

气泡弹性对同心筒水下发射影响研究

王亚东*, 袁绪龙, 张宇文, 刘维

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要:潜射导弹自同心筒装置发射过程中在筒口处会形成燃气泡,由于气泡在水下的弹性效应,水气耦合作用导致气泡周期性地膨胀压缩,会对导弹弹道参数、受载特性产生一定影响。以CFD为技术手段,建立了导弹水下发射动态仿真模型,通过数值模拟获得了发射过程中多相流场、导弹弹道参数及受力的时间历程曲线,分析了气体弹性效应对参数变化的影响;并针对发射深度及其发射艇速对气泡弹性效应的影响进行了仿真分析,给出了其影响规律。仿真方法和结果对工程研究有一定参考价值。

关键词:流体力学;水下发射;同心筒发射装置;气泡弹性

中图分类号:TJ768.2;O35 **文献标志码:**A **doi:**10.7511/jslx201302024

1 引言

同心筒发射装置 CCL (Concentric Canister Launcher) 具有结构简单、模块化及可调整等优点,其应用于导弹水下发射可有效增大导弹存储量、降低发射时对邻位导弹的干扰及易于实现饱和攻击。

同心筒发射装置概念最初由美国提出,在舰载武器发射时使用,在空气介质中使用的研究较为充分。其应用于水下发射时,水气两种介质交互作用引起了筒口气泡发展、压力场演变、导弹离筒的筒口效应及海水倒灌入筒等一系列复杂的力学问题,均会影响导弹的发射过程,这些现象的本质在于水下气泡的生成及发展。导弹发动机产生燃气经发射装置排导进入水中形成筒口气泡,由于气体弹性作用,筒口气泡周期性膨胀和压缩,引起了筒口压力场的脉动,而导弹发射过程必然穿越筒口区,压力场脉动引起了弹体受力变化,进而影响弹道参数。

张有为^[1]采用球形气泡模型分析了导弹水下点火瞬间的推力状况,证明了水惯性作用引起了发动机推力的脉动。李杰^[2]通过对导弹离筒后燃气后效的研究,以导弹尾部压力随时间的变化验证了筒口燃气泡在水下的周期性脉动特性,阐述了其对导弹受力的影响。在导弹水下发射研究领域,计算流体动力学(CFD)作为一种经济、高效的研究工具

被广泛使用。苗佩云^[3]通过求解三维 N-S 方程,完成了同心筒发射装置筒内流场的三维数值模拟,得出了导弹系留状态时筒内参数分布特性。侯金瑛^[4]仿真了同心筒发射潜载导弹的全过程,主要研究了多相流场分布、演化特征。张红军^[5]以单筒发射装置为计算对象,详尽地给出了导弹冷弹射出筒过程中的流场结构、尾空泡演化、弹体表面压力及弹道参数等内容。王汉平^[6]和王亚东^[7]研究了筒口的多相流场,前者侧重于筒盖受载,后者侧重于筒口气泡和水的交互。文献[4-8]给出了 CFD 仿真结果和试验结果的比对,证明了该方法研究的可靠性,且该法与试验相比具有更大的灵活性和经济性。涉及水气耦合的 CFD 方法亦被成功应用于水下爆炸领域^[9],捕捉介质之间交界面的变化。

本文采用 Mixture 多相流模型,采用商用 CFD 软件 FLUENT 来求解三维 N-S 方程及 RNG $k-\epsilon$ 湍流方程,仿真了潜射导弹自同心筒发射装置发射至离筒的三维非定常过程,获得了燃气泡生成及演化过程、导弹运动参数及受载特性,有针对性地分析了气泡弹性对运动参数及受力的影响。设置了不同发射深度及不同横流速度的工况以考查气泡弹性效应的影响因素,研究了其变化规律。

2 仿真模型建立

2.1 模型近似

为了简化仿真计算,不失真实性对模型做以下近似假设。

收稿日期:2012-02-22;修改稿收到日期:2012-08-13.

基金项目:王亚东*(1985-),男,博士生
(E-mail: roby868@163.com).

(1) 流场面对称,取一半计算以减小计算规模。

(2) 导弹助推器生成的燃气作为理想气体处理,其气体参数按照实际混合燃气参数折算。

(3) 由于发射过程时间较短,故不考虑水的受热汽化影响及发射筒的热损失。

(4) 设导弹发射过程中侧向受约束,只计算轴向运动参数。

2.2 网格划分

按照以上的假设,可得计算区域如图1所示。计算域选择取决于计算对象,本文计算标准工况为导弹自运动的潜艇平台经同心筒装置垂直发射,故外场设置为带梯度的压力出入口来构建外场横流并考虑重力加速度引起的压力变化;设置滑动边界来完成弹体位置的动态更新,导弹发动机喷口取为质量流量入口。

在以上计算域划分网格,边界条件的选择如图1所示,在网格划分时需注意以下几点。

(1) 计算中动网格更新选用层变(Layering)方法,沿弹身轴向包络导弹的区域定义为动区域,发射筒外筒和外场定义为静区域,动静区域设置滑动边界;控制网格接口处网格质量,避免过大的梯度影响流场。

(2) 设置网格梯度,外场网格向外渐变稀疏,靠近弹体运动的区域和筒口区域布置足够细密网格以提高流体动力求解精度及清晰地捕捉气泡轮廓。

(3) 控制发射筒内网格尺寸,特别是具有较小尺寸的弹筒间隙。

(4) 外场壁面类边界条件对空泡尺度特征影响较大,故远场边界条件选为压力入/出口,并根据重力和横流速度来设置数值及梯度,用UDF赋予边界条件。

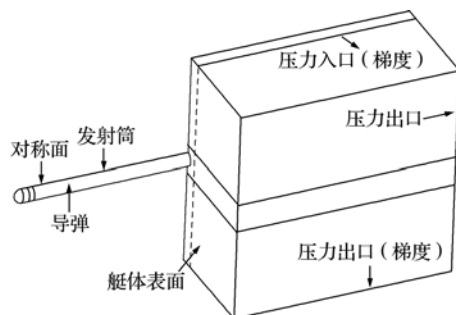


图1 计算区域

Fig. 1 Compute zone

按照以上准则划分网格,网格总数为99万,该网格模型在12核工作站计算机时为24小时,网格细化后计算结果差异较小但耗时增大非常显著,故本文研究以此网格开展,具备较好的可信性和计算经济性。

2.3 导弹运动控制

导弹在同心筒中采用助推器推进发射,在整个内弹道过程中所受外力包括导弹自身重力 G 、助推器推力 T 、弹体与发射筒之间摩擦力 f 及导弹受流体动力 F ,依据牛顿第二定律且考虑因助推器工作引起的弹体质量变化,有

$$m = m_0 - \int_{t_0}^t \Delta m dt, \quad a = (T + F - f - G) / m \quad (1, 2)$$

$$v = \int_{t_0}^t a dt, \quad s = \int_{t_0}^t v dt \quad (3, 4)$$

计算中忽略摩擦力 f ,流场和弹道解算过程为计算时间步开始时,通过遍历弹体表面所有单元积分其受力获取流体动力 F ,根据当前时间计算弹体质量 m ,根据式(2)求解导弹加速度 a ,采用欧拉积分法解算弹体运动参数 v 和 s ,同时将这些参数用于更新网格,而后计算流场,流场求解收敛后进入下一时间步。

2.4 计算设置

计算模型主要设置如下。

(1) 选用Mixture多相流模型,设置等效气体相为主相,水为副相,考虑气相压缩性,不考虑水的压缩性。

(2) 采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,压力速度场耦合方式选用SIMPLEC,有助于提高初始流场建立的数值稳定性。

(3) 模型中要加入重力影响,对于与重力方向平行的压力入口,需要按照空间位置考虑重力引起的压力梯度,初始化流场时赋予外场及发射筒内与实际相符的压力。

(4) 选择合理的时间步长,保证动网格更新的正常进行及导弹运动解的时间步长无关性。

按照以上设置进行导弹发射流场的三维非定常计算,仿真由助推器点火时刻开始,计算至导弹弹尾离筒距离超过1/2弹长停止,每个时间步输出导弹运动参数 a , v 和 s 及弹体轴向、侧向所受流体动力载荷 F_x , F_z 和 M_y ,并记录水气的流场分布信息供综合分析使用。

笔者所用水下发射多相流场的计算方法在进

行文献[7]研究时已给出了与试验结果的比对,证明了其有效性。本文不再专门给出模型的校验。

3 仿真结果与分析

3.1 气泡弹性对运动参数、弹体受载影响

取发射艇速为 F_1 , 导弹在水下 H_1 深度发射为标准工况, 考查同心筒水下发射时气体的弹性效应以及其对导弹运动、受载的影响。

图 2 为发射过程中的筒口气泡形态云图, 给出了发射筒口区域气泡生成、演化过程, 每幅图片间隔为 $1/35$ 无量纲时间, 时间起点为 $3/35$ 无量纲时间。筒口气泡发展驱动因素包括导弹助推器的燃气补充及筒口气泡弹性引起的周期膨胀和压缩, 二者综合作用, 导致整个气泡形态和内部压力的周期性变化。图 2 给出了两个周期的膨胀和压缩过程, 图 2 中上部分前三幅显示了气泡膨胀过程, 而后转至压缩, 到第五幅时压缩至极限, 此时为 $8/35$ 无量纲时刻, 对应图 3 (P/P_0 和 t/t_0 分别代表无量纲压力和时间) 中标注的第一个峰值。同样地, 下部分五幅图描述了另外一个膨胀和压缩周期, 终了为 $13/35$ 无量纲时刻, 对应图 3 标注的第二个峰值。这说明了气泡弹性是整个气相内部压力周期性脉动的原因, 而这种周期性脉动将带来弹体受力的变化。

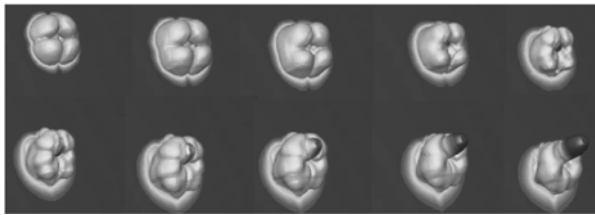


图 2 筒口气泡形态
Fig. 2 Profile of bubble in tube outlet

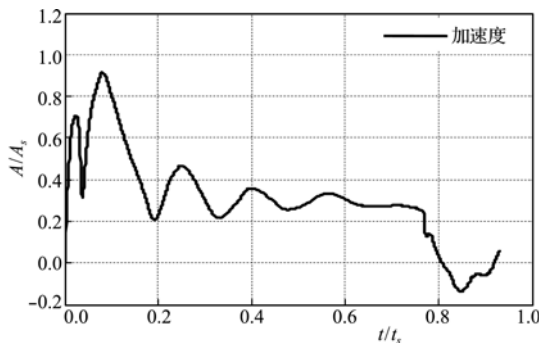


图 4 弹体加速度-时间历程
Fig. 4 Missile acceleration vs. time

图 4 给出了导弹无量纲加速度 A/A_0 的时间历程, 图 5 给出了无量纲化的侧向力 F_z 及流体动力力矩 M_y (参考点为导弹质心, 下同) 的时间历程。

发射过程中导弹助推器推力基本保持恒定, 故由式(2)可知, 导弹加速度数值变化取决于流体动力 F 。对于筒内运动, $F \approx (P_b - P_t)S$, P_b 和 P_t 分别为导弹底部和头部所受压力, S 为弹身横截面积, 而导弹头部位于水气边缘, 其压力和水静压相当, 故 F 主要由 P_b 决定, 弹尾在气泡内, P_b 必然受气泡弹性引起的压力脉动影响, 图 4 证实了此论断, 导弹加速度脉动的特征频率和筒内测点监测的压力脉动频率相当, 且振荡幅值同样呈衰减趋势。

艇速和气泡不对称附着引起了弹体侧向力和力矩的变化, 在 0.2 无量纲时刻之前, 弹头位于气泡内, 艇速和气泡压力脉动均不会引起弹体侧向受载, 但在艇速作用下, 气泡被吹偏引起了迎背流的不对称附着, 其内部压力脉动必然导致侧向受载, 如图 5 所示 (压力正峰值对应侧向力负峰值, 力矩较复杂, 与气泡附着位置相关), 且其变化频率和气泡脉动频率相当。图 5 中 0.8 时刻左右的脉动是导弹出筒的筒口效应所致, 超出此论文研究范畴, 不再赘述。

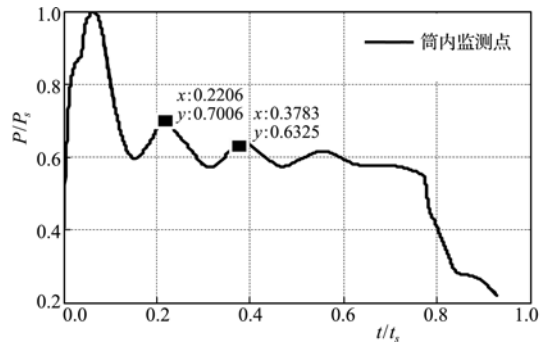


图 3 筒底监测点压力-时间历程
Fig. 3 Monitor of pressure vs. time at tube bottom

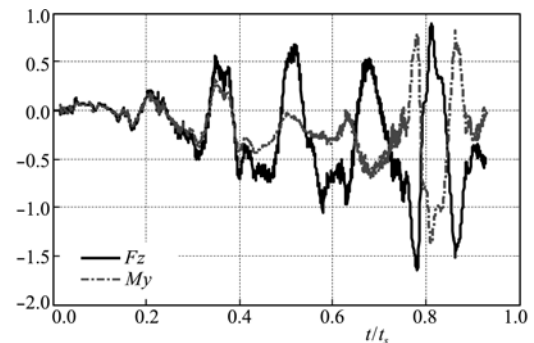


图 5 弹体受载-时间历程
Fig. 5 Load on missile vs. time

3.2 发射艇速影响

为验证 2.1 中弹体侧向受载是由艇速引起的结论,设置对比工况,保持其他计算条件不变,发射艇速置零,仿真得到弹体流体动力力矩-时间历程对比曲线如图 6 所示。

由仿真结果可知,存在发射艇速与否条件下弹体侧向受载差别明显,无艇速条件下的微弱脉动是由湍流导致的气泡附着微不对称引起,远小于有艇速时气泡被吹偏引起不对称效应如图 7 示,而泡内压力脉动更增强了受载变化。

有无艇速下发射筒内底部测点无量纲压力-时间历程如图 8 所示。

由图 8 曲线可知,在 0.35 无量纲时间之前,艇速对筒内压力几乎无影响,后期存在局部差异可能的原因是横流改变了筒口气泡形态导致其膨胀性质略有不同。

为考查发射艇速对气泡弹性效应及其引起的弹体侧向受载影响,分别针对艇速 F_1 和 F_2 ($F_2 < F_1$) 进行计算。

图 9 给出了不同艇速下泡内监测点测得压力随时间变化曲线。

同前述的有无艇速对比结果类似,不同艇速对气泡弹性所致脉动特性影响亦不大,存在差异也是

由于横流改变了筒口气泡形态导致其膨胀性质变化引起的。

从图 10 可以看出,艇速越大引起的弹体侧向受载数值也稍大;这是因为艇速越大,气泡不对称程度更大,导弹迎背流面受力更不均衡。图 10 中筒口效应区影响因素与此不同,不再赘述。

3.3 发射深度影响

根据文献[7]的研究,水下气泡随深度增加,脉动频率增加,但幅值减小,为验证在同心筒发射装置中是否有此规律,设置了 H_1 和 H_2 两种深度 ($H_1 < H_2$) 进行仿真计算,得到了泡内压力的时间历程曲线,因静水压力随水深是变化的,为了单独表达深度对气泡弹性影响,给出的曲线扣除了静水压力变化,如图 11 所示。可以看出,同心筒水下发射时的气泡脉动特性符合文献[7]所述规律:脉动频率增加但幅值较小。

图 12 为两种工况对应的弹体侧向受载随时间变化曲线。

发射深度改变了气泡脉动特性的同时亦改变了气泡的形态,故对侧向受载影响因素较为复杂。但由曲线可知,流体动力力矩数值变化频率仍符合气泡脉动频率且深度较大的工况脉动正负峰值差较小,受载特性主要还是由气泡脉动特性决定。

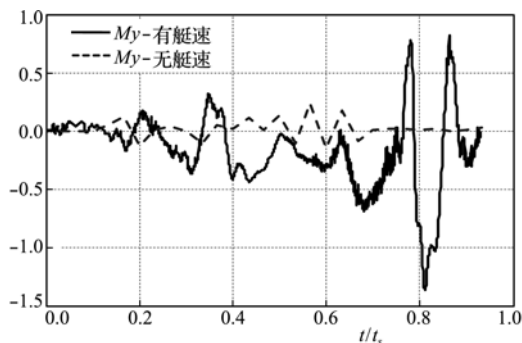


图 6 有无艇速下弹体力矩-时间历程
Fig. 6 Moment on missile vs. time

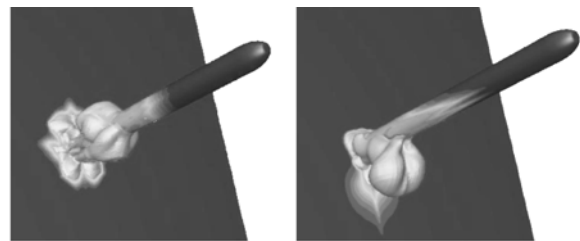


图 7 有无艇速下气泡附着位置
Fig. 7 Bubble attaching location

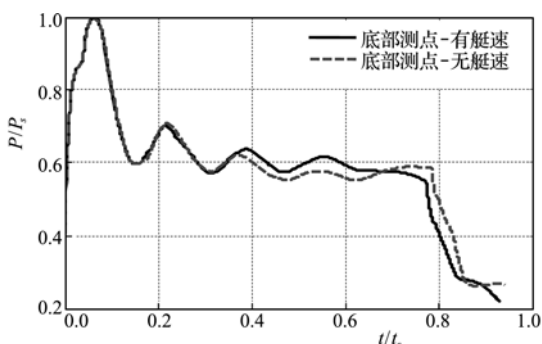


图 8 有无艇速下底部测点压力-时间历程
Fig. 8 Monitor of pressure vs. time at tube bottom

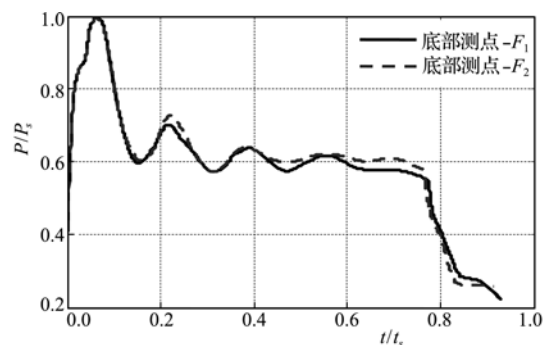


图 9 不同艇速下底部测点压力-时间历程
Fig. 9 Monitor of pressure vs. time at tube bottom in different velocity

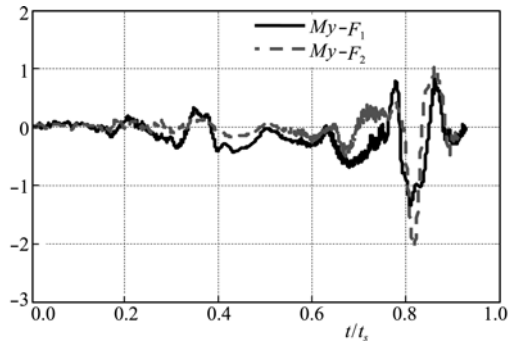


图 10 不同艇速下弹体力矩-时间历程

Fig. 10 Moment on missile vs. time in different velocity

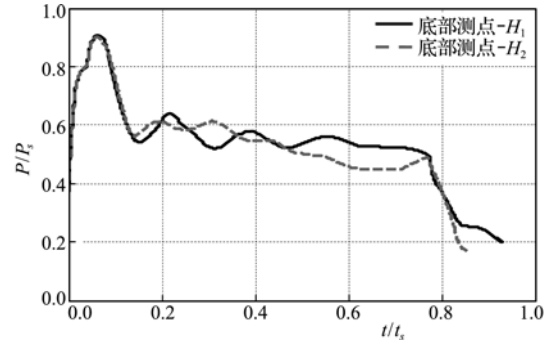


图 11 不同深度下底部测点压力-时间历程

Fig. 11 Monitor of pressure vs. time at tube bottom in different depth

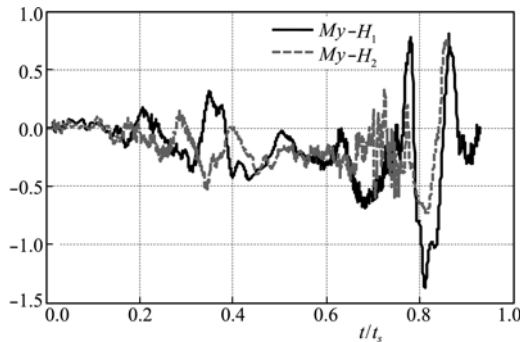


图 12 不同深度下弹体力矩-时间历程

Fig. 12 Moment on missile vs. time in different depth

4 结 论

本文建立了潜射导弹同心筒水下发射过程的三维非定常模型,得到了导弹发射过程中的水气两相流场分布、运动参数及侧向受载变化,通过综合分析,得出了气泡弹性效应对导弹同心筒水下发射的影响,并分析了发射艇速、发射深度对结果的影响规律,得到了以下结论。

(1) 同心筒发射装置在水下发射时筒口气泡存在气泡弹性效应,会发生周期性的膨胀和压缩,导致了泡内压力的周期性脉动。

(2) 气泡弹性效应引起的压力脉动是导弹加速度脉动的动因,艇速导致气泡在弹体上不对称附着是弹体侧向受载的主要原因,受载的脉动频率和气泡脉动频率相当。

(3) 发射艇速对气泡弹性效应影响程度很小,但其影响气泡附着的不对称程度,艇速越大,不对称度加大导致侧向受载幅值增大。

(4) 发射深度越大,气泡脉动频率增大,但幅值减小,并以同样趋势影响弹体侧向受载。

参考文献(References):

[1] 张有为,王晓宏,杨举贤.利用球形气泡模型研究导弹水下点火瞬间的推力状况[J].水动力学研究与进展,

2005, **20**(5): 636-640. (ZHANG You-wei, WANG Xiao-hong, YANG Ju-xian. Study on the working thrust for the missile launching under water using the spherical bubble model [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, **20**(5): 636-640. (in Chinese))

[2] 李杰,鲁传敬.潜射导弹尾部燃气后效建模及数值模拟[J].弹道学报,2009, **21**(4): 6-8. (LI Jie, LU Chuan-jing. The model of combustion gas bubble of submarine-launched missile and numerical simulation [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, **21**(4): 6-8. (in Chinese))

[3] 苗佩云,袁曾凤.筒内复杂流场三维数值模拟[J].弹箭与制导学报,2004, **24**(1): 71-72. (MIAO Pei-yun, YUAN Zeng-feng. Three-dimensional simulation for complicated flow of a canister [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2004, **24**(1): 71-72. (in Chinese))

[4] 侯金瓒,谭大成,毕世华,等.同心筒发射潜载导弹过程数值研究[J].固体火箭技术,2011, **34**(1): 9-13. (HOU Jin-zang, TAN Da-cheng, BI Shi-hua, et al. Numerical research on the process of launching submarine missile by concentric canister launcher [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, **34**(1): 9-13. (in Chinese))

[5] 张红军,陆宏志,裴胤,等.潜射导弹出筒过程的三维非定常数数值模拟[J].水动力学研究与进展,2010, **25**(3): 406-415. (ZHANG Hong-jun, LU Hong-zhi, PEI Yin, et al. Numerical investigation to vertical launching of submarine launching missile [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, **25**(3): 406-415. (in Chinese))

[6] 王汉平,余文辉,魏建峰.潜射模拟弹筒口压力场仿真[J].兵工学报,2009, **30**(8): 1009-1013. (WANG Han-ping, YU Wen-hui, WEI Jian-feng. Simulation of pressure field near canister outlet for underwater-launched emulated missile [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, **30**(8): 1009-1013. (in Chinese))

- [7] 王亚东,袁绪龙,覃东升. 导弹水下发射筒口气泡特性研究[J]. 兵工学报, 2011, **32**(8): 991-995. (WANG Ya-dong, YUAN Xu-long, QIN Dong-sheng. Research on the outlet cavity features during the launch of submarine launched missile [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(8): 991-995. (in Chinese))
- [8] 傅德彬,刘琦,陈建伟,等. 导弹发射过程数值模拟[J]. 弹道学报, 2004, **16**(3): 11-16. (FU De-bin, LIU Qi, CHENG Jian-wei, et al. Numerical simulation on missile launching process [J]. *Journal of Ballistics*, 2004, **16**(3): 11-16. (in Chinese))
- [9] 师华强,汪玉,宗智,等. 近水面水下爆炸二维 Level-set 数值模拟[J]. 计算力学学报, 2010, **27**(3): 409-414. (SHI Hua-qiang, WANG Yu, ZONG Zhi, et al. 2D Numerical simulation of underwater explosion near free surface based on level-set method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, **27**(3): 409-414. (in Chinese))

On the effect of bubble elasticity to sub-launch process using concentric canister launcher

WANG Ya-dong*, YUAN Xu-long, ZHANG Yu-wen, LIU Wei
(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A bubble will come into existence at the tube outlet during the launch process of sub-launched missile being launched from a concentric canister launcher. Due to the elastic effect, the bubble underwater will expand and be compressed periodically, and it will affect the motion parameters and loads acting on the missile. In aid of the CFD technique, a dynamic simulation model of the launch process of the sub-launch missile was set up, through which the multiphase flow field, the motion parameters and loads with time were obtained, furthermore, the effects of bubble elastic feature to the parameters were analyzed. The influences of launch depth and submarine velocity to the bubble elastic features were also investigated, followed by the effect law. The simulation method and results have a certain reference value for engineering studies.

Key words: hydromechanics; underwater launch; Concentric Canister Launcher (CCL); bubble elasticity

(上接第 307 页)

Dynamic analysis and comfort evaluation of the three-dimension Body-vehicle-road coupled system

ZHANG Bing-qiang^{*1,2}, LI Liang¹

(1. Civil Engineering College, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Civil Engineering College, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The vehicle body is supposed as 3d elastic beam and the wheels as the rigid body. The human body is simplified as the parallel dynamic model. The road is supposed as the deck on the Kelvin base. And then by the dynamic model of tire stress, the vehicle and the road are coupled. The dynamic model of the body-vehicle-road is presented, and its functions are derived. The road function is divided with the Galekin method, and the system functions are solved with the New-mark method. The vehicle riding comfort of the vehicle is appraised with the RMS of the body vibrating acceleration. The effects of the system parameters on the vehicle riding comfort are also analyzed. The results indicate that the error can be achieved the highest about 30% between the model of this paper and the traditional, the body-vehicle interaction and the vehicle-road interaction cannot be ignored when analyzing the vehicle vibration and the vehicle riding comfort. The system parameters put much influence on the vehicle riding comfort.

Key words: body-vehicle-road coupled system; beam element; elastic deck; simulation analysis; comfort evaluation