

基于喘振频域特性的失稳预警技术研究

孙涛^{1,2}, 徐光华^{1,2}, 张春梅³

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了寻求离心压缩机喘振发作的早期征兆, 利用相关积分法结合细化快速傅里叶变换, 研究了完整记录喘振发展变化的压力信号的频域特性, 并根据喘振产生的物理机制提出了一种新的喘振预警方法. 该方法采用与监测频带能量相对应的参数, 来度量喘振过程中离心压缩机内部流动特性的变化. 分析结果表明, 在离心压缩机完全进入喘振前, 喘振频带能量有明显的增长过程, 增长时刻距喘振完全发作有 1~2 s 的时间间隔, 这对实现离心压缩机安全高效运行具有十分重要的意义.

关键词: 离心压缩机; 喘振; 快速傅里叶变换; 喘振预警方法

中图分类号: TP206.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1321-05

Instability Early Warning Based on Frequency-Domain Characteristic of Surge

Sun Tao^{1,2}, Xu Guanghua^{1,2}, Zhang Chunmei³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To seek the incipient symptom of surge in the centrifugal compressor, the frequency-domain characteristics of the pressure signal from the state far from surge to the state of full developed surge are analyzed by correlation integral method combining with zoom fast Fourier transform, and a new surge early warning method defining a parameter related with the frequency band energy as the measure is proposed according to the fact that the perturbed energy increases nonlinearly during the surge process. It is illustrated that the frequency band energy of surge is endowed with a visible increase process, and the time delay of 1 - 2 s between the initial rise and the full onset of surge is long enough to allow the effective response of the controller. The investigation offers a powerful support for the compressor to operate under safe and high-efficient condition.

Keywords: centrifugal compressor; surge; fast Fourier transform; surge early warning

由于以被动控制为主的传统防喘振方法不能使压缩机在工况区充分工作, 还会过早启动防喘振系统, 因此浪费了能源, 降低了经济效益^[1]. 随着对喘振机理认识的深入和信号处理技术的发展, 诸多学者在“主动控制”概念的推动下, 在喘振先兆的研究

方面做了大量的工作. 实验研究和数值模拟均表明, 根据诱发喘振的非稳定能量的积累程度, 喘振的发展通常可分为平稳段、过渡段和喘振段, 有些学者进一步将过渡段分为短暂过渡段和柔和性喘振^[2-3]. 过渡段是失稳前的临界状态, 有效捕捉这段信号对于

压气机的安全高效运行具有十分重要的意义,然而相关文献中对这段信号的判定是基于压力信号的振荡幅度和作者经验,因此缺乏客观性.喘振先兆的频率和喘振的频率非常接近^[4-5],要清楚分辨它们必须提高频谱的分辨率,然而它们所对应的信号段的特点决定了不能通过降低采样频率或增加数据采样长度来达到这个目的.近年来,相关积分法被引入压气机流动特性变化的分析,并取得了良好的效果^[6-8].在前人研究的基础上,作者前期对相关积分法关键参数的取值、高效算法和在离心压缩机喘振辨识中的应用进行了深入研究^[9-10].此外,对于这种采样数据的有效长度恒定的瞬态信号的分析,丁康、刘进明等^[11-12]学者也作了许多研究,这些都为客观定量地来判定喘振的各个发展阶段,以及研究喘振的频域特性奠定了坚实的基础.

本文首先利用相关积分法分析喘振过程中压缩系统非线性状态信息的演化,通过相关积分曲线来确定喘振各发展阶段,然后利用 FFT-FT (Fast Fourier Transform-Fourier Transform) 方法对这几段信号进行细化分析来研究喘振频域的特性.在此基础上,根据喘振产生的物理机制提出了一种新的喘振预警方法,并通过多组信号的分析,表明其有效性和实用性.

1 流动特性变化分析

本文所采用的实验数据取自某台 250 kW 单级离心压气机实验台,采样频率为 150 Hz,实验装置参数和过程参见文献^[9].采用相关积分法结合频谱细化方法,分析了多组完整记录喘振发展变化的动态压力信号(从远离喘振到完全进入喘振),此处以

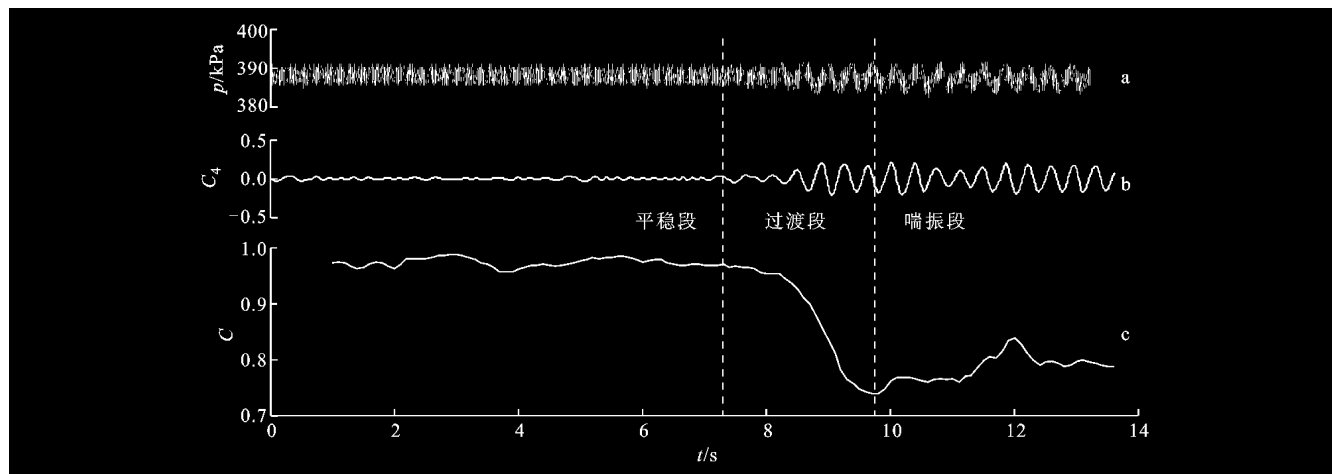
一组缓慢节流过程中所记录的压力信号的分析为例,来说明该分析方法的有效性.在图 1 的 a 波形中,由于劣点和干扰噪声的影响,只能分辨出压力约在 $t=8.2$ s 时,脉动幅度增大,说明流动状况已发生变化,显然时域波形几乎不能提供任何预警信息.图 1 中的 b 为经验模态分解(EMD)所提取出的喘振脉动波形信号,虽然 EMD 凭借其自适应滤波特性,消除了噪声干扰,可清楚地看出第 4 层本征模态函数值 C_4 约在 $t=7.2$ s 时,脉动幅度就开始逐渐增大,但 EMD 还是通过波形振荡幅度来判定喘振的各发展阶段,因此只能进行定性分析.图 1 中的 c 为测试信号所对应的相关积分 C 的曲线,可以看出整条曲线呈现由高到低的变化趋势,并且在 $t=7.2\sim 9.8$ s 时, C 急剧下降,此后维持在较低水平(约为 0.72).由相关积分曲线可以定量地辨识出失稳过程的平稳段、过渡段和喘振段,不仅克服了传统方法不能进行定量分析的缺点,而且避免了由此而带来的主观性.

2 喘振频域特性分析

刘进明等人于 1995 年提出了 FFT-FT 方法^[12],该方法有效地克服了传统频谱分析方法的运算精度和运算时间的矛盾,并已得到广泛应用. FFT-FT 算法的思路是用 FFT 作全景频谱,对指定的频谱区间进行细化运算,可以任意小地确定该区间的频率分辨率,然后用离散傅里叶变换进行频谱分析.设细化区间为 $[f_1, f_2]$,细化频谱线网格为 n ,则细化频率

$$\Delta f_z = (f_2 - f_1)/n \quad (1)$$

对于采样频率为 f_s 、采样点数为 N 的时间序列 $x(t_k)$,在细化区间进行傅里叶变换,得到的复数为



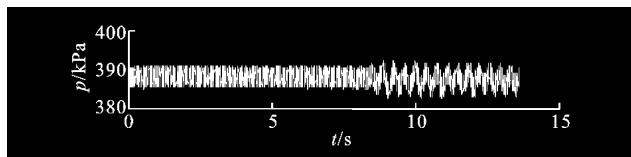
a: 时域波形; b: 喘振脉动波形信号; c: 相关积分曲线

图1 缓慢节流压力信号的3种不同形态

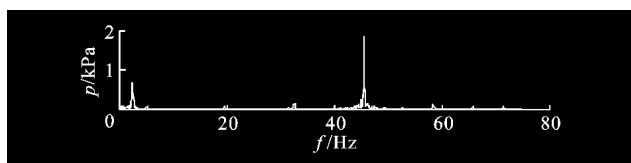
$$\text{Re}y = a(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) \cos(2\pi k f / f_s) \quad (2)$$

$$\text{Im}y = b(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) \sin(2\pi k f / f_s) \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)即可得到连续的频谱图. 喘振是压缩系统特有的不稳定现象, 而喘振频率与系统参数和工作转速有关. 如图 2 所示, 缓慢节流压力信号的低频分量频率在 2~3 Hz, 因此选择该区间为细化区间, 细化谱线为 101 条.



(a) 时域波形



(b) 幅值谱

图 2 压力信号的时域波形和幅值谱

根据相关积分曲线确定喘振各发展阶段, 从测试信号中截取相应的信号段, 并采用 FFT-FT 对各信号段进行分析. 图 3 为由测试信号截取的不同发展阶段的压力信号的全景和细化谱, 各段信号的全景谱均有一个约 46 Hz 的高频分量, 并对应于干扰噪声. 平稳段的全景谱和细化谱均表明在细化区间

没有频率成分. 过渡段和喘振段压力信号的时域波形差别很大, 而全景谱却很相似, 低频分量的频率值均为 2.685 Hz. 细化谱则能清楚地表明它们的主频不同, 图 3d 中的主频约为 2.579 Hz, 图 3f 中的主频约为 2.717 Hz, 显然 FFT-FT 方法大大提高了喘振频率计算的精度. 在图 3f 的细化谱中, 除了 2.717 Hz 的频率成分外, 还存在着 2.169 Hz 的频率成分, 说明进入喘振后扰动能量虽然变弱, 但并没有完全消失. 上述分析也进一步证实了喘振先兆和喘振频率相近, 因此喘振信号本质上是非平稳非线性信号.

3 失稳预警方法

对于压缩系统, 容腔内的非稳定扰动能量由初始积累到激发喘振, 其能量是非线性增长的, 因此在压气机系统内, 脉动压力能量的积累有可能作为喘振先兆的外部表征. 但是, 喘振过渡期间存在着多个频率成分, 以某个频率成分的幅值为指标, 显然不能准确地反映扰动能量的非线性增长过程. 本文及相关文献的分析均表明这些频率成分都处于一个窄频带内, 按照 FFT-FT 方法的思路, 很容易计算出频谱曲线下的窄频带区间面积 (见图 4). 该面积可作为监测频带能量的度量指标, 假设监测频带为 (f_a, f_b) , 其间共有 n 个网格, 其谱线分别为 $f_i, i=a, a+1, \dots, b$, 则频谱曲线下的监测频带区间面积

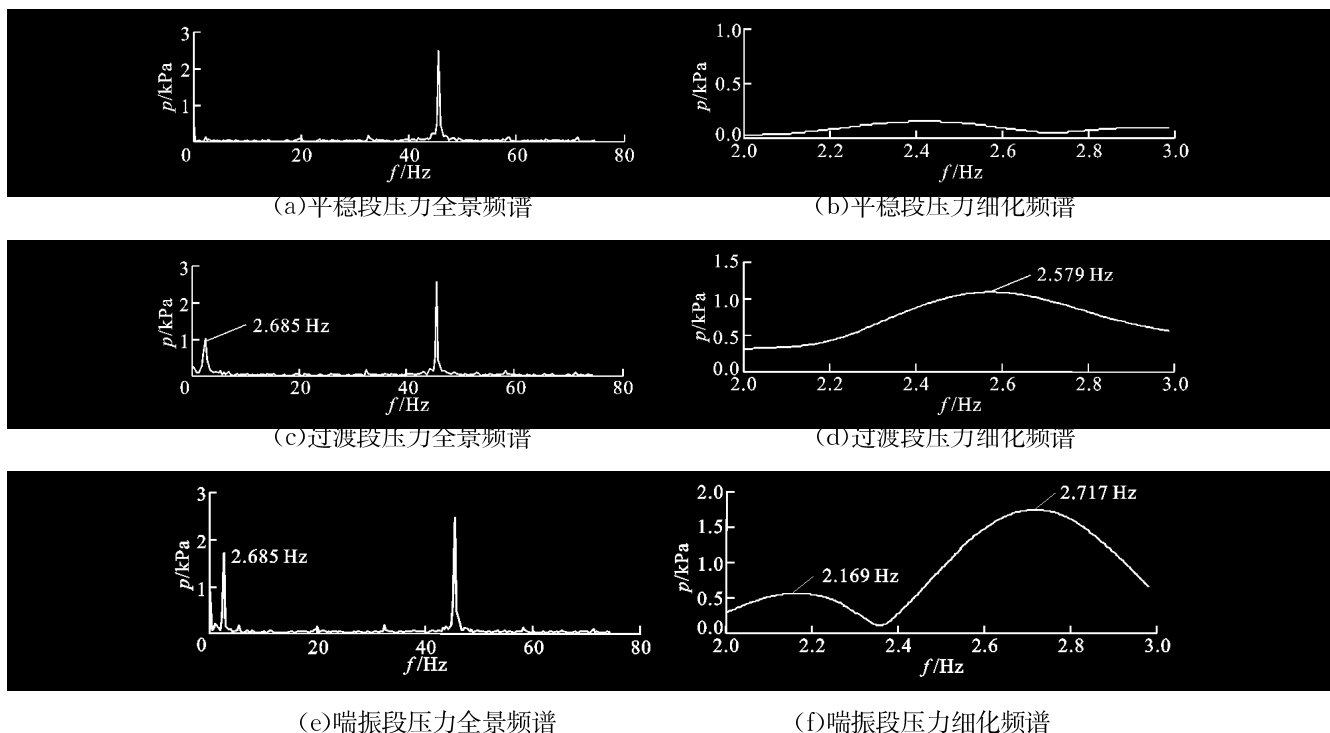


图 3 缓慢节流各阶段压力信号的幅值频谱

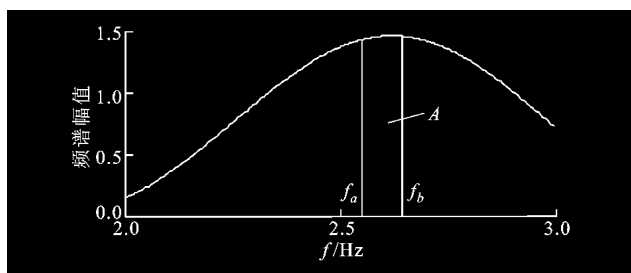


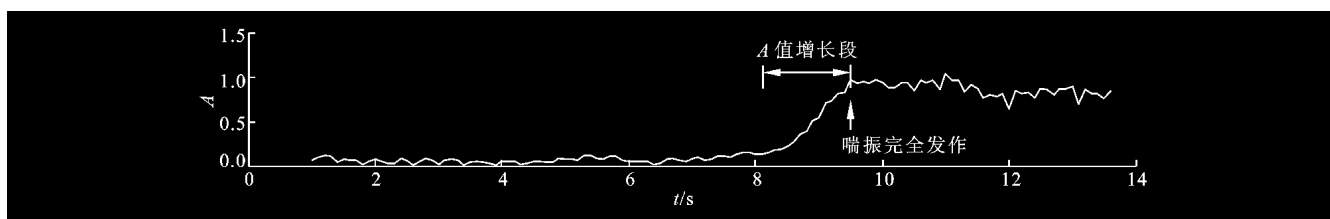
图4 频带能量示意图

$$A = \sum_{i=a}^b f_i \Delta f \quad (4)$$

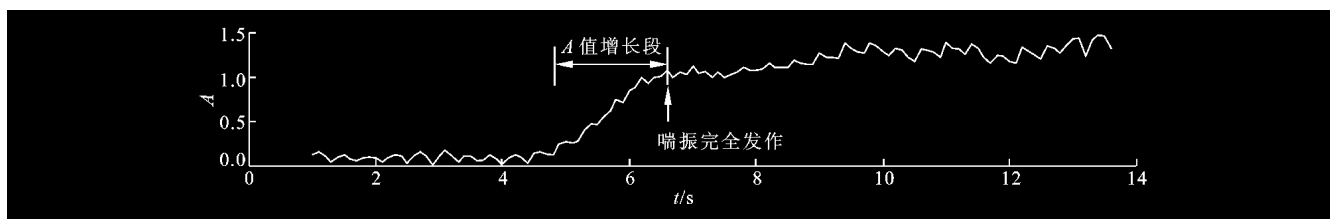
式中: Δf 为指定频谱区间的网格宽度.

根据所采用的实验数据的频域特性,确定监测

频带为 2.55~2.75 Hz,以 A 为监测参数,计算前需对信号做去均值处理.如图 5 所示,图中注明了频带能量增长段和喘振完全发作所对应的时间,虽然这 2 种节流方式所对应的频带能量曲线差异较大,但远离喘振时所对应的频带能量均不超过 0.05,喘振完全发作后所对应的频带能量均大于 1,从扰动能量初始积累到激发出喘振的过渡段的时间间隔为 1~2 s,此时频带能量均快速增长.显然,频带能量预警方法的可靠性较高,喘振先兆明确(频带能量持续增加),易于辨识(可通过频带能量定性判断),可早期发现喘振发作的征兆(喘振完全发作前 1~2 s).



(a)缓慢节流



(b)快速节流

图5 不同速率节流时压力信号的频带能量曲线

4 结 论

在动力工程中,监测并预知喘振的出现是一个人们很感兴趣的问题,本文的研究进一步证实了喘振先兆频率和喘振频率相近,喘振信号本质上是非平稳非线性的信号.采用本文所提出的基于频带能量的喘振预警方法对多组节流过程中的压力信号进行分析,验证了该方法的有效性和实用性.随着科技的发展,压缩机组的控制趋向于安全与高效,由于只追求预警方法的时间提前量,也有可能造成防喘振系统过早启动,因此研究防喘系统最佳启动时刻的判定方法,是本文计划进一步开展的工作.

参考文献:

- [1] 宋智民. 离心压缩机喘振预测和控制研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
- [2] 聂超群, 戴冀, 廖生芳. 离心压缩系统喘振先兆的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(3): 306-310.

Nie Chaoqun, Dai Ji, Liao Shengfang. Experiment investigation into surge inception in centrifugal compression system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(3): 306-310.

- [3] 聂超群, 陈静宜, 乔晓辉. 压缩系统喘振现象主动控制的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1995, 16(2): 166-171.

Nie Chaoqun, Chen Jingyi, Qiao Xiaohui, et al. Experiment study on active control of surge in centrifugal compression system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1995, 16(2): 166-171.

- [4] 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.

- [5] 蒋峻. 离心风机喘振在线预报和自适应调节的实验研

- 究[D].北京:中科院工程热物理所,2001.
- [6] Bright M M, Qammar H K, Weig H J, et al. Stall precursor identification in high-speed compressor stages using chaotic time series analysis methods [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3):491-499.
- [7] Bright M M, Helen K Q, Wang Leizhen. Investigation of pre-stall mode and pip inception in high speed compression through the use of correlation integral [J]. AEME Journal of Turbomachinary, 1999, 121(4):743-750.
- [8] 吴云,李应红,张朴. 某涡喷发动机压气机气动失稳过程的非线性分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5):890-894.
- Wu Yun, Li Yinghong, Zhang Pu. Nonlinear analysis of the process of loosing compressor aerodynamic stability in a turbojet engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5):890-894.
- [9] 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 process of surge in centrifugal compressors based on correlation integral method [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(6):1092-1097.
- [10] Sun Tao, Xu Guanghua, Zhang Chunmei, et al. Investigation of fast algorithm for correlation integral method [C] // Proceeding of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2006:755-760.
- [11] 丁康,陈健林,苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1):1-10.
- Ding Kang, Chen Jianlin, Su Xiangrong. Development in vibration signal analysis and processing methodss [J]. Journal of Vabration Engineering, 2003, 16(1):1-10.
- [12] 刘进明,应怀樵. FFT 谱连续细化分析的傅立叶变换法[J]. 振动工程学报, 1995, 5(2):162-166.
- Liu Jinming, Ying Huaqiao. Zoom FFT spectrum by Fourier transform [J]. Journal of Vibration Engineering, 1995, 5(2):162-166.

(编辑 管咏梅)