

# 迷宫式气封热稳定性的简便评定法

[印度] 苏曼特·帕撒克

[提要] 在迷宫式气封中,由于转子-静子的干扰引起摩擦而产生的热量,部分被传导给转子和静子,部分通过对流由冷却空气带走,少量被辐射散出。热弹性随着转子和静子的温度上升而改变。如果由于状况变化而使得转子-静子的干扰消失,则热量就停止产生。另一方面,如果干扰加剧,则发热也增加,系统趋向不稳定并导致损坏。原则上,迷宫式气封的热稳定性现象是热弹性的。本文完全着重于热的影响,文中规定了一个比较简单的准则,以供设计师快速检查迷宫式气封的热稳定性。在稳态和非稳态设计中都用了所规定的准则并且该准则成功地预示出稳定和热不稳定状态,所讨论的一些影响参数为设计师提供了取得一种能稳定运行的迷宫式气封配置的指南。

主题词 燃气轮机 气封

符 号

$CP$  比热,千卡/公斤 $^{\circ}C$   
 $c$  元件厚度,米  
 $K$  形状因子  
 $L$  长度,米  
 $M$  质量,公斤  
 $Q$  热量,千卡  
 $R$  半径,米  
 $r$  转子下标  
 $s$  静子下标  
 $S$  表面积,米 $^2$   
 $T_0$  摩擦开始前摩擦表面的初始温度, $^{\circ}C$   
 $T_m$  转子和静子之间较低的熔融温度, $^{\circ}C$   
 $t$  从摩擦开始起的时间,小时  
 $\alpha$  传热系数(当量的),千卡/小时平方米 $^{\circ}C$   
 $\theta_0$  转子或静子的初始温度, $^{\circ}C$   
 $\theta$  转子或静子的即时温度, $^{\circ}C$   
 $\lambda$  导热系数,千卡·米/小时平方米 $^{\circ}C$

热稳定性

$\rho$  密度,公斤/立方米

$\tau$  时间常数,在摩擦开始后,转子或静子达到温度 $\theta$ 所需的时间,小时

## 引 言

在小型燃气轮机中迷宫式气封的设计对控制气体漏泄、提供精密计量的冷却气流,推力平衡、轴承箱气密以及防止在不希望吸入热燃气的区域中吸入热燃气是特别重要的。发动机的效率与级间漏泄以及发动机中其它地方的漏泄有直接关系。据估计,这些漏泄减少25%就可使耗油率降低27%。为了减少漏泄和最有效地完成其它功能,总是希望迷宫式气封中的转子-静子间隙是可运转的最小间隙。

临界转速时的转子挠度、机动负荷时转子和静子的相对挠度、加速和减速时的热弹性挠度以及所有的瞬变状态使得转子和静子间的间隙不能取得过小。从而限制了气封的性能。

在这些情况下,有两种气封设计方法。一种方法是保持足够大的间隙,使得在任何情况下都不出现转子-静子摩擦。这样导致

间隙相当大,因此气封的功效较低。为了改善气封的功效,必须大大增加气封的齿数,这样不仅会增加重量,而且经常会因空间尺寸的局限而不可行。此处大的间隙是由在发动机总寿命中占时非常少的一些瞬变状态所要求的。大多数时间中,发动机是在稳定状态下工作的,而大的间隙降低了发动机稳态工作时的性能。

另一种方法是维持一个取决于制造设备的可运转的最小间隙。利用现代的制造设备所能得到的这一间隙与第一种方法相比可以小得多。这样,气封的功效提高了许多倍。然而在一些瞬变状态的短时间内,转子和静子要相互摩擦。

### 摩擦的机理

热量是由转子和静子摩擦而产生的。最简单的摩擦形式是旋转气封的一只齿和静子气封表面相摩擦,结果在摩擦接触处的温度达到了最易熔融部件(转子或静子)的熔融温度。对于许多复合材料,这是起始熔融点(固相线状态)。摩擦表面上的温度变化情况示于图1。熔融温度几乎是即刻达到的,在此之后表面温度保持不变。热量从接触面被传导到静止零件和转动零件。

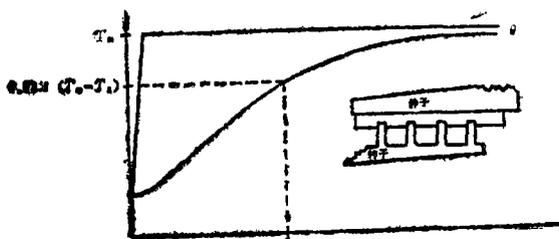


图1 转子和静子气封摩擦表面的温度变化

每个零件的温度变化是材料质量、几何形状(导热通路)和材料热力性质的函数。一部分热量通过对流传给冷却空气。这亦是对流表面和即时温度下空气热力性质的函数。一小部分热量被辐射散走,在本研究中

它被忽略不计。由于导热和对流,转子和静子的温度上升。部件温度的变化亦示于图1。转子达到稳态需要一定的时间,静子亦然。开始时温度上升是急剧的,但随着时间的进展它趋向稳定。假设  $T_m$  是转子和静子两者中较低的一个熔融温度、 $T_0$  是摩擦表面在摩擦开始前的初始温度、 $\theta_0$  是转子和静子的初始温度、 $\theta$  是转子和静子的即时温度,那么可用下式表示  $\theta$  的变化:

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_m - T_0} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中  $t$  是从摩擦开始的时间,  $\tau$  是时间常数,即转子或静子在摩擦开始后达到温度  $\theta$  所需的时间。

当  $t = \tau$  时

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_m - T_0} = 0.63 \quad (2)$$

当  $t = 3\tau$  时

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_m - T_0} = 0.95 \quad (3)$$

换言之,当  $t = 3\tau$  时,温度  $\theta$  为稳态温度的95%。这给  $\tau$  下了定义,响应的时间就是达到稳态温度的时间。时间常数给出了转子和静子分别对热输入的响应速度的概念。

### 稳定准则

理论上为了能够确保迷宫式气封的热稳定性,可以将气封的形式做成这样:由摩擦产生的热引起的热位移,使转子和静子相互分离。如果转子由于热量输入而发生热变化所需的时间比静子长很多,则转子的增长率小于静子的增长率。转子的时间常数  $\tau_r$  将比静子的时间常数  $\tau_s$  大。为了气封的热稳定性,因此要

$$\frac{\tau_s}{\tau_r} < 1 \quad (4)$$

假设

1. 为了大大地简化热弹性影响, 假设对转子和静子的热影响是类似的, 且具有同样的意义。在考虑热量输入的响应时, 假设转子和静子都是简单的圆柱体。

2. 转子和静子间的摩擦是纯径向的。

3. 因幅射引起的热交换很小, 在本研究中忽略不计。

4. 忽略不计风阻损失。

影响时可常数 $\tau$ 的参数如下:

转子或静子的质量  $M$ , 转子/静子材料的比热  $CP$ , 传热系数 (当量的)  $\alpha$  和表面积  $S$ 。

$$\tau \propto (M)^a (CP)^b (\alpha)^c (S)^d \quad (5)$$

各个参数的基本量纲如下:

时间常数 $\tau$	$\theta$
质量 $M$	$M$
比热 $CP$	$\frac{H}{MT}$

$$(6)$$

$$\text{传热系数(当量的)} \alpha \frac{H}{L^2 T \theta}$$

$$\text{表面积 } S \quad L^2$$

等式 (5) 可改写为

$$\tau = K (M)^a (CP)^b (\alpha)^c (S)^d \quad (7)$$

将基本量纲代入式 (7), 并进行求解, 得

$$\tau = K \frac{MCP}{\alpha S} \quad (8)$$

假使用下标  $s$  和  $r$  分别表示静子和转子的参数, 则

$$\frac{\tau_s}{\tau_r} = \frac{M_s CP_s / \alpha_s S_s}{M_r CP_r / \alpha_r S_r} \quad (9)$$

对于热稳定的气封,  $\tau_s / \tau_r$  必须小于 1。

应用该准则需要计算转子和静子的质量。转子和静子的比热值对应于同样的温度条件。从摩擦表面到转子和静子的传热过程是颇复杂的, 因此传热系数 (当量的) 计算

也很复杂。

摩擦接触面上的温度等于转子或静子的最易熔融部件的熔融温度 (刚出现熔融, 固态线)。由于困在转子和静子之间的空气质量很小, 所以立刻达到相同的温度。热量通过最热部件的导热和被围在中间的空气的对流传给转子和静子。然后热量通过导热横越转子/静子, 最后当转子/静子的表面受热后, 热量又被对流传给转子/静子周围的冷却空气。

现在来看图 2 中所示转子或静子部件,  $T_1$  是被围在中间的空气的温度, 它亦是摩擦部件的熔融温度。  $T_2$  和  $T_3$  分别是如图 2 中所示的不同表面的温度。  $T_4$  是周围空气的温度。假使  $Q_1$  代表通过导热和对流传入转子的热量, 那么

$$Q_1 = (T_1 - T_2) (\alpha_1 S_1 + \frac{\lambda S_2}{e_1}) \quad (10)$$

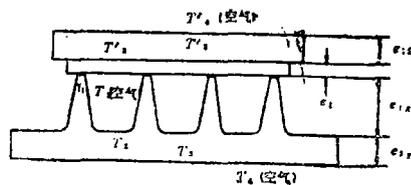


图 2

类似地, 假使  $Q_2$  是横越通过转子的热量,  $Q_3$  是由冷却空气带走的热量, 则

$$Q_2 = \frac{\lambda}{e_3} S_3 (T_2 - T_3) \quad (11)$$

$$\text{以及 } Q_3 = \alpha_4 S_4 (T_3 - T_4) \quad (12)$$

在稳定状态下,

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q = \alpha S (T_1 - T_4) \quad (13)$$

式中  $\alpha$  是转子/静子的传热系数 (当量的)。

将等式 (10)、(11)、(12) 和 (13) 联合后得

$$\frac{1}{\alpha S} = \frac{e_1}{e_1 \alpha_1 S_1 + \lambda S_2} + \frac{e_3}{\lambda S_3} + \frac{1}{\alpha_4 S_4} \quad (14)$$

利用关系式 (14) 可计算转子和静子的  $\alpha_0$ 。

假使静子采用蜂窝结构, 那末计算  $S_1$  和  $S_2$  时应注意计入实体性的影响。在具有不止一种材料的地方, 例如带有可磨材料的静子, 等式 (14) 采用如下的通用形式:

$$\frac{1}{\alpha S} = \frac{e_1}{e_1 \alpha_1 S_1 + \lambda S_2} + \sum \frac{e_3}{\lambda S_3} + \frac{1}{\alpha_4 S_4} \quad (15)$$

式中  $\sum \frac{e_3}{\lambda S_3} = \left(\frac{e_3}{\lambda S_3}\right)_1 + \left(\frac{e_3}{\lambda S_3}\right)_2 + \dots$ , 和静子的形式及其材料性能有关的参数。

### 准则的应用

等式 (9) 中得到的准则和关系式 (14) 和 (15) 指出了每个参数在设计一个稳定的迷宫式气封系统时的重要性。除了构成迷宫式气封系统的材料性质之外, 转子和静子之间质量的相对分布情况、静子、转子和转子的齿中的导热和对流的通路亦是重要的。该系统已被用于许多气封系统的研究中。一个经过验证的计算发生摩擦后各瞬变情况下温度平面分布的程序已被用来求出采用稳态准则得到的各种气封构形的温度变化, 用该程序和用稳态准则预测的气封热稳定性是一致

的。对一个在运行中由于摩擦而损坏的非稳定的气封采用该准则进行了重新设计, 发现它在修改后已变成稳定的。图 3 示出在摩擦时发生破坏的迷宫式气封, 以及在发生摩擦后转子和静子中的温度上升及  $\tau_s/\tau_r$  值。达到稳态温度的时间和这些温度本身表明了导致气封破坏的转子—静子的连续摩擦。图 4 示出用该准则修改后得到的气封构形。这种形式的气封在发生摩擦温度上升后, 静子比转子增长快。最后, 摩擦消失, 气封继续令人满意地工作。它的  $\tau_s/\tau_r$  值是 0.337。图 4 所示之气封形式在发动机中已被采用, 并且工作得很满意。表 1 示出  $\tau_s$  和  $\tau_r$ , 以及其它一些参数的数值。用本法算出的  $\tau_s$  和  $\tau_r$  与由程序算得的达到稳态温度的时间是一致的。在这里值得讲一下, 当  $\tau_s/\tau_r \leq 1$  时气封呈稳定状态, 但为了设计留有余地, 最大不应该超过  $\tau_s/\tau_r = 0.35$ 。图 7 示出带有蜂窝的另一种气封, 图 8 是已在稳定运行的修改型。表 1 所列导致参数变化的这些设计修改清楚地表明了质量以及转子和静子中的导热与对流通路的影响。由准则和程序标出的温升可以看到增加转子质量和改进它的导热能力导致迷宫式气封变成稳定。减小静子的质量并采用较短的导热通路可得到类似的影响。

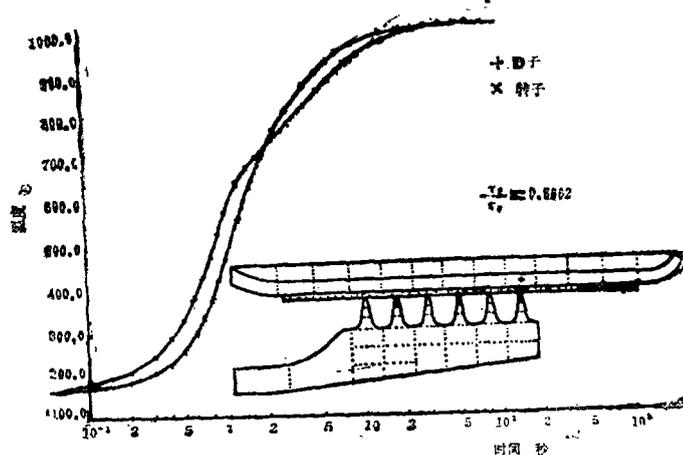


图 3

表 1

拉别令气封	图 3	图 4	图 5	图 6	图 7	图 8
齿 形						
$M_s X_{CPS}$	0.0564	0.02978	0.02978	0.02978	0.30027	0.21331
$\frac{e}{e\alpha_1 S_1 + \lambda S_2}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$	0.0185	0.01478
$\frac{e}{\lambda S_3}$	$0.43 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	$1.91 \times 10^{-3}$	$1.339 \times 10^{-3}$	$8.034 \times 10^{-4}$
$\frac{1}{\alpha_4 S_4}$	0.2219	0.2219	0.2219	0.2219	0.1384	0.14224
$\frac{1}{\alpha_s S_s}$	0.2263	0.2239	0.2239	0.2239	0.15824	0.15782
$\tau_s = \frac{M_s CPS}{\alpha_s S_s}$	0.01267	$6.667 \times 10^{-3}$	$6.667 \times 10^{-3}$	$6.667 \times 10^{-3}$	0.04752	0.03366
$M, X_{cpr}$	0.04761	0.06355	0.06719	0.0664	0.25812	0.47513
$\frac{e}{e\alpha_1 S_1 + \lambda S_2}$	$6.58 \times 10^{-2}$	$6.58 \times 10^{-2}$	$6.478 \times 10^{-2}$	$2.079 \times 10^{-2}$	0.0819	0.1519
$\frac{e}{\lambda S_3}$	$8.40 \times 10^{-3}$	$5.602 \times 10^{-3}$	$5.602 \times 10^{-3}$	$5.602 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-3}$	$2.213 \times 10^{-3}$
$\frac{1}{\alpha_4 S_4}$	0.3281	0.2395	0.2395	0.2395	0.08499	0.0681
$\frac{1}{\alpha_r S_r}$	0.4023	0.311	0.3099	0.2659	0.16825	0.2222
$\tau_r = \frac{Mrcpr}{\alpha_r S_r}$	0.0192	$1.976 \times 10^{-2}$	$2.082 \times 10^{-2}$	$1.765 \times 10^{-2}$	0.04343	0.1056
$\frac{\tau_s}{\tau_r}$	0.6662	0.3373	0.3202	0.3776	1.0941	0.3189

静子

转子

曾力图建立转子的齿形和稳定性准则间的关系。图 4 中的转子迷宫式气封齿径改变后的情况示于图 5 和图 6，但全部其它参数保持不变。其结果示于 9 图。确定齿形的形状因子  $K$  由下面的无因次表达式给出。

$$K = \frac{\tau_{\text{标准齿}}}{\tau_{\text{假设的齿}}} = \frac{\left( MCP \frac{e}{e\alpha_1 S_1 + \lambda S_2} \right)_{\text{标准齿}}}{\left( MCP \frac{e}{e\alpha_1 S_1 + \lambda S_2} \right)_{\text{假设的齿}}}$$

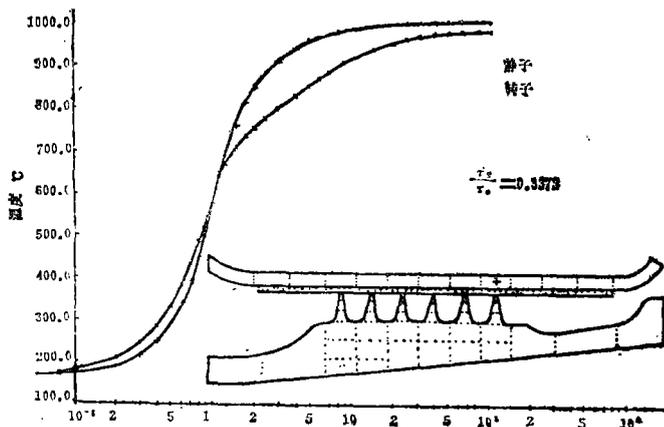


图 4

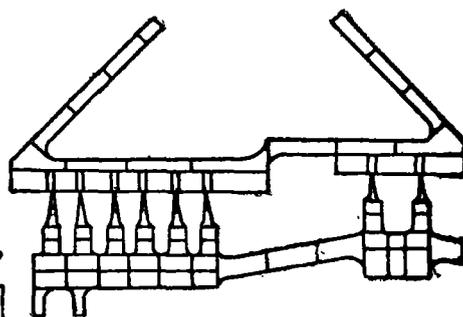


图 7

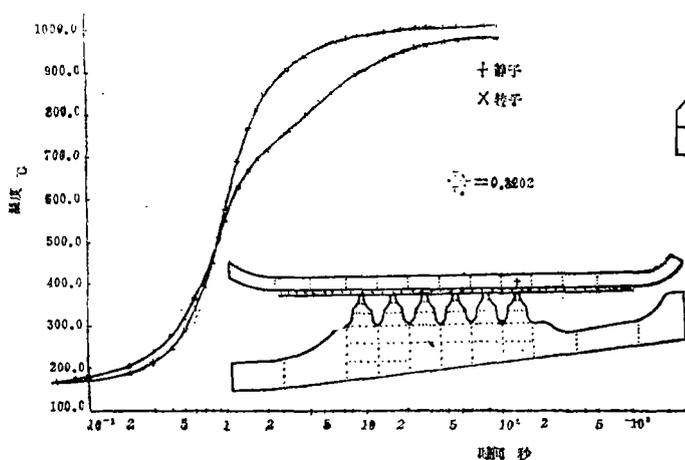


图 5

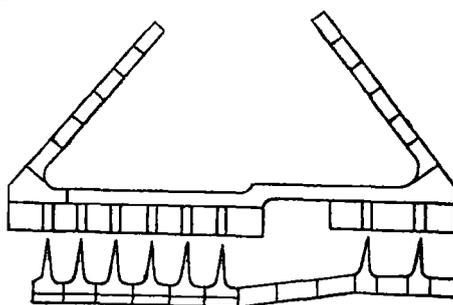


图 8

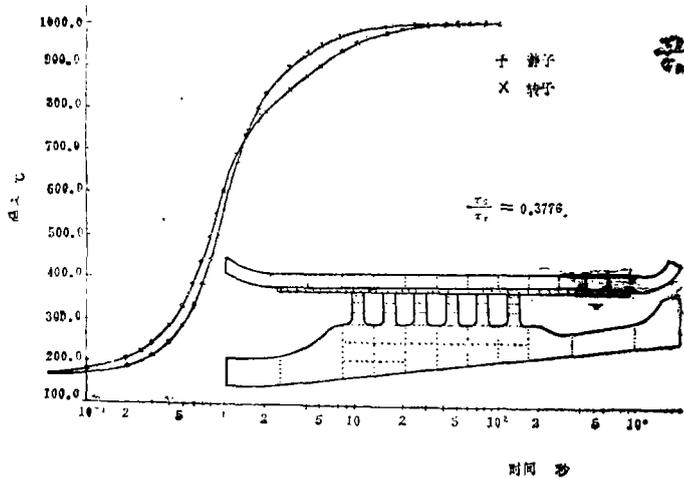


图 6

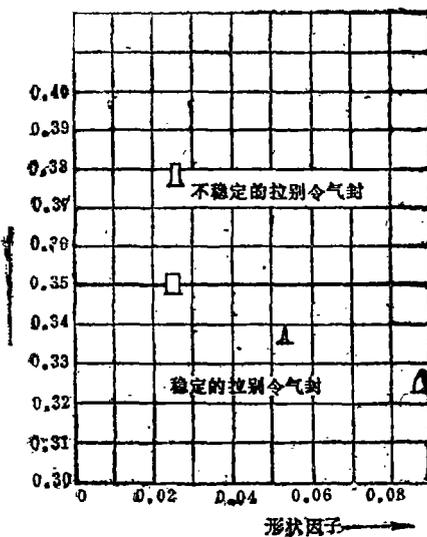


图 9

无因次化的假设齿只不过是一条等高度的连续块，其高度和标准齿的高度相等（图10）。如图9所示，从热稳定性看，一个高而薄的齿优于厚而短的齿。减薄齿就会限制将热量传导到齿的支座上。增加齿的高度就使导热路径的长度增长，从而降低了导热性。最好的齿是高而薄的齿，并且其底部较宽或较厚。较宽的底部降低齿的温度，并且减少了它和它的支承结构间的温度梯度。

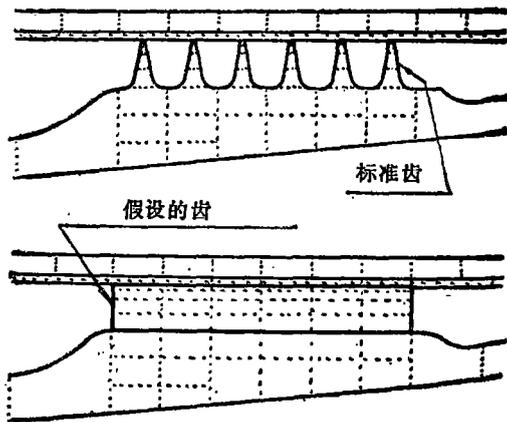


图 10

迷宫式气封稳定性的另一个重要方面是转子和静子的相对耐磨性。通过将静子的耐磨性做成大大低于转子，就会使摩擦产生的热量维持在低值，这样使转子由热造成的增长最小，否则它可能使摩擦加剧以致引起热不稳定。

假使摩擦产生的热量使转子相对静子作轴向或径向位移，则可能产生热不稳定。轴向摩擦引起齿侧面的摩擦，增加了接触表面

和相碰材料的体积。这意味着轴向摩擦产生比较多的热，并且它的流路也较宽，这增加了进入齿下支承结构的热流量。设计的一个重要方面是使气封转子在发生摩擦后相对静子的轴向位移是可忽略的。

### 结 论

本准则已在一些较大的燃气轮机中用来对许多气封设计进行分析和修改。近来又被用于设计许多无人驾驶靶机的小燃气轮机的迷宫式气封。这些气封的性能是令人满意的。该准则使设计师可以快速检验气封在运行中发生摩擦后的稳定性。虽然主要由于简化假设而使准则简化，但它和由已建立的非常成熟的程序获得的结果是很一致的。该准则强调了设计稳定气封的每个参数的相对重要性。该法亦可用于确定有前途的迷宫式气封形式。

在保持稳定性准则的简单和易用的同时，把热弹性的影响、转子在受热情况下的挠度和偏心度、受约束静子的不圆度状况以及风阻损失等包含到稳定性准则中去是值得的，这是因为设计师总是致力于在一个应用场合中找出许多复杂问题的答案，而他通常不能为他的设计的个别方面付出太多的时间。

（参考文献略）