

文章编号: 1000-8055(2009)08-1720-06

分数阶 Fourier 变换在某型涡轴发动机 喘振分析中的应用

旷桂兰^{1,3}, 王道波², 吴伟力³, 岳林², 姚峥嵘³

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016;

3. 中国航空动力机械研究所 测控技术研究室, 株洲 412002)

摘 要: 基于分数阶 Fourier 变换(FRFT)时频分析理论的特点, 构造信号验证了 FRFT 能解除时频耦合的特性. 在此基础上, 采用 FRFT 对某涡轴发动机典型的喘振试验数据进行喘振特征信号提取, 然后基于有效特征信号的 FRFT 功率谱进行喘振瞬时频率的估计. 结果表明: 利用旋转角与喘振特征相匹配分数阶 Fourier 变换的能量聚集特性, 能有效提取发动机喘振特征信号, 并能利用 FRFT 结果, 采用最优信号提取旋转角下的 FRFT 功率谱进行喘振瞬时频率的估计.

关 键 词: 涡轴发动机; 喘振; 分数阶 Fourier 变换(FRFT); 试验; 瞬时频率

中图分类号: V263.3

文献标识码: A

Application of fractional Fourier transform in one turbine shaft engine surge analyse

KUANG Guilan^{1,3}, WANG Dao-bo², WU Wei-li³, YUE Lin²,
YAO Zheng-rong³

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Automation,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Measurement and Control Technology Laboratory,
China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: The article constructed signal to simulate the fractional Fourier transform (FRFT)'s characteristics of time-frequency analysis and validated that FRFT can relieve time and frequency coupling effectively. Then, typical surge experiment data of a turbine shaft engine were processed using FRFT in order to pick up surge characteristic signal. With the FRFT energy spectrum of the surge characteristic signal, we evaluated the instantaneous surge frequency. The results show that using the characteristics of FRFT's energy congregation in the rotary angle, which matches with the engine surge's peculiarity, helps pick up the engine's surge characteristics signal effectively; using the FRFT energy spectrum helps estimate the instantaneous surge frequency.

Key words: turbine-shaft engine; surge; fractional Fourier transform (FRFT); experiment; instantaneous frequency

收稿日期: 2008-12-15; 修订日期: 2009-07-02

作者简介: 旷桂兰(1972-), 女, 湖南衡阳人, 博士生, 高级工程师, 主要从事航空发动机试验、测试、控制与状态监控的研究.

由于发动机喘振问题关系到飞机驾乘人员的安全及空军战斗力的提高,故一直是航空发动机设计制造领域的重要研究课题.航空发动机设计人员一直探索如何提高发动机的喘振裕度,力求使发动机在所有瞬态和稳态工作条件下都不发生喘振.近年来迅速发展的航空发动机数字控制系统(FADEC)技术使发动机设计人员在不改变现有发动机结构的情况下,通过设计先进的优化控制规律防止发生喘振或快速退出喘振工作区域成为可能,从而提高发动机性能,更充分地发挥发动机潜在能力.如果 FADEC 系统能实现准确判别或预测喘振,则可通过主动控制改变供油规律等措施实现在线智能防喘及退喘.但如何提取发动机喘振特征信号并准确判别或预测喘振是 FADEC 系统及试验控制系统实现在线智能防喘及退喘的重要前提.

在对发动机喘振数据进行分析时,如能获取数据喘振起始点及喘振频率,然后将压气机各截面的通道数据在对应喘振起始点的同一时间段下进行相位估计,先选定一个基准通道,将这一通道数据与其他通道数据进行互谱估计,求出对应喘振频率下的相位差,确定出相位最超前的通道,该通道即对应喘振首发级的位置.喘振首发级的确定可以为发动机设计人员有效提高喘振裕度设计提供重要依据.因此,准确获取喘振起始点及喘振频率是发动机喘振分析的重要基础.

不论是压气机部件台做性能逼喘试验,还是整机台做专项逼喘试验,均是通过调节特定控制量引发发动机进入喘振,一般压气机台是调节节气门开度,而本文整机专项逼喘,是调节流入压气机后的高压气源压力.而发动机本身运转状态由试验台控制系统或发动机数控系统进行恒定.在调节控制量使发动机进入喘振时,各种调节量交叉控制,使得信号含量相当丰富,此外测试系统本身不可避免地存在干扰和噪声.而且发动机本身结构复杂,在高转速、高温度的恶劣环境下工作,由于各种气动、热力效应及控制系统等的交互作用,喘振时压气机流道气体压力变化是典型的时变非平稳信号,仅采用时域或频域处理方法很难将其分离出来,更谈不上对喘振起始点和喘振频率进行准确判断.

传统 Fourier 变换是将信号在整体上分解为具有不同频率的正弦(复指数)分量,只能得到信号的整体频谱,不能获得信号的局部特性,只能处理确定性的平稳信号,对时变非平稳信号则不能

完成满意的分析^[1].FRFT (fractional Fourier transform)^[2]是近年来基于经典 Fourier 分析法发展起来的一种新的时-频分析理论和方法,本文基于发动机喘振分析的需要,采用 FRFT 提取某型涡轴发动机喘振特征信号并获取喘振频率.

1 某涡轴发动机喘振

1.1 某涡轴发动机

某航空涡轴发动机由前段组件、组合压气机、燃烧室、燃气涡轮和动力涡轮及附件传动机匣组件等组成,其组合压气机转子为单端预紧的端齿连接转子,转子有多级轴流叶轮和一级离心叶轮,各级叶轮之间由圆弧端齿连接,并通过中心拉杆串接在一起.

1.2 发动机喘振及喘振特征信号

压气机正常工作时,气流可顺畅地流过气流通道.当某种原因使得气流来流速度降低,气流相对压气机工作叶片速度的方向角比叶片的安装角大得多,此时会产生明显的气流叶背分离,造成压气机作功能力下降,在分离区内,气体压力降低,使得压气机后高压气体具有倒回运动趋势,严重时高压气体反窜过整个压气机级,使气体来流速度增大,如果导致气体来流速度降低的原因没有消除,当压气机级后空气达到一定压力后气体来流速度又降低,导致新一轮高压气体反窜,如此往复,就产生了危害巨大的喘振现象.通常,发动机不允许在喘振区工作,否则会导致发动机机件(首先是压气机)强烈机械振动和热端部件超温,并常伴随着旋转失速^[3],在极短时间内造成机件严重损坏.

压气机喘振是气流沿压气机轴线方向发生的低频率(通常只有几赫兹至十几赫兹)、高振幅(强烈的压强和流量波动)的气流振荡现象^[4],喘振时,流量及出口压力等都随时间低频振荡.

2 FRFT 提取喘振信号及进行喘振瞬时频率估计原理及仿真验证

2.1 分数阶 Fourier 变换(FRFT)

FRFT 可广义等价于信号在时频平面内绕原点旋转任意角度后构成的分数阶 Fourier 域的表示^[5].信号在分数阶 Fourier 域的表示是一种时频分析法,融合了信号在时域和频域的信息^[6].

信号 $x(t)$ 在 $\alpha = p \frac{\pi}{2}$ 上的 FRFT 定义如下:

$$X^{\alpha}(u) = F^{\alpha}[x(t)](u) = \int_{-\infty}^{\infty} K^{\alpha}(t, u) x(t) dt$$

式中 α 为旋转角度; u 为分数阶 Fourier 域; $K_{\alpha}(t, u)$ 为变换核.

$$K_{\alpha}(t, u)=\left\{\begin{array}{l} \sqrt{(1-j \cot \alpha) / 2 \pi} \cdot e^{j \frac{t^2+u^2}{2} \cot \alpha-j t u \csc \alpha}, \\ \alpha \neq n \pi \\ \delta(t-u), \quad \alpha=2 n \pi \\ \delta(t+u), \quad \alpha=2 n \pi \pm \pi \end{array}\right.$$

当 $\alpha=0$ 时, FRFT 是时域信号自身; 当 $\alpha=\pi / 2$ 和 $\alpha=3 \pi / 2$ 时, FRFT 对应经典的 Fourier 变换 $X_{\pi / 2}(u)$ 和 Fourier 反变换 $X_{-\pi / 2}(u)$ [7].

2 2 利用 FRFT 提取喘振特征信号

传统的滤波和干扰分离方法只限于在时域或频域(Fourier 域)进行, 如信号和干扰有很强的时频耦合, 即在时频平面里呈现斜的分布, 使得它们在时间轴或频率轴上的投影均有重叠, 就难于在时域或频域得到好的滤波和干扰分离结果. FRFT 具有解除时频耦合的特性, 只要信号和噪声线性可分, 就可选择合适的旋转角度 $\alpha=p \frac{\pi}{2}$, 使之与处理对象相匹配, 即可以在分数阶 Fourier 域获得好的滤波和干扰分离效果[8].

从图 1 可看出, 虽然信号和噪声完全没有重叠, 但投影在 $p=0$ 阶域(时域)和 $p=1$ 阶域(频域)都有重叠, 即信号和噪声存在时频耦合, 无论在 $p=0$ 阶域还是在 $p=1$ 阶域, 都不可能将不希望的噪声遮隔掉. 然而, 可以用斜直线将信号与噪声分离开, 在旋转角度合适的某个域用二值幅值遮隔, 即可消去噪声干扰.

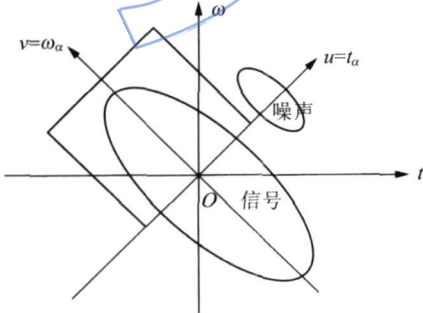


图 1 信号与干扰分布示意图

Fig.1 Signal and noise distributing

实际喘振信号分析中, 如何确定合适 α 值(即 p 值)是达到最优去噪及有效信号提取的关键. 对于旋转角与喘振特征相匹配的 FRFT 变换, 能量集中在 u 域里以 u_0 为中心的窄带内, 而噪声能量分布在整个 FRFT 域平面, 在任何 FRFT 域均不会呈现能量聚集, 只要在 u 域中利用一个中心值为 u_0 的带通滤波器即可滤除掉大部分干扰, 然后

再进行相应分数阶 Fourier 反变换变回到时域中, 就实现了喘振特征信号提取[9]. 图 2 中以旋转角 α 为变量, 对喘振段压气机出口静压信号 $p_{s3}(t)$ 连续进行 FRFT 得到 $X_{\alpha}(u)$, 形成信号能量在 (α, u) 平面的二维分布 $|X_{\alpha}(u)|^2$, 在此平面上进行二维峰值搜索找到峰值坐标点 (α_0, u_0) , 即可确定最优旋转角, 在此旋转角下即可实现对信号的最优去噪及有效提取.

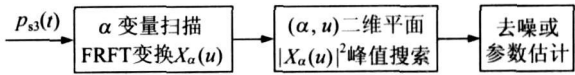


图 2 基于 FRFT 的 $p_{s3}(t)$ 信号处理
Fig.2 Signal processing of $p_{s3}(t)$

2 3 利用 FRFT 进行喘振瞬时频率估计

在利用 FRFT 提取了喘振特征信号的基础上, 就可进行喘振特征参数估计. 根据文献[6]可知: 设信号 $x(t)=a(t) e^{j \phi(t)}$, $\phi(t)$ 是信号 $x(t)$ 的相位, 其瞬时频率 $\frac{1}{2 \pi} \frac{d \phi(t)}{d t}$ 可由下式得出

$$\frac{1}{2 \pi} \frac{d \phi(t)}{d t}=\frac{1}{2 \pi} \cdot \frac{1}{2\left(\sin 2 \alpha\right) t\left|x(t)\right|^2} \cdot\left\{\left|F_{-\alpha}\left[X_{\alpha}(u) u\right](t)\right|^2-\left|F_{\alpha}\left[X_{-\alpha}(u) u\right](t)\right|^2\right\} \quad(1)$$

式中 $|F_{-\alpha}[X_{\alpha}(u) u](t)|^2, |F_{\alpha}[X_{-\alpha}(u) u](t)|^2$ 分数阶功率谱可通过信号 FRFT 模值的平方获得.

2 4 仿真及方法验证

FRFT 进行信号处理可根据需要在很多场合进行应用, 在 MATLAB 7.0 环境下, 构造信号

$$f(t)=\exp \left[j \frac{1}{2} \pi t^2\right]+\exp [j \pi(-t^2+5 t)]+n(t)+0.04$$

式中 $n(t)$ 为干扰噪声. 对 $f(t)$ 作各 p 域下的 FRFT, 发现 -0.705 阶和 0.5 阶 FRFT 呈现明显的尖峰值, 即在此两个特定的 p 域下能量呈现高度集中. 图 3 分别为 -0.705 阶和 0.5 阶 FRFT 幅值图, 纵坐标表示 FRFT 幅值, 横坐标表示 p 域的 u 值刻度. 图 4 为 $p=1$ 时 $f(t)$ 的 FRFT, 即对应经典 Fourier 变换.

从图 4 经典 Fourier 变换结果可以看出, $\exp \left[j \frac{1}{2} \pi t^2\right], \exp [j \pi(-t^2+5 t)]$, 常量信号与噪声项混叠在一起, 很难分开. 但图 3 表明, 采用特定 p 域下的分数阶 Fourier 变换可以将

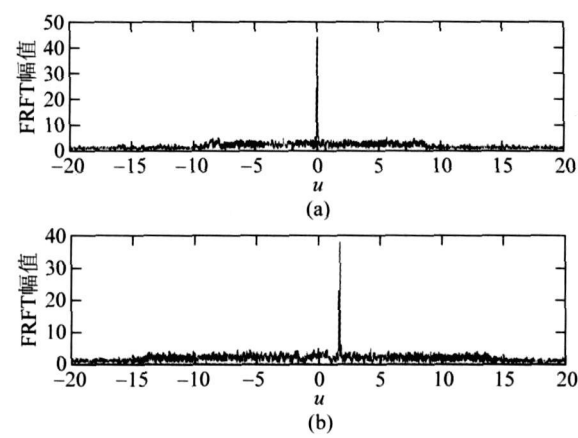


图 3 $f(t)$ 的分数 Fourier 变换幅值图 ($p = -0.705, 0.5$ 阶)
Fig. 3 $f(t)$'s FRFT in $p = -0.705, 0.5$

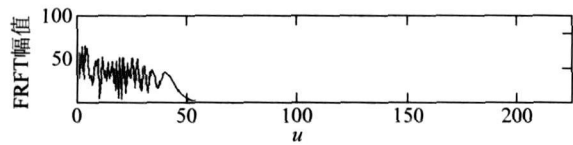


图 4 $f(t)$ 经典 Fourier 变换
Fig. 4 $f(t)$'s classical Fourier transformation

$\exp\left[j\frac{1}{2}\pi t^2\right]$ 或 $\exp[j\pi(-t^2+5t)]$ 与其他信号明显地区分开, 很容易地就能实现对特殊信号地提取. 以提取 $f(t) = \exp[j\pi(-t^2+5t)]$ 为例, 针对 $p = 0.5$ 阶的 FRFT 结果, 保留信号能量集中的点, 其它点置零, 然后计算该 p 域的分数阶 Fourier 反变换就得到了要提取的信号 $\exp[j\pi(-t^2+5t)]$.

可以看出, 提取信号的过程, 不但有效去除了干扰噪声, 而且可根据不同具体应用, 根据已知有效信号的特征去除不关心的信号分量. 因此, 与经典 Fourier 信号处理相比, 分数阶 Fourier 具有更好的信号提取能力.

利用上述 FRFT 计算结果, 对提取的有效信号进行频率估计, 估计出信号频率为 2 538 Hz. 一般来说, 信噪比越高, 瞬时频率估计的质量越好, 当信噪比高于 3 dB 时, 估计结果一般能达到要求. 经 FRFT 去噪或提取的信号一般都能获得高于 3 dB 的信噪比. 因此, 在 FRFT 去噪、提取信号的基础上, 增加少量计算即可完成信号频率估计.

3 FRFT 在某涡轴发动机试验喘振信号提取与喘振频率估计中的应用

3.1 某涡轴发动机整机逼喘试验方法及装置

根据某型涡轴发动机研制要求, 为了在整机上真实获得压气机喘振裕度特性, 必须进行整机逼喘试验. 根据该型发动机结构特征, 利用压气机扩压机匣上两个飞机引气口, 当发动机保持转速不变时, 将两个引气口接通高压气源, 使高压气体喷入燃烧室内, 减少压气机后气流流入燃烧室, 使流路堵塞, 压气机流量下降, 直至喘振. 逼喘试验装置如图 5 所示, 由高压气瓶、减压阀、压力表、电动阀、电磁阀、压力传感器等组成.

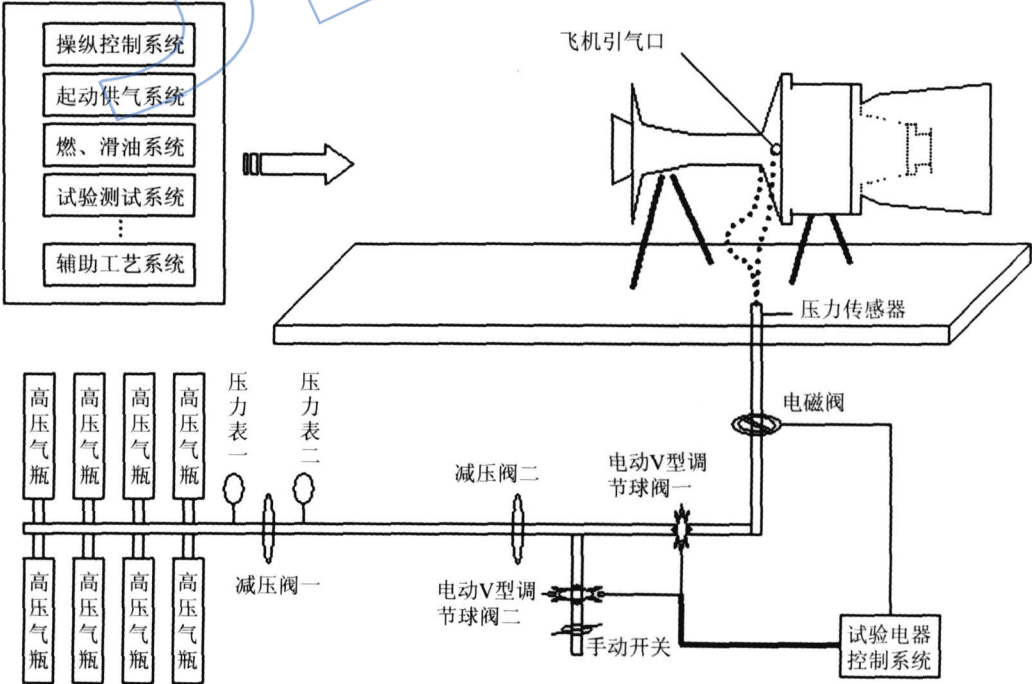


图 5 逼喘试验装置框图
Fig. 5 Surge experimentation equipment

在专用涡轴露天试验台成功进行了该型发动机核心机、整机的多次专项逼喘试验,其中 X_1 号核心机成功进行了换算转速在 0.8, 0.85, 0.875, 0.9, 0.925, 0.95, 0.97 下的 7 次逼喘试验.

3.2 某涡轴发动机整机喘振敏感参数

某型涡轴发动机整机专项逼喘试验时,为了捕捉喘振时各参数的变化特征,压气机喘振敏感参数及燃油流量(W_f)在接入稳态测试系统测量的同时,用美国尼高力 Odyssey 动态存储示波记录仪进行了实时示波记录.试验中喘振相关测点的布置及精度见表 1.

表 1 测点布置及精度

Table 1 Arrangement and precision of measuring points

参数名称	截面	测点数	精度/%	测量方法
p_{s1}	进气道出口	4	± 0.35	静压
p_{s2}	压气机进口	1	± 0.35	静压
p_{t2}	压气机进口	1×3	± 0.2	总压梳
p_{s3}	压气机出口	1	± 0.35	静压
p_{t3}	压气机出口	1×3	± 0.2	总压梳
W_{Ch1}	发动机进口流量	1	± 1	导流盆

3.3 利用 FRFT 分析处理 p_{s3} 喘振信号

本文选取核心机 1 次典型喘振实例展开数据分析工作.以下采用 FRFT 对该型涡轴发动机 X_1 号核心机在换算转速 0.95 逼喘试验录取试验数据中的 p_{s3} 信号进行分析处理.

通常出现喘振非稳定工况,信号波动大,振幅明显,结合试验时听到的“放炮”声时刻,可大致定位出现喘振的时间.锁定 p_{s3} 喘振段数据(点数 200)进行 FRFT 处理,图 6 为该段数据时域图.计算各 p 值下的 $X_\alpha(u)$, p 步长为 0.02,搜索 $|X_\alpha(u)|^2$ 在 (α, u) 平面上的峰值点.在 $p = 0.94$ 阶时,出现了明显的能量聚集峰值点.图 7 为 $p = 0.94$ 阶的 FRFT 幅值图,纵坐标表示 FRFT 幅值,横坐标表示 p 域的 u 值刻度.图 8 为 $p = 1$ 阶时的 FRFT,即对应经典 Fourier 变换.

从图 7 可以看出, p_{s3} 在分数阶 Fourier 域出现了明显的能量聚集,与图 8 经典 Fourier 变换相比,能量聚集更为集中,更易于实现将有效信号和其余信号分隔开来.噪声的能量分布在整个 FRFT 域平面,在任何 FRFT 域上均不会呈现能量的聚集,可以确定图 7 中能量聚集是喘振特征信号所引起的.将锁定的数据段朝前推,继续进行

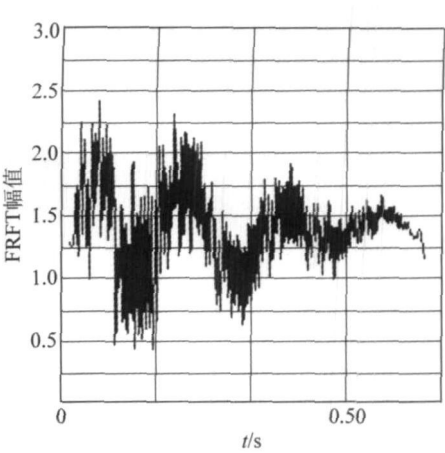


图 6 p_{s3} 喘振段数据时域波形图

Fig. 6 p_{s3} surge data's time domain waveform

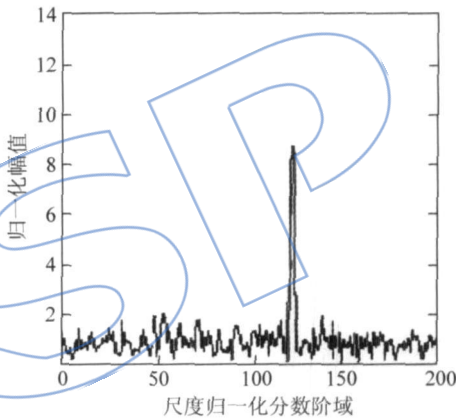


图 7 p_{s3} 喘振段数据分数 Fourier 变换幅值图
($p = 0.94$ 阶)

Fig. 7 p_{s3} surge data's FRFT in $p = 0.94$

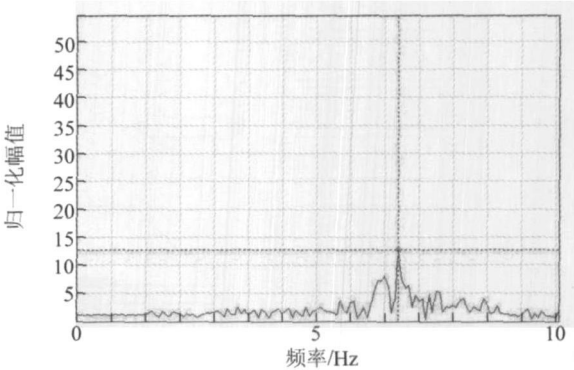


图 8 p_{s3} 喘振段数据经典 Fourier 变换

Fig. 8 p_{s3} surge data's classical Fourier transformation

分数阶 Fourier 变换,找到喘振分量所对应的能量聚集点,直至移到某一段数据之后,其中出现的能量聚集峰值点小于一个预先确定的限定值,则可以确定此处为发生喘振的起始点.

在本次核心机专项逼喘试验中,准确定位喘

振起始点后, 就可准确得出该时刻的高压气源压力, 此即引发该核心机在该运行状态下喘振所需的高压气源压力。这为后续的整机专项逼喘试验提供了较为准确的参考数据。喘振起始点确定后结合同时刻发动机其他参数(如振动、流量等)的变化, 有利于深入分析发动机在各个状态下的喘振特征。

喘振不仅和压气机本身有关, 还和全台发动机其他部件的容腔大小和工作条件有关, 和气流流路的整个容积有关, 喘振时的气流脉动频率直接取决于容积的大小和结构, 一般容积愈大脉动频率愈低。喘振频率的确定可以为分析发动机喘振特性、提出改进喘振裕度设计及改进发动机结构设计提供参考依据。特别是在压气机部件台进行性能录取试验的逼喘数据分析中, 具有非常重要的作用。对压气机逼喘过程所录取的通道数据利用上述 FRFT 提取喘振特征信号、确定喘振起始点、计算出喘振频率等处理后, 将压气机各截面对应的通道数据在对应喘振起始点的同一时间段下进行相位估计, 先选定一个基准通道, 将这一通道数据与其他各通道数据进行互谱估计, 求出对应喘振频率下的相位差, 然后确定其中相位最超前的通道, 该通道即对应着喘振首发级的位置。喘振首发级的确定可以为发动机设计人员理性分析产生喘振的物理根源、有效提高喘振裕度设计提供重要依据。因此, 准确获取喘振起始点及喘振频率是发动机喘振分析的重要环节。在上述提取核心机喘振特征信号的基础上, 应用 FRFT 的计算结果, 可以计算出节选段数据中喘振特征分量的信号频率值为 6.8 Hz。

4 结论与展望

1) 根据涡轴发动机喘振的物理特征, 利用旋转角度与喘振特征相匹配分数阶 Fourier 变换的能量聚集特性, 通过在 (α, u) 二维平面上搜索 $|X_\alpha(u)|^2$ 峰值点, 可以直观确定最优旋转角, 从而有效提取发动机喘振特征信号。

2) 确定喘振频率, 尤其是在此基础上可进行压气机喘振首发级的确定, 可为型号设计人员理性分析喘振根源、全面把握发动机喘振特征、提出改进设计提供重要的数值依据。

3) 在 FRFT 对喘振试验数据进行有效数据提取的基础上, 只需增加少量计算, 就可采用最优信号提取旋转角下的 FRFT 功率谱进行喘振瞬时频率估计。

4) 采用 FRFT 能有效分析处理发动机喘振数据, 但通常发动机出现喘振前兆到实际发生喘振, 时间非常短, 所以该方法真正投入到发动机实时防喘、退喘工作中, 还受数据处理速度的制约, 有效的 FRFT 快速算法是下一步研究的重点。目前该方法还只适用于对数据的事后分析处理。

参考文献:

- [1] 齐林, 周丽晓. 变换域自适应滤波算法的研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2007, 39(1): 61-66
QI Lin, ZHOU Lixiao. Study on transform domain adaptive filtering algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2007, 39(1): 61-66 (in Chinese)
- [2] Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1996, 44: 2141-2151.
- [3] 冯国全, 朱梓根. 航空发动机喘振引起转子系统横向载荷的确定方法[J]. 航空发动机, 2002, (3): 13-17
FENG Guoquan, ZHU Zigen. A computational method for surge caused transverse load in engine rotor[J]. Aero engine, 2002, (3): 13-17 (in Chinese)
- [4] 彭泽琰, 刘刚. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [5] 邓兵, 陶然, 齐林, 等. 分数阶 Fourier 变换与时频滤波[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10): 1357-1359
DENG Bing, TAO Ran, QI Lin, et al. Fractional Fourier transform and time frequency filtering[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(10): 1357-1359 (in Chinese)
- [6] 王静, 李明. 分数阶线性信号的 Laplace 处理方法及其几点性质[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2007, 26(2): 42-45
WANG Jing, LI Ming. Laplace processing method and characters of linear fractional order signals[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2007, 26(2): 42-45 (in Chinese)
- [7] 赵义正, 杨景曙. 基于分数阶 Fourier 变换的瞬时频率估计方法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2005, 29(1): 44-49
ZHAO Yizheng, YANG Jingshu. A method of instantaneous frequency estimation based on fractional fourier transformation[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2005, 29(1): 44-49 (in Chinese)
- [8] 高望. 分数阶 Fourier 变换及其在非平稳信号处理中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2004
GAO Wang. Fractional fourier transform and its application in the processing of nonstationary signals[D]. Changchun: Jilin University, 2004 (in Chinese)
- [9] 刘榕, 张军. 基于 FRFT 的 LFM 抗干扰通信研究[J]. 山西电子技术, 2007, (1): 77-79
LIU Rong, ZHANG Jun. Research of LFM anti-jamming communication based on FRFT[J]. Shanxi Electronics, 2007, (1): 77-79 (in Chinese)