

蒸汽轮机成组叶片的气动弹性模型*

北京航空航天大学 张扬军** 李克俭 陶德平

【摘要】 在分析成组叶片振动特点的基础上,提出了一个适用于蒸汽轮机成组叶片的气动弹性模型,应用该模型对某型成组叶片的气动弹性稳定性进行了分析。

关键词: 汽轮机 叶片振动 气动力弹性 建立模型

1 成组叶片简化模型及控制方程组

在研究汽轮机长叶片颤振时,掌握叶片的振动特性必不可少,因为叶片的颤振与相邻叶片的振动相位差及振型有极为密切的关系。当前发电设备单机容量已达百万千瓦,因而末级动叶片很长。由于结构强度方面的原因,越来越多地大机组的末级动叶片采用拉筋而成为成组叶片。同一组的叶片被拉筋固联成一个整体,使得其在振动方式上和自由叶片大不相同。成组叶片的特点是:(1)同一组的叶片具有相同的振动型式。(2)同一组的叶片一起振动,因此相同组的叶片间振动相位角一定为零。(3)不同组的叶片的振动相位各不相同。相邻的不同组的叶片的叶片间相位角即为叶片组之间的振动相位角。根据成组叶片的振动特点,采用每组叶片振动的相位和振型相同的办法来考虑拉筋的影响。各个不同叶片组之间振动的相位和振型可根据实际情况输入。叶片间的振动相位角的计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_{i,j} = 0 & j \in [1, M-1] \\ \sigma_{i,M} = \Phi_{i+1,1} - \Phi_{i,M} & i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (1)$$

σ 为叶片间的振动相位角, Φ 为叶片的振动相位; i 表示第 i 组叶片, N 为总的叶片组数; j 表示第 i 组的第 j 个叶片, M 为第 i 组的叶片数。

采用特征截面处的二维流场来模拟实际的三维流场。假设叶片排的振动型式为弯曲振动,且叶片排的振动为流场非定常性的唯一起因。叶片排的振动规律可以表示为: $\tilde{h}_{x,j} = \bar{h}_{x,j} e^{i(\varphi_{i,j} + kt)}$, $\tilde{h}_{y,j} = \bar{h}_{y,j} e^{i(\varphi_{i,j} + kt)}$ 。假设非定常流动是对定常平均流场的小扰动、非定常扰动量随时间呈简谐规律变化、流动为无粘的,由 Euler 方程组出发进行线性化,可得控制方程组为:

$$\begin{cases} \bar{p}_\tau + u_0 \bar{p}_x + v_0 \bar{p}_y + \rho_0 (\bar{u}_x + \bar{v}_y) = -ik\bar{p} \\ \bar{u}_\tau + u_0 \bar{u}_x + v_0 \bar{u}_y + (1/\rho_0) \bar{p}_x = -ik\bar{u} \\ \bar{v}_\tau + u_0 \bar{v}_x + v_0 \bar{v}_y + (1/\rho_0) \bar{p}_y = -ik\bar{v} \\ \bar{p}_\tau + u_0 \bar{p}_x + v_0 \bar{p}_y - a^2 (\bar{p}_\tau + u_0 \bar{p}_x + v_0 \bar{p}_y) = -i(\bar{p} - a^2 \bar{p}) \end{cases} \quad (2)$$

进口边界:当定常平均轴向分速为亚音时,给定3个条件: $\bar{p} = \bar{u} = \bar{v} = 0$;当轴向分速为超音时给定4个条件: $\bar{p} = \bar{u} = \bar{v} = \bar{p} = 0$ 。

出口边界: 当出口为亚音时, 给定反压 $\bar{p} = 0$, 其余的 3 个条件直接外推即可。

物面边界: 扰动速度 $\bar{u}, \bar{v}$ 即为物面表面的振动速度, 扰动温度 T 和扰动压力 $\bar{p}$ 直接外推。

采用 MacCormack 格式差分求解控制方程。方程组 (2) 整理成如下形式:

$$\partial U / \partial \tau + \partial F / \partial x + \partial G / \partial y = C \quad (3)$$

式中: $U = [\bar{p}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{p} - a^2 \bar{p}]^T$, $F = [u_0 \bar{p} + \rho_0 \bar{u}, u_0 \bar{u} + (1/\rho_0) \bar{p}, u_0 \bar{v}, u_0 \bar{p} - a^2 u_0 \bar{p}]^T$, $G = [v_0 \bar{p} + \rho_0 \bar{v}, v_0 \bar{u}, v_0 \bar{v} + (1/\rho_0) \bar{p}, v_0 \bar{p} - a^2 v_0 \bar{p}]^T$, $C = [-ik \bar{p}, -ik \bar{u}, -ik \bar{v}, -i(\bar{p} - a^2 \bar{p})]^T$ 。

求解非定常方程的具体格式为

$$U_{i,j}^{n+1/2} = U_{i,j}^n + \Delta \tau C_{i,j}^n - (\Delta \tau / \Delta x) (F_{i,j}^n - F_{i-1,j}^n) - (\Delta \tau / \Delta y) (G_{i,j}^n - G_{i,j-1}^n) \quad (4)$$

$$U_{i,j}^{n+1} = (1/2) (U_{i,j}^{n+1/2} + U_{i,j}^n) + (1/2) \Delta \tau (C_{i,j}^{n+1/2} + C_{i,j}^n) - (\Delta \tau / \Delta x) \times (F_{i+1,j}^{1/2} - F_{i,j}^{1/2}) - (\Delta \tau / \Delta y) (G_{i,j+1}^{1/2} - G_{i,j}^{1/2}) \quad (5)$$

2 算例分析

文献 [1] 中的叶片分别为某型蒸汽轮机的末级动叶片。两种叶片均为带拉筋的成组叶片, 5 片一组, 共 24 组。应用本文所提出的蒸汽轮机成组叶片的气动弹性模型对两种叶片的气弹稳定性分别进行了研究。取 87.5% 叶高处的截面为特征截面。从图 1 中可以看出, 叶片排的最小气动阻尼随着相对容积流量的变化呈非单调变化, 在 $\overline{GV}_2 = 0.5$ 左右有一峰值, 这一趋势与实际情况完全一致。苏联全苏热工所在实验室条件下, 研究了工况变化时对叶片动应力的影响。随着工况的变化, 当 $\overline{GV}_2 = 0.3 \sim 0.6$ 时, 叶片的动应力剧烈增加, 与额定工况相比, 动应力增加两倍多, 认为产生这种变化的原因是由于气动弹性失稳所致^[2]。文献 [2] 给出了全苏热工所给出的 K300-130 型蒸汽轮机组末级叶片脱流高度及动应力随相对容积流量变化而变化的情况, 与图 1 所示的叶片气动阻尼与相对容积流量变化的趋势十分相似。叶片在 $\overline{GV}_2 = 0.5$ 左右有一极小值, 而 K300-130 型蒸汽轮机组末级叶片的计算结果与实验结果均表明, 在 $\overline{GV}_2 = 0.30$ 左右其动应力亦有一极大值。由图 1 可见, 随着 $\overline{GV}_2$ 的减小, 气动阻尼也下降。在小的相

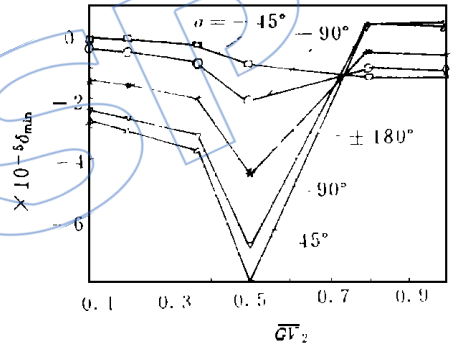


图 1 最小气动阻尼随相对容积流量的变化

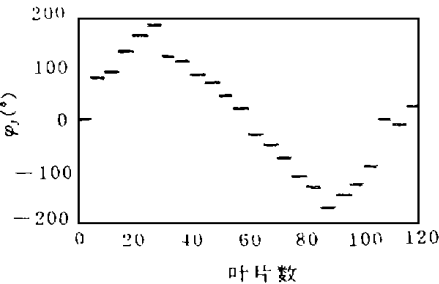


图 2 叶片间相角分布

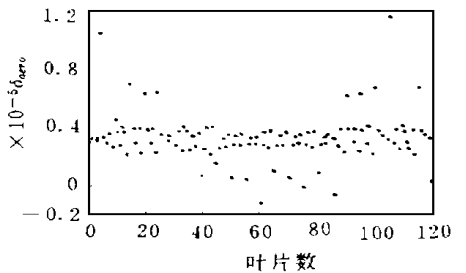


图 3 叶片的气动阻尼分布

对容积流量时, 叶片处于大负攻角状态, 容易产生失速颤振。在相对容积流量 $\overline{GV}_2 = 0.20$, 假设

叶片间相角分布如图 2 所示时, 整个叶片排的气动阻尼分布如图 3 所示。由于成组叶片的同一组的叶片一起振动, 具有共同的振动相位, 气动阻尼基本上一致, 且均为正值, 叶片具有较好的气动弹性稳定性; 不同组的叶片的振动相位各不相同, 相邻的不同组的叶片之间存在叶片组之间的振动相位角, 使得成组叶片的边缘叶片的气弹稳定性具有较大的变化, 有的气弹稳定性较差, 为此在实际运行要特别注意那些位于成组叶片边缘的叶片的气弹稳定性情况。

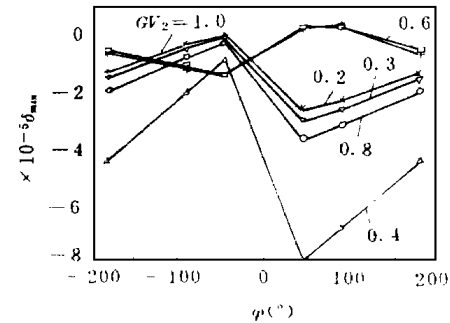


图 4 最小气动阻尼随叶片组间的相角变化

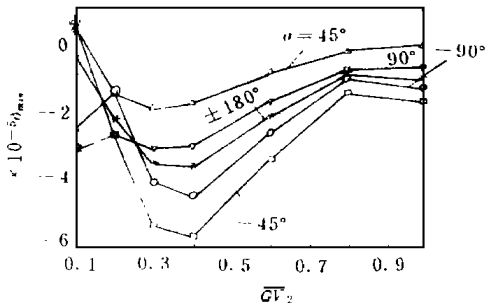


图 5 最小气动阻尼随相对容积流量的变化

图 4 给出了在不同的相对容积流量工况下, 叶片的最小气动阻尼随叶片组间的相角变化的曲线。叶片排的最小气动阻尼随着相对容积流量的变化呈非单调变化。叶片组间的相角对叶片的气弹稳定性有较大的影响。图 5 为在叶片间相角分布如图 2 所示时, 叶片的最小气动阻尼随相对容积流量变化的情况。

3 结 论

- (1) 叶片排的最小气动阻尼随着相对容积流量的变化呈非单调变化。计算与机组实验结果一致。叶片组间的相角对叶片的气动弹性稳定性有较大的影响。
- (2) 相邻的不同组的叶片之间存在叶片组之间的振动相位角, 使得成组叶片的边缘叶片的气动弹性稳定性具有较大的变化, 在实际运行要特别注意那些位于成组叶片边缘的叶片的气动弹性稳定性情况。

参 考 文 献

1 陶德平, 张扬军, 李克俭. 300M W 空冷汽轮机末级动叶颤振特性分析. 北京航空航天大学科研报告, 1993
2 周盛等. 叶轮机气动弹性力学引论, 国防工业出版社, 1989

(责任编辑 魏星禄)