

文章编号: 1000-8055(2010)12-2656-04

基于统计特征的轴流压气机喘振检测

李长征^{1,2}, 熊 兵², 韩 伟²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 江油 621703)

摘 要: 在分析四种型号轴流压气机 36 组试验数据的基础上, 统计发现压气机出口总压脉动的有效值服从正态分布; 有效值及其标准差因机型不同而不同, 并随工作转速变化而变化。设计了基于统计特征的自动门限喘振在线检测系统。通过试验验证显示, 可在喘振发生时发出报警信号。该方法计算简单, 具有较大的工程应用价值。

关 键 词: 轴流压气机; 气动稳定性; 喘振; 统计特征; 在线检测

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Surge detection of an axial compressor based on statistical characteristics

LI Chang-zheng^{1,2}, XIONG Bing², HAN Wei²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Jiangyou 621703, China)

Abstract: By analyzing 36 groups test data of four models axial compressors, it's found statistically that the root mean square (RMS) of pulsation of compressors outlet total pressure is subject to normal distribution; the RMS and its standard deviation vary from different models and/or working speeds. An automatic threshold surge-detecting on-line system was designed based on statistical characteristics. Experiments demonstrate that alarm signals can be given at the time of surge. This method is simple in calculation, and has great value in engineering application.

Key words: axial compressor; aerodynamic stability; surge; statistical characteristics; on-line detection

喘振是气流沿压气机轴线方向发生的低频率、高振幅的气流振荡现象, 轻则造成航空发动机特性的急剧恶化, 重则导致熄火甚至叶片断裂而致使整台发动机遭受严重破坏^[1-3]。及时可靠地检测压气机喘振先兆, 对于保障飞行安全、发展主动控制具有重要意义。目前喘振检测算法主要有相关积分法^[4-5]、方差分析法^[6-7]、小波分析法^[8-10]、紊流度分析法^[11]和自相关函数法^[12-13]等。

压气机喘振检测常采用出口总压(p_2^*)信号。不同型号压气机, 压力脉动幅值、紊流度等参数不同; 即便是同一台压气机, 当工作状态(转速)不同时, 上述参数也不相同^[14]。因此, 检测门限的设定极为重要。本文力图打破压气机型号、工作状态的限制, 探讨轴流压气机出口总压脉动统计特征, 设计通用的自动门限喘振在线检测系统。

收稿日期: 2009-10-23; 修订日期: 2010-05-31

作者简介: 李长征(1978—), 男, 山东金乡人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机计算机辅助试验技术研究。

1 压力脉动信号统计特性

压气机喘振是以压力脉动的形式出现的气动失稳现象. 出口总压 p_2^* 较温度、转速、流量等信号具有反应敏感、易于测量的特点, 是最佳的检测信号, 并且得到了广泛的应用^[14]. 由于轴流压气机是旋转机械, p_2^* 常包含转子频率、叶片通过频率的基频和倍频成分, 其时间序列不服从正态分布. p_2^* 信号的直流分量即为平均压力 ($\bar{p}_2^*$); 交流分量即脉动成分 (Δp_2^*). 在正常工作状态下, 压气机内流场稳定, 因此紊流的能量是相对稳定的. Δp_2^* 的有效值 ($\Delta p_{2,\text{rms}}^*$) 表达了紊流的能量, 由此推断: $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 数值相对稳定, 多次测量服从正态分布. 下面用实测数据验证这一推断.

通过对四种型号轴流压气机 36 组台架性能试验数据进行分析, 显示在稳定工作状态下, $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 服从正态分布. 现以某型压气机转速 n_1 时的数据为例进行阐述. 在该状态下录取 50 组 $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ ($x_1, x_2, \dots, x_n; n=50$), 作为研究样本. 把它绘制在正态概率纸 (累积分布图) 上, 如图 1 所示. 可见, 绘制点散布在一条直线附近, 它对样本来自正态分布提供了一个粗略的支持.

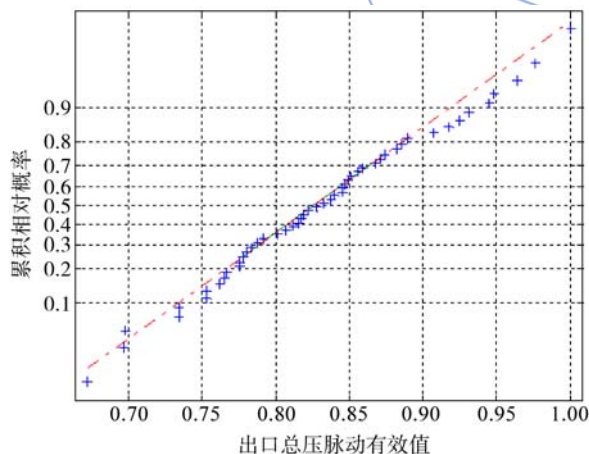


图 1 有效值的正态概率累积分布

Fig. 1 Normal cumulative probability distribution of the root mean square(RMS)

进一步采用爱泼斯-普利 (Epps-Pulley) 检验, 确认 $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 服从正态分布. 爱泼斯-普利检验利用样本的特征函数与正态分布的特征函数的差的模的平方产生的一个加权积分. 由 n 个观察值 $x_j (j=1, 2, \dots, n)$, 可计算下列量:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

和

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (2)$$

检验统计量为

$$T_{\text{E-P}} = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} \exp \left\{ -\frac{(x_i - x_k)^2}{2m_2} \right\} - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp \left\{ -\frac{(x_i - \bar{x})^2}{4m_2} \right\} \quad (3)$$

如果计算出的检验统计量 $T_{\text{E-P}}$ 的值大于给定显著性水平 α 和样本量 n 确定的 p 分位数, 则拒绝零假设, 否则接受零假设.

对上述数据 ($n=50$) 计算得: $T_{\text{E-P}}=0.0502$. 取显著性水平 $\alpha=0.01$, 则 $T_{1-\alpha}=0.574$, $T_{\text{E-P}} < T_{1-\alpha}$, 接受零假设, 即 $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 服从正态分布.

2 基于统计特征的喘振检测

设 $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 则对于 $\Delta p_{2,\text{rms}}^*$ 的任意测量值 x , 它落在 $\mu \pm 3\sigma$ 内的概率为 99.73%. 而当压气机发生喘振时, 出口总压脉动幅值迅速增大^[14], 其有效值 x 远大于 $\mu + 3\sigma$, 由此可检测喘振发生.

一般地说, 对于 $0 < \alpha_{\text{norm}} < 1$, 可确定上 α_{norm} 分位数 z_α (式(4)), 在检测过程中将其记作 C_{th} . 当待检有效值 x 满足式(5)时, 喘振发生, 否则为正常工作状态.

$$z_\alpha = \inf \{ x; 1 - F(x) \geq \alpha \} \quad (4)$$

$$x > \mu + C_{\text{th}} \sigma \quad (5)$$

正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 中的 μ 和 σ 未知, 须进行参数估计. 由统计理论^[15] 可知, $\bar{x}$ 是 μ 的无偏估计, 对于置信度为 $1 - \alpha_\mu$ 的置信区间如式 6 所示 (其中 S 为样本标准差, 式(7), 记为 $(\mu_{\text{lo}}, \mu_{\text{up}})$).

$$\left[\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha_\mu/2}(n-1), \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha_\mu/2}(n-1) \right] \quad (6)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

式中 S^2 是 σ^2 的无偏估计, σ^2 的一个置信度为 $1 - \alpha_\sigma$ 的置信区间为式(8), 记为 $(\sigma_{\text{lo}}^2, \sigma_{\text{up}}^2)$.

$$\left[\frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha_\sigma/2}^2(n-1)}, \frac{(n-1)S^2}{\chi_{\alpha_\sigma/2}^2(n-1)} \right] \quad (8)$$

由于喘振是小概率事件, 因此喘振报警应该保守一些为宜. 对于显著性水平 α_μ 和 α_σ , 设置保守的检测门限 x_{th} (式(9)), 当 $x > x_{\text{th}}$ 时, 发出喘振报警信号. 通过调整 $\alpha_\mu, \alpha_\sigma, \alpha_{\text{norm}}$ 等参数, 可降低

检测的虚警率.

$$x_{th} = \mu_{up} + C_{th} \sigma_{up} \quad (9)$$

3 自动门限在线检测

不同型号压气机稳态时, $\Delta p_{2,rms}^*$ 不同; 同一型号压气机不同转速下, 其数值也相差很大(如图2所示, 图中数据已归一化), 因此不能使用固定门限检测, 而应使用如图3所示的自动门限在线检测系统.

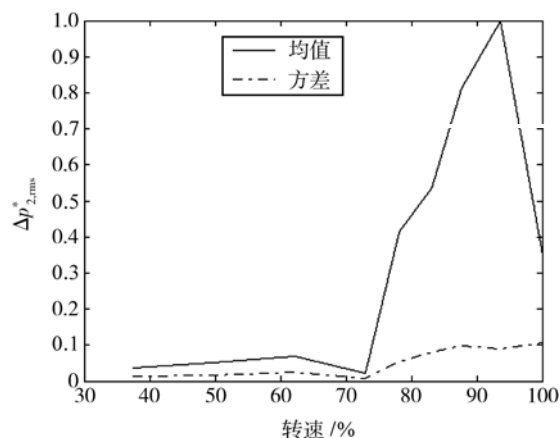


图2 有效值的均值和方差随转速的变化关系

Fig. 2 Relationship between speeds and mean values/variances of the RMS

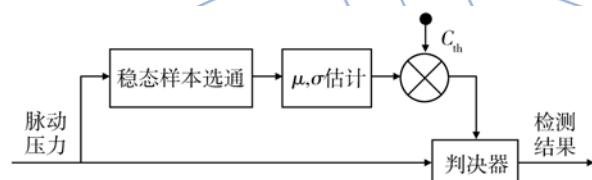


图3 自动门限在线检测系统

Fig. 3 Automatic threshold surge-detecting on-line system

自动检测门限 x_{th} 的形成由稳态时有效值 μ , σ 的估计和门限系数 C_{th} 两部分组成(式(9)). 为消除不同型号压气机或不同工作转速的影响, 在稳态时, 接通“稳态样本选通”环节, 估计 μ 和 σ , 并计算检测门限 x_{th} . 当压气机进入喘振状态时, “稳态样本选通”环节断开. 判决器比较待检 x 和门限 x_{th} , 给出检测结果.

4 试验验证

某型压气机节流试验中出口总压 p_2^* 采样率为 10 kHz, 在转速 n_1 下, p_2^* 和 $\Delta p_{2,rms}^*$ 的时域波形如图4所示. 0~8.5 s 压气机稳定工作. 从 8.5 s

时刻开始逐渐移动节气门, 11.636 s 开始发生喘振. 图中显示: $\Delta p_{2,rms}^*$ 在压气机稳定工作时随机波动, 服从正态分布.

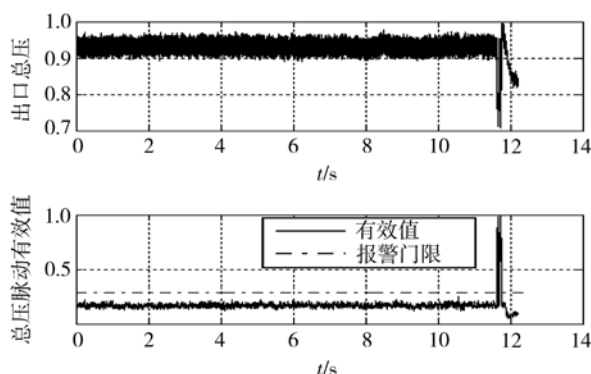


图4 压气机出口总压及其有效值

Fig. 4 Total pressure of compressor outlet and the RMS

检测中取下列参数: $\alpha_{\mu} = 0.0001$, $\alpha_{\sigma} = 0.0001$, $C_{th} = 3.8906$ 即 $\alpha_{norm} = 0.0001$, 可在 11.639 s 发出喘振报警信号.

5 结论

通过正态概率累积分布图和爱泼斯-普利检验验证, 在稳定工作状态下, $\Delta p_{2,rms}^*$ 服从正态分布. 构造了基于统计特征的喘振信号检测算法. 该算法具有运算简单, 易于实现, 虚警率低并且可控制的特点. 由于不同型号压气机其 $\Delta p_{2,rms}^*$ 不同; 同一型号压气机工作转速不同时 $\Delta p_{2,rms}^*$ 亦不相同, 本文探讨了自动门限喘振在线检测系统. 通过试验验证, 该算法可在压气机喘振时及时发出报警信号.

参考文献:

- [1] 旷桂兰, 姚峥嵘, 王道波, 等. 某涡轴发动机整机喘喘试验研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 588-595.
KUANG Guilan, YAO Zhengrong, WANG Daobo, et al. Surge experimentation research for a whole turbine-shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 588-595. (in Chinese)
- [2] 吴艳辉, 楚武利, 张皓光. 轴流压气机失速初始扰动的研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(5): 571-584.
WU Yanhui, CHU Wuli, ZHANG Haoguang. A review of studies on stall precursors in axial-flow compressor [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(5): 571-584. (in Chinese)
- [3] 谢彦文, 崔耀欣, 顾伟, 等. 压气机喘振机理及防喘措施研究[J]. 热力透平, 2008, 37(2): 94-99.
XIE Yanwen, CUI Yaoxin, GU Wei, et al. Investigation on compressor surge mechanism and anti-surge control [J].

- Thermal Turbine, 2008, 37(2): 94-99. (in Chinese)
- [4] 吴云, 李应红, 张朴, 等. 某轴流式压气机气动不稳定的相关积分分析[J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 145-149.
WU Yun, LI Yinghong, ZHANG Pu, et al. Correlation-integral analysis of the aerodynamic instability of an axial-flow compressor [J]. Journal of Engineering for Thermal Engine & Power, 2006, 21(2): 145-149. (in Chinese)
- [5] 孙涛, 徐光华, 张春梅. 基于相关积分法的离心压气机喘振过程的非线性监测[J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 1092-1097.
SUN Tao, XU Guanghua, ZHANG Chunmei. Nonlinear monitoring of the centrifugal compressor surge process based on the correlation integral method [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(6): 1092-1097. (in Chinese)
- [6] 李扬, 李应红, 吴云. 基于方差分析的某轴流式压气机失速征兆起始检测[J]. 航空计算技术, 2005, 35(1): 104-105.
LI Yang, LI Yinghong, WU Yun. Detection of rotating stall inception precursor of axial flow compressor with variance analysis [J]. Aeronautical Computer Technique, 2005, 35(1): 104-105. (in Chinese)
- [7] 张靖焯. 一种捕捉预示压气机失稳预警信号的新方法的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2): 270-277.
ZHANG Jingxuan. Study of a new method for giving warning signals of instability [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 270-277. (in Chinese)
- [8] 李美林, 张春梅, 王尚锦, 等. 用小波和分维数方法处理喘振实验数据[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 175-178.
LI Meilin, ZHANG Chunmei, WANG Shangjin, et al. Surge data processing based on wavelet analysis and fractal methods [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(2): 175-178. (in Chinese)
- [9] Dremine I M, Furlatov V I, Ivanov O V, et al. Precursors of stall and surge processes in gas turbines revealed by wavelet analysis[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(6): 599-604.
- [10] 谢锋, 谢寿生. 基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 754-758.
XIE Feng, XIE Shousheng. Detection of rotating stall in aircraft engine based on wavelet analysis [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 754-758. (in Chinese)
- [11] 李军, 刘广鸿, 刘世官. 数字嵌入式航空发动机气动失稳预警系统的研制与应用[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2006, 23(3): 19-21.
LI Jun, LIU Guanghong, LIU Shiguan. Development and application of digital inserted beforehand alarm system of aero-engine pneumatic stability fault [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2006, 23(3): 19-21. (in Chinese)
- [12] 宋慧敏, 李应红, 吴云, 等. 基于自相关函数的压气机气动不稳定监测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(3): 7-9.
SONG Huimin, LI Yinghong, WU Yun, et al. Sensing the aerodynamic instability of a compressor using auto-correlation function [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(3): 7-9. (in Chinese)
- [13] Tahara N, Nakajima T, Kurosaki M, et al. Active stall control with practicable stall prediction system using auto-correlation coefficient [R]. Salt Lake City, Utah.: 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2001.
- [14] 刘大响, 叶培梁, 胡骏, 等. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [15] 刘新平, 贺瑞缠, 李红文, 等. 概率论与数理统计[M]. 西安: 西北大学出版社, 2006.