

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.14

某型飞机飞参振动数据分析

王小飞, 袁涛, 徐风磊, 姚凌虹
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 介绍了常用的振动数据分析方法, 选取某型飞机飞行状态较为稳定的飞参振动数据进行了仿真分析, 并针对仿真过程中出现的频率进行了定性分析。仿真实验通过多组数据的频谱统计分析, 发现左发动机自由涡轮存在轻微不对中问题。对于发动机异常振动识别具有重要意义。

关键词: 飞参振动数据; 仿真分析; 异常识别

中图分类号: TB936; TNO

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0073-05

Analysis of Flight Vibration Data for an Airplane

WANG Xiaofei, YUAN Tao, XU Fenglei, YAO Linghong

(Qingdao Branch of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: It is an international hotspot to monitor the working condition of aero-engine using vibration data. Firstly, three commonly used analysis methods for vibration data are introduced. Secondly, emulations analysis based on vibration data under steady flight condition is made. Lastly, qualitative analysis for the extrusive frequency in the emulation is made. Statistical analysis based on the frequency of multi vibration data suggests that there may be some asymmetry failures in the free turbine which is important for the identification of abnormal vibration of aero-engine.

Key words: flight vibration data; emulation analysis; anomaly identification

0 引言

飞参系统又称“飞行参数记录与处理系统”, 可分为机上数据记录系统和地面数据处理系统两部分, 主要用于对飞机子系统或部件的工作状态参数进行测量、记录和处理等^[1-3]。飞参系统记录数据(简称“飞参数据”)最早应用于飞行事故调查, 后期又逐步拓展到设备状态监控、辅助地勤维护、飞行质量评估和辅助飞机设计等领域^[4-6]。

振动数据分析一直是各国飞机状态监控与故障诊断研究的重点^[7-9]。飞机发动机等相关部件长期处于高速运行状态, 由于其复杂的结构和几何耦合关系必然会出现一些疲劳损伤、不平衡、断裂等机械故障, 从而导致飞行事故发生概率大幅增加^[10-12]。发生此类故障时, 发动机等相关部件会出现不同于正常情况下的振动, 其振动信号中包含了丰富的工作状态信息和异常数据, 通过合适的数据分析手段能够呈现出相关部件的故障信息, 从而有针对性地排除早期故障, 减少事故概率。根据美军相关调查部门对其现役的 30 种军用直升机长期跟踪记录显示, 有 60% 的故障和事故是振动冲击直接或间接造成的, 相关维修费用更是超

过了其他维修费用的总额, 高达 58%^[2]。因此, 研究飞机振动数据的特点和相关分析方法, 具有重要的军事意义。

当前, 国内飞机振动数据的分析应用研究较为薄弱, 本文针对某型飞机振动数据分析手段极度匮乏的问题, 对其飞参系统记录的振动数据进行了探索式的分析和研究, 取得了一定的成果。研究成果可用于发动机和减速器的振动监测、趋势分析, 在保障飞行安全、提高维修保障效率等方面具有重要意义和经济效益。

1 振动数据采集

对某型飞机共 7 路振动信号进行高速采样, 同时对其振动加速度信号进行采集记录, 振动超限时给出告警信号。振动传感器采集的振动加速度信号一部分转接至飞参综合采集器的高速采集通道进行采样记录, 一部分经过振动信号处理模块转换后进入综合采集记录器。振动信号最终输入飞参综合采集记录器, 并可在地面进行数据卸载分析。电路电源为飞机汇流条提供的 27 V 直流电, 经电源模块变换后为电路提供符合要求的电源。某型飞机飞参振动数据采集原理如图 1 所示。

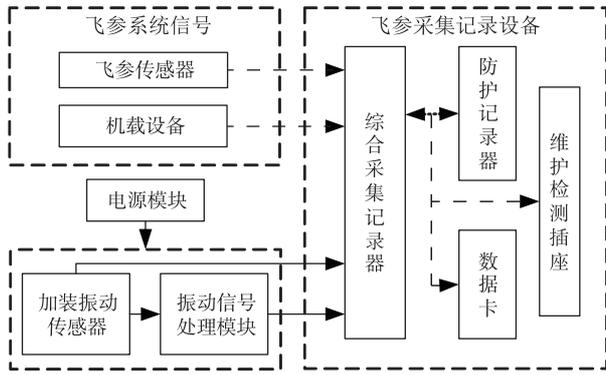


图1 某型飞机飞参振动数据采集原理

2 振动数据分析方法

常用的振动数据分析方法大致包括时域分析、频域分析和小波分析三大类^[13-15]。

2.1 时域分析

振动信号的时域分析又可以细分为两类：一类是进行信号直接分析；另一类是生成和变换各种调制信号，对信号的动态范围进行压缩与扩张，或用门限方法进行噪声的抑制等^[13]。应用较为广泛的主要有时域波形分析、时域统计分析以及时域相关分析等。其中，时域统计分析的指标包括量纲指标（如均值、极值、均方差和方差等）和无量纲指标（峭度指标、裕度指标、峰值指标和脉冲指标等）；时域相关分析包括自相关分析、互相关分析和典范相关分析等。

2.2 频域分析

振动信号的时域分析简洁、直观，但当出现多种复杂信号叠加的情况时，往往无法对具体的信号成分进行识别和定位。某型飞机各部分附件的振动大都与其自身的特性和运动状态相关，产生的信号规律性较强，采用频域分析可以把不同周期的信号分离，化繁为简，所以频域分析是进行振动分析的重要手段。某型飞机的振动主要可分为低频、中频与高频振动。根据振动的幅度、频率，结合特定状态下的飞行速度、高度等其他因素，可以对振动进行进一步的分析、定位。常用的频域飞行方法包括幅值谱分析、功率谱分析和倒谱分析等。

幅值谱分析是最常用的工具。信号的幅度谱就是对于飞参采集的数据直接进行快速傅里叶变换所得的信号频率谱，设时域信号为 $x(t)$ ， $X(f)$ 为其幅度谱，则幅度谱的定义为

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

由幅值频谱可以较为直观地观察信号在各个频率点的分布，并且能够清晰地观察各个频率的幅值大小，在数据分析的初期有着明显的优势。同时理论上，经过傅里叶变换之后，信号中的周期信号应当呈离散点分布，而非周期信号则会连续分布，在幅度谱图上十分明显。如图2所示。

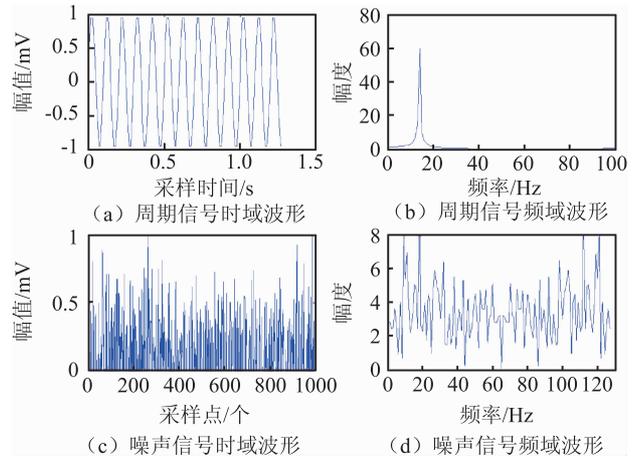


图2 典型信号的幅值谱

从图2可以清晰地看出，当信号为标准正弦波时，直接经过FFT的幅值谱图形在频域中表现为一个脉冲形状（理论上其应为离散的一个频率点，但由于Matlab中使用的plot函数会将离散的点进行光滑的连线显示，所以显示为一个脉冲信号，但不影响分析）。当信号为一个随机信号时，可以看到该噪声信号的幅度谱图形为杂乱、不规则的图形，同时也不具备周期信号的频域离散性质。

2.3 小波分析

频谱分析都是基于FFT变换的，由于其基函数限制为正、余弦波形，导致其对瞬时信号、突变信号的分辨与捕捉能力不足。小波变换通过可变化的基函数实现了对时间（空间）频率的局部分析，类似于放大镜，能够自动适应时频信号分析的要求，广泛应用于信号分析、图形识别、数据的压缩、语音分析与合成、地震监测分析等领域^[5]。小波分析方法包括连续小波变换和离散小波变换等。

3 振动数据选取

某型飞机发动机为后输出型的自由涡轮式涡轴发动机，由独立的自由涡轮向外输出功率。自由涡轮装在燃气发生器之后，两者之间没有任何的机械连接关系，只有气动联系。发动机没有体内减速器，其主传动装置输出的功率通过主减速器传给旋翼和飞机部

附件。

在进行振动数据初步分析时，由于采样率较高，飞参记录的振动数据量巨大，同时还要尽可能多的从数据中发现飞机部附件的振动特点，因此，采用抽取数据片段的方法进行，即通过对飞行状态的跟踪识别，仅抽取外部空气扰动最小的片段（比如悬停状态）时的数据进行分析。这样可以最大限度地去除外部环境扰动的影响，同时提升分析精准度。后期可在前期数据分析与经验积累的基础上，针对其他较为复杂的飞行状态进行更加细致的分析工作。

首先，根据飞参记录的旋翼转速、发动机转速、气压高度、总距杆位置、油门杆位置等信号进行飞行状态识别；然后，选取各信号均稳定的数据段进行分析，实验结果表明，在[2000 s, 3600 s]的区间上，各信号均相对稳定，可以认为此时飞机进入稳定状态（如悬停），下文将针对这段区间上的飞参振动数据进行分析。

4 振动数据仿真分析

某型飞机发动机振动数据有左发动机振动（前）、左发动机振动（后）、右发动机振动（前）和右发动机振动（后）4种。

在实际应用中，对数据进行实时监控最常用的方法是时域统计分析，现选取有量纲参数均方根幅值，无量纲参数指标：峭度指标、裕度指标、脉冲指标和峰值指标，以左发动机后部振动为例，进行发动机振动数据指标分析，结果如图3所示。

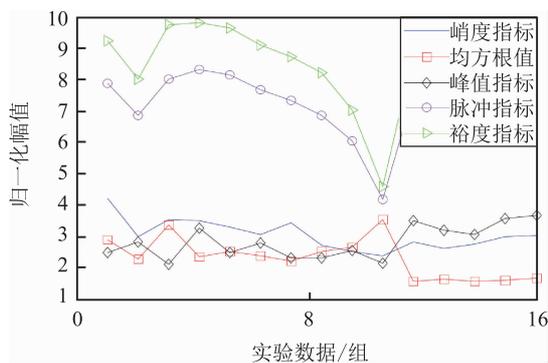


图3 发动机时域指标

由图3可以看出，对于发动机振动数据而言，其裕度指标与脉冲指标相近，且数值较大，而其他三种指标的数值相对较小；同时四种无量纲参数指标变化趋势类似。相对于其他指标，均方根参数则是最稳定的指标，这可能是由于数据段较为稳定造成的。

同样以左发动机后部为例，在不做任何预处理的情况下进行频谱分析，结果如图4所示。

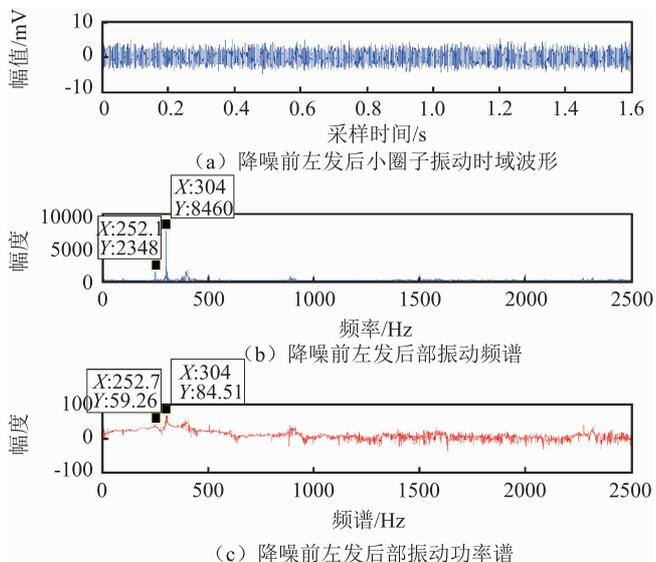


图4 预处理前频谱图

由图4可以看到，在幅度频谱图及功率谱图中含有明显的噪声，为增加分析结果的清晰性与准确性，有必要进行数据的降噪处理，发动机振动数据预处理采用小波 mini-maxi 阈值去噪，分解系数采用三层 sym5 小波分解，结果如图5所示。

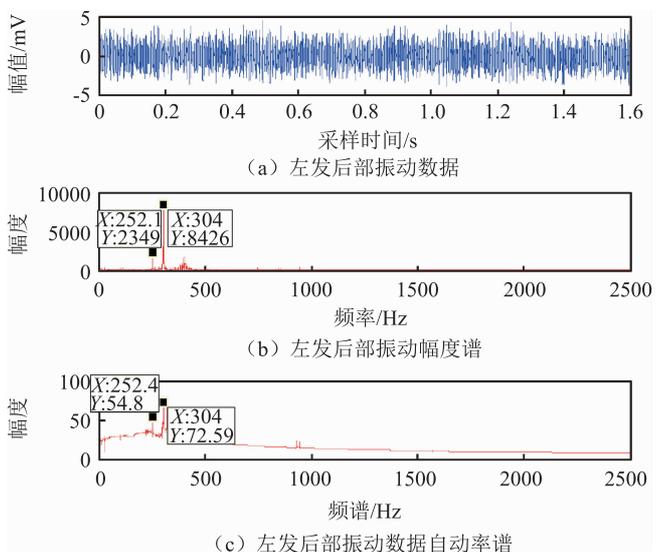


图5 频谱分析方法比较

图5对左发动机后振动数据进行了两种频域的分析。在幅度谱图中可以看到主要有252 Hz和304 Hz两个主频，查阅资料可以分别确定为自由涡轮和燃气发生器涡轮频率。在自功率谱图中可以看到与幅度谱图中相同的频率成分，并且主频部分更加突出，较直接FFT变换得到的频谱图更加明显。但是图像整体发生变化，高

频部分噪声也由于主频的突出而相应地显现出来。因此,为保证分析结果相对准确且简化分析过程,对振动数据主要进行频谱图分析,必要时再使用其他方法进行辅助分析。采用前述方法依次对 4 种发动机振动数据进行频谱分析,结果如图 6 至图 9 所示。

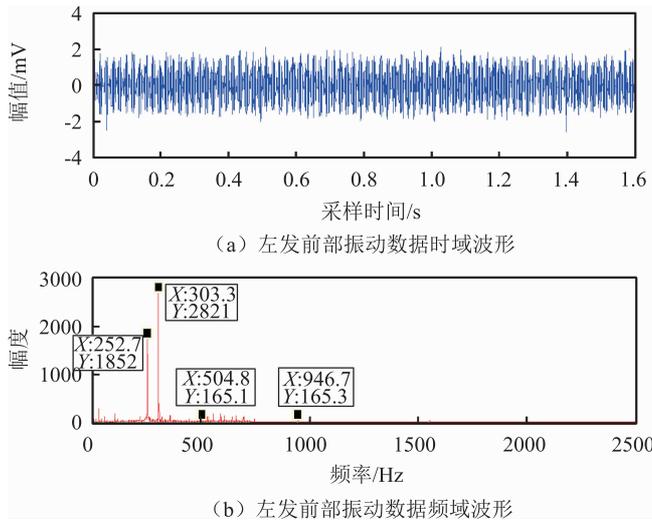


图 6 左发动机前部振动数据分析

由图 6 可以看到在左发动机前部的振动数据中,含有频率为 252, 303, 504, 946 Hz 的信号,分别为自由涡轮频率、燃气发生器涡轮频率、自由涡轮 2 倍频率、燃气发生器涡轮的 3 倍频率。

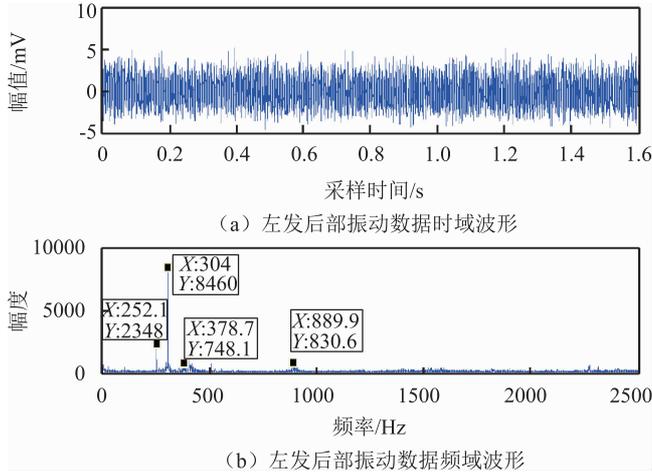


图 7 左发动机后部振动数据分析

由图 7 可以看到在左发动机后部的振动数据中,含有频率为 252, 304, 379, 890 Hz 的信号,分别为自由涡轮频率、燃气发生器涡轮频率、自由涡轮 1.5 倍频率、燃气发生器涡轮的 3 倍频率。

由图 8 可以看到在右发动机前部的振动数据中含有频率为 252, 303 Hz 的信号,分别为自由涡轮频率、燃气发生器涡轮频率。

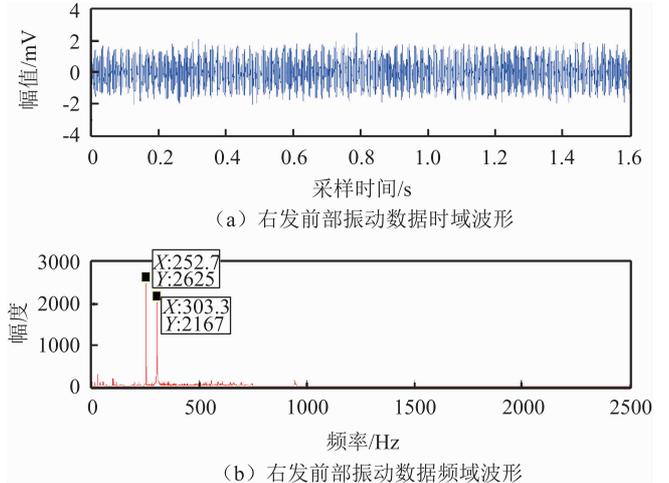


图 8 右发动机前部振动数据分析

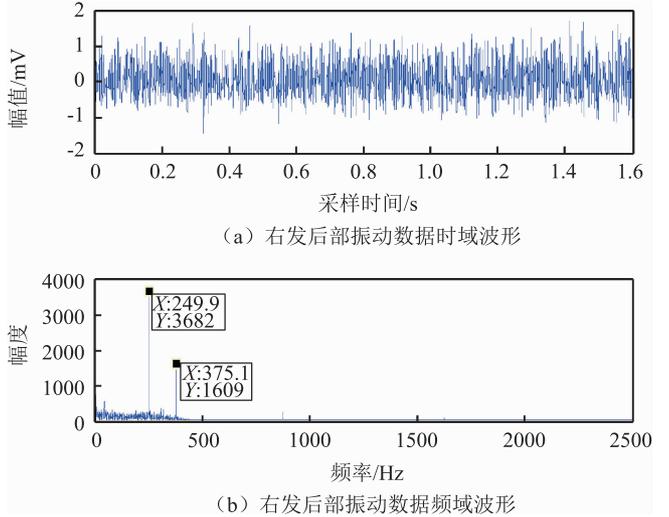


图 9 右发动机后部振动数据分析

由图 9 可以看出右发动机后部的振动数据中仅仅包含有 250, 375 Hz 两个主频,分别为自由涡轮主频与其 1.5 倍倍频。

汇总左发动机和右发动机前、后部位的振动信息,结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 左发动机振动频率分析

位置	频率/Hz	幅度	分析
左发前部	252.7	1852	自由涡轮
	303.3	2821	燃气涡轮
	504.8	165.1	1 号的 2 倍频
左发后部	252.1	2348	自由涡轮
	304	8460	燃气涡轮
	378.7	748.1	1 号的 1.5 倍频

表2 右发动机振动频率分析

位置	频率/Hz	幅度	分析
右发前部	252.7	2625	自由涡轮频率
	303.3	2167	燃气涡轮频率
右发后部	249.9	3682	自由涡轮频率
	375	1609	1号的1.5倍频

通过表1和表2可知,在两个发动机的振动数据中主要包含自由涡轮和燃气发生器涡轮频率,同时存在1.5和2倍频频率。由发动机转子典型故障中转子不对中问题可知,转子不对中不但对基频振动产生影响,还可能引起2倍频、4倍频等高频振动,倍频的幅值反映转子不对中的程度。可以初步判定左发动机自由涡轮有轻微不对中问题。

5 结论

飞机飞参振动数据是当下国内外研究的热点话题。本文主要介绍了常用的振动数据分析方法,同时选取了某型飞机飞行状态较为稳定的飞参数据进行了仿真分析,并针对仿真过程中出现的频率进行定位、分析。仿真实验通过多组数据分析统计发现,采用时域分析方法很难发现振动异常,采用频域分析能发现部分明显的振动异常,小波分析可以作为振动分析的辅助工具(比如滤波等)。进一步通过得到各振动源的正常频率与幅值范围进行研究,发现某型飞机左发动机自由涡轮有轻微不对中问题,这也从侧面说明了频域分析方法在振动信号分析中的优势,对于发动机异常振动识别具有重要意义,便于实现初步报警。

参考文献

- [1] 胡朝江,陈列,杨全法.飞机飞参系统及应用[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [2] Simon D L, Litt J S. A Data Filter for Identifying Steady-state Operating Points in Engine Flight Data for Condition Monitoring Applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(7): 1-8.
- [3] 周圣林,毛海涛.浅析国内飞参使用现状与发展建议[J].航空标准化与质量,2016(2): 49-52.
- [4] 冯占辉,胡葛庆.直升机主减速器的动力学分析与故障诊断研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.

- [5] 王自珍,爰国华,张士文.基于计算机仿真技术的MSP430单片机实验教学实例[J].实验室研究与探索,2013,32(9): 94-97.
- [6] Chacko A, Ari S. Denoising of ECG Signals Using Empirical Mode Decomposition Based Technique[C]//IEEE International Conference On Advances In Engineering, Science And Management. Nagapattinam, Tamil Nadu: IEEE, 2012: 6-9.
- [7] 孙护国. TB-117BMAP发动机构造[M].青岛:海军航空工程学院青岛分院,2001.
- [8] 曲建岭,唐昌盛,李万泉.飞参数据的应用研究现状及发展趋势[J].计测技术,2007,27(6): 1-4.
- [9] 王延忠,牛文韬,唐文,等.航空直齿轮喷油润滑油气两相流分析[J].航空动力学报,2013,28(2): 439-444.
- [10] 周德新,彭妮娜,樊智勇.飞行参数在线自动监控技术的研究[J].计算机测量与控制,2015,23(8): 2689-2691.
- [11] 王泽欣.波音737NG飞机燃油压力加油系统故障分析[J].航空维修与工程,2015,11: 61-62.
- [12] Hassan M, Boudaoud S, Terrien J, et al. Combination of Canonical Correlation Analysis and Empirical Mode Decomposition Applied to Denoising the Labor Electrohysterogram[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(9): 2441-2447.
- [13] 李祥楠.空中加油系统软管燃油压力测量算法研究[D].西安:西北大学,2015.
- [14] 孙文柱,曲建岭,袁涛,等.基于改进SVDD的飞参数据新异检测方法[J].仪器仪表学报,2014,35(4): 932-939.
- [15] 蔡贝,程为彬,刘峰.基于除法电路的工具面角模拟解算[J].自动化技术与应用,2017,36(5): 77-81.

收稿日期:2018-12-17

基金项目:国家自然科学基金(51505491)

作者简介

王小飞(1986-),男,讲师,博士,主要研究方向为飞参数据的应用处理、航空发动机性能趋势监控及智能故障诊断等。

2015年毕业于海军航空大学控制科学与工程系,后工作于海军航空大学青岛校区航空仪电控制工程与指挥系,参与国家自然科学基金1项,授权发明专利1项,



发表学术论30余篇,其中3篇SCI、5篇EI,出版专著1部,教材3部。