

doi: 10.7690/bgzd.2018.04.001

## 阻尼板对水下航行体的力学影响作用

任佰锋<sup>1</sup>, 边晓阳<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 91049 部队 72 分队, 山东 青岛 266102; 2. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为更加准确地分析阻尼板对航行体产生的力学影响, 分析无界流场状态下无壁面与有壁面时的平板力学。首先建立阻尼板对航行体整体的作用力和力矩关系表达式; 其次通过仿真分析阻尼板周边的流场变化, 得出阻尼板受到的流体作用力矩随张开时间并不呈简单的线性关系; 最后利用 FLUENT 软件对带阻尼板与不带阻尼板的水下航行体进行数值模拟。结果表明: 阻尼板的存在会使水下航行体的轴向附加质量增加并且尾部流速降低, 可为阻尼板对水下航行体的力学影响作用分析提供一种思路和方法。

**关键词:** 阻尼板; 水下航行体; 流体作用力矩; 力学影响作用

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Mechanics Effect of Damping Plate on Underwater Vehicle

Ren Baifeng<sup>1</sup>, Bian Xiaoyang<sup>2</sup>

(1. No. 91049 Unit of PLA, Qingdao 266102, China;

2. Brigade of Graduate Student, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** For the mechanics analysis of the underwater vehicle with damping plate, analyze the plate mechanics without wall and wall in unbounded flow field. Firstly, establish the expression of the force and moment of the damper on the whole body. Secondly, through the simulation, analyze the flow field around the damping plate, it is concluded that the moment of the fluid subjected to the damping plate does not show a simple linear relationship with the opening time. At last, the numerical simulation of the underwater vehicle with damping plate and without damping plate is carried out by using FLUENT software. The results show that the axial additional mass of underwater vehicle and reduces its tail flow rate. The above work provides a way for the damping plate to analyze the mechanistic effects of the underwater vehicle.

**Keywords:** damping plate; underwater vehicle; fluid action moment; mechanistic influence

### 0 引言

由于功能设定的要求, 某水下航行体没有动力推动装置, 以一定的初始速度从水下发射载体中垂直向上发射, 出水后在重力的作用下竖直落回到水中。由于水下航行体质量与体积较大, 为了防止其垂直落回水中后发生触及发射载体的危险, 水下航行体增加了阻尼板用来执行水下发射后的航行体减速任务<sup>[1]</sup>。

水下航行体配备了阻尼板, 其力学环境发生了很大的改变。为了更加准确地分析阻尼板对航行体产生的力学影响, 需要建立合理的数学模型并进行仿真<sup>[2-3]</sup>。笔者依次分析了阻尼板对水下航行体产生的力及力矩、阻尼板在张开过程中流体作用力矩的基本变化规律, 并对比分析了有无阻尼板 2 种情况下水下航行体的力学环境变化。

阻尼板与水下航行体的位置剖视图如图 1 所示。如图 2 所示, 航行体水下发射后, 阻尼板迅速张开增加航行体的水下阻力, 从而减小出水速度,

降低出水高度, 消除回落水后的水下航行体触及发射载体危险。

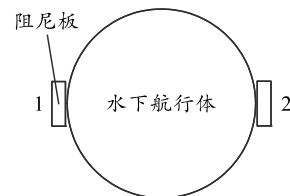


图 1 阻尼板与水下航行体的位置剖视图

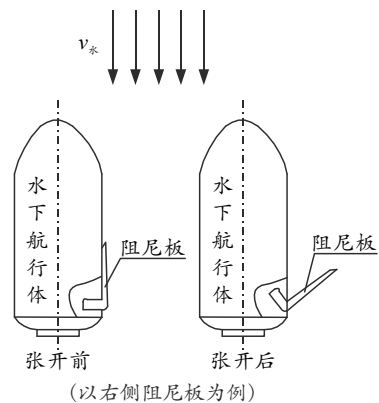


图 2 阻尼板张开示意图

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-01-28

作者简介: 任佰锋(1972—), 男, 山东人, 学士, 高级工程师, 从事战略导弹总体发动机研究。

# 1 阻尼力及阻尼力矩的计算分析

## 1.1 单块阻尼板对水下航行体产生的阻尼力计算

为了计算阻尼板的受力情况，如图 3 所示，首先对单块阻尼板的受力按照平板进行计算，对于无界流场中的平板，平板的受力可以由下面公式计算得到：

$$F_x = \int_s (-p \sin \alpha + \tau \cos \alpha) ds = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 C_d S \sin \alpha; \tag{1}$$

$$F_y = \int_s (-p \cos \alpha - \tau \sin \alpha) ds = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 C_d S \cos \alpha. \tag{2}$$

其中： $p$  为作用于阻尼板上的压力； $\tau$  为作用于阻尼板上的摩擦力； $v_\infty$  为来流速度； $C_d$  为平板阻力系数； $S$  为平板面积； $\alpha$  为阻尼板张开角度。

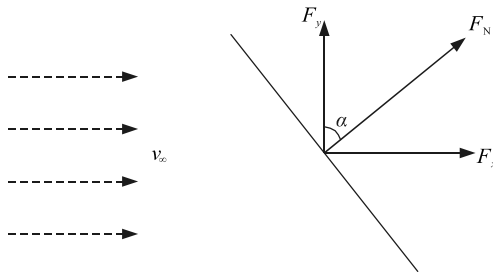


图 3 平板受力计算  $\alpha$

考虑壁面附近的平板受力(见图 4)，认为这时的绕流运动对平板和壁面产生相同大小的作用力，力的方向分别垂直于平板表面和壁面。二者的合力经过角点，合力大小为：

$$F_x = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 C_d S \sin \alpha; \tag{3}$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 C_d S (\cos \alpha - 1); \tag{4}$$

$$F_{\text{合}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}. \tag{5}$$

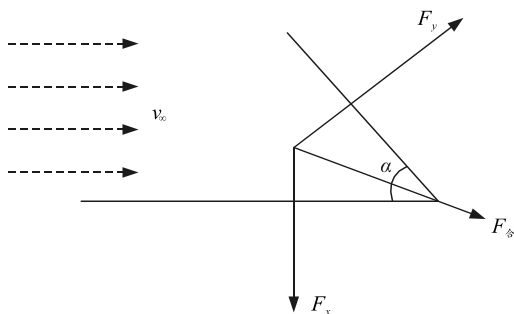


图 4 有壁面存在时平板受力

单块阻尼板产生的力为

$$\left. \begin{aligned} f_{xi} &= -\frac{1}{2} \rho v_x^2 C_d S_{b0} \sin \alpha \\ f_{yi} &= -\frac{1}{2} \rho v_x^2 C_d S_{b0} (\cos \alpha - 1) \cos [(i-1)\beta] \\ f_{zi} &= -\frac{1}{2} \rho v_x^2 C_d S_{b0} (\cos \alpha - 1) \sin [(i-1)\beta] \end{aligned} \right\}. \tag{6}$$

## 1.2 多块阻尼板产生的阻尼合力及合力矩计算

水下航行体在发射后竖直向上运动，多块阻尼板同时张开。在水下由于来流因素的影响，产生了较大阻力<sup>[4]</sup>。将所有阻尼板产生的力与力矩相加得到多块阻尼板对航行体的整体作用力和作用力矩，具体计算方程如下：

$$\left. \begin{aligned} F_{x\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} f_{xi} \\ F_{y\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} f_{yi} \\ F_{z\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} f_{zi} \end{aligned} \right\}; \tag{7}$$

$$\left. \begin{aligned} M_{x\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} (-f_{yi} z_{bi} + f_{zi} y_{bi}) \\ M_{y\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} (-f_{zi} x_{bi} + f_{xi} z_{bi}) \\ M_{z\text{合}} &= \sum_{i=1}^{n_b} (-f_{xi} y_{bi} + f_{yi} x_{bi}) \end{aligned} \right\}. \tag{8}$$

其中： $n_b$  为阻尼板个数； $S_{b0}$  为阻尼板面积； $\alpha$  为阻尼板张开角度； $\beta$  为各个阻尼板之间的夹角。计算过程中，平板阻力系数取 0.7。 $x_{bi}$ 、 $y_{bi}$ 、 $z_{bi}$  为阻尼板受力作用点至中心线(中心线位置见图 2)的垂直距离，并且

$$\left. \begin{aligned} x_{bi} &= x_T \\ y_{bi} &= R \cos [(i-1)\beta] \\ z_{bi} &= R \sin [(i-1)\beta] \end{aligned} \right\}. \tag{9}$$

其中  $R$  为航行体最大半径。

## 1.3 阻尼板张开过程中的阻尼力矩变化分析

### 1.3.1 网格的选取及划分

在研究水下航行体水中向上运动过程中阻尼板受到水的冲击载荷问题时，为保证计算准确性和流动问题计算收敛性，在航行体附近网格分布较密，在阻尼板周围网格分布更密，尤其在阻尼板与航行体之间区域，网格最为密集。远离阻尼板、航行体及流动速度变化小的地方网格分布较为稀疏。

生成网格后通过 ICEMCFD 的 Smoother 工具对所生成网格进行优化，从而生成质量较高的网格，见图 5 和图 6。由 ICEMCFD 生成 FLUENT 可以识别的网格文件格式，由 FLUENT 直接读入，进行计算分析<sup>[5]</sup>。由于要应用动网格技术，因而将网格划分为四面体网格。

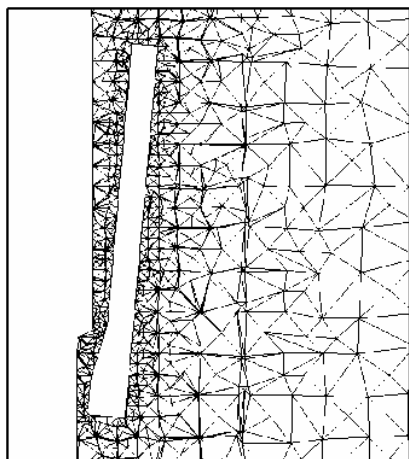


图 5 阻尼板张开 5 时附近网格划分

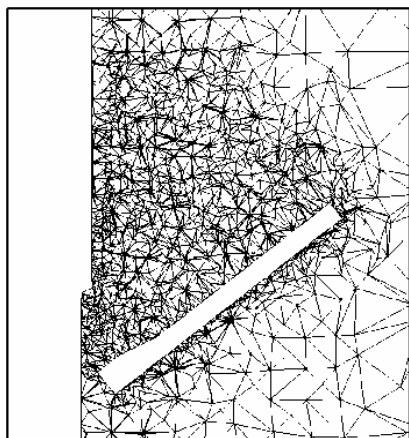


图 6 阻尼板张开 50 时附近网格划分

### 1.3.2 仿真计算结果分析

由图 7 可看出：从初始时刻到 0.007 s，力矩值由 36 200 N·m 下降到 22 500 N·m；从 0.007~0.032 s，力矩基本上呈缓慢上升趋势，力矩值增加到 52 000 N·m；从 0.032~0.035 s，力矩值又开始下降，下降到 39 400 N·m。在计算过程中，阻尼板由张开 5°开始，此时阻尼板转动角速度为 0 rad/s。随着阻尼板打开，阻尼板张开角速度增大，转动角速度也随之加快。在小于一定张开角度时，阻尼板张开角度越大，所受流体作用力矩越大。同时，张开角速度越大，受到流体作用力矩越小。所以在初始时刻，力矩值较大，而随后出现力矩值下降、上升又下降的现象，就是由于上几种现象共同作用<sup>[6-7]</sup>。

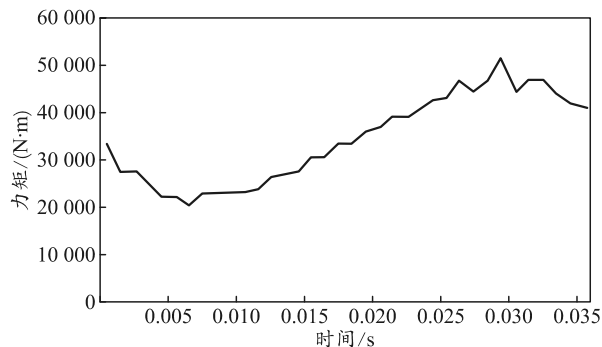


图 7 阻尼板流体作用力矩随时间变化规律

## 2 阻尼板影响作用对比分析

为了分析阻尼板对水下航行体的作用，使用 Fluent 软件进行水下航行体带阻尼板和不带阻尼板 2 种情况粘性不可压绕流问题的数值模拟，计算中采用轴对称模型。图 8 和图 9 是不带阻尼板和带阻尼板的水下航行体尾部流动速度矢量图，可以看出：阻尼板使水下航行体的轴向附加质量增加了许多，阻尼板和航行体之间的区域流速比较低<sup>[8]</sup>。图 10 和图 11 是不带阻尼板和带阻尼板的柱体尾部流动压力分布图，阻尼板和航行体之间的区域压力变化并不大，该区域内形成了明显的高压区。图 12 是航行体表面压力系数的分布，2 种情况下尾部的压力呈现了不同的状态。

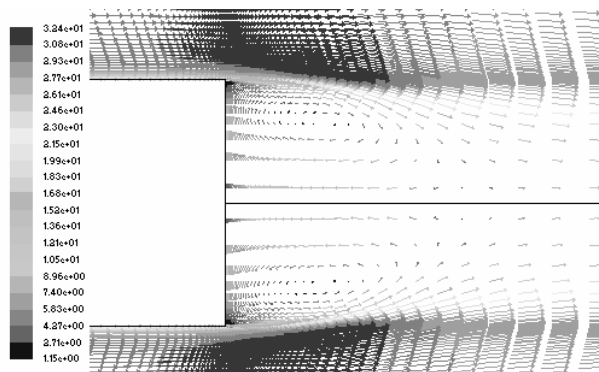


图 8 不带阻尼板尾部速度矢量图

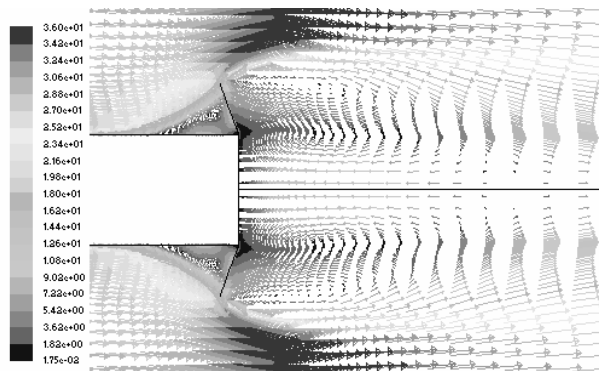


图 9 带阻尼板尾部速度矢量图

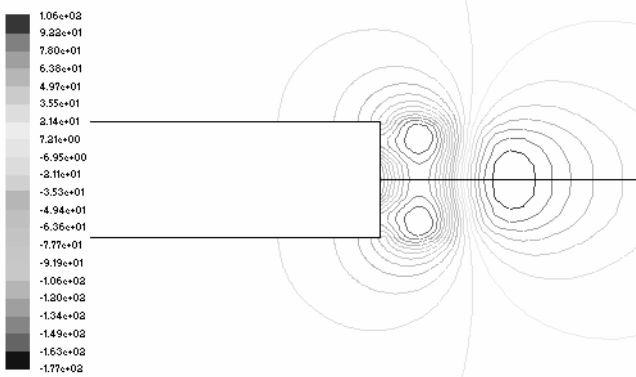


图 10 不带阻尼板尾部压力分布

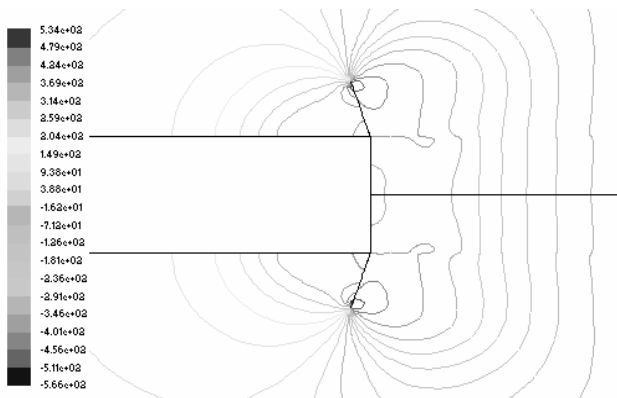


图 11 带阻尼板航行体尾部压力分布

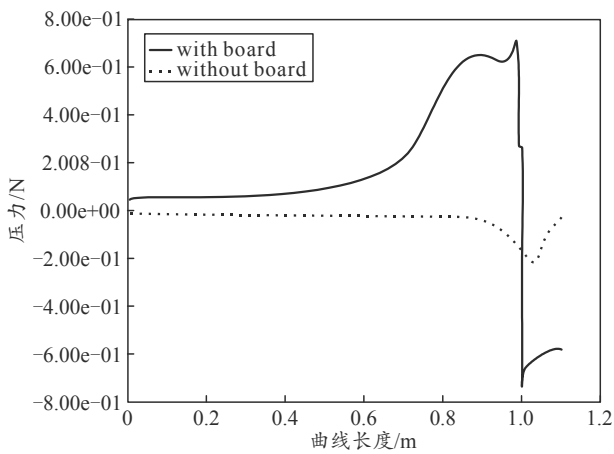


图 12 航行体表面压力系数分布

### 3 结论

笔者结合水下航行体实际弹道特性，分析了阻尼板对于水下航行体的力学影响作用情况。水下发射航行体的实际力学环境十分复杂，受到空泡、波浪流等多种因素的影响，笔者在计算过程中对于流体环境进行了一定程度的简化，通过以上研究可知，阻尼板对水下航行体产生的合力和力矩受到阻尼板尺寸、阻尼板张开角度以及阻尼板数量等因素的综合影响，由此可见：存在关于 3 种影响因素的最优方案可以使得阻尼板的减速效果达到最大，在后续的工作中以此为基础继续深入研究；阻尼板受到的流体作用力矩随张开时间并不呈线性关系，而呈下降后上升到顶点再下降的趋势，在文中分析了趋势变化的具体原因；对带阻尼板和不带阻尼板情况下的水下航行体进行力学作用影响分析，得出阻尼板使水下航行体的轴向附加质量增加很多，阻尼板和航行体之间的区域流速比较低，具有较明显的减速效果。

### 参考文献：

- [1] 李四超. 水下航行体舵板张开特性研究与分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(4): 475-479.
- [2] 都军民, 孙卓, 魏建峰. 舵板张开过程的数值仿真与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(3): 426-429.
- [3] CTF R. A conceptual design of an underwater missile launcher[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(1): 85-99.
- [4] 裴金亮, 于海涛, 孔德才, 等. 水下航行体出水空泡溃灭理论与计算[J]. 兵工自动化, 2017, 36(11): 62-66.
- [5] 张潇, 王延荣, 张小伟. 基于多层动网格技术的流固耦合方法研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(1): 64-66.
- [6] CHENG Y S, LIU H. Mathematical modeling of fluid flows for underwater missile launch[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2006, 18(3): 492-497.
- [7] 周培培, 郭少杰, 王斌. 超声速下栅格舵展开过程数值模拟[J]. 火箭与制导学报, 2016, 36(2): 26-28.
- [8] 胡坤, 王树宗. 水下航行体 X 型正交舵控制参数设计研究[J]. 船海工程, 2008, 37(3): 127-131.