

# 基于压缩感知的航空发动机管道声模态检测新方法

## Compressive Sensing Based Acoustic Mode Detection Method for Aero Engine Duct

■ 于文君 梁东 杨天啸/中国航发研究院 杨明绥 王萌 闫力奇/中国航发动力所

结合航空发动机风扇/压气机的噪声模态特点，基于压缩感知技术，发展了一种创新的声模态测试方法，与现有方法相比，使用传感器更少，模态观测范围更大，试验成功率更高，解决了实际噪声试验中成功率和观测范围受限、效率较低等瓶颈问题。

随着我国航空技术水平的不断发展成熟，在追求更高的发动机性能的同时，降低噪声、振动、油耗和污染排放等已成为未来发动机发展的技术重点。在民用领域，随着国际民航组织不断提高噪声适航标准，国产大型客机适航取证将面临巨大挑战。在军用领域，直升机、无人机等低空飞行器的声隐身性能将影响突防性能和存活能力。同时，高强度噪声将导致飞行器结构的声疲劳，对飞行安全产生威胁。因此，针对气动噪声预测、控制和评价的研究迫在眉睫。

随着大涵道比涡扇发动机的广泛使用，风扇和压气机噪声成为目前学术界和工业界的研究热点。国外研究人员提出多种通过声场测量值来分析声源的方法，均基于奈奎斯特采样定理。对于高阶模态的观测，要采用大量传感器和多通道高速同步采集，所需的软硬件设备复杂且价格较高，将产生一系列的工程实际应用问题。例如，在噪声测试的过程中，采用80通道同步声学阵列对管道周向模态进行检测，由

于通道数过多，每个传感器的安装、测试、校准等相当耗时，试验效率较低。同时，由于管壁安装位置有限，无法实现更高阶的模态检测能力。另外，目前方法的鲁棒性不高，如果一旦少数通道在测试过程中出现失效的情况，将直接影响检测结果的准确性。声阵列的高阶模态检测能力和试验成功率成为了试验过程中的瓶颈问题。另一方面，声学测试硬件设备、单通道数据处理方法等都已经形成了成熟的技术和标准，因此只有从阵列设计、阵列测试方法等角度进行创新，才有可能解决上述瓶颈问题。

### 压缩感知模态检测方法

风扇/压气机噪声一般具有单频模态

稀疏的特点。从信号采样的角度分析，采用传统方法进行声模态检测，一般是过采样（Over-Sampling）的，因此存在降低采样数进而解决上述问题的可能。压缩感知（Compressive Sensing）技术降低了当前信号采样中的冗余信息，直接将连续时间信号变换得到压缩样本，这种采样方式给中国航发研究院和中国航发动力所的联合创新团队提供了航空声学测试领域的新思路，据此提出和发展了一种创新的测试方法——压缩感知模态检测方法。

管道声模态检测流程如图1所示。在单频下，风扇噪声在模态空间一般具有稀疏性特征。压缩感知的实现过程如图2所示。先通过采样过程的处理可以实现对原始信号的

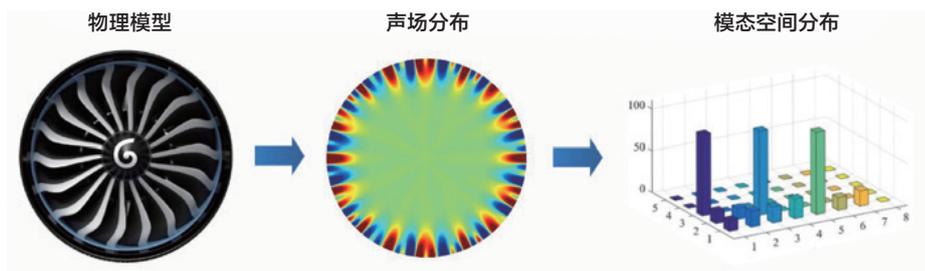


图1 管道声模态检测流程示意图

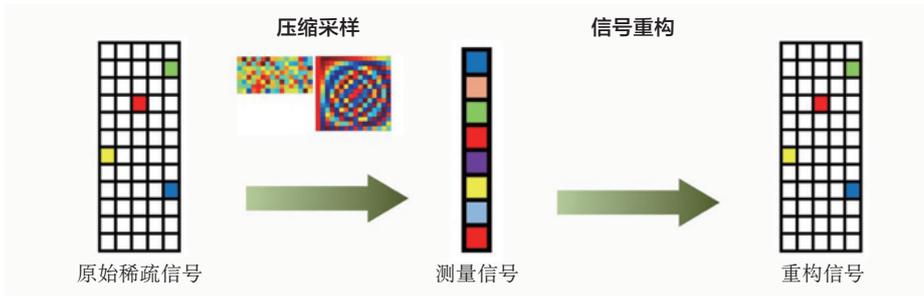


图2 压缩感知实现过程示意图

“压缩”，进而大大降低采样数；然后通过信号重构算法，还原原始信号。由于压缩感知方法理论较复杂，将其引入管道噪声模态测试的过程中，需要解决以下的理论难点和技术难点。

### 压缩采样过程

虽然在2006年陶哲轩等人已经严格证明了压缩感知方法的理论，但在各领域如何具体实现其中的随机测量矩阵仍然是难点问题，在管道声阵列测试中还没有解决的先例。创新团队原创性地提出了一种1-0随机测量矩阵构建方法，可将实际选取的传感器同压缩感知方法中的随机测量矩阵关联起来，在试验时通过随机选取传感器周向位置，较方便地实现了采样过程中所要求的“随机性”。另一方面，压缩感知理论要求随机测量矩阵应满足约束等距性（Restricted Isometry Property），但从理论角度分析当前测量矩阵的约束等距性存在一定困难，创新团队从仿真角度采用蒙特卡洛（Monte-Carlo）方法对算法的有效性进行了深入细致的分析。经大量算例验证，通过随机测量矩阵进行采样获得的信号，可以完美地还原为原始信号，验证了压缩采样过程的有效性。

### 信号重构过程

稀疏模态信号的重构过程属于

凸优化问题。信号重构过程分为两步：一是针对采集信号进行频域分析预处理，然后采用 $l_1$ -范数最小化算法，还原模态空间信号；二是根据还原模态空间信号，进行模态分析，得到各个模态的幅值。目前国际上已有多种 $l_1$ -范数最小化求解方法，创新团队选取了正交匹配追踪（Orthogonal Matching Pursuit）算法进行求解，实现了信号重构过程。

在解决和实现信号重构后，压缩感知模态检测方法可以应用于管道周向模态的检测。同时，对于现有周向声阵列设备，该方法可以在不改变硬件布置的条件下进行推广应用。

## 试验应用验证

在经过大量数值仿真算例的验证和评估后，创新团队采用这项技术开展了声模态合成管试验和风扇模型试验。声模态合成管试验属于模型级算法验证试验，采用均布扬声器模拟声源，可实现模态阶数的精确控制。试验中，传统方法采用全部16个传感器，压缩感知方法随机选取其中7个传感器，对管道中模拟的主要模态可以准确识别，重构声场基本一致，如图3所示。

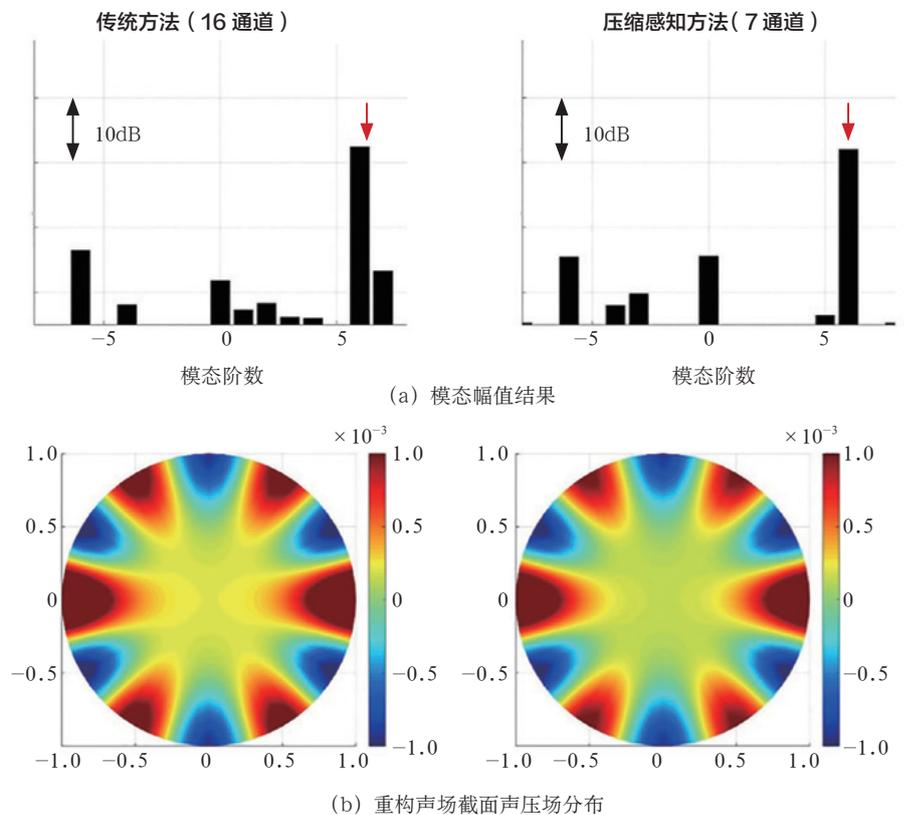
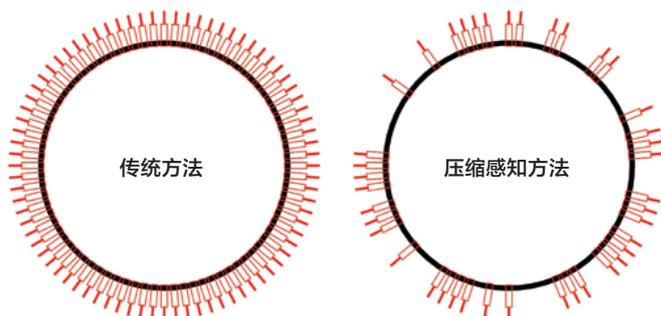


图3 声模态合成管模型试验结果



图4 中国航发动力所风扇/增压级声学试验器 (AALC)



(a) 传感器布局 (80个) (b) 传感器布局 (40个)

图5 传感器布局示意图

表1 两种方法性能对比  
(以传统方法观测50阶模态情况为例)

	传统方法	压缩感知方法
阵列布置方式	周向均匀	周向随机
理论所需传感器数目	100个	22个
传感器成本 <sup>①</sup>	200万元	44万元
传感器最小间距	3cm	>6cm
最高可观测模态阶数	50	>100
理论校准时间 <sup>②</sup>	8.3h/天	1.9h/天
传感器容错性	无	有
抗混叠能力	无	有
抗干扰能力	较强	一般

① 以每个传感器2万元计算。  
② 以每个传感器校准时间5min计算。

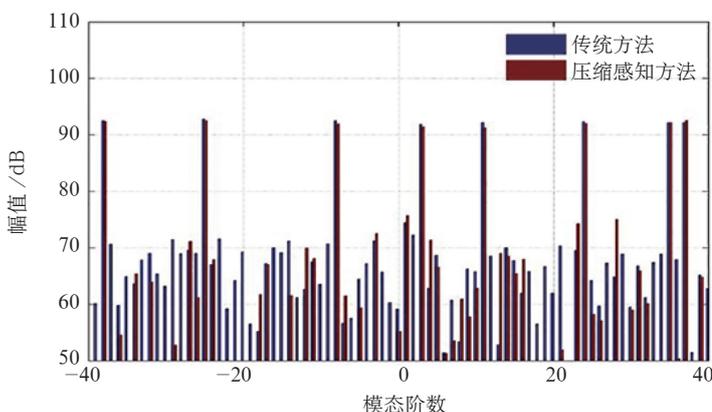


图6 模态幅值观测结果

风扇模型试验在中国航发动力所的风扇/增压级声学试验器 (AALC) 上开展, 如图4所示。试验中传统方法选取80个传感器, 压缩感知方法可随机选取其中40个传感器, 传感器布局示意图如图5所示。在所有主要噪声模态下, 压缩感知方法观测模态幅值误差均满足工程试验精度要求, 模态幅值观测结果如图6所示。

### 应用潜力

相比于传统方法, 压缩感知方法在所需传感器数量、硬件成本、传感器最小间距、最高可观测模态阶数等方面

具有明显优势。同时, 压缩感知方法对于传感器选取位置不敏感, 对于个别传感器依赖小, 所以在试验过程中, 如果有部分传感器误差过大或损坏的情况, 可直接剔除其数据, 将其影响降至最低, 提高试验成功率, 表1为两种方法性能对比。

未来这项技术还可推广应用于露天试车台等试验环境较复杂的试验设备。由于露天试车台受气象环境直接影响, 每年的试验窗口时间较短, 保证其试验成功率非常重要。采用压缩感知方法可有效保证试验成功率, 并提高对高阶模态的检测能力。

### 结束语

中国航发研究院和中国航发动力所的联合创新团队, 结合信号处理领域的新兴理论, 发展了一种创新的噪声模态测试技术, 首次在航空发动机噪声测试领域成功应用压缩感知技术, 解决了在试验过程中遇到的突出问题, 提高了现有测试能力。同时, 这项技术具有广阔的应用前景, 不仅适用于未来发动机型号研制试验, 还可以向民用声学测量领域推广应用。

航空动力

(于文君, 中国航发研究院, 工程师, 主要从事航空发动机气动声学领域研究工作)