

某轴流式压气机气动不稳定的相关积分分析

吴 云, 李应红, 张 朴, 宋慧敏

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 研究了某轴流式压气机节流试验中的气动不稳定问题。运用非线性的相关积分方法对压气机机匣壁面沿程静压信号进行了分析。结果表明, 压气机静叶通道机匣壁面给定点静压信号的相关积分值随着发动机工作状态的不同有规律地发生变化, 反映了对应位置的流动分离状况; 压气机沿程各级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值可以反映不同工况时压气机各级叶尖的流动匹配情况; 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的相关积分值可以反映中低转速工况下放气带开关状态对转子端壁流态的影响。研究还表明, 压气机静子机匣壁面沿程静压信号的相关积分分析是进行压气机气动稳定性监控诊断的一种有效手段。

关 键 词: 压气机; 气动不稳定; 相关积分; 试验研究

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

1 引 言

压气机的气动不稳定问题是影响叶轮机械性能发挥的重要因素之一^[1], 对压气机气动稳定工作状况的实时监测对于保证叶轮机械在不同工况下能够稳定工作具有重要意义。目前压气机气动稳定性的研究在数值模拟方面已经较为成熟, 文献[2~3]通过建立轴流压缩系统的非线性模型, 对压缩系统的工作稳定性进行仿真, 取得了较好的效果; 考虑到压气机工作的复杂性, 试验也是研究压气机气动稳定性的必要手段, 由于成本和技术风险的原因, 仅有少数的失速、喘振试验直接在发动机上进行^[4~5]。

此前对压气机气动稳定工作状态实时监测的重点主要是对压气机临近失速前的模态扰动波和短周期扰动尖峰进行检测, 如行波能量法、功率谱密度分析和小波分析等^[6~9]。由于压气机内流动力学的复杂性, 很难有一种通用的算法可以同时检测这两种扰动信号, 而且不能很好的对压气机失速前的工作状态变化进行监测。相关积分方法是一种非线性时间序列分析方法^[10], 这种方法的优点是只需要一个

压力传感器的动态信号, 不需要对测量信号进行滤波处理。由于压气机转子端部流态在设计点和近失速点有很大差别^[11], 因此有可能通过监测压气机端部的流态来分析压气机的工作稳定性。

基于文献[4]进行的某型涡喷发动机节流喘喘试验, 通过对试验数据进行分析, 发现压气机沿程各级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值随节流程度不同有规律地发生变化, 一定程度上可以反映压气机工作状态的变化。

2 试验情况

节流试验在专用试车台架上进行。试验发动机为单轴涡喷发动机, 压气机为七级轴流式。防喘装置为置于压气机三、四级之间的放气带。试验中, 在压气机上、下机匣的安装面上钻孔, 安装高响应动态压力传感器或测压探针, 测量压气机各级静叶通道机匣壁面静压及同一静叶通道不同叶高的总压。具体的试验设备、发动机改装情况和数据采集处理方法参见文献[4], 试验发动机的压气机特性图如图 1 所示。

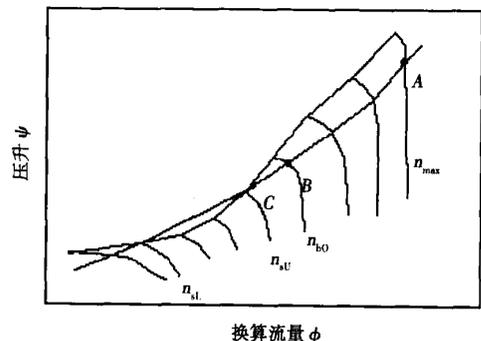


图 1 试验发动机压气机特性示意图

该型发动机在中低转速范围确定穿越喘振区域,与喘振边界有两个交点,分别为喘振上边界转速 n_{sU} 和喘振下边界转速 n_{sL} 。工作点 A 是设计点,对应发动机最大转速工作状态,工作点 B 对应放气带开关转速 n_{b0} ,工作点 C 对应的转速比 n_{sU} 高 20 r/min左右。

试验中,对发动机在启动过程,最大状态工作点 A ,放气带打开点 B ,临近失速边界的工作点 C 附近工作时压气机各级机匣壁面静压进行了测量。采用了 1 000 Hz 和 10 000 Hz 两种数据采集速率。

3 相关积分方法

3.1 相空间重构

Takens 提出的嵌入定理指出^[13],可以找到一个合适的嵌入维数,如果原吸引子的维数为 d ,延迟坐标的维数 $m \geq 2d + 1$,则可以在嵌入维空间把时间序列 $x(t_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 的吸引子恢复出来。

运用延时坐标法重构相空间,对 $x(t_i)$ 进行延时采样,延迟时间为 $\tau, \tau = k \cdot \Delta t, k \in Z$ 。应用延迟坐标形式形成相空间矢量,即 $X_i = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau))$ 。原时间序列延拓成一个 m 维相空间的一个相型分布:

$$\begin{matrix} x(t_1) & x(t_1 + \tau) & \dots & x(t_1 + (m - 1)\tau) \\ x(t_2) & x(t_2 + \tau) & \dots & x(t_2 + (m - 1)\tau) \\ x(t_3) & x(t_3 + \tau) & \dots & x(t_3 + (m - 1)\tau) \\ M & M & M & M \end{matrix}$$

3.2 相关积分

重构相空间中相空间矢量 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的相关积分定义为^[14]:

$$CI = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \theta(\epsilon - ||X_i - X_j||)$$

其中, $N = n - (m - 1) \cdot \tau$ 为相点数, ϵ 为预设的阈值, θ 是 Heaviside 函数,满足:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

选取 $m = 20, \tau = 3, \epsilon = 0.4$, 具体的选取方法参见文献[14]。滑动时间窗口宽度为 1 000 个相空间矢量,滑动步长为 200 个相空间矢量。

针对给定时间窗口内的相空间矢量,相关积分值的大小反映了压气机内部流动的非线性动力学特性^[10],压气机稳定工作,各级流动匹配较好的情况下,相空间矢量间的距离较小,反映为小于给定阈值的相空间矢量对较多,对应较大的相关积分值;反之,若出现不稳定工作征兆,则对应着较小的相关积分值。

4 节流试验数据分析

对发动机在工作点 A, B, C 附近工作时的压气机各级静子机匣壁面静压信号进行分析,计算其第一级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值,所有数据文件未经任何滤波及其它预处理。图 2 显示了发动机在最大状态、放气带开关转速附近和近失速点附近工作时压气机第一级静子机匣壁面静压信号和相应的相关积分值曲线。

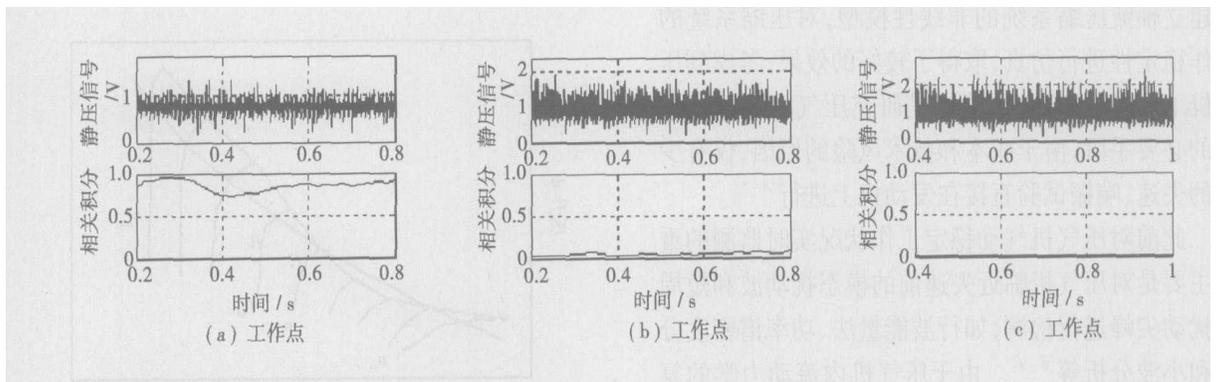


图 2 3 个不同工作点第一级转子的机匣壁面静压信号和相关积分

发动机在工作点 A 稳定工作时,压气机第一级静子机匣壁面静压信号的相关积分均值为 0.850 1, 最小值为 0.724 1;工作点 B 附近,放气带关闭时的相关积分均值为 0.044 2, 最小值为 0.019 5;工作点 C 附

近的相关积分均值为 0.001 5, 最小值为 0.000 5。

由此可见,对应于不同的发动机工作点,压气机机匣壁面上给定点处静压信号的相关积分值在量值上有很大的差异。对于图 1 所示的情形,由于从工

作点 A 到 B 、 C , 发动机的稳定工作裕度是依次减小的^[12], 压气机第一级端部的来流攻角也是依次增大的, 因此, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的相关积分值的变化, 在一定程度上反映了不同的端壁流动状况。从压气机气动稳定性监控的角度来看, 可以考虑在压气机静子机匣壁面静压信号相关积分值与气动稳定性裕度之间建立起关联。

从相关积分值与工作点的对应关系上看, 最大状态时, 压气机的稳定裕度较大, 压气机各级流场匹配较好, 流动未发生分离, 相关积分值在一个较高的水平上(大于 0.7); 工作点 B 附近, 放气带关闭时, 压气机的喘振裕度变小, 第一级叶尖部位来流攻角增大, 流动分离逐渐增强, 相关积分值维持在一个较低的水平上(0.03 左右振荡); 近失速点 C 附近, 压气机的稳定裕度几乎为零, 压气机第一级动叶叶尖的流动分离相当严重, 相关积分值降到 0.001 左右。3 个典型工作状态下的相关积分值各相差一个量级。因此, 相关积分值的变化反映了不同工作状态下压气机第一级静叶通道机匣壁面流场的流动状况。量值上接近一个量级的差异对于区分不同的工作状态, 对压气机的气动稳定性进行监控是十分有利的。

图 3 显示了发动机在工作点 C 附近压气机第一级~第六级静子机匣壁面静压信号和相应的相关积分

值。

计算得出, 第一级静子机匣壁面静压的相关积分值平均值为 0.003 5, 而第二级~第六级静子机匣壁面静压的相关积分均值分别为 0.737 1, 0.710 8, 0.729 1, 0.613 3, 0.602 1。

可以看出, 对应于同一发动机工作点, 压气机沿程机匣壁面静压信号的相关积分值是不同的。由于工作点 C 附近对应着压气机稳定裕度很小的状况, 可以认为, 压气机第一级转子端部首先出现了较为严重的流动分离, 而其它各级转子端部尚未出现严重的流动分离。这一点对该型涡喷发动机的气动稳定性监测具有很重要的意义, 因为压气机第一级叶尖周向的切向速度最大, 在空气流量减小, 叶尖攻角增大时, 流动分离首先在第一级动叶叶尖首先发生, 但是由于第一级轮毂比较大, 叶片较长, 流动分离的发展较为缓慢; 随着节流程度的加深, 压气机的流量进一步减小, 分离区进一步扩展并向后面级传播, 在级负荷较大的压气机中间级诱发模态扰动或短周期扰动。由此可见, 相关积分值的动态变化可以在一定程度上反映压气机各级的流态演化特征, 在压气机运行过程中动态监测沿程各级机匣壁面静压信号的相关积分值, 可以监控不同工况下发动机各级的匹配情况。

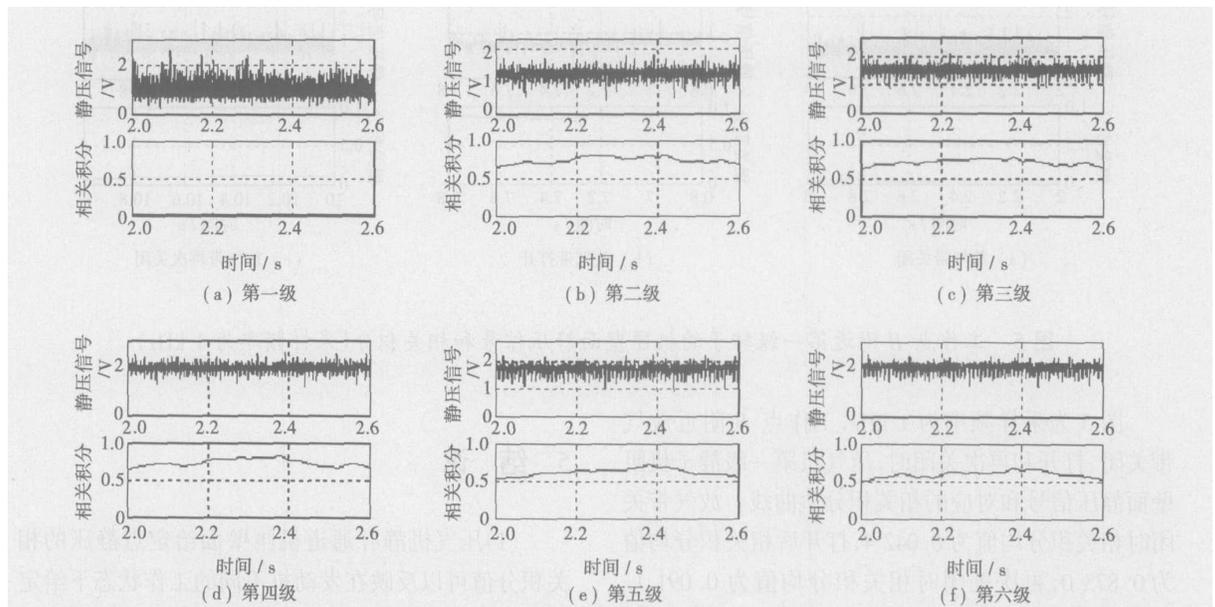


图 3 工作点 C 附近压气机第一级~第六级转子的机匣壁面静压信号和相关积分

图 4 为采样频率为 10 kHz, 工作点 B 附近放气带关闭、打开和再次关闭时, 压气机第一级静子机匣壁面静压信号和对应的相关积分值曲线。可以看

到, 放气带关闭时相关积分均值为 0.044 2, 打开后相关积分均值为 0.829 5, 再次关闭时相关积分均值为 0.076 9。

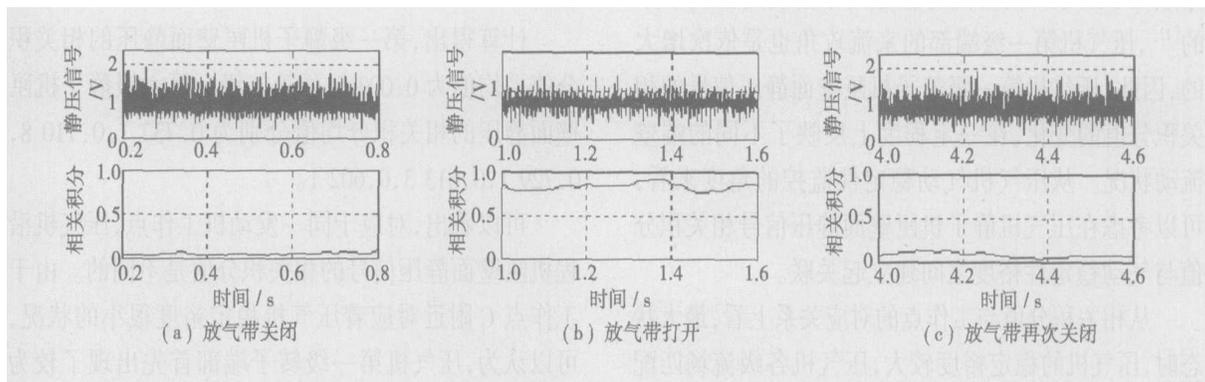


图 4 工作点 B 附近第一级转子的机匣壁面静压信号和相关积分(采样频率为 10 kHz)

工作点 B 对应中低转速的工况,放气带关闭时,发动机喘振裕度较小^[12],打开放气带则可以显著增大稳定工作裕度。图 3 所示的情况表明,压气机第一级静子机匣壁面静压信号的相关积分值可以反映在工作点 B 处,放气带的开关状态对压气机第一级端部流态的影响。在工作点 B 附近工作且放气带关闭时,压气机的第一级的流动状况较为恶劣,反映为很小的相关积分值,由于放气带的打开,压气机第一级端部的流场得到了明显改善,反映为相关

积分值的显著增大,而放气带再次关闭时由于流场不稳定,相关积分值恢复到较低的水平上。对于该型发动机,放气带的打开减小了压气机的流道阻力,使得放气孔前面各级的空气流量增加,轴向速度增大,气流冲角减小,从而减轻了前面各级尤其是第一级对设计状态的偏离,有助于使发动机在压气机稳定裕度较小的情况下避免进入严重的不稳定工作状态。由此可见,相关积分值的变化可以反映放气带打开对第一级转子叶尖部位流动分离的抑制作用。

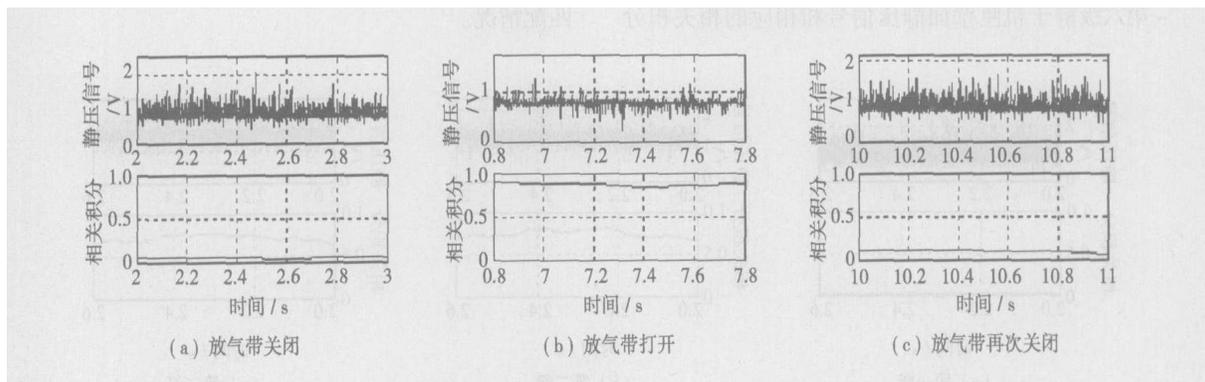


图 5 工作点 B 附近第一级转子的机匣壁面静压信号和相关积分(采样频率为 1 kHz)

图 5 为采样频率为 1 kHz,工作点 B 附近放气带关闭、打开和再次关闭时,压气机第一级静子机匣壁面静压信号和对应的相关积分值曲线。放气带关闭时相关积分均值为 0.042 4,打开后相关积分均值为 0.873 0,再次关闭时相关积分均值为 0.091 1。相关积分值与放气带的开关状态的对应关系与采样频率为 10 kHz 时一致,从而表明采样频率的变化并未对相关积分分析监控压气机工作状态的有效性产生很大影响,仍然能够很好地反映压气机内部流动状况的变化趋势。

5 结 论

(1)压气机静叶通道机匣壁面给定点静压的相关积分值可以反映在发动机不同的工作状态下给定点的流动分离状况,压气机第一级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值可以作为度量压气机气动稳定性的一个指标,较大的相关积分值对应压气机内部匹配较好的流动状况,较小的相关积分值则表明有较为严重的端部流动分离。

(2)压气机沿程各级静叶通道机匣壁面静压的

相关积分值可以反映压气机沿程各级的流动匹配状况。与检测模态扰动或短周期扰动相比, 监测压气机第一级静叶通道机匣壁面静压的相关积分值可以提供较长的预警时间。

(3) 压气机第一级静子机匣壁面静压信号的相关积分值可以反映中低转速下放气带开关状态对压气机转子端壁流态的影响。

参考文献:

- [1] 陆亚钧. 叶轮机非定常流动理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992.
- [2] 张明川, 唐狄毅. 预测轴流压气机工作稳定性的非线性模型[J]. 推进技术, 1998, 19(5): 47-51.
- [3] 吴 虎, 东秋生. 某发动机压缩系统喘振与消喘控制的模拟分析[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 216-218.
- [4] 李应红, 李 军, 姜 涛. 某型发动机喘振综合治理及扩稳试验[J]. 推进技术, 2002, 23(3): 213-215.
- [5] FREEMAN C. Stall in axial flow aero engine compressors[A]. **Axial Flow Compressors Lecture Series**[C]. Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1992. 1-24.
- [6] LEINHOS D, SCHMID N R, FOTTNER L. The influence of transient inlet distortions on the instability inception of a low-pressure compressor in a turbofan engine[J]. **ASME J Turbomachinery**, 2001, 123(1): 1

-8.

- [7] HÖSS B, LEINHOS D, FOTTNER L. Stall inception in the compressor system of a turbofan engine[J]. **ASME J Turbomachinery**, 2000, 122(1): 32-44.
- [8] INOUE M, KUROMARU M, YSHIDA S, *et al.* Short and long length-scale disturbances leading to rotating stall in an axial compressor stage with different stator/rotor gaps[J]. **ASME J Turbomachinery**, 2002, 124(3): 376-384.
- [9] 姜 涛, 贾智伟, 李应红. 基于小波分析的压气机失速故障检测[J]. 推进技术, 2003, 24(1): 55-57.
- [10] BRIGHT M M. Chaotic time series analysis tools for identification and stabilization of rotating stall precursor events in high speed compressors[D]. Akron: Akron Univ, 2000.
- [11] 于宏军, 刘宝杰, 刘火星, 等. 近失速状态下压气机转子叶尖旋涡流动研究[J]. 航空学报, 2004, 25(1): 9-15.
- [12] 吴 云, 张 朴, 李应红, 等. 基于相关积分方法的压气机气动不稳定监测[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集[C]. 西安: 中国工程热物理学会出版社, 2004. 434-439.
- [13] TAKENS F. Detecting strange attractors in fluent turbulence[J]. **Lecture Notes in Mathematics**, 1981, 898: 366-381.
- [14] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.

(辉 编辑)

新技术

轴流压气机流动的控制技术

据《ASME Journal of Turbomachinery》2005年7月号报道, 通过求解利用高阶方式离散化的非定常雷诺平均的纳维尔-斯托克斯方程, 得到的结果表明在宽广的冲角范围内通过抽吸和吹除附面层可以有效地控制无序不稳定的分离流动, 导致提高了轴流压气机叶栅时间平均的气动力性能。

详细研究了不规则激励频率、幅值和激励位置的影响。有效地激励频率跨越一个宽广的频谱, 并且存在一个几乎等于旋涡脱落特征频率的最佳激励频率。激励幅值显示有一个阈值(接近是周期抽吸和吹除最大速度与自由流速度之比的10%), 并且有一个最佳值(接近35%)。最佳激励位置正好是在分离点的上游。

探索了利用上游尾流抑制轴流压气机内不稳定分离的可行的不稳定制动器。

(吉桂明 供稿)

Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 140 ~ 144

A numerical optimization program based on a gradient method has been developed. Furthermore, in conjunction with a program for solving three-dimensional viscous flow fields a three-dimensional aerodynamic optimized design was conducted of transonic compressor rotating blades with the aim of maximizing the adiabatic efficiency. First, a chord-wise sweep optimization design was performed with an increase in adiabatic efficiency amounting to about 0.65% being achieved. Then, an optimization design was conducted to the camber line of the blade profile, thus obtaining the final blade. As compared with a prototype blade, the adiabatic efficiency can be enhanced by as high as 1.05%. It has been found that a swept blade alone can bring about only a rather limited improvement in aerodynamic performance. A combined optimization design involving both a chord-wise sweep and a camber line can lead to a significant improvement in flow conditions in a blade row and also a fine off-design performance. **Key words:** compressor, swept rotating blade, camber line, Navier-Stokes equation, optimization design

某轴流式压气机气动不稳定的相关积分分析 = Correlation-integral Analysis of the Aerodynamic Instability of an Axial-flow Compressor [刊, 汉] / WU Yun, LI Ying-hong, ZHANG Pu, SONG Hui-min (Engineering College under the Air Force Engineering University, Xi'an, China, Post Code: 710038) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 145 ~ 149

Investigated was the aerodynamic instability problem of an axial-flow compressor during throttling tests. A nonlinear correlation-integral method was employed to analyze static pressure signals along the compressor casing-wall surface. The results of the analysis indicate that correlation-integral values of the static pressure signals at a given point of the compressor stator passage casing-wall surface will undergo regular changes, depending on the engine operating conditions, and reflect the flow separation conditions at corresponding locations. The correlation-integral values of static pressure at various-stage stator channel casing-wall surface along the compressor flow passage can reflect the flow matching status at the blade tip of the various compressor stages under different operating conditions. The correlation-integral values of the static pressure of the compressor first stage stator casing-wall surface reflect the impact of the bleed valve's switching state on the rotor end-wall flow regime at intermediate and low-speed operating conditions. The study conducted by the authors indicates that the correlation-integral analysis regarding the above-mentioned static pressure signals can serve as a kind of effective means for monitoring and diagnosing the compressor aerodynamic stability. **Key words:** compressor, aerodynamic instability, correlation integral, experimental investigation

基于基元叶栅法的轴流式压气机变工况性能计算模型 = Calculation Model for the Off-design Performance of an Axial-flow Compressor Based on an Elementary Cascade Method [刊, 汉] / ZHANG Xue-lei, WANG Song-ling, CHEN Hai-ping, et al (Education Ministry Key Laboratory of Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 150 ~ 155

On the basis of an elementary cascade method a calculation model for the off-design performance of an axial-flow compressor has been set up. Through the use of a variable specific-heat equation the thermodynamic parameters of air were calculated with the general characteristic curves showing pressure ratios, isentropic efficiency, corrected consumed power and