基于 ANSYS/LS-DYNA 的示位标入水冲击仿真分析*

蒋克强[1]，张遵鸥[1]，张培成[2]

（1. 中国电子科技集团公司第三十六研究所， 浙江 嘉兴 314033；
2. 东岳搬运机械有限公司， 山东 泰安 271000）

摘　要：无线电示位标投放入水时承受较大冲击载荷，可能会对其结构或内部元器件造成破坏。因缺少实际的冲击载荷参数，设计时为保证满足冲击要求留有较大的刚强度余量，增大了示位标的重量和体积，而通过有限元分析手段可以方便快速地得到较为符合实际的入水冲击载荷参数。文中将示位标假设为刚体，基于 ANSYS/LS-DYNA 对其入水冲击过程进行有限元建模及数值分析，得到了其以不同姿态、不同速度入水时的最大冲击加速度和冲击时间等参数，这些参数作为力学输入条件可以更好地指导示位标的结构设计。

关键词：无线电示位标；入水冲击；仿真分析；ANSYS/LS-DYNA

中图分类号：TB12；TP391.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-5300(2012)-02-0015-03

Water-entry Impact Simulation Analysis of a Position Indicating Radio Beacon Based on ANSYS/LS-DYNA

JIANG Ke-qiang[1], ZHANG Zun-ou[1], ZHANG Pei-cheng[2]

(1. *The 36th Research Institute of CETC*, *Jiaxing* 314033, *China*;
2. *Dongyue Portage Machine Ltd.*, *Taian* 271000, *China*)

Abstract: Position indicating radio beacon gets great impact load when being put into water, maybe damaging the device structure and inner components. Because of the lack of impact load parameters when being designed, the beacon must have extra volume and weight in order to satisfy the impact requirements. However, water-entry impact load parameters can be got easily and conveniently through finite element analysis. In this paper, based on ANSYS/LS-DYNA, the finite element analysis model of the water-entry course of position indicating beacon is established on the assumption that the beacon is rigid body. Some parameters such as maximum impact acceleration and impact time were got after water-entry simulations with different speeds and gestures, which could become mechanical input parameters of structure design.

Key words: position indicating radio beacon; water-entry impact; simulation analysis; ANSYS/LS-DYNA

引　言

示位标是航运中广泛应用的应急无线电定位设备。在船舶出现撞船、搁浅等事故时，作为应急设备投入海中并开启工作，接收站通过接收示位标发射的无线电信号来定位船只，以便救援人员及早发现实施救援。对于大型船只，示位标的投放高度可达几十米，其入水速度为 20 m/s 以上，将承受很大的入水冲击载荷，可能对示位标的结构及内部元器件造成永久破坏，导致失效而无法起到定位作用，丧失最佳救援时机。

目前对结构入水冲击的研究已经较为深入，理论研究和实验均多见。但由于入水过程较为复杂，部分现象尚无法解释，试图对入水过程进行全面准确的理论建模较为困难。实验研究则需要大量的实验器材和合适的场所，灵活性差，设计师通过验证来改进设计的周期长，成本高。当前，以非线性动力学的深入研究和计算机软硬件技术的发展为基础，相继出现了诸多著名的仿真软件，如LS-DYNA、MSC. Dytran等，这些软

* 收稿日期：2011-11-15

件在研究入水、碰撞、跌落、爆炸等复杂非线性动力学分析中得到了广泛的应用，大量用户的仿真结果与实验结果的一致程度较高，且在设计前期进行数值分析较为灵活，适应性强，对结构详细设计有重要的指导意义。基于上述背景，本文采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对示位标入水过程进行有限元建模及数值分析，试图得到示位标在不同姿态、速度下入水的冲击载荷参数，指导其后继的结构优化设计。

1 示位标入水冲击有限元分析建模

1.1 几何模型

示位标外壳由工程塑料注塑成型。在有限元分析时，简化一些对结果影响较小的特征和结构，比如小孔、倒角、圆角等特征。简化后示位标外形尺寸如图1所示。

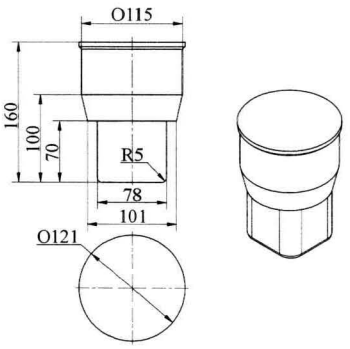

图1　示位标简化结构尺寸

1.2 单元类型选择

LS-DYNA 程序提供 Lagrange、Euler 和 ALE 三种算法，Lagrange 算法的单元网格附着在材料上，随着材料的流动产生单元网格的变形。但是在结构变形过大时，有可能使有限元网格造成严重畸变，引起数值计算的困难，甚至程序终止。Euler 方法以空间坐标为基础，使用这种方法划分的网格与所分析物质独立存在，网格大小和位置在整个分析过程中始终不变，故各个迭代过程中计算精度不变。ALE 算法则是先执行一个或几个 Lagrange 时步计算，此时单元网格随材料流动产生变形，然后执行 ALE 时步计算，适用于大变形分析，可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难，并实现流体-固体耦合的动态分析[1]，故本文中空气和水采用单点 ALE 单元，单元类型选择六面体 Solid164。而示位标结构由于形状较为复杂，选择四面体 Solid168 Lagrange 单元。因示位标入水冲击是一个极短的过程，且与流体相比示位标具有足够大的刚度，故将示位标假设为刚体。

1.3 材料参数设定

在流固耦合分析中，流体采用 NULL 材料模型相对较多一些，固体则多用 Johnson-Cook 材料本构关系方程，并以 Gruneisen 状态方程或线性多项式方程来描述。

水和空气的状态方程采用 Gruneisen 状态方程描述，并采用 NULL 材料模型。Gruneisen 状态方程对于材料被压缩或拉伸有不同的形式。对于水和空气等被压缩的材料，Gruneisen 状态方程为[2]

$$p=\frac{\rho_0 C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+\alpha\mu)E \tag{1}$$

$$\mu=\rho/\rho_0-1 \tag{2}$$

式中：p 为压力；C 为 v_s-v_p（冲击速度-质点速度）曲线的截距；S_1、S_2、S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率的系数；γ_0 为 Gruneisen 常数；α 为 γ_0 的一阶体积修正；ρ、ρ_0 分别为当前密度和初始密度。

在 ANSYS 前处理中，对水和空气的参数设置如表1所示[3]。

表1　水和空气的参数设定

材料	ρ/(kg·m^{-3})	PC	MU/(Pa·s)	C/(m·s^{-1})	S_1	S_2	S_3	γ_0
水	998	-10	0.87E-3	1497	2.56	-1.99	0.227	0.5
空气	1.25	-1	1.74E-5	340	0	0	0	1.4

表1中：ρ 为密度；PC 为截断压力，$PC<0$，一般假定一个小的负值；MU 为材料的动力学粘度；C 为冲击波速度，即声波在该材料中的传播速度。

示位标的外壳材料为工程塑料 ABS，实物的总重量约为1.2 kg。

1.4 流固耦合及边界条件定义

使用 ANSYS 建立起示位标入水冲击过程的几何模型，定义入水历程时间、重力加速度载荷及材料等参数，生成 K 文件。示位标被假设为刚体，而在 LS-DYNA 中无法直接对刚体添加加速度载荷，需要转化为施加在质心上的力载荷，可使用关键字 * LOAD_RIGID_BODY 进行力载荷的定义。在 K 文件中添加关键字 * CONTROL_ALE 表示采用流固耦合算法；使用关键字 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义流固耦合，在本文中，需要分别定义空气与示位标、水与示位标之间的耦合关系，算法采用罚函数法。示位标的初始速度则用 * INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY 进行定义。为防止边界反射波的影响，需要在有限水域的四周边界节点

上添加非反射边界条件来模拟无限水域情况。

2 结果分析

调整示位标的入水姿态，并设定不同的入水速度，做系列分析，使用前后处理程序 LS-PrePost 对仿真结果进行处理。图 2 为示位标以 20 m/s 的速度倒立落入水中某时刻的模拟状态。分别提取系列分析中入水冲击的最大冲击加速度和冲击时间，冲击时间取到加速度越过尖峰并开始缓慢下降的时刻为止，如图 3 所示。

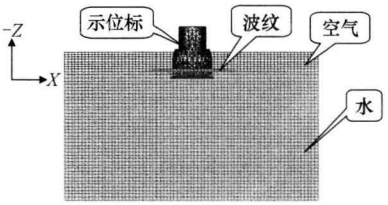

图 2　示位标倒立入水模拟

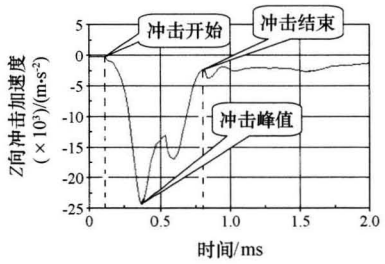

图 3　竖直入水冲击加速度曲线（入水速度 = 20 m/s）

将系列分析中提取的数据绘制成曲线如图 4 所示。

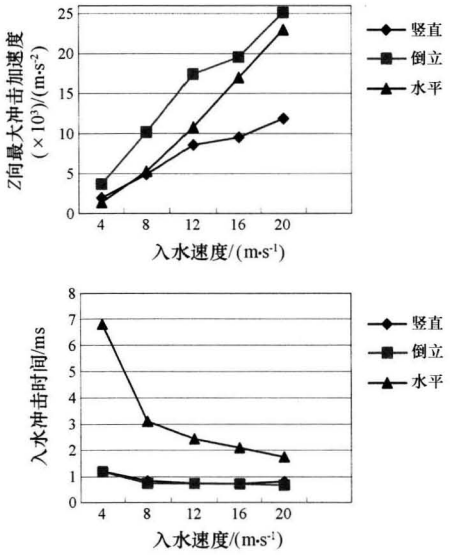

图 4　不同速度入水的冲击加速度和冲击时间

2.1　竖直和倒立入水

由于假设示位标为刚体，且结构具有对称性，当其竖直或倒立入水时，不同位置在相同时刻具有相同的加速度。

由分析可知最大冲击加速度随入水速度的增大基本呈线性增大趋势；但当入水速度大于一定数值时，单次冲击的加速度曲线不再是一个典型的冲击波，而是出现震荡减小现象，如图 3 所示，这也导致冲击时间随着入水速度的增大而减小，但当速度增大到一定程度后，冲击时间减幅趋缓，如图 4 所示。

倒立入水时，大端面首先接触水面，撞水面积比竖直入水大，示位标受到比竖直入水更大的冲击，但冲击时间接近，可见减小入水冲击的接触面可有效降低冲击载荷。

2.2　水平入水

如图 5 所示，当水平落入水中时，示位标大端面（节点 472 所在面）的边缘首先撞水，受到冲击力后减速入水，水面向上的反作用力使示位标产生旋转，另一端因旋转导致入水速度增加，故当另一端（节点 757 所在面）也接触水面时，其入水速度比首先接触水面的节点速度大，受到更大的冲击载荷，如图 5 所示。故在对示位标进行结构设计时，要考虑到不同姿态入水可能引起的最大冲击载荷，并对相应薄弱部位的结构做加强设计。

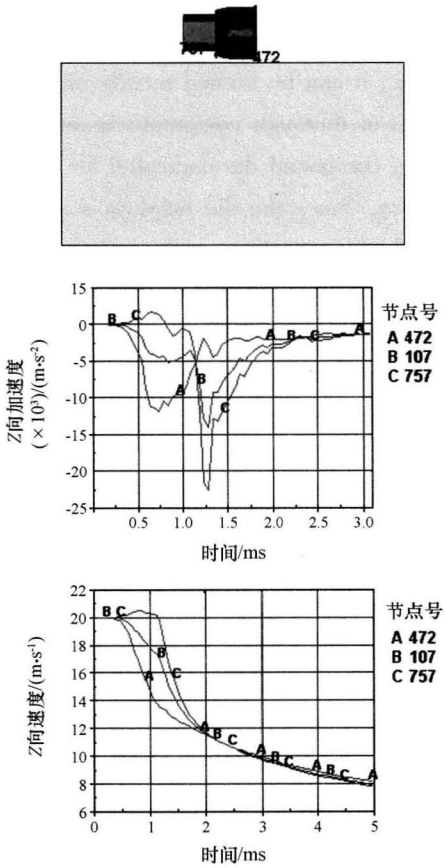

图 5　不同节点的冲击加速度和速度曲线（入水速度 = 20 m/s）

（下转第 21 页）

作出网状小方格，拉深后可以通过方格的变化直观地看出零件各区域的变形情况。

由网格试验结果可以看出：其实低矩形盒体的直壁部分和四壁圆角部分并不是孤立的，而是相互联结在一起的整体毛坯，它们各自的变形相互牵制、相互影响。圆角部分的拉深变形会向直壁扩展，使直壁受到切向挤压，也产生一定程度的拉深变形，结果使其本身的拉深变形得到缓解。由于直壁与圆角的变形性质不同，它们在拉深过程中产生的径向伸长变形也不一样。伸长变形较小的直壁部分具有较大的位移速度，使直壁与圆角之间过渡部分的金属诱发剪切变形。由于存在上述“直壁对圆角的带动作用”，低矩形盒体圆角部分的拉深系数可以小于相同条件下圆筒形零件的极限拉深系数。

为满足矩形盒体变形工艺要求，在设计时采用拉深凸、凹模直壁与角部不等间隙，如图7所示；在试模过程中，通过修整凹模口部不同区域拉深圆角大小等措施，控制材料流动速度，保证了矩形盒体四角顺利成型。

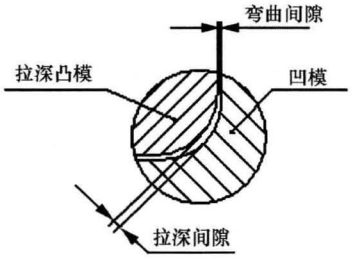

图7　拉深间隙示意图

3 结束语

本模具把冲压生产中的拉深、切边工序复合在一起，降低了工装成本，提高了生产效率，适应产品小批量生产需要。

在模具设计、调整中综合运用恒力压边技术、不等间隙技术、凹模圆角调整技术等顺利实现具有一定难度的较小圆角半径低矩形盒体一次拉深成型，满足了产品需求，取得了较好的效果。

参考文献

[1] 王孝培. 冲压设计资料[M]. 北京：机械工业出版社，1988.

[2] 《冲模设计手册》编写组. 冲模设计手册[S]. 北京：机械工业出版社，1999.

[3] 太田哲. 冲压模具结构与设计图解[M]. 北京：国防工业出版社，1980.

[4] 聂兰启. 圆筒形零件拉伸挤边复合模设计[J]. 冲模技术，2008(11)：23-26.

[5] 李硕本. 冲压工艺理论与新技术[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

胡建知(1973-)，男，工程师，主要从事工装模具设计工作。

沈丽琴(1976-)，女，工程师，主要从事工装模具设计工作。

(上接第17页)

3 结束语

示位标入水冲击分析是典型的液固耦合分析，使用LS-DYNA软件可以方便快速地对入水冲击过程进行仿真分析。仿真结果表明，假设为刚性的示位标以20 m/s的速度入水所承受的最大冲击加速度可达25×10^3 m/s^{2}左右，冲击时间为几个ms。示位标以不同姿态入水的最大冲击加速度差别较大，对其进行结构设计时应按最恶劣的受力情况进行设计。投放时可适当控制其入水姿态，比如增加减速定向装置等，以减小入水时承受的冲击载荷，避免设备损坏。

参考文献

[1] 赵海鸥. LS-DYNA动力学分析指南[M]. 北京：兵器工业出版社，2003.

[2] Livermore Software Technology Company. LS-DYNA Theory Manual[M]. 2006.

[3] 程载斌，刘玉标，刘兆，等. 导弹水下潜射过程的流体-固体耦合仿真[J]. 兵工学报，2008，29(2)：178-183.

蒋克强(1984-)，男，工程师，硕士，主要从事电子设备机械结构设计、分析等工作。

张遵鸥(1963-)，男，高级工程师，主要从事电子设备机械结构设计、研究等工作。

张培成(1984-)，男，主要从事机械设计及分析等工作。