

航空发动机气路故障特征提取方法研究

Research on Fault Feature Extraction Method of Aero Engine Gas Path

孔祥兴 范满意 王志强 / 中国航发研究院 张瑞 / 中国航发动力所

航空发动机复杂恶劣的工作环境容易导致故障发生，轻则引起发动机性能下降，重则会损坏发动机，诱发飞行事故。监测、跟踪、评估发动机的健康状况，快速准确地预测、定位潜在故障部位，对于增强发动机的安全性、降低维修成本具有重要意义。

航空发动机由于使用损耗、设计缺陷、外物损伤等原因，会引发不同类型故障模式的产生，如叶片掉块、断裂和轴承、齿轮磨损等，如图1所示。当前，很多发动机用户对于危害性处于轻度或临界范畴的大部分故障模式，只能通过地面孔探仪检查的方式探测故障，无法为飞行员、后勤及维修人员提供及时有效的故障预报信息。而预测与健康管理技术的发展，使得设计人员可以通过故障诊断、预测算法，实现故障的检测、隔离，以及早期征候预报。

不同的故障模式产生后，会引发发动机相应部件特性的改变，进而导致发动机工作参数偏离健康基准。发动机部件特性状态量（如压气机流量、效率）较健康基准的偏移量称为故障因子，是故障影响传递的因变量，往往是不可测参数；发动机可测量的工作参数较健康基准的偏移量称为征兆量。借助数学方法在全部征兆量之中提取对故障模式敏感性高、关联性强、但相互之间相关性较弱的可测工作参数，即为故障特征的提取。

故障特征作为故障的判定依据，

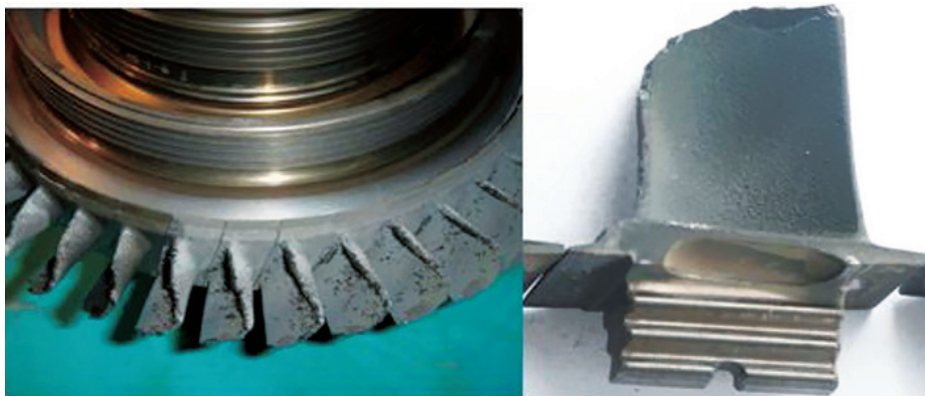


图1 发动机涡轮叶片掉块故障示例

是故障诊断、预测算法设计的基础与核心要素。当前，发动机设计与制造厂所对故障模式及影响开展失效模式和影响分析（FMEA），通常通过机理分析故障产生原因，并定性描述故障的影响效果，主要目的是为了寻求排故的解决方案，并不能作为准确、量化的故障诊断、预测判定依据，而通过数学分析的方法，建立同时包含关键征兆参数种类和偏移量信息的故障特征，才可以满足诊断算法构建故障判据的要求。

发动机气路故障的发生，会引起温度、压力、转速等气动热力参数及振动参数的变化，对于同一型发动机，相同的故障模式引起的发动机测量参数变化具有相似性。对

这种由故障模式引起的测量参数相对于正常基准的偏移规律进行统计与量化描述，可作为特定故障模式的故障特征，为故障诊断算法的设计和判定提供依据。本文介绍一种利用发动机历史故障数据来分析和提取故障特征的方法。

故障特征提取方法总体方案

基于发动机历史故障数据进行故障特征提取，需要开展如下工作。

首先，需要对原始试车数据进行预处理。发动机原始试车数据为整个试车过程中测量工作参数的时序信号，信号中包括稳态和过渡态数据，且夹杂各种噪声。预处理工作包括测量数据有效性检查、信号

滤波、稳态点选取和截断、数据特征初步分析等。

其次，计算所有测量参数在发动机故障前后的偏移量。发动机发生气路部件故障后，会引起气动热力工作参数的明显偏移；同时，如果气路部件故障（如叶片掉块、断裂等）导致部件的质量损失则会引发转子的振动特征的变化。

最后，根据所有测量参数对于故障的响应情况，提取故障特征参数。分析和辨识对于故障模式响应敏感性高、关联度强的测量参数，并确定这些测量参数的偏移量阈值，综合表征故障特征。

故障特征提取方法的关键

综上所述，确定基于数据的故障特征提取总体方案如图2所示。其中，

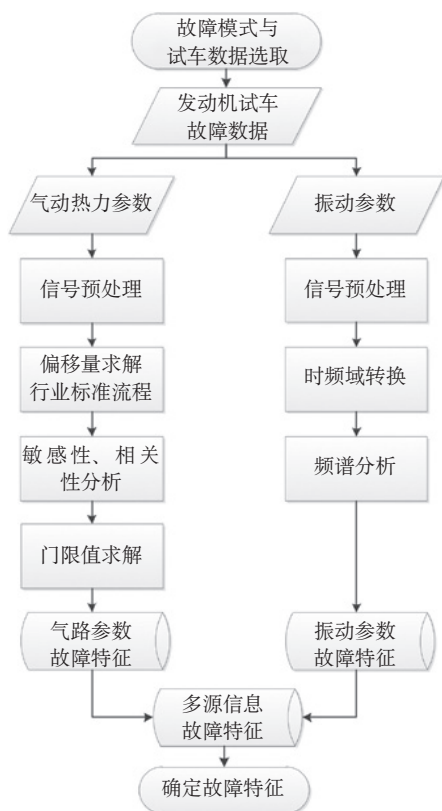


图2 基于试车数据的故障特征提取总体方案

根据前期的研究表明，故障特征提取方法的关键是确定相应故障模式的征兆特征。

发动机试车数据中可作为故障特征量的参数主要包括各截面温度、压力以及转速等气动热力测量参数和振动测量参数。所谓故障特征提取即通过定性、定量的数据分析选取与能够表征特定的故障模式的测量参数类型及偏移量门限值，且确定故障特征结果需便于进行故障模式的判定和分类。针对发动机故障模式选取相应的试车数据后，分别对气动热力参数和振动参数进行故障特征提取。

一方面，对于气动热力参数提取流程包括信号预处理、偏移量求解、敏感相关性分析、门限值求解等四个环节。其中，信号预处理将台架试车数据进行有效性检查、信号滤波、稳态数据提取与截断、故障时刻初步分析等；偏移量求解采用相关工业标准求解测量参数的偏移量；敏感性、相关性分析采用相关理论算法辨识对故障敏感性高、关联性强的测量参数，并对这些参数之间的相关性进行分析，确定故障特征参数的类别；门限值优化采用数学统计、优化等算法确定满足应用范围要求的参数偏移量的故障门限值。

另一方面，对于振动参数提取流程包括信号预处理、时频域转换、频谱分析等三个环节。其中，信号预处理对台架高频原始振动信号进行平滑滤波、稳态数据提取与截断、信号物理值解析；时频域转换采用快速傅里叶变换（FFT），将振动信号由时域转化为频域信号；频谱分析对频域振动信号的变化规律进行

分析，总结归纳故障征兆特征。最终，将气路参数特征和振动参数特征确定为相应故障模式的征兆特征。

应用实例分析

针对上述方案的可行性，本文利用一型发动机的试车数据进行验证。验证工作的重点为气路和振动参数的处理与特征分析。

气路参数处理结果与特征分析

因航空发动机气路参数的复杂性以及试车数据中有可能出现的偏差，需要先对其进行信号预处理，求解出参数的偏移量，然后筛选出敏感性高的参数加以分析，确定参数的参考门限值，具体流程如下。

信号预处理。对于相同的发动机状态，几次试车之间测量参数存在一定的偏差，造成这种偏差的原因主要包括三方面：不同试车次大气环境存在差异；控制精度影响；故障造成工作参数偏移。所以，应首先对试车数据进行一定的预处理。

偏移量求解。测量参数换算到标准大气条件后相同工作状态的高压转子转速已经对齐，第5次前后试车数据（如压气机出口总压、低压转子转速、风扇外涵总压等）参数表现出明显的偏移特征，利用基线模型计算各个参数的偏移量，如图3所示。

敏感性相关性分析。综合分析试车数据相对于性能基线的偏移程度，发动机测量参数在不同试的车中，故障后相对基线偏移状态基本一致，稳态偏移量大代表该参数对于故障模式的响应度更高、敏感性更强。根据参数偏移量对于故障的响应幅值，对敏感性进行量化评估。其中，两个甚至更多的参数对故障

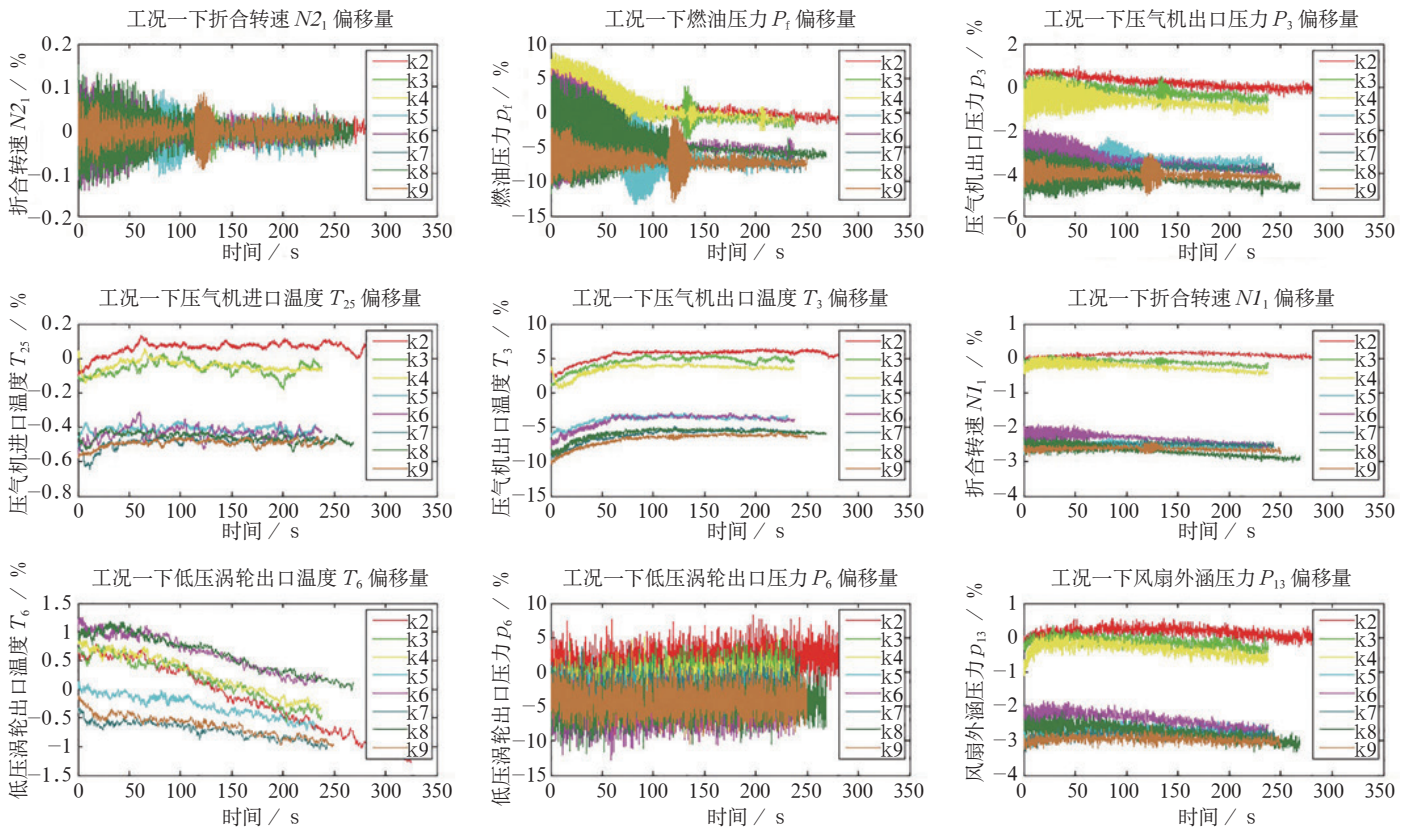


图3 发动机测量参数偏移量计算

有相似的敏感性，为了去除在敏感性方面比较类似的参数，很有必要进行测量参数的相关性分析。故障发生后，各个参数偏移量之间的相关系数采用0 ~ 1之间数值表示，1表示相关程度最高，0表示无相关性。相关系数在0.8以上的参数视为相关性较强，以下为弱相关性参数。本案例选择的特征参数原则主要包括3项条件：敏感性评估排名前15位的测量参数；相关系数在0.75以下的测量参数；尽量保证测量参数类型齐全。气动热力特征参数类型选择结果包括：压气机出口总压 p_3 、燃油总管压力 p_f 、主燃油流量 W_f 、风扇外涵总压 p_{13} 、低压转子转速 $N1$ 、涡轮后总压 p_6 、涡轮后总温 T_6 、风扇内涵总温 T_{16} 。

门限值求解。通过敏感性、相

关性分析，选取压气机出口总压 p_3 、燃油总管压力 p_f 等8个气动热力参数作为特征参数，在发动机的特定稳定状态下（本文以慢车状态为例），

对试车数据偏移量的情况进行综合统计，由于试车过程偏移量变化情况相近，也有利于确定特征参数的故障参考门限值，如图4所示。

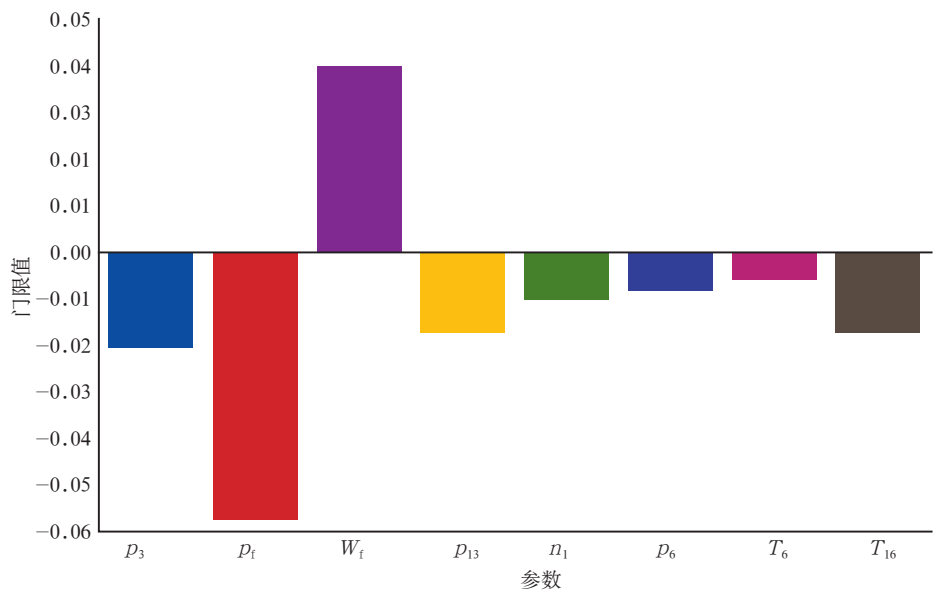


图4 气动热力故障特征参数参考门限值

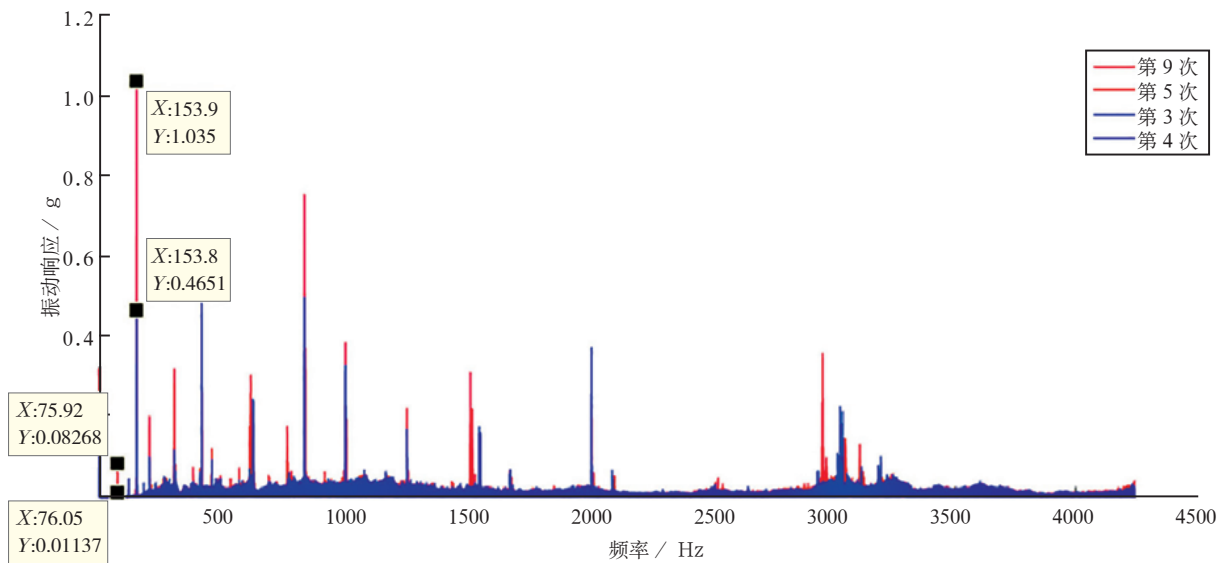


图5 慢车状态风扇机匣垂直振动频谱对比

振动参数处理结果与特征分析

根据振动参数的特点，需要先对参数信号进行预处理，再将其转换为频域信号，最后进行频谱分析，具体过程如下。

信号预处理。振动信号测点包括进气机匣垂直、水平方向，中介机匣垂直、水平方向，以及涡轮机匣垂直、水平方向。信号预处理工作主要对时域的振动信号进行了稳态截断，包括发动机上升状态和下降状态。

时域频域变换。利用FFT变换将试车时域振动信号转换为频域信号。将4次试车数据振动频谱绘制在同一频谱图（如图5所示），图像显示第5次、第9次振动基频幅值明显高于第3次、第4次试车，反映出叶片故障后由于转子不平衡量的产生导致基频振动幅值增加。所以，高、低压转子基频幅值增加可能作为参考故障特征。图中显示，几次试车过程振动幅值都没有超过发动机振

动安全阈值，这恰恰说明通过频谱分析能够在故障发展至振动信号超限之前对故障进行早期检测和诊断。

频谱分析。为了确定故障发生后准确的振动信号特征，进一步综合试车数据中6个测点位置、6个稳定工作状态的振动信号频谱开展了细致的统计分析，发现振动信号的特点：一是多测点位置高压转子基频振动显著增大，一致性高；二是中介机匣垂直方向低压转子基频振动幅值普遍增加；三是高压转子转速工频 f_{N2} 的倍频明显，可能存在不对中或转静子碰摩，或由于机匣的椭圆度引发；四是根据组合频率 $3f_{N2}+f_{N1}$ 、 $2f_{N2}+f_{N1}$ 及 $4f_{N2}-f_{N1}$ 等，高压转子可能存在轻微碰摩。

通过对振动数据综合分析得出结论：多处测量位置高压转子基频振动显著增大以及中介机匣垂直方向低压转子基频振动幅值增加可认定为这组振动信号的特征。上述分析的第三条、第四条特点说明高压

转子基频振幅增加主要是由高压转子存在碰摩引发；低压转子由于涡轮叶片掉块导致质量不平衡引发基频振幅增加，并通过低压转子前支点传向中介机匣。

结束语

实现航空发动机气路故障诊断功能的核心要素包括典型状态、故障特征、诊断流程、诊断算法等四个方面。前二者属于研究对象特性范畴，是诊断的设计基准和依据；后二者属于应用方法范畴，是实现诊断功能的具体手段。一方面，确定故障诊断所关注的发动机典型工况状态并建立相应的故障特征，是故障诊断方法设计的首要问题和基础条件；另一方面，在后续的深入研究中故障特征的形式又要与故障诊断与隔离要求相匹配。

航空动力

（孔祥兴，中国航发研究院，高级工程师，从事航空发动机健康管理与控制的基础与应用技术研究）