

某型组合动力装置振动数据的 Hankel-SVD 去噪处理与分析

刘马龙,程卫国,宋利剑

(中国航空研究院 609 研究所,江苏 南京 211100)

摘 要:以某型飞行器组合动力装置实际飞行试验的振动数据为基础,通过构造 Hankel 矩阵,利用奇异值分解数据处理方法对振动数据进行去噪处理,再结合产品实际结构原理,精确地分析组合动力装置模式转换前、中、后 3 个不同状态振动量级的差异,同时对比飞行高度的变化对齿轮箱振动响应的影响,找出组合动力装置齿轮箱传动轴易受振动冲击的薄弱点,为后续多动力源输入高速齿轮箱的结构优化、避免其组合动力装置的共振现象、实现平稳模式转换提供技术支持。

关键词:飞行器;Hankel 矩阵;SVD 分解;信号去噪;振动数据处理;齿轮箱

中图分类号:V275 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0152-04

Signal De-noising and Analysis of Vibration Test Data of Integrated Power Unit Based on SVD and Hankel Matrix

LIU Malong, CHENG Weiguo, SONG Lijian

(609 Research Institute, China Aviation Academy, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on the vibration data of a certain type of aircraft combined power plant flight test, the singular value decomposition data processing method was used to denoise the vibration data, through the construction of Hankel matrix. Combined with the actual structure principle of the product, the vibration magnitude difference of three different states of before, during and after the mode transformation of the combined power plant was analyzed accurately, and meanwhile by comparing the influence of the change of flight height on the vibration response of the gearbox, the weak points of gearbox with multi power input were located, leading to optimizing stable mode conversion of the combined power unit and avoiding resonance phenomenon.

Keywords: aircraft; Hankel matrix; SVD; signal de-noising; vibration data processing; gearbox

0 引言

高速齿轮箱以其传动效率高、承载力强而广泛应用于多种航空飞行器中。某型组合动力装置采用了双涡轮动力源(简称动力源I和动力源II)驱动同一个共用高速齿轮箱来输出功率,以满足不同飞行条件下的功率输出需要。齿轮箱上安装有 1 台发电机和 1 台液压泵,用于输出电、液能源。

组合动力装置根据工作包线和飞行姿态的限制,有两种独立的工作模式:涡轮动力源 I 和涡轮动力源 II 工作模式。两种工作模式间在保持齿轮箱输出功率不变的条件下才可进行无缝转换,从而保证各种飞行工况下输出功率的连续性。在模式转换过程中如何避免产生共振,实现可靠切换是其中关键技术。

为避免共振产生的不利因素,保证齿轮箱在两种动力源切换中都能可靠工作,本文对组合动力装置在飞机不同振动环境下的实测振动数据进行分析,结合组合动力装置的结构动力学特性及工作状态下的动力传动特性,研究其外部载荷(特别是高马赫和跨音速区)环境变化与组合动力装置模式转换之间的关联特性及影响,从而找到齿轮箱双动力源传动齿轮系设计的薄弱环节和最易发生故障的隐患部位,保证产品性能可靠。因采集到的信号数据往往

具有某种混沌行为特征,其频谱散布于整个频率空间,使用传统的 FFT 和小波变换都很难将有用信号和噪声频谱严格区分开来^[1]。另外,传统的去噪方法在去噪的同时容易将原始信号中的一些突变细节去除掉^[2-3],并且不易于硬件实现,去噪的阈值也无法准确选择。基于此,本文采用了基于特征均值的 SVD^[4]信号去噪算法。

1 振动数据的 Hankel-SVD 去噪分析方法

本文提出基于峰值或能量的 Hankel 奇异特征分解方法,实现测试数据的去噪、独立分量分解与分量对应频率分析。目的是分析不同运行状态下,齿轮箱传动轴在组合动力装置模式转换前、转换过程中、模式转换后瞬间的信号特征及变化。

1.1 矩阵的奇异值及奇异值分解(SVD)定理

A 矩阵的秩为 $r(r \leq n)$,则存在 n 阶正交阵 V 和 m 阶正交阵 U ,满足:

$$U^T A V = \Sigma$$

式中: Σ 为 $m \times n$ 的非负对角阵;

$$\Sigma = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ 称为 A 的奇异值。上式可看作是用两个正交矩阵分别对 A 作变换,变换的结果得到对角阵 Σ 。

对该式进行等效变换就可得到矩阵 A 的奇异值分解形式为^[5-6]

$$A = U \Sigma V^T$$

1.2 Hankel 矩阵

Hankel 矩阵是一类特殊构成的矩阵。该型矩阵在数值分析、优化理论、系统辨识等众多领域具有广泛的应用^[7-8]。设离散数字序列 $x(i)$ 的长度为 N , 即 $i=1, 2, \dots, N$, 由 $x(i)$ 构造的 Hankel 矩阵具有如下形式:

$$A_{\text{Hankel}} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(n) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(m) & x(m+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}$$

式中: m, n 和 N 具有 $m+n-1=N$ 的关系。矩阵中的各行是由序列 $x(i)$ 左移一个元素而形成的, 每一行和前一有 $n-1$ 个元素是相同的, 各行之间存在很大的相关性。

1.3 基于 Hankel 矩阵奇异值分解的信号去噪方法及处理流程

对一个观察信号 $x(n)$, 设其中含有真正的信号 $s(n)$, 并含有噪声 $u(n)$, 则 $x(n)$ 可表示为

$$x(n) = s(n) + u(n)$$

将 SVD 用于去除观察信号 $x(n)$ 中含有的噪声, 需要对 $x(n)$ 进行重新组织, 形成矩阵 A 。若 A 是由信号和噪声共同组成的矩阵, 那么矩阵 A 的奇异值 $\sigma_1, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_r$ 可以反映信号和噪声能力集中的情况。如果将 $\sigma_1, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_r$ 递减排序, 即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_i \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0$, 那么, 前 i 个较大的奇异值主要反映信号, 较小的奇异值 $\sigma_{i+1}, \dots, \sigma_r$ 则主要反映噪声, 把这部分反映噪声的奇异值置 0, 就可以去除信号中的噪声。

设观测信号 $x(n)$ 的长度为 N , 即 $n=0, 1, \dots, N-1$, 由 $x(n)$ 可以构造矩阵:

$$X_1 = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \cdots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \cdots & x(M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(K-1) & x(K) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix}$$

对该 Hankel 矩阵 X_1 作 SVD, 将较小的特征值置 0, 最后进行 SVD 反变换, 可重建出去噪后的信号。在 SVD 重建过程中, 常用方法是将特征值突然变小的那些部分置 0。因此, 一般在实验中, 可以令小于所有特征值均值的那些特征值为 0, 也可以令小于所有特征值中值的那些特征值为 0。在本文中, 采用的是均值法置 0, 最后通过 SVD 反变换获得去噪后的信号。

1.4 去噪效果验证

为检验基于 Hankel 矩阵奇异值分解信号去噪方法的

有效性, 下面选取了一组飞行试验数据进行验证, 采样频率 5 kHz, 取数据 7×10^4 点, 分为 7 段, 每段 1×10^4 点, 采样时长 2 s, 构造的 Hankel 矩阵 A 为 $7 \times 7 \times 10^8$ 阶, 取其中的第 4 段为例进行分析。其时域波形和频谱如图 1、图 2 所示。

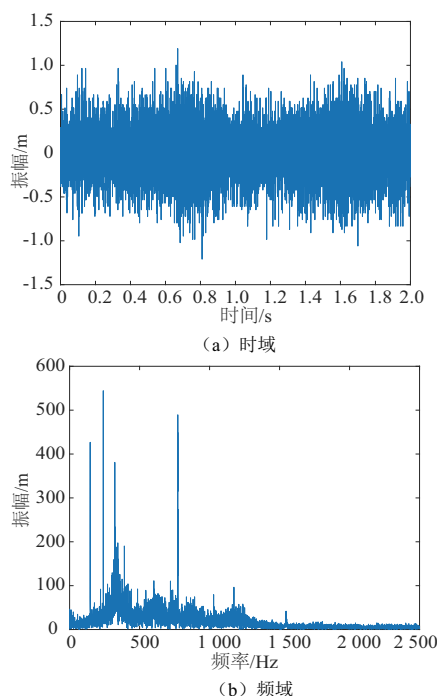


图 1 原始信号

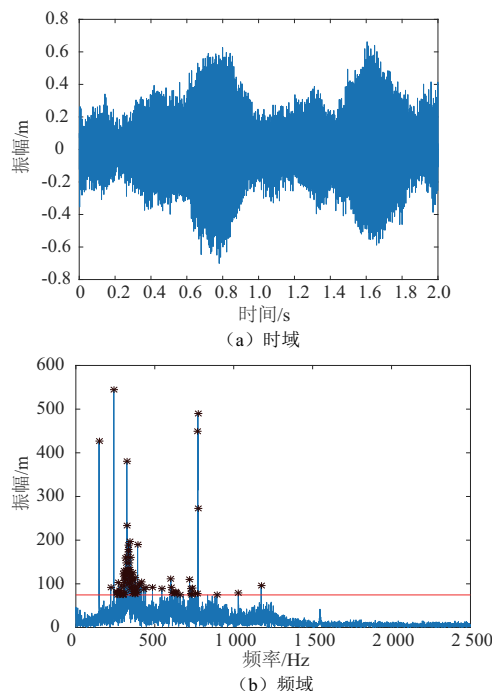


图 2 去噪后信号

从图 1(a) 中可以发现信号噪声大, 组成比较复杂, 利用傅里叶变换得到的频谱如图 1(b) 所示。将图 1 的含噪测量数据构成的 Hankel 矩阵进行 SVD, 得到的奇异值序列中反映真实信号的奇异值较大, 反映噪声的奇异值较小。将反映噪声的奇异值置 0, 再重构矩阵, 结果对应的频谱如图 2(a) 和图 2(b) 所示。按照信号占总能量的百

分比选取 74.6 mm 以上的峰值点予以保留,其选取结果如图 2(b)所示,共选取得到 92 个数据点位,92 个峰值。对比结果得到,去噪处理后大部分需要保留的峰值特征得到保留,频谱中的频移特性也被保留,因此采用本文方法确定奇异值阈值重构信号滤除噪声的效果很好。

2 某型组合动力装置的振动数据去噪处理及振动分析

2.1 组合动力装置测点布置

为便于采集数据,本次试验设置 6 个传感器测点,每个测点记录 3 个方向(航向、侧向、垂向)的数据,共计 18 个 channel(通道)。6 个传感器分别为:机舱左后安装节(传感器 1)、组合动力装置左后安装节(传感器 2)、机舱右前安装节(传感器 3)、组合动力装置右前安装节(传感器 4)、齿轮箱顶部(传感器 5)、机舱左前安装节(传感器 6)。如图 3 所示。

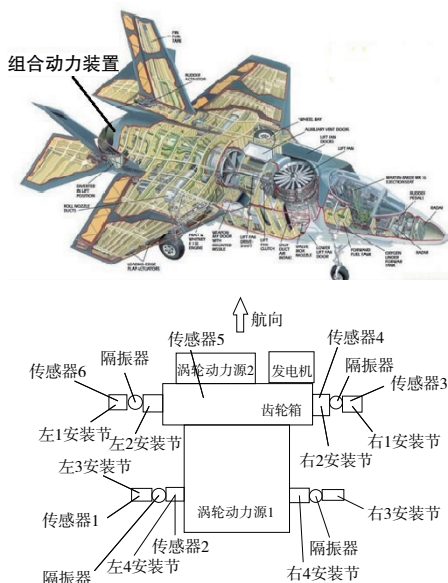


图 3 飞行试验组合动力装置位置及测点分布

2.2 飞行测试实验介绍

组合动力装置在空中飞行时,根据工作包线和飞行姿态的限制,有两种不同的工作模式:涡轮动力源 II 工作模式和涡轮动力源 I 工作模式,模式可转换。

空中飞行时,在涡轮动力源 II 起动包线和工作姿态范围外,当接到起动指令,系统打开动力源 I 的起动机开始起动,当其接近最大转速并进入稳定工作阶段后,驱动发电机和液压泵发出应急功率,同时带动动力源 II 在接近一半的转速上下转动。此时,系统在动力源 I 模式下工作。

当进入动力源 II 起动包线和工作姿态范围内,动力源 II 点火并加速,在无负载情况下起动。当其转速接近最大时,关闭动力源 I 的燃气发生分系统并停止其工作,动力源 II 接替动力源 I 驱动发电机和液压泵发出应急功率,并继续加速到最大转速,进入稳态工作阶段,系统转入动力源 II 模式工作。

上述过程中,在动力源 II 完成起动前均存在两个动力驱动的转换过程。实验在组合动力装置齿轮箱的传动链上设置了离合器,分别用来实现动力源 I 驱动动力源 II、动力源 I 驱动附件和动力源 II 驱动附件的转换。本次研究针对涡轮动力源 I 和 II 的工作模式转换进行 6 次空中起动试验:分别按 3 km、7 km、8 km、10 km 模式转换,均转换成功。模式转换时工作包线均为 1 Ma 以内。

2.3 振动数据特征与分析

根据 6 次飞行测试数据,分析组合动力装置在模式转换前、中、后 3 个不同状态的振动情况。为定量分析各组数据之间的振动差异,对各组数据进行分析时,选取相同模式转换状态的涡轮动力源 II 转速一致。模式转换前,统一选取动力源 II 转频为 (600.6 ± 4.6) Hz、时间点为 38.8 s 的工作状态进行分析(4.6 Hz 为切片谱最小频率分辨率)。模式转换中,统一选取动力源 II 转频为 (673.8 ± 4.6) Hz 的工作状态进行分析,时间点为 40.7 s。模式转换后,统一选取动力源 II 转频为 (590.8 ± 4.6) Hz,时间点为 42.8 s。

下面以在涡轮动力源 II 的工作包线内,飞行高度 10 km,飞行马赫数 $< 1 Ma$ 时进行模式转换的数据为例进行分析。其中 channel 18 机舱的左前安装节航向(传感器 6)采集的信号经过时频转换后的数据图如图 4、图 5 所示。

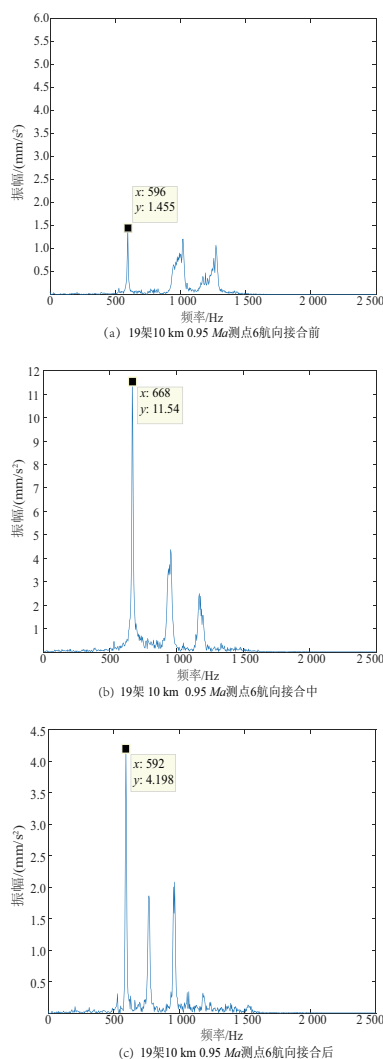


图 4 10 km 模式转换航向测试原始数据

对比图 4、图 5 去噪前后的航向测试信号发现,去噪后可十分便捷地对其中一个频率峰值的信号进行特征分析,确定其分量形式和大小,从而得到各个特征的时域波形和频谱特征,和涡轮动力源 II 系统的结构、运行特征相对应。

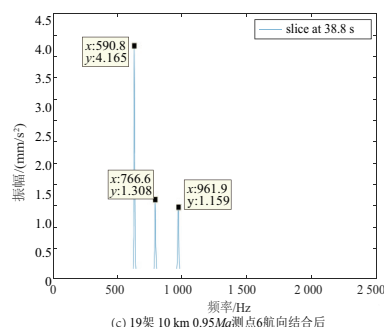
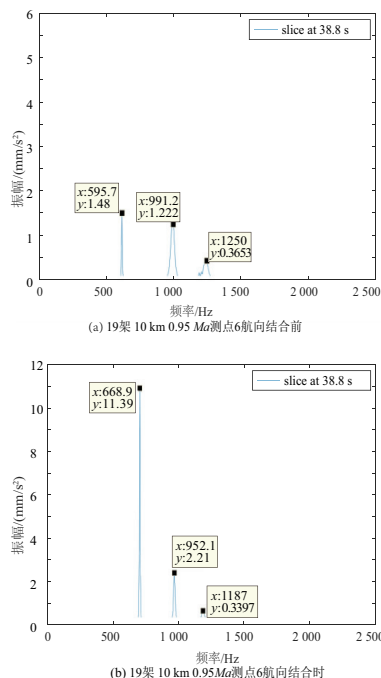


图 5 去噪后 10 km 模式转换航向测试数据

设计时涡轮动力源 I 传动轴(以下简称 I 号轴)的转速可计算其频率为 1217 Hz,同理涡轮动力源 II 传动轴(以下简称 II 号轴)频率为 750 Hz。液压泵内含 9 个柱塞,每个为 110 Hz,经计算后得液压脉动频率为 990 Hz。以去噪后的飞行航向通道的测试数据为例,传感器 6 显示 3 个状态切片谱中均以 II 号轴的转频、液压脉动 I 号轴转频为主。如图中模式转换前、中、后分别出现 1250 Hz、1187 Hz、961.9 Hz 的频率,均为 I 号轴转频(3 次实验转速不同)。

由数据分析可得,相同测点位置,模式转换中各频率成分的振动幅值最大,其次是模式转换后,模式转换前振动幅值最小。测试谱中包含的 II 号轴转频最多,其是所受振动最大的,也是最容易出现振动冲击断裂的,是齿轮箱关注的重点和薄弱点。因此针对 II 号轴进行振动幅值对比分析,对模式转换前、中、后各测点的 II 号轴振幅差别有一个直观的认识,如表 1 所示。

表 1 0.8 Ma 下涡轮动力源 II 传动轴振动幅值对比

航向数据		结合前幅值			结合中幅值			结合后幅值		
测点—通道		0.8Ma	启动	启动相对于 0.8Ma的幅 值增量(±%)	0.8Ma	启动	启动相对于 0.8Ma的幅 值增量(±%)	0.8Ma	启动	启动相对于 0.8Ma的幅 值增量(±%)
1	channel1	0.588 80	0.588 18	−0.105 89	0.530 28	0.262 53	−50.492 30	0.501 37	0.734 12	46.423 22
2	channel5	0.744 73	0.762 43	2.376 29	2.304 99	1.257 42	−45.447 80	0.658 50	0.795 93	20.869 99
3	channel7	0.000 70	0.000 25	−63.531 80	0.000 87	0.000 61	−29.973 10	0.002 85	0.003 68	29.425 27
4	channel10	0.900 15	0.438 64	−51.269 80	5.056 48	3.797 79	−24.892 60	1.756 85	2.938 84	67.279 08
5	channel14	0.627 82	0.534 32	−14.893 30	2.540 92	1.706 92	−32.822 90	0.563 08	1.106 06	96.429 07
6	channel18	1.634 76	1.053 81	−35.537 70	8.258 08	5.429 60	−34.251 00	2.511 32	3.959 09	57.649 57

模式转换中的 18 个测点通道,除 3 号测点垂向测试通道外,0.8 Ma 下 II 号轴振动幅值都要大于启动时的数据,因此,可判断 0.8 Ma 下模式转换中 II 号轴受到了较大的气动载荷,致使模式转换中的数据振幅较大。

最后对 II 号轴进行不同飞行高度(3 km、7 km 0.95 Ma、8 km 0.95 Ma、10 km 0.95 Ma)振动幅值分析,如图 6 所示。

模式转换前,随高度增加测试的 II 号轴振动幅值逐渐增大,而 10 km、0.95 Ma 时振动幅值却减小,与 3 km 模式转换时的振幅相近。模式转换中,8 km、0.95 Ma 测试的 II 号轴振动幅值相对其他几个高度偏小。模式转换后,除传感器 1 的 7 km、0.95 Ma 以外,随高度增加 3 km、7 km 0.95 Ma、8 km 0.95 Ma,测试的 II 号轴振动幅值大体上也是呈逐渐增大趋势。

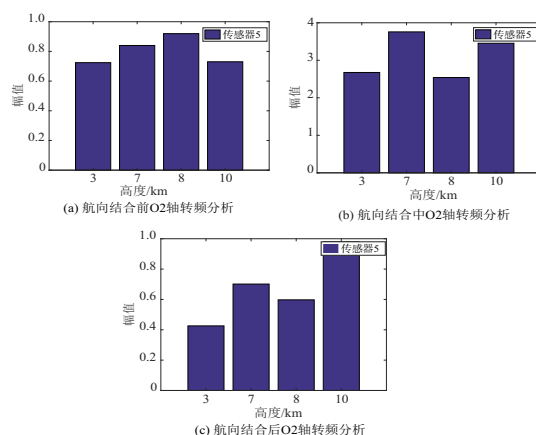


图 6 不同飞行高度振动幅值对比

(下转第 183 页)

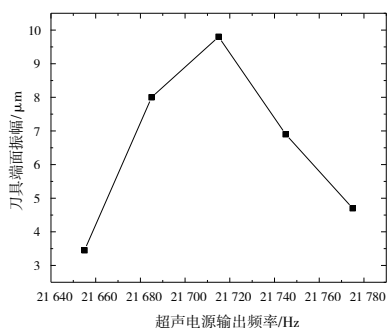


图 13 直径 8 mm 刀具端面振幅与频率关系

22 050 Hz、21 715 Hz,在同样悬长和直径下超声电源自动识别超声刀柄的谐振频率分别为 22 475 Hz、22 030 Hz、21 710 Hz。

由试验结果知,刀具端面振幅最大点对应频率和超声电源自动识别的谐振频率最大相差为 25 Hz,同电源输出频率相比,误差 $<1.5\%$,说明电源自动识别的谐振频率为超声刀柄的谐振频率。验证了电源的频率自动识别的精确性。

3 结语

本文基于最大电流法和相位控制法相结合的频率自动识别方法,研制了具有自动识别超声刀柄谐振频率功能的超声电源。结合超声刀柄,进行了超声电源频率自动识别测试,结果表明:

1)当刀具直径不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具悬长的增大而减小;当刀具悬长不变时,超声刀柄的谐振频率随刀具直径的增大而减小。

2)超声电源测得的超声刀柄谐振频率与阻抗分析仪测得的频率差值最大变化值为 221 Hz,误差 $<1\%$;重复测量时,电源测量数据极差最大为 30 Hz,验证了超声电源频率自动识别的稳定性。

3)通过刀具端面振幅验证试验,刀具端面振幅最大点对应的频率和超声电源自动识别的谐振频率相差最大 25 Hz,误差 $<1.5\%$,验证了超声电源频率自动识别的精确性。

参考文献:

- [1] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] KUMAR S, WU C S, PADHY G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 295-322.
- [3] 刘艳, 郑景珍, 陈阿娣, 等. C/SiC 复合材料超声振动加工切削力单因素试验研究 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 35-37, 99.
- [4] BREHL D E, DOW T A. Review of vibration-assisted machining [J]. Precision Engineering, 2008, 32(3): 153-172.
- [5] 齐海群, 谢涛, 袁江波. 安装端面对换能器谐振性能的影响 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(11): 10-12.
- [6] 王建明. 功率超声技术的现状与展望 [J]. 声学技术, 1997(1): 47-49.
- [7] 刘永富. 磁平衡电流传感器场路联合仿真方法及瞬态效应研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [8] 王昱皓, 钟贻兵, 时圣利. 高可靠霍尔电流传感器的研究和应用 [J]. 新型工业化, 2015, 5(11): 8-12.
- [9] 鲁光辉. 霍尔电流传感器的性能及应用 [J]. 四川文理学院学报(自然科学版), 2007, 17(2): 40-42.
- [10] 赖俊驹, 彭浩, 胡金磊, 等. 基于闭环霍尔效应的电流传感器设计 [J]. 新型工业化, 2018, 8(9): 1-5.

收稿日期:2019-12-02

(上接第 155 页)

3 结语

本文以实际飞行测试为基础,采集信号后,通过构造 Hankel 矩阵,对航向、侧向、垂向共 6 个传感器 18 个通道的测试数据进行 SVD 反变换,获取去噪后的信号,随后利用时频分析方法,分析了外部载荷(特别是高马赫和跨音速区)环境变化与组合动力装置模式转换之间的关联特性,并重点研究涡轮动力源 II 传动轴的振动幅值变化。

通过本次实验得出结论:该型双动力源齿轮箱在动力源 I 和 II 的单独工作模式以及模式转换时性能可靠,为改进产品质量提供了技术支撑,为进一步研究多动力源的组合动力装置如何避免共振现象实现平稳转换工作模式提供了有力的数据与分析支持。

参考文献:

- [1] BAO X X, LI C L, XIONG C B. Noise elimination algorithm for modal analysis [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(4): 041901.
- [2] MARTIN P, ROTHBERG S. Introducing speckle noise maps for laser vibrometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009,

47(3/4): 431-442.

- [3] ZHAO X Z, YE B Y. Separation of single frequency component using singular value decomposition [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2019, 38(1): 191-217.
- [4] RONG H X, GAO Y B, GUAN L W, et al. GAM-based mooring alignment for SINS based on an improved CEEMD denoising method [J]. Sensors, 2019, 19(16): 3564.
- [5] 程发斌, 汤宝平, 钟佑明. 基于最优 Morlet 小波和 SVD 的滤波降噪方法及故障诊断的应用 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 91-94, 128.
- [6] 赵学智, 叶邦彦. SVD 和小波变换的信号处理效果相似性及其机理分析 [J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1582-1589.
- [7] 吴浩浩, 罗志增. 基于构造 Hankel 矩阵的 SVD 陷波方法 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4514-4516.
- [8] 张波, 李健君. 基于 Hankel 矩阵与奇异值分解(SVD)的滤波方法以及在飞机颤振试验数据预处理中的应用 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 162-166.

收稿日期:2020-10-19