

基于全相位 FFT 不平衡分析的转子现场动平衡*

解梦涛, 张强波, 张霞妹

(中国飞行试验研究院发动机所 西安, 710089)

摘要 为了对地面转子试验器进行动平衡,降低其振动量值,掌握转子系统现场动平衡技术,基于全相位快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称FFT)建立了转子不平衡量的计算模型,并在地面转子试验器上搭建了不平衡测试系统。试验表明,当转速高于1kr/min后,计算模型可准确地分析出转子不平衡响应。对转子试验器进行了现场动平衡,结果表明,所建立计算模型在较轻的试重条件下(三圆法无法计算出配平方案),经单次配平可使转子不平衡振动降低77.3%,证明了所建立的不平衡计算模型的有效性与准确性。该模型可用于对其他复杂转子机械的现场动平衡计算。

关键词 现场动平衡;全相位快速傅里叶变换;振动;不平衡测试;转子试验器
中图分类号 TH113.1; V232.2

引言

转子不平衡测量分析的精准度与稳定性是其现场动平衡的关键所在^[1-2],然而对于航空发动机等复杂转子机械的现场动平衡中,通常会由于其空间、环境温度及使用条件等因素的限制难以加装专业动平衡系统及其所需要的振动与转速传感器等测量仪器,而需要借助其自带的振动传感器、转速传感器采集数据,计算出转子不平衡量及动平衡方案。为实现这一目的,笔者建立了基于全相位FFT的不平衡测量方法与计算模型。

全相位FFT是在FFT的基础上发展而来,具备“相位不变形”特点,也可更好地抑制旁谱泄漏,可大幅度地提高幅值及相位计算精度^[3-4]。文献[5]研究表明,在工程中常用的等时采样模式下计算不平衡相位时,全相位FFT分析方法明显优于互功率法与跟踪滤波法。

首先,建立了基于全相位FFT的转子不平衡量计算模型,数值仿真结果表明,该模型可准确地计算出模拟信号中各振动分频的振动与幅值;其次,在地面转子试验器上搭建了不平衡测试系统对不平衡测试计算方法进行验证;最后,根据影响系数动平衡法对地面转子试验器进行动平衡操作。结果表明,单次配平后转子最大不平衡振动可下降77.3%,验证了该计算模型的有效性与精度。

1 基于全相位FFT的不平衡分析

1.1 计算及测量原理

全相位FFT的实现是在传统的FFT频谱分析之前增加“全相位预处理”步骤,即在振动数据序列中截取 $(2N-1)$ 位数据通过卷积窗 W_c 转换为 N 位数据,再进行FFT分析。假设存在原始数据序列 $x(1-N) \sim x(N-1)$,则预处理后的序列 $y(n)$, $(n=0 \sim N-1)$ 的数学表达式为

$$y(n)=[W_c(n)x(n)+W_c(n-N)x(n-N)]R_N(n) \quad (1)$$

设 $W_c(-N)=0$, R_N 为矩形窗函数,卷积窗 W_c 由传统FFT谱分析所加的窗函数 f (需为对称窗)计算得出,设前窗 f 翻转后的后窗为 b ,则卷积窗 W_c 的表达式为

$$W_c(n)=\begin{cases} f(n)*b(-n)=\sum_k f(x)b(k+n) & (n \in [1-N, N-1]) \\ 0 & (|n| \geq N) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)最终计算出相对于 $x(0)$ 数据点处的相位信息,再采用相位差频谱校正方法对幅值、相位等信息进行修正。

不平衡振动幅值与相位的测量计算需要同时利用振动信号与转速信号协调分析获取,其测量原理如图1所示。其中,振动传感器与转速传感器感应

* 中国飞行试验研究院技术支持项目(XY-1707-FDJ)
收稿日期:2020-12-05;修回日期:2020-12-28

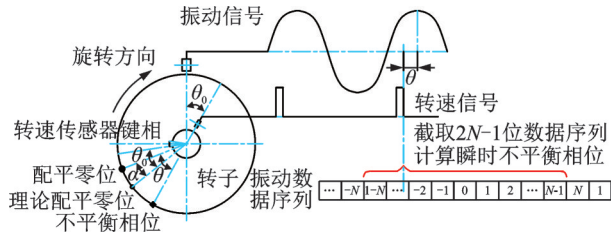


图1 相位计算原理图

Fig.1 Phase calculation schematic diagram

头固定在静子件上,设其周向夹角为 θ_0 ,转速传感器旋转盘与转子件固定,设其键相方位与转子上定义的理论配平零位的周向夹角为 θ_0 。旋转过程中当键位通过转速传感器感应头方位时在转速信号中产生高脉冲信号,当转子不平衡方位经过振动传感器方位时在转子基频振动信号中产生振动峰值(振动传感器正向安装方位沿径向向外)。需要计算的相位角为振动峰值点相对于脉冲信号下降沿的滞后角,设为 θ 。

根据全相位FFT计算原理,可在振动数据序列中以转速脉冲信号下降沿为中心截取 $2N-1$ 位数据进行单次振动相位计算,计算所得相位值为 $90^\circ - \theta$,其中 N 为FFT计算块大小。转子中实际不平衡位置为配平零位向后 θ 角度处。理论配平零位与配平零位之间的角度差 α 主要是由测试系统中振动传感器、转换/放大器以及抗混叠滤波器引起的相位平移,而在影响系数动平衡中,相位平移并不会对结果产生影响^[6-7]。

1.2 数值仿真实验

利用Matlab数值计算软件编写全相位FFT计算程序,利用模拟振动信号仿真验证其相位与幅值的计算精度。对于由转子不平衡等原因产生的机械振动,信号一般可用正弦函数表示^[8-9],因此可用式(3)生成一个包含多个不同频率成分和初始相位的复合正弦波形序列

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (3)$$

其中: A_i 为某一频点振动分量幅值; ω_i 为振动分量频率; φ_i 为振动分量相位。

设模拟信号由5个振动分量组成,信号时域波形见图1。根据全相位FFT不平衡计算程序获取振幅谱,以及根据相位差校准法得出的初始相位校正谱和振幅校正谱,其计算结果分别如图2与表1所示。

由表1可知,根据全相位FFT计算获取的初始

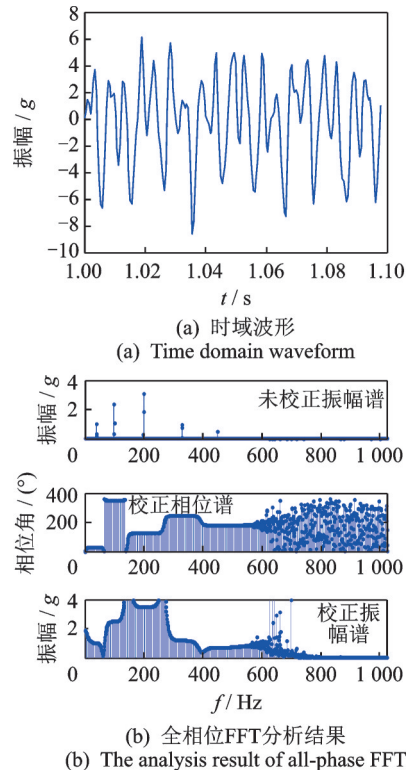


图2 多频振动信号仿真计算结果

Fig.2 Simulation results of multi-frequency vibration signal

表1 不平衡振动计算误差列表

Tab.1 Calculation error of the unbalanced vibration

序号 i	振动分量频率 ω_i/Hz	相位		振幅	
		理论值 $\varphi_i/(\text{°})$	全相位FFT计算结果/ (°)	理论值 A_i/g	全相位FFT计算结果/ g
1	39.1	30.3	30.3	1.0	1.0
2	99.2	352.1	352.1	2.5	2.5
3	199.3	125.7	125.7	3.5	3.5
4	329.4	245.6	245.6	1.2	1.2
5	449.5	180.9	180.9	0.7	0.7

相位校正谱与振幅校正谱可准确计算出5个振动分量对应的初始相位值和振幅值,其大小与理论值完全一致,证明了这一分析方法的准确性。

2 不平衡测试系统的搭建与结果分析

不平衡测试系统的搭建及动平衡试验在图3所示的地面转子试验器平台上展开,其转子系统通过前、后轴轴承支撑,前端带单级悬臂风扇盘,后端通过联轴器与驱动电机相连。

通过转子结构可推测,风扇盘为转子系统的质

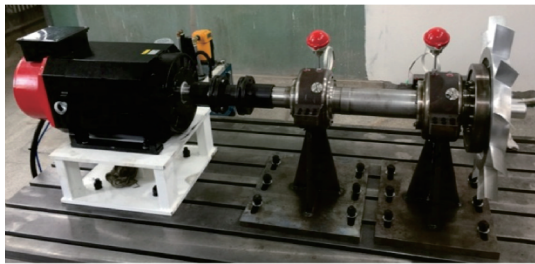


图 3 地面转子试验器
Fig.3 Ground rotor tester

量集中点,也是最易产生不平衡质量的地方,因此不平衡测振点选择在前轴承座上,主要采集前轴承座径向振动。根据全相位 FFT 计算原理,需要同步采集转子带键相的转速信号方可计算不平衡相位及幅值信息。因此,笔者最终搭建的不平衡测试系统原理如图 4 所示,不平衡计算模型可根据采集器同步采集的转速及振动信号计算试验器转子的不平衡振动幅值和相位信息,再进行动平衡计算,给出配重加装方案。

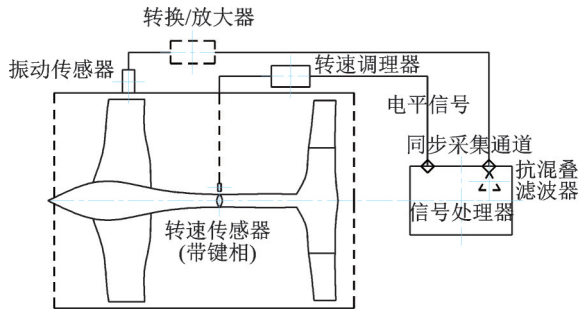
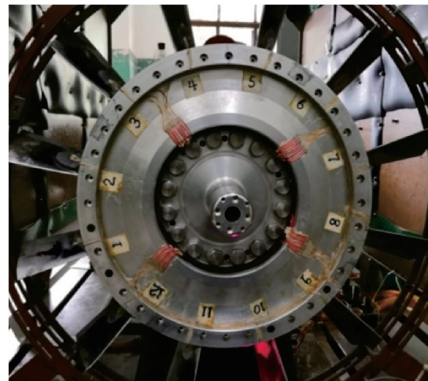


图 4 转子不平衡测试系统原理图
Fig.4 Rotor imbalance test system

转子不平衡构型的调整是通过在风扇盘上不同相位角的配平孔内加装不同质量的配重螺钉及垫片实现(转子台上沿风扇盘周向均匀分布 36 个配平螺栓孔),如图 5 所示。

在初始无配重构型下试验录取各转速点的转速与振动数据,通过全相位 FFT 不平衡计算模型分析各转速点的不平衡振动幅值与相位如图 6 所示。

在图 6(a)所示的转速台阶试验中,每一个台阶处都可检测多个可用于不平衡量分析的计算基准点,如图 6(b)所示,每个基准点可计算出 1 组不平衡振动幅值及相位数据,分别如图 6(c)与图 6(d)所示。可知,1 kr/min 以上的每个转速内不同基准点计算的不平衡幅值与相位均非常稳定,表明了所建立分析方法的可靠性。取每个转速点内计算结果平均值作为此转速下的不平衡量,所计算不平衡



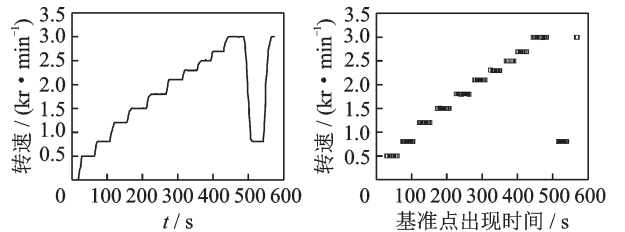
(a) 配平孔分布图
(a) Equalizing hole distribution diagram



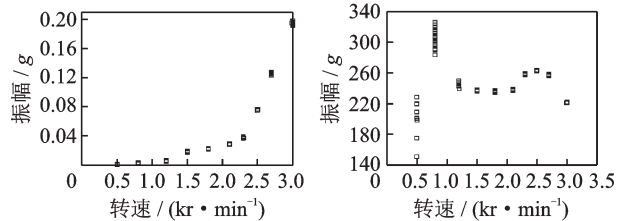
(b) 配重实物称量图
(b) Weighing drawing of counter weight

图 5 配重及其加装图

Fig.5 Balance weight and mounting diagram



(a) 转速历程图
(a) Rotational speed chart
(b) 计算基准点分布图
(b) The distribution diagram of calculate the reference point



(c) 转子不平衡振幅图
(c) Unbalance vibration amplitude of rotor
(d) 转子不平衡相位图
(d) Unbalance vibration phase of rotor

图 6 转子系统不平衡特性分析结果

Fig.6 Analysis results of unbalanced characteristics of the rotor

振动幅值及相位均与转子动力学理论结果趋势相符^[10-11]。

3 转子试验器动平衡

首先,根据传统的“三圆法”进行转子动平衡^[12],分别在风扇盘 90°, 210°及 330°相位处加装 4.54g 试重。根据“三圆法”作图计算配平方案,结果显示三圆无交点,如图 7 所示(图中长度数字仅表示相对比例关系),这说明无法计算出配平方案,需要增加配重质量。

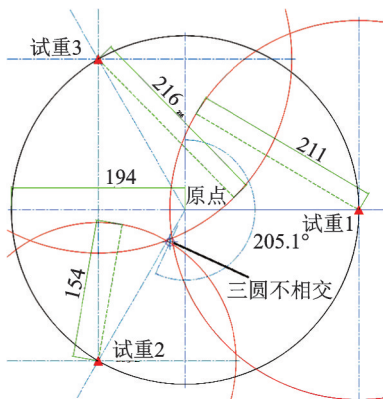


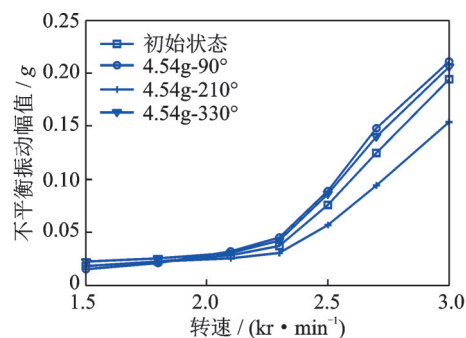
图 7 三圆法计算配平结果

Fig.7 The balancing scheme calculated by the three-circle method

利用笔者建立的不平衡计算模型根据试验录取数据计算转子不平衡幅频与相频曲线,如图 8 所示。可知,不同方位下转子不平衡振动幅值最大仅出现 22% 的变化量,相位基本稳定不变,表明试重质量确实较小。

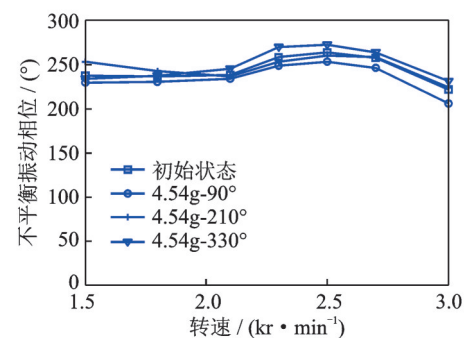
为表明所建立计算模型的准确性(试重所产生的不平衡振动变化越小对于不平衡计算精度的要求越高,若小试重环境下不平衡计算精度不够,极有可能导致动平衡失败或单次配平后不平衡振动下降幅度很小),笔者直接利用试验数据根据影响系数法计算配平方案。从试验结果可知,3 个方位试重的试验结果中 210°方位试重所产生的不平衡振动幅值变化最大,因此选择此组试验数据计算影响系数与配平方案,配平方案的计算采用遗传算法优化方法使各转速点不平衡振动均降至最优值^[13-15]。以 1.5 kr/min~3.0 kr/min 之间的所有试验转速点数据为依据计算配平结果,计算获取的配平方案为 19.4g-202.5°,实际加装配重为 19.41g-202°。

配平试验后获取的不平衡振动特性如图 9 所示,可知单次配重后转子系统最大不平衡振动值分别下降 77.3%,表明所建立的不平衡计算模型及配平算法的有效性 with 准确性。



(a) 转子不平衡振动幅频曲线

(a) The amplitude-frequency curves of rotor unbalance vibration

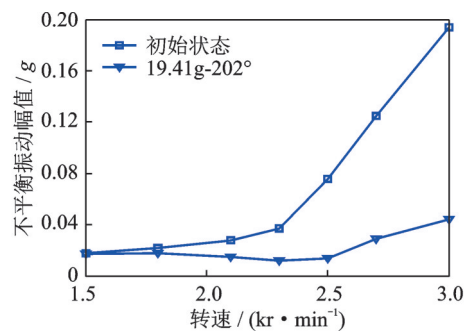


(b) 转子不平衡振动相频曲线

(b) The phase-frequency curves of rotor unbalance vibration

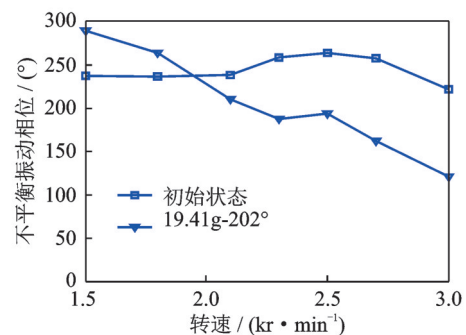
图 8 试验获取的转子不平衡振动特性图

Fig.8 The unbalance vibration characteristic diagram of the rotor



(a) 转子不平衡振动幅频曲线

(a) The amplitude-frequency curves of rotor unbalance vibration



(b) 转子不平衡振动相频曲线

(b) The phase-frequency curves of rotor unbalance vibration

图 9 配平前后的转子不平衡振动特性图

Fig.9 Unbalance vibration characteristics of rotor before and after balancing

4 结 论

1) 基于全相位FFT分析方法建立了转子系统不平衡量的计算模型,试验前的数值仿真结果表明,计算模型可准确地计算出各振动分量的幅值和相位信息。

2) 在地面转子试验器上搭建了不平衡测试系统,试验测量结果表明,在转速高于1kr/min时,所建立的不平衡计算模型可稳定地计算出转子不平衡响应。

3) 最终的转子动平衡结果表明,根据所建立计算模型结果可在较轻的试重质量下,单次配平使转子最大不平衡振动下降77.3%,验证了所建立的不平衡计算模型的有效性与准确性,为该计算模型移植到航空发动机转子在线动平衡等复杂工程环境中奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 张玉光. 动平衡测试技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- [2] 邓旺群. 航空发动机柔性转子动力特性及高速动平衡试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- [3] 黄翔东. 全相位数字信号处理[D]. 天津:天津大学, 2006.
- [4] 欧阳涛, 段发阶, 李孟麟, 等. 旋转叶片异步振动全相位FFT辨识方法[J]. 振动工程学报, 2011, 24(3): 268-273.
OUYANG Tao, DUAN Fajie, LI Menglin, et al. A method for identifying rotation blade asynchronous vibration by all-phase FFT[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(3): 268-273.(in Chinese)
- [5] 牟玉喆, 潘鑫, 高金吉, 等. 基于LabVIEW的不平衡振动信号相位实时提取方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015, 5: 17-20.
MU Yuzhe, PAN Xin, GAO Jinji, et al. Research on the phase real-time extraction methods for imbalance vibration signa based on the LabVIEW platform [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2015, 5: 17-20.(in Chinese)
- [6] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2015:136-139.
- [7] ZHOU S, DYER S W, SHIN K K. Extended influence coefficient method for rotor active balancing during acceleration[J]. Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control- Transactions of the ASME,

2004, 126(1):219-223.

- [8] GREEN K, CHAMPNEYS A R, FRISWELL M I. Analysis of the transient response of an automatic dynamic balancer of eccentric rotors [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 274-293.
- [9] 孟光. 转子动力学研究的回顾与展望[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1):1-9.
MENG Guang. Review and prospect of rotor dynamics [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 1-9.(in Chinese)
- [10] 张春雷. 旋转机械状态监测与现场动平衡[D]. 西安:西北工业大学, 2002.
- [11] SEVE F, ANDRIANOELY M A, BERLIOZ A, et al. Balancing of machinery with a flexible variable-speed rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 264: 287-302.
- [12] 王汉英, 张再实, 徐锡林. 转子平衡技术与平衡机[M]. 北京:机械工业出版社, 1988:313.
- [13] 刘翔春, 廖瑛, 文援兰. 应用改进遗传算法优化天基光学监视平台轨道[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 58-62.
LIU Xiangchun, LIAO Ying, WEN Yuanlan. The orbit of the space-based optical monitoring platform optimizing by the improved genetic algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 58-62.(in Chinese)
- [14] 翟红春, 崔秀峰. 基于遗传算法的动平衡优化方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(5): 24-26.
ZHAI Hongchun, CUI Xiufeng. Optimizing dynamic balancing of aeroengine based on genetic algorithm[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(5): 24-26.(in Chinese)
- [15] 徐宾刚, 屈梁生, 孙瑞祥. 基于影响系数法的柔性转子无试重平衡法研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(7): 63-67.
XU Bingang, QU Liangsheng, SUN Ruixiang. Balancing of flexible rotors without test weights [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(7): 63-67.(in Chinese)



第一作者简介:解梦涛,男,1990年11月生,硕士。主要研究方向为航空动力装置动平衡及故障诊断技术。曾发表《基于虚拟样机技术的航空发动机放气活门机构仿真及故障分析》(《航空动力学报》2016年第31卷第1期)等论文。

E-mail:jiemengtao@163.com