

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.005

旋转驱动装置流场数值模拟

李定鹏¹, 钱建平¹, 黄维平², 苏京昭¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 辽沈工业集团有限公司, 沈阳 110045)

摘要: 为了让悬浮子弹能在空中达到一段滞空悬浮时间, 设计了一种旋转驱动装置。首先介绍旋转驱动装置的工作原理, 建立计算模型, 然后对驱动装置进行流场仿真, 改变驱动装置的出口直径及出口数, 分析结构参数对驱动性能的影响。仿真结果表明: 出口压力和出口速度相互制约, 当气体通过驱动装置弯管区域时, 气体压力和速度变化不大; 其他条件不变, 当驱动装置出口直径为 2 mm, 出口数为 3 时, 提供的驱动力矩最大。

关键词: 旋转驱动装置; 驱动性能; 数值模拟

中图分类号: TJ413⁺.9 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Flow Field in Rotating Device

Li Dingpeng¹, Qian Jianping¹, Huang Weiping², Su Jingzhao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Liaoshen Industry Group Co. Ltd., Shenyang 110045, China)

Abstract: In order to keep suspension bullets staying in the air for a while, a rotary driving device was designed. Firstly introduces the working principle of the rotary driving device, calculation model was presented, numerical calculation was performed for flow field of driving device, change the outlet diameter and the outlet number of driving device, analysis the influence of driving capability on driving device. The simulation results show that the outlet gas pressure and the outlet gas speed are mutual restriction, when the gas through the driving device of pipe bending region, the pressure and velocity of gas are little change, other conditions are unchanged. When the outlet diameter of driving device is 2mm, the outlet number of driving device is 3, provided the maximum driving moment.

Keywords: rotary driving device; driving capability; numerical simulation

0 引言

在现代战场上随着反舰武器的日益强大, 雷达扫描存在“盲区”及近程防护体系的不完善性, 一种新概念的“被动式”低空防御武器——悬浮弹随之被提出。它能够利用自带的动力源驱动升力模块在特定作战位置实现短时的滞空悬浮, 形成一道空中防御屏障。将悬浮子弹药按列阵布置在敌方来袭飞机或导弹的航线, 为水面舰艇或地面工事构筑末端防线, 通过直接毁伤来袭目标或诱使目标偏航等方式以达到防御作用^[1]。

悬浮装置的驱动模块是研究中最重要的一部分。多管喷气旋转装置将喷管与旋转驱动模块直接固连在一起, 利用直接喷气驱动方式提供旋转扭矩。在已研究螺旋桨升力性能的基础上, 笔者建立了气动分析模型, 结合理论分析和数值仿真, 了解喷气旋转悬浮装置的驱动性能。

1 旋转驱动装置

图 1 为旋转驱动装置简化图, 图中定义了数值仿真的监测点。高压气流从入口进入环形腔, 再由

环形腔的侧孔进入喷管, 从喷管出口流出, 产生气动推力, 使旋转驱动体高速旋转。

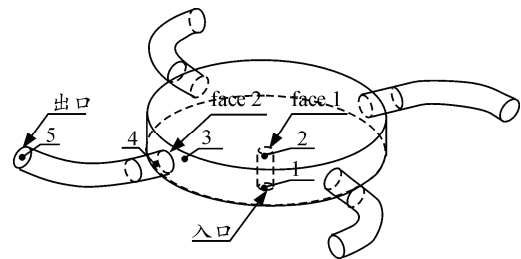


图 1 旋转驱动装置简化图

2 数学模型

2.1 控制方程与湍流模型

对旋转驱动装置进行三维流场仿真, 主要涉及以下方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

运动微分方程^[2]:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{\partial p}{\rho \partial x} \quad (2)$$

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-02-04

作者简介: 李定鹏(1990—), 男, 安徽人, 硕士, 从事武器系统作战效能分析研究。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{\partial p}{\rho \partial y} \quad (3)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{\partial p}{\rho \partial z} \quad (4)$$

气体状态方程：

$$p = \rho RT \quad (5)$$

湍流模型：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mu_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] +$$

$$\eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mu_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] +$$

$$\frac{c_1 \varepsilon}{k} \eta_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

2.2 驱动力矩计算模型

出口推力由出口排气动量产生的推力和出口静压与空气静压之差产生的附加推力。旋转驱动装置出口推力和旋转驱动力矩计算公式^[3]：

$$F = q_m v + pA \quad (8)$$

$$M = nFR \quad (9)$$

式中： n 表示出口个数； R 表示喷嘴距离圆心的距离； q_m 出口质量流量； v 出口速度； p 为出口静压与空气静压之差； A 为出口面积。

3 计算模型

3.1 假设条件

为了便于对旋转驱动装置进行数值模拟，做如下基本假设和简化^[4]：

- 1) 气体是可压缩的理想气体；
- 2) 过程中内部气体与外界无热量交换；
- 3) 假定容器壁的温度保持不变。

3.2 几何模型的建立及网格划分

图 1 为旋转驱动装置的几何模型及流场仿真的监测点分布^[5]，入口直径为 2 mm，出口直径为 3 mm。采用六面体网格，计算网格如图 2 所示。



图 2 旋转驱动装置计算网格

3.3 模拟参数及边界条件设定

- 1) 介质参数：可压缩的理想气体模型；
- 2) 湍流模型选择：标准的 $k-\varepsilon$ 模型；
- 3) 边界条件：入口边界采用压力入口边界，压力设置为 5 MPa，温度为 1 200 K；出口边界设置为压力出口边界，压力设置为一个标准大气压，出口温度设置为 300 K，压力值为绝对压力，壁面边界设定为默认值，即为绝热条件^[6-7]。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真结果

如图 3 和图 4 所示，装置内部气体流动复杂。从图 4 可知，气体在直管中流动时，速度较为平稳，变化不大，当通过面 face1 时，在该区域的流动，截面突然扩大，射流成向外发散的趋势；在该区域附近速度梯度较大，越靠近中心，速度越大，在中央气体速度最大可达到 1 100 m/s，当气体继续流动，撞击上壁面，沿着壁面向四周扩散，此时气体速度又急剧地下降，气体在装置内部形成紊乱的漩涡流动。当气体经过面 face2 时，截面又突然缩小，气体速度又有所上升，此处节流口的存在对流动有着一定阻滞作用，这也是出口节流损失产生的原因。

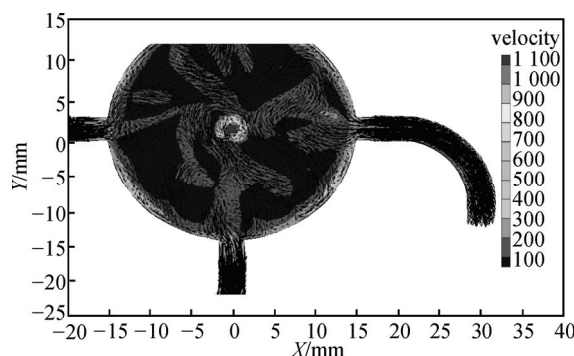


图 3 旋转驱动装置流场速度矢量图

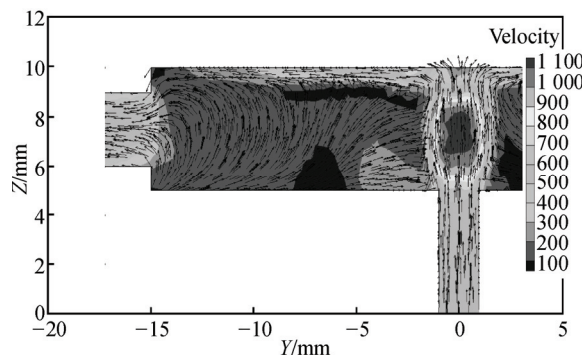


图 4 旋转驱动装置流场速度矢量图

如图 5 和图 6 所示，监测点 1 到 2 的过程中，气体总压下降很小，大量入口静压转化为动压，总

压和静压相差较大。监测点 2 到 3 的过程，流体在内部流动较复杂，总压和静压下降都特别明显。当气体通过面 face1 时，在该区域附近静压梯度较大，静压下降明显，这是由于此时气体速度急剧变大，部分静压转化为动压。当气体继续流动，撞击上壁面时，速度下降，部分动压转化为静压，静压增大，如图 6 所示，在上壁中央达到最大值。当气体沿着壁面流动，填满装置内部时，体积膨胀，密度减小。

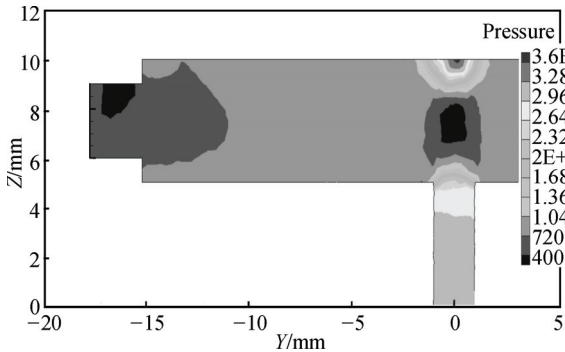


图 5 各监测点的总压和静压

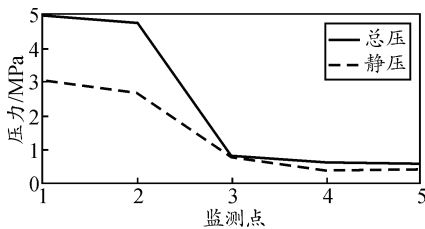


图 6 旋转驱动装置局部静压图

监测点 3 到 4 的过程，截面缩小，总压和静压都有所下降，由于气体速度增大，部分静压转化为动压。监测点 4 到 5 的过程，气体经过弯管，压力损失较小。

综上所述：根据装置内部速度和压力分布可知，仿真结果基本满足可压缩流体流动的一般规律，因此仿真结果基本可信。

4.2 仿真分析

不同的入口压力条件，分别对 4 种不同结构方案的旋转驱动装置进行仿真计算，寻找结构参数对仿真结果的影响。

从图 7 可知：随着入口压力的增加，质量流量也相应地增加，相同的压差条件下，质量流量的增加量随着入口压力呈细微的递增趋势，因此流量系数也随着压力的增加而增加。其他条件相同时，出口数 n 对质量流量没有影响；但是出口数 n 相同时， $d=3\text{ mm}$ 比 $d=2\text{ mm}$ 质量流量要大一些。

从图 8 可知：出口速度跟入口压力关系不大；

出口面积相同时，出口数 n 对出口速度几乎没有影响；出口数 n 相同时， $d=3\text{ mm}$ 比 $d=2\text{ mm}$ 出口速度要大，同时速度的振动幅度也较大。

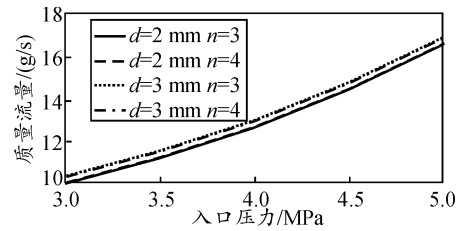


图 7 入口压力与质量流量的关系

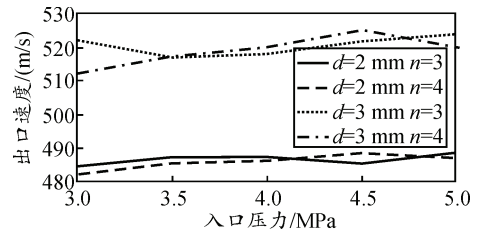


图 8 入口压力与出口速度关系

从图 9 可知，出口静压也随着入口压力的增大而增大。出口数 n 对出口静压影响较大，当出口数 n 增加，单个出口的质量流量降低，出口静压减小；同时出口面积增大，气体膨胀越大，密度下降，出口静压也减小。

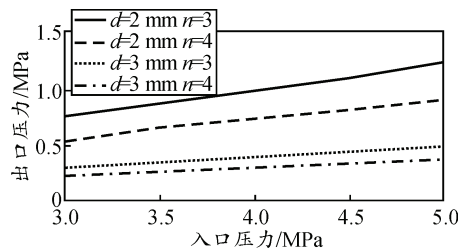


图 9 入口压力与出口压力的关系

从图 10 可知，入口压力与驱动力矩近似成线性关系。结合喷口推力公式可知，其他条件不变，尽管 $d=3\text{ mm}$ 出口气体动量产生的推力要大于 $d=2\text{ mm}$ ，但由于 $d=2\text{ mm}$ 出口静压远大于 $d=3\text{ mm}$ ，最终 $d=2\text{ mm}$ 产生的力矩大于 $d=3\text{ mm}$ 。同样，其他条件相同， $n=3$ 产生的驱动力矩大于 $n=4$ ，因此， $d=2\text{ mm}$ ， $n=3$ 的旋转驱动装置结构最佳。

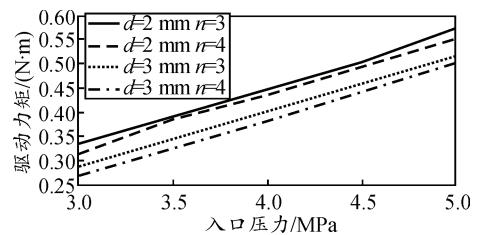


图 10 入口压力与驱动力矩的关系

5 结论

从仿真结果分析可以得出:

1) 旋转驱动装置的驱动力矩与出口面积、质量流量、出口速度和出口静压因素有关,但是这4个因素又是相互制约相互影响的,文中的结构方案略显简单,可以进一步细化,并进行仿真分析,找出规律,设计出最佳的结构。

2) 由仿真结果可知:气体在通过弯管过程中,对气体的出口速度、出口静压影响不是很大。

3) 通过对旋转驱动装置进行数值仿真,了解旋转驱动装置的结构参数对驱动力矩的影响。但在设计结构时,还需要考虑旋转驱动装置由于摩擦产生阻力矩的影响。

(上接第13页)

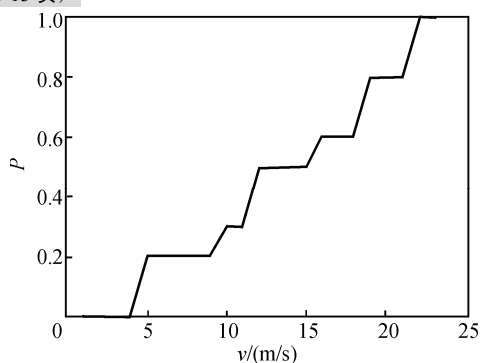


图5 毁伤概率与着靶速度关系曲线

4 结束语

笔者根据毁伤试验模型一般的建立原则,拟定多层间隔靶板系统为鱼雷自导系统的毁伤等效靶。然后结合间隔靶等效模型,建立了数值计算模型,通过仿真给出了射弹侵彻毁伤自导系统的结果,从而为鱼雷自导系统毁伤评估提供了一种实用的模型

参考文献:

- [1] 雷伟, 钱建平, 季溢栋, 等. 悬浮子弹降落与悬浮过程弹道特性动力学分析[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(2): 131-134.
- [2] 王希靖, 韩晓辉. 基于 FLUENT 的铝合金搅拌摩擦焊三维流场数值模拟[J]. 电焊机, 2007, 36(1): 48-50.
- [3] 季溢栋, 钱建平, 雷伟. 多管喷气旋转装置动力分析与试验研究[J]. 四川兵工学报, 2014, 34(4): 143-145.
- [4] 邹专勇. 喷气涡流纺喷嘴内部三维流场的数值研究[J]. 纺织学报, 2008, 29(2): 86-89.
- [5] 倪敬, 陈宇江, 刘湘琪, 等. 双齿轮渐近同步驱动系统设计[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 757-759.
- [6] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 181-183.
- [7] 韩占忠. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 35-37.

方法。但上述建立的射弹对自导系统破坏的等效毁伤靶主要是基于理论上的探讨,仿真所得结果还需要在试验中进行验证。

参考文献:

- [1] 钱东, 张少悟. 鱼雷防御技术的发展与展望[J]. 鱼雷技术, 2005, 13(2): 1-6.
- [2] 陈文仁, 王方. 高危鱼雷威胁与超空泡射弹拦截技术[J]. 现代舰船, 2011, 18(6): 44-47.
- [3] 邓国强, 周早生, 杨秀敏. 爆炸冲击效应数值仿真中的几项关键技术[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1059-1062.
- [4] 何建, 唐平, 王善, 等. 柱形杆高速碰撞薄靶板的数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2107-2110.
- [5] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California, USA: LSTC, 2003: 45-51.
- [6] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 76-83.