

# 燃气喷射推进航行体出管内弹道 CFD 数值模拟研究

吴小翠<sup>1</sup>, 谷海涛<sup>2</sup>, 王一伟<sup>1</sup>, 黄晨光<sup>1</sup>, 胡志强<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室 北京 100190 Email:wuxiaocui@imech.ac.cn)

<sup>2</sup> (中国科学院沈阳自动化研究所 海洋信息技术装备中心 沈阳 110016)

**摘要:** 燃气推进航行体出管是一个高温高速燃气与水掺混的复杂二相流动与刚体运动的耦合问题。本研究基于 CFD 方法计算流场得到航行体表面受力, 并与发动机推力叠加共同求解得到航行体运动形式, 形成针对燃气推进出管内弹道的 CFD/刚体动力学耦合数值模拟方法, 获得了燃气喷射过程流场演化特征, 对比了典型设计参数的影响规律。

**关键词:** 多相流数值模拟、刚体动力学、内弹道。

## 1 引言

燃气推进航行体出管是一个高温高速燃气与水掺混的复杂二相流动与刚体运动的耦合问题。燃气的喷射、膨胀、脉动等过程能够显著影响航行体受力, 同时航行体的运动改变了燃气流动的边界, 也会影响燃气的演化特征。考虑耦合效应的内弹道精确求解对于航行体设计具有重要的意义。

由于高速气液两相流动求解的复杂性, 相关问题一般广泛采用简化建模的方式求解。肖虎斌<sup>[1]</sup>针对燃气-蒸汽式发射装置发射过程各阶段的受力特征, 建立了潜射导弹发射内弹道模型。兰晓龙<sup>[2]</sup>建立了水下枪械内弹道方程组, 对膛内流动等现象进行了分析。陈庆贵等<sup>[3]</sup>对燃气-蒸汽为发射动力的发射内弹道计算模型进行了改进, 并以某型潜射导弹为例对计算模型进行了仿真计算。袁绪龙等<sup>[4]</sup>构建一种快速的同心筒水下发射内弹道算法, 建立了同心筒水下发射内弹道计算模型, 用 CFD 结果辨识并校验模型经验参数。李杰等<sup>[5]</sup>利用 Rayleigh-Plesset 方程, 建立了等压球状尾泡模型, 通过尾泡方程与导弹运动方程的联合求解, 讨论了燃气泡对垂直发射潜射导弹弹道轨迹的影响。

近年来, 随着计算流体力学方法的发展, 越来越多的工作利用该手段求解水下发射筒内气体流动问题。胡晓磊等<sup>[6]</sup>基于计算流体力学方法和均质多相流理论, 对燃气-蒸汽弹

射气-液两相流场进行三维非定常数值研究,研究了弹射过程中流场结构、二次流现象和变深度弹射载荷和内弹道变化规律。曹嘉怡等<sup>[7]</sup>采用基于多相流 Mixture 模型的有限体积法求解 RANS 方程,对导弹水下发射出筒过程的轴对称流场进行了数值模拟,获得了多相流场的演化特性。王亚东等<sup>[8]</sup>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。到目前为止,针对类似问题的 CFD 和刚体动力学的耦合求解仍具有较大的挑战,相关应用需要得到进一步拓展。

本研究基于 CFD 数值模拟方法结合刚体运动计算程序,对航行体发射过程的流场和内弹道进行模拟,获得航行体壁面压力载荷分布以及运动学参数变化规律。

## 2 数值模拟方法

本研究基于计算流体力学理论,求解关于多相混合流动的 Navier-Stokes 方程,引入关于水、气两相的输运方程,结合湍流模型使方程封闭。同时为了模拟管内狭小空间内的航行体-发射管的相对运动,采用滑移网格界面插值方法保证交界面处通量连续。流场计算的同时积分航行体表面受力,与发动机推力叠加共同作为刚体运动方程的外加载荷求解得到航行体运动形式,返回到流体求解部分作为边界条件。

### 2.1 主控方程

为了模拟流场中的液态水和空气等多种组分及其相变,考虑单一流体多种组分混合物介质,建立基本方程。

首先,混合物流动应满足连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (1)$$

其中,  $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$  为混合物密度,  $\bar{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_m}$  为平均速度,  $\alpha_k$  为第  $k$  种组分体

积分数。

而且,混合物流动还应满足动量方程与能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

其中,  $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$  为混合物黏性系数,  $\bar{F}$  为体力项,本研究算例中此项取为零。

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

其中  $k_{\text{eff}}$  为有效热传导系数, 可表示为  $\sum \alpha_k (k_k + k_t)$ ,  $k_k$  为  $k$  相的热传导系数,  $k_t$  为

湍流热传导系数, 可表示为  $\frac{C_p \mu_t}{Pr_t}$ ,  $Pr_t$  为湍流普朗特数, 设为 0.85。

方程右边第一项代表传导引起的能量输运, 而  $S_E$  为能量源项; 对于可压缩相 (如空气

等)  $E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2}$ , 对于不可压缩相 (如液态水),  $E_k = h_k$ ,  $h_k$  为显焓, 可表示为

$$h_k = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,k} dT, \text{ 计算中 } T_{\text{ref}} \text{ 为 } 298.15\text{K}.$$

燃气喷射出管问题中, 将燃气发生器喷射气体近似为不可凝结的空气, 空气的质量分数  $f_a$  由以下方程描述。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f_a) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m f_a) = 0 \quad (4)$$

空气密度  $\rho_a = \frac{p_{\text{op}} + p}{\frac{R}{M_w} T}$ , 其中  $p_{\text{op}}$  为参考压力,  $R$  为气体常数  $M_w$  为摩尔质量, 温度  $T$

由能量方程求解中获得。

此外, 本项工作中均采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型来建立并求解关于湍动能及耗散率的输运方程。

## 2.2 流场求解方法

基于以上基本方程, 使用基于压力方法求解。压力速度耦合方式采用 PISO (pressure implicit with splitting of operators), 即压力的隐式算子分割算法。方程离散时, 时间采用一阶隐式格式, 压力插值采用体力加权形式 (body-force-weighted scheme), 动量和能量均采用二阶迎风格式离散。

主体计算网格采用多块混合网格形式, 外形包含整个航行体几何及管内外流域。整体网格如图 1 所示。管内航行体附近采用了非结构四面体网格配合棱柱型网格刻画边界层; 管外构型为圆柱区域, 在运动方向上采用了层状网格, 剖面情况如图 2 所示。航行体与燃气发生器表面网格均采用三角形网格并在边界层中生成棱柱型网格。

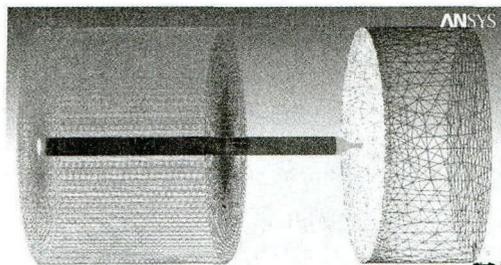


图1 全流场网格

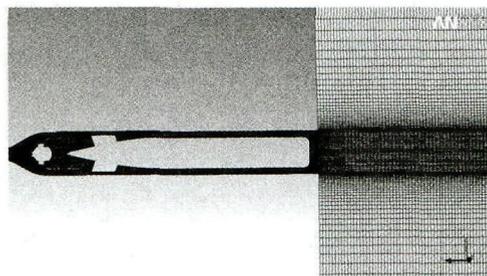


图2 流场中剖面网格

### 2.3 刚体运动计算方法

刚体运动基于求解以下单自由度运动方程，其中为了保证解的收敛性，流体动力采用了3点平滑算法。

$$ma^n = \frac{F_{\text{fluid}}^n + F_{\text{fluid}}^{n-1} + F_{\text{fluid}}^{n-2}}{3} + F_{\text{engine}} \quad (5)$$

其中  $m$  为航行体质量， $a$  为加速度， $F_{\text{fluid}}$  为流体动力积分受力， $F_{\text{engine}}$  为燃气发生器动量形成推力，上标表示时间步。

利用加速度可进一步显式时间积分推进得到速度变化，应用于流体计算边界更新。

$$v^n = v^{n-1} + a^{n-1} \Delta t \quad (6)$$

其中  $v$  为航行体轴向速度， $\Delta t$  为计算时间步长。

## 3 结果与讨论

数值模拟得到了启动过程燃气喷流的演化特征如图3。初期燃气喷射到水中受到水的阻挡，形成一个小燃气泡并逐渐膨胀（如图3-左上）；随着燃气的进一步喷射，燃气的速度效应开始体现出来，引起附近水流也产生同向速度，使得燃气泡形成一个梨形（如图3右上）；燃气受到底部管壁的阻挡，逐渐积聚并推动发射管中水向后排出，燃气泡逐渐变为箭头形状（如图3左下）；燃气继续推动水向后排出，同时航行体速度进一步增大，水流完全排出后稳定的燃气排出流动逐渐形成（如图3右下）。

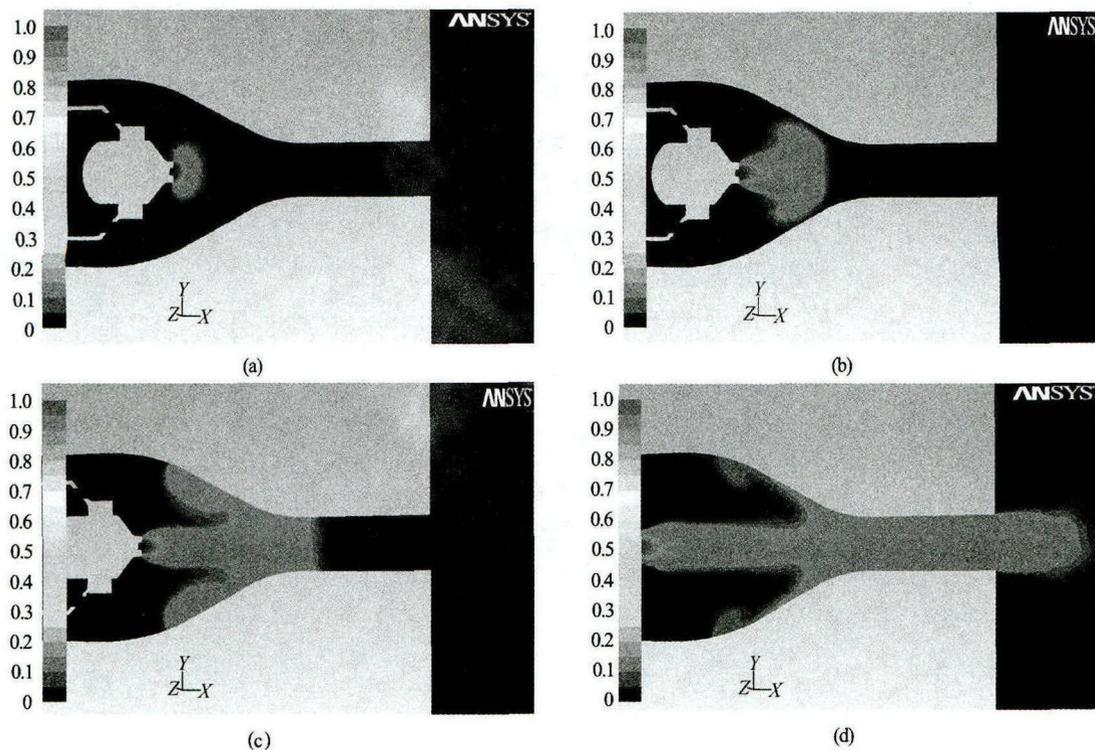


图3 启动阶段截面燃气流动演化

于此同时，刚体运动求解得到的航行体速度与位移曲线如图4和图5，前期由于燃气发生器底部压力较大，前期加速较大，后期加速效应减弱。整个阶段中，速度与位移变化平稳，未因为航行体末端补水不足产生较大的速度下降，相比通常自航发射情况，说明该发射方式发射推力较好。

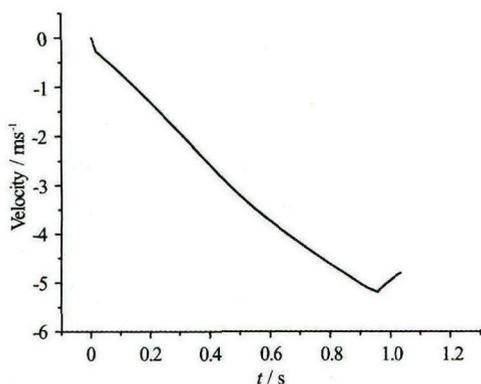


图4 燃气工况出管过程速度演化

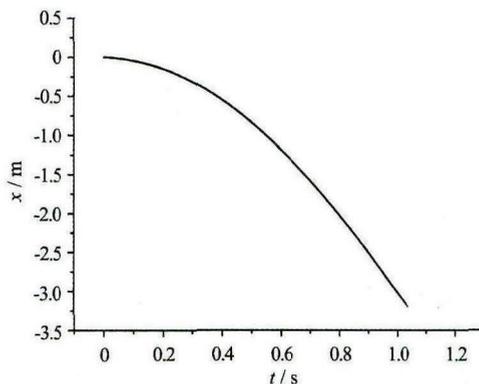


图5 燃气工况 fs 体位移演化

## 4 结论

本研究基于 CFD 与刚体动力学程序的耦合,研究了燃气喷射条件下航行体出管问题的流场和刚体运动内弹道规律。在考虑燃气影响的条件下,燃气泡能够产生短暂的大推力并在前中期降低水动阻力,但后期水动阻力反有所增大。

在此基础上,进一步也可考虑在尾部加装优化措施或是优化燃气发生器支撑结构形状,达到进一步增大推力减小阻力的目的。

## 参 考 文 献

- 1 肖虎斌. 潜射导弹燃气蒸汽式发射装置的内弹道建模. 舰船科学技术, 2010, 32(2):36-39.
- 2 兰晓龙. 水下枪械发射内弹道研究. 中北大学, 2014.
- 3 陈庆贵, 齐强, 王海洋, 等. 潜射导弹发射内弹道仿真研究. 导弹与航天运载技术, 2011, (6):40-42.
- 4 袁绪龙, 王亚东, 刘维. 同心筒水下发射内弹道建模与仿真研究. 弹道学报, 2013, 25(2):48-53.
- 5 李杰, 鲁传敬. 潜射导弹尾部燃气后效建模及数值模拟. 弹道学报, 2009, 21(4):6-8.
- 6 胡晓磊, 乐贵高, 马大为, 等. 水下燃气-蒸汽弹射气-液两相流场数值研究. 航空动力学报, 2015, (1):164-172.
- 7 曹嘉怡, 鲁传敬, 陈鑫, 等. 导弹水下热发射出筒过程流动特性. 固体火箭技术, 2011, (3):281-284.
- 8 王亚东, 袁绪龙, 张宇文, 等. 气泡弹性对同心筒水下发射影响研究. 计算力学学报, 2013, 30(2):313-318.

### Internal ballistic simulation on gas jet propulsion of vehicles in tube based on computational dynamics method

WU Xiao-cui<sup>1</sup>, GU Hai-tao<sup>2</sup>, WANG Yi-wei<sup>1</sup>, HUANG Chen-guang<sup>1</sup>, HU Zhi-qiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China 100190 Email:wuxiaocui@imech.ac.cn)

<sup>2</sup> (Center of Marine Information Technology & Engineering, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

**Abstract:** Vehicles propulsion by fuel gas in tube is a complicated coupled issue between the mixture flow of high-speed and high-temperature gas and water and rigid body motion. The surface force of flow field is integrated in computational fluid dynamics results, and the total force is calculated in addition with the thrust of the engine. The coupling approach of CFD / rigid body dynamics is established, which can calculate the trajectory in tube by fuel gas propulsion. The evolution characteristics of the flow field in the gas injection process are obtained, and the variation of velocity and displacement of the vehicle is discussed.

**Key words:** Numerical simulation of multiphase flow, rigid body dynamics, internal ballistics