

# 基于RVMD-RobustICA-ST联合相干性分析的 电驱动总成噪声源识别\*

张威<sup>1</sup> 景国玺<sup>1</sup> 杨征睿<sup>2,3</sup> 高辉<sup>2,3</sup> 王东<sup>2,3</sup>

(1.河北工业大学,天津市新能源汽车动力传动与安全技术重点实验室,天津 300400;2.中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司,天津 300300;3.中国汽车技术研究中心有限公司,天津 300300)

**【摘要】**为研究集成一体化电驱动总成的噪声源特性,提出一种RVMD-RobustICA-ST联合算法融合相干性分析的噪声源识别方法。首先,采用基于奇异值分解的占优特征值准则估计噪声子空间维数对变分模态分解参数进行指向性条件约束,并利用鲁棒性独立分量分析联合占优特征值约束的变分模态分解对信号特征进行提取。然后,利用S变换和快速傅里叶变换对各分量信号时频特性进行识别。最后,在二次残差法分析分量信号波形误差度基础上,以电驱动总成振动信号、噪声信号、时频重叠分量信号为变量建立线性系统并进行相干性分析。结果表明,稳态工况下减速二级齿副啮合振动噪声对该电驱动总成噪声贡献度最大,且时频重叠分量信号的噪声能量主要由减速一级齿副啮合振动提供。

**关键词:**集成一体化电驱动总成 噪声源识别 奇异值分解 变分模态分解  
鲁棒性独立分量分析 S变换 相干性分析

中图分类号:U469.72 文献标识码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20220244

## Noise Source Identification of Electric Drive Assembly Based on RVMD- RobustICA-ST Combined with Coherence Analysis

Zhang Wei<sup>1</sup>, Jing Guoxi<sup>1</sup>, Yang Zhengrui<sup>2,3</sup>, Gao Hui<sup>2,3</sup>, Wang Dong<sup>2,3</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Power Transmission and Safety Technology for New Energy Vehicles, Hebei University of Technology, Tianjin 300400; 2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300300; 3. China Automotive Technology & Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300)

**【Abstract】**In order to study the noise source characteristics of integrated electric drive assembly, this paper proposed a joint algorithm of RVMD-RobustICA-ST combined with coherence analysis method. Firstly, the spatial dimension of the noise was estimated by Rule of Dominant Eigenvalues(RDE) based on Singular Value Decomposition(SVD), and the variational modal decomposition was subjected to targeted conditional constraints, and then Robust Independent Component Analysis (RobustICA) combined with variational modal decomposition to extract signal features. Secondly, S Transform and Fast Fourier Transform were used to identify the time-frequency characteristics of each component signal. Finally, on the basis of analyzing the waveform error of the component signal using the quadratic residual method, a linear system was established with the vibration signal, noise signal, and time-frequency overlapping component signal of the electric drive assembly as variables for coherence analysis. The results show that the meshing vibration noise of the second gear pair of the reducer has the greatest contribution to the noise of the electric drive assembly under steady state conditions, and the noise energy of the time-frequency overlapping component signal is mainly provided by the meshing vibration of the first gear pair of the reducer.

**Key words:** Integrated electric drive assembly, Noise source identification, Singular value decomposition, Variational modal decomposition, Robust independent component analysis, S transform, Coherence analysis

**【引用格式】**张威,景国玺,杨征睿,等.基于RVMD-RobustICA-ST联合相干性分析的电驱动总成噪声源识别[J].汽车技术,2023(5):15-24.

ZHANG W, JING G X, YANG Z R, et al. Noise Source Identification of Electric Drive Assembly Based on RVMD-  
RobustICA-ST Combined with Coherence Analysis[J]. Automobile Technology, 2023(5): 15-24.

\*基金项目:国防重点实验室基金资助项目(6142212200309)。

通讯作者:景国玺(1984—),男,甘肃会宁人,博士,教授,研究方向为振动噪声控制、结构疲劳强度等,okjgx@163.com。

## 1 前言

电动汽车动力系统正朝集中一体化、高系统效率、高功率密度方向发展。同时,多源激励性、驱动电机高速化、系统结构刚度降低等问题使集成式电驱动总成振动噪声特性相比电机或减速器单体更复杂。

一些学者基于阶次分析及心理学指标分析纯电动汽车动力总成,发现减速器、差速器噪声较电机更突出<sup>[1]</sup>。L. Humbert 等<sup>[2]</sup>基于磁固耦合数值模型发现电机切向电磁力会对减速器动态噪声特性产生影响。林巨广等<sup>[3]</sup>采用阶次分析方法分析减速器噪声并建立驱动电机的二维电磁仿真模型来分析计算电磁力,在分析电驱动总成贡献阶次基础上提出了一种优化方法并验证了其效果的显著性。李基芳等<sup>[4]</sup>通过音噪比对开关频率噪声进行了分析评价,发现改变控制器开关频率等措施对电驱动总成噪声有一定改善效果。一些学者利用十字形声阵列方法对电动汽车用电机系统噪声源进行了定位识别<sup>[5]</sup>。龚承启等<sup>[6]</sup>利用集成经验模态分析方法识别分析起动机噪声,确定了各独立分量与噪声源之间的对应关系。Wei 等<sup>[7]</sup>结合独立分量和小波变换的经验模态分析确定了电动客车动力总成的主要噪声源。

多激励耦合性、部分时变特性使系统动态响应呈现复杂的非平稳性特征,导致当前少有学者从噪声源分离的角度对集成式电驱动总成的振动噪声特性进行研究。本文基于占优特征值准则变分模态-鲁棒性独立分量分析(Ruled Variational Modal Decomposition - Robust Independent Component Analysis, RVMD-Robust-ICA)联合算法对某集成式电驱动总成单一通道噪声源进行分离,利用S变换(S Transform, ST)、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)方法对分量信号时频特性进行识别,采用二次残差(Vestigial Quadratic Mismatch, VQM)、相干性分析方法对各激励源贡献度进行定量分析。

## 2 基本理论

### 2.1 占优特征值约束的变分模态分解

由线性混合模型得到的观测信号可表示为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}(t)$ 为观测信号; $\mathbf{A}$ 为线性混合系统矩阵; $\mathbf{S}(t)$ 为源混合信号; $\mathbf{N}(t)$ 为噪声信号。

当 $\mathbf{N}(t)$ 为高斯白噪声时,将观测信号去均值化后对其协方差矩阵 $\mathbf{R}_x(t)$ 进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(t) &= \mathbf{A}E[\mathbf{S}(t) \cdot \mathbf{S}(t)^H] \mathbf{A}^H \\ &= [\mathbf{U} \ \mathbf{V}] \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_n \end{bmatrix} [\mathbf{U} \ \mathbf{V}]^T \\ &= \mathbf{U} \mathbf{A}_s \mathbf{U}^T + \mathbf{V} \mathbf{A}_n \mathbf{V}^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $E$ 为矩阵期望符; $H$ 为共轭转置符; $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{V}$ 为酉矩阵; $\mathbf{A}_s = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n)$ ,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n$ ;  $\mathbf{A}_n = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$ ,  $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \mu_3 \geq \dots \geq \mu_n$ ;  $n$ 为信号维数<sup>[8]</sup>。

相邻主特征值之比为:

$$\gamma_k = \lambda_k / \lambda_{k+1}, \quad k=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (3)$$

占优特征值所对应的分量信号能量远大于非占优特征值所对应分量信号能量,占优特征值与非占优特征值的分界处 $\gamma_{k+1}$ 相比 $\gamma_k$ 发生突变,则可知源混合信号的维数为 $(k+1)$ 。

基于上述约束条件,变分模态分解(Variational Modal Decomposition, VMD)引入最小均方误差准则、维纳滤波等方法对 $\mathbf{X}(t)$ 进行多次迭代,分解为若干个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量信号 $\mathbf{x}_k(t)$ <sup>[9]</sup>,对每个IMF分量信号进行希尔伯特(Hilbert)变换得到单边频谱解析信号:

$$H_k = [\delta(t) + j/(\pi t)] * \mathbf{x}_k(t) \quad (4)$$

式中, $j$ 为虚部单位; $*$ 为卷积符; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数。

通过 $L^2$ 范数对调制信号进行梯度计算,构造变分约束条件:

$$\begin{cases} \min_{\{\mathbf{x}_k(t) | \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial(t) \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * \mathbf{x}_k(t) e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k(t) = \mathbf{X}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\omega_k$ 为第 $k$ 层对应的中心频率; $k$ 为分解层数; $K$ 为最大分解层数; $\partial$ 为偏导符。

引入拉格朗日(Lagrange)乘子 $\lambda$ 和惩罚因子 $\alpha$ ,将待解决变分问题从约束性转变为非约束性。基于交替方向乘法对算法进行不断迭代更新,最终得到IMF分量、中心频率和拉格朗日乘子的最优解。

### 2.2 鲁棒性独立分量分析

鲁棒性独立分量分析(Robust Independent Component Analysis, RobustICA)是基于峭度对比函数和最优步长(Optimal Step Size)的一种独立分量分析算法<sup>[10]</sup>。该算法可以分解提取任意具有非零峭度的独立分量,不必假设源信号为亚高斯或超高斯等特定类型。

算法收敛性能在很大程度上受限于步长:

$$\mu_{\text{opt}} = \arg \max |k_{\text{un}}(\mathbf{w} + \mu \mathbf{g})| \quad (6)$$

式中, $\mu_{\text{opt}}$ 为最优步长; $k_{\text{un}}$ 为峭度; $\mathbf{w}$ 为分离向量; $\mu$ 为步长; $\mathbf{g}$ 为步长迭代优化的线性搜索方向。

归一化峭度对比函数 $k(w)$ 可由关于步长 $\mu$ 的四次多项式表示,再通过多项式的根确定全局最优步长。搜寻过程如下:

a. 基于峭度目标函数计算最优步长多项式系数:

$$\sum_{n=0}^4 a_n \mu^n = a_0 + a_1 \mu + a_2 \mu^2 + a_3 \mu^3 + a_4 \mu^4 \quad (7)$$

式中, $a_n$ 为多项式系数。

b. 在迭代方向上选择使峭度绝对值达到最大的根,从而获得最优步长:

$$\mu_{opt} = \operatorname{argmax} |k_{cur}(\mathbf{w} + \mu_n \mathbf{g})| \quad (8)$$

c. 更新分离向量:

$$\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}_n + \mu_{opt} \mathbf{g} \quad (9)$$

d. 归一化:

$$\mathbf{w}_{n+1}^N = \mathbf{w}_{n+1} / \|\mathbf{w}_{n+1}\| \quad (10)$$

e. 基于阈值条件判断是否满足收敛性,通过多次迭代得到分离矩阵 $\mathbf{W}$ 。

### 2.3 S变换

S变换是对短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)和连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)2种算法取长补短而得到的一种可逆时频分析方法。其窗函数是随频率变化形状而变的高斯窗函数,且其基函数不必满足容许性条件。

任一非平稳振动噪声时域信号 $\mathbf{X}(t)$ 的ST可表示为:

$$\begin{cases} S(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega(f, \tau - t) e^{-j2\pi f t} \mathbf{X}(t) dt \\ \omega(f, \tau - t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $t$ 为时间; $f$ 为频率; $\tau$ 为时域位移; $\omega(f, \tau - t)$ 为高斯窗函数。

### 2.4 相干性分析

随机非平稳时域信号 $\mathbf{Y}(t)$ 和 $\mathbf{Z}(t)$ 间的互相关函数为:

$$R_{ZY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{Z}(t) \mathbf{Y}(t + \tau) dt \quad (12)$$

式中, $T$ 为信号采样时间长度。

互相关函数经FFT得到互功率谱密度为:

$$S_{ZY}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ZY}(\tau) e^{-j f \tau} d\tau \quad (13)$$

基于负频率无实际应用意义,定义单边谱互功率谱密度函数为:

$$G_{ZY}(f) = 2S_{ZY}(f) \quad (14)$$

两个随机非平稳信号之间的常相干函数为:

$$\gamma_{ZY}^2(f) = \frac{|G_{ZY}(f)|^2}{G_{ZZ}(f)G_{YY}(f)} \quad (15)$$

式中, $G_{ZZ}(f)$ 、 $G_{YY}(f)$ 分别为 $\mathbf{Z}(t)$ 、 $\mathbf{Y}(t)$ 的单边谱自功率谱密

度函数。

## 3 联合算法模型建立及验证

VMD算法将振动噪声信号从自适应划分问题转变为构造变分问题,将信号分解为不同中心频率的本征模态函数。

本文通过分解结果观察VMD算法的性能。将模拟观测信号设计为5个不同的单频信号 $S_i(t)$ ( $i=1,2,3,4,5$ ),设 $\mathbf{N}(t)$ 为随机噪声,线性混合形成观测信号 $\mathbf{X}(t)$ :

$$\begin{aligned} S_1(t) &= 4 \sin(2\pi f_1 t), f_1 = 500 \text{ Hz} \\ S_2(t) &= \sin(2\pi f_2 t), f_2 = 2000 \text{ Hz} \\ S_3(t) &= 8 \sin(2\pi f_3 t), f_3 = 4000 \text{ Hz} \\ S_4(t) &= 2 \sin(2\pi f_4 t), f_4 = 6500 \text{ Hz} \\ S_5(t) &= \sin(2\pi f_5 t), f_5 = 10000 \text{ Hz} \\ \mathbf{X}(t) &= S_1(t) + S_2(t) + S_3(t) + S_4(t) + S_5(t) + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

设定采样频率 $F_s=51200$  Hz,时域特征如图1所示。

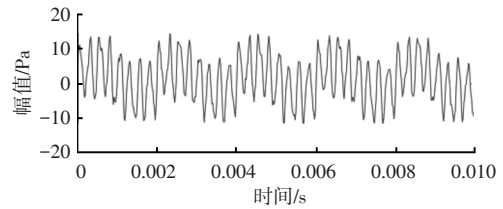
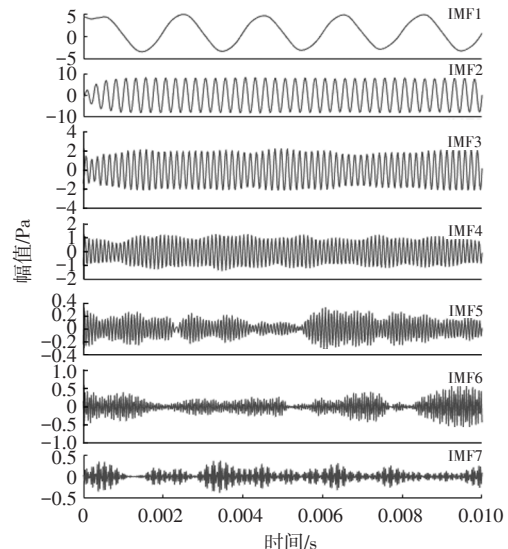


图1 观测信号 $\mathbf{X}(t)$ 时域特征

对VMD算法性能有影响的参数为:信号分解层数 $k$ 、惩罚因子 $\alpha$ 、中心频率分布形式参数 $i$ 、函数优化参数 $t_{op}$ 、收敛公差 $r$ ,以及IMF分量位置参数 $D$ 。其中影响程度最大的参数是 $k$ 和 $\alpha$ ,根据信号特性,经多次对比分析确定 $\alpha=10000$ ,将分解层数设定为非源混合信号维数,随机设定分解层数 $k=7$ 层时,模拟观测信号分解得到的各IMF分量时、频域特性如图2所示。



(a)时域特征

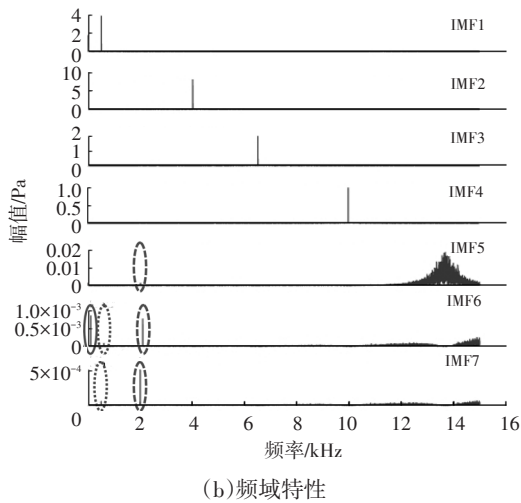


图2  $k=7$ 层时各IMF分量时域特征及频域特性

由图2可知,VMD算法的信号分解层数调整控制不合理时,IMF分量产生过分解导致模态出现混叠现象,且由于噪声造成算法性能下降,信号中部分能量丢失。

由于模拟观测信号的源混合信号维数已知,将分解层数设定为源混合信号维数,分解结果如图3所示。由图3可知,VMD算法在参数设定较为合理时,由于噪声信号的存在,分解结果依旧存在模态混叠及信号能量丢失现象。

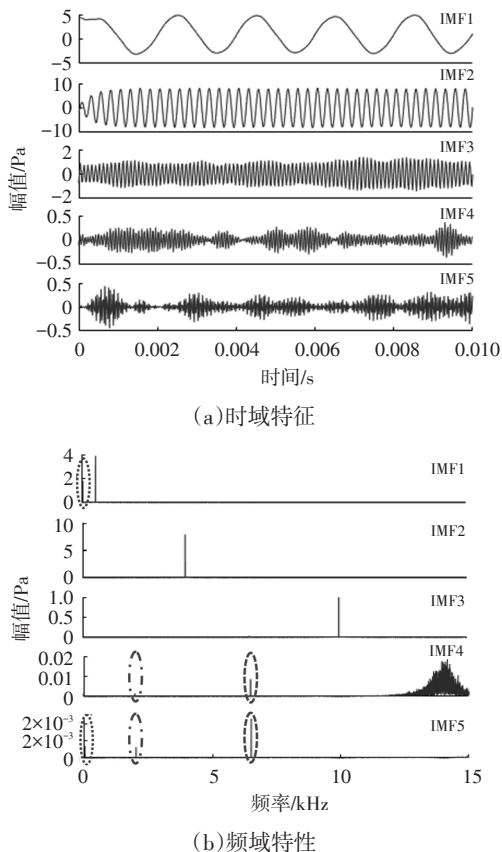


图3  $k=5$ 层时各IMF分量时域特征及频域特性

经上述对比验证发现,VMD算法分解信号时参数

信号分解层数 $k$ 对其性能影响权重极大,分解层数选择不当会导致信号产生欠分解或过分解,而惩罚因子选择不当会导致IMF分量带宽变动起伏较大,从而引发模态混叠现象。VMD算法的信号分解层数可人为控制,但是选择出最佳层数相当困难,基于此,引入占优特征值准则(Rule of Dominant Eigenvalues, RDE)对源混合信号子空间维数进行估计。现通过 $k$ 的不同取值对上述模拟观测信号 $X(t)$ 进行VMD分解,将各IMF分量重组建立混合矩阵,对混合矩阵进行SVD分解得到 $\gamma_k$ ,如表1所示。

表1 不同参数VMD分解 $\gamma_k$ 对比数据

主特征值比	$k=5$ 层	$k=6$ 层	$k=7$ 层	$k=8$ 层	$k=9$ 层	$k=10$ 层
$\gamma_1$	1.999 4	1.999 3	1.997 5	1.943 0	1.753 9	1.417 8
$\gamma_2$	2.000 5	2.717 2	2.000 4	2.000 4	2.629 1	2.001 1
$\gamma_3$	1.997 5	1.470 6	1.999 7	1.999 7	1.602 5	1.998 9
$\gamma_4$	1.001 2	1.001 1	1.157 3	1.255 9	1.256 1	1.601 4
$\gamma_5$		58.687 3	4.125 8	2.915 4	3.188 4	4.050 1
$\gamma_6$			5.692 3	1.935 8	6.638 1	3.032 8
$\gamma_7$				4.826 7	1.114 7	1.133 1
$\gamma_8$					1.418 9	1.669 5
$\gamma_9$						5.909 7

主特征值比变化趋势如图4所示,由图4可以看出:随着 $k$ 的调整,虽然 $\gamma_k$ 的取值也在变化,但每条趋势线均在 $\gamma_4$ 与 $\gamma_5$ 之间产生较大波动且均呈上升趋势,由此可验证RDE准则的可靠性。

电驱动总成在实际运转过程中,由于系统本身、运行工况及外界条件所引起的摩擦、碰撞、冲击造成其振动噪声信号呈非平稳特性<sup>[11]</sup>。信号的非平稳性导致占优特征值准则的变分模态(Ruled Variational Modal Decomposition, RVMD)在实际应用时依旧会产生模态混叠或假频问题。因此,将分解产生的IMF分量信号进行矩阵重构引入RobustICA算法进行再次分离,以降低模态混叠及假频现象出现的概率。联合算法模型流程如图5所示。

## 4 电驱动总成噪声试验

### 4.1 测试平台与测试系统

本文以某乘用车集中一体化电驱动总成作为研究对象,在动力传动系统半消声室内进行噪声试验。动力传动系统半消声室技术参数如表2所示。

在本文试验过程中,硬件设备采用LMS 48通道SCL220型数据采集前端、GRAS 46AE声学传感器、KISTLER 8763B050BB加速度传感器、B&K 4231声校准

器,噪声数据采集软件系统采用LMS Test.Lab 14A,如图6所示。

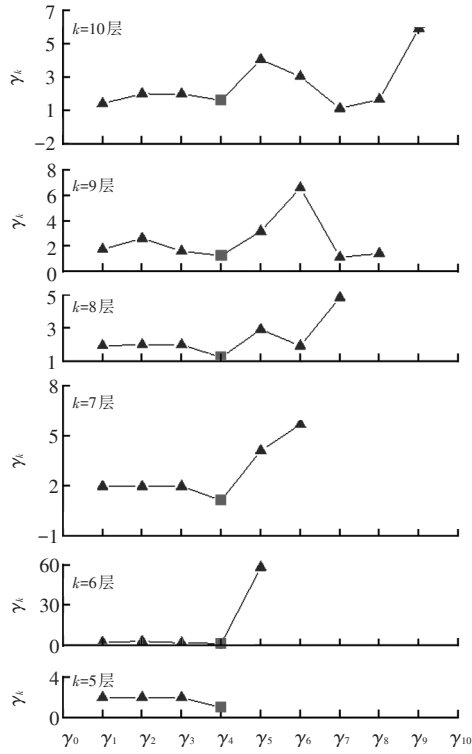


图4 不同VMD参数 $\gamma_k$ 变化趋势对比曲线

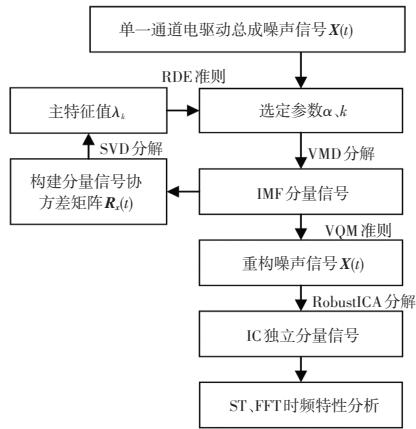


图5 联合算法模型流程

表2 动力传动半消声室技术参数

参数	取值	参数	取值
半消声室截止频率/Hz	50	负载额定扭矩/N·m	4 000
半消声室背景噪声/dB	16	负载最高转速/r·min <sup>-1</sup>	3 000
负载额定功率/kW	355		

#### 4.2 工况选取及测点布置

本文选取较为典型的稳态工况,在扭矩 180 N·m (6 000 r/min)下进行电驱动总成噪声特性分析。试验过程中,在如图7所示的与测试对象近声场外包围面距离 1 m的测量面上布置了4个声学传感器,用于采集电驱动总成近声场点噪声信号,采样频率设置为 25 600 Hz,频

率分辨率为 1 Hz。

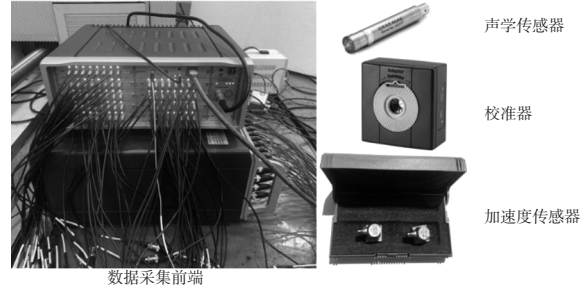


图6 数采前端及其他硬件设备

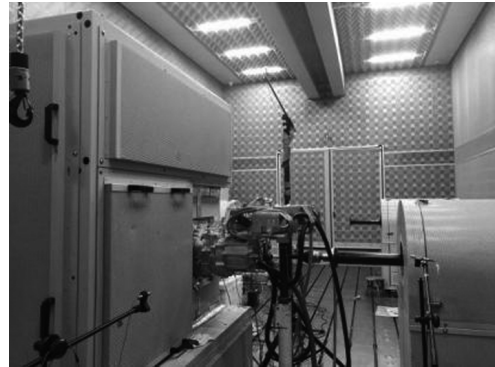


图7 声学传感器布置

如图8所示,在驱动电机上部、驱动电机端盖、驱动输入轴、减速中间轴、驱动输出轴、减速器下部等测点布置三向振动加速度传感器,带宽设置为 12 800 Hz,分辨率为 1 Hz。坐标系以电驱动总成到驱动电机端为正 Y 方向,垂直地面向上为正 Z 方向,正 X 方向根据右手定则确定。

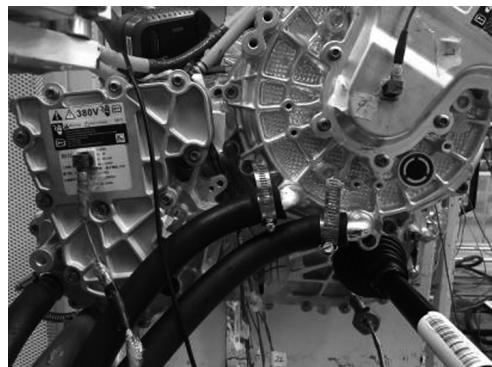


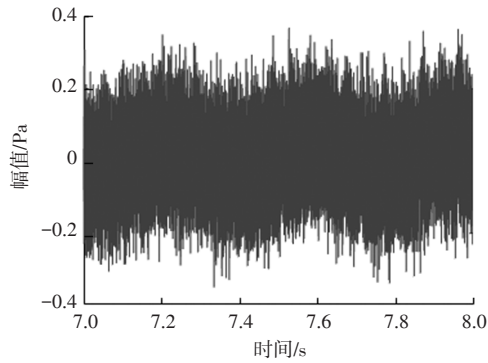
图8 振动加速度传感器布置

### 5 电驱动总成噪声源分离及识别

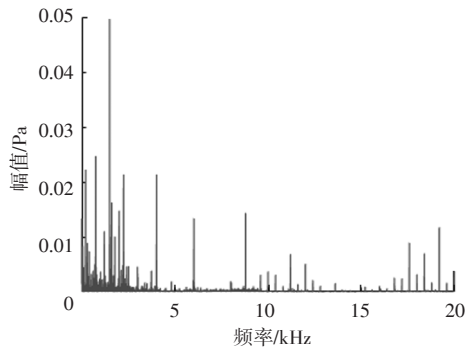
试验获取的时域信号长度为 13 s,随机选取第7~8 s 内近声场测点声学传感器所获取的噪声信号数据进行噪声特性分析。电驱动总成单一通道噪声信号时域特征和频域特性如图9所示。

首先,对数据采集前端采集到的单一通道电驱动总成噪声信号  $X(t)$  进行 VMD 分解,以  $\alpha=2 000$ 、 $k=5$  层作为

初始参数,分解结束后得到各IMF分量信号。将各本征模态函数重组后求信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_x(t)$ ,对其进行SVD分解后得到各分量所对应的主特征值,利用RDE准则寻求占优特征值与非占优特征值之间的分界点。依次改变VMD算法参数赋值并进行反复分解评定,最终确定 $\alpha=3\ 000$ 、 $k=14$ 层。



(a)时域特征



(b)频域特性

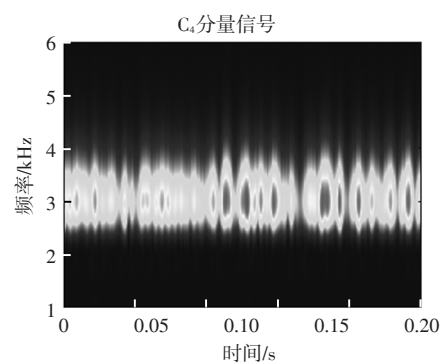
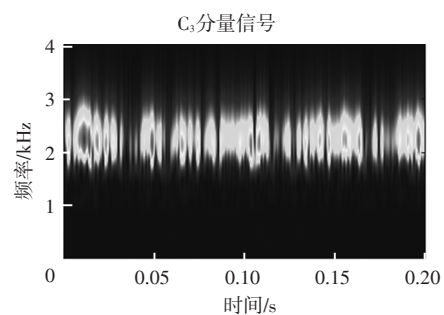
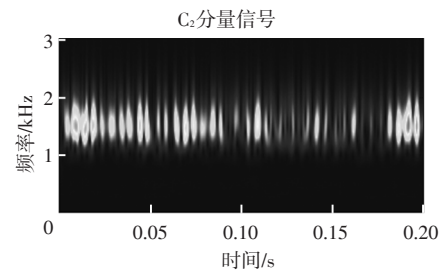
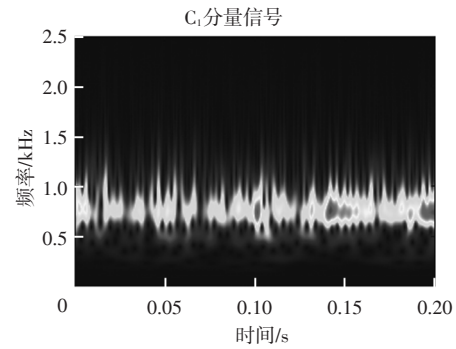
图9 单一通道噪声信号时域特征及频域特性

由图9b可以看出,15 000 Hz以上频率信号能量较小,且本文电驱动总成中驱动电机控制器开关频率为10 000 Hz。因此,剔除15 000 Hz以上的IMF信号分量后将其余分量进行重构,得到混合重构观测信号矩阵 $\mathbf{X}_x(t)$ 。利用RobustICA算法对重构矩阵再次进行迭代分解,经解耦得到电驱动总成噪声信号的各独立分量。最后,利用ST和FFT方法对各分量进行时频特性分析识别。

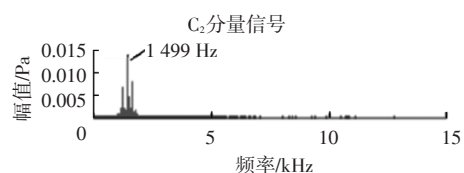
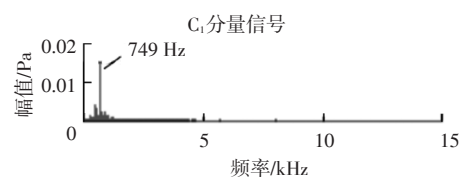
如图10所示, $C_i(i=1,2,3,4)$ 分量信号的主要频率成分分别为749 Hz、1 499 Hz、2 244 Hz、2 991 Hz。

在制造或装配过程中,轮齿的齿廓之间会存在一定偏差,由此产生的位移激励引起齿轮振动、受载变形及各种误差导致轮齿啮合交替过程中产生瞬时啮合冲击。在变工况、变载荷、交替应力等条件下,其传动轴会因不断承受大载荷、长时间的不稳定冲击影响发生故障,而受制造工艺误差与装配精度等限制,传动轴通常存在不对中、不平衡等现象。此时,传动轴的振动噪声特性表现在齿轮上,信号特征频率与转轴频率、啮合频

率及其倍频相关。



(a)时频特性



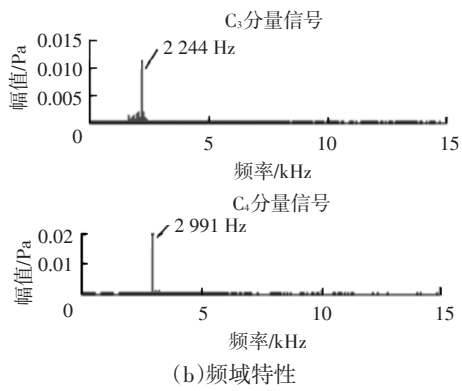


图10  $C_i(i=1,2,3,4)$ 分量信号时频域特性

减速器一级主动齿轮齿数为20,从动齿轮齿数为51;减速器二级主动齿轮齿数为19,从动齿轮齿数为72。可知 $C_1 \sim C_4$ 为减速器二级齿轮副啮合频率及其倍频 $h \cdot f_z (h=1,2,3,4)$ 。4个分量信号均由二级齿副啮合振动引起,对其混合矩阵信号与电驱动总成各测点振动信号进行相干分析。如图11所示,对计算结果对比筛选发现:输出轴+Y向振动信号与混合信号相干系数最大,进而可将 $C_1 \sim C_4$ 分量信号与输出轴+Y向振动信号对应。

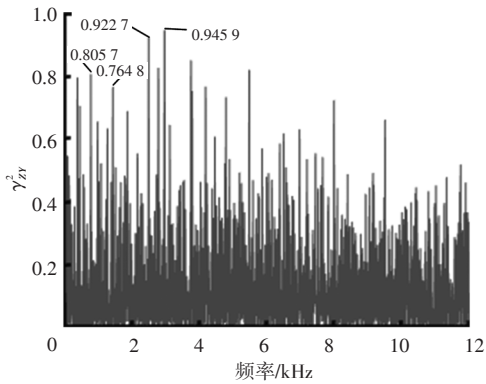


图11 混合信号与输出轴+Y向振动信号相干性

如图12所示, $C_5$ 分量信号的频率成分主要集中在6018 Hz处。由上述齿轮啮合振动噪声相关理论,可知 $C_5$ 为减速器一级齿轮副啮合频率的3倍频。

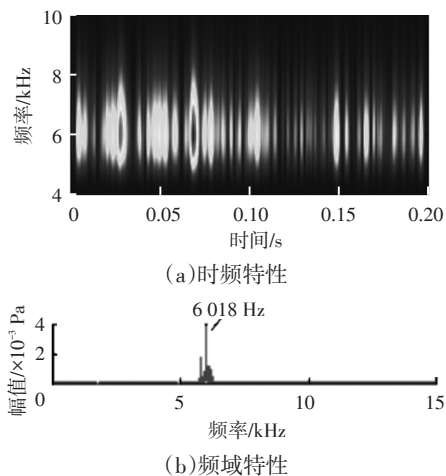


图12  $C_5$ 分量信号时频特性

对一级齿副啮合频率相关的独立分量混合信号与各测点振动信号进行相干分析。如图13所示,筛选计算结果发现,中间轴-Y向振动信号与混合信号相干性最强,可将 $C_5$ 分量信号与中间轴-Y向振动信号对应。

如图14所示, $C_i (i=6,7)$ 分量信号的主要频率分布在2409 Hz、3212 Hz处。

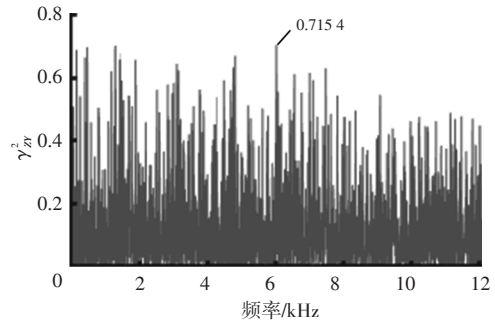
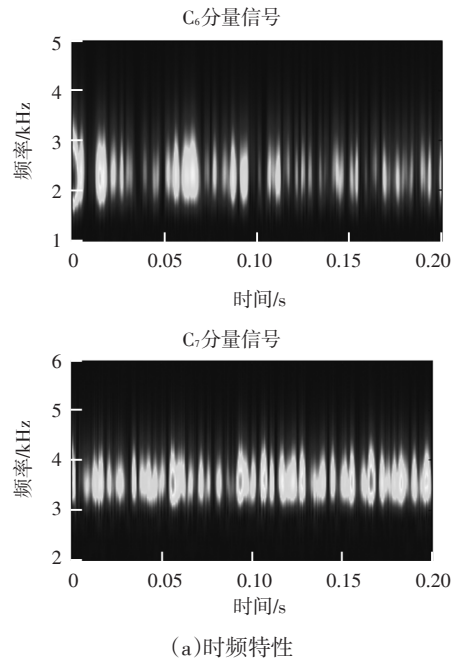
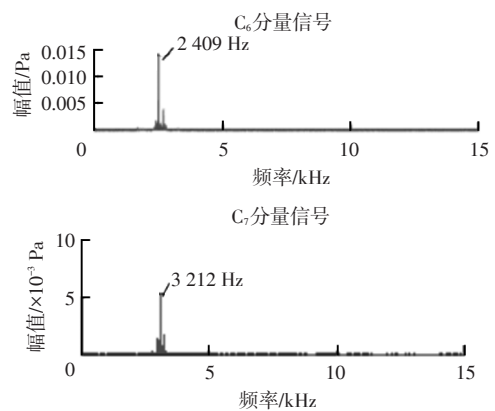


图13  $C_5$ 与中间轴-Y向振动信号相干性



(a)时频特性



(b)频域特性

图14  $C_i(i=6,7)$ 分量信号时频域特性

电磁噪声是车用永磁同步驱动电机噪声的主要成分,由定、转子气隙磁场产生的电磁交变力作用于定子表面引起<sup>[12]</sup>。其中电磁切向分量对电机振动噪声影响较小,通常忽略不计且仅考虑径向电磁分量的作用。就电动汽车用整数槽永磁同步驱动电机而言,电磁噪声主要由定、转子高次谐波的相互作用引起。

本文的研究对象电驱动总成所用驱动电机为8极48槽永磁同步电机,由上述电磁噪声理论可知,C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>是电机径向电磁力波引起的电磁噪声。对分量混合信号与各测点振动信号作相干性分析,如图15所示,对比筛选计算结果发现,驱动电机端盖-Y向振动信号与混合信号相干性最好。

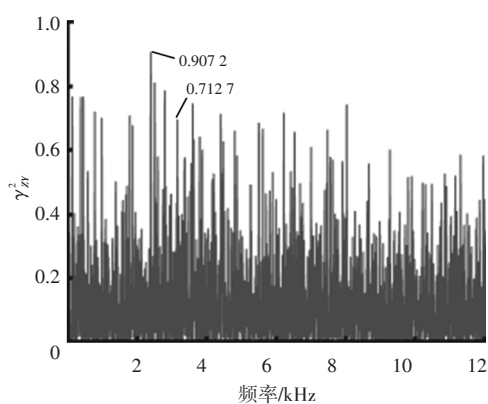


图15 混合信号与电机端盖-Y向振动信号相干性

电驱动总成中所用驱动电机控制器开关频率通常为固定不变的常数,输出电流中会引入较多谐波<sup>[13]</sup>,而影响较明显的电流谐波主要分布在一、二倍开关频率处。如图16所示,由上述理论可知,C<sub>8</sub>分量信号的主要频率是 $f_s=10\ 000\ \text{Hz}$ 。

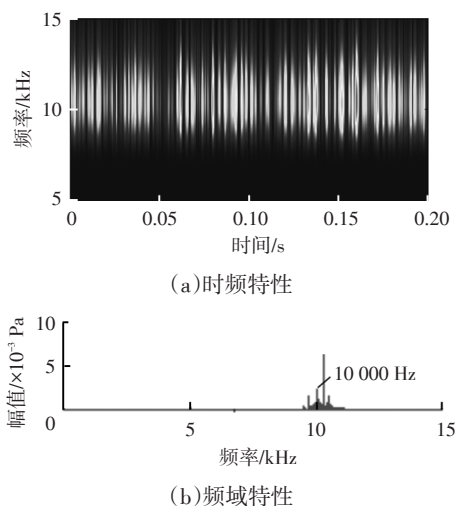


图16 C<sub>8</sub>分量信号时频特性

对开关频率及其倍频混合信号与各测点振动信号进行相干性分析。如图17所示,发现驱动电机上部+Z向振动信号与混合信号相干性最好。

向振动信号与混合信号相干性最好。

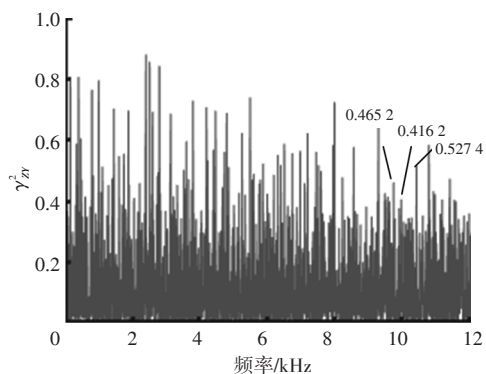


图17 C<sub>8</sub>分量与驱动电机上部+Z向振动信号相干性

如图18所示,C<sub>9</sub>分量信号的主要频率为4 017 Hz。由上述齿轮副啮合振动噪声和电机电磁噪声相关理论可知,C<sub>9</sub>是时频重叠信号,既可以是减速器一级齿轮副啮合噪声,也可以是驱动电机电磁噪声。

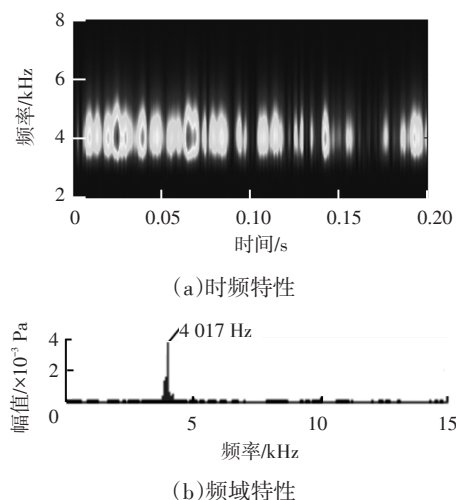
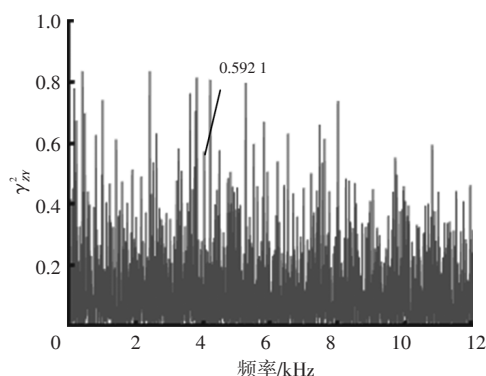
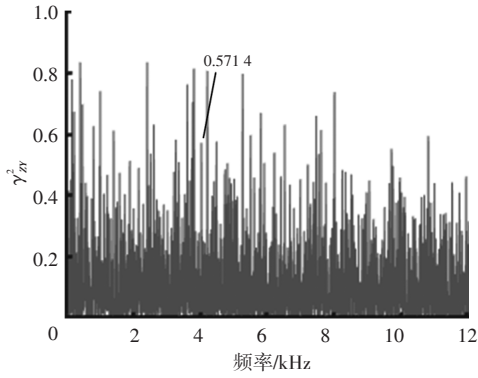


图18 C<sub>9</sub>分量信号时频特性

对分量信号与各测点振动信号进行相干性分析,观察图19计算结果发现,C<sub>9</sub>与中间轴-X向振动信号、驱动电机端盖+X向振动信号的相干系数均大于0.5。其中,C<sub>9</sub>与中间轴-X向振动信号的相干性大于C<sub>9</sub>与驱动电机端盖+X向振动信号的相干性。



(a)C<sub>9</sub>分量与中间轴-X向振动信号相干性



(b) C<sub>0</sub>分量与驱动电机端盖+X向振动信号相干性

图19 C<sub>0</sub>分量与中间轴和电机端盖振动信号相干性

本文基于VQM性能评价准则判定电驱动总成噪声信号与各分量信号之间的波形误差度,VQM越小,表明算法分离效果越好,分量信号波形误差度越小。其表达式为:

$$V = 10 \lg \left\{ \frac{E \left\{ \left[ s_i(t) - \frac{E \{ s_i(t) S(t) \}}{E \{ S^2(t) \}} \cdot S(t) \right]^2 \right\}}{E \left\{ \left[ \frac{E \{ s_i(t) S(t) \}}{E \{ S^2(t) \}} \cdot S(t) \right]^2 \right\}} \right\} \quad (17)$$

式中,S(t)为源混合信号;s<sub>i</sub>(t)为分量信号。

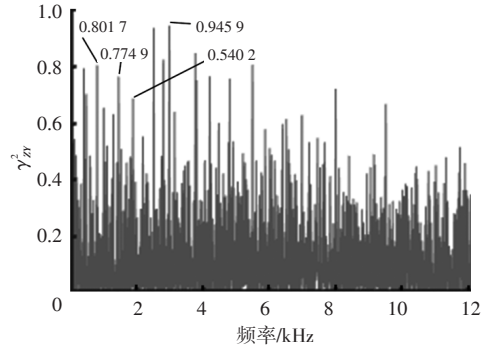
对各IC分量信号与电驱动总成噪声源噪声信号之间的波形误差度进行计算,结果如表3所示。由表3可知,电驱动总成噪声信号中减速器二级齿轮副啮合噪声信号误差度最小,驱动电机电磁噪声信号次之。

表3 各分量信号VQM

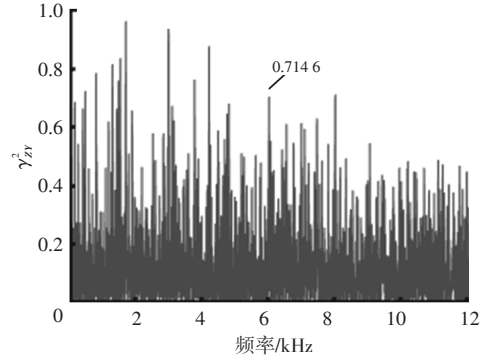
噪声信号	分量信号主频/Hz	VQM
减速器二级齿轮副啮合噪声信号	749	-0.219 0
	1 499	-0.263 7
	2 244	-0.108 6
	2 991	-0.177 0
驱动电机电磁噪声信号	2 409	-0.155 2
	3 212	-0.094 3
减速器一级齿轮副啮合噪声信号	6 018	-0.054 6
开关频率噪声信号	10 291	-0.045 1
时频重叠噪声信号	4 017	-0.029 4

本文在VQM准则判定基础上,建立单输入单输出线性系统。以振动信号作为系统输入,噪声信号作为系统输出,对算法分离后的各分量信号对应的振动信号与单一通道电驱动总成噪声源信号进行相干分析,结果如图20所示。由图20可知,减速器二级齿轮副啮合振动噪声对电驱动总成噪声贡献度最大,其中2 991 Hz单频相干性达到0.945 9。

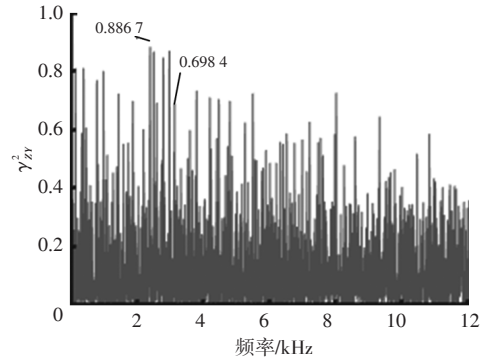
2023年 第5期



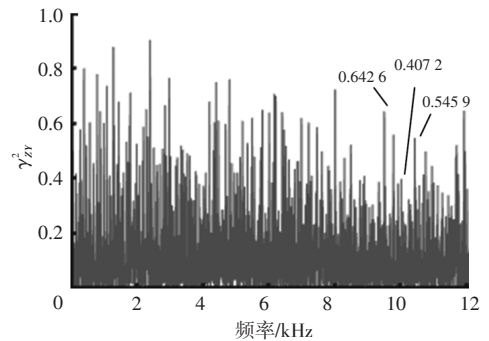
(a)输出轴+Y向振动信号与噪声信号相干性



(b)中间轴-Y向振动信号与噪声信号相干性



(c)电机端盖-Y向振动信号与噪声信号相干性



(d)驱动电机上部+Z向振动信号与噪声信号相干性

图20 各振动信号与噪声信号相干性

## 6 结束语

本文通过一系列仿真模拟对比研究及电驱动总成测试信号的分析验证,得出以下结论:

- a. 基于RDE对电驱动总成单一通道噪声子空间

维数进行估计,为VMD算法参数设定提供导向性条件约束,可避免分解层数不当所引起的模态混叠现象。

b. 在参数设定较合理的前提下,VMD算法性能受噪声影响依旧会产生模态混叠现象,与RobustICA算法联合应用使算法稳定性更好且性能得到进一步提升。

c. 利用ST、FFT方法对各分量信号进行时频特性识别可看出,ST方法对电驱动总成噪声信号有优良的时频特性识别能力。

d. 在利用VQM对各分量信号波形误差度评定基础上,采用相干分析方法将分量信号与电驱动总成各测点振动信号对应,并与单一通道电驱动总成噪声信号建立单输入单输出线性系统,可知在对应工况下,减速器二级齿轮副啮合振动噪声对电驱动总成噪声贡献度最大,驱动电机电磁噪声贡献度次之。

e. 以时频重叠分量信号作为系统输入,电驱动总成各测点振动信号作为系统输出并进行相干性分析,结果表明,时频重叠分量信号由减速器和驱动电机共同作用产生,且减速器一级齿副啮合噪声贡献度大于驱动电机电磁噪声贡献度。

#### 参 考 文 献

- [1] 于蓬,陈霏霏,章桐,等.集中驱动式纯电动车动力总成噪声特性分析[J].机电一体化,2015,21(1):7-12+56.  
YU P, CHEN F F, ZHANG T, et al. Acoustic Characteristic Analysis of Central Driven Power Train of Electric Vehicle [J]. Mechatronics, 2015, 21(1): 7-12+56.
- [2] LOUIS H, PELLERAY P, CRISTAUDO S. Electromagnetic and Structural Coupled Simulation to Investigate NVH Behavior of an Electrical Automotive Powertrain[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2012, 1(2): 395-404.
- [3] 林巨广,谢涛辉.电动汽车动力总成噪声分析与优化[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(8):1009-1014+1044.  
LIN J G, XIE T H. Noise Analysis and Optimization of Electric Automobile Powertrain[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(8): 1009-1014+1044.
- [4] 李基芳,付玉成,孙守富,等.控制器开关频率对电驱动总成噪声影响研究[J].汽车电器,2021(6):48-51.  
LI J F, FU Y C, SUN S F, et al. Research on Influence of Switching Frequency on the Noise of Electric Powertrain[J]. Auto Electric Parts, 2021(6): 48-51.
- [5] 张承宁,王再宙,宋强.基于传声器阵列电动汽车用电机系统噪声源识别研究[J].中国电机工程学报,2008(30):109-112.  
ZHANG C N, WANG Z Z, SONG Q. Research of Noise Source Identification of Traction Motor System for Electric Vehicle Based on Microphone Array[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(30): 109-112.
- [6] 龚承启,华春蓉.基于EEMD-Fast ICA-STFT的车用启动电机噪声源识别[J].噪声与振动控制,2017,37(5):92-96+114.  
GONG C Q, HUA C R. Noise Source Identification of Vehicle's Starting Motors Based on EEMD-Fast ICA-STFT Approach[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(5): 92-96+114.
- [7] WEI C Y, YU H Z N, WANG J G, et al. Noise Source Identification of the Electric Bus Powertrain Using a Wavelet Transform and EEMD-RobustICA[C]//WCX SAE World Congress Experience. Detroit, Michigan, USA: SAE, 2019.
- [8] ISHIBASHI T, INOUE K, GOTANDA H, et al. Studies on Estimation of the Sources Number in Blind Source Separation Problems[C]//2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea: IEEE, 2006: 5169-5174.
- [9] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational Mode Decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [10] ZARZOSO V, COMON P. Robust Independent Component Analysis by Iterative Maximization of the Kurtosis Contrast With Algebraic Optimal Step Size[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(2): 248-261.
- [11] 方源,章桐,于蓬,等.电动车动力总成内部激励的研究分析[J].振动、测试与诊断,2014,34(3):496-502+591.  
FANG Y, ZHANG T, YU P, et al. Research and Analysis of the Internal Excitations of Electric Powertrain[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 496-502+591.
- [12] 骆开军,林曦鹏,陈海生,等.电动车用永磁同步电机定子铁心固有频率研究[J].汽车技术,2021(1):31-36.  
LUO K J, LIN X P, CHEN H S, et al. Research on Natural Frequency of Stator Core of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle[J]. Automobile Technology, 2021(1): 31-36.
- [13] 于莫岩,刘茜,陈勇,等.变频器供电的电动客车永磁电机高频噪声研究[J].计算机仿真,2019,36(7):120-125.  
YU M Y, LIU Q, CHEN Y, et al. Study of High Frequency Noise of PMSM in Electric Bus Powered by Inverter[J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 120-125.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2022年5月11日。