

迷宫式密封装置气弹力的计算

西北工业大学 秦卫阳** 顾家柳

【摘要】 采用射流理论和 BLASIUS 圆管理论, 导出了密封中各个动力系数的表达式, 使密封中各个动力系数的计算更加实用、简单。

主题词: 迷宫式密封 转子 气动力弹性 计算

1 基本方程的推导

对于控制体 I、II (见图 1) 其连续方程分别为:

$$\frac{l}{RT} \frac{\partial (p_i \delta_i)}{\partial t} + \frac{l}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{1,i} \delta_i)}{\partial \theta} + \dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i + \dot{m}_r = 0 \quad (1)$$

$$C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{2,i})}{\partial \theta} - \dot{m}_r = 0 \quad (2)$$

其中 $C_1 = (r - 0.5h)/r$ 。整个密封的连续性方程为

$$\frac{l}{RT} \frac{\partial (p_i \delta_i)}{\partial t} + C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{l}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{1,i} \delta_i)}{\partial \theta} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{2,i})}{\partial \theta} + \dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i = 0 \quad (3)$$

对于控制体 I、II, 动量矩方程的一般表达式为

$$-\frac{l}{r} \frac{\partial (\rho_i \delta_i)}{\partial \theta} + \tau_{u,il} - \tau_{u,i,l} = \frac{l}{RT} \frac{\partial (p_i w_{1,i})}{\partial t} + \frac{1}{rRT} \frac{\partial (p_i \delta_i w_{1,i}^2)}{\partial \theta} + \dot{m}_{i+1} w_{1,i} - \dot{m}_i w_{1,i-1} + w_{o,i} \left[C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{2,i})}{\partial \theta} \right] \quad (4)$$

$$\tau_{t,i} C_2 l - \tau_{u,il} - C_1 \frac{hl}{r} \frac{\partial p_i}{\partial \theta} = C_1^2 \frac{hl}{RT} \frac{\partial (p_i w_{2,i})}{\partial t} + C_1 \frac{hl}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{2,i}^2)}{\partial \theta} - w_{o,i} \left[C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial (p_i w_{2,i})}{\partial \theta} \right] \quad (5)$$

$r_e = \frac{(r-h)^2 l + 2(r-0.5h)^2 h}{l}$, $C_2 = r_e/r$, 可由漏气量方程得到 $\dot{m}_i = K_{1i} K_{2i}$

$(p_{i-1}^2 - p_i^2)/RT$ 。其中 K_{1i} 为齿型修正系数, K_{2i} 为流量系数。由文献 [1] 可得 $w_{oi} = 0.58 w_{1,i} + 0.42 w_{2,i}$

对于流体与静子、流体与转子之间的摩擦力, 应用 BLASIUS 的切应力模型, 可得 $\tau = \lambda \rho w^2/2$, 而 $\lambda = n_o Re^m$ 。其中 w 为流体相对于表面的速度, n_o, m 为实验测得的系数, Re 为雷诺数。对于控制体 I、II 气流间的摩擦力, 应用射流理论, 可得到:

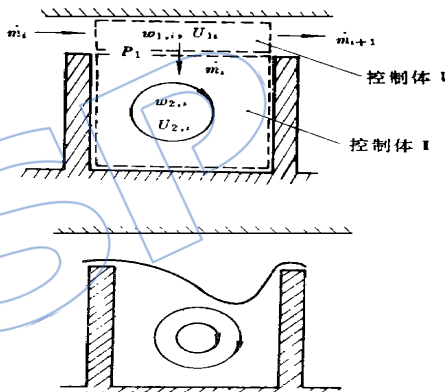


图 1 控制体

$$\frac{l}{RT} \frac{\partial p_i \delta_i}{\partial} + C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial} + \frac{l}{rRT} \frac{\partial p_{iw1,i} \delta_i}{\partial} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial p_{iw2,i}}{\partial} + \dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i = 0 \quad (6)$$

$$- \frac{l}{r} \frac{\partial \rho_i \delta_i}{\partial} + \tau_{u,i} l - \tau_{st,i} l = \frac{l}{RT} \frac{\partial p_i \delta_{w1,i}}{\partial} + \frac{1}{rRT} \frac{\partial p_i \delta_{w2,i}}{\partial} + \dot{m}_{i+1} w_{1,i} - \dot{m}_{iw1,i-1}$$

$$+ w_{\alpha,i} \left[C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial p_{iw2,i}}{\partial} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{t,i} C_2 l - \tau_{u,i} l - C_1 \frac{hl}{r} \frac{\partial p_i}{\partial} = C_1^2 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_{iw2,i}}{\partial} + C_1 \frac{hl}{rRT} \frac{\partial p_{iw2,i}}{\partial} - w_{\alpha} \left[C_1 \frac{hl}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial} + \frac{hl}{rRT} \frac{\partial p_{iw2,i}}{\partial} \right] \quad (8)$$

其中: $\tau_{st,i} = (1/2) \rho_i \frac{U_{1,i}^2 + w_{1,i}^2 n_s (u_{r1,i} D_{h1,i} / \nu)^{m_s}}{v^{m_r}}$, $\tau_{t,i} = (1/2) \rho_i u_{r2,i} (r_e \omega - w_{2,i}) n_r (u_{r2,i} D_{h2,i} / \nu)^{m_r}$, $\tau_{u,i} = 0.142 \rho_i \frac{(w_{2,i} - w_{1,i})^2 + (U_{2,i} - U_{1,i})^2 (w_{2,i} - w_{1,i})}{v^{m_r}}$ 。而 $w_{r1,i} = \frac{U_{1,i}^2 + w_{1,i}^2}{2\delta_i l} (\delta_i + l)$, $w_{r2,i} = \frac{(r_e \omega - w_{2,i})^2 + U_{2,i}^2}{2\delta_i l} (h + 1)$, $D_{h1,i} = \frac{2hl}{h+1}$, $U_{1,i} = \dot{m}_i l / (\delta_i p_i)$, $U_{2,i} = 0.206 U_{1,i}$ 。方程(6)~(8)中,未知量为 $p_i, w_{1,i}, w_{2,i}$,所以方程组是封闭的。

2 对方程组的求解及计算结果

上述方程组为一偏微分方程组,采用摄动法求解。假设转子进动为小偏移,就可得到零阶摄动与一阶摄动方程。由零阶摄动方程可以得到转子在无偏移的情况下密封内气流的周向速度 $w_{10,i}, w_{20,i}$ 以及泄流率 $\dot{m}_i$,然后解一阶摄动方程,就可得到转子在径向扰动情况下产生的压力及周向速度的变化^[3]。其中各动力系数表达式为:

$$K_{XX} = \sum_{i=1}^{N-1} \pi(r-h) l F_{cci}^a, \quad K_{XY} = \sum_{i=1}^{N-1} \pi(r-h) l F_{cci}^b$$

$$C_{XX} = -\frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{N-1} \pi(r-h) l F_{sci}^a, \quad C_{XY} = -\frac{1}{\omega} \sum_{i=1}^{N-1} \pi(r-h) l F_{sci}^b$$

其中, $F_{cci}^a, F_{cci}^b, F_{sci}^a, F_{sci}^b$ 都可通解一个矩阵方程得到。这样,就可求出 $K_{XX}, K_{XY}, C_{XX}, C_{XY}$ 。

对于文献[2]中的具体算例,采用本文的公式进行了计算,其迷宫式密封的具体尺寸为:齿数 $N=16$,半径 $R=7.25\text{mm}$,齿间隙 $C_r=0.3\text{mm}$,齿高 $h=3.175\text{mm}$,齿间距 $l=3.175\text{mm}$ 。计算结果见图2。(其中,○为实验值;●为本文计算值;△为文献[2]中计算值)。可以看出,本文的理论计算结果较之文献[1]中的理论计算结果,更接近于实验结果。本文还对一实际的封严蓖齿装置进行了计算,原始数据及结果如表1(列出了 K_{XY} 与 C_{XX} 的计算数据)。齿数 $N=3$,半径 $R=250\text{mm}$,齿间隙 $C_r=0.3\text{mm}$,齿高 $h=2.5\text{mm}$,齿间距 $l=2.5\text{mm}$ 。

表1 计算结果

$w_0(\text{m/s})$	-100	-50	0	50	100
$K_{XY}(\text{N/mm})$	-6.86	-3.66	-0.48	2.70	5.87
$C_{XX}(\text{N} \cdot \text{s/m})$	16.48	16.40	16.31	16.21	16.09

计算封严装置的等效动力参数,目的是为了研究密封装置的稳定性,进而防止自激现象的发生。由密封气弹力的表达式可见,带蓖齿转子的稳定性条件为^[4]:

$$K_{XY} - \omega C_{XX} \leq 0, \quad K_{YX} + \omega C_{YY} \geq 0 \quad (9)$$

由等效动力参数的对称性,有 $K_{XY} = K_{YX}, C_{XX} = C_{YY}$ 。将三齿密封装置结果代入可得:若进气无正预旋,都是起正阻尼作用的。由此,就可得到一个启示,即对环形密封中引入与转子转速方向

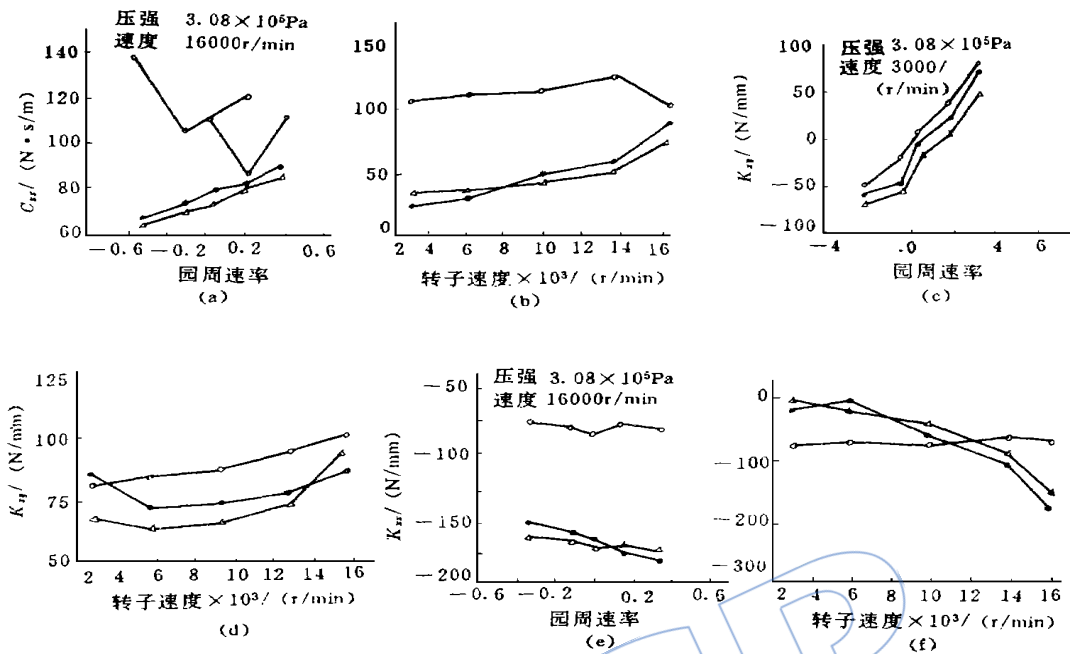


图 2 计算结果

相反的高速气流, 来增加转子的稳定性。这种想法已在实验中取得了理论的效果, 可大大降低转子的振动幅度。对其机理还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Scharer J K. Theory Versus Experiment for Rotor Dynamic Coefficients of Labyrinth Gas Seals: Part I — A Two Control Volume. ASME, J. of Vibration Acoustics, Stress and Reliability in Design, 1988, 110: 210
- 2 Scharer J K, Childs D W. Theory Versus Experiment for Rotor Dynamic Coefficients of Labyrinth Gas Seals: Part II — A Comparison to Experiment. ASME J. of Vibration Acoustics, Stress and Reliability in Design, 1988, 110
- 3 秦卫阳. 迷宫式密封装置气弹力研究: [学位论文]. 西北工业大学, 1992
- 4 顾家柳. 转子动力学. 北京: 国防工业出版社, 1985

(责任编辑 魏星禄)