

文章编号: 1001-0645(2002)01-0025-03

# 舰载导弹垂直发射系统燃气流场的三维数值计算

姜 毅

(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

**摘 要:** 用求解三维Navier-Stokes方程的方法, 对舰载垂直发射系统发射导弹时燃气流场进行了数值计算, 紊流模型采用标准 $k-\epsilon$ 二方程模型, 计算方法为有限体积法, 计算网格为结构化网格. 计算出了导弹点火后未动、导弹运动至发射箱 $1/4$ ,  $1/2$ ,  $3/4$ 高度和导弹尾部刚出发射箱时等5种典型状态下的燃气流场分布规律, 并给出了一些特性曲线, 为深入研究这种复杂现象提供了重要的理论依据.

**关键词:** 垂直发射; 燃气射流; 有限体积法; 计算流体力学

**中图分类号:** V 211.21

**文献标识码:** A

## Three-Dimensional Jet Calculation for the Vertical Launcher on a Warship

J IANG Yi

(School of Mechano-Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To calculate a very complicated jet flow in the vertical launcher on a warship, a three-dimensional Navier-Stokes equation is solved with a standard  $k-\epsilon$  turbulent model. The method of calculation is of finite-volume and the grid used is that of structural mesh. Positions of the missile relative to the launching-box include the initial, when reaching the  $1/4$ ,  $2/4$ ,  $3/4$  and  $4/4$  length until the bottom of the launching equipment. Some contours and information are mentioned to study this jet flow deeply.

**Key words:** vertically launching; jet; finite-volume method; computational fluid dynamics

由于垂直发射方式可以节省大量的空间, 即: 在相同的军舰甲板面积条件下, 垂直发射方式能装载比一般发射方式(如倾斜发射)多数倍的导弹, 所以, 垂直发射方式已在一些现代化军舰上采用. 典型系统如美国的MK-41垂直发射系统采用了八联装导弹共用一排气道的方式.

由于垂直发射空间非常紧凑, 而发射时导弹要喷出大量高温、高速的燃气射流, 因此, 顺利、可靠地排导燃气流对垂直发射方式至关重要, 并直接关系

到导弹的发射成败. 解决燃气流问题是垂直发射方式的关键之一. 通过数值计算的方法对这一复杂的流动现象进行模拟研究, 无论在理论上还是在现实上, 都具有重要的意义和价值.

作者通过求解三维、雷诺平均的Navier-Stokes方程的方法, 采用有限体积法, 紊流模型为 $k-\epsilon$ 二方程模型, 对这一问题进行了深入地研究, 成功地完成了数值模拟工作.

收稿日期: 2001-05-10

作者简介: 姜 毅(1965-), 男, 副教授.

## 1 计算方法

设控制体的体积为  $V$ , 周界面积为  $A$ , 向量  $dA$  表示周界上的微元面积, 指向界面的外法线方向.

为把流体力学控制方程表示成积分形式<sup>[1]</sup>, 先将控制方程表示为

$$\bar{q}_i + \nabla \cdot P = 0, \quad (1)$$

式中  $P = iF + jG + kH$ . 则方程(1)的积分表示形式为

$$\int_V \bar{q}_i dV + \int_V \nabla \cdot P dV = 0. \quad (2)$$

应用高斯散度定理, 可以将上式化为

$$\int_V \bar{q}_i dV + \int_A P dA = 0. \quad (3)$$

在式(3)中, 体积积分项的物理量  $q$ , 在作差分时间, 以控制体中心点处的值  $q_{ijk}$  为代表; 周界积分项的物理通量  $P$ , 以各段周界的中点值为代表. 于是, 式(3)在所取的控制体内可差分离散为

$$\begin{aligned} \bar{q}_{ijk}^{n+1} = \bar{q}_{ijk}^n - \frac{\Delta t}{V_{ijk}} & (P_{i+1/2,j,k}^n \cdot A_1 + P_{i-1/2,j,k}^n \cdot A_2 + \\ & P_{i,j+1/2,k}^n \cdot A_3 + P_{i,j-1/2,k}^n \cdot A_4 + \\ & P_{i,j,k+1/2}^n \cdot A_5 + P_{i,j,k-1/2}^n \cdot A_6). \end{aligned} \quad (4)$$

本文中采用的是中心差分格式<sup>[2]</sup>.

为了对该问题进行准确地数值计算, 从导弹发动机燃烧室出口开始, 在构造网格时, 发射装置内的各种结构尺寸保持原貌, 计算网格采用完全结构化网格. 计算网格见图 1.

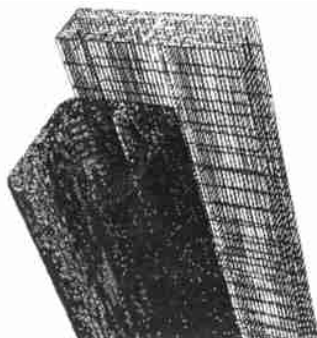


图 1 发射装置上部计算网格

Fig 1 Grids on the head of the launching equipment

## 2 计算结果

共计算了 5 种状态, 即: 导弹点火后未动, 导弹运动至发射箱 1/4, 1/2, 3/4 高度和导弹尾部刚出发射箱时的情况, 给出了在各种情况下的燃气流场分

布规律以及一些特性曲线, 具体结果见图 2~ 图 5.

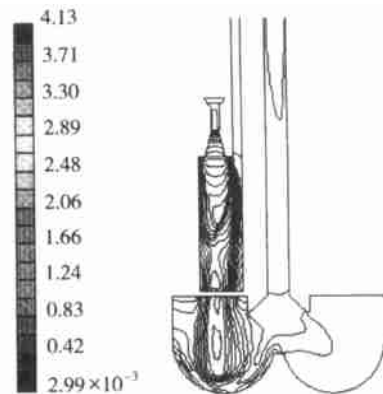


图 2 发射装置中截面上的马赫数等值线

Fig 2 Contour mapping of Mach numbers on the central section of the launching equipment

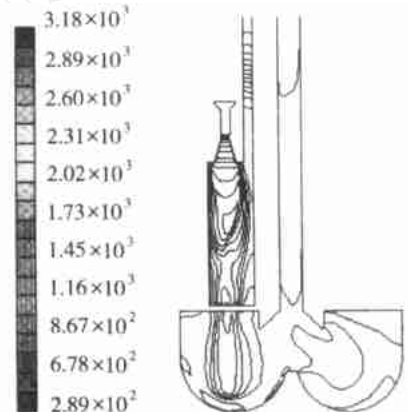


图 3 发射装置中截面上的温度等值线

Fig 3 Contour mapping of temperature for the central section of the launching equipment

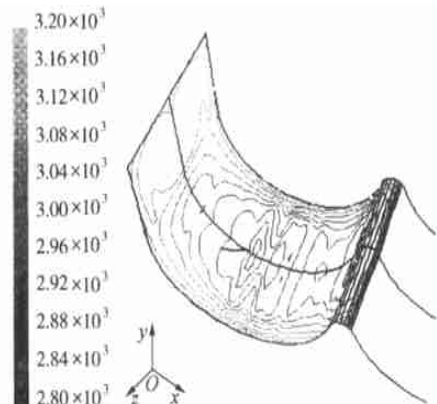


图 4 发射装置底部导流面上的温度等值线

Fig 4 Contour mapping of temperature variation on the surface of the exhaust at the bottom

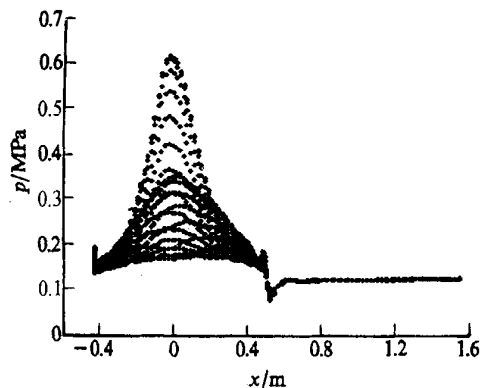


图 5 发射装置底部导流面上的压力

Fig 5 Pressure on the surface of exhaust at the bottom of launcher

### 3 讨 论

由数值计算可知,随着导弹的向上运动,作用在底部导流面上的压力和温度逐渐降低,当导弹离箱时,作用在发射装置底部上的压力可降低 2.71 倍;

当导弹向上运动时,由发射箱前端口吸入的空气越来越多,对发射装置内的燃气温度的冷却作用,当导弹运动到发射箱出口时,空气引射量为导弹初始位置时的 2.84 倍。

在底部小孔处燃气流速为 1 个马赫数左右。

对舰载导弹垂直发射系统燃气流场进行三维数值计算为解这一复杂的气体动力学问题提供了可靠的依据,给出了工程上的急需数据,为工程设计提供了重要的根据。

#### 参考文献:

- [1] Shih T H, Liou W W, Shabbir A. A new  $k-\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows—Model development and validation [J]. Computers in Fluids, 1995, 24(3): 227- 238
- [2] Fluent Incorporated. Fluent5 User's Guide [M]. Lebanon: Fluent Incorporated, 1998

(上接第 21 页)

取  $\xi_1 = 1, \xi_2 = \xi_3 = 0$ ,  
则式(7)满足,且对应系统的形式不变性。将其代入广义 Noether 等式,有

$$- \dot{q}_2 = - \dot{G}_N,$$

于是  $G_N = q_2$ 。

守恒量为  $I = q_1 + q_2 = \text{const}$ 。

如果取  $Q_1 = - q_2^2$ ,  
则形式不变性将不导致守恒量。

#### 参考文献:

- [1] 李子平. 经典和量子约束系统及其对称性质[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1993  
Li Ziping. Classical and quantal dynamics of constrained systems and their symmetrical properties [M]. Beijing: Beijing Polytechnic University Press, 1993 (in Chinese)
- [2] 赵跃宇, 梅凤翔. 力学系统的对称性与不变量[M]. 北京: 科学出版社, 1999  
Zhao Yueyu, Mei Fengxiang. Symmetries and invariants of mechanical systems [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [3] 梅凤翔. 李群和李代数对约束力学系统的应用[M]. 北

京: 科学出版社, 1999

Mei Fengxiang. Applications of Lie groups and Lie algebras to constrained mechanical systems [M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)

- [4] 李子平. 约束系统的变换性质[J]. 物理学报, 1981, 30(12): 1659- 1671  
Li Ziping. Transformation property of constrained system [J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(12): 1659- 1671 (in Chinese)
- [5] Mei Fengxiang. Nonholonomic mechanics [J]. A S M E App Mech Rev, 2000, 53(11): 283- 305
- [6] Mei Fengxiang. Form invariance of Lagrange system [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 9(2): 120- 124
- [7] Mei Fengxiang. Form invariance of Appell equations [J]. Chinese Physics, 2001, 10(3): 177- 180
- [8] Wang Shuyong, Mei Fengxiang. Form invariance of Nielsen equations [J]. Chinese Physics, 2001, 10(5): 373- 375
- [9] 梅凤翔. 关于 Noether 对称性, Lie 对称性和形式不变性[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4): 535- 536  
Mei Fengxiang. On noether symmetry, Lie symmetry and form invariance [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(4): 535- 536 (in Chinese)