

2026 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

复杂环境下低频振动高性能检测关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：李兵、西安交通大学、教授、机械工程

提名意见：西安交通大学完成的“复杂环境下低频振动高性能检测关键技术及应用”成果，面向航天器、武器、智能制造等重大装备在结构安全设计及性能评估中对低频振动精确检测的迫切需求，针对现有振动传感器低频特性差、频带窄、灵敏度低导致的“测不到、测不准”行业痛点，依托国家重点研发专项等支持开展了系统性技术攻坚。突破了复杂环境下低频振动检测的技术瓶颈，创新性地提出了精确信号解调与特征提取算法，从核心机理上突破了现有测振传感器的物理局限，研制出具有完全自主知识产权的系列化高性能振动传感器。项目获授权发明专利 34 项，发表高水平论文 40 篇，构建了从基础方法到高端传感器研制的完整技术体系，实现了该领域核心检测装备的自主可控。项目成果应用效果卓越，在航空航天、国防军工等多家单位成功应用，解决了航天器微振动检测、爆炸实验地震监测等极端场景的低频高精度检测难题，为多项国家重大任务提供了原创性技术支撑。同时，技术成功推广至智能制造、风电、冶金等产业，服务于宝山钢铁股份有限公司、酒泉钢铁（集团）有限责任公司、西电东送工程等国家大型企业与重点装置，极大地提升了振动检测、装备健康管理及运维产品的核心价值，经济社会效益显著。

该项目技术先进、创新性强，成为振动传感器为重型装备改造升级赋能的重要支撑，具有显著的社会和经济效益。本人确认提名材料真实有效，符合填写要求，特提名该项目为陕西省技术发明奖一等奖。

提名者：崔荣鑫、西北工业大学、教授、控制科学与工程

提名意见：项目面向重大装备服役安全与状态评估的迫切需求，直击复杂环境下低频振动易受干扰，且现有传感器低频特性差、解调算法精度不足等瓶颈，从传感机理、检测系统及信号处理维度开展了系统攻坚，构建了“高精传感器+智能解调算法”的完整技术链条。发明了微机械反弹簧准零刚度等敏感芯片与微弱电容检测等技术，研制出具自主知识产权的系列高性能 MEMS 振动传感器，从物理机制上突破了低频振动的检测难题；提出了以 $\Sigma\Delta$ 调制为核心的低频拓展及基于泛函变分的自适应特征提取等新算法，实现了强背景噪声下的工况精准解耦与瞬时频率高精度解调。软硬协同彻底破解了低频振动精确检测难题，获授权发明专利 34 项、发表论文 40 篇。研制的系列传感器及解调系统已在北京卫星环境工程研究所及国防部队等单位规模化应用，解决了航天器微振动、爆炸实验等检测难题，支撑了国家重大任务。同时深度赋能宝山钢铁、唐山冀

东水泥及西电东送等大型骨干企业与重点工程，产生重大经济效益。

该项目实现了国产高性能测振传感器及智能诊断技术的自主可控，产业与经济效益重大。提名材料真实有效，符合填写要求，特提名该项目为陕西省技术发明奖一等奖。

三、项目简介

低频振动不仅影响和危害卫星等装备的服役安全，而且直接反映武器和机床等装备的服役性能和状态，由于其易受复杂环境干扰，且易与低频异源信号叠加，对其精确检测困难显著。现有振动传感器存在低频特性差、频带窄、灵敏度低、解调算法精度不足等问题，导致低频振动信号“测不到、测不准”，严重制约装备研制与服役安全。因此，突破复杂环境下低频振动精确检测技术，研制具有自主知识产权的高性能振动传感器，对国防装备的创新设计和定型试验，以及工业装备的升级更新和技术改造具有重大意义。本项目在国家重点研发专项、国家自然科学基金等项目支持下，攻克了复杂环境下低频振动高性能检测关键技术，提出了精确信号解调与特征提取算法，研制了系列化振动传感器，形成了如下发明点：

1、发明了微机械反弹簧准零刚度等敏感芯片结构，研制了系列 MEMS 加速度传感器芯片及振动传感器，实现了对低频振动信号的高精度检测。提出了电热/静电预加载的芯片刚度主动调节方法，设计了具有准零刚度特性的 MEMS 振动敏感芯片；建立了多面均布刚性限位和柔性吸能结合的双级限位抗冲击方案，发展了基于应力隔离结构及非线性补偿的温度稳定性提升技术，提出了模态局域化、超谐同步等微弱电容检测技术，研制了系列 MEMS 加速度传感器芯片及振动传感器，实现了对高过载、快速温变等复杂环境下低频振动的高精度检测；

2、发明了 $\Sigma\Delta$ 调制低频拓展及正交锁相低频噪声抑制技术，研制了系列低频地震波传感器，解决了爆炸地震波的高精度检测难题。提出了以 $\Sigma\Delta$ 调制器为核心的地震检波器低频拓展和正交锁相低频噪声抑制技术，设计了可直接外接于地震检波器的低频拓展和数字读出的单芯片电子学系统，发展了基于频率域建模的动圈地震检波器特性及非线性参数建模和优化方法，研制了低频数字地震传感器和低噪声抗电磁干扰型地震波传感器，解决了传统地震监测设备在爆炸实验场景中频响范围窄、部署效率低及易受电磁干扰的难题；

3、发明了复杂背景噪声下低频振动信号精确解调及特征提取技术，研制了低速装备的状态评估与故障诊断方法，解决了低频振动信息的解耦分离与监测应用难题。面向多源信息耦合与工况环境干扰下的振动信号，提出极值点插值包络切点逼近方法提高瞬时幅值解调精度，结合中心差分正交项符号校正与二次曲线差值法实现瞬时频率精确解调；基于泛函变分框架提出时变正弦模态、多谐波对偶模态等自适应特征提取算法，实现强噪声下的状态-工况解耦；设计窄带包络重构方法保持低频状态特征的完整性，建立瞬时相位广义差熵值指标，

量化跟踪损伤状态的演变发展；提出轧钢机、风电机组、水泥回转窑、大型压力机等低速装备的专用监测诊断方法，应用于行业领军企业与国家重大工程中。

项目获授权发明专利 34 项，发表高水平论文 40 篇，支撑完成硕博学位论文 23 篇，获批横向课题 18 项，累计经费 1274.8 万元。研制的系列低频振动传感器在北京卫星环境工程研究所、西安空间无线电技术研究所、中国人民解放军 63672 部队、中国人民解放军 63833 部队等航天及国防单位应用，解决了航天器微振动检测、爆炸实验等场景中低频振动的高精度检测难题，为多项重大任务提供了原创性技术支撑。此外，项目发明的低频振动精确解调及特征提取技术推广应用于中山迈雷特数控技术有限公司、西安因联信息科技有限公司、河南晶锐冷却技术股份有限公司等工业运维服务平台，服务于宝山钢铁股份有限公司、唐山冀东水泥股份有限公司、酒泉钢铁（集团）有限责任公司、西电东送工程等国家大型企业与装置，提高了振动检测、健康管理及运维服务产品的核心价值，为工业装备的升级更新和技术改造提供了重要技术支撑，具有显著的社会和经济效益。

四、客观评价

（1）课题结题验收意见

① 2024 年 11 月，在国家重点研发计划项目“高铁车辆健康监测用成套传感器研制和应用（2021YFB3203201）”课题结题评审会中，专家组现场听取了项目组汇报，审查了 MEMS 电容加速度传感器芯片实物，给出评审意见“开发的 MEMS 加速度传感器具备宽频带、高精度加速度测量功能，在轨道交通系统厂商形成国产替代应用”

② 2021 年 3 月，在中国人民解放军 63672 部队装备部门组织下，召开了“MEMS 微地震传感器设计制备技术（项目编号：201908043）”技术服务合同质量验收评审会，形成如下评审意见“项目完成了 MEMS 地震传感器芯片设计、加工制备、样机开发等研究工作，达到项目要求”。

（2）检测报告

① 2024 年 5 月，项目研制的 MEMS 电容振动传感器在陕西省计量科学研究院振动声学实验室（CNAS 认证号 NO：CNAS L1060）进行性能检测，传感器的量程、带宽、线性度、噪声、抗冲击指标分别为： $\pm 30\text{ g}$ 、4300 Hz、0.14%FS、 $9.13\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ Hz}$ 、5500 g（检测报告编号：ZS10241078Z）。性能指标与美国 ADI 公司的 ADXL380、瑞士 Colibrys 公司的 VS1010 产品性能相当；

② 2024 年 8 月和 2025 年 8 月，项目研制的 MEMS 电容振动传感器在北京卫星环境工程研究所（CNAS 认证号 NO：CNAS L6804）按照“运载器、上面级和航天器试验要求”分别开展了热真空和热循环试验。传感器在 -35°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 、 $1.3\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 的热真空条件及 -35°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ （温变速率 $3\text{--}5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）范围 12.5 次热循环条件下均可正常工作（检测报告编号：WM-ZKZ-20240655c、WM-LAB-20250059c）。

（3）科技奖项

2019 年，本项目复杂背景噪声下低频振动信号精确解调及特征提取技术的部分创新技术“振动特征的自适应提取与状态演化发展的跟踪分析”获河南省机械工业科学技术二等奖“数控磨、铣床用电主轴的可靠性设计、试验及应用”；

2022 年，本项目 MEMS 电容振动传感器敏感芯片的部分创新技术“电容 MEMS 加速度敏感芯片抗交叉干扰结构”获中国仪器仪表学会科技进步一等奖“紧凑型数字电容式 MEMS 三轴一体加速度传感器关键技术及产业化”；

（4）科技查新

2025 年 9 月，委托西安交通大学科技查新工作站（教育部科技查新工作站 Z08）对项目技术发明要点进行国内外查新，形成了查新报告（编号：202536000Z08D272）。结果表明，在国内外公开发表的中英文文献中，与本项目查新点完全相同的未见报道。

2. 学术评价

（1）论文引用及评价：

① A Low Noise Capacitive MEMS Accelerometer with Anti-Spring Structure (Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 296:79-86)被引用 83 次。其中，沙特阿卜杜拉国王科技大学 Muhammad M. Hussain 教授（美国 APS Fellow，英国 IOP Fellow, Applied Nanoscience 期刊的主编）在其论文 ACS Applied Electronic Materials, 3:504-531，2021 引用图文评价了本项目提出的反弹簧结构使 MEMS 电容振动传感器实现了更高的灵敏度；比利时鲁汶大学 Michael Kraft 教授（国际期刊 IEEE Sensors Letters 的高级编辑和 Journal of Sensors and Sensor Systems 的副主编）在其论文 Sensors, 20(14):4054，2020 引用并评价了本项目提出的反弹簧结构使 MEMS 电容振动传感器获得低噪声特性；贝鲁特美国大学 Hussein Hussein 教授在其论文 Microsystems & Nanoengineering 2024, 10:43 中引用并评价本项目 MEMS 电容振动传感器反弹簧结构产生了近零刚度，提升了传感器的分辨率；

② A MEMS based Fabry-Perot accelerometer with high resolution (Microsystem Technologies, 2020, 26(6): 1961-1969) 被引用 49 次。其中，华中科技大学国家杰青基金获得者涂良成教授在 IEEE Sensors, October 2-5, 2020 会议上引用并评价本项目发明的微加速度传感器具备低噪声、抗电磁干扰优势；

③ Bearing Failure Impulse Enhancement Method using Multiple Resonance Band Centre Positioning and Envelope Integration (Measurement, 2022, 200: 111623) 被引用 10 次，高端装备机械传动全国重点实验室刘小峰教授在其论文 IEEE Transactions on Industrial Information, 2024, 20(9):11035-11044 中引用并评价本项目发明的多共振带融合解调方法在定位轴承复合故障取得了显著效果。

（2）其他学术评价

2023 年 3 月，本项目研制的抗电磁干扰型光学地震波传感器在中国科协科研仪器案例库优秀案例成果征集遴选活动中被评为二类优秀案例。此外，项目

研发团队于 2024 年 5 月以光学地震波传感器作为成果获得“2024 年度中国仪器仪表学会科学仪器托举计划项目”（CIS 海豚计划）优秀研发团队项目支持。

3. 经济评价

（1）项目成果应用于西安因联信息科技有限公司，2022 年至 2024 年为该公司新增销售额 3055 万元。

（2）2023 年 9 月，项目研制的 MEMS 电容振动传感器在 2023 年陕西省北斗创新创业大赛中，获得最具商业价值奖，项目名称为“北斗+加速度计：多传感器协同融合滑坡灾害监测预警平台”。

五、应用情况和效益

1.应用情况

本项目研究成果已在航天器微振动试验、飞行器风洞试验、武器弹药爆炸实验、精密机床振动监测、低速旋转机械运维等场景开展应用，具体情况如下：

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	北京卫星环境工程研究所	MEMS 电容振动传感器	航天器振动试验	2023-06至2025-08	朱云飞
2	中国人民解放军 63833 部队	MEMS 电容振动传感器	飞行器风洞试验	2025-01至2025-05	杨党国
3	西安空间无线电技术研究所	MEMS 电容振动传感器	星载天线运输振动监测	2019-02至2023-05	刘博学
4	中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所	MEMS 电容振动传感器	导航产品减振系统动态响应测试实验	2023-07至2025-08	闫立勋
5	上海电气集团公司中央研究院	MEMS 电容振动传感器	超精密机床振动监测	2024-07至2025-07	陈忠
6	中国人民解放军 63672 部队	低频地震波传感器	某爆炸地震监测活动	2020-01至2024-12	张晓鹏
7	西安因联信息科技有限公司	低频振动信号精确解调及特	往复压缩机、水泥回转窑、	2018-01至	吕芳洲

		征提取技术	风电齿轮箱等 低速设备	2024-12	
8	河南晶锐冷却 技术股份有限 公司	低频振动信号 精确解调及特 征提取技术	特) 高压直流 输电设备故 障诊断及健康 管理系统	2023-07 至今	付兵非
9	中山迈雷特数 控技术有限公 司	MEMS 振动传 感器及解调和 特征提取技术	数控深孔环模 枪钻等高档数 控机床	2022-03 至 2024-07	周永洪

2.应用效益

(1) MEMS 电容振动传感器

① MEMS 电容振动传感器被应用于北京卫星环境工程研究所承担的某巡天望远镜地面微振动试验中，实现了对 **0.1-700Hz** 频率带宽内百余种荷载工况引发的振动信号的高精度检测，为巡天望远镜超静平台建设提供关键技术支持；

② MEMS 电容振动传感器被应用于中国人民解放军 63833 部队某型号飞行器风洞试验，突破了传统压电振动传感器低频振动检测瓶颈，实现对 **0.1Hz-4kHz** 宽频带流致振动信号精确捕获，有效支撑了型号武器气动-结构耦合动力学模型的建立；

③ MEMS 电容振动传感器被应用于西安空间无线电技术研究所研制的某星载天线运输过程振动监测，完整记录了运输过程随机振动（PSD **0.1-80Hz**）及冲击等复杂激励谱，建立了运输振动数据可靠性验证数据集；

④ MEMS 电容振动传感器被应用于中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所导航产品减振系统动态响应测试实验中，该传感器成功捕捉到减振系统在模拟飞行环境下多频段、低振幅的动态特性，为导航装备的振动环境构建、减振设计验证与系统优化提供了关键数据支撑；

⑤ MEMS 电容振动传感器被应用于上海电气集团中央研究院超精密机床振动监测，实现了对主轴-工件-夹具耦合振动（**0.1Hz-4kHz**）的宽频段解析，准确记录了零件加工过程中切削颤振、主轴异常等异常工况，为机床运维提供了数据基础。

(2) 低频地震波传感器

⑥ 低频数字地震传感器被应用于中国人民解放军 63672 部队某活动实验中，实现了多种冲击振动和远区地震波形的精准监测，应用效果较好，为某测试评估工作提供了有效的数据支撑。

(3) 低频振动信号精确解调及特征提取技术

⑦ 低频振动信号精确解调及特征提取技术应用于西安因联信息科技有限公司，集成于该公司的机器健康大数据平台与 SaaS 工业服务平台中，共同构成具有国际竞争力的基于工业机理的算法模型和知识系统，服务于中石油、金隅水泥、中煤集团、陕煤集团等行业龙头企业；

⑧ 低频振动信号精确解调及特征提取技术应用于河南晶锐冷却技术股份有限公司，随“(特)高压直流输电智能运维平台”服务于“西电东送”工程中，**准确辨识了安徽古泉(昌吉-古泉±1100千伏特高压直流输电线路工程终点)站内水冷系统主循环泵故障**，保障了电网联络枢纽站关键设备的安全运行；

⑨ MEMS 传感器及低频振动信号精确解调及特征提取技术应用于中山迈雷特数控技术有限公司，合作开发了**数控机床健康状态监测系统**，及时发现**刀具裂纹、断刀以及其它低频故障**，提高了机床能效和经济性。研发成果作为迈雷特黑灯云管家、设备智能运维平台的重要技术支撑，显著提高了公司产品的竞争力。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种低 g 值电容式 MEMS 加速度计及其模态局域化测量电路	中国	ZL201610964640.3	2019 年 10 月 11 日	3555411	陕西诺伊纳微科技有限公司（权利人知情同意）	韦学勇、张宏才、兰海、翁寅生
2	发明专利	振动加速度信号频谱的可视化分析方法	中国	ZL201710138514.7	2018 年 12 月 18 日	3187720	西安交通大学	张庆、褚世杰
3	发明专利	一种低横向灵敏度的法布里珀罗光学 MEMS 加速度传感器	中国	ZL201911213693.1	2020 年 11 月 17 日	4099829	西安交通大学	韦学勇、赵明辉、蒋康力、蒋庄德
4	发明专利	大型机械压力机多连杆机构状态监测方法	中国	ZL201911384423.7	2022 年 02 月 11 日	4928657	西安交通大学	侯成刚、张兆宁
5	发明专利	一种低横向灵敏度的 MEMS 弹簧质量结构	中国	ZL201911213704.6	2022 年 08 月 05 日	5362283	陕西诺伊纳微科技有限公司（权利人知情同意）	韦学勇、赵明辉
6	发明专利	具有应力隔离的 MEMS 电容式加速度传感器敏感结构及传感器	中国	ZL202411145861.9	2025 年 09 月 23 日	8289011	西安交通大学	韦学勇、王实秋、赵明辉、王文锋、齐永宏
7	发明专利	一种多级限位抗过载 MEMS 电容式加速度传感器结构及传感器	中国	ZL202411145822.9	2025 年 09 月 19 日	8272779	西安交通大学	韦学勇、王实秋、赵明辉、王文

								锋、齐永宏
8	发明专利	一种法布里珀罗传感器的噪声抑制系统与方法	中国	ZL202210096476.4	2023 年 08 月 22 日	6263142	西安交通大学	韦学勇、齐永宏、赵明辉、李博、蒋庄德
9	发明专利	一种改进型直接正交瞬时频率求解方法	中国	ZL201810440887.4	2020 年 05-29	3901691	西安交通大学	张庆、贾林山、姚普林、何小高
10	发明专利	一种针对风电齿轮箱的故障诊断方法	中国	ZL201310694994.7	2016 年 01 月 20	1900019	西安交通大学	侯成刚、淡丽军、田秦

七、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
韦学勇	1	仪器学院党委书记	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目总体负责人，提出了总体研究思路，制定了研究方案与具体实施计划。设计了微机械反弹簧准零刚度等敏感芯片结构，发明了 $\Sigma\Delta$ 调制低频拓展及正交锁相低频噪声抑制等技术，主导研制了系列化高性能低频振动传感器。
张庆	2	智能检测技术与系统副所长	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目主要完成人，发明了低频振动信号精确解调及特征提取技术，研制了低速装备的状态评估与故障诊断方法，并拓展了技术应用。
赵明辉	3	无	助理教授	西安交通大学	西安交通大学	项目主要完成人，发明了正交锁相低频噪声抑制技术，研制了系列低频地震波传感器，在某地震实验中应用。
侯成刚	4	无	副教授	西安交通大学	西安交通大学	项目主要完成人，研制了低速装备的状态评估与故障诊断方法，在风电机组、水泥回转窑、大型压力机等低速装备开展技术应用。
蒋庄德	5	陕西省科协副主席	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目的主要完成人，参与项目整体研究思路及技术方案的制定，发明了MEMS 振动加速度传感器敏感芯片结构。

八、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）
西安交通大学	1	西安交通大学独立完成了项目的总体方案制定、基础理论研究、核心技术攻关、技术应用推广等工作。针对装备的设计研制、试验测试、运维改造等过程中低频振动感知的技术瓶颈，项目团队开展了低频振动高性能检测技术研究工作。发明了微机械反弹簧准零刚度等敏感芯片结构，研制了系列 MEMS 振动传感器；发明了 $\Sigma\Delta$ 调制低频拓展及正交锁相低频噪声抑制技术，研制了系列低频地震波传感器；发明了复杂背景噪声下低频振动信号精确解调及特征提取技术，研制了低速装备的状态评估与故障诊断方法。揭示了低频振动的感知和表征机理，构建了低频振动传感器从理论方法、加工测试、信号处理到集成应用的完整研发体系，实现了复杂环境下低频振动检测技术的自主创新，助力了我国航天器、爆炸武器等装备的测试研发工作，推进了智能制造、电力装备、冶金机组等工业装备的运行维护与升级改造，取得了显著的经济和社会效益。

九、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

项目完成人均均为项目方案制定、技术研发、推广应用的主要完成人，具体情况说明如下：

1、2017 年至今，项目完成人（韦学勇/1、赵明辉/3、蒋庄德/5）针对复杂环境下振动检测高性能传感器合作开展技术攻关，研发了系列 MEMS 电容振动传感器及地震波传感器，共同申报了多项发明专利；

2、2014 年至今，项目完成人（张庆/2、侯成刚/4）针对复杂背景噪声下低频振动信号精确解调及特征提取技术合作开展技术攻关，研制了低速装备的状态评估与故障诊断方法，共同申报了发明专利；

3、2018 年至今，项目完成人（韦学勇/1、张庆/2、赵明辉/3、侯成刚/4、蒋庄德/5）针对复杂环境下振动检测高性能检测技术联合开展推广应用。其中，韦学勇/1、赵明辉/3 及蒋庄德/5 负责传感器对低频振动信号高精度检测，然后将检测数据提供给张庆/2 及侯成刚/4 进行低频振动信号精确解调及特征提取。项目

完成人共同协作形成了复杂环境下低频振动高性能检测技术及应用闭环；

4、项目完成人（韦学勇/1、张庆/2、赵明辉/3、侯成刚/4、蒋庄德/5）均为西安交通大学仪器科学与技术学院的科研人员，长期合作开展先进传感与测试技术研究，先后获批了陕西省先进生物检测技术与仪器重点实验室、陕西省微纳制造与精密仪器国际联合研究中心、陕西省先进传感与精密仪器创新引智基地等基地平台；

5、完成人严格按照对成果的实际贡献大小依次排名。经项目组成员充分协商，按完成人承担完成研究任务、创新点贡献、 推广应用工作量等综合实际绩效依次排名，各完成人一致同意其排序。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同知识产权	韦学勇/1、赵明辉/3、蒋庄德/5	2019 年 4 月	2021 年 9 月	基于电热预加载具有准零刚度特性的 MEMS 微重力传感器芯片	专利证书
2	应用合作	韦学勇/1、张庆/2、赵明辉/3、侯成刚/4	2018 年 1 月	2024 年 12 月	低频振动的高性能检测、特征精确提取和综合诊断分析	应用证明