

同步分析方法应用于航空发动机转子轴承系统振动分析与故障诊断

Application of Synchronous Analysis Method in Vibration Analysis and Fault Diagnosis of Aero Engine Rotor Bearing Systems

洪秀敏 吴太欢 王昆 罗华耿 / 厦门大学 顾乃宁 / 中国航发控制系统研究所

航空发动机工作环境特殊、振动特性复杂，信号分析面临由传递路径复杂、多转动部件、机匣测振多源混合等导致的信噪比低、特征提取困难等问题。同步分析方法应用于航空发动机转子轴承系统振动分析，能有效提高信噪比，增强轴承故障特征，在航空发动机领域具有重要的应用前景。

转子轴承系统作为航空发动机的重要部件，通常处于极端恶劣的工作环境，如高温、高速、变载、润滑不良等条件下长期循环反复使用，极易引发故障失效，进而影响航空发动机的安全性和可靠性。此外，转子轴承系统在运行时还持续经历气动激振、热场变化等复杂情况，振动问题尤为突出^[1]。然而，航空发动机振动监测受限于传感器的布置，只能依赖于机匣上有限的测点数据，机匣测点的响应被视为航空发动机安全运行状态的关键指示信息，融合了转子、轴承及支承结构等多源振动数据，并且不可避免地混杂了复杂多变的环境噪声干扰，呈现出信噪比低、特征提取困难等特性^[2]。传统同步分析方法多局限于转子和齿轮故障诊断，难以满足轴承系统的应用需求。因此，结合当前航空发动机振动分析与故障诊断领域的实际需求，在常规同步分析方法的基础上开展航空发动机转子轴承系统振动分析与故障诊断方法的改进研究，扩宽同步分析方法的应用范围，实现相关软硬件设施的国产替

代，对提升航空发动机振动分析、诊断的准确性和可靠性，以及安全运维的水平具有重要的工程意义。

转子轴承系统振动特点

随着现代化工业的进步与发展，滚动轴承的工作条件和性能指标要求愈发严苛，尽管滚动轴承类型繁多，但其结构通常由外圈、内圈、滚动体，以及保持架等4种基本元件组成。一般情况下，滚动轴承的外圈固定安装在轴承座孔上，内圈随转轴一起转动。但在双转子航空发动机系统中，中介轴承支承在高压和低压转子之间，其内圈、外圈分别与高压、低压转轴固定连接，随高压和低压转子同步转动。

基于不同的使用需求，中介轴承内圈和外圈旋转方向不一致，可能同向旋转，也可能反向旋转。常见的中介支承构型如图1所示^[3]，结构I中介轴承内圈支承于低压转子，外圈支承于高压转子；结构II中介轴承内圈、外圈支承与结构I相反。

轴承的振动可以分为两类：一类是轴承的自然振动；另一类是当轴承的内圈、外圈及滚动体等部件出现局部损伤时引起的冲击激励，该激励产生的冲击振动与轴承损伤状态密切相关。自然振动下，健康轴承的振动响应主要包括与轴速同步的周期性振动信号成分、与轴速不同步的周期干扰成分和随机噪声。

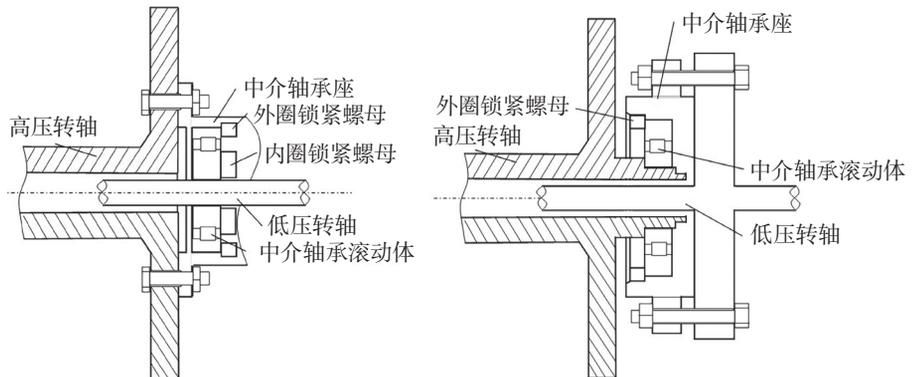


图1 中介支承结构I(左)和中介支承结构II(右)

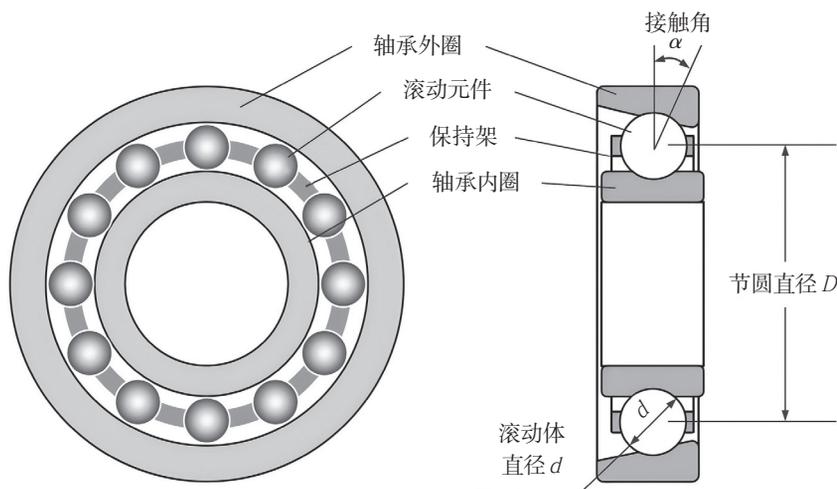


图2 中介轴承结构

当轴承发生损伤时，振动响应中会出现特定的故障特征频率，故障特征频率与轴转频成比例。对于航空发动机转子轴承系统而言，存在损伤特征频率与轴转频同步、干扰信号与轴转频异步的特点，通过分析和识别特征频率及其谐波成分可以有效地检测和诊断轴承的损伤状态。

根据轴承运动学原理，理想情况下中介轴承故障特征频率可通过内圈转速、外圈转速、轴承各部件结构参数计算得到。中介轴承结构如图2所示，主要参数包括轴承节圆直径、滚动体直径、接触角（滚动体受力方向与内外滚道垂直线的夹角）、滚动体数量，以及高低压转子之间的转速差。中介轴承各部件的故障特征频率主要依赖于上述几何参数和转速差的组合影响。

航空发动机转子轴承故障振动模式与传统轴承存在显著差异，传统的轴承故障诊断分析方法难以直接应用于该领域特征提取和故障诊断。

同步分析 同步采样

航空发动机运行工况复杂、转

速变化快，同时受传递路径影响，机匣采集的轴承故障振动信号往往是信噪比低的非平稳信号，非平稳振动信号处理是航空发动机轴承振动分析与故障诊断领域的挑战之一。通常情况下，傅里叶变换可以应对大多数平稳振动信号，但非平稳信号的周期频率是时变的，若直接对整段振动信号进行频谱分析将导致频率能量弥散，难以准确提取损伤特征。

为应对这一问题，同步采样被开发用于非平稳工况下的旋转机械故障诊断。在旋转机械系统中，振动故障响应通常随轴的转动同步产生，以轴转过的角度为采样标尺，采集相邻两个数据点之间的角度间隔固定不变，使得每个旋转周期内

的采样点数一致，与轴转速变化的快慢无关。利用这一特点，通过轴速信号对采集得到的转子轴承振动信号进行同步采样，将时变转速运行的转子轴承系统产生的时域非平稳信号转换成角域平稳信号，从而获得整周期采样信号。轴承损伤特征频率表现为与轴转频相关，因此，在轴转动周期域内开展傅里叶变换，分析并提取阶次谱上与轴承相关的阶次特征，可以有效消除时变转速工况下轴速度同步成分的频谱能量弥散问题，确保故障特征的准确提取，以判断轴承不同部件损伤的存在性。

传统的同步采样方法根据轴速条件生成合适的采样时钟，一般需要键相装置、比例发生器、采样率合成器或增频器等硬件设备，如图3所示。该方式高度依赖于精确的硬件安装与配置，这限制了其在复杂场景下的适用广度。相比之下，数字同步采样摒弃了复杂的硬件束缚，通过先进的数字信号处理技术优化同步采集过程。数字同步采样可分解为以下3步：第一步是在转速已知的情况下通过数值定积分确定轴转动的整周期时间点，或者在已有键相信号的情况下由脉冲触发位置的时间点识别得到；第二步是将轴旋

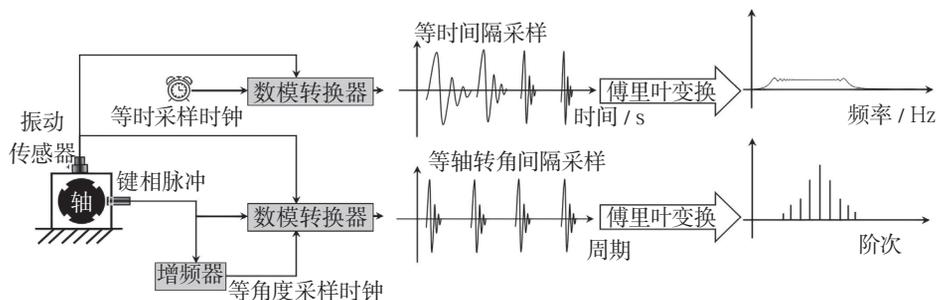


图3 传统同步采样原理^[5]

转一周的时间平均分成 N 份, 找出各份对应的时间点; 第三步是根据这些时间点, 使用插值算法对振动信号进行重采样得到同步采样信号。

数字同步采样无须额外安装复杂的硬件设备, 具备低成本、高可靠性的特点, 在旋转机械振动分析领域得到了广泛的认可, 基于该技术的研究应用已较为成熟, 但如高精度的转速信息要求或数字方法所占系统计算内存较多, 会影响信号处理的效率等方面的问题仍有待进一步改进。

时间同步平均

时间同步平均结合了同步采样和时间平均滤波方法。首先, 通过同步采样将等时采样信号转换为等角域采样信号。然后, 根据参考转速的周期以整数倍周期截取若干数据段。最后, 将各段信号进行平均计算得到目标信号, 随机噪声和非周期性干扰在多次平均后会相互抵消或减弱, 而与参考转速同步的周期成分因为相位一致得到增强。因此, 时间同步平均方法能有效消除信号中与参考转速无关的干扰成分和随机噪声, 提高目标信号的信噪比。时间同步平均方法抑制噪声的证明过程如图4所示, 可以看出, 时间同步平均次数越多, 提高信噪比的效果越强。

时间同步平均方法对信号需具备高度周期性的严苛要求构成了其有效实施的关键前提。考虑到这一实际应用限制, 许多学者致力于探索同步平均的改进方法, 但研究主要聚焦在频率成分与轴转频成整数倍关系的转子和齿轮故障振动分析与诊断领域。当前, 学术界在中介轴承振动故障分析领域对同步平均方法的研

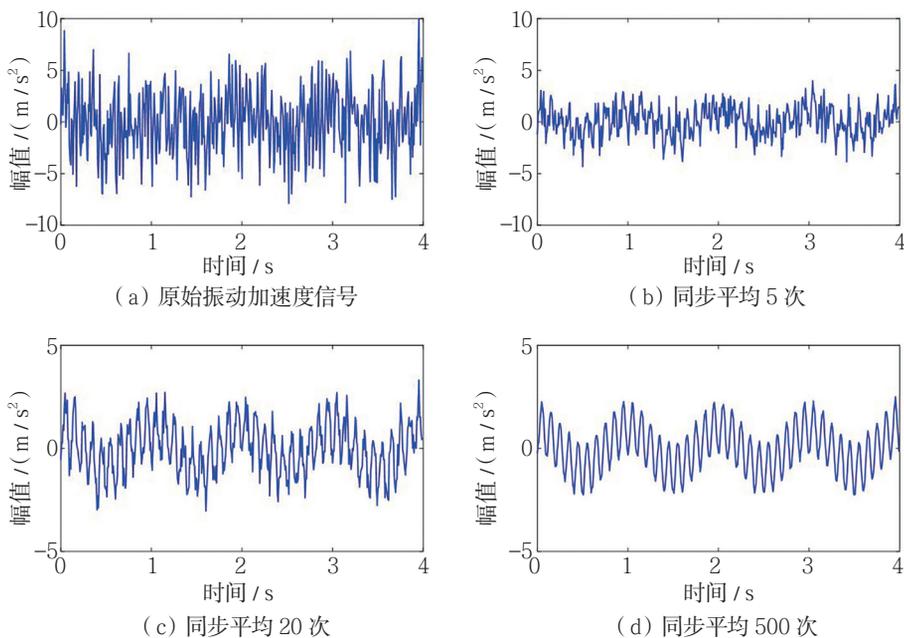


图4 时间同步平均次数不同产生的降噪结果

究尚显不足, 公开文献较少。

在中介轴承振动故障分析与特征提取方面, 时间同步平均方法仍然存在一些问题需要解决。一方面, 有效地开展同步采样是实施时间同步平均的重要前提; 另一方面, 中介轴承损伤冲击响应信号通常不满足严格的周期性要求。具体而言, 根据轴承运动学计算得到的故障特征, 其周期参数通常不是整数, 若以此为依据对信号进行轴转速周期截断, 将无法实现时间同步平均的严格要求。

改进应用

同步采样改进应用

在实际工程应用中, 许多情况下无法直接通过转速信号进行同步采样。以航空发动机双转子轴承系统为例, 双转子轴承系统振动信号同步采样缺乏真实物理轴参考速度, 损伤冲击响应发生的频次与内转子、外转子的转速差相关, 形成一个基

于内转子和外转子的速度差做同步采样的物理装置难以实现。针对这一问题, 相继有学者提出了一些解决方案, 这些方案的核心思想可概括为: 基于转子轴承运动学构建物理相对轴为转子轴承振动信号同步采样提供参考速度。

由轴承运动学原理可知, 轴承内圈、外圈以及滚动体损伤冲击响应特征频率与轴承内圈、外圈转速差的比值和轴承的结构参数有关。轴承结构参数通常是确定的, 即使转子轴承的内圈、外圈转速随时间变化, 其内圈、外圈以及滚动体的损伤冲击响应特征频率与内圈、外圈转速差的比值关系始终保持恒定。因此, 构建以内圈、外圈转速差为转速的相对轴, 基于这一相对轴做后续阶次分析和同步平均等一系列的信号处理是一种可行方案。

时间同步平均改进应用

时间同步平均作为一种有效的降噪方法, 在轴承振动分析和故障

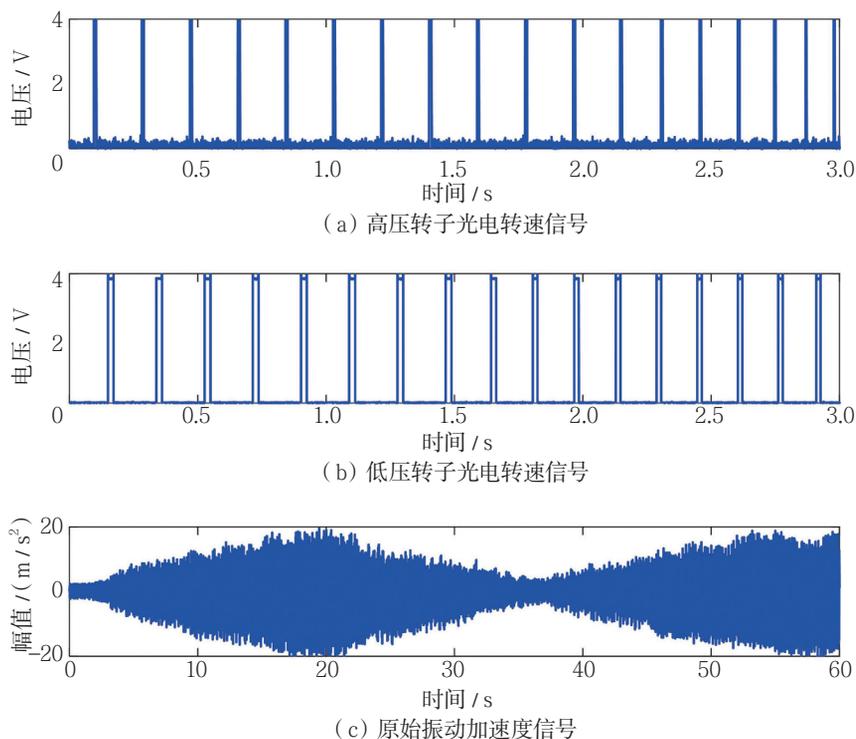


图5 中介轴承内圈损伤振动信号及高低压转子转速信号

特征提取方面具有重要的应用潜力，但其技术路线需进一步提升和改进。

同样地，以航空发动机双转子轴承系统为例，根据轴承损伤冲击响应特征频率的分析可知，如果直接对相对轴应用时间同步平均方法，转子轴承故障信息所在的频率成分不是相对轴频率的整数倍，信号会被抑制。为此，提出一种虚拟轴时间同步平均方法——在相对轴的基础上人为引入虚拟轴的概念，设定一种以损伤特征频率为基频的故障特征虚拟轴，使其与轴承损伤特征成整数比关系。在故障特征虚拟轴的周期域内应用时间同步平均方法，可以显著地提高轴承损伤振动信号的信噪比^[4]。

有效性验证

以中介轴承内圈损伤为例验证时间同步采样和时间同步平均改进方法的有效性。在双转子-中介轴承系

统试验装置中通过加速度振动传感器采集中介轴承内圈损伤的振动信号，并利用光电传感器同步记录高压转子和低压转子转速信号，如图5所示。

对采集得到的振动信号和转速信号进行改进同步分析，即相对轴同步采样和虚拟轴时间同步平均，信号处理过程如图6所示。由结果可知，高频响应包络谱图6(b)所示中介轴承内圈特征频率严重弥散，几乎找不出损伤特征。在相对轴内对高频成分做包络分析得到包络谱图6(e)，可以看出，中介轴承损伤特征被突出表征，但仍存在丰富的频率成分干扰。基于内圈损伤特征虚拟轴转速开展同步分析，所得结果如图6(g)和图6(h)所示，发现在时间同步平均降噪后，图6(f)包络阶次谱上的干扰成分均被滤除，只保留了中介轴承内圈损伤特征成

分。显然，基于图6(h)开展故障特征提取明显优于图6(b)和图6(f)，虚拟轴时间同步平均方法能显著提高故障特征成分的信噪比，增强包络谱上中介轴承振动故障特征。

综上所述，传统的同步分析能有效增强故障特征识别能力，提高故障诊断精确度，在航空发动机振动分析领域是一个已经较为成熟的技术，但主要集中于转子或齿轮等方向。基于此提出的传统同步分析方法改进技术路线应用于航空发动机转子轴承系统，拓宽了传统方法的应用范围，填补了该领域的研究空白。但针对航空发动机转子轴承系统的特殊情况，如轴承打滑或接触角波动，以及其他振动干扰等因素的存在，同步分析方法在损伤轴承中的应用仍需继续探索。

应用前景

随着现代化信息和工业技术的不断进步，同步分析主要涉及的软硬件技术支持，包括精确的时间同步采集设备、高性能的数据采集和处理系统，以及先进的信号处理算法和软件工具等方面，均取得了显著提升。这些技术的进步不仅为同步分析在航空发动机转子轴承系统的应用奠定了坚实的基础，同时也进一步拓展了其在航空发动机实时监测、预测维护和性能优化方面的潜力^[5-6]。

实时健康监测与预测维护

通过同步分析技术，可以在转子轴承系统中实现更为精确和及时的健康监测。结合深度学习、数字孪生等前沿技术的发展，对发动机运行状态进行复杂分析、预测或远程诊断服务也成为可能。提前预测

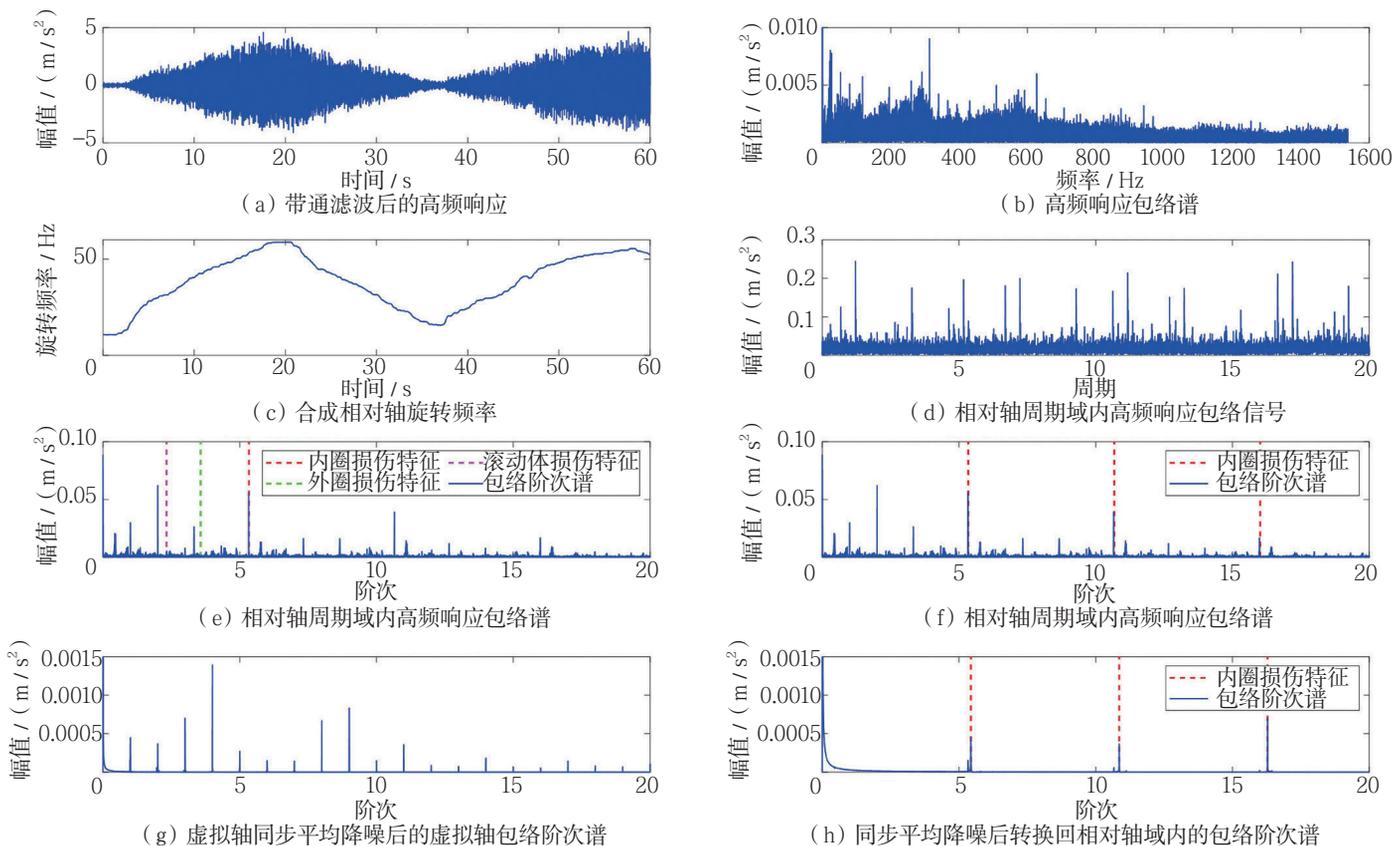


图6 同步分析改进方法处理过程

潜在故障并制定有效的维护策略，避免非计划停机时间，能有效提高运行效率和安全性。

优化性能和燃油效率

利用实时数据分析和优化算法，根据转子轴承系统的实时状态动态调整发动机控制策略，能够最大程度减少系统异常工作时间，以达到更高的燃油效率和更优的性能表现，在提升发动机可持续性能的同时减少碳排放，符合绿色航空未来趋势和环保法规要求。

故障诊断与辅助决策

依托先进的数据处理能力和数据驱动算法，能够快速识别和定位转子轴承系统故障根源，及时为维护人员提供决策支持，显著缩短故障排除时间，有效地降低航空发动机整体维护成本和资源消耗。

结束语

航空发动机转子轴承系统的振动分析与故障诊断是确保航空安全、提升发动机性能的关键技术之一。相关技术的探索与改进，不仅可以拓宽传统同步分析方法的应用范围，更有效提高了轴承故障特征的识别精度和诊断的准确性。展望未来，同步分析方法在转子轴承系统的应用将更加广泛和深入，有望拓展至航空发动机实时健康监测、预测维护及故障诊断等方面。

航空动力

(洪秀敏, 厦门大学, 硕士研究生, 主要从事航空发动机振动信号处理、健康管理等研究)

参考文献

[1] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望 [J]. 航空学报, 2011,32(8):1371-1391.

[2] 田晶, 张羽薇, 张凤玲, 等. 基于多尺度量子熵的中介轴承故障诊断方法 [J]. 航空学报, 2022,43(8):75-86.

[3] 吴太欢. 考虑不平衡的转子轴承系统振动分析与故障诊断方法研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2024.

[4] ZHANG B, ZHANG F, LUO H. Virtual shaft-based synchronous analysis for bearing damage detection and its application in wind turbines [J]. Wind Energy, 2022, 25(7): 1252-1269.

[5] 吴伟力, 陈大力. 航空发动机振动故障诊断技术及发展趋势 [J]. 航空动力, 2021(3):69-72.

[6] 刘魁, 王潘, 刘婷. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用 [J]. 航空动力, 2019(4):70-74.