

超空泡射弹尾拍运动流固耦合动力学响应研究

何乾坤^{1†} 王聪² 魏英杰²

(1. 中国航天科工集团第九总体设计部, 武汉 430040) (2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要 基于 ANSYS 软件和 CFX 软件的双向隐式交错迭代法对超空泡射弹尾拍运动过程中的流固耦合响应进行了研究, 结构响应仿真采用有限元法、流场仿真采用分相流模型和 SST 湍流模型, 重点比较分析了流固耦合作用对射弹运动姿态和流体动力的影响, 给出了尾拍过程中弹体应力的变化规律。

关键词 超空泡射弹, 尾拍, 流固耦合, 响应

DOI: 10.6052/1672-6553-2014-051

引言

航行体在水下高速运动时, 航行体表面附近的水因低压而发生相变, 形成覆盖航行体大部分的空泡或全部表面的超空泡^[1]. 形成超空泡之后, 水下航行体的摩擦阻力大幅减小, 从而使射弹等水下航行体的航速迅速提升^[2]. 当超空泡射弹在水中以高速运动时, 任何小的扰动, 如射弹在发射及穿越气-水界面时的扰动, 都会使射弹在沿轴向运动的同时绕其头部摆动, 此时射弹的尾部会与空泡壁面发生碰撞反弹现象, 即尾拍现象^[3].

近年来, 超空泡航行体的尾拍现象引起了国内外学者的广泛关注, 并开展了一系列的数值研究工作. 由于超空泡射弹发生尾拍现象时会产生大量的水雾, 使得空泡内部极其混乱, 难以准确地观测到射弹在空泡内部的真实行为^[4]. 并且, 由于超空泡射弹尺度较小、运动速度高的特点, 以目前的实验手段难以较为准确的获得射弹发生尾拍时的受力、变形等信息. 因此, 结合现有实验观察所获得的信息, 国内外学者在研究尾拍问题时采用了诸多假设和简化. 其中, Rand 等人^[5,6]假设射弹头部近似沿直线 L 运动、空泡轴线与 L 重合, 不计射弹在尾拍过程中的动量损失, 建立了射弹在垂直平面内尾拍飞行时的简化模型, 得到了射弹尾拍碰撞周期与飞行速度关系的微分方程, 分析了超空泡射弹尾拍周期与初始角速度及运动速度之间的关系. Kulkar-

ni^[7]研究了超空泡射弹的尾拍刚体动力学特性, 基于 Milwitzky^[8]的水上飞机撞水受力方式分析了射弹尾拍时尾部受力并建立了超空泡射弹尾拍刚体动力学方程, 在此基础上对射弹姿态变化和水弹道进行了分析.

本文结合前人的研究成果, 基于 ANSYS 软件和 CFX 软件的双向隐式交错迭代法计算了射弹尾拍运动过程中的流固耦合响应, 分析了流固耦合作用对射弹运动姿态和流体动力的影响, 给出了尾拍过程中弹体应力的变化规律, 为尾拍现象的研究提供了一定的参考.

1 数值仿真模型

基于 ANSYS 和 CFX 的双向隐式交错迭代法分为流体和结构两个主要求解模块: 流体求解模块为基于有限体积法的 CFX 求解器, 结构求解模块为基于有限元法的 ANSYS 求解器. CFX 和 ANSYS 求解器在每一个规定的耦合求解时间步长内均有若干次交错迭代过程, 迭代过程中流体和结构在流固交界面处数据实时传输, 结构外载荷由流场计算提供而流场边界位移由结构计算提供. 每一个耦合求解时间步的交错迭代步数由流固耦合交界面上传递数据的收敛程度决定, 各求解器的收敛性将在数据传递之后进行检查, 若系统没有达到指定的收敛要求, 交错迭代过程将一直持续直至系统在该时间步内收敛, 具体求解过程如图 1 所示.

基于 ANSYS 与 CFX 的流固耦合计算需要分别对流体和结构进行网格划分,如图 2 所示,结构尺寸及材料属性定义见表 1,边界条件定义如图 3 所示.

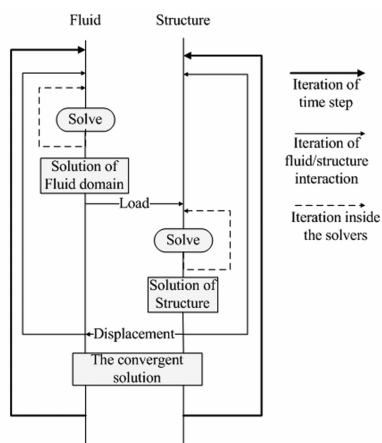


图 1 流固耦合交错迭代法求解过程

Fig. 1 Scheme of the fluid - structure coupling staggered solution procedure

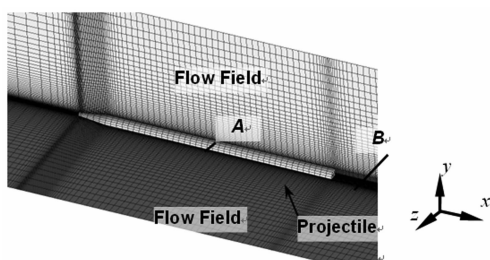


图 2 网格划分

Fig. 2 Computational meshes

表 1 射弹尺寸及属性

Table 1 The properties and dimensions of projectile

Length L/m	Diameter d/m	Diameter of nose D_n/m	Density $\rho_s/kg \cdot m^{-3}$	Moment of Inertia $I_z/kg \cdot m^2$
0.18	0.01	0.004	7800	2.9773×10^{-4}

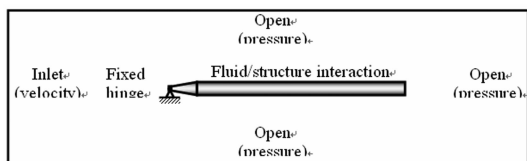


图 3 流固耦合计算边界条件定义

Fig. 3 Sketch map of boundary conditions

流固耦合计算不但可以得出射弹在尾拍过程中的姿态变化,还可以得出射弹在尾拍过程中应力及变形等信息.

由于超空泡射弹为弹性体,因此无法直接给出射弹的刚体姿态变化,本文通过射弹尾部中心点的位移间接给出射弹姿态变化.如图 4 所示,图中黑色线条表示变形后的超空泡射弹,虚线为射弹头部绞支点与尾部中心点连接而成的直线,点划线为 x 轴,则射弹姿态角 θ 定义为虚线与点划线的夹角.超空泡射弹变形后,尾部中心点在 x 方向位移为 Δx , y 方向位移为 Δy ,因此 θ 可以表达为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{L - \Delta x}\right) \quad (1)$$

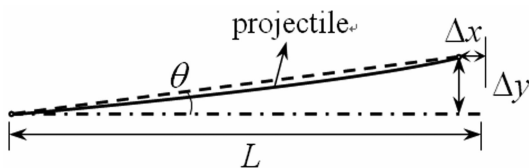
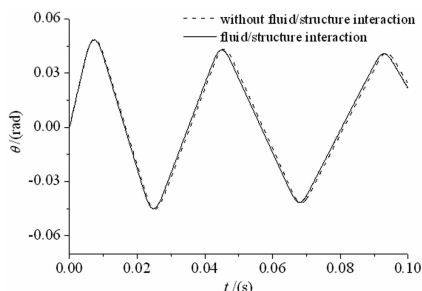
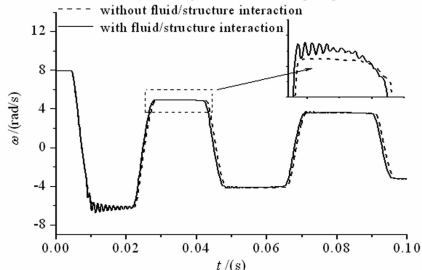


图 4 超空泡射弹姿态角计算示意图

Fig. 4 Sketch map of attitude angle



(a) Comparison of rotating angle



(b) Comparison of angular velocity

图 5 超空泡射弹转角及角速度变化比较

Fig. 5 Comparison of rotating angle and angular velocity

超空泡射弹转角及角速度变化如图 5 所示,由图中可以看出,流固耦合效应对射弹转角幅值几乎没有影响,对射弹转动周期略有影响,但影响并不明显.由于超空泡射弹在尾拍过程中受尾拍冲击力作用产生了振动,因此射弹转动角速度受结构振动影响,在做低频周期性变化的同时也伴随着高频振动.将射弹转动角速度做傅里叶变换,可以得到角

2 数值仿真结果分析

假设超空泡射弹以速度 $V = 100m/s$ 在水中匀速运动,射弹具有初始扰动角速度 $= 8rad/s$. 通过

速度频响图,如图6所示.进一步观察角速度频响图可以发现,射弹角速度具有两阶主要振动频率:一阶频率大小为22.5Hz,为射弹刚体转动频率;二阶频率大小为889.64Hz,为射弹结构的一阶固有频率,因此射弹结构振动对刚体运动的影响主要体现在结构一阶固有频率的振动上.

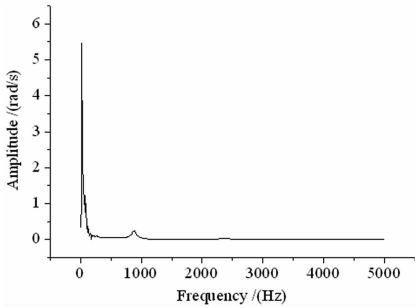


图6 考虑流固耦合作用下的角速度频响图
Fig.6 Frequency Response of angular velocity

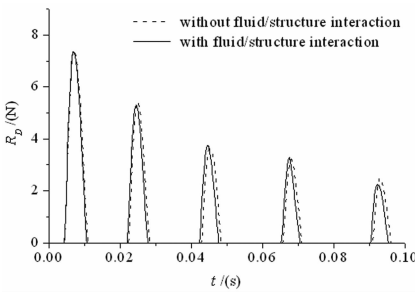


图7 超空泡射弹尾部阻力变化对比
Fig.7 Comparison of drag force at tail

当考虑流固耦合效应时,超空泡射弹的结构振动也会对流场产生影响,从而进一步影响到射弹尾部受到的流体动力,图7和图8分别给出了流固耦合效应对超空泡射弹尾部所受升力以及阻力的影响.由图中可以看出,超空泡射弹尾部所受的升力和阻力整体呈周期性变化,并且随着尾拍次数的增大,升力和阻力的幅值不断减小;未考虑流固耦合效应时,射弹尾部升力和阻力在单次尾拍过程中先单调增大后单调减小,只具有一个极值点;考虑流固耦合效应时,射弹尾部受力在单次尾拍过程中伴随着高频振荡,具有多个极值点,如图8(b)所示;总的来说,流固耦合效应对射弹尾拍时所受的升力以及阻力的幅值影响不大.由图8(b)可以推论,考虑流固耦合效应时,超空泡射弹的结构振动对流场也产生了一定的影响,图9进一步给出了T时刻($t = 0.0064s$)流固耦合效应对射弹尾部表面压力系数的影响.由图中可以看出,流固耦合效应略微

改变了压力系数高峰区的分布范围和极值大小,但对压力系数总体分布形式改变不大.

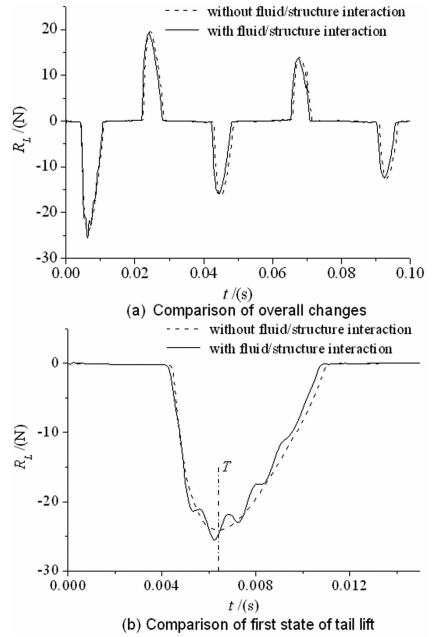


图8 超空泡射弹尾部升力变化对比
Fig.8 Comparison of lift force at tail

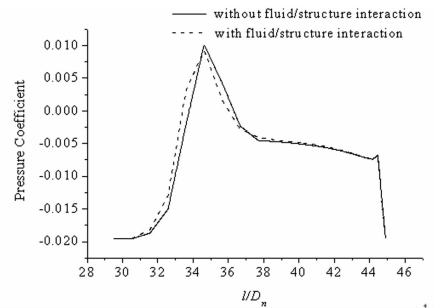


图9 超空泡射弹尾部表面压力系数变化对比($t = 0.0064s$)
Fig.9 Comparison of pressure coefficient at tail ($t = 0.0064s$)

超空泡射弹等效应力变化如图10所示,图中左侧为射弹尾拍状态下应力分布,右侧为尾拍结束后,弹回空泡内部时应力分布.由图中可以看出,射弹在尾拍状态下,应力较大值主要集中在弹体中部,射弹尾部非撞击面的应力较小,撞击面应力较大;当尾拍结束后,射弹弹回空泡内部,弹体中部应力值迅速减小.为了进一步描述弹体内部应力变化,分别在弹体中部和弹体尾部标记A、B两点(见图2),给出两点等效应力变化如图11所示.由图中可以看出,当超空泡射弹发生尾拍时,射弹中部应力迅速增大并在最大值附近不断振动,而尾部应力值维持在最小值附近;当射弹尾拍结束后弹回空泡内部时,射弹中部应力迅速减小并在最小值附近振动,但尾部应力值迅速增大至最大值附近振动;

射弹尾部应力和中部应力整体变化趋势相同,但尾部应力曲线在相位上约落后于中部应力曲线半个周期.

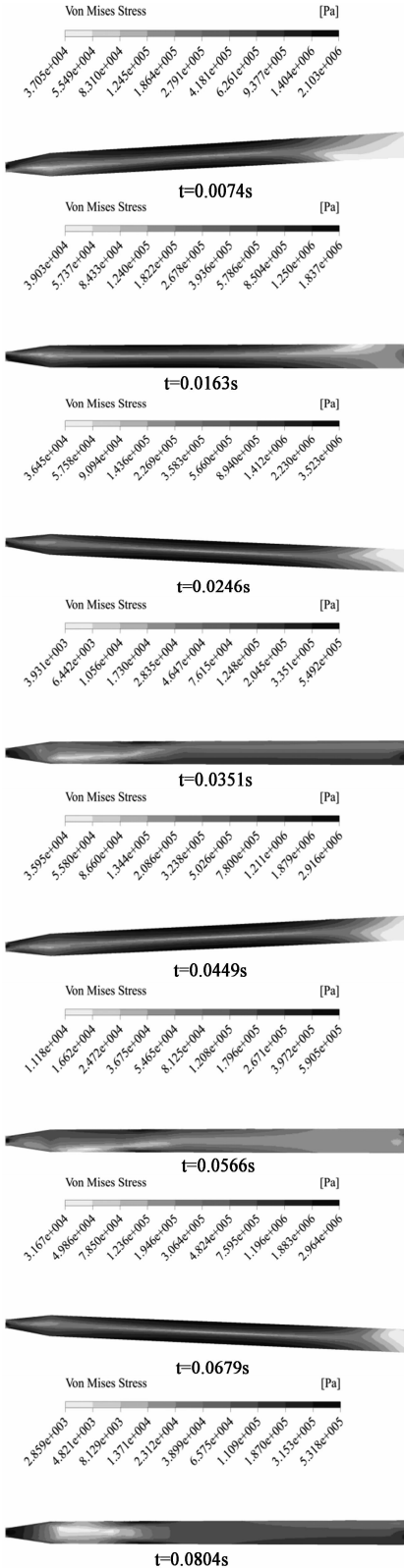


图10 超空泡射弹 Von Mises 应力变化云图
Fig. 10 Time evolution of Von Mises stress

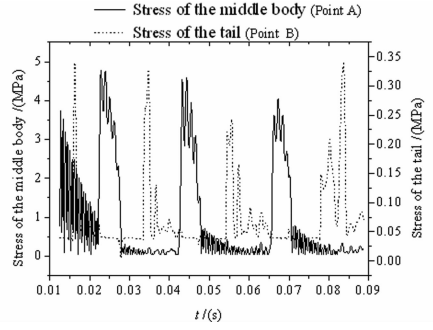


图11 射弹不同位置 Von Mises 应力时程图
Fig. 11 Time evolution of Von Mises stress at different part of projectile

3 小结

通过对超空泡射弹流固耦合运动进行数值模拟,得到以下结论:

(1) 考虑流固耦合作用时,超空泡射弹的转动角速度在做低频周期性变化的同时也伴随着高频振荡.将射弹转动角速度做傅里叶变换,进一步观察角速度频响图可以发现,射弹结构振动对刚体运动的影响主要体现在一阶固有频率的振动.

(2) 未考虑流固耦合作用时,超空泡射弹尾部受力在尾拍过程中光滑变化,在单次尾拍中尾部升力呈先单调增大后单调减小变化,只具有一个极值点;考虑流固耦合作用时,弹体尾部受力不再光滑,在单次尾拍中伴随着高频振荡.

(3) 当超空泡射弹发生尾拍时,弹体中部应力迅速增大并在最大值附近不断振动,而尾部应力值维持在最小值附近;当射弹尾拍结束后弹回空泡内部时,射弹中部应力迅速减小并在最小值附近振动,但尾部应力值迅速增大至最大值附近振动;弹体尾部应力和中部应力整体变化趋势相同,但尾部应力曲线在相位上约落后于中部应力半个周期.

参 考 文 献

- 1 吕志民,申超,陈永奎. 超空泡射弹技术探讨. 舰船科学技术,2007,29(1):92~94 (Lu Z M, Shen C, Chen Y K. The research of supercavitation projectile. *Ship Science and Technology*, 2007, 29(1):92~94(in Chinese))
- 2 Savchenko Y N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies. VKI Special Course on Supercavitating Flows. Brussels: RTO2AVT and VKI, 2001: 313~341
- 3 孟庆昌,张志宏,顾建农等. 超空泡射弹尾拍分析与计

- 算,爆炸与冲击,2009,29(1):56~60(Meng Q C, Zhang Z H, Gu J N. Analysis and calculation for tail slaps of supercavitating projectiles. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1):56~60(in Chinese))
- 4 Cameron P J K, Rogers P H, Doane J W, et al. An experiment for the study of free flying supercavitating projectiles. *Journal of Fluids Engineering*, 2011, 133(021303):1~9
- 5 Pratap R, Rand R. In-flight dynamics of high-speed underwater projectiles. Cornell University. AHSUM Project Progress Report, 1996
- 6 Rand R, Pratap R, Ramani D, et al. Impact dynamics of a supercavitating underwater projectile. In: ASME Design Engineering Technical Conferences. California, 1997 VIB-3929:1~11
- 7 Kulkarni S S, Pratap R. Studies on the dynamics of a supercavitating projectile. *Applied Mathematical Modelling*, 2000 (24):113~129
- 8 Milwitzky B. Generalized theory for seaplane impact. *NACA Report 1103*, 1952:1~77

SIMULATION OF TAIL-SLAP PHENOMENON OF SUPERCAVITATING PROJECTILES WITH FLUID/STRUCTURE INTERACTION

He Qiankun^{1†} Wang Cong² Wei Yingjie²

(1. Ninth general design department, China Aerospace Science & Industry Corporation, Wuhan 430040, China)

(2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Based on the staggered solution procedure of ANSYS and CFX software, the fluid structure coupling response of projectile during tail-slapping has been researched. Structural response was simulated by using FEM and flow field was simulated by using inhomogeneous model and SST turbulence model. Finally, the influences of fluid structure coupling effect have been analyzed and the change law of body stress has been given.

Key words supercavitating projectiles, tail-slap, fluid/structure interaction, response