

某型蒸汽轮机自由叶片失速颤振研究

张扬军(清华大学水电系水机教研室)

陶德平(北京航空航天大学 407 教研室)

〔摘要〕为了给实际机组安全运行和叶片损坏故障分析提供技术依据,本文利用可考虑叶片间相角变化的叶片颤振预测方法对某型机组叶片的颤振性能进行了分析。理论预测结果和实验结果基本一致。研究表明,在一定的来流马赫数、叶片间振动相位角和较大的来流攻角条件下,该机组自由叶片发生失速颤振故障是可能的。对如何改善该型自由叶片的气动弹性稳定性进行了讨论。

关键词 汽轮机 自由叶片 失速颤振 防颤

分类号 TK263.3

1 引言

汽轮机长叶片失速颤振是导致叶片损坏的原因之一,这已被美国西屋公司的 790 mm 叶片、西德 KMU 公司的 850 mm 和 906.6 mm 等叶片的断裂事故和现场实验所证实^{〔1〕}。目前国内运行的长叶片种类也很多,涉及不同容量的机组。汽轮机末级动叶片的速度高,级焓降大,叶片处于跨音速流场中。越来越多的大机组承担调峰任务,使得长叶片常在小的相对容积流量、高背压、大负攻角下工作。近年来国内也陆续发生一些原因不明的长叶片断裂事故(如 700 mm、680 mm、432 mm 等长叶片),由于现场记录不全,难以确切找出事故原因,事故分析认为可能与机组在低流量、高背压工况条件下运行发生失速颤振有关。

为了给实际机组安全运行和叶片损坏事故分析提供技术依据,本文利用文献〔2,3〕所

发展的可变叶片间相角的叶片颤振预测方法对某型机组自由叶片的颤振性能进行了研究。

2 理论分析方法

文献〔2,3〕发展了一种可考虑叶片间相角变化的叶片颤振预测方法,其基本思想是以转子上某靠近叶尖的特征截面的二维叶栅来模拟转子叶片的非定常特性,考虑特征截面的二维非定常流场,设叶片的弦长为零,振动叶片排蜕化为变形激盘,变形激盘的运动规律由叶片排的振动规律所决定,叶片间的相角根据实际情况输入,激盘的运动方程可以表示为:

$$\begin{cases} \bar{h}_{x,j} = \bar{h}_{x,j} e^{i(\phi_j + \omega t)} \\ \bar{h}_{y,j} = \bar{h}_{y,j} e^{i(\phi_j + \omega t)} \end{cases} \quad (1)$$

变形激盘振动是流场非定常性的唯一起因。

* 本文为国家自然科学基金会资助项目

收稿日期 1994 01 25 收修改稿 1994 03 30

本文联系人 张扬军 男 博士生 100084 北京

激盘前后为无粘流,非定常振荡分量 l 相对于定常分量 l 为小扰动,且 l 随时间呈简谐变化。

过激盘即流场的间断面满足如下四个突跃条件:

(1) 过激盘突跃面的流量连续:

$$(\rho_1 + \bar{\rho}_1)u_{1n}^{rel} = (\rho_2 + \bar{\rho}_2)u_{2n}^{rel} \quad (2)$$

这里的下标“1”与“2”分别代表激盘前、后, n 表示垂直于变形激盘的方向,上标“rel”表示相对于变形激盘的运动。

(2) 过激盘的相对总焓守恒:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} (q_1^{rel})^2 \\ = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} (q_2^{rel})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 γ 为比热比, q 为气流速度的模。

(3) 非定常落后角关系:

引入经验关系

$$\beta_2 = \theta + \delta_{m2} + g[\alpha(\beta_1, \theta, \delta_{m1}), M_{a1}, \theta(0, \frac{\partial h_x}{\partial y})] \quad (4)$$

将上式进行线化后来表示非定常气流角的突跃条件,式中 β_1, β_2 为激盘前后的气流角, δ_{m1}, δ_{m2} 为激盘前后的几何构造角。

(4) 过激盘的滞止压力损失条件:

对于大负攻角透平叶栅,极少有现成的公式可用,利用平板问题的解加上修正系数 K_1 过渡到真实叶型,得到速度损失系数 ψ 为:

$$\frac{1}{\psi^2} = \frac{1}{\psi_0^2} + K_1 + \left(\frac{\Delta u_0}{q_1}\right)^2 \quad (5)$$

试验数据表明, K_1 随着攻角的改变而改变。根据实验数据可得:

$$K_1 = \frac{-0.2\alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \quad (6)$$

在上述假设和定解条件下以及确定了栅前、栅后定常流场之后,采用二维无粘可压非定常 Euler 方程组作为基本方程,并利用非定常小扰动假设将方程线化,得到如下的线

化小扰动振幅方程组,

$$\begin{cases} \bar{\rho}_x + u\bar{\rho}_x + v\bar{\rho}_y + \rho(\bar{u}_x + \bar{v}_y) = -ik\bar{\rho} \\ \bar{u}_x + u\bar{u}_x + v\bar{u}_y + \frac{1}{\rho}\bar{p}_x = -ik\bar{u} \\ \bar{v}_x + u\bar{v}_x + v\bar{v}_y + \frac{1}{\rho}\bar{p}_y = -ik\bar{v} \\ \bar{p}_x + u\bar{p}_x + v\bar{p}_y - a^2(\bar{p}_x + u\bar{\rho}_x + v\bar{\rho}_y) = -i(\bar{p} - a^2\bar{\rho}) \end{cases} \quad (7)$$

通过求解线化小扰动振幅方程组即可确定非定常流场。

3 结果与讨论

某机组自由叶片是我国最早自行开发的 700 mm 叶片,它已被广泛应用于国产 5 万、7.5 万、12.5 万、20 万、30 万汽轮机上作为末级动叶片。该型叶片设计成功,运行情况良好。但也发现个别机组运行中叶片曾发生不同程度的裂纹和冲刷等事故,主要发生在 20 万机组上。

图 1 为来流攻角分别为 $+16^\circ, -24^\circ, -60^\circ$ 、叶片间相角为 $+180^\circ$ 时,叶片的气动阻尼随相对马赫数变化的曲线。由图 1 可以看出,在攻角为 $+16^\circ, -24^\circ$ 时,叶片的气动阻尼随相对马赫数增加而变化的趋势不明显,叶片的气动阻尼均为正值。当攻角为 -60° 时,引起叶盆发生大尺度分离,随着相对马赫数的增加,叶片的气动阻尼呈非单调变化。但来流马赫数小于 0.70 左右时,叶片的气动阻尼相对马赫数增加而下降,在马赫数为 0.70 左右处达到极小值,此时叶片的气动阻尼为负值,有可能发生失速颤振;当来流马赫数大于 0.70 时,叶片的气动阻尼随相对马赫数增加反而有增加的趋势。图 1 的计算结果说明,在小的相对容积流量时,叶片处于大负攻角状态,从而引起叶片发生大尺度分离,容易产生失速颤振。

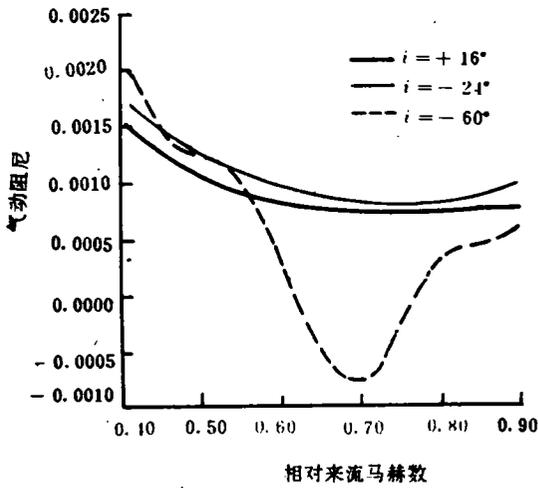


图1 叶片气动阻尼随相对马赫数的变化

在马赫数为0.72时,叶片的气动阻尼随来流攻角的变化如图2所示。随着来流攻角的减小,叶片的气动阻尼减小。当叶片的攻角小于 -40° 时,叶片的气动阻尼急剧下降,产生的原因可能是由于大的负攻角引起流动发生大尺度分离,使得叶片的气动弹性稳定性变差。

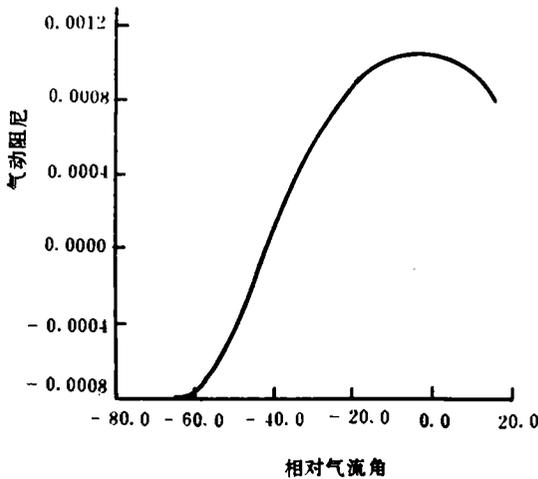


图2 叶片气动阻尼随来流攻角的变化

文献[4]在叶栅风洞上对该机组3个自由叶片组成的扇形叶栅进行了颤振试验。风

洞最大流量为6 kg/s,出口尺寸为 $380 \times 120 \text{ mm}^2$,叶片前绝对压力可达 $1.863 \times 10^5 \text{ Pa}$,出口马赫数为0.1~0.9。实验时3个叶片直立,叶片高度500~700 mm范围为试验段,由于振幅与叶高成正比,发生失速颤振工况的主流区集中在叶尖部分,因此气动功主要集中于叶尖部分。为模拟小流量、高背压下的颤振工况,在动叶前设计由4只静叶组成的扇形叶栅,以产生 60° 左右的负攻角。该机组叶片的颤振实验结果表明,当正攻角或小攻角时,改变马赫数时对叶片振动的影响不明显,振幅的增加基本上正比于进气量的增加,所增加的幅值仅是由于流量增加使叶片的弯应力增加,叶片没有发生颤振失稳。当负攻角增加到 60° 时,叶片的振幅随着马赫数的增大而逐渐增大,在相对马赫数为0.8左右时达到最大值,且振幅随时间增大呈发散趋势。来流相对马赫数继续增大,叶片的振动幅值反而减小,如图3所示。这种叶片振幅随马赫数的非单调变化是叶片发生颤振的重要特性,和理论计算所得出的结论相一致。

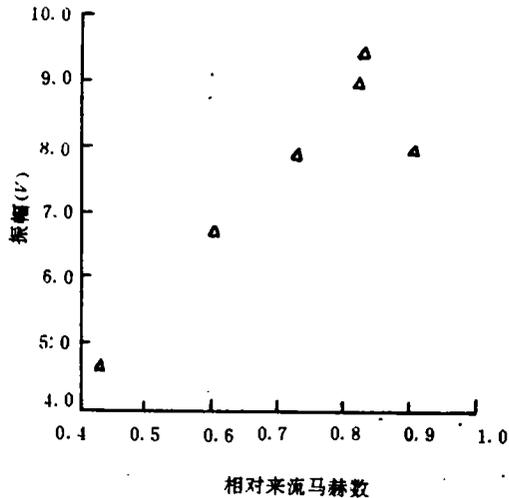


图3 叶片振幅随相对马赫数的变化

图4给出了攻角为 -60° 、来流马赫数为0.72时,叶片的气动阻尼随叶片间相角变化

的曲线。由图可知,叶片间相角对该自由叶片的气弹稳定性有非常大的影响,和文献〔5〕的结论一致。叶片间相角在 -90° 至 $+45^{\circ}$ 之间时,叶片的气动阻尼为正值,且叶片间的相位角为 $+0^{\circ}$ 左右时叶片的气动阻尼出现极大值,其气动弹性稳定性好。叶片间相角在 $+45^{\circ}$ 至 $+180^{\circ}$ 之间时,叶片的气动阻尼为负值。当叶片间的相位角为 $+110^{\circ}$ 时,叶片的气动阻尼最小,其气动弹性稳定性最差。在对叶

受到实验设备的限制,因而无法给出类似图4的实验曲线。实验结果表明,相邻叶片的振动相位差为 $+180^{\circ}$ 时,叶片的动应力发生突增现象,和图4的结论一致。在实物机组进行叶片安装时,应使叶片间的相位角不在 $+45^{\circ}$ 至 $+180^{\circ}$ 的范围之间。特别是应尽量避免使叶片间的相位角在 $+110^{\circ}$ 附近。若安装使叶片间的相位角为 $+0^{\circ}$ 左右,叶片将具有较好的气动弹性稳定性。除此之外,增大叶片弦长,亦是防颤的有效措施。

参 考 文 献

- 1 陶德平、周胜. 叶轮机气动弹性力学. 北京航空航天大学研究生学位课程讲义, 1990年7月
- 2 张扬军、陶德平. 变叶片间相角的蒸汽轮机叶片颤振预测方法. 水利电力机械, 1993(4)
- 3 Zhang Yangjun, Li Kejian, Tao Deping and Zhou Sheng. A New method for steam turbine flutter prediction. in AERO-HYDROELASTICITY DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS, seismological Press, Oct. 1993, ISBN7-5028-0980-5/0.19(1373)
- 4 许玉妹、严宏强. 振荡叶栅颤振的实验研究. 国家“七五”大型火电成套设备科技攻关项目 75-50-2-01-13 提交报告, 1990年7月
- 5 张扬军、李克俭、陶德平. 叶片间相角对蒸汽轮机叶片颤振的影响. 航空动力学报 1994, 9(2)

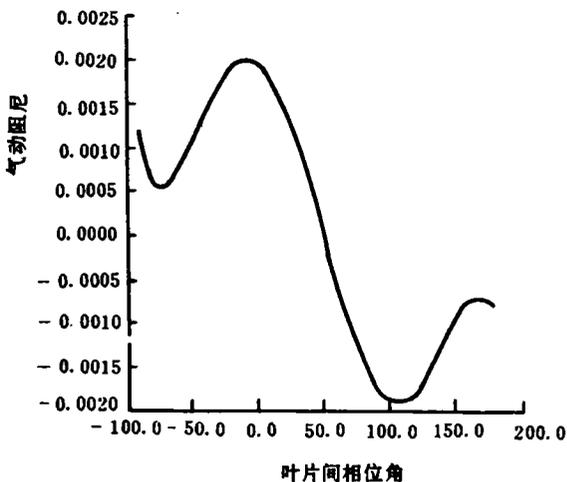


图4 叶片气动阻尼随叶片间相角的变化

片进行颤振实验时,改变叶片间振动相位角

6S60新型柴油机在沪通过鉴定

由上海沪东造船厂制造的B&W6S60MC新型船用柴油机,日前在上海通过专家的技术鉴定。

该机是一种二冲程、单作用、直流扫气、恒压式涡轮增压器、可直接换向并由单螺旋桨推进的新一代柴油机,最大持续输出功率12264.7千瓦,转速105转/分。燃油系统设计为能燃烧3500秒的燃料油,同时能燃烧粘度为6000秒的重质燃油。机舱为24小时无人值班,主机可在机舱集控室。驾驶室和机旁应急操纵站操纵,现主要应用于7万吨级船舶,根据实际情况亦可用于其它类型船舶。经来自上海交通大学、上海船舶研究设计院和上海711研究所等5家单位柴油机专家的反复评议,一致同意该机通过技术鉴定。该机拟于今年晚些时候申报国家重点新产品成果奖。

(沪东造船厂情报科 邵天骏 供稿)

This paper deals with a modification design version involving the addition of a superheater to a KZL2-0.7-A I type packaged boiler. The said design version has been proved to be successful in practical use. **Key words:** *KZL type packaged boiler, superheater*

△ The Determination of the Separation Efficiency of a High-temperature Separator for a Circulating Fluidized Bed Boiler Wei Tanzheng (*Xiangtan Boiler Works*) *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(2): 92~95

Based on the heat balance analysis of a circulating fluidized bed dense phase region the author holds that the circulating ash quantity and its temperature are major factors influencing the temperature level of the dense phase region. By the use of the definition of circulation ratio a formula for calculating the circulation ratio was derived. On the basis of the ash balance analysis a relationship between the high-temperature separator separation efficiency and circulation ratio has also been deduced. It is recommended to develop the circulating fluidized bed boilers of low circulation ratio ($R_c = 2-10$), which are in tune with the current conditions in China. **Key words:** *circulating fluidized bed, dense phase region heat balance, ash balance, circulation ratio, high-temperature separator, separation efficiency*

△ A Computer Aided Design of High Integration for Boilers Fan Zhiming, Wu Tao, Wang Xinhua, Lin Ren (*Hangzhou Boiler Works*) *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(2): 96~100

This paper dwells on the specific details and methods used during the development and research of a highly integrated CAD software package. The said system represents an organic combination of a graphic system, engineering data base and a computation calculation software, resulting in a highly integrated CAD software package. **Key words:** *boiler, computer, CAD*

△ The Application of a PMK Programmable Single-loop Regulator in the Combustion Automatic Control System of Daya Bay Nuclear Power Station Preoperational Test Boilers Wang Xiaolei Zheng zi Qiang (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*) *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(2): 101~105

Described in this paper are the design, commissioning test and operating conditions of a combustion automatic control system for Daya Bay Nuclear Power Station preoperational test boilers as well as the application of a PMK programmable single-loop regulator for the said system. **Key words:** *combustion automatic control system, single loop, regulator, design, commissioning test*

△ The Study of a Steam Turbine Free Blade Stall Flutter Zhang Yangjun, Tao Deping (*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*) *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(2): 106~109

To provide a technical basis for assessing the safe operation of a turbine unit and analysing its blade failures, the authors have analysed the blade flutter characteristics of a steam turbine through the use of a flutter prediction method based on interblade phase angle numerical variation. The results of theoretical prediction are basically in agreement with those obtained by experiments. The study results show that under the condition of a certain incident flow Mach number, an interblade vibration phase angle and a relatively large attack angle of the incident flow, there exists the possibility of free blade failure caused by a flutter stall. A discussion is also conducted of the method aimed at improving the aeroelasticity stability of the free blades. **Key words:** *steam turbine, free blade, stall flutter, flutter prevention*

△ Grey Correlation Analysis of the Factors having an Effect on Coal Char Specific Surface Area and Pore Properties