

一种航空发动机压气机喘振检测方法

申世才, 雷 杰, 郝晓乐

(中国飞行试验研究院发动机所, 西安, 710089)

摘要 将发动机压气机出口脉动压力作为喘振检测信号, 检验分析了压气机出口脉动压力的统计特征, 采用滑动窗口的 Johnson 转换方法对脉动压力信号进行正态转换, 基于统计特征提出了适应发动机任意状态的喘振检测阈值和方法。该方法成功检测出某发动机 3 次喘振故障, 分析得出: 发动机压气机出口脉动压力不服从正态分布, 稳态过程脉动压力正态转换成功率大于瞬态过程, 降低样本容量可有效提高瞬态过程正态转换成功率; 对于脉动压力 99.95% 概率分布的上、下边界距离, 其幅值范围在不同转速下差异较大, 且随转速增大而增大; 根据提出的喘振检测量可设置适应发动机任意状态的固定检测阈值, 其检测出发动机喘振及退出喘振所需时间均小于 20 ms。

关键词 航空发动机; 压气机; 喘振检测; 脉动压力; 统计特征; 飞行试验

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.04.001

中图分类号 V231.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)04-0001-06

A Method for Detecting the Surge of an Aero-Engine Compressor

SHEN Shicai, LEI Jie, HAO Xiaole

(Engine Department of Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract Taking the fluctuating pressure at the outlet of the engine compressor as a surge detection signal, the statistical characteristics of the fluctuating pressure at the outlet of the compressor being tested and analyzed, and the fluctuating pressure signal being transformed normally by the Johnson transform method of sliding window based on the statistical characteristics, a threshold and a method for surge detection adapted to any state of the engine are proposed respectively. The method is successfully used to detect the surge failures at a certain engine for three times. The analysis shows that the fluctuating pressure at the outlet of the engine compressor does not obey the normal distribution, and the success rate of the normal transformation for the fluctuating pressure in the steady state process is higher than that in the transient process, the sample capacity reduced can effectively increase the success rate of normal transformation in transient process. For the upper and lower boundary distances of the 99.95% probability distribution of the fluctuating pressure, the amplitude range varies greatly at different speeds and increases with the increase of the speed. According to the proposed surge detection amount, a fixed detection threshold can be set adaptable to any state of the engine, and the detection time of starting engine surge and exiting engine surge is less than 20 ms.

收稿日期: 2020-04-01

基金项目: (航空工业) 装备预研联合基金项目(6141B05110201)

作者简介: 申世才(1983—), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 主要从事发动机故障诊断研究。E-mail: shenshicai2007@163.com

通信作者: 雷 杰(1987—), 男, 陕西商洛人, 高级工程师, 主要从事发动机试飞技术研究。E-mail: leihongtao520@126.com

引用格式: 申世才, 雷杰, 郝晓乐, 等. 一种航空发动机压气机喘振检测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 1-6. SHEN Shicai, LEI Jie, HAO Xiaole. A Method for Detecting the Surge of an Aero-Engine Compressor[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(4): 1-6.

Key words aero-engine; compressor; surge detection; fluctuating pressure; statistical characteristics; flight test

喘振是一种危害性极大的发动机压缩系统气动失稳现象,轻则造成发动机工况急剧恶化,重则导致发动机机械损伤,进而引发严重飞行事故,引起人员和财产的巨大损失^[1]。因此,寻求一种快速、准确检测发动机喘振故障的方法是发动机稳定性研究领域的热点问题,对于保障航空器飞行安全具有重要的现实意义和价值。

当前,国内外的喘振检测方法基本是以压气机出口流场压力为对象,根据压力信号时域或频域特征进行喘振算法研究。其中基于压力信号时域特征的喘振检测算法主要有:自相关函数法^[2]、短时能量法^[3]、变化率法^[4-5]、压差法^[6]、方差分析法^[7]、统计特征法^[8]等,基于压力信号频域特征的喘振检测算法主要有:频谱分析法^[9-11]、小波分析法^[12-13]、频域幅值法^[14-15]等。上述时域和频域特征喘振检测算法多数是以压气机部件级试验为支撑,取得了很多较好的喘振检测效果,但由于受到试验对象和条件限制,应用在发动机整机喘振检测的算法相对较少,有必要寻求一种简单、可靠、准确的发动机整机喘振检测方法。

1 压气机出口脉动压力统计特征分析

发动机压气机出口动态压力 p_{31} 包含平均压力成分 $p_{31,a}$ 和脉动压力成分 Δp_{31} ,在发动机稳定状态下,压力机内部流场稳定,其出口脉动压力 Δp_{31} 相对稳定,而在发动机出现喘振时,压气机出口流场 Δp_{31} 呈不稳定状态^[4]。所以当发动机稳定工作时,如果 Δp_{31} 服从某种概率分布规律,根据其概率分布函数,就可以通过 Δp_{31} 的统计特征设置阈值来检测发动机喘振故障的发生。

正态分布是统计学中最重要的一种分布规律,大量随机现象可以用正态分布规律来描述或近似,同时正态分布具有很多优良的性质,所以不论是在理论研究还是工程实践中,正态分布具有广泛的应用。这里首先假设 Δp_{31} 测量数值服从正态分布,下面采用某发动机实测数据检验压气机出口脉动压力时间序列数据是否符合正态概率分布规律。

某发动机试飞期间,测量了不同飞行高度、速度条件下发动机稳态及瞬态的 p_{31} 时间序列数据,获取了相应的 Δp_{31} 时间序列数据。将这些不同飞行条件下发动机稳态和瞬态 Δp_{31} 时间序列数据作为总体统计量,采用简单随机抽样原则从总体统计量中抽取发动机稳态和瞬态 Δp_{31} 时间序列数据作为

检验样本,进行 Δp_{31} 时间序列正态符合性检验分析。

样本数据 x 的正态性检验方法有很多,主要分为统计图法和统计指标法。统计图法包括直方图、P-P图、箱式图、概率图、分位数图等,均能为样本正态性提供一个粗略估计,本文采用分位数图对样本 Δp_{31} 正态性进行初步估计;统计指标法可对样本正态性进行定量检验,主要包括偏度峰度联合检验、S-W(Shapiro-Wilk)检验、A-D(Anderson-Darling)检验、K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验等,本文选择K-S检验作为样本 Δp_{31} 的正态性定量检验方法。

图1为高压转速为 n_2 时发动机稳态过程 Δp_{31} 时间序列随机样本分位数图,可见该发动机稳态输入样本散点不完全分布在直线附近,故而不能完全为正态分布提供粗略支持,进一步采用K-S检验。

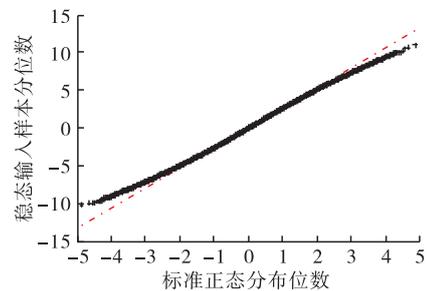


图1 稳态过程时间序列样本数据分位数图

K-S检验统计量为:

$$D_n = \max\{|F_n(x_i) - F_0(x_i)|, |F_n(x_{i+1}) - F_0(x_i)|\} \quad (1)$$

式中: $F_n(x)$ 为样本的概率分布函数; $F_0(x)$ 为标准正态分布函数。如果检验统计量 D_n 大于给定显著水平 α 和样本容量 n 确定的检验临界值 $D_n(\alpha)$, 则拒绝零假设, 否则接受零假设, 认为 Δp_{31} 符合正态分布。

对图1中发动机稳态过程时间序列样本 Δp_{31} 进行计算, 得到 $D_n = 0.0083$, 取显著性水平 α 为 0.01 时, 查表得到临界值 $D_n(\alpha) = 0.0025$, $D_n > D_n(\alpha)$, 故拒绝零假设, 所以发动机稳态过程 Δp_{31} 不服从正态分布。

进一步分析发动机瞬态过程 Δp_{31} 是否服从正态分布, 图2为发动机瞬态过程 Δp_{31} 随机样本分位数图, 显然发动机瞬态过程 Δp_{31} 输入样本散点同样不完全分布在直线附近, 进一步进行K-S检验: D_n 等于 0.0147, 取显著性水平 α 为 0.01 时, 查表 $D_n(\alpha)$ 为 0.004, $D_n > D_n(\alpha)$, 拒绝零假设, 故发动机瞬态过程 Δp_{31} 同样也不服从正态分布。

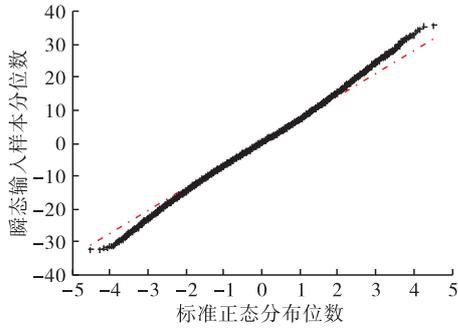


图 2 瞬态过程时间序列样本数据分位数图

进行全部 Δp_{31} 时间序列样本正态符合性检验后,发现 Δp_{31} 不服从正态分布,这是因为发动机压气机是高温、高速旋转机械部件,其 Δp_{31} 信号包含了发动机转子频率、叶片频率的基频和倍频成分及受发动机瞬态过程影响,其测量数据随时间统计序列不服从正态分布,所以对于 Δp_{31} 这种未知分布规律,难以根据其统计特征设置喘振检测阈值,想要 Δp_{31} 按正态分布设置喘振检测阈值,必须将 Δp_{31} 时间序列样本数据进行正态转换。

2 压气机出口脉动压力正态转换

2.1 Johnson 正态转换方法

常用的非正态数据正态转换方法主要包括:倒数转换、对数转换、平方根转换、平方根反正旋转换、平方根后取倒数转换、Johnson 转换等,其中前 5 种方法对样本数据的要求较高,要求样本 x 为正值,由于 Δp_{31} 存在负值数据,故难以采用前 5 种转换方法对 Δp_{31} 数据进行正态转换。

Johnson 转换条件相对宽松,允许样本 x 存在负数的情况,具有良好适应性且 Johnson 转换可将随机样本 x 直接转换为标准正态分布 $N(0,1)$ 。本文采用 Johnson 转换方法对 Δp_{31} 时间序列样本数据进行正态变换。样本 x 进行 Johnson 正态转换时,其基本转换公式为:

$$z = \gamma + \eta f(x, \epsilon, \lambda) \quad (2)$$

式(2)中 $f(x, \epsilon, \lambda)$ 为特定 Johnson 分布曲线函数,具体为 S_B (有界)、 S_L (对数正态)、 S_U (无界)3 种类型, $\eta, \gamma, \lambda, \epsilon$ 等通过对应转化类型计算公式得到,3 种类型函数及参数约束条件见表 1。

表 1 Johnson 转换函数

类型	Johnson 转换函数	参数范围	样本 x 范围
S_B	$z = \gamma + \eta \ln \frac{x - \epsilon}{\lambda + \epsilon - x}$	$\eta, \lambda > 0$ $\epsilon, \gamma \in (-\infty, +\infty)$	$\epsilon < x < \epsilon + \lambda$
S_L	$z = \gamma + \eta \ln(x - \epsilon)$	$\eta, \lambda > 0$ $\epsilon, \gamma \in (-\infty, +\infty)$	$x > \epsilon$
S_U	$z = \gamma + \eta \operatorname{arsinh} \frac{x - \epsilon}{\lambda}$	$\eta, \lambda > 0$ $\epsilon, \gamma \in (-\infty, +\infty)$	$-\infty < x < +\infty$

确定 Johnson 转换函数的方法有很多,其中样本百分位数法得到了广泛应用,本文采用百分位数法进行正态转换。

首先选择一个合适的 r ,在标准正态分布表中查找 $(-sr, -r, r, sr)$ 的分布概率 $P_{-sr}, P_{-r}, P_r, P_{sr}$,通过样本获取对应分位数 $x_{-sr}, x_{-r}, x_r, x_{sr}$ 后,计算 $m = x_{sr} - x_{-r}, k = x_{-r} - x_{-sr}, l = x_r - x_{-r}$,得到分位数比 mn/l^2 。

当 $mk/l^2 < 1$ 时为 S_B 分布, $mk/l^2 = 1$ 时为 S_L 分布, $mk/l^2 > 1$ 时为 S_U 分布。由于分位数比与 s 和 r 取值有关,需要确定合适的 s 和 r ,研究表明 s 取值为 3 及 r 取值范围为 $(0.25, 0.26, \dots, 1.25)$ 时,可获得较好的转换效果^[16-17]。

本文取 r 值为 1.2(在 0.25~1.25 范围内, r 取值 1.2 时正态转换效率最高),对于图 1 和图 2 中发动机稳态和瞬态过程随机样本,计算得到 mk/l^2 值分别为 0.721 和 0.921 5,即 $mk/l^2 < 1$, Δp_{31} 的 Johnson 转换函数为 S_B 型,对应的 $\eta, \gamma, \lambda, \epsilon$ 计算公式为:

$$\eta = z \left\{ \operatorname{arcosh} \left[\frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{l}{m} \right) \left(1 + \frac{l}{k} \right) \right]^2 \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$\gamma = \eta \operatorname{arsinh} \left\{ \left(\frac{l}{k} - \frac{l}{m} \right) \left[\left(1 + \frac{l}{m} \right) \left(1 + \frac{l}{k} \right) - 4 \right]^{1/2} \left[2 \left(\frac{l^2}{mk} - 1 \right) \right]^{-1} \right\} \quad (4)$$

$$\lambda = l \left\{ \left[\left(1 + \frac{l}{m} \right) \left(1 + \frac{l}{k} \right) - 2 \right]^2 - 4 \right\}^{1/2} \left(\frac{l^2}{mk} - 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{x_z + x_{-z}}{2} - \frac{\lambda}{2} + l \left(\frac{l}{k} - \frac{l}{m} \right) \left[2 \left(\frac{l^2}{mk} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

2.2 Johnson 正态转换结果

采用 K-S 方法对正态转换后的脉动压力时间序列样本 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 正态性符合性进行检验。其中图 1 所示发动机稳态过程 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 检测结果为: $D_n = 0.001 1, D_n(\alpha) = 0.002 5, D_n < D_n(\alpha)$, 接受了零假设,故 Johnson 正态转换后的稳态 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 服从正态分布。图 2 中瞬态过程样本 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 检测结果为: $D_n = 0.009, D_n(\alpha) = 0.004, D_n > D_n(\alpha)$, 拒绝了零假设,故 Johnson 正态转换后的瞬态 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 不服从正态分布。

对其他随机样本采用 Johnson 转换并检测转换后 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 的正态性,发现 Johnson 转换方法对于稳态过程具有较高的转换效率,稳态过程 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 正态转化成功率 P 可达到 90% 以上,但是对于瞬态过程随机样本正态转换效果较差,瞬态过程 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 正态转化成功率 P 不足 50%。

进一步分析瞬态过程 Δp_{31} 正态转化率不足的原因:样本 Δp_{31} 是时间序列的统计量,其受发动机

状态变化影响很大,当发动机稳态工作时, Δp_{31} 幅值范围基本稳定在同一量级,而不同转速时 Δp_{31} 幅值范围差异较大,且在瞬态变化过程中,随着发动机转速的提高, Δp_{31} 幅值变化范围也逐渐升高(具体如图3所示),这种 Δp_{31} 幅值随转速变化的特性是导致瞬态过程 Δp_{31} 随机样本Johnson正态转化成功率 P 过低的主要原因。

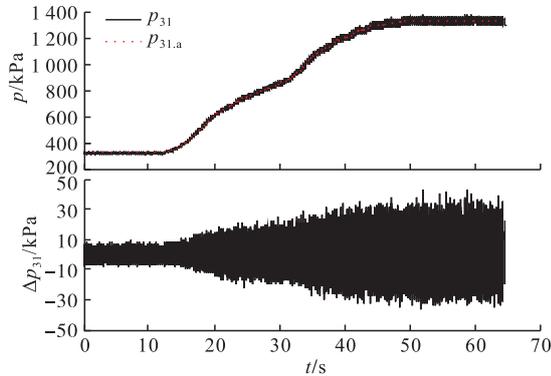


图3 压气机出口压力时间序列

为解决发动机瞬态过程 Δp_{31} 正态转化成功率 P 过低问题,必须降低瞬态过程转速变化对于 Δp_{31} 幅值变化范围的影响,考虑到样本 Δp_{31} 是时间序列的高频采集信号,其采样频率为5 kHz,减小 Δp_{31} 样本容量 n 就可以直接削弱转速变化对于 Δp_{31} 幅值变化范围的影响,当样本容量 n 减小到一定程度时(如几十毫秒量级),可假设认为发动机瞬态过程时间序列 Δp_{31} 相当于一个准稳态变化过程。按照上述方法,逐步减小随机样本容量 n ,从总体样本抽取几十组发动机瞬态过程随机样本进行Johnson正态转换,正态转化成功率 P 统计情况见表2所示,可见减小样本容量 n 可有效提高瞬态过程 Δp_{31} 的正态转化成功率,当随机样本量 n 降低至500及以下,随机样本 Δp_{31} 的Johnson正态转化成功率达到90%以上,因此要实现瞬态过程 Δp_{31} 有效正态转换,可将样本容量 n 确定为100。

表2 瞬态过程正态转化成功率统计表

n	300 000	150 000	75 000	10 000	5 000	1 000	500	100
$P/\%$	14	24	40	54	72	86	94	98

3 喘振检测阈值和方法

3.1 喘振检测量

正态转换后的 $\Delta p_{31, \text{norm}} \sim N(0, 1)$,根据其概率分布函数可知, $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 时间序列落在 ± 3.5 范围内的概率为99.95%,即 $\Delta p_{31, \text{norm}}$ 有99.95%概率分布在 $-3.5 \leq \Delta p_{31, \text{norm}} \leq 3.5$ 范围内,那么根据表1中 S_B 型Johnson转换函数的反函数 z^{-1} ,可以得到正

态转换前 Δp_{31} 的99.95%概率分布范围为:

$$\lambda + \epsilon - \frac{\lambda}{e^{\frac{-3.5-\gamma}{\eta}} + 1} \leq \Delta p_{31} \leq \lambda + \epsilon - \frac{\lambda}{e^{\frac{3.5-\gamma}{\eta}} + 1} \quad (7)$$

由于瞬态过程 Δp_{31} 样本容量 n 不宜过大,当 n 过大时将不能有效实现 Δp_{31} 正态转换,所以也就不能通过Johnson转换函数的反函数 z^{-1} 获取 Δp_{31} 的99.95%概率分布范围。此外,不同发动机状态下 Δp_{31} 幅值范围存在较大差异,导致其99.95%概率分布范围不同,进而不能根据 Δp_{31} 分布范围使用固定喘振检测阈值。为解决这一问题,本文采用一种基于滑动窗口的Johnson转换方法,具体如下。

假设滑动窗口长度为 d ,将测取的发动机时间序列 Δp_{31} 第1点数据 x_1 作为滑动窗口起始点,向后截取 d 个 Δp_{31} 数据。对窗口内 d 个 Δp_{31} 数据进行Johnson正态转化,得到 S_B 型Johnson正态转换函数反函数的 $\eta, \gamma, \lambda, \epsilon$ 等参数,根据公式(7)计算窗口内 Δp_{31} 数据99.95%概率分布上界 $\Delta p_{31, \text{max}}$ 和下界 $\Delta p_{31, \text{min}}$ 。将 $\Delta p_{31, \text{max}}, \Delta p_{31, \text{min}}$ 作为第 x_d 点时间序列 Δp_{31} 的99.95%概率分布上界 $\Delta p_{31, \text{max}}(x_d)$ 和下界 $\Delta p_{31, \text{min}}(x_d)$ 。按照 Δp_{31} 时间序列顺序滑动计算窗口,重复上述计算方法,可以得到 Δp_{31} 的99.95%概率分布的自适应上界 $\Delta p_{31, \text{max}}$ 和下界 $\Delta p_{31, \text{min}}$,实际等效于 Δp_{31} 上下“包络线”。

样本容量 n 为100时正态转换成功率最高,取滑动窗口 $d=100$,对于图3所示 Δp_{31} 时间序列样本数据,其99.95%概率的 $\Delta p_{31, \text{max}}, \Delta p_{31, \text{min}}$ 分布情况见图4所示,局部放大情况见图5,可见采用滑动窗口的Johnson正态转换方法,能够获取时间序列 Δp_{31} 的99.95%概率分布自适应上界 $\Delta p_{31, \text{max}}$ 和下界 $\Delta p_{31, \text{min}}$ 。

上文所述 Δp_{31} 等效“包络线”反映了其幅值变化范围,可以根据 Δp_{31} 上下“包络线”间距 D 检测发动机喘振,为消除 D 受发动机转速变化的影响,定义一种无量纲的发动机喘振检测量 T_{31} 为:

$$\begin{cases} D = \Delta p_{31, \text{max}} - \Delta p_{31, \text{min}} \\ T_{31} = \frac{\Delta p_{31, \text{max}} - \Delta p_{31, \text{min}}}{p_{31, a}} \end{cases} \quad (8)$$

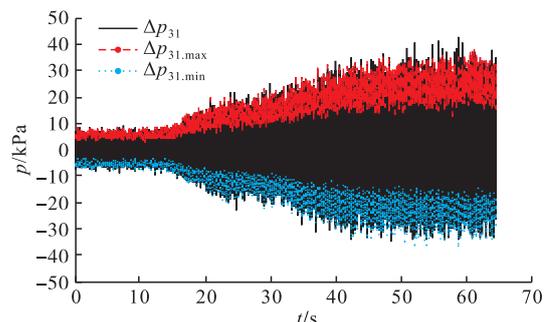


图4 脉动压力概率边界时间序列

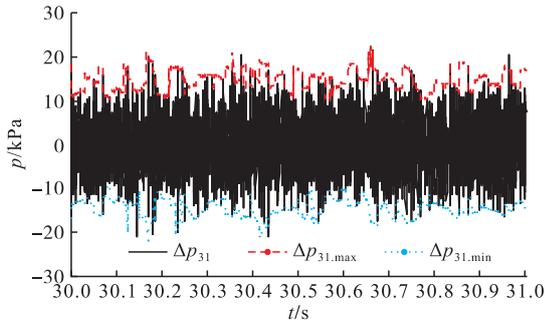


图 5 脉动压力概率边界时间序列局部放大图

式(8)等效于对 $\Delta p_{31.max}$ 和 $\Delta p_{31.min}$ 间距 D 进行归一化处理,可以消除发动机不同转速时 D 幅值范围的差异,便于设置固定的喘振检测阈值。如对于图 4 中所示的 Δp_{31} 时间序列,其对应的喘振检测测量 T_{31} 计算结果如图 6 所示。

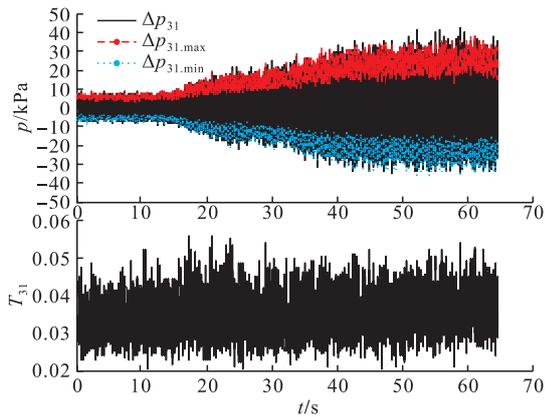


图 6 发动机无量纲喘振检测测量时间序列

3.2 喘振检测阈值及方法

设置发动机喘振检测阈值时,将上文不同飞行条件下发动机稳定工作时测取的稳态和瞬态时间序列 Δp_{31} 作为总体统计量,采用滑动窗口的 Johnson 转换方法计算对应的喘振检测测量 T_{31} ,将获取的 T_{31} 作为设置喘振检测阈值 A 的总体样本。

采用 K-S 方法检验总体样本 T_{31} 正态性,表明其并不服从正态分布。对总体样本 T_{31} 进行 Johnson 转换,即 $T_{31.norm} \sim N(0,1)$ 。对于转换后的 $T_{31.norm}$,其同样有 99.95% 概率分布在 ± 3.5 范围内,由公式(7)计算发动机稳定工作时 T_{31} 变化范围为:

$$0.0185 \leq T_{31} \leq 0.0798 \quad (9)$$

因为当发动机喘振时, Δp_{31} 脉动幅值会迅速增大,其概率意义“包络线”间距 D 必然会出现剧增,那么 T_{31} 将不可避免超出 0.0798 的范围,可以设置固定喘振检测阈值 $A=0.0798$ 。但是发动机稳定工作时, T_{31} 还存在 0.025% 概率小幅超过 0.0798,所以综合考虑喘振检测灵敏度和误报率,引入一个优化参数 $t(1 \leq t \leq 2)$,设置保守的固定喘振检测阈值为: $A=0.0798t$, t 根据实际喘振检测效果设定,

以最低喘振误报率作为 t 取值依据。

综上所述,根据发动机固定喘振检测阈值 A ,本文设计的喘振检测方法为:当喘振检测测量 T_{31} 大于 A 时,认为发动机出现喘振;当 T_{31} 小于等于 A 时,认为发动机工作稳定。

4 喘振检测方法试验验证

某发动机试飞期间先后发生 3 起喘振故障,其中地面发生喘振 1 次,空中发生喘振 2 次(记为空中喘振 1、空中喘振 2),地面发动机喘振发生在稳态过程中,空中 2 起喘振分别发生在加速、减速过程中,使用该型发动机喘振试飞数据对喘振检测方法的实际效果进行试验验证。

图 7~9 为该发动机 3 次喘振检测验证结果,3 次喘振检测均发出了喘振信号。当发动机稳定工作时,不管是稳态过程还是瞬态过程,喘振检测测量 T_{31} 变化幅值均相对稳定,不受发动机转速变化影响, T_{31} 没有超过检测阈值 A 的范围,而当发动机出现喘振时,喘振检测测量 T_{31} 值会出现剧增并超过检测阈值 A 。图 7 所示发动机稳态过程,喘振时,从脉动压力 Δp_{31} 出现波动到发出喘振信号用时约为 12 ms,喘振期间 T_{31} 最大值增长至 1.748;喘振消失时,从脉动压力 Δp_{31} 停止波动到喘振信号消失用时约为 14 ms。图 8、图 9 所示发动机瞬态过程,喘振时从脉动压力 Δp_{31} 出现大幅波动到发出喘振信号用时分别约为 16 ms、15 ms,喘振期间 T_{31} 最高增长到 1.653 和 1.689;喘振消失时从脉动压力 Δp_{31} 停止波动到喘振信号消失用时分别约为 17 ms、14 ms。

综上所述,本文发动机喘振检测方法成功检测出 3 次喘振故障,其识别发动机喘振及退出喘振所需时间均小于 20 ms,未出现虚警、漏报等异常情况,验证了检测方法的有效性和准确性,表明方法具有识别率高、报警迟滞小等优点。

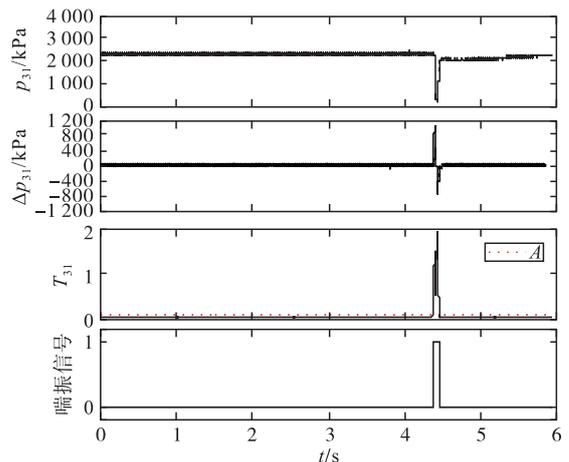


图 7 发动机地面喘振检测结果

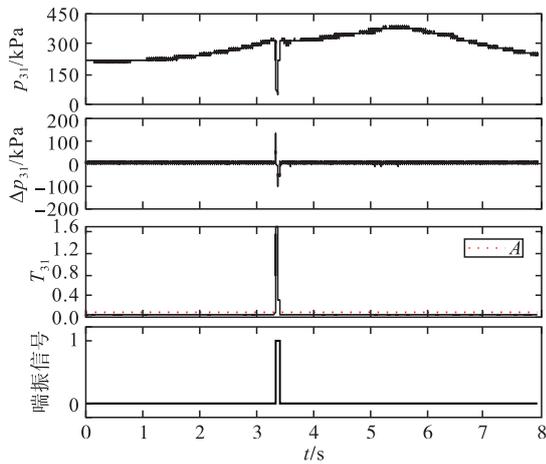


图8 发动机空中喘振1检测结果

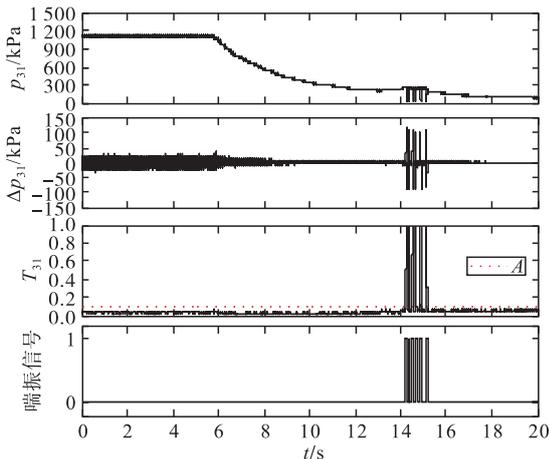


图9 发动机空中喘振2检测结果

5 结论

1)在地面及空中发动机稳定工作时,压气机出口脉动压力不服从正态分布。对于稳态过程脉动压力,采用 Johnson 方法的正态转换成功率较高,可达 90%以上,但是对于瞬态过程正态转换效果较差,当样本容量 n 降低至 500 以下时,瞬态过程脉动压力正态转化成功率可达到 90%以上。

2)采用滑动窗口的 Johnson 转换方法,可以获得压气机出口脉动压力 99.95% 概率分布的自适应上边界和下边界。在不同发动机转速下,该上、下边界距离的幅值范围差异较大,且随发动机转速增大而增大。

3)在地面及空中发动机稳定工作时,提出的喘振检测量消除了发动机状态变化带来的影响,在稳态及瞬态过程中变化范围差异很小,即喘振检测量不受发动机工作状态变化的影响。

4)根据喘振检测量能够设置适应发动机任意状态的固定喘振检测阈值,通过 3 次喘振试飞数据的验证,其识别发动机喘振及退出喘振所需时间均小

于 20 ms,表明喘振检测方法具有识别率高、报警迟滞小等优点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李长征,熊兵,吴晨.基于短时能量的压气机喘振检测[J].测控技术,2010,29(3):92-93.
- [4] 雷杰,房剑锋,雷晓波.基于脉动压力变化率的航空发动机喘振检测方法[J].燃气涡轮试验与研究,2019,32(2):1-6.
- [5] 李小彪,余海生,孙健国,等.一种涡扇发动机喘振信号判定方法[J].推进技术,2009,30(6):727-729.
- [6] 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(2):19-21.
- [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.
- [8] 李长征,熊兵,韩伟.基于统计特征的轴流压气机喘振检测[J].航空动力学报,2010,25(12):2656-2659.
- [9] HAGINO N, KASHIWABARA Y. Experimental Study of Surge and Rotating Stall Occurring in Small Centrifugal Compressor[Z]. AIAA 2009-5215.
- [10] 张朴,魏洋亭,李应红.某型发动机旋转失速压力信号的频谱分析[J].空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(4):5-7.
- [11] 曹巨江,李言,孙涛.喘振频域特性的实验研究[J].应用科学学报,2007,25(5):516-519.
- [12] DREMIN I M, FURLETOV 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.
- [13] 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.
- [14] HONEN H, GALLUS H E. Monitoring of Aerodynamic Load and Detection of Stall in Multistage Axial Compressors[Z]. ASME 93-GT-020.
- [15] 李长征,韩伟,熊兵.压气机喘振模式识别与在线检测[J].推进技术,2011,32(3):318-322.
- [16] SLIFKERJ F, SHAPIRO S S. The Johnson System: Selection and Parameter Estimation[J]. Technometrics, 1980, 22(2):239-246.
- [17] CHOU Y M, POLANSKY A M, MASON R L. Transforming Non-Normal Data to Normality in Statistical Process Control[J]. Journal of Quality Technology, 1998, 30(2):133-141.

(编辑:姚树峰)