

# 导弹水下潜射过程的流体—固体耦合仿真

程载斌, 刘玉标, 刘兆, 申仲翰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 导弹潜射是集高速流动、冲击、结构响应于一体的流体—固体—气体三态非线性耦合复杂过程, 是决定潜射导弹发射成败的关键环节。本文应用 LS-DYNA 显式程序建立了三种包含水体、空气、导弹、发射井和筒盖的多物质耦合 ALE 网格模型, 使用罚函数流体—固体耦合方法对导弹水下无攻角潜射过程进行了数值模拟, 给出了弹体质心的轴向加速度、轴向流体阻力及阻力系数、空泡区压力分布。仿真结果表明, 模型 2 的仿真过程与实际导弹潜射过程最为相符。同时总结了 LS-DYNA 程序中流体—固体耦合计算的相关设定原则和方法。本文可为潜射导弹的水动力载荷设计和数值仿真提供有益的参考。

**关键词:** 流体力学; 潜射导弹; 流—固耦合; ALE; LS-DYNA; 流体阻力系数

**中图分类号:** TJ762.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2008)02-0178-06

## FSI Simulation on the Vertical Launching Process of Under water Missile

CHENG Zai-bin, LIU Yu-biao, LIU Zhao, SHEN Zhong-han

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The launching of underwater missile is a nonlinear coupling process of water, structure and air, which integrates high-speed flow, impact and structural response into a whole, and is a key segment of submarine carried missile launching. The three different models with ALE multi-material mesh including water, air missile, silo and cover plate were built by LS-DYNA. The process of submarine-launched missile without attack angle was simulated by the penalty FSI. The axial acceleration of missile centroid, water resistance force and resistance coefficient and pressure distribution of cavity zone were obtained. The simulated results show that the process simulated by the model 2 is coincident well with that launched by the real missile. Additionally, some advices of FSI method and simulating experiences were concluded. It provided a new kind of reference standard for missile design and numerical simulation works of underwater loading.

**Key words:** hydromechanics; submarine carried missile; fluid-structure interaction; ALE; LS-DYNA; fluid resistance coefficient

潜射战略导弹是国家核力量的重要支柱之一, 能大大提高攻击的突然性和打击效果。目前, 潜射导弹的水下发射方式大多采用高压气体将导弹弹抛出海面, 在出水后点火, 然后继续沿着空中弹道飞行, 直至击中目标。虽然导弹在水中运动的时间很短, 但是导弹却经历了如界面变化、空泡溃灭等各种复杂的物理

过程。导弹高速运动时形成的空泡发展和溃灭的机理至今没有完善的理论模型对其进行描述, 因此给水动力的设计带来了极大的困难。如何计算水动力载荷和预测水下力学环境是目前潜射导弹设计中亟待解决的问题。本文通过数值模拟方法对导弹无攻角潜射过程中的水动力载荷进行了计算与分析, 以期为

收稿日期: 2007-04-10

作者简介: 程载斌(1978—), 男, 博士研究生。E-mail: chengzaibin@126.com

潜射导弹水下力学环境的设计提供参考。

### 1 计算模型

#### 1.1 几何模型与材料

图 1 所示为 1/2 对称有限元模型。导弹、发射

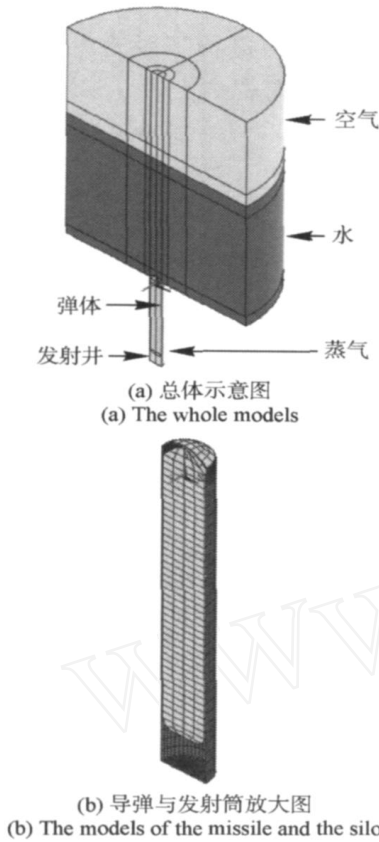


图 1 模型示意图

Fig.1 The FEA model

筒、水深等按实际几何尺寸建模,水域直径 40 m;上层空气高度 15 m,直径 40 m. 导弹和发射筒盖采用 LAGRANGE 实体单元组成,发射筒由 SHELL163 单元构成,流体由 ALE 实体单元组成。Y 向为导弹发射方向。

水材料模型采用 GRUNEISEN 状态方程:

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

其中:  $p$  为介质压力;  $\rho_0$  为波前介质密度;  $C$  为冲击波速;  $\rho_0$  为 GRUNEISEN 常数;  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别为 Mie-GRUNEISEN 状态方程  $u_s = C + S_1 u_1 + S_2 u_1^2 + S_3 u_1^3$  的一次项系数、二次项系数和三次项系数;  $b$  为 GRUNEISEN 常数  $\rho_0$  的一阶体积修正;  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ . 本文设定水模型参数为:波速  $C = 1531 \text{ m/s}$ ,一次项系数  $S_1 = 2.56$ ,二次项系数  $S_2 = -1.99$ ,三次系数  $S_3 = 0.227$ ,  $b = 0$ , GRUNEISEN 系数  $\rho_0 = 0.5^{[2,3]}$ .

空气材料模型采用线性多项式状态方程,即:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E. \quad (2)$$

其中:  $C_0 \sim C_6$  为线性多项式状态方程系数。本文设定空气模型参数如下:  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ ,  $C_4 = C_5 = 0.4$ ,  $E = 2.5 \times 10^5$ .

固体、流体模型的材料参数如表 1、2 所示。

表 1 固体材料参数表

Tab.1 Material parameters of the solid

部件	材料模型	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/ Pa	泊松比	屈服应力/ Pa	硬化系数
导弹	mat-1	1 000	$0.200 \times 10^{12}$	0.3		
发射筒	mat-20	1 000	$0.200 \times 10^{12}$	0.3		
筒盖	mat-3	1 000	$0.100 \times 10^{12}$	0.3	$1.1 \times 10^{-3}$	1.0

表 2 流体材料参数表

Tab.2 Material parameters of the fluid

部件	材料模型	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	截断压力/ Pa	运动粘性系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	状态方程
水	mat-9	1 030	$-2.2 \times 10^{10}$	$8.97 \times 10^{-7}$	GRUNEISEN
空气	mat-9	1.225	$-3.394 \times 10^6$	$1.5 \times 10^{-5}$	LINEAR. POLYNOMIAL

#### 1.2 边界条件

在 1/2 对称有限元模型的对称界面上施加对称约束,水底面除与筒盖接触部分外,全部施加全约

束,发射井外围、筒盖边缘施加位移全约束,空气和水外延边界施加透射边界约束。

导弹底部的驱动力为:

$$F_p(t) = \frac{D^2}{4} p(t). \quad (3)$$

式中:  $D$  为导弹外径;  $p(t)$  为弹体尾罩底部实测压力值。

弹体适配器与发射井壁之间的摩擦力  $F_f$  采用 ADAMS 仿真所得四段适配器的摩擦合力。若导弹重力为  $mg$ , 则仿真时导弹质心施加的合力为

$$F = F_p - F_f - mg. \quad (4)$$

## 2 LS-DYNA 模拟

### 2.1 流体平衡初始化过程

水下导弹潜射时, 初始静水压力十分重要, 若忽略, 仿真结果将严重偏离流体力学理论计算结果。由于 mat-9 材料无法通过 LS-DYNA 的动力松弛功能进行流体静力平衡初始化, 故本文利用仿真的初始 0.3 s 使流体重力达到动平衡状态, 而后模拟加载推力, 进行发射仿真。同时为尽量接近“干”式发射真实状况, 导弹模拟发射前发射筒内必须无水, 发射筒盖在此时间内应该处于关闭状态, 而弹体头部出水时筒盖必须开启以避免不真实的碰撞。

### 2.2 仿真方法

本文利用罚函数流—固耦合方法, 采用三种仿真方法进行导弹潜射过程仿真, 通过对比以寻求仿真过程与实际过程最为接近的模型与模拟方法。

表 3 模型对比

Tab. 3 Comparison of 3 models

模型	筒盖材料 模型	水是否 加载重力	初始压力 平衡方法	仿真开启 筒盖方法
model 1	刚体	是	动力学平衡	重新启动方法
model 2	mat-3	是	动力学平衡	刚体-弹性体 自动转化方法
model 3	无筒盖	否		

模型 1: 进行初始计算以实现水压动平衡, 而后采用重新启动方法改变筒盖刚体约束条件, 进行潜射过程仿真。

模型 2: 筒盖材料为 mat-3, 该材料在小应力条件下发生破坏。运用刚体-变形体自动转化命令, 使筒盖在初始 0.3 s 仿真时间内为刚体, 然后复原并进行发射过程仿真, 最终导弹冲破筒盖潜入水中。

模型 3: 无静水压力, 直接进行潜射过程仿真。

## 3 仿真结果

对比不同模型的仿真结果并综合评价不同模型

和仿真方法的优缺点。

### 3.1 加速度和水阻力曲线

弹体质心加速度和水阻力随时间变化的结果是评价仿真方法的重要标准。弹体质心加速度由弹体  $Y$  向合力随时间变化的曲线求得, 水阻力根据弹体表面压力积分求得。图 2、图 3 中的导弹质心加速度和水阻力的值均进行了脱密处理, 为真实值除以某一值以后的相对值。

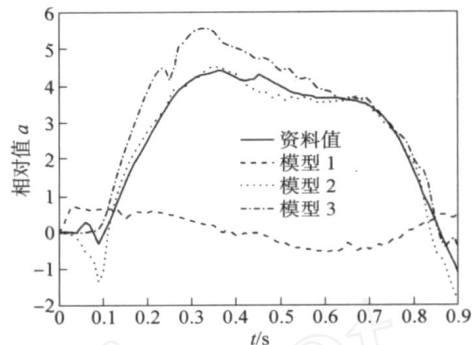


图 2 导弹质心加速度曲线图

Fig. 2 The acceleration of the centroid of different models

对比图 2 中模型 1 与其他模型的加速度仿真结果, 并观察图 4 所示仿真压力传播过程, 可以判断模型 1 的计算有严重的错误。重启动前(图 4(a))静水压力与实际基本相符; 而在重启动瞬间(图 4(b))水表面压力突增到  $4 \times 10^5$  Pa 以上, 以致后续时间内导弹受压力波作用, 令仿真水阻力严重偏离合理范围。模型 1 重启动时刻应力应变初始化错误是计算错误的原因。

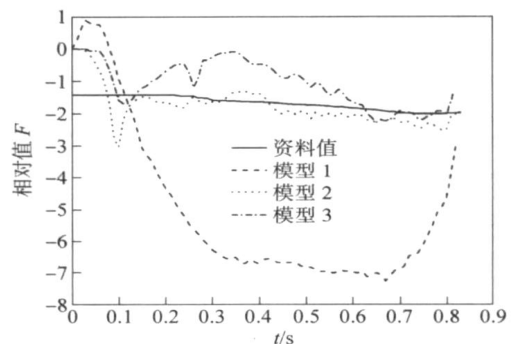


图 3 导弹水阻合力曲线图

Fig. 3 The resisting force of different models

深入分析可知重启动时刻初始化错误原因: 重启动前重力加速度加载后, 由于压力作用, 流体材料产生小压缩量, 导致水面单元中材料不全为水材料。重启动时应力初始化命令按照网格 part 进行初始

化,因此水 part 表面会产生初始化计算错误,产生不真实压力。同时在重启瞬间发射筒盖周围亦出现相同现象。造成上述现象的原理基本相同,都是因为罚函数流—固耦合时,水质点进入了筒盖单元,以致重启出现错误,如图 4(c) 所示。

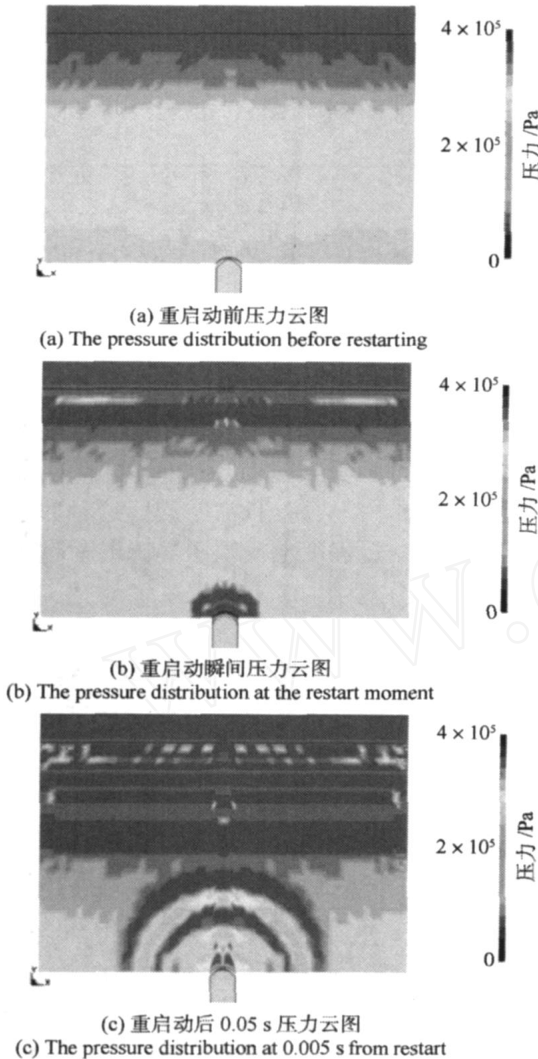


图 4 重启压力分布云图(模型 1)

Fig. 4 The pressure distribution of restarting for the model 1

对比模型 2、3 仿真所得曲线数据,并分析其发射过程中流体压力变化云图,判定其计算结果较为真实地反映了导弹潜射过程的运动特性及水冲击阻力的量值。其中模型 3 因无静水压力削弱了流体阻力,其最大加速度和速度均大于 2 号模型。

图 5 表明:由于模型 3 中水模型材料无重力作用,仿真中导弹与水接触面积减小,不合理地减小了导弹附着水量所产生的阻力。对于仿真短时间流体冲击力作用,如 0.2 s 以内,则模型 3 无静水压力初

始化且计算时间短,是非常可行的仿真方案。

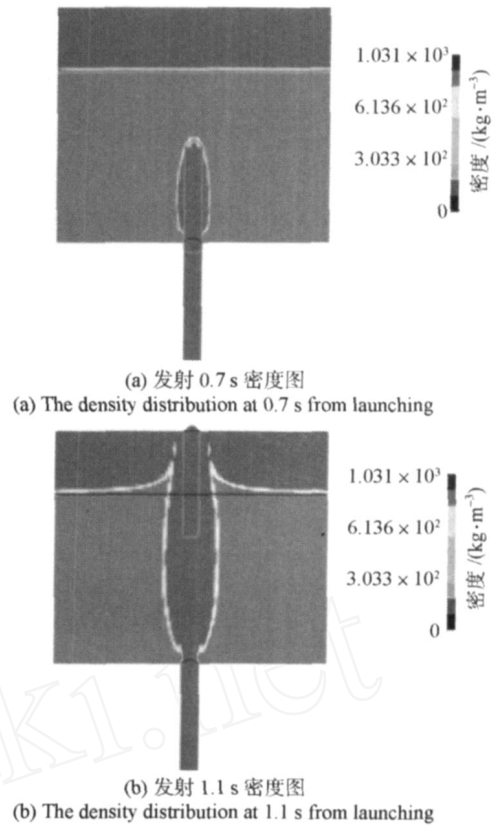


图 5 模型 3 流体密度分布

Fig. 5 The density distribution of the fluid for the model 3

根据以上分析,模型 2 的仿真过程与实际导弹潜射过程最为相符,仿真所得结果与资料中试验测量值相近,所以模型 2 所采用的仿真分析方法较为合理。

### 3.2 水阻力系数

根据流体力学理论,计算导弹在原静止的无界流体中作变速直线运动,流体作用于弹体物面上的合力( $Y$ 向)应为<sup>[4]</sup>

$$F_y = - p(t) - m(t) a(t) - \left[ \frac{1}{2} \rho v(t)^2 \right] \cdot A \cdot C_D(t). \tag{5}$$

其中:静水压力  $p(t) = \rho g h(t) A$ ,  $h(t)$  为弹头离水面距离;  $m(t)$  为轴向附加质量;  $g$  为重力加速度;  $a(t)$  为加速度;  $\rho$  为流体密度;  $v(t)$  为弹体质心相对水流速度;  $A = D^2/4$  为特征面积;  $C_D(t)$  为流体阻力系数。

图 6 所示为  $m(t)$  不同时  $C_D$  随时间变化的曲线。因为导弹在发射的初始 0.3 s 内,弹头由气体包围,且出筒距离小,界面接触冲击为这段时间的主

要作用力,  $C_D$  计算值与理论相差过大, 故本文取导弹发射后 0.3 ~ 0.7 s 时间段进行流体阻力系数  $C_D$  计算。

由图 6 可知,  $C_D$  最终收敛在 0.4 附近, 与测量值有一定的误差。由于导弹在发射过程中空泡作用改变了导弹的固有特征尺寸, 而同时导弹潜射本身是一个变速、变入水体积的非定常过程,  $C_D$  的理论计算十分困难。雷诺数  $Re$  和附加质量的大范围变化都是影响试验的重要因素, 故试验测定  $C_D$  也十分复杂, 存在一定的误差。而本文采用显式算法的 LS-DYNA 仿真计算出流体阻力系数  $C_D$ , 既经济又节省时间, 虽然误差难以避免, 但作为一种比较可信的数值仿真方法, 也可为导弹设计工作提供一种新的方法与技术参考。

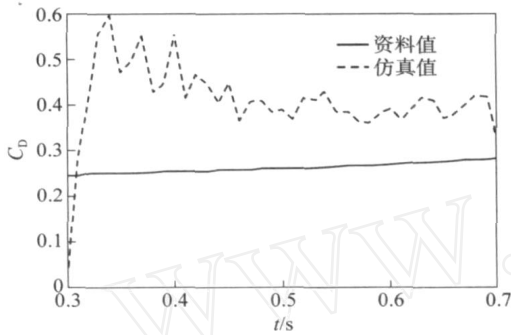


图 6 仿真计算  $C_D$  值与试验值比较

Fig. 6 Comparison of  $C_D$  between the simulation and the experiment

### 3.3 空泡作用

导弹在水下高速运动时, 会在弹体肩部形成空泡, 并逐渐发展、溃灭形成水动力载荷。空泡的作用主要反映在导弹表面压力的变化时程曲线上。由图 7 和图 8 所示导弹表面径向压力随时间变化的分布图可知: 导弹在发射 0.4 s 后出现空泡作用, 导弹肩

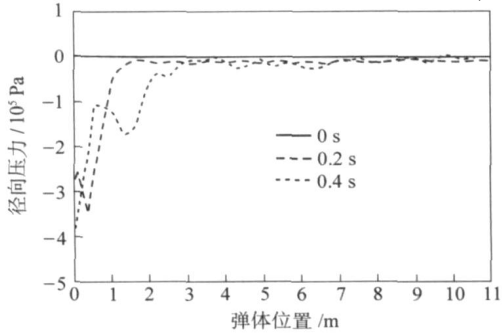


图 7 0 ~ 0.4 s 弹体表面径向压力分布

Fig. 7 Radial pressure distribution on the missile's surface during 0 - 0.4 s

部出现低压区, 随后空泡 (低压区) 不断向弹体后端发展, 直至图 8 中 1.0 s 时刻导弹压力分布状况。

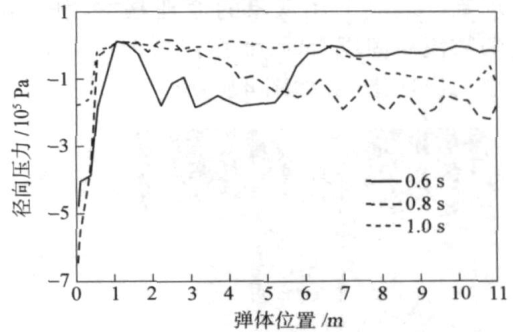


图 8 导弹 0.4 ~ 1.0 s 表面径向压力分布图

Fig. 8 Radial pressure distribution on the missile's surface during 0.4 - 1.0 s

本文仿真计算中水体所采用的 mat-9 材料模型并不支持严格意义上的空泡仿真计算, 但是当流体材料膨胀到压力小于其截断压力时, 材料便不能阻碍本身的膨胀作用, 从而出现“空泡”, 这种数学意义上的“空泡”在一定程度上反映了导弹潜射过程中空泡的生成过程。

### 3.4 网格问题

仿真计算时, 单元网格越精细, 计算精度越高, 同时计算时间也越长。在流-固耦合计算中网格的精细程度还直接影响到计算的稳定性问题, 具体的网格尺寸应该根据模型的规模和精度的要求来制定。在 ALE 方法计算时, 流体单元网格通常要比固体细密, 但是如果 LAGRANGE 结构两边压力差较

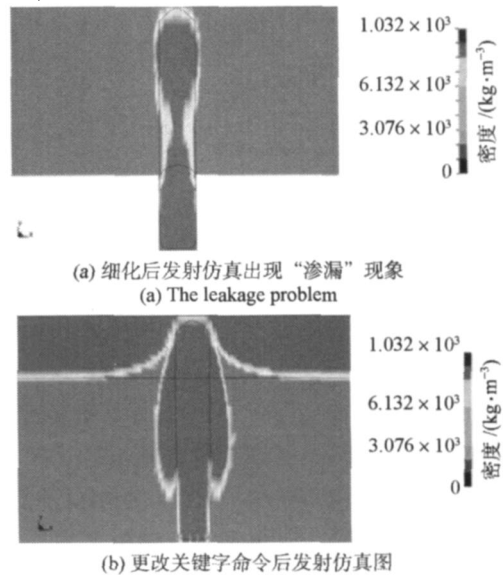


图 9 “渗漏”示意图

Fig. 9 Schematic plan of leakage

大时,需要加密固体网格或者增加面积分点和增加罚函数系数的方法来防止流体“渗漏”<sup>[2]</sup>。

将本文中模型2的流体网格加密,便会出现“渗漏”现象。对关键字进行修改,增加耦合从面的积分点并加大罚函数系数,便可成功避免此类现象,见图9。

#### 4 结论

本文采用LS-DYNA显式有限元程序建立了多物质耦合有限元模型,使用罚函数流-固耦合方法对潜射导弹水下垂直发射过程进行了仿真分析,给出了弹体质心的轴向加速度、轴向流体阻力及阻力系数、空泡区压力分布,并与试验结果进行了比较。仿真结果较真实地反映了潜射导弹无攻角发射的过程,为潜射导弹设计中水下力学环境的仿真模拟提供了一种新的方法,可为潜射导弹的水动力设计提供有益的参考。

对比不同模型的仿真结果讨论了流体初始条件和网格密度的影响,同时分析了模型网格单元划分导致的“渗漏”现象,并提出加密固体网格或者增加

面积分点和增加罚函数系数的方法来防止流体“渗漏”。总结介绍了LS-DYNA程序中流-固耦合计算的相关设定原则和方法,可为从事相关领域数值仿真工作的学者提供参考。

#### 参考文献(References)

- [1] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1993: 376 - 390.  
ZHANG Shou-zhong. Explosion and impact dynamics[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1993: 376 - 390. (in Chinese)
- [2] M'hamed Souli. LS-DYNA advanced course in ALE and fluid/structure coupling[C]. The 8th International LS-DYNA Users Conference, 2004, 30 - 33: 103 - 111.
- [3] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA基础理论与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 237 - 244.  
LI Yu-chun, SHI Dang-yong, ZHAO Yuan. Basic theory and engineering practice on ANSYS10.0/LS-DYNA[M]. Beijing: China Water-Power Press, 2004, 30 - 33: 103 - 111. (in Chinese)
- [4] 潘文全. 流体力学基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1984: 271 - 292.  
PAN Wen-quan. Foundation of fluid mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1984: 271 - 292. (in Chinese)