

## 涡流阀流量调节特性数值模拟\*

刘冰 方丁酉

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 用数值模拟研究了涡流阀的流量调节特性。在来流总压恒定的条件下,用时间相关法求解了雷诺平均的 Navier-Stokes 方程。计算了无控制流和有控制流两种情况,得到了流动参数在流场中的分布和控制流量与喷管流量的关系。计算表明,涡流阀有良好的流量调节特性。

**关键词** 涡流阀, 推力调节, 数值模拟

**分类号** V435.3

## Numerical Simulation for Mass Flow Rate of Vortex Valve

Liu Bing Fang Dingyou

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** The control properties of vortex valve for mass flow rate are numerically simulated. The time-dependent method is used to solve full Navier-Stokes governing equations. The calculation is made with the control mass added or not. The steady nozzle flowfield with vortex chamber is obtained and the nozzle mass flow rate is related with control mass flow rate. The results indicate that the vortex valve has good property for controlling nozzle mass flow rate.

**Key words** vortex valve, thrust control, numerical simulation

国外在六、七十年代对涡流阀的调节特性做了许多实验研究。Kasselmann<sup>[2]</sup>等设计了一个5cm的涡流阀模型,采用了含铵的高卤酸盐推进剂,相应的燃烧室获得了550%的变化,比理论上依靠直接加入质量的方法所获得的要大230%,而且响应亦很快。利用两

\* 1996年3月20日收稿

个串联的涡流阀还得了高达 200 : 1 的流量的变化。Blatter<sup>[1]</sup>等对一个具有 1b/s 的实验涡流阀做了七次实验, 实现了当控制流压力同主气流的压力之比为 1.7 : 1 时, 3.46 : 1 的流量调节能力。本文从数值模拟方面研究涡流阀的调节特性, 采用 MarcCorMark 显格式, 用有限差分法计算了带涡流阀的喷管流场。

## 1 控制方程和湍流模型

### 1.1 基本假设

计算的带涡流室喷管如图 1。假设: 1) 气体为有粘的成分冻结, 比热比为常数, 且遵守理想气体状态方程。2) 控制流由一个环形截面切向喷入涡流室。3) 来流来自一个恒压贮气箱。4) 气体与壁面之间无质量和能量交换。

### 1.2 控制方程

由于计算流域形状复杂, 流场中存在激波, 流动分离区等复杂现象, 为了正确分辨流场细节, 本文选用了轴对称雷诺平均的全 Navier-Stokes 方程。无量纲化后的控制方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial r} + H = 0$$

### 1.3 湍流模型

由于涡流室的形状复杂, 大拐弯很多, 可能存在分离流动。本文采用目前广泛使用、计算量最小的 Baldwin-Lomax 代数模型, 湍流模型中的湍流粘性系数分内外两层给出:

$$\mu_t = \begin{cases} \mu_{\text{inner}} = \rho l^2 |\omega| Re & y \leq y_c \\ \mu_{\text{outer}} = 0.0168 \rho C_p F_{\text{wake}} F_{\text{kleb}}(y) Re & y \geq y_c \end{cases}$$

其中,  $y$  表示流场内某点离开壁面的法向距离, 为按内层公式计算的欧粘系数与外层公式计算的欧粘系数相等时最小  $y$  的值。内层公式中, 混合长度  $l$  和涡量  $\omega$  分别为:

$$l = ky[1 - \exp(-y^+ / A)], \quad \omega = \left| \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial x} \right|$$

$$\text{对有旋流: } \omega = \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2}$$

其中:  $y^+ = \sqrt{\rho_w \tau_w Re y} / \mu_w$ 。

外层公式中:  $F_{\text{wake}} = \min(y_{\text{max}} F_{\text{max}}, C_w y_{\text{max}} \pi_{\text{dif}}^2 / F_{\text{max}})$

其中:  $u_{\text{dif}}^2 = (u^2 + v^2)_{\text{max}} - (u^2 + v^2)_{\text{min}}$

$F_{\text{max}}$  是下列函数的最大值

$$F(y) = y |\omega| [1 - \exp(-y^+ / A)]$$

与  $F_{\text{max}}$  对应的  $y$  为  $y_{\text{max}}$ ,  $F_{\text{kleb}}$  为 Kiebanoff 间歇因子:

$$F_{\text{kleb}}(y) = \left[ 1 + 5.5 \left( \frac{C_{\text{kleb}} y}{y_{\text{max}}} \right)^6 \right]^{-1}$$

上述公式中的常数分别为:

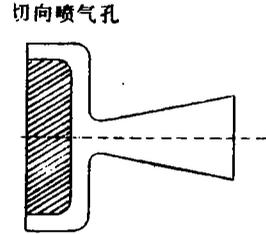


图 1 喷管示意图

$$A=26, \quad C_p=1.6, \quad C_{\text{kleb}}=0.3, \quad C_w=0.25, \quad k=0.4$$

因为  $\mu_{\text{inner}}$  与  $\mu_{\text{outer}}$  在  $y_c$  处相等,  $\mu_c$  总是取两者中最小的, 所以没有必要求  $y_c$ , 即取  $\mu_c = \min(\mu_{\text{inner}}, \mu_{\text{outer}})$ 。

## 1.4 网格生成

由于计算流域形状复杂, 要求网格壁面正交性较好。计算所用网格采用文献 [4] 的计算方法分段生成网格。无控制流计算采用  $160 \times 47$  个网格点, 有控制流计算采用了  $240 \times 47$  个网格点, 在壁面附近对网格进行了加密。

## 2 数值方法和边界条件

### 2.1 数值方法

本文利用 MacCormack 二步显格式将控制方程离散化。

预报步:

$$\begin{aligned} U^{\bar{n}+1} = & U^n - \frac{\Delta t}{\Delta \xi J_{i,j}} (F_{i,j}^n - F_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta \eta J_{i,j}} (G_{i,j}^n - G_{i,j-1}^n) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta \xi J_{i,j}} (F_{i+1,j}^n - F_{i-1,j}^n) + \frac{\Delta t}{2\Delta \eta J_{i,j}} (G_{i,j+1}^n - G_{i,j-1}^n) \\ & - \Delta t H_{i,j}^n + \Delta t H_{i,j}^{\nu,n} + S_{i,j}^n \end{aligned}$$

校正步:

$$\begin{aligned} U^{n+1} = & \frac{1}{2} (U^n + U^{\bar{n}+1}) - \frac{\Delta t}{\Delta \xi J_{i,j}} (F_{i+1,j}^{\bar{n}+1} - F_{i-1,j}^{\bar{n}+1}) - \frac{\Delta t}{\Delta \eta J_{i,j}} (G_{i,j+1}^{\bar{n}+1} - G_{i,j-1}^{\bar{n}+1}) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta \xi J_{i,j}} (F_{i+1,j}^{\bar{n}+1} - F_{i-1,j}^{\bar{n}+1}) - \frac{\Delta t}{2\Delta \eta J_{i,j}} (G_{i,j+1}^{\bar{n}+1} - G_{i,j-1}^{\bar{n}+1}) \\ & - \frac{1}{2} \Delta t H_{i,j}^{\bar{n}+1} + \frac{1}{2} \Delta t H_{i,j}^{\nu,\bar{n}+1} + S_{i,j}^{\bar{n}+1} \end{aligned}$$

上述格式中, 对流项的预报步用一侧后差, 校正步用一侧前差格式; 与粘性有关的项采用中心差分。这种格式是时间一阶精度和空间二精度的。

### 2.2 边界条件

入口边界的数值处理采用参考平面上的特征线法。由于出口为超音速流, 信息不往上游传播不影响上游, 故用简单的三点外插公式来求出口边界上的参数。轴线边界采用轴对称条件。固壁边界速度满足无滑移条件, 壁面压力和温度条件考虑零压力梯度和绝热壁的情况; 假设控制流总温与主气流总温相等, 喷口处的参数由下面的方程求得:

$$\frac{P}{T} A_0 W = m_0, \quad \frac{C_p}{R} = \frac{C_p}{R} T + \frac{1}{2} W^2$$

式中:  $m_0$  为给定的无因次控制流量,  $P$  为喷口处无因次压强,  $T$  为喷口处无因次温度,  $A_0$  为切向控制无因次流通道面积。

## 3 算例及结果分析

### 3.1 无控制流算例

图 2 是无控制流时涡流室外侧的速矢图, 图 3 是它的等马赫线分布图。可见在喷管中, 由于喷管型面二阶导数不连续, 形成了斜激波, 由于喷管扩散段较长, 斜激波发生

了反射。

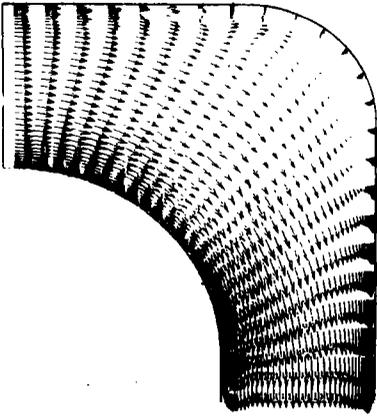


图2 无控制流涡流室外侧速矢图

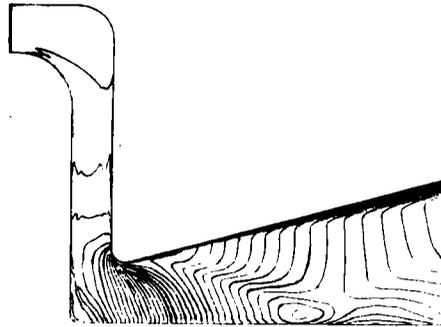


图3 无控制流喷管等马赫线分布图

### 3.2 有控制流算例

据理论分析,带涡流室喷管工作时,由于旋流的引入,在涡流室中形成的径向压力梯度会提高涡流室外侧的压力,从而使喷管中的流量减少。图4是有控制流时涡流室外侧的速矢图,由于旋转气流的影响,原有的分离流动变大了,同时由于涡流室外侧压强提高导致了新的分离流动的产生,可见涡流室中的径向压力梯度确实存在。无控制流时,喷管喉部无因次流量为0.8926;当喷入的质量流量为无控制流时喷管流量的19%时,喷管喉部无因次流量为0.8287;当喷入的质量流量为无控制流喷管流量的25%时,喷管喉部无因次流量为0.7682。

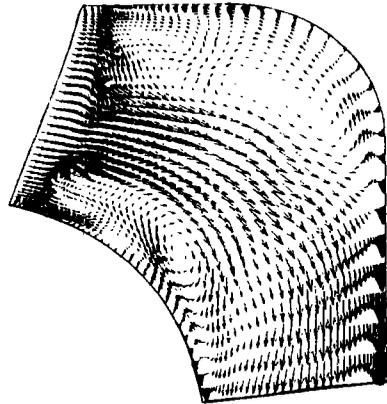


图4 有控制流涡流室外侧速矢图

### 参 考 文 献

- 1 Blatter A, Keranew T W. Research and development of a vortex valve for modulation of a 16-percent aluminized 550°F solid propellant gas. AIAA Paper 69~424
- 2 Kasselmann J T, Delozier T R. Fluidic valve for warm gas flow control. AIAA Paper 69-118
- 3 Baley R T, Shih T P, Nguyen H L, Roelke R J. Grid2D/3D-A computer program for generationing grid systems in complex-shaped two-and three-dimensional spatial domains. Department of mechanical engineering university of Florida, 1992
- 4 马铁犹. 计算流体力学. 北京:北京航空航天大学出版社, 1986

(责任编辑 石少平)