达科技有限公司本着“持之以恒，奋进博达”的宗旨一直以来积极参与、赞助中国 CAE 相关的技术会议，技术交流和其他技术活动，竭诚帮助中国企业利用 CAE 模拟(如 LS-DYNA 模拟)来提高产品设计，产品创新，从而提高产品的质量和竞争能力。从 2009 年以来，已成功邀请美国、德国、日本及国内经验丰富的专家成功举办有关“汽车被动安全及碰撞 LS-DYNA 仿真模拟”、“约束系统设计及 LS-DYNA 仿真模拟”、“LS-DYNA 并行 MPP 计算”、“LS-DYNA 气囊展开”，“LS-DYNA 高级培训”，“LS-DYNA 中的混凝土模型及爆破分析”，“基于模拟的优化分析 LS-OPT，Genesis”等各种高级技术培训 30 多期，2015 年恒士达科技将继续提供相关 LS-DYNA 技术培训：

（一）2015 年 8 月 27-28 日，上海，结构优化设计 GENESIS 培训

1、Genesis 软件功能介绍　　2、Genesis 优化案例介绍　　3、Genesis-ELSDYNA 的应用

（二）2015 年 10 月，上海，基于 LS-DYNA 的混凝土模型、仿真分析及应用(防爆抗爆分析)培训

1、 LS-DYNA 混凝土模型；

2、 混凝土材料特征；

3、MAT_159，MAT_84,MAT_72 等模型的理论与应用；

4、MAT_159，MAT_84,MAT_72 等模型的 LS-DYNA 验证；

5、K&C 混凝土（MAT_72）模型原理；

6、K&C 混凝土模型模拟以及结果验证；

7、K&C 混凝土模型在爆炸，撞击问题中应用；

8、K&C 混凝土模型参数的确定(操作练习)；

9、LS-DYNA 混凝土模型的应用案例分析

主讲专家：吴有才 博士

吴有才博士于 2006 年获得美国加州大学洛杉矶分校土木工程系博士学位，一直从事防爆抗爆领域的有限元分析和相关程序开发研究工作，参加多个与混凝土相关的项目，比如快速混凝土墙破坏预测系统的建立，混凝土墙 Concrete Wall、砖墙 Brick Wall、水泥砖墙 CMU Wall 等的抗爆能力分析及加固方案。服务对象包括美国政府相关机构、炼油厂、新加坡政府部门及联合国驻外办事处等，在防爆抗爆领域有着丰富的经验和渊博的知识。

（三）2015 年 10 月， 北京或上海，基于 LS-DYNA 汽车碰撞仿真模拟分析

(1) Mesh convergence and mesh quality
　　网格总体布置，网格收敛，和网格质量
(2) Spotweld modeling
　　焊点建模
(3) Spotwelds and other connections
　　焊接及其他类型的连接
(4) Numerical damping and numerical noise
　　数值计算中的阻尼和噪声
(5) Master/slave contacts
　　模拟中的主/从 接触
(6) Contact energy and contact penalties
　　模拟中的接触能量及罚函数法接触
(7) Single surface contacts, contact thickness
　　模拟中单面接触及接触厚度
(8) Soft constraint, segment contact
　　模拟中 soft 约束接触及基于段的接触的合理选择
(9) Element formulations
　　单元的计算公式
(10) Hourglass formulations
　　合理的沙漏控制
(11) Seat belts
　　安全带模型
(12) Component models
　　用 LS-DYNA 进行零/部件级的分析
(13) QA of numerical models
　　数值模型结果的可信度保证
(14) Material models for metals
　　LS-DYNA 中的金属材料模型。
(15) Hardening curves, data preparation
　　碰撞模拟中硬化曲线及其参数的准备
(16) Rate effects
　　碰撞模拟中材料应变率作用
(17) Modeling of thermoplastics
　　碰撞模拟中热塑性材料(thermoplastics)模型的合理选择及参数确定
(18) Localisation and regularization
　　应力应变局部化，正则化
(19) Stress states, triaxiality
　　应力状态、三轴应力等
(20) Failure models
　　带有失效的材料模型
(21) GISSMO and mapping techniques
　　考虑损伤的 GISSMO 材料模型设置及冲压成型工艺分析结果引入

主讲专家： Paul Du Bois

Paul Du Bois 是一位德国资深咨询专家，从 1987 年以来一直从事于工程计算模拟，特别专注于显示计算

的动态模拟分析，如碰撞及撞击现象的模拟。他已为绝大部分汽车生产厂如 DaimlerChrysler, Porsche, Ford, Toyota, Opel, GM, Fiat, Volvo, SAAB, PSA 提供碰撞分析咨询。从 1992-1997，Paul 为 FAT （德国汽车工业研究联合会） 中的“侧碰假人”工作组提供咨询，1996-2006，为 FAT 中的“泡沫材料”工作组提供咨询。除了计算方法的研发和工程咨询以外，他也提供“LS-DYNA 在碰撞分析中的应用” 高级培训。他的课程在欧洲各国如德国，英国，法国，意大利，及日本，美国深受欢迎。

上海恒士达科技有限公司近期赞助并出席的技术年会及会议

上海恒士达科技有限公司本着"持之以恒，奋进博达"的宗旨一直以来积极参与、赞助中国 CAE 相关的技术会议，技术交流和其他技术活动，竭诚帮助中国企业利用 CAE 模拟(如 LS-DYNA 模拟)来提高产品设计，产品创新，从而提高产品的竞争能力。

2015 年 8 月 6-7 日，上海恒士达科技有限公司赞助并出席由中国机械工程学会机械工业自动化分会、中国力学学会产学研工作委员会、中国计算机学会高性能计算专业委员会、陕西省国防科技工业信息化协会共同主办第 11 届中国 CAE 工程分析技术年会（CCAC 2015）。为推广 CAE 技术支持产品创新的成功经验，普及 CAE 技术的应用，本次会议设有专业主题交流论坛：（1）国防科技工业论坛：国防科技领域一直是 CAE 技术应用最大的行业，也是最成熟的行业，该分会场包括航空、航天、兵器、航电、舰船、核工业、特种行业等。（2）汽车、交通运输论坛：汽车制造业也是 CAE 技术应用最成熟的行业之一，近年来高速发展的铁路交通运输和船舶工业也对 CAE 的应用产生了巨大的需求。该分会场包括汽车整车开发及零部件制造、内燃机制造、特种车辆、机车制造等。（3）先进制造及综合科技应用论坛：当前我国制造业正在经历转型升级，CAE 技术将起着不可忽视的重要推动作用。（4）仿真验证与确认（V&V）专题论坛：V&V（Verification & Validation）流程包括真实物理简化、仿真、试验、比较验证四个部分，其中，Verification 验证发生在仿真过程内部；而 Validation 确认发生在试验和仿真结果之间。仿真经过 V&V 验证后可以成为虚拟试验，可平均取代了 70%以上的物理试验，甚至在某些行业做到了完全取代真实试验。（5）CAE 软件自主开发专题论坛：为了促进 CAE 软件自主开发领域产学研合作，推进我国自主知识产权 CAE 软件的发展，实现 CAE 技术引领的装备制造产业的自主创新，本届年会特举办 CAE 软件自主开发论坛。

2015 年 8 月 26-28 日，上海恒士达科技有限公司赞助并出席在中国苏州由中国汽车工程学会汽车安全技术分会主办，清华大学苏州汽车研究院承办的中国汽车工程学会第十八届汽车安全技术国际学术会议。本次会议内容：1．汽车底盘安全控制 2．驾驶安全辅助 3．协同式交通安全系统 4．碰撞预判技术 5．汽车结构安全性 6．行人碰撞保护 7．乘员约束系统 8．碰撞生物力学 9．交通事故分析 10．测试分析技术 11．整车安全性设计流程及体系 12．汽车安全法规及汽车产品召回。

2015.8.6-7 第 11 届中国 CAE 工程分析技术年会（CCAC 2015）

国内会议信息快递

2015 年 9-10 月 中国机械工程协会机械工业自动化分会 培训信息

- 9 月 14-16 日 第八届现代汽车疲劳耐久性技术交流培训班 地点：北京
- 9 月 18-20 日 第十届汽车碰撞安全性设计技术培训班 地点:北京
- 10 月 15-17 日 第五届汽车内外饰设计开发技术高级培训班 地点：北京

2015 年 8 月 25-28 日

中国汽车工程学会第十八届汽车安全技术学术会议

地点：江苏苏州

会议介绍：由中国汽车工程学会汽车安全技术分会主办，清华大学苏州汽车研究院承办。本次学术会议将邀请汽车安全技术领域的国内外知名学者、企业人士出席。会议将就目前国内外汽车安全技术研究及应用的最新进展展开研讨。

2015 年 9 月 15-16 日

2015 年全国首届汽车几何质量设计与验证技术高峰论坛

地点：上海青松城大酒店

论坛介绍：此次论坛得到了多家国内一流汽车主机厂、全球一流的软硬件供应商和高校科研院所的大力支持，主办方倾力打造理念更新、技术交流、互动研讨、分析案例的技术交流平台。同时也希望借此次机会，将尺寸公差技术的理念和应用推广到汽车及零部件、航空、航天、机床、高铁和轨交等整个制造领域。

2015 年 12 月 2-5 日

汽车零配件、维修检测诊断设备及汽车用品展览会

地点：上海国家会展中心

展会介绍：由法兰克福展览（上海）有限公司和中汽国际联合主办，展会内容覆盖汽车原厂制造商到售后市场的整个产业链各项产品及服务；整合汽车产业链：整车研发及制造、零部件制造、产品流通领域、维修改装和养护终端等各环节实力卖家。

LS-DYNA 信息资源网址

- www.lstc.com
  LSTC 公司网址
- www.lsdynasupport.com
  LSTC 公司 LS-DYNA 支持网站。 用户可以下载不同版本的 LS-DYNA 软件
- www.feainformation.com
  FEA 一般信息和各种模拟动画数据库网址
- www.feainformation.com.cn
  FEAInformation 中文版。LS－DYNA 最新发展动态，功能介绍，应用实例交流
- www.dynasupport.com
  LS-DYNA 的支持网站。LS-DYNA 教程、常见问题解答、LS-DYNA 的发行说明和手册并可供下载。
- www.lsoptsupport.com
  LS-OPT 的支持网站。LS-OPT 的最新动态、入门指南、常见问题解答和实例。
- www.dynalook.com
  网址包含了过去 10 年 LS-DYNA 的国际技术论文和欧洲的会议论文。有超过 950 篇论文可供参考。
- www.dynaexamples.com
  用户可以下载不同的 LS-DYNA 培训课程的课件和实例。
- www.topcrunch.org
  LS-DYNA 在不同硬件平台上的基准测试结果。这些信息可以用于硬件性能的评估和比较。
- blog.d3view.com
  访问 LS-DYNA 功能的各种评论和详细信息。
- www.ncac.gwu.edu/vml/models.html
  由 NCAC 维护。它提供了各种车辆和道路隔离护栏的有限元模型。
- www.dummymodels.com
  提供 LS-DYNA 的假人模型及其验证情况的详细信息。

此外，用户还可以加入其中的用户组：

- http://tech.dir.groups.yahoo.com/group/LS-DYNA/
- http://groups.google.com/group/ls-prepost/
- http://groups.google.com/group/lsopt_user_group/

订阅投稿邮箱 ：
yanhua@feainformation.com
订阅请注明主题： FEA 订阅
取消订阅请注明主题：FEA 取消订阅
投稿请注明主题：FEA 投稿

本刊通讯地址：
7374 Las Positas Road
Livermore, CA 94551 (美国)
电话：(001)-925-245-4562 传真：(001)-925-449-2507
联系人：Yanhua Zhao