

# 2022 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

## 一、项目名称

基于熵值理论的转子系统早期异常检测与故障诊断方法

## 二、提名者及提名意见

提名者：

陕西省教育厅

提名意见：

针对冲击振动响应信号的故障表征、优化检测以及诊断等科学问题开展深入研究，并将研究成果成功应用于转子系统早期故障检测和诊断中，取得了一系列创新性成果：提出了低信噪比下基于熵值理论的早期微弱故障表征新方法，阐明了微弱瞬态信号提取与熵理论噪声抑制机制；构建了瞬态信号多元多尺度熵值理论模型，揭示了多源异构信息故障特征的表征原理；提出了自适应带宽优化的阶次跟踪方法，发现了时变工况下带宽与分析信号相匹配的基本规律，实现了时变工况下故障信息的有效分离。研究成果发表 5 篇代表性论文，1 篇入选 ESI 热点论文，4 篇入选 ESI 高被引论文，并荣获 2020 年西安市自然科学优秀学术论文二等奖、2020 年 PHM Conference “最佳论文奖”和 JSSE 年度最佳论文，5 篇代表性论文 WOS 总他引 510 次，篇均 WOS 他引 102 次。累积申请国家发明专利 12 项，授权发明专利 5 项。项目研究成果已应用于多家航空航天院所，解决了转子系统早期故障检测与诊断难题，并获得“陕西高等学校科学技术一等奖”。该项目创新成果卓越，科学价值显著，极大的扩展了故障诊断方法的范围，推动了熵值理论在故障诊断领域的应用，而且在工程领域得到了实际应用，取得了显著的经济效益。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

### 三、项目简介

#### 1. 所属科学技术领域、主要研究内容

本项目属于机械状态监测与故障诊断和航空、航天可靠性工程领域。

转子系统常常工作于高温、高速、重载和强扰动等复杂服役环境下，导致灾难性事故时有发生，对其进行早期异常检测与诊断是提高维护效率、降低运维成本、防止灾难性事故发生的有效途径。转子系统发生故障时会伴随周期性冲击激励，由于转子系统结构的复杂性、工况多变性及传递路径的影响，使得周期性冲击振动响应信号具有特殊的动力学特性—调制性、时变性和瞬态性。同时，由于转子系统早期故障的冲击振动响应十分微弱，易受到噪声干扰，并与机械系统复杂结构固有频率进行调制后具有频域分布范围广、时频结构复杂等动力学特性。因此，如何从强烈且复杂的背景信号中提取出微弱冲击瞬态信号是转子系统早期故障诊断领域的关键。

然而，传统的时频分析算法在处理此类微弱冲击瞬态信号时收效甚微。首先，时域统计特征对频响函数和幅值特性变化不敏感，无法准确捕捉早期故障引起的瞬时微弱动态信号变化。其次，频域特征在进行全局或局部特征提取时，存在频谱泄漏和平均效应，在抑制噪声的同时也削弱了特征信号，无法满足转子系统早期微弱故障发现的苛刻需求。本项目另辟蹊径，从第三维度—基于熵值的复杂度表征来度量瞬时信号的动力学变化，既具有信号能量的统计特性，又对信号的局部频率变化十分敏感，因而能够准确捕捉早期局部微弱故障信息，避免了传统时频和频域特征的平均效应所导致的噪声与微弱冲击“两败俱伤”问题。

该项目从转子系统故障机理出发，以熵值理论为主线，挖掘微弱冲击瞬态信号与故障征兆之间的本质联系，研究故障冲击与动力学复杂度之间的映射关系，探索基于熵值的转子系统早期微弱故障表征方法，针对转子系统“早期故障难预警”、“多源信息难融合”和“时变工况特征难提取”的难题开展深入研究，并将研究成果成功应用于转子系统的早期故障检测和诊断中，为我国航空航天装备的高可靠性运行提供了理论支撑和技术支持。

#### 3. 科学发现点

该项目在国家自然科学基金项目和国家 973 项目的支持下，围绕转子系统的早期故障检测和诊断开展深入研究，取得了具有重要科学意义和国际影响力的创新性成果：

1). **构建了低信噪比下基于熵值理论的早期微弱故障表征体系，阐明了微弱瞬态信号提取与熵理论噪声抑制机制。**探索了转子系统动力学特性变化与振动信号复杂度之间的变化规律，构建了基于符号动力学熵的转子系统早期微弱故障表征体系，阐明了微弱瞬态信号提取与熵理论噪声抑制机制，突破了现有熵值方法抗噪性差和计算效率低的瓶颈，奠定了基于熵值的微弱故障表征理论基础。

2). **建立了瞬态信号多元多尺度熵值理论模型，揭示了多源异构信息故障特征**的表征原理。针对转子系统多源监测信号异质、异构的特性，构建了多元信号互相关模型，揭示了多通道瞬态信号的动态关系和跨通道信号间的关联机制，阐

明了多源异构信号的故障融合机理，实现了转子系统多源信息的深度融合。

3). 发现了时变工况下带宽与分析信号相匹配的基本规律，实现了时变工况下故障信息的有效分离。构建了时变工况下微弱脉冲信号的自适应提取模型，通过最小带宽优化提高了信号能量的聚集性，揭示了包络线选择与分析信号相匹配的基本规律，提出了自适应带宽优化的阶次跟踪方法，实现了时变工况下故障信息的有效分离。

### 3. 科学价值及同行引用评价情况

围绕上述创新工作发表 5 篇代表性论文在《Mechanical Systems and Signal Processing》(MSSP)、《IEEE Transactions on Industrial Electronics》(TIE)、《Journal of Sound and Vibration》(JSV) 等权威期刊上，其中 1 篇入选 ESI 热点论文（前 0.1%），4 篇入选 ESI 高被引论文（前 1%），并荣获 2020 年西安市自然科学优秀学术论文二等奖、2020 年 Prognostics & System Health Management Conference “最佳论文奖”和 Journal of Systems Engineering and Electronics 年度最佳论文；5 篇代表性论文 Web of science(WOS)总他引 510 次，篇均 WOS 他引 102 次，google 学术共计引用 646 次，被来自 32 个国家和地区的 700 多名学者在 100 多种国际期刊上引用，他引者包括中、美、英、加等国的 14 名院士及 ASME/IEEE/IOP 等国外权威学会 20 余名 Fellow 等。

该项目研究成果获中国力学学会优秀博士论文、入选“博士后创新人才支持计划”、陕西高等学校科学技术“一等奖”、西北工业大学“翱翔新星”、哈尔滨工业大学校优博等荣誉；担任振动工程主流期刊《Measurement》(Elsevier, JCR1 区) Associate Editor 和 EI 期刊《交通运输工程学报》青年编委等，担任中国振动工程学会下 4 个专业委员会的委员，受邀在国际/国内学术会议作大会邀请报告 3 次，担任组委会大会主席 1 次，分会场主席 10 余次。

基于熵值理论的转子系统早期异常检测与故障诊断方法，授权国家发明专利 5 项。研发了航空发动机早期异常检测系统，基于航空发动机采集的多源数据，利用熵理论全面提取隐藏故障信息，实现了某型号涡扇航空发动机早期故障的门限内准确预警。研发了卫星状态监测与健康管理系统，提升了在轨卫星的早期故障报警与诊断能力，直接支撑了在轨卫星 326 次故障的发现和及时处置，为保障卫星的安全运行发挥了重大作用。

## 四、客观评价

本项目针对冲击振动响应信号的故障表征、优化检测以及诊断等科学问题开展深入研究,并将研究成果成功应用于旋转机械转子系统早期故障检测和诊断中,取得了一系列创新性成果。被来自 32 个国家和地区的 700 多名学者在 100 多种国际期刊上引用,他引者包括中、美、英、加等国的 14 名院士及 ASME/IEEE/IOP 等国外权威学会 20 余名 Fellow 等。主要客观评价归纳如下:

(1) 国内外学者高度评价了基于符号动力学熵的早期微弱故障表征方法及其在微弱瞬态信号提取的应用(科学发现点 1)

① 欧洲科学院院士、IEEE Fellow、芬兰科学院院士 Moncef Gabbouj 教授发表在权威期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》(2022, 165: 108343) 论文中 5 次引用了申请人的工作(代表论文 1,4,5),其中对符号动力学熵(SDE)的系列研究进行了进行了大篇幅引用和积极评价。论文中引用评价如下:“不幸的是,已有的熵值提取方法都存在各自的缺陷。因此,提出了符号动力学熵(SDE)来克服上述缺陷[48]。然而,上述熵算法仅估计单个尺度的不规则性,而忽略了非平稳振动数据中其他尺度下丰富的故障信息。因此,发展了多尺度符号动力学熵方法[48-50]来克服这一缺点,从振动数据中捕捉更多的细节。不幸的是,粗粒化过程会忽略隐藏在高频信号成分下的故障特征。为了解决多尺度分析带来的问题,提出了层次符号动力学熵(HSDE)[51],它能够同时捕捉隐藏在高频和低频部分下的故障特征。然而,传统的层次分析会因为数据长度随着层数加而缩短,导致统计可靠性下降。因此,参考文献[52]提出了一种改进的层次分析方法,使用移动平均和移动差分处理来解决这个问题。基于改进后的层次分析方法不会随着层数增加而缩短数据长度。”

② 加拿大工程院院士、加拿大红外视觉及无损检测领域首席科学家、加拿大拉瓦尔大学 X. Maldague 教授在顶级期刊《IEEE Transactions on Industrial Informatics》(2018, 14: 5629-5636)上对我们提出的符号动力学熵进行了高度评价(代表论文 1),称符号动力学熵为一种有效的信号处理技术。

③ 国家杰出青年基金获得者、机械设备健康监测与故障诊断领域专家雷亚国教授在权威期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》(2020, 138: 106587)中多次引用申请人工作,对我们的代表论文 1 给出了积极评价:对于先进的智能故障识别策略,所提方法能够很好的克服原有分类策略的不足。

④ 哈尔滨工业大学郭庆教授在《Entropy》(2019, 21: 1061)中对基于符号动力学熵的早期微弱故障表征研究进行了高度评价。评价到与传统方法相比,符号动力学熵是一种具有高计算效率,高鲁棒性的特征提取方法。通过符号学滤波,符号动力学熵能够极大的保留隐藏在强背景噪声种的故障特征。

(2) 国内外学者积极评价了本项目在瞬态信号多元多尺度熵值理论模型的构建与多源异构信息故障特征的表征中的应用(科学发现点 2)

① 中国工程院院士、俄罗斯应用科学院外籍院士、非线性振动专业委员会

主任陈予恕教授发表《Measurement》(2020, 151: 107233)关于基于熵值理论健康监测的论文4次引用了申请人的工作,对层次熵分析方法进行大段引用和肯定(代表论文4),其中,指出“将层次分析与熵相结合,以表示振动信号的动态特性,能够有效的提取故障特征,并诊断行星齿轮箱和轴承故障”。

② 加拿大工程院院士、加拿大工程院院士 M. J. Zuo 教授在知名期刊《IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement》(2020, 69: 1594-1608)上对多元多尺度熵值理论模型的构建研究方面的工作做了积极正面评价(代表论文4),称我们提出的层次熵极大的丰富了所提取的故障特征。

③ 国家杰出青年基金获得者、清华大学褚福磊教授在顶级期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》(2019, 126: 662-685)上积极正面评价了我们的多尺度熵值理论研究方面的工作(代表论文4),称通过形态学滤波和层次熵,能够有效的提取行星齿轮箱的故障特征”。

④ 可靠性国际知名学者、加拿大卡尔顿大学 Jie Liu 教授在顶级期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》(2020, 145: 106956)上对我们提出的层次熵高度评价(代表论文5),称“层次熵能够在保留原有低频组件特征的同时,同步地提取高频组件的故障特征,极大的丰富了故障特征。”

⑤ 鲁汶大学(KU Leuven) Dandan Peng 教授在顶级期刊《IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems》上对我们的代表论文5高度评价,称“该方法在两种轴承数据集上均取得了较好的效果,为我们的后续研究指明了方向”。

(3) 国内外学者积极评价了本项目在时变工况下微弱脉冲信号的自适应提取与时变工况下故障信息的有效分离的应用(科学发现点3)

① 英国皇家工程院院士、芬兰国家 FiDiPro 计划杰出院士、IEEE Fellow、IET Fellow、英国布鲁内尔大学 A.K. Nandi 教授在综述性论文《Mechanical Systems and Signal Processing》(2020, 138: 106587)中2次引用申请人工作(代表论文3),对本项目在时变工况下故障信息提取的应用研究方面进行了高度评价,指出本项目提出了一种高效的变转速下的特征提取方法。

② 加拿大工程院院士、IET Fellow、IEEE 控制系统学会温哥华分会主席 Mehrdad Saif 教授发表在顶级期刊《IEEE Transactions on Industrial Informatics》(2018, 13: 2758-2769)中对本项目中的微弱脉冲信号自适应提取模型进行了高度评价(代表论文2)。他们认为,提出的改进最小带宽经验模态分解方法能够从任意复杂非线性非平稳信号中准确提取微弱故障特征。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	A fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using modified multi-scale symbolic dynamic entropy and mRMR feature selection	Mechanical Systems and Signal Processing	Yongbo Li, Yuantao Yang, Guoyan Li, Minqiang Xu, Wenhui Huang	2017 年 91 卷, 295-312	2017 年 04 月 20 日	Minqiang Xu	Yongbo Li	李永波, 李国彦, 杨远涛, 徐敏强, 黄文虎	132	SCI	是
2	Application of Bandwidth EMD and Adaptive Multiscale Morphology Analysis for Incipient Fault Diagnosis of Rolling Bearings	IEEE Transactions on Industrial Electronics	Yongbo Li, Minqiang Xu, Xihui Liang, Wenhui Huang	2017 年 64 卷, 6506 - 6517	2017 年 05 月 20 日	Minqiang Xu	Yongbo Li	李永波, 徐敏强, 黄文虎	133	SCI	是

3	A fault diagnosis method for planetary gearboxes under non-stationary working conditions using improved Vold-Kalman filter and multi-scale sample entropy	Journal of sound and vibration	Yongbo Li, Ke Feng, Xihui Liang, MingJ Zuo	2019 年 439 卷, 271- 286	2019 年 01 月 20 日	Ming J Zuo	Yongbo Li	李永波, 冯珂	54	SCI	是
4	A fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy	Mechanical Systems and Signal Processing	Yongbo Li, Guoyan Li, Yuantao Yang,	2018 年 15 卷, 319- 337	2018 年 03 月 15	Xihui Liang, Minqiang Xu	Yongbo Li	李永波, 李国彦, 杨远涛, 徐敏强	101	SCI	是
5	Early fault diagnosis of rolling bearings based on hierarchical symbol dynamic entropy and binary tree support vector machine	Journal of Sound and Vibration	Yongbo Li, Yuantao Yang, Xianzhi Wang, Binbin Liu, Xihui Liang	2018 年 18 卷, 72-86	2018 年 08 月 18 日	Xihui Liang	Yongbo Li	李永波, 杨远涛, 王先芝, 刘彬彬	90	SCI	是
合 计									510		

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李永波	1	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	针对冲击振动响应信号的故障表征、优化检测以及诊断等科学问题开展深入研究，并有效地将研究成果应用于转子设备的健康监测中。对发现点 1, 2, 3 做出了创造性贡献，是代表论文 1-5 的主要作者。 <b>【代表性论文 1-5】</b>
徐敏强	2	无	教授	哈尔滨工业大学	哈尔滨工业大学	针对如何提高熵值理论抗噪能力、提高计算效率角度出发，构建了多尺度和层次分析模型，并将其应用于转子设备的特征提取。对发现点 1, 2 做出重要贡献。 <b>【代表性论文 1, 2, 4】</b>
王先芝	3	无	副教授	西安邮电大学	西安邮电大学	针对时变工况下冲击瞬态信号时频结构展开深入研究，提出了基于最小带宽优化经验模态分解的时变工况下故障冲击检测和提取方法，并有效地将研究成果应用于转子设备的健康监测中。对发现点 2, 3 做出了突出贡献。 <b>【代表性论文 5】</b>

## 七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	提出了适用于微弱冲击振动响应信号的熵值提取方法—符号动力学熵，解决了低信噪比下进行特征提取的关键问题。通过符号化过程，有效滤除在调制过程中噪声的干扰，并针对周期性冲击激励，建立状态模式矩阵和状态迁移矩阵与故障信息的映射关系，极大保留故障信息，突破了微弱冲击振动响应信号的表征能力不足的瓶颈，并将研究成果成功应用于飞行器发动机在线监测系统中。
哈尔滨工业大学	2	构建了瞬态信号多元多尺度熵值理论模型，揭示了多源异构信息故障特征的表征原理。受转子系统结构复杂、长传递路径影响，单一传感器难以准确的捕捉整个转子系统的动力学变化。基于多尺度分析和多维嵌入理论，提出了多元多尺度熵方法，通过构建多元信号互相关模型，深入挖掘多通道瞬态信号的动态关系和跨通道信号间的相关性，揭示了多源异构信号的故障融合机理，实现了多通道故障信息在不同尺度下的全面提取，解决了单一传感器不能全面、综合的反映整个转子系统动力学变化的难题。
西安邮电大学	3	通过对时变工况下冲击瞬态信号时频结构的研究，提出了基于最小带宽优化经验模态分解的时变工况下故障冲击检测和提取方法。提出了能够定量评价 Vold-Kalman 滤波（VKF）带宽与故障信息提取的指标—特征频率比，建立了基于特征频率比最大的 VKF 带宽优化准则根据待跟踪的阶次目标的时频结构自适应选择最优带宽，实现了变转速微弱脉冲信号的最大化提取，解决了变转速下机械系统振动信号噪声和干扰分量难以有效滤除的问题。

## 八、完成人合作关系说明

本项目由三位完成人与申报人密切合作，共同开展了本项目的研究工作，属同一研究团队。主要完成人合作申请并完成了五项国家自然科学基金和三项陕西省自然科学基金基础研究计划，并在此基础上获得了陕西高等学校科学技术一等奖。

具体情况如下：

第二完成人徐敏强，针对如何提高熵值理论抗噪能力、提高计算效率角度

出发，构建了多尺度和层次分析模型，并将其应用于转子设备的特征提取。对发现点 1, 2 做出重要贡献。

第三完成人王先芝，针对时变工况下冲击瞬态信号时频结构展开深入研究，提出了基于最小带宽优化经验模态分解的时变工况下故障冲击检测和提取方法，并有效地将研究成果应用于转子设备的健康监测中。对发现点 2, 3 做出了突出贡献。