

航空发动机振动故障诊断及发展趋势

Aero Engine Vibration Fault Diagnosis Technology and Its Development Trend

■ 吴伟力 陈大力/中国航发动研所

航空发动机是结构紧凑的高速旋转机械，在运行过程中经常会出现振动方面的故障。发展综合振动故障诊断技术，开展振动故障机理研究，是解决航空发动机振动故障的有效途径。

振动是航空发动机的一个重要监控参数，发动机在进行试验时，需要解决各种振动问题。发动机振动之所以特别重要，是因为振动直接影响发动机的正常工作和寿命，如果发动机出现振动异常而不及及时加以检查排除，就有可能造成严重的后果。因此，航空发动机振动故障诊断一直是航空发动机试验测试中的一个重要研究课题。

典型的发动机振动故障

航空发动机的振动故障具有复杂性和随机性，引起发动机振动故障的原因多种多样，其振动故障现象各不相同，典型的航空发动机振动故障及其特征简要归纳见表1。

发动机振动测量

建立满足测试目的和要求的振动测量系统、选择相应的振动测量方法是开展振动故障诊断的重要基础。

振动测量系统

振动测量系统包含测振托架、振动传感器、传输电缆、信号适调器、数据记录（存储）、分析仪和以计算机为中心的数据处理系统等部分。测量时应合理布置振动监测点，选取并正确安装满足要求的振动传感

表1 典型航空发动机振动故障原因及振动特征

故障名称	产生原因	振动特征
转子不平衡	转子材质不均匀、结构不对称、加工误差或存在装配误差；转子平衡在运转中被破坏	转子的振动幅值随转速增高而加大，随转速降低而减小；在频谱图上基频峰值显著高于其分频和倍频峰值
转子不对中	转子支承装配不良或零件变形等	转子和支承振动大，转子二倍频振幅增大，同时其基频振幅也可能增大
轴承故障	轴承存在润滑条件恶化、装配不良或受到过大冲击载荷等异常情况，而产生磨损、剥落或烧蚀	故障初期频谱中出现轴承故障特征频率，故障后期转子振动增大、频谱异常频率增多
齿轮故障	齿轮存在加工或装配误差偏大，或运行条件不佳，使齿面磨损、剥落、塑性变形、齿根裂纹或断齿等	啮合时伴有较大冲击，振动波形具有调制特征；出现以啮合频率为中心，以转速频率及其倍频为边带的边频特征；随故障加深，频谱中边频带振动幅值剧增
附件转子故障	附件转子（如燃油泵、传动轴等）不平衡、装配不良等	频谱中存在故障附件转子频率振动，且其幅值较正常明显偏大
进气畸变	机翼和机体对气流的障碍、飞行姿态及试车台的进气流场不均等	频谱中出现以转子基频与旋转叶片数乘积成倍数关系的激振频率，且振动幅值波动明显
旋转失速	压气机失速，在前几级的流道内会出现一个或几个旋转分离区，其旋转方向与转子转动方向相同，而旋转速度较低	频谱中出现频率为转子基频的0.3 ~ 0.5倍振动频率，且发动机喘振可能性增大
转子与静子碰摩	转子与静子间隙设置不合理；转子振动过大；静子件刚性不高或受热不均变形；转子热弯曲等	频谱中转子基频及其倍频振动增大；有时引起转子或静子固有频率的振动，有时出现0.4 ~ 1倍频率振动，甚至引起高次谐波2倍、3倍…或次谐波1/3倍、1/2倍…的振动

表1 典型航空发动机振动故障原因及振动特征 (续)

故障名称	产生原因	振动特征
转子或静子松动	装配不良或预紧力不够;工作中受热或振动冲击;设计不合理等	产生转子或静子一阶固有频率振动;转速升至某一值时振幅突然增大,转速降至某一值时,振幅突然减小;有时在较高转速下转子基频两侧出现超过基频振幅的边频振动
临界转速	转子工作转速等于或靠近其临界转速;转速过临界转速时停留时间长;转子装配或支承变化,导致临界转速落入工作转速附近	上推至某转速时,转子基频振动急剧增大,下拉或越过此转速后,转子基频振动明显减小;频谱以转子基频振动为主,无倍频成分或幅值很小;多次试验,振动特征具有重复性
结构共振	某些结构受到与其固有频率相等的激振力的作用	局部振动幅值随转速上升急剧增大,随转速下降快速减小,而其他部位振动幅值变化不明显
螺旋桨振动	螺旋桨转子桨叶气动不平衡;螺旋桨转子质量不平衡	激起频率为螺旋桨转速频率的整机振动

器,选用符合要求的电缆并合理固定,确保绝缘性和屏蔽性,保证信号有效传输,避免干扰和失真。目前,在航空发动机振动测量中,广泛采用的振动传感器是压电式加速度计,该类传感器具有频响范围较宽、体积较小、使用寿命较长等优点。

振动测量方法

航空发动机振动测量分为静态和动态两种。静态测量是在研制过程中为了获取发动机的静态振动特性和结构模型参数,采用加激励的方法进行测量。动态测量是在发动机运转情况下进行的,用于实时监测发动机工作状态、诊断振动故障。

目前,航空发动机整机振动测量时,均采用振动位移、振动速度或振动加速度作为显示参数和限制参数。一般说来,对于较低频率振动用振动位移进行显示和限制;对于中等频率振动用振动速度进行显示和限制;而较高频率振动则用振

动加速度进行显示和限制。从对发动机整机振动限制的基本要求和发展趋势看,选择用振动速度进行显示和限制相对较多。因为振动速度既能反映发动机振动能量的大小,又可以反映发动机结构的应力水平,不论发动机的尺寸、转速如何,其振动速度基本上为一个数量级,一般在20~70mm/s范围内,便于给出一个统一的振动限制标准。

振动故障诊断方法

航空发动机振动故障诊断就是通过对发动机的振动信号进行分析和处理,实现发动机运行状态的识别和预测,在事故发生前及时进行诊断,从而提高发动机运行的可靠性及安全性。

幅值谱诊断法

对一个信号的幅值谱分析,可以得到该信号的各种频率成分及其幅值和相位。幅值谱诊断法就是利用振动信号的幅值与频率的对应关

系,实现对转子、齿轮和轴承故障的诊断。通过振动信号幅值谱分析可以获得发动机运行状态下的转子和部件的振动参数,如转子基频及其倍频的幅值、轴心轨迹,齿轮的啮合频率幅值、轴承的特征参数幅值以及振动谱上其他重要成分的频率幅值等。通过观察各个频率下的振动幅值,可以判断出哪些部件的振动超标,哪些部件的振动在合理范围。

幅值谱诊断法是使用最为广泛的一种分析方法,适合于发动机各种试验的振动监控。

共振解调法

当齿轮和滚动轴承出现局部损伤类故障时,会产生周期性的脉冲激励,由于脉冲激励是一宽频信号,必然会激起振动传感器(压电加速度计)的谐振(共振)。将传感器拾取的振动信号进行放大,然后经过中心频率等于传感器谐振频率的带通滤波器滤波,再经解调器进行包络检波,得到了与脉冲冲击发生频率(即齿轮、轴承的故障特征频率)相同的低频信号,对此信号进行频谱分析,可以有效地诊断出齿轮和滚动轴承的故障部位,这种技术就是共振解调法,共振解调技术与快速傅里叶变换(FFT)分析的对比如图1所示。

共振解调技术对诊断齿轮和滚动轴承的损伤类故障效果非常好,该技术得到了广泛应用。

细化谱分析技术

细化谱(ZOOM)分析是在FFT分析中用以增加频谱中某段频率范围的分辨能力的方法,即局部放大的方法。ZOOM-FFT算法原理如图2所示。

细化谱分析能使感兴趣的频段得到较高的分辨率,进而按频率逐段局部放大就能使整个频谱图得到

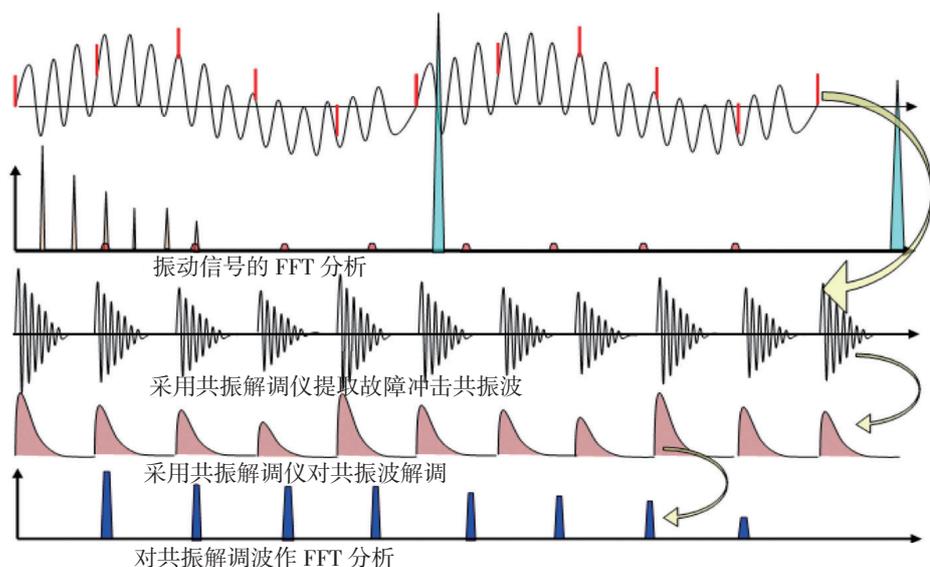


图1 振动信号FFT分析与共振解调分析对比

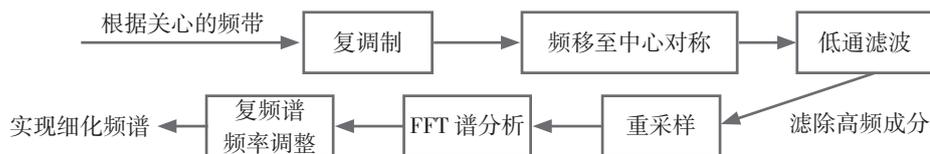


图2 ZOOM-FFT算法原理

详细的分析。该方法在处理间距很近的共振尖峰、斜度陡变化激烈的相位谱图、含有大量谐波的振动信号等情况时，能够得到更高的频率分辨率，从而有效分析振动数据，提高故障诊断的准确性。

倒频谱分析技术

倒频谱（cepstrum）分析可分析复杂频谱图上的周期结构，分离和提取在密集调频信号中的周期成分，对于具有多成分边频等复杂信号的分析非常有效。在齿轮磨损、偏载等故障的发动机齿轮箱的振动信号中，其信号功率谱中会含有多个大小和周期不同的成分，且出现频率调制时，在功率谱图上各振动频率混在一起，难以直观地从谱图上得出振动特征。利用倒频谱分析技术，对具有边带信号的功率谱再作一次

谱分析，则能把具有周期成分的边带信号分离出来，从而实现振动故障信息的有效提取。倒频谱变换能够在整个功率谱范围内求取边频带的平均间距，既不会漏掉边频信号，又能够给出精确的间距结果。

小波分析法

小波分析是一种信号的时频分析方法，它能够将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频率的块信号。小波分析采用改变时间、频率的分析方法，具有多分辨率分析的特性，很好地解决了时间分辨率和频率分辨率的矛盾，在时域和频域都具有很好的局部化性质，适于分析检测具有瞬时突变等特征的非平稳信号，因而能有效地应用于故障诊断、信噪分离等问题。

利用小波分析法进行故障诊

断，首先针对振动信号的特点按照最大相似度准则选取小波基，根据信号采样频率对信号进行小波分解，可以利用门限阈值等形式对所分解的小波系数进行处理，对每一层小波系数进行重构，进而通过对重构信号进行频谱分析，提取异常振动信息，得出诊断结论。在齿轮故障、滚动轴承磨损、剥落等故障中，其振动信号中含有与故障部件对应的冲击成分，用小波分析法可以提取这些冲击成分，从而实现故障的诊断。

此外，常见的振动故障诊断方法还有模态分析法、多相干分析技术、振动信号分形方法、信号盲源分离技术等，在发动机振动故障诊断及排故中时有采用，在此不再赘述。

振动故障诊断技术发展趋势

随着传感器技术、计算机技术、数据处理技术、人工智能技术、网络技术的迅速发展和深入的应用，航空发动机振动故障诊断技术不断向传感器精密化、分析方法多维化、诊断方法智能化的方向发展。

多元传感器信息的融合

现代化的故障诊断技术要求对发动机进行包括振动参数在内的多种参数的全方位、多角度的监控，以便对其运行状态有全面的了解。需采用多种类型传感器同时对发动机的各类参数进行监测，进而对多元信息进行融合，以得到较好的发动机振动故障的诊断结果。例如，将发动机排气颗粒监测技术、实时润滑油颗粒监测技术以及振动声学早期预警技术融合，可实现发动机的多元信息分析，提高早中期振动故障诊断的可靠性，并实现振动故障

