

文章编号:1000-8055(2012)10-2205-09

## 入口带倒圆结构的旋转长孔计算模型

李 澎, 吴 宏, 陶 智

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 通过对旋转长孔的各种复杂工况开展 CFD 仿真, 对现有经验关联式进行修正, 并基于流体网络法对修正后的计算模型进行开发, 开发完成的模型采用计算流体力学商业软件 Simerics 进行验证. 结果表明: 该模型考虑了入口倒圆结构对流动的影响, 对于旋转长孔的模拟准确度较高, 在低雷诺数及超声速等各种流动状态下均具有较广的适用性, 并且只需基本的几何特征参数即可进行一维数值模拟, 因此可以作为二次空气系统一维数值仿真的标准化模型使用.

**关 键 词:** 旋转长孔; 入口倒圆; 流量系数; 经验关联式; 二次空气系统

**中图分类号:** V231.3

**文献标志码:** A

## Rotating long orifices with radiused inlets analytical model

LI Peng, WU Hong, TAO Zhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,  
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,  
Beijing 100191, China)

**Abstract:** The main subjects are to introduce a new correlation for long orifices with radiused inlets by conducting computational fluid dynamics simulation under complex working conditions, and then, analytical model of long orifices with radiused inlets was developed based on fluid network method, and the model was verified by commercial CFD tool Simerics. It is shown that the model has high precision, it is applicable under complex conditions, and only geometric features are required for one-dimensional modeling. Thus it can be used as a standard model in secondary air system simulation widely.

**Key words:** rotating long orifice; radiused inlet; flow coefficient; correlations; secondary air system

## 符号表

|           |                                          |                |              |
|-----------|------------------------------------------|----------------|--------------|
| $D$       | 孔口直径(mm)                                 | $\dot{m}_{id}$ | 理论质量流量(kg/s) |
| $D_{up}$  | 上游流通直径(mm)                               | $p_1^*$        | 入口总压(Pa)     |
| $L$       | 孔口长度(mm)                                 | $p_2^*$        | 出口总压(Pa)     |
| $r$       | 入口倒圆半径(mm)                               | $p_1$          | 入口静压(Pa)     |
| $A$       | 过流面积(m) $A = \pi D^2 \times 10^{-6} / 4$ | $p_2$          | 出口静压(Pa)     |
| $A_{up}$  | 上游流通面积(m <sup>2</sup> )                  | $T_1^*$        | 入口总温(K)      |
| $\dot{m}$ | 质量流量(kg/s)                               |                |              |

收稿日期:2012-03-25

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2205\\_001.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2205_001.html)

基金项目:国家自然科学基金(51176004)

作者简介:李澎(1984—),男,山西吕梁人,博士生,主要从事二次空气系统瞬态算法的研究.

|          |                                                                           |           |                          |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------|
| $T_2^*$  | 出口总温(K)                                                                   | $R$       | 气体常数                     |
| $T_1$    | 入口静温(K)                                                                   | $\rho_1$  | 入口密度(kg/m <sup>3</sup> ) |
| $T_2$    | 出口静温(K)                                                                   | $\rho_2$  | 出口密度(kg/m <sup>3</sup> ) |
| $R_1$    | 入口旋转半径(m)                                                                 | $Ma_1$    | 入口马赫数                    |
| $R_2$    | 出口旋转半径(m)                                                                 | $Ma_2$    | 出口马赫数                    |
| $\mu$    | 动力黏度(Pa·s)                                                                | $\alpha$  | 孔中心轴与转轴之间夹角(°)           |
| $Re_x$   | 孔口雷诺数 $Re_x = \frac{\dot{m} \cdot D \times 0.001}{\mu \cdot A}$           | $i$       | 入射角(°)                   |
| $Re_c$   | 上游雷诺数 $Re_c = \frac{\dot{m} \cdot D_{up} \times 0.001}{\mu \cdot A_{up}}$ | $\omega$  | 旋转角速度(r/min)             |
| $C_d$    | 流量系数                                                                      | $u$       | 孔口切向速度(m/s)              |
| $C_r$    | 雷诺数修正因子                                                                   | $V_{id}$  | 绝对参考系下理论流速(m/s)          |
| $C_m$    | 马赫数修正因子                                                                   | $V_\phi$  | 气流切向速度(m/s)              |
| $C'_d$   | 超声速流量系数                                                                   | $V_z$     | 理论流速沿转轴方向分量(K)           |
| $c_p$    | 比定压热容                                                                     | $V_{rel}$ | 相对参考系下理论流速(m/s)          |
| $\kappa$ | 比热比                                                                       | $s_w$     | 涡旋强度(m <sup>2</sup> /s)  |
|          |                                                                           | $p_{sr}$  | 涡旋压升(Pa)                 |

尽管计算流体力学技术在燃气轮机设计过程中被广泛应用,但获取各部件的流动经验关联式仍然是非常必要的,尤其是对于孔口这种重要的节流限压结构对系统流量控制起着决定性的作用,经验关联式的准确性对于系统压力、流量等参数分布情况的准确评估至关重要.国内外设计人员通过试验或者计算流体动力学(CFD)仿真的手段对旋转长孔的流动及换热特征开展了较多的研究,国外提出的最新的经验关联式对于旋转长孔在大多数正常运行工况下流动特性的描述较为准确,但对于较低雷诺数以及高压比超声速状态下的运行工况,计算误差还是比较大的.二次空气系统中的节流孔口通常采用长孔的形式,对于亚声速下的湍流流动状态,它的流量系数主要由孔口本身的几何特征决定,而在超声速或低雷诺数状态下,它的流量系数则由几何特征与流动参数共同决定.对于入口处有倒圆或者倒角设计的长孔,流线及流动分离区域会发生明显变化,进而引起流量系数的改变,也是需要考虑的影响因素.在国内外对于旋转长孔已开展的研究中,张效伟等<sup>[1]</sup>通过试验方法考察了小尺度孔的长径比、孔径、倾斜角对流量系数的影响.郭成富等<sup>[2]</sup>通过试验的方法对进口倒圆半径对流量系数的影响进行了深入研究.曹睿等<sup>[3]</sup>通过数值仿真的方法,研究了流动状态及孔结构参数对锐边孔口的流量系数的影响.这类研究定性地考察了几何及流动特征参数对流动特性的影响,并未提出定量的分析手段.国外的 McGreehan 等<sup>[4]</sup>提出了带有入口倒圆结构的长孔的流量系数经验关联式,并跟已有试验数据对比,证明了其书序模型的合理性. Idris 等<sup>[5]</sup>

探索了旋转对孔口流量系数的影响,并提出旋转入射角修正方程组,并通过与试验数值进行对比,吻合度较高.经验证,在国外最新研究得到的模型在亚声速湍流工况下模拟准确度较高,但在超声速及低雷诺数状态下误差较高.本文将提出全新的修正方式,并结合已有经验及仿真数据,采用流体网络法<sup>[6]</sup>对入口带倒圆结构的长孔的数学模型进行开发,模型除了考虑孔口几何特征的影响之外,还考虑了入射角及各种状态下流动参数的影响<sup>[7]</sup>.除此之外,超声速状态下的流动也是该模型需要考虑的内容.开发完成的模型适用范围广,只需基本的几何特征参数及进出口边界条件便可进行求解,因此可以作为二次空气系统一维仿真的标准化模型使用.

## 1 旋转长孔模型

图 1 所示为缩流断面在孔口中出现的位置示意.

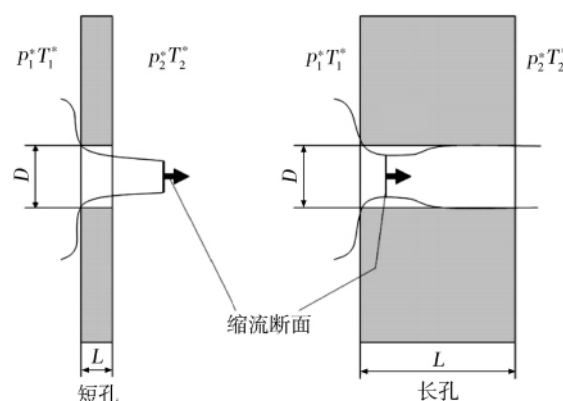


图 1 孔口缩流断面示意图

Fig. 1 Sketch of vena contracta of orifices

旋转长孔的几何结构如图 2 所示,本文所涉及的各项参数的物理意义和单位如下所示,旋转长孔的截面形式为圆形,由于二次空气系统中的节流长孔大多为盘孔,其上下游流通面积相对较大,因此可忽略上下游面积对流动的影响.本文重点考察在不同的进出口压力边界条件下,孔长孔径比  $L/D$ ,倒圆孔径比  $r/D$ ,入射角  $i$ 、雷诺数以及马赫数等因素对孔口流量系数的影响,以得出流量系数经验关联式及修正式,从而实现计算模型的标准化的.

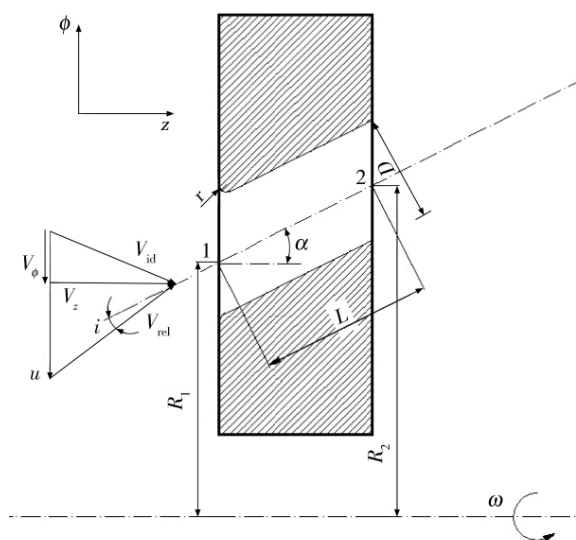


图 2 入口带倒圆的旋转长孔结构示意图

Fig. 2 Sketch of rotating long orifice with radiused inlet

### 1.1 涡旋压升

涡旋用来描述气体动能中切向部分的分量,由于这部分动能的存在,旋转长孔的节流效应会受到影响.不论气流的流动方向如何,涡旋造成的压升总是体现在旋转半径较小的一侧,并影响到进出口的压比.当进口半径  $R_1$  小于出口半径  $R_2$  时,进出口压比  $p_1^*/p_2^*$  受涡旋影响而增大,流量增加;反之,当进口半径  $R_1$  大于出口半径  $R_2$  时,进出口压比  $p_1^*/p_2^*$  受涡旋影响而减小,流量降低.涡旋压升 SPR 由进出口气流旋转角速度以及进出口旋转半径共同决定.计算公式如下所示<sup>[8]</sup>:

$$p_{sr} = \frac{\bar{\rho}}{4} \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{R_1 - R_2} \right)^2 (R_2^4 - R_1^4) - \frac{2\bar{\rho}}{3} \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{R_1 - R_2} \right) \left[ \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{R_1 - R_2} \right) R_1 - \omega_1 \right] (R_2^3 - R_1^3) + \frac{\bar{\rho}}{2} \left[ \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{R_1 - R_2} \right) R_1 - \omega_2 \right]^2 (R_2^2 - R_1^2) \quad (1)$$

在公式(1)中,  $\bar{\rho}$  代表进出口平均密度,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别代表进出口的气流旋转角速度.对于旋转长孔来说,  $\omega_1 = V_{\phi 1}/R_1$ ,  $\omega_2 = V_{\phi 2}/R_2$ .

### 1.2 控制方程

对于流动方向与流通截面相垂直的情况,其理论流量由上下游压力与气体本身的属性决定,式(2)即为用来计算理论流量的气体动力学方程

$$\dot{m}_{id} = \frac{p_1^* A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \quad (2)$$

式(2)试用范围为马赫数小于 1 的亚声速流动工况.

流量系数用来描述实际流量与理论流量的相对大小.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{id}} \quad (3)$$

进而可以得到质量流量与流量系数、进出口压力与温度之间的关系如式(4)所示

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\frac{p_1^* A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (4)$$

因此,对于旋转孔口的流动计算,关键在于流量系数  $C_d$  的获取,也是本文的主要研究内容.流量系数的影响因素主要包括以下这些方面:

- 1) 雷诺数  $Re$ .
- 2) 入口倒圆或倒角结构.
- 3) 孔中心轴与转轴之间的夹角  $\alpha$ .
- 4) 孔的截面形式.
- 5) 孔长与孔径比.
- 6) 孔的转速  $\omega$  与旋转半径  $R$ .
- 7) 马赫数  $Ma$  与可压缩性.
- 8) 气流入射角  $i$ .

绝对参考系下沿孔中心轴方向的理论流速由式(5)确定

$$V_{id} = \sqrt{\frac{2\kappa \cdot R \cdot T_1^*}{\kappa-1}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (5)$$

相对参考系下的总温及总压定义如下:

$$T_{1,rel}^* = T_1^* \cdot \left[ 1 + \frac{(u - V_{\phi 1})^2}{2c_p T_1^*} \right] \quad (6)$$

$$p_{1,rel}^* = p_1^* \cdot \left[ 1 + \frac{(u - V_{\phi 1})^2}{2c_p T_1^*} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (7)$$

相对参考系下沿孔中心轴方向的理论流速则由绝对参考系下的理论流速  $V_{id}$  与气流相对孔口

的切向流速  $u - V_\phi$  共同确定

$$V_{\text{rel}} = \sqrt{V_{\text{id}}^2 + (u - V_\phi)^2} \quad (8)$$

以及

$$u - V_\phi = V_{\text{rel}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (p_1/p_{1,\text{rel}}^*)^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - (p_2/p_{1,\text{rel}}^*)^{(\kappa-1)/\kappa}}} \quad (9)$$

在文献[7]中,气流切向流速  $V_\phi$  由上游涡旋强度确定,如式(10)所示

$$V_\phi = \frac{S_w}{R_1} \quad (10)$$

由此即可得到入射角  $i$

$$i = \arctan\left(\frac{\sqrt{(V_{\text{id}} \cdot \sin \alpha)^2 + (u - V_\phi)^2}}{V_{\text{id}} \cdot \cos \alpha}\right) - \alpha \quad (11)$$

在高速旋转状态下,涡旋压升的影响不可忽略,尤其是在高转速状态下.当  $R_1 < R_2$  时

$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{(p_1^* + p_{\text{sr}})A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^* + p_{\text{sr}}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^* + p_{\text{sr}}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (12)$$

当  $R_1 \geq R_2$  时

$$\dot{m} = C_d \cdot \frac{(p_1^* - p_{\text{sr}})A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^* - p_{\text{sr}}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^* - p_{\text{sr}}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (13)$$

### 1.3 流量系数

在文献[4]中,McGreenhan 与 Schotsch 提出入口带倒圆结构的静止长孔的流量系数经验关联式

$$C_d = 1 - g \cdot \left\{ 1 - \left[ \left( 0.9981 - \frac{4.73}{\sqrt{Re_x}} \right) - f \cdot \left( 0.4096 - \frac{4.73}{\sqrt{Re_x}} - \frac{372}{Re_x} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

其中

$$f = 0.008 + 0.992 \times e^{-5.5(r/D) - 3.5(r/D)^2} \quad (15)$$

$$g = (1 + 1.3 \times e^{-1.606[(L-r)/D]^2}) \cdot (0.435 + 0.021 \cdot \frac{L-r}{D}) \quad (16)$$

本文将以该经验关联式为基准,在考虑不同几何特征的情况下,充分考察上游流动雷诺数、马赫数及可压缩性对流动的影响,对经验关联式进行修正.

$$C_{d,i=0} = C_d \cdot C_r \cdot C_m \quad (17)$$

旋转状态下入射角对流量系数的修正则采用 Marcus<sup>[9]</sup> 提出的修正方程进行修正.

#### 1.3.1 雷诺数

雷诺数的修正主要针对  $Re_c$  小于 20000 时的工况,分别针对孔长孔径比  $L/D$ ,以及倒圆半径与孔径的比值  $r/D$  进行修正.本文采用商业软件 Simerics 获取雷诺数修正因子,图 3 所示为简化后的 CFD 计算模型,通过自适应二叉树方法划分网格<sup>[10]</sup>.在不同出口流速下,通过改变孔长孔径比  $L/D$  (0.5~10) 以及入口倒圆半径与孔径比  $r/D$  (0.02~0.5),考察不同雷诺数下的实际流量系数,并对采用式(14)得到的流量系数进行修正,  $C_r = C_{rl} \times C_{rr}$ ,修正之后的流量系数对应的流量与 CFD 结果相符.

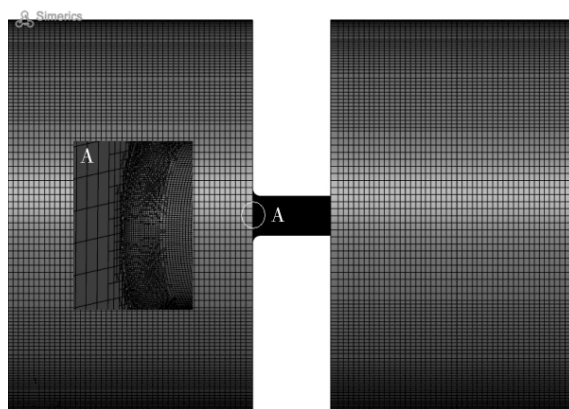


图 3 静止长孔 CFD 计算模型

Fig. 3 CFD model of stationary long orifice

图 4 为在相同的进出口压力边界条件下具有不同入口倒圆半径的静止长孔压力云图.

由此可见:随着倒圆半径的增加,入口处由于流动分离造成的低压区不断缩小,缩流断面的流通面积不断加大,孔口流通能力增强.

最终得到不同工况下的流量系数修正因子  $C_{rl}$  及  $C_{rr}$  分别如图 5 与图 6 所示.

#### 1.3.2 可压缩性

随着马赫数的增加,气体的可压缩性对流动产生了巨大的影响,在文献[11]中,Parker 等提出可压缩性对长孔流量系数影响的考量方法.在本文中,可压缩性的影响通过对进出口平均马赫数以及流量系数进行修正来考虑,并得到了如图 7 所示的一组曲面.

由图 7 可见,当马赫数小于 0.4 时,气体的可压缩性对流动的影响并不是很大;当马赫数大于

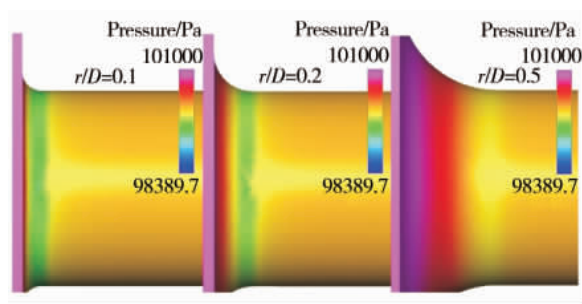


图 4 静止长孔压力云图

Fig. 4 Pressure distribution sketch of stationary long orifice

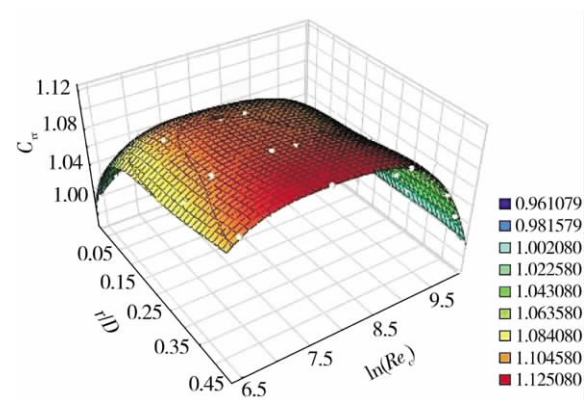


图 6 流量系数修正因子  $C_{rr}$

Fig. 6 Correction factor  $C_{rr}$  for flow coefficient

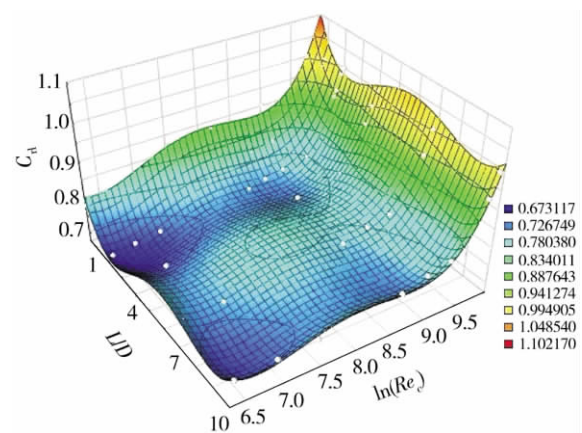


图 5 流量系数修正因子  $C_{rl}$

Fig. 5 Correction factor  $C_{rl}$  for flow coefficient

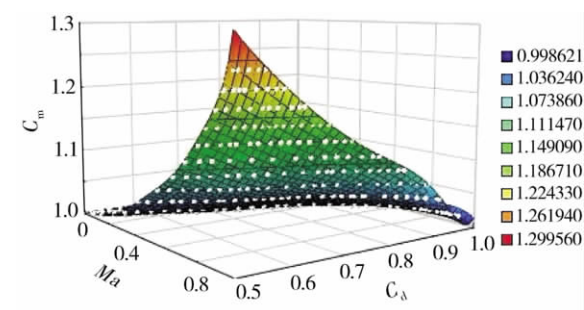


图 7 流量系数修正因子  $C_m$

Fig. 7 Correction factor  $C_m$  for flow coefficient

0. 4, 气体的可压缩性对流动的影响则不可忽略.

1. 3. 3 入射角

在文献[5]中,入射角对流量系数的影响可以通过式(18)来确定

$$C_d/C_{d,i=0} = \frac{1}{(i-b_1)^2 \cdot b_2 + b_3} - \frac{e^{(i/b_4+b_5)}}{b_6} \cdot (i/b_4 + b_5) + b_7 \tag{18}$$

相应的关联系数通过表 1 获取,对于该表中未涉及的情形可通过线性插值的方式近似获取.

表 1 入射角对流量系数的修正因子

Table 1 Incidence angle correction of flow coefficient

| $L/D$ | $r/D$ |                         |      |                       |      |                      |      |                         |                    |
|-------|-------|-------------------------|------|-----------------------|------|----------------------|------|-------------------------|--------------------|
|       | 0     |                         | 0.05 |                       | 0.10 |                      | 0.20 |                         | 0.50               |
| 0.4   | b1    | $3.8818 \times 10$      | b1   | $2.0072 \times 10^9$  | b1   | $8.9051 \times 10^2$ | b1   | $1.0719 \times 10^2$    | b1                 |
|       | b2    | $7.1443 \times 10^{-5}$ | b2   | $-4.7070 \times 10^8$ | b2   | $4.9939 \times 10^8$ | b2   | $1.1045 \times 10^{-4}$ | b2                 |
|       | b3    | 1.2651                  | b3   | $3.6469 \times 10^7$  | b3   | $4.2256 \times 10^7$ | b3   | 2.0305                  | b3                 |
|       | b4    | $2.6770 \times 10$      | b4   | $3.5034 \times 10$    | b4   | $3.6941 \times 10$   | b4   | $2.8734 \times 10$      | b4                 |
|       | b5    | $6.8889 \times 10^{-1}$ | b5   | 1.0875                | b5   | 1.1789               | b5   | $7.7599 \times 10^{-1}$ | b5                 |
|       | b6    | $2.0178 \times 10$      | b6   | $2.0675 \times 10$    | b6   | $2.1371 \times 10$   | b6   | $1.8456 \times 10$      | b6                 |
|       | b7    | $3.3953 \times 10^{-1}$ | b7   | 1.1561                | b7   | 1.1793               | b7   | $7.8828 \times 10^{-1}$ | b7                 |
|       | b1    | $-1.0055 \times 10^3$   | b1   | 2.2400                | b1   | $1.0810 \times 10$   | b1   | $1.4849 \times 10$      | b1                 |
|       |       |                         |      |                       |      |                      |      |                         | $1.9919 \times 10$ |

| $L/D$ | $r/D$ |                       |      |                         |      |                         |      |                         |      |                          |
|-------|-------|-----------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|--------------------------|
|       | 0     | 0.05                  | 0.10 | 0.20                    | 0.50 | 0                       | 0.05 | 0.10                    | 0.20 | 0.50                     |
| 1.25  | b2    | $-6.8224 \times 10^9$ | b2   | $5.4180 \times 10^{-3}$ | b2   | $5.7168 \times 10^{-2}$ | b2   | $3.4088 \times 10^{-2}$ | b2   | $9.5706 \times 10^{-2}$  |
|       | b3    | $2.4775 \times 10^9$  | b3   | 2.3623                  | b3   | 7.0397                  | b3   | 4.7473                  | b3   | 6.3318                   |
| 1.25  | b4    | $4.0177 \times 10$    | b4   | $2.1655 \times 10$      | b4   | $3.7874 \times 10$      | b4   | $3.5175 \times 10$      | b4   | $2.4293 \times 10$       |
|       | b5    | 1.2056                | b5   | $3.3143 \times 10^{-1}$ | b5   | 1.9351                  | b5   | 2.5651                  | b5   | $-6.8695 \times 10^{-1}$ |
|       | b6    | $1.9866 \times 10$    | b6   | $3.6611 \times 10$      | b6   | $5.9657 \times 10$      | b6   | $1.5288 \times 10^2$    | b6   | 4.0709                   |
|       | b7    | 1.2026                | b7   | $5.9411 \times 10^{-1}$ | b7   | 1.1517                  | b7   | 1.1366                  | b7   | $8.9253 \times 10^{-1}$  |
|       |       |                       |      |                         |      |                         |      |                         |      |                          |

由此可以得到如图 8 所示的一组曲线。

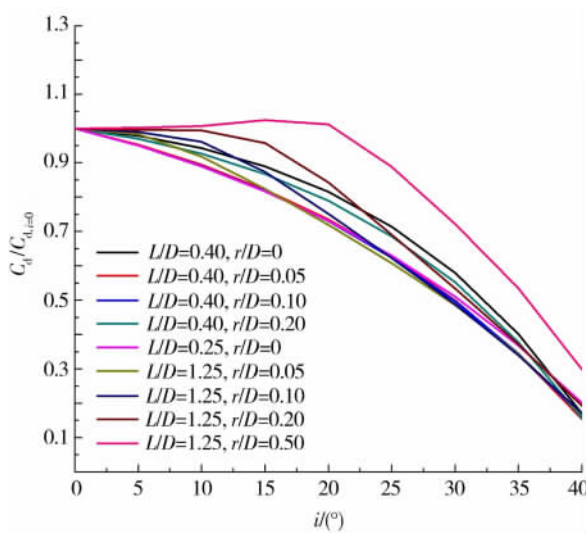


图 8 入射角对流量系数的修正

Fig. 8 Correction of incidence angle for flow coefficient

在概念化设计中,也可采用式(19)来获取实际流量系数,经验证,对于  $r/D \leq 0.2$  的情形,该公式的误差约为  $\pm 13.29\%$  [12].

$$C_d/C_{d,i=0} = -4.4513 \times 10^{-4} \cdot i^2 - 2.9937 \times 10^{-3} \cdot i + 1 \quad (19)$$

#### 1.4 超声速流动

随着进口压力的增大,流量也逐渐增大,需要注意的是,当进出口压比超过一定值,即临界压比以后,马赫数大于 1 而产生气阻,此时,孔口处于超声速流动状态下,孔口的流量由临界压比与超声速流量系数共同确定。

$$\frac{\dot{m} \sqrt{RT_1^*}}{p_1^* A} = C_d' \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_1^*}{p_2} \right)_{\text{crit}}^{-2/\kappa} - \left( \frac{p_1^*}{p_2} \right)_{\text{crit}}^{-(\kappa+1)/\kappa} \right]} \quad (20)$$

其中临界压比  $(p_1^*/p_2)_{\text{crit}}$  描述的是当出口马赫数等于 1 时对应的进出口压比值,本文采用流量系数  $C_d$  及绝对参考系下的理论流速  $V_{\text{id}}$  计算公式(5)近似获取,可以得到

$$(p_1^*/p_2)_{\text{crit}} = \left( \frac{3-\kappa}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} / C_d \quad (21)$$

在本文中,超声速流量系数  $C_d'$  通过 CFD 仿真获取,最终得到的是超声速状态下,  $C_d'$  随进出口压比  $p_1^*/p_2$  以及孔长孔径比  $L/D$  的一组变化曲面,如图 9 所示。

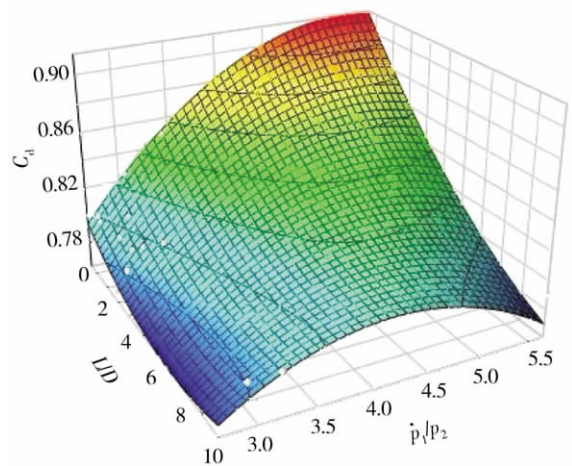


图 9 超声速流量系数

Fig. 9 Supersonic flow coefficient

对于入口带倒圆结构的长孔的超声速流量系数,本文提出式(22)所示的修正公式进行修正。

$$C_d' = C_{d,r=0}' \times [0.246 \times (r/D)^3 - 0.422 \times (r/D)^2 + 0.3 \times (r/D) + 1.025] \quad (22)$$

## 2 验证计算

### 2.1 全微分方程

采用流体网络法对旋转长孔的经验关联式进

行开发,仅将长孔的几何特征及运动特征作为求解条件,相应的流动特征由上下游压力及各修正方程确定。

根据全微分理论,可将元件质量流量描述为进出口总压的全微分关系式,如下所示:

$$\Delta \dot{m} = \frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*} \Delta p_1^* + \frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*} \Delta p_2^* \quad (23)$$

那么对于压声速流动状态下的旋转长孔,当  $R_1 < R_2$  时,  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*}$  与  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*}$  分别为

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*} = \frac{C_d \cdot A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^* + p_{sr}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^* + p_{sr}} \right)^{\frac{(\kappa+1)}{\kappa}} \right] \quad (24)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*} = 0 \quad (25)$$

当  $R_1 > R_2$  时,  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*}$  与  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*}$  分别为

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*} = \frac{C_d \cdot A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1^* - p_{sr}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1^* - p_{sr}} \right)^{\frac{(\kappa+1)}{\kappa}} \right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*} = 0 \quad (27)$$

而对于超声速流动状态,  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*}$  与  $\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*}$  分别为

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_1^*} = \frac{C'_d \cdot A}{\sqrt{RT_1^*}} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \cdot \left[ \left( \frac{p_1^*}{p_2} \right)_{\text{crit}}^{-2/\kappa} - \left( \frac{p_1^*}{p_2} \right)_{\text{crit}}^{-(\kappa+1)/\kappa} \right] \quad (28)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial p_2^*} = 0 \quad (29)$$

此外,根据理想气体状态方程,进出口密度  $\rho$  由进出口静压  $p$ 、静温  $T$  及气体常数  $R$  确定。

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (30)$$

基于以上方程组,采用流体网络法对其进行验证,结果表明该模型具有良好的收敛性,可以满足二次空气系统仿真的要求。

## 2.2 计算工况

本文开发的模型采用 Simerics 进行验证,为了充分考察长孔几何特征、流动参数、进出口边界条件及旋转效应对其流动特性的影响,计算了在不同进口压力(从 100~250 kPa,总温为 573.15

K),以及不同的长孔几何尺寸( $L=15\sim120$  mm,  $r=0.6\sim12$  mm,  $D$  为 30 mm)。出口总压给定 100 kPa,进出口旋转半径  $R_1=R_2=0.1$  m,长孔旋转角速度  $\omega=5\,000$  r/min。流体工质采用理想干空气。

Simerics 验证模型如图 10 所示,通过计算长孔在不同的几何特征下的流动特征来考察计算模型的准确性。

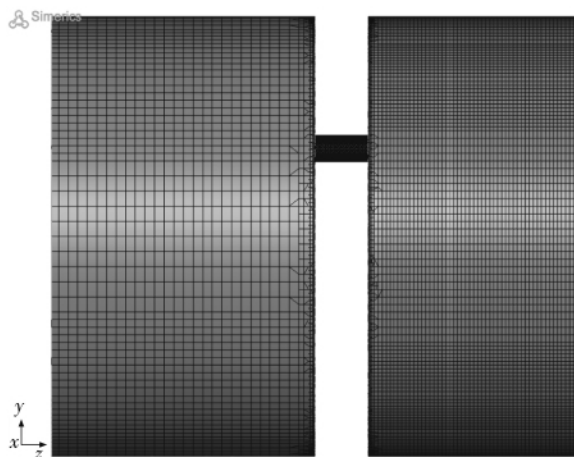


图 10 Simerics 验证模型

Fig. 10 Simerics model for verification

## 3 结果分析

在不同的进口压力条件下,考察孔长与入口倒圆半径对长孔流量的影响。图 11 所示为转速分别为 0 r/min 与 5 000 r/min 时,及入口倒圆半径  $r=2$  mm 的情况下,孔长对质量流量的影响及计算结果验证对比。

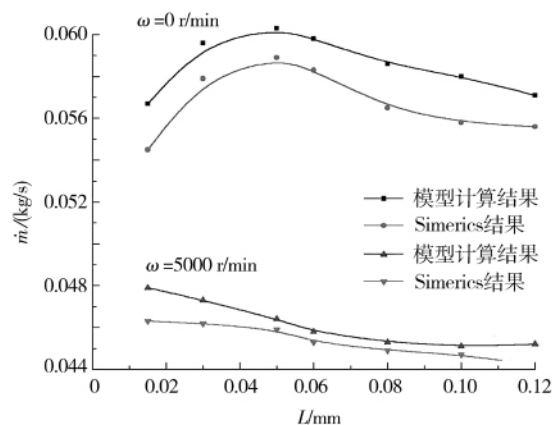


图 11 孔长对流动的影响

Fig. 11 Influence of length on flow

在静止状态下,随着孔长的增加,孔口的流量

呈现出先增加后减小的趋势,  $L=0.05\text{ m}$  时孔口的流量最大, 这表明在给定计算条件下, 缩流断面出现的位置在  $0\sim 0.05\text{ m}$  之间, 当  $L$  大于  $0.05\text{ m}$ , 随着  $L$  的增大, 沿程损失逐渐增大, 流量逐渐减小. 而在  $5000\text{ r/min}$  的旋转状态下, 缩流断面出现的位置小于最小孔长  $0.015\text{ m}$ , 因此随着孔长的增大, 流量受沿程损失影响呈现出单调下降的趋势. 本文所创建的长孔模型计算结果与 Simerics 验证结果最大偏差约为  $4.2\%$ .

图 12 所示为转速分别为  $0\text{ r/min}$  与  $5000\text{ r/min}$  时, 及孔口长度  $L=0.06\text{ m}$  的情况下, 入口倒圆半径对质量流量的影响及计算结果验证对比.

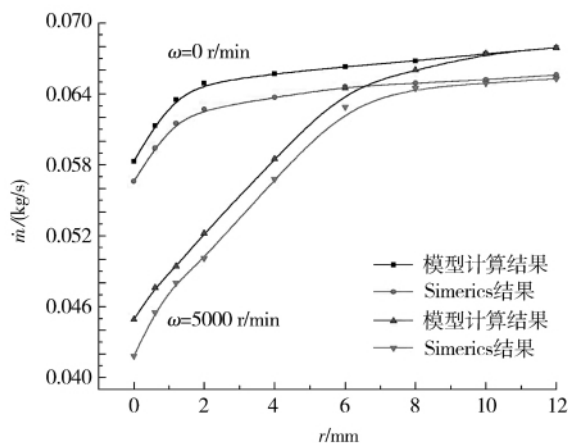


图 12 入口倒圆半径对流动的影响

Fig. 12 Influence of inlet radius on flow

由此可见, 随着入口倒圆半径的不断增大, 长孔的流量逐渐增大, 这是由于倒圆角使得入口处的流动分离现象减弱, 缩流断面的有效流通面积增大, 进而导致流通能力的增强. 在  $5000\text{ r/min}$  的旋转状态下亦呈现出这样的规律, 不过随着流量的增大, 入射角逐渐减小, 当小于  $12^\circ$  以后, 旋转的影响可以忽略不计. 经验证, 本文所创建的长孔模型计算结果与 Simerics 验证结果最大偏差约为  $6.2\%$ .

图 13 显示的是静止状态下, 入口倒圆半径  $r=2\text{ mm}$  及孔口长度  $L=0.06\text{ m}$  的情况下, 入口压力对流量的影响及计算结果验证对比.

可见, 随着入口压力的不断增加, 孔口的流量也不断增大, 不过对于上下游面积较大的“盘孔”, 当马赫数大于 1 时所表现出的“气阻”效应并不是很明显. 本文所创建的长孔模型计算结果与 Simerics 验证结果最大偏差约为  $6.6\%$ .

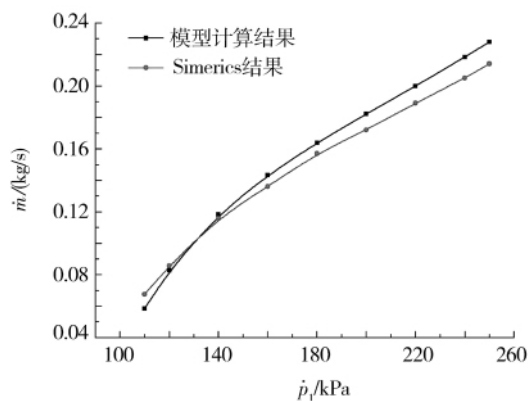


图 13 入口压力对流动的影响

Fig. 13 Influence of inlet pressure on flow

## 4 结 论

本文通过深入研究入口带倒圆结构的孔口的流动特征提出该元件通用性更强的计算模型, 基于该计算模型, 研究人员只需根据入口带倒圆结构的孔口的几何特征参数即可模拟其流动特征, 不仅大大地提高了工作效率, 而且增强了该元件的易用性. 该模型考虑的影响因素较为全面, 不仅可以模拟低雷诺数下的层流流动状态, 还可以模拟旋转、高马赫数及超声速下的各种复杂工况, 经过 Simerics 进行验证, 可得到以下结论:

- 1) 在相同的运行条件下, 该模型的计算结果与 Simerics 最大偏差不得超过  $6.6\%$ , 结果可靠性高.
- 2) 对于低雷诺数、高马赫数、超声速下的流量系数经验关联式, 本文模型通过大量的 CFD 仿真来获取, 积累的数据具有很好的传承性, 大大节省了日后实际应用时所需的工作量.
- 3) 经大量验证工况表明: 该模型具有很好的收敛性.
- 4) 该模型易用性强, 只需要提供孔的基本几何特征参数就可以模拟其流动特征, 使用非常方便, 大大提高了工作效率.

综上所述, 开发完成之后的模型适用于具有不同几何特征的节流长孔, 且具有良好的收敛性, 采用内流系统商业 CFD 软件 Simerics 对其进行验证, 结果表明: 对于绝大多数计算工况, 该模型的计算结果都与 CFD 结果吻合良好. 因此, 该模型可以广泛应用于二次空气系统的仿真计算.

## 参考文献:

- [1] 张效伟, 朱惠人, 张霞. 小尺度孔的流量系数试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2479-2485.

- ZHANG Xiaowei, ZHU Huiren, ZHANG Xia. Experiment of discharge coefficients for small scale cylindrical holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25 (11): 2479-2485. (in Chinese)
- [2] 郭成富, 王秀兰, 王勇. 倒(圆)角进口圆孔流量系数的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, 10(4): 10-15.
- GUO Chengfu, WANG Xiulan, WANG Yong. Experimental investigation on discharge coefficients of cylinder hole with a chamfered or rounding inlet [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1997, 10(4): 10-15. (in Chinese)
- [3] 曹睿, 刘艳升, 严超宇. 垂直锐边孔口的自由出流特性[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2175-2180.
- CAO Rui, LIU Yansheng, YAN Chaoyu. Characteristics of vertical sharp-edged orifice discharge [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59 (9): 2175-2180. (in Chinese)
- [4] McGreehan W F, Schotsch M J. Flow characteristics of long orifices with rotation and corner radiusing [J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110(4): 213-217.
- [5] Idris A, Pullen K R, Read R. The influence of incidence angle on the discharge coefficient for rotating radial orifices [R]. GT2004-53237, 2004.
- [6] 陶智, 徐国强, 丁水汀. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [7] Alexiou A, Mathioudakis K. Secondary air system component modeling for engine performance simulation [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131 (5): 031202. 1-031202. 9.
- [8] Miller D S. Internal flow systems [M]. 2nd ed. Cranfield: BHR Group Limited, 1996.
- [9] Huning M. Comparison of discharge coefficient measurements and correlations for orifices with cross-flow and rotation [J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132: 031017. 1-031017. 10.
- [10] JIANG Yu, Furmanczyk M. A three-dimensional design tool for crescent oil pumps [R]. Warrendale: SAE, 2008-1-0003, 2008.
- [11] Parker D M, Kercher D M. An enhanced method to compute the compressible discharge coefficient of thin and long orifices with inlet corner radiusing [J]. Heat Transfer in Gas Turbine Engines, 1991, 188(1): 156-163.
- [12] Meyfarth P F, Shine A J. Experimental study of flow through moving orifices [J]. Basic Engineering, 1965, 87 (1): 1082-1083.
- [13] Alvi S H, Sridharan K. Loss characteristics of orifices and nozzles [J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 100: 299-307.
- [14] Lichtarowitz A, Duggins R K. Discharge coefficients for incompressible noncavitating flow through long orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1965, 7 (2): 210-219.
- [15] Hay N, Spencer A. Discharge coefficients of cooling holes with radiused and chamfered inlets [J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(4): 701-706.