

用压气机级间外壁静压数据 计算级特性—落后角迭代法

徐立民 张春霖 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕 采用压气机全台试验时测得的级间沿外壁静压折算出平均半径处静压,再利用通用的落后角随冲角变化的关联式,求出气流出口角和级加功量及温升,以至全部的级特性。而这个落后角关联式是利用大量试验工况点“迭代”出来的,确切地说,是使压气机计算温升与试验温升趋于一致。

关键词 压气机 全台试验 压气机级 级特性 落后角 计算方法 迭代

一、前 言

目前多级压气机全台试验的测试水平还难以准确地详细测量级间参数。只测级间外壁静压的方案多被采用,据此级间外壁静压数据整理计算级特性的工作有代表性。主要困难是没有级间温度测量值。本文提出落后角迭代法,能获得工程上满意精度的级特性。以此试验级特性和落后角关联式为基础,能很好地用来预测本压气机的转角特性以及改型、模化机特性,并已被用于几个型号的风机设计中去。

本文讨论一个10级轴流式压气机,它有3列可转导叶,设计压比6.2。试验结果表明,非设计工况的特点具有目前高压比多级轴流压气机的典型性。

二、落后角迭代法

先拟定一个通用的落后角随冲角变化的关联曲线(见图2),适用于所有级的动、静叶平均半径叶栅,从而可以解决平均半径出口气流角和级加功量的求法问题,以求得的各级级温升之和约等于压气机试验总温升为目标,再返过来修正落后角关系式。这样用大量工况点反复修正迭代同一个落后角关系式。如果迭代的工况点足够多,计算总温升与试验偏差足够小,最终总可以得到较准确的通用落后角关系式,那么,依靠级间沿壁静压计算级特性的任务即可迎刃而解。

落后角关联式:

$$\frac{\delta - \delta_r}{\varepsilon_r} = f\left(\frac{i - i_r}{\varepsilon_r}\right)$$

收稿时间: 1989-05-04

其中 $\epsilon_r = \theta + i_r - \delta_r$ 即参考工况时的气流转折角; θ 是结构弯角; i_r 是参考工况冲角, 用文献[1]中的NACA数据; δ_r 是参考工况落后角, 采用卡特公式加修正常数的方法: $\delta_r = \delta_0 + m_c \theta / \sqrt{\sigma}$, 其中 σ 是稠度, δ_0 是要迭代求出的修正常数,

$$m_c = 0.111e^{0.04285(90-r)^{0.777}} \quad r \text{ 是安装角}$$

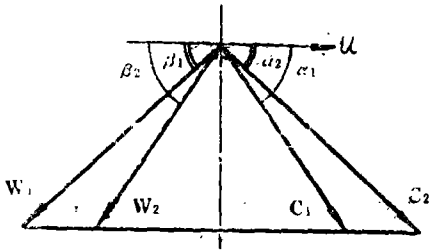


图 1 气流方向角体系

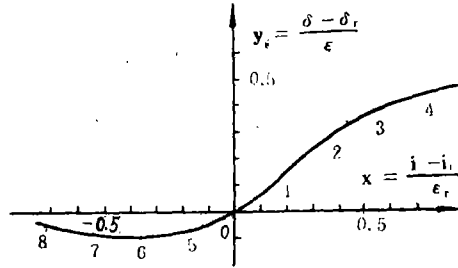


图 2 落后角关联曲线

三、平均半径处部分参数的公式推导

实际流量 $G_0 = \int_{r_h}^{r_t} C_z \rho_m F / K_G$

名义流量 $G = C_{zm} \rho_m F = K_G G_0$

其中 K_G 用设计参数求得:

$$K_G = \left(C_{zm} \rho_m F / \int_{r_h}^{r_t} C_z \rho_m F dr \right)_d$$

变工况和转角时仍用此值 (因 K_G 值非常接近1, 本压气机 K_G 设计值从第一级到第十级在1.007到1.0的范围内变化。

下标 m ——平均半径处

t ——顶部

h ——根部

d ——设计点

下面的参数不加注明的话, 均指平均半径上参数 (推导从略):

$$M_{c1}^2 = -\frac{1}{k-1} + \frac{1}{k+1} \sqrt{1 + 2R \cdot \frac{k-1}{K} \cdot T_1^* \left(\frac{G}{p_1 F \sin \alpha_1} \right)^2}$$

$$= f(G, \alpha_1, p_1, T_1^*)$$

$$P_1^* = p_1 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 2RT_1^* \frac{k-1}{k} \left(\frac{G}{p_1 F \sin \alpha_1} \right)^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$= f(G, \alpha_1, p_1, T_1^*)$$

$$T_1 = T_1^* / \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{c1}^2 \right) = f(G, \alpha_1, p_1, T_1^*)$$

$$\rho_1 = p_1 / (RT_1) = f(G, \alpha_1, p_1, T_1^*)$$

$$\varphi = C_2 / u = G / (\rho_1 F u) = f(G, \alpha_1, p_1, T_1^*, n)$$

$$1/\varphi = \text{ctg} \alpha_1 + \text{ctg} \beta_1 = \text{ctg} \alpha_2 + \text{ctg} \beta_2$$

$$\begin{aligned}\psi_T &= h_u/(u^2/2) = 2\varphi(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2) \\ &= 2 - 2\varphi(\text{ctg}\alpha_1 + \text{ctg}\beta_2) = f(\varphi, \alpha_1) \\ \Delta T^* &= h_u/C_p = \psi_T u^2/(2C_p) = f(u, \varphi, \alpha_1) \\ T_3^* &= T_1^* + \Delta T^*\end{aligned}$$

采用落后角关联式 $\delta = f(i, \delta_r, i_r, \varepsilon_r)$, 已知 φ 和 α_1 , 可求得本级的其他气流角和下一级的 α_1 。

四、由外壁静压 p_{1t} 求平均半径静压 p_{1m}

简单径向平衡方程:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{C_u^2}{r}$$

$$C_u = C_z \text{ctg}\alpha_1 = K \text{ctg}\alpha_1 \cdot G/(\rho F)$$

其中 $K = C_z \rho / (C_{zm} \rho_m)$

由此可得:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{RT}{pr} \cdot \left(\frac{KG \text{ctg}\alpha_1}{F} \right)^2$$

$$\int_{r_m}^{r_t} p dp = R \left(\frac{G}{F} \right)^2 \int_{r_m}^{r_t} \frac{T}{r} (K \text{ctg}\alpha_1)^2 dr \quad (1)$$

第一步先求近似的初始值 p_{1m0} (简化和推导从略):

$$p_{1m0} = \left\{ p_{1t}^2 - (p_{1td}^2 - p_{1md}^2) \cdot \frac{T_{1m}^*}{T_{1md}^*} \cdot \left(\frac{G_0}{G_{0d}} \right)^2 \cdot \int_{r_m}^{r_t} \text{ctg}^2 \alpha_1 \frac{dr}{r} \right. \\ \left. \int_{r_m}^{r_t} \text{ctg}^2 \alpha_{1d} \frac{dr}{r} \right\}^{1/2} = f(p_{1t}, T_{1m}^*, G_0, \alpha_1(r)) \quad (2)$$

其中 $\alpha_1(r) = \alpha_{1p}(r) - \Delta r_p - \delta(r)$

落后角 $\delta(r) \approx \delta_m$, Δr_p 是前一级导叶的转角, 下标 p 代表几何参数。

把初始值 p_{1m0} 代入第三节中的相应公式, 可得到相应的初始值 φ_0 。

第二步是迭代求解较精确的 p_{1m} :

把公式(1)中的温度 T 表示成:

$$T_1 = T_1^* - \frac{C_1^2}{2C_p} = T_1^* - \left(\frac{C_z}{C_{zm}} \right)^2 \cdot \varphi_m^2 u_m^2 / (2C_p \sin^2 \alpha_1)$$

参看图3, 设计工况时, 比值 C_z/C_{zm} 和 $C_z \rho / (C_{zm} \rho_m)$ 沿径变化不大, 且几乎呈线性关系(第五级之后恒等于1)。非设计工况和导叶转角时, 比值 C_z/C_{zm} 和 $C_z \rho / (C_{zm} \rho_m)$ 的沿径分布与设计工况不会有很大出入, 应属同一量级。所以, 在式(1)中, 积分限内的上述比值可以用中径和顶部的算术平均值来代替, 并简单地采用设计点参数, 即:

$$C_z/C_{zm} \approx \frac{1}{2} (1 + (C_{zt}/C_{zm})_d)$$

$$C_z \rho / (C_{zm} \rho_m) \approx \frac{1}{2} [1 + (C_{zt} \rho_t / (C_{zm} \rho_m))_d]$$

通常设计都是沿径等功的，所以 $T_1^* \approx T_{1m}^*$ ，变工况及导叶转角时变化不大。

如此简化后，积分式 (1) 可解，代入初值 p_{1m0} ， φ_0 ，迭代出 p_{1m} 。上述假设造成的误差可忽略。参看图 4，设计工况时，积分项 $\int_{r_m}^{r_t} (K \text{ctg} \alpha_1)^2 T_1 / r \text{ dr}$ 的上述简化算法计算值与实际积分值偏差不超过 0.26%。积分项仅占 p_{1m} 的 1% 左右，所以 p_{1m} 的计算精度相当高。

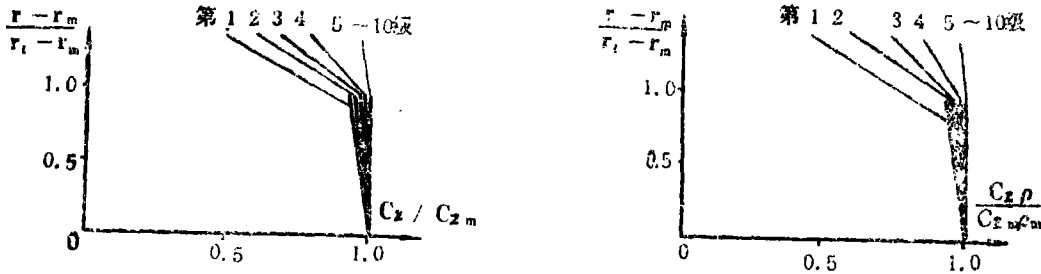


图 3 设计点 C_z/C_{zm} ， $C_z \rho / (C_{zm} \rho_m)$ 沿径分布

五、级特性的计算步骤

已知数据：流量 G_0 、转速 n 、转角 $\angle \alpha_1$ 、压气机进出口总温、级间外壁静压。

首先求得进口导叶的落后角，可得第一级的 α_1 ，现在已知第一级的 T_1^* 和 α_1 。应用式

(2) 可得到第一级的 p_1 初值 $p_{10} = f(p_{1t}, T_1^*, G_0, \alpha_1(r))$ ，然后应用公式(1)的简化法和第三节中的相应公式迭代求出 p_1 及其他参数，同时第二级的 T_1^* 和 α_1 也得到，这样再算第二级，直至全部级。在一个工况的所有级参数算完之后，比较压气机试验总温升和刚刚算得的计算总温升，如果不相等，则重新调整落后角关联式；如此迭代，使全部工况点的总温升计算值与试验值趋于一致。最后同时得到了落后角关联式和级特性：

$$\text{级压力系数 } \psi = 2C_p T_1^* (\pi^{* \frac{k-1}{k}} - 1) / u^2 \text{ 和级效率 } \eta = \psi / \psi_T$$

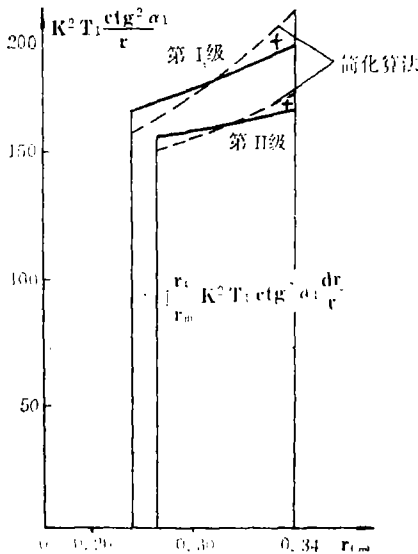


图 4 积分的简化算法与实际值比较

六、计算结果及精度

有 33 例工况点（其中不转角的 20 例，转角的 13 例）用于迭代落后角关联式，它们的最终计算总温升与试验偏差 X_i 的各种平均值是：

$$\frac{\sum X_i}{n} = 0.0052\% \quad \frac{\sum |X_i|}{n} = 1.5\%$$

迭代得到的落后角关联曲线如图2所示, 原点斜率 $Y_0' = 0.5$, Y_1, Y_2, \dots, Y_8 分别等于 0.13, 0.28, 0.38, 0.444, -0.07, -0.09, -0.075, -0.05, 修正常数 $\delta_0 = 1.95^\circ$ 。计算了99例工况点的级特性, 得到单 $\psi - \varphi$ 曲线如图5所示。

落后角计算误差是影响所有级参数误差的主要因素, 首先受到影响的是级加功量和级入口总温 T_{1^*} 。经估算, 各级进口总温的偏差为0.5~0.7%, 那么以推算出: 流量系数 φ 和压力系数 ψ 的误差最大不超过0.7%, 级效率的偏差主要决定于级温升的偏差, 较难估计。

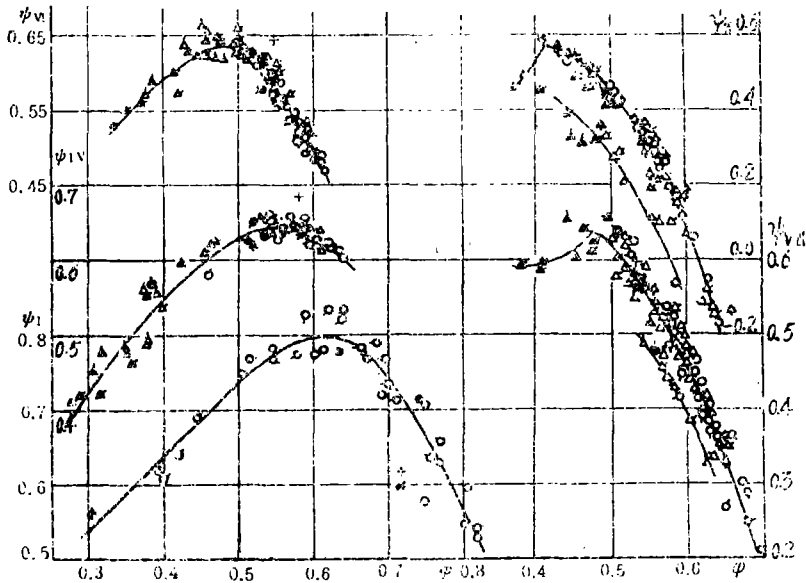


图5 第1,4,6,8,10级 $\psi - \varphi$ 曲线

实心符号代表喘点或接近喘点

- * 设计点, 用设计压比计算, $\psi = 2C_p T_{1^*} \times (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) / u^2$
- + 设计点, 用中径的理论压头系数乘以级效率计算, $\psi = \psi_T \cdot \eta = \eta \cdot 2\varphi(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2)$

七、结 论

1. 由简单径向平衡方程出发, 积分式中部分参数取平均值的算法, 即可由沿壁静压求得相当准确的平均半径处静压。
2. 落后角迭代法在没有级间温度测量值时能够获得满意精度的级特性 $\psi - \varphi$ 曲线, 特别适用于压气机全台试验时级间参数只测外壁静压的情形。
3. 虽然各级参数是按平均半径处进行计算的, 但不应视为平均半径处的基元级特性, 而是整个级的级特性, 因为温度是沿径的质量平均温度, 压力也是以外壁静压为基础的。
4. 因为在得到级特性的同时, 获得了针对本压气机的落后角关联式, 所以能够方便地计算本压气机的转角总特性。

参 考 文 献

[1] 秦鹏 译·轴流压气机气动设计, 国防工业出版社, 1975年

A Calculation of Stage Characteristics by use of Static Pressure Data of a Compressor Interstage Outside Wall—Deviation Angle Iteration Method

Xu Limin, Zhang Chunlin

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

The static pressure at mean radius is derived by using the static pressure along interstage outside wall measured during a compressor unit test, outlet flow angle, stage power increment, temperature rise and eventually total stage characteristics are obtained by use of the general correlation of deviation angle with incidence angle. This deviation angle correlation is derived from an iteration of numerous test condition points, which tend to bring the calculated and measured compressor temperature into full agreement.

Key Words: *compressor, unit test, stage characteristics, deviation angle, calculation method, iteration*

〇
(简)
()
()
(讯)
〇

英国皇家海军为23型护卫舰订购8台斯贝发动机——SMIA和

英国皇家海军的最新动态

据“燃气轮机世界”1989年7—8月号报导,英国 Rolls-Royce 公司最近从英国皇家海军获得它本年度第一个较大的合同——8台SMIA发动机。这些舰用主推进发动机将用于已订购和正在建造的23型发展级护卫舰。计划发动机将于1991年交货。

(谈增祥 供稿)