

# 锥形浮子入水冲击受力状态的数值模拟

梁杰<sup>1</sup>, 李晖<sup>2,3</sup>, 郑捷庆<sup>2,3</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021;  
3. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了分析锥形浮子入水冲击的规律, 基于 Fluent 软件采用动网格技术, 对斜升角分别为 30°、45°、60°的锥形浮子入水冲击过程进行了模拟仿真。通过分析压力和速度数据, 发现在锥形浮子入水瞬间水面对浮子产生的冲击十分巨大; 压力峰值先于冲击载荷峰值出现, 而且两峰值之间的时间间隔随锥体斜升角的增大而增大。

**[关键词]** 锥形浮子; 入水冲击; 波浪能; 数值模拟

**[中图分类号]** O 352

## Numerical Study on Water Entry Impact of Conical Buoy

LIANG Jie<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2,3</sup>, ZHENG Jie-qing<sup>2,3</sup>

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;  
2. School of Mechanical & Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. Fujian Province  
Key Laboratory of Cleaning Energy Utilization and Development, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to analyze the rules of the water impact, numerical simulation of water entry impact of conical buoy with different deadrise of 30°, 45°, 60° were carried out based on FLUENT software, using dynamic mesh. With the analysis of the pressure and velocity data, it was found that the impact on the buoy at the water-entry moment is very huge. The peak value of the pressure appears ahead of that of the impact load, and the time interval between the two peaks increases in the cone angle. The results have reference value for the optimization design and reducing the impact damage of the buoy.

**Keywords:** Conical buoy; Water impact; Wave power; Numerical simulation

## 0 引言

结构物以一定的速度从空气中穿过水气交界面进入到水中的过程被称为入水冲击。入水冲击是一个涉及到固、液、气三者之间相互耦合作用的复杂物理过程。水上飞机的降落、船舶的入水抨击、宇宙飞船器件的水上着落、空投鱼雷的入水、海上救生艇的抛落以及采集海洋能的浮子振荡过程等都涉及到入水冲击问题<sup>[1]</sup>。近年来许多学者对入水冲击问题展开了研究。G. De Backer<sup>[5]</sup>通过实验确定了锥形浮子的沾湿因子, 并且与渐进理论的计算结果做了比较, 认为渐进理论的结果偏于保守。Marco Anghileri<sup>[6]</sup>通过实验和模拟验证了 SPH 方法也可以运用于入水冲击问题的研究。D. Van Nuffel<sup>[7]</sup>通过

**[收稿日期]** 2015-07-31

**[修回日期]** 2015-10-07

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51409118); 福建省自然科学基金项目(2014J05062); 福建省教育厅面上项目(JA13184)

**[作者简介]** 梁杰(1987—), 男, 硕士生, 主要从事海洋可再生能源利用方面的研究。通信作者: 李晖(1974—), 女, 副教授, 博士, 从事海洋可再生能源开发与利用研究, E-mail: judy.lh@163.com。

实验获得了圆柱体入水瞬间的冲击压力和冲击载荷,结果表明,在入水瞬间圆柱体底部受到巨大冲击.魏照宇等<sup>[8]</sup>利用 MSC. dytran 软件进行回转体高速入水冲击的模拟,得到了回转体垂直入水初期的弹道特性、轨迹与入水超空泡.邱海强<sup>[9]</sup>利用 Fluent 软件对平头、锥头和圆头回转体在速度 50 ~ 150m/s 时的入水过程进行了仿真试验,结果表明,回转体高速入水冲击载荷峰值与速度和回转体的形状有很大关系.魏卓慧<sup>[10]</sup>研究了刚性截锥形弹体截锥角、入水速度、截锥高度以及沾湿因子对冲击载荷的影响.锥形浮子是波浪能发电工程中常见的采能元件,在浮子工作过程中由于防避台风和最优控制的需要,常常需要将浮子升离水面,当它再次入水的时候,就会发生入水冲击现象,入水冲击对于浮子的工作寿命有重大影响.本文对锥形浮子的自由落体入水冲击过程进行模拟仿真,分析了锥形浮子在入水过程中受到的冲击载荷和压力的变化规律.

# 1 模型建立

## 1.1 几何模型的建立、网格划分和边界条件设置

锥形浮子二维示意图如图 1 所示.锥形浮子顶部直径为 0.3 m,锥体斜边与水平未扰动的初始自由液面之间的夹角称为斜升角  $\beta$ .

图 2 展示了计算区域的网格划分,计算域宽 1.2 m,高 3 m,锥形浮子的重心距离计算域底部 2.8 m.计算过程中,在计算域下半部分添加液相水,使得锥形截面的重心距离水面的高度是 2 m,其余部分充满空气.锥形浮子的材料是 Fluent 软件默认材料铝,密度为 2800 kg/m<sup>3</sup>.计算域采用三角形网格进行划分,动网格技术采用的是弹簧近似光滑模型和局部重划模型<sup>[11]</sup>.

设置边界条件时,将计算域的左右及底部边界定义为固定壁面,顶部边界定义为压力出口,二维锥形浮子的三条边界定义为运动壁面,重力方向垂直向下,重力加速度  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

## 1.2 连续性方程和动量方程

由于浮子的入水冲击过程涉及到空气和水两相流体,因此本文在模拟计算中采用了 VOF (Volume of Fluid) 多相流模型,流体的连续性方程和动量方程也基于该模型进行了修正.在 VOF 模型中,各相流体共享一个方程组,在整个计算域追踪并对流体求解同一个动量方程组,同时追踪每种流体的体积分数来模拟多相流.在每个控制容积中,所有相的体积分数之和为 1.

混合物连续性方程:

$$\partial \rho_m / \partial t + \partial (\rho_m \mu_i) / \partial x_i = 0. \tag{1}$$

式中:  $\mu_i$  为  $i$  方向上的速度分量;  $\rho_m$  为混合物密度,  $\rho_m = (1 - a_q) \rho_l + a_q \rho_g$ , 其中  $\rho_i (i = l, g)$  分别为水和空气的密度,  $a_q$  和  $1 - a_q$  分别为空气相和水相体积分数.在每个控制单元体积内,如果  $a_q = 0$ ,则表示单元体积内没有空气相;如果  $a_q = 1$ ,则表示单元体积内充满空气相;如果  $0 < a_q < 1$ ,则表示单元体积内有空气相与水相之间的交界面.

混合物动量方程:

$$\partial (\rho_m \mu_i) / \partial t + \partial (\rho_m \mu_i \mu_j) / \partial x_i = - \partial p / \partial x_i + \partial [(\mu_m + \mu_l)(\partial \mu_i / \partial x_j + \partial \mu_j / \partial x_i)] / \partial x_i. \tag{2}$$

式中:  $p$  为混合物压强;  $\mu_m$  为混合物动力粘性系数;  $\mu_j$  为湍流粘性系数;  $g$  为重力加速度.

## 1.3 湍流模型

本文采用标准  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型,需要求解湍动能和耗散率方程.湍动能输运方程是由精确的方程推导得到的,但耗散率是通过物理推理和数学上模拟相似原形方程得到的.该模型假设流动为完全湍

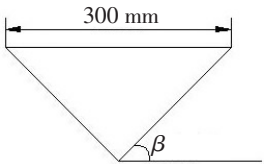


图 1 锥形浮子示意图  
Fig.1 Schematic show of conical buoy

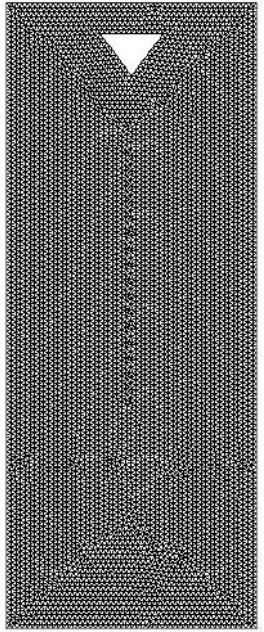


图 2 计算区域的网格划分  
Fig.2 Meshing of computational domain

流，分子粘性的影响可以忽略，因此，标准  $\kappa-\varepsilon$  模型只适用于完全湍流的流动过程的模拟。标准  $\kappa-\varepsilon$  模型的湍动能  $\kappa$  和耗散率  $\varepsilon$  方程为：

$$\rho dk/dt = \partial [(\mu + \mu_i/\sigma_k) \partial k/\partial x_i]/\partial x_i + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M,$$

(3)

$$\rho d\varepsilon/dt = \partial [(\mu + \mu_i/\sigma_\varepsilon) \partial \varepsilon/\partial x_i]/\partial x_i + G_{1\varepsilon} \varepsilon (G_k + C_{3\varepsilon} G_b)/k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2/k.$$

(4)

式中： $t$  为时间； $\rho$  为流体密度； $\mu$  为流体速度； $G_k$  表示由于平均速度梯度引起的湍动能； $G_b$  表示由于浮力影响引起的湍动能； $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能  $\kappa$  和湍能耗散率  $\varepsilon$  的湍流 Prandtl 数， $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ； $C_{3\varepsilon} = \tan|v/\mu|$ ，式中  $v$  为平行于重力场矢量的流速分量， $\mu$  为垂直于重力场的速度分量； $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  均为常值，其值分别为  $C_\mu = 0.09$ ， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ； $Y_M$  表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。

1.4 数值计算方法

本文应用 CFD 软件 Fluent13.0，模拟了锥形浮子做自由落体入水的过程。对上述数学模型采用有限体积法和二阶迎风离散格式，依次求解连续性方程和动量方程，并采用 Simple 压力耦合方程进行压力修正。运用动网格技术和 UDF 来控制运动边界，同时，运用 UDF 采集求解器中的数据。

2 45°斜升角锥形浮子的自由落体入水过程分析

浮子在入水瞬间会受到很大的冲击，随着入水深度的变化，浮子的冲击载荷，速度和表面受到的压力也会随之变化。现以 45°锥形浮子为例，分析锥形浮子入水过程中表面压力和冲击载荷的变化。

2.1 锥形浮子入水过程

本文所模拟的锥形浮子自由落体入水过程，以浮子从一定高度（此处为 2 m）开始下落， $t=0$  时刻开始计时。根据锥顶点和锥表面的压力分布情况，将锥形浮子入水过程分为 2 个阶段。

第一阶段为锥顶点压力远高于锥体表面压力的阶段。图 3 所示为  $t = 0.640 \sim 0.680$  s 时间段内锥形浮子的入水相图。由图 3 可见，在  $t=0.640$  s 时，锥形浮子顶点即将接触水面；入水后液面逐渐上升，水面上升过程中，水并未离开锥体斜面；在  $t=0.680$  s 时，上升液面几乎与浮子顶面持平。图 4 所示为  $t = 0.640 \sim 0.680$  s 时间段内锥形浮子周围流场的压力分布云图。从图 4 可以看出，锥体在这一阶段的压力最大值出现在锥顶点，锥顶点压力最高可达 11 kPa 左右。随着入水深度的增加，锥顶点出现最大压力的现象也逐渐变得不再明显。

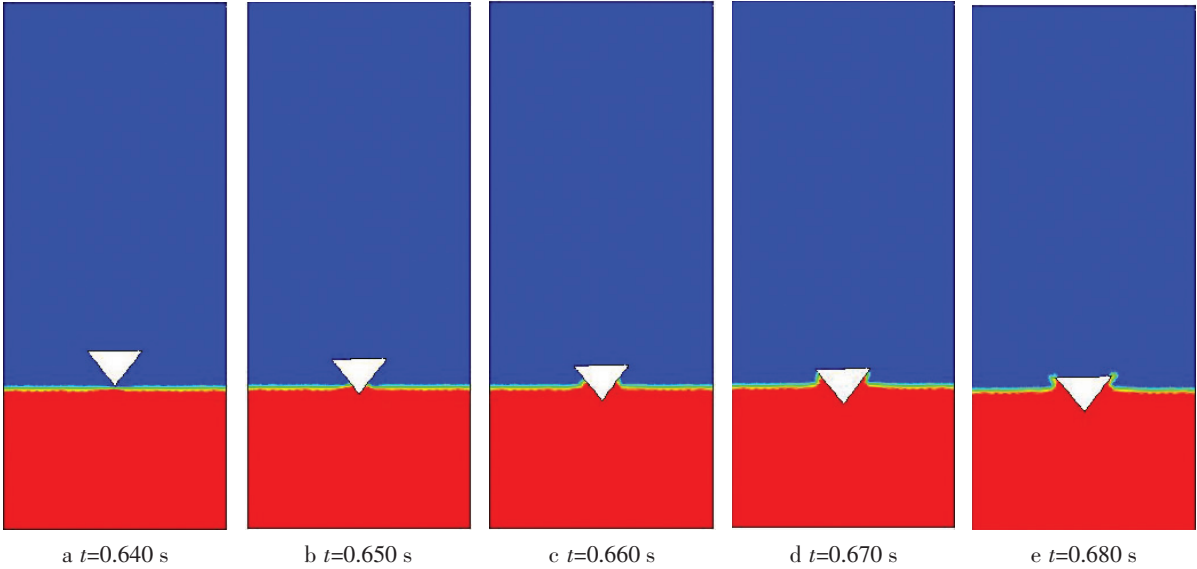


图 3  $t=0.640\sim0.680$  s 时间段内锥形浮子入水相图

Fig.3 Phase diagrams of conical buoy into the water at  $t=0.640\sim0.680$  s

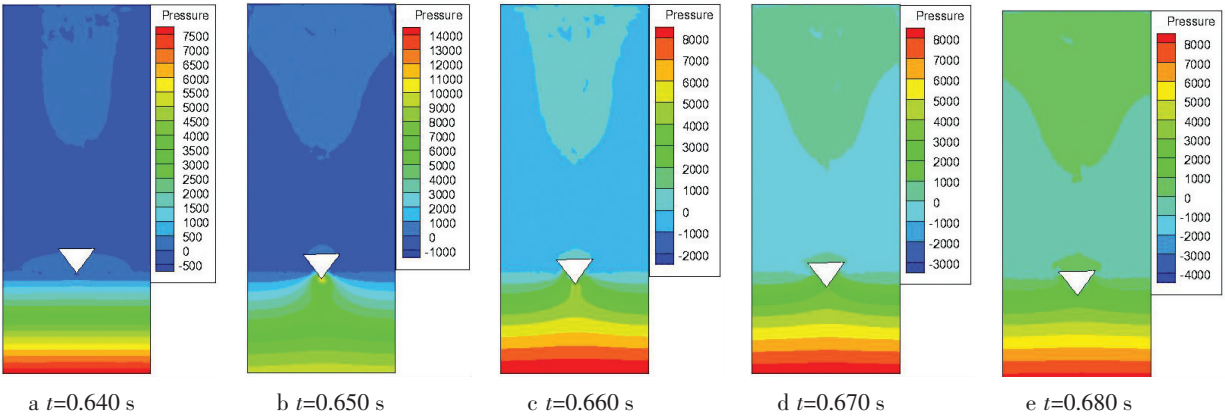


图 4  $t=0.640\sim0.680$  s 时间段内锥形浮子周围流场压力分布图(单位 Pa)

Fig.4 Pressure distributions of conical buoy around flow field at  $t=0.640\sim0.680$  s(Pa)

第二阶段是锥顶点与锥体表面的压力分布比较均匀缓和的阶段. 图 5 所示为  $t = 0.690 \sim 0.730$  s 时间段内锥形浮子的入水相图. 从图 5 可以看出, 随着时间的推移, 水液面逐渐越过锥平面, 随后向四周喷射, 形成水花.

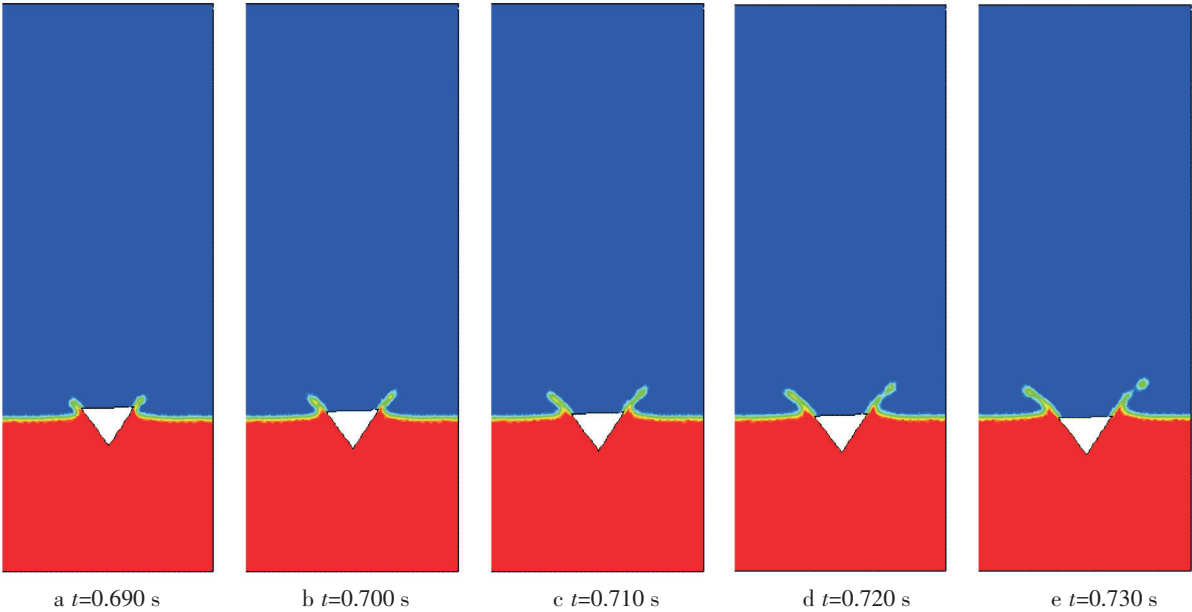


图 5  $t=0.690\sim0.730$  s 时间段内锥形浮子入水相图

Fig.5 Phase diagrams of conical buoy into the water at  $t=0.690\sim0.730$  s

图 6 所示为  $t = 0.690 \sim 0.730$  s 时间段内锥形浮子周围流场的压力分布云图. 从图 6 可以看出, 这一过程中锥顶点与锥体表面的压力差距有所缓和, 但锥顶点的压力仍然要大于锥体表面的压力, 锥顶点的最大压力约为 4 kPa 左右, 也就是说, 虽然锥顶点承受的压力与锥体表面承受的压力之间不再有明显的差距, 但是锥顶点依然是整个锥体压力分布的最高点.

2.2 锥体入水过程中不同时刻的表面压力分布

图 7 所示为锥体在入水过程中不同时刻表面压力分布曲线, 横坐标代表不同锥体半径, 锥顶点半径  $R=0$ . 从图 7 可以明显看出, 在入水过程的各个时刻, 压力的最大值均出现在  $R=0$  处, 即锥顶点处, 且随着锥体半径的增大而振荡减小; 随着入水深度的增加 (即时刻  $t$  的增大), 锥顶点承受的压力与锥体表面其他位置受到的压力之差趋于缓和. 一般情况下, 受到压力最大的区域就是破坏最先开始的地方, 故有必要研究锥顶点在入水过程中压力随时间的变化.



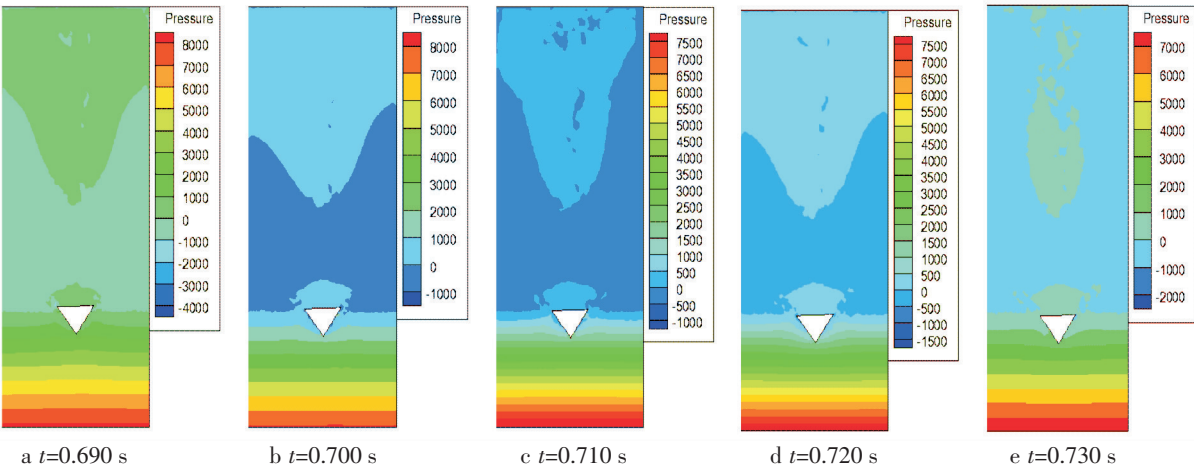


图 6  $t=0.690\text{ s}\sim 0.730\text{ s}$  时间段内锥形浮子周围流场压力分布云图(单位 Pa)

Fig.6 Pressure distributions of conical buoy around flow field at  $t=0.690\text{ s}\sim 0.730\text{ s}$ (Pa)

2.3 锥体入水过程中锥顶点压力随时间的变化

图 8 为锥体入水过程中锥顶点处压力随时间变化曲线。从图 8 可以看出在锥体入水瞬间锥顶点压力瞬间升高，达到 14 541 Pa，但是持续时间很短，又经过一段时间之后，出现峰值，峰值达到 23 530 Pa，振荡之后又一次升高到 24 862 Pa，但持续时间仅为几毫秒，然后开始振荡回落。由此可以看出入水冲击时间很短，瞬间完成，冲击压力的峰值也十分巨大。

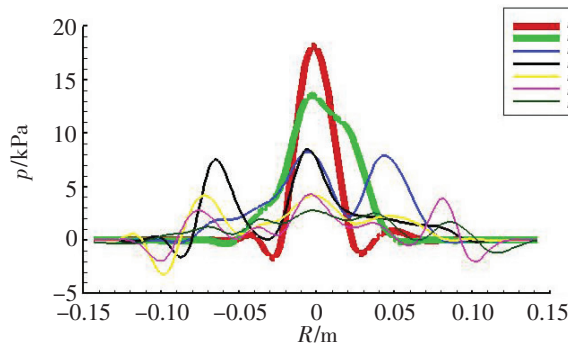


图 7 锥体入水过程中不同时刻表面压力分布图

Fig.7 Time dependence of surface pressure distribution of conical buoy into the water

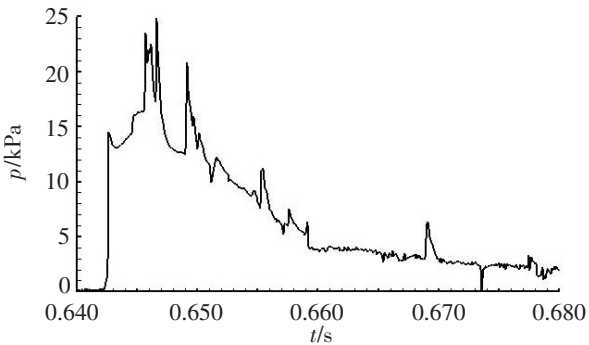


图 8 锥体入水过程中锥顶点压力随时间变化曲线图

Fig.8 Time dependence of pressure at conical point during the process of conical buoy into the water

2.4 锥体入水过程中锥体的速度变化曲线

锥形浮子自由落体垂直入水之后，受到冲击作用，速度一定会受到影响。图 9 所示为锥形浮子入水过程中  $t = 0.620 \sim 0.700\text{ s}$  时间段的速度变化曲线。由图 9 可以看出，锥形浮子在 0.620 s 到 0.645 s 之间做的是匀加速运动，即自由落体运动，在  $t = 0.642\text{ s}$  时刻入水，速度开始减小（负号代表方向，竖直向下）。入水之初速度变化很快，随着时间的推移，入水深度的增大，速度变化趋缓。这在某种程度上代表了冲击载荷的变化。

2.5 锥体入水过程中锥体冲击载荷（加速度）变化曲线

本文以锥体加速度代表其所受的冲击载荷。从图 9 可以看出，在入水冲击过程中，浮子的速度变化剧烈，故有必要研究入水过程中冲击载荷的变化规律。图 10 所示为锥体在 0.640 ~ 0.680 s 时间段内入水瞬间受到冲击载荷曲线图。从图 10 可以看出，锥体在入水瞬间（约  $t = 0.642\text{ s}$ ），加速度立即有明显的变化，出现阶跃式上升，随后保持一段时间的振荡之后又出现阶跃式上升；随后出现大幅振荡并出现峰值，但持续的时间很短，瞬间完成。这说明锥体所受的冲击载荷时间短、数值大，破坏力巨大。

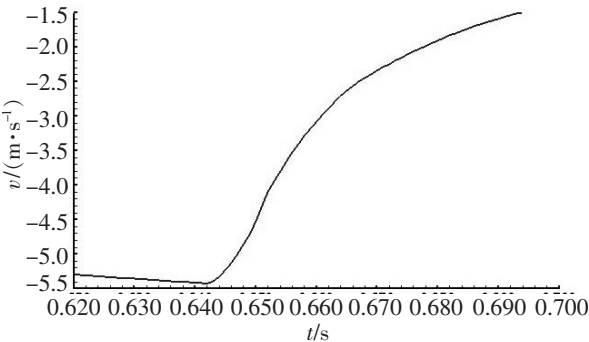


图 9 锥体入水过程中锥体沿重力方向的速度随时间变化曲线图

Fig.9 Time dependence of conical buoy speed along the direction of gravity during the process of conical buoy into the water

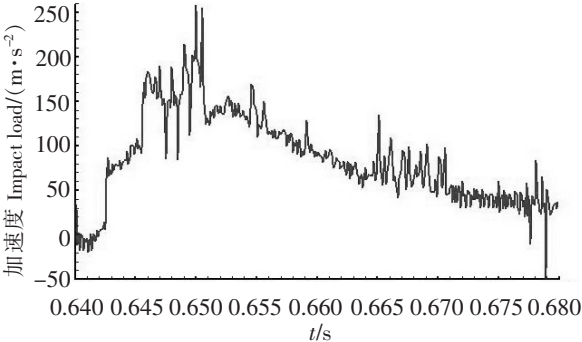


图 10 锥体入水过程中冲击载荷随时间变化曲线图

Fig.10 Impact load curve change over time in the process of conical buoy into the water

3 不同斜升角的锥形浮子入水过程中压力与冲击载荷分析

由于在入水过程中锥顶点始终承受最大压力,故锥顶点的压力变化是本文研究的重点.图 11 所示为斜升角为 30°的锥体在入水过程中冲击载荷与锥顶点压力随时间的变化曲线.从图 11 可以看出,在锥体入水瞬间(约  $t=0.677\text{ s}$ ),锥顶点压力瞬间升高,冲击载荷也同时升高.而后,锥顶点压力持续升高并出现峰值,达到 40 kPa,持续时间很短,转而下降,而冲击载荷在压力出现下降的时候,依然在升高,随后出现峰值,峰值达到  $600\text{ m/s}^2$ ,持续时间也很短,然后开始下降.从图 11 中还可以看出,压力峰值出现的时刻与冲击载荷峰值出现的时刻有一定的时间间隔,但间隔很短,约为  $0.003\text{ s}$ .

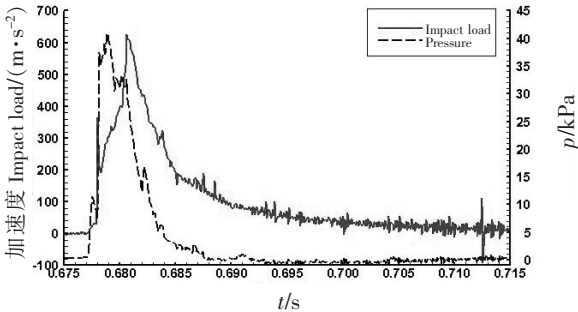


图 11 30°锥体入水过程中压力与冲击载荷变化曲线图

Fig.11 30° cone pressure and impact load change curve in the process of conical buoy into the water

图 12 所示为斜升角为 45°锥体在入水过程中冲击载荷与锥顶点压力随时间的变化曲线.从图 12 可以看出,锥体在入水瞬间(约  $t=0.643\text{ s}$ )压力与冲击载荷瞬间升高,然后两者同步升高,当压力出现峰值的时刻,冲击载荷依然在升高,随着时间的推移,压力开始下降,但冲击载荷却出现了峰值,而后压力和冲击载荷一起下降.压力峰值和冲击载荷峰值均是在震荡中出现,持续时间都很短.与图 11 类似,该图显示出压力峰值与冲击载荷峰值出现的时刻不在同一时刻,压力峰值先于冲击载荷峰值出现,两者的时间间隔约为  $0.005\text{ s}$ ,要比斜升角为 30°的锥体长.

图 13 所示为斜升角为 60°的锥体在入水过程中冲击载荷与锥顶点压力随时间的变化曲线.从图 13 可以看出,锥体在入水时刻(约  $t=0.635\text{ s}$ ),锥顶点压力开始上升,冲击载荷亦随之上升,但是压力上升的速度要比冲击载荷上升的速度快,然后,压力出现峰值,转而开始下降,而冲击载荷依然在上升,随后达到峰值.依然可以看出,压力峰值出现的时刻要早于冲击载荷峰值出现的时刻,时间间隔约为  $0.018\text{ s}$ ,时间间隔要比 45°的锥体长.

图 11~图 13 均显示,锥顶点压力峰值出现时刻要早于锥体所受冲击载荷峰值的出现时刻,在此做一简单分析:由于锥体刚入水与水面接触的只有锥体顶端的部分,接触面积很小而此时的速度又很大,故压力很快出现峰值;由于锥体和水面的剧烈撞击作用,冲击载荷随之急剧上升.随着入水深度的加大,接触面积增大,所受阻力增大,故冲击载荷出现峰值.随着斜升角的增大,两峰值之间时间间隔增大,这是因为当入水深度相同时,斜升角越大,锥体与水面的接触面积越小,因此要达到一定的接触面

积并达到一定的冲击阻力需要更深的入水深度,故压力峰值和冲击载荷峰值之间的时间间隔会增大。

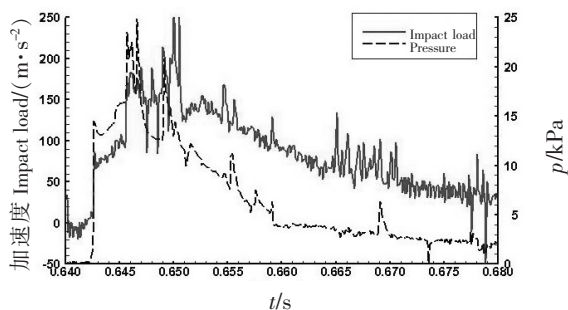


图 12 45°锥体入水过程中压力与冲击载荷变化曲线图

Fig.12 45° cone pressure and impact load change curve in the process of conical buoy into the water

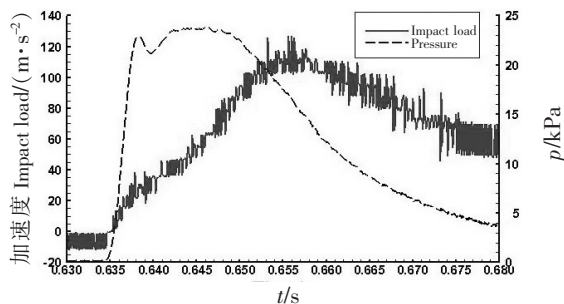


图 13 60°锥体入水过程中压力与冲击载荷变化曲线图

Fig.13 60° cone pressure and impact load change curve in the process of conical buoy into the water

## 4 结论

本文针对锥形浮子的自由落体入水过程进行了模拟仿真,分析了锥形浮子在入水过程中,压力和冲击载荷随时间的变化规律,得出以下结论:

- 1) 锥形浮子在入水瞬间会承受巨大的冲击载荷,该冲击载荷具有时间短、数值大的特点,将对浮子本身造成破坏。
- 2) 锥形浮子在入水过程中,锥顶点压力要大于锥体表面其他位置点受到的压力,即压力最大值出现在锥顶点处。同时锥顶点与锥体表面其他点的压力差距随着入水深度的增加而变小。
- 3) 锥形浮子入水过程中,锥顶点压力峰值的出现时刻要早于冲击载荷峰值的出现时刻。
- 4) 随着锥体斜升角的增大,锥顶点压力峰值出现时刻与冲击载荷峰值出现时刻之间的时间间隔逐渐增大。

## [ 参考文献 ]

- [1] 秦洪德,赵林岳,申静. 入水冲击问题综述. 哈尔滨工业大学学报, 2011, (1): 158-163.
- [2] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a liquid surface studied by the aid of instantaneous photography. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1900, 194(A): 175-200.
- [3] VON KARMAN T. The impact of seaplane floats during landing. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Technical Notes 321, 1929.
- [4] WAGNER V H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces. Z Angew Math Mech, 1932, 12(4): 193-215.
- [5] DE BACKER G. Experimental investigation of water impact on axisymmetric bodies. Applied Ocean Research, 2009, 31: 143-156.
- [6] MARCO ANGHILERI. Rigid body water impact-experimental tests and numerical simulations using the SPH method. Original Research Article International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(4): 141-151.
- [7] VAN NUFFEL D. A comparison between the experimental and theoretical impact pressures acting on a horizontal quasi-rigid cylinder during vertical water entry. Original Research Article. Ocean Engineering, 2014, 77: 42-54.
- [8] 魏照宇,石秀华. 回转体高速垂直入水冲击特性研究. 鱼雷技术, 2010, 5: 339-342.
- [9] 邱海强,袁绪龙,王亚东,等. 回转体高速垂直入水冲击载荷和空泡形态仿真. 鱼雷技术, 2013, 3: 161-164.
- [10] 魏卓慧,王树山,马峰. 刚性截锥形弹体入水冲击载荷. 兵工学报, 2010(1): 118-120.
- [11] 胡俊明. 基于 Fluent 的波浪辐射与绕射问题数值模拟研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)