

# 测量信息对飞行器工作模态辨识精度影响分析\*

王亮, 张妍, 蔡毅鹏, 周国峰, 南宫自军

(中国运载火箭技术研究院 北京, 100076)

**摘要** 针对模态辨识结果对输入的敏感性,研究了测量信息对飞行器工作模态辨识精度的影响。介绍了自回归-滑动平均(auto-regressive and moving average,简称 ARMA)模型环境激励模态辨识方法的理论、试验测点和激励情况,并给出了试验研究方案情况。通过选择不同测点布置组合,研究了测点布置对辨识结果的影响。对各测点数据人为增加噪声,研究了数据品质对辨识结果的影响。研究发现,测点数目较多,且测点布置在振型数值较大位置,辨识结果较好。

**关键词** 模态辨识; 自回归-滑动平均; 自然激励技术; 工作模态

**中图分类号** O32; V416

## 引言

高速飞行器的姿态控制主要依靠以陀螺为代表的敏感设备对姿态进行测量,进而通过控制系统进行稳定控制飞行。实际飞行过程中,敏感设备感受的姿态信息中包含刚体运动姿态以及飞行器弹性振动引起的附加姿态,控制系统设计时若不考虑该附加姿态角,则可能导致飞行器姿态发散。因此,姿态控制系统的网络设计必须考虑弹性振动的影响。高速飞行器气动力矩相关系数较大,刚体频率与弹性频率间“带宽”小,增加了控制系统频域设计难度。从以往飞行试验结果辨识发现,一些飞行器地面模态试验获得的弹性振动频率与飞行状态相比偏低,阻尼比偏小,进一步增加了姿控设计难度。因此,发展飞行器工作模态辨识技术,获得准确的飞行模态参数对姿控设计具有重要意义。

由于飞行器在飞行过程中的外部激励无法精确测量,因此可以采用环境激励工作模态辨识技术。工作模态分析研究最早可以追溯到单阶模态测试的随机减量法<sup>[1]</sup>。Ibrahim 等<sup>[2]</sup>提出了利用时域信号进行参数识别的方法,该方法经多年的完善形成了独具一格的固有时间尺度分解法(intrinsic time-scale decomposition,简称 ITD),其特点是能够在激励信号未知的条件下,直接使用响应的时域信号进行模态参数识别,而且识别时无需将测试的响应信号进行不同域的变换,避免由不同域变换而引起的

信号截断误差,但该方法对噪声比较敏感。Asmus-sen<sup>[3]</sup>系统总结论述了参数识别的时序分析方法的进展,并对比了以最小二乘估计为核心的单参考点复指数法,以及在其基础上进一步发展的多参考点复指数法的优劣势。Pappa<sup>[4]</sup>提出了特征系数实现法,该方法是基于线性系统的状态方程和系统最小实现理论,属于多输入多输出的模态参数辨识方法,通过构造 Hankel 矩阵,利用奇异值分解方法,确定相互描述状态方程的系统矩阵和输入、输出矩阵,构成最小阶的系统实现,通过求解,得到系统的模态参数。目前,该方法已广泛应用于桥梁、高层建筑、汽轮机、飞机和汽车等的模态参数识别<sup>[5-10]</sup>。

由于飞行试验时,测量系统(包括测点数目和布置位置)可能会受到多方面因素的影响,因此研究测量信息对工作模态辨识结果的影响非常重要,直接关系到辨识效果。笔者通过地面策划相应的环境激励试验,选择不同测点组合以及人为增加噪声,研究了对模态辨识结果的影响。

## 1 ARMA 模态辨识技术

本研究采用文献[6]的 ARMA 模态辨识技术。ARMA 模型时间序列分析法简称为时序分析法。 $N$ 个自由度的线性系统激励与响应之间的关系可用高阶微分方程来描述,在离散时间域内,该微分方程变成由一系列不同时刻的时间序列表示的差分方程,即 ARMA 时序模型方程

\* 国防基础科研资助项目(JCKY2016203B032)  
收稿日期:2018-06-08;修回日期:2019-09-18

$$\sum_{k=0}^{2N} a_k x_{t-k} = \sum_{k=0}^{2N} b_k f_{t-k} \quad (1)$$

其中:  $2N$  为自回归模型和滑动均值模型的阶次;  $a_k$ ,  $b_k$  分别为待识别的自回归系数和滑动均值系数;  $f_t$  为白噪声激励。

式(1)表示响应数据序列  $x_t$  与历史值  $x_{t-k}$  的关系, 其中等式的左边称为自回归差分多项式(auto-regressive, 简称 AR)模型, 右边称为滑动平均差分多项式(moving average, 简称 MR)模型。当  $k=0$  时, 设  $a_0 = b_0 = 1$ 。

通过各种估计方法求自回归系数  $a_k$  和滑动均

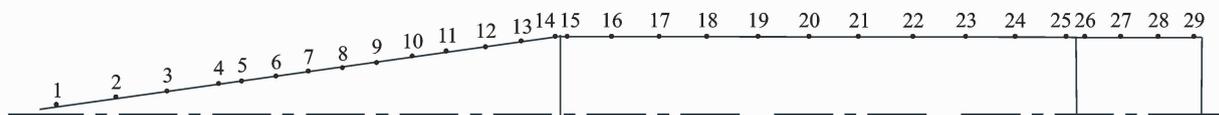


图1 测点分布示意图

Fig. 1 Sketch of the measure points' distribution

激励时, 在飞行器首尾布置激振器, 同时白噪声激励, 激励频带为  $5 \sim 200$  Hz。

首先采用传统方法获取飞行器  $100$  Hz 以内的低频模态特性。试验采用随机激励方法测得弹体各测量点的频响函数曲线, 从频响函数曲线频率中获得弹体的模态参数, 通过振型的动画显示, 确定这些模态的基本特性, 分析出弹体的整体模态和局部模态分布情况, 再采用多点正弦调谐方法获取弹体整体的前几阶模态参数(频率、振型和阻尼)数据。多点正弦调谐方法基于相位共振原理, 采用多个激振器, 调节多个正弦激振力的分布和大小, 激励出结构的纯模态。根据调谐方法获取的模态特性如表1和图2所示。

表1 传统方法获取的全弹模态试验结果

Tab. 1 Modal frequencies derived by the traditional method

模态名称	试验频率/Hz	计算频率/Hz	误差/%
1阶弯曲	35.7	34.6	-3.2
2阶弯曲	77.7	77.3	-0.6

### 3 测点布置对辨识结果的影响分析

本节研究了不同测点布置组合对工作模态辨识结果的影响, 各测点组合情况如下:

- 1) 弹身 29 个测点;
- 2) 弹头 14 个测点和尾舱 4 个测点;
- 3) 弹头 14 个测点;
- 4) 尾舱 4 个测点;
- 5) 弹头 7 个测点和尾舱 2 个测点(1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 26, 28);

值系数  $b_k$  后, 可以通过 ARMA 模型传递函数的表达式计算系统的模态参数。

## 2 试验方案

试验时, 采用橡皮绳组, 通过两点水平悬吊的方法来模拟飞行器自由-自由边界条件。在飞行器外表面沿同一母线轴向均匀布置测点, 均为三向加速度传感器, 外表面加速度测点共 29 个, 将飞行器分为前、中、后 3 个部段, 测点数分别为 14, 11 和 4, 测点分布示意图如图 1 所示。

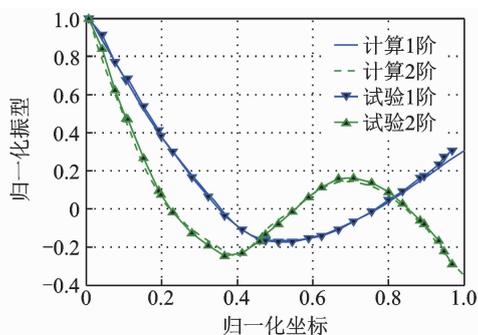


图2 传统方法获取的前2阶模态振型辨识结果

Fig. 2 The first two order model shapes derived by the traditional method

- 6) 弹头 4 个测点和尾舱 1 个测点(1, 5, 9, 13, 26);
- 7) 弹头 3 个测点和尾舱 1 个测点(6, 9, 13, 26);
- 8) 弹头 3 个测点和尾舱 1 个测点(4, 5, 6, 26);
- 9) 弹头 3 个测点和尾舱 1 个测点(8, 9, 10, 26);
- 10) 弹头 3 个测点和尾舱 1 个测点(11, 12, 13, 26)。

组合 1 为全测点状态, 测点分布较均匀。由于飞行器中段一般为发动机, 飞行试验时无法安装振动测点, 因此组合 2~9 为模拟发动机前段和发动机后段有测点、发动机无测点情况。其中: 组合 3 和 4 是模拟发动机前段或发动机后段测点较多的情况; 组合 5~9 在组合 2 的基础上缩减测点数; 组合 7~8 对比了弹头内测点集中布置的情况。3 个组合分别代表了测点集中在弹头前段、中段和后段的情况。

图 3、图 4 给出了工况 1 时, 信号的时频分析结果和各通道前 4 阶模态辨识结果。

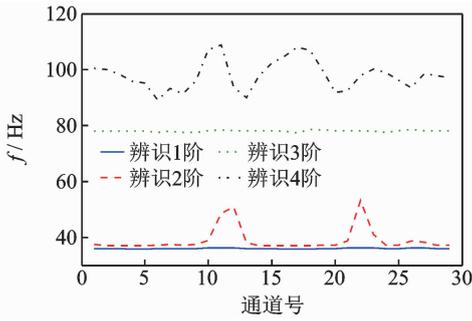


图 3 各阶模态频率辨识结果

Fig. 3 Identified results of modal frequencies

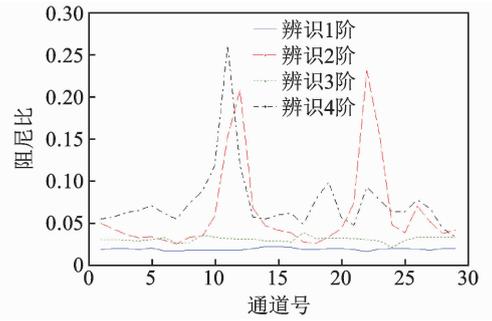


图 4 各阶模态阻尼比辨识结果

Fig. 4 Identified results of modal damping

各测点组合情况下,使用 ARMA 方法辨识出 前 4 阶模态频率和阻尼比,结果如表 2、表 3 所示。

表 2 各测点组合下模态频率辨识结果

Tab. 2 Modal frequencies identification of different measuring point combination

组合	f/Hz							
	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	36.11	0.055 3	40.30	5.367 6	77.57	0.199 2	95.70	2.780 9
2	36.13	0.024 5	41.44	6.640 1	76.93	0.222 8	92.12	3.094 7
3	36.13	0.025 9	42.07	8.018 0	76.96	0.171 9	91.36	2.300 0
4	36.20	0.020 0	42.09	3.305 6	77.65	1.082 9	97.15	3.367 8
5	36.13	0.023 4	40.64	4.475 5	77.18	0.305 7	89.99	3.122 3
6	36.13	0.038 3	38.87	1.633 8	77.60	0.254 2	94.98	3.225 4
7	36.13	0.014 4	40.17	1.290 4	76.95	0.540 8	90.22	2.170 4
8	36.08	0.019 4	37.78	0.635 2	77.06	0.376 1	89.18	1.619 1
9	36.17	0.018 3	40.81	1.522 3	74.69	1.485 9	89.92	3.852 8
10	36.19	0.091 5	59.51	3.457 3	77.98	0.347 9	88.38	1.904 4

表 3 各测点组合下模态阻尼比辨识结果

Tab. 3 Modal damping identification of different measuring point combination

组合	阻尼							
	1 阶		2 阶		3 阶		4 阶	
	均值/%	标准差	均值/%	标准差	均值/%	标准差	均值/%	标准差
1	1.537	0.000 67	8.289	0.040 68	3.126	0.003 78	5.170	0.021 63
2	1.529	0.000 39	9.872	0.053 62	3.399	0.004 39	5.493	0.027 98
3	1.510	0.000 39	10.630	0.066 47	3.381	0.003 04	4.764	0.017 32
4	1.558	0.000 41	11.679	0.043 36	3.311	0.001 87	5.818	0.013 52
5	1.536	0.000 48	10.148	0.050 51	3.458	0.005 10	4.177	0.013 66
6	1.538	0.000 49	7.950	0.028 99	3.272	0.003 33	5.309	0.015 27
7	1.527	0.000 44	6.940	0.020 97	4.166	0.009 34	7.693	0.049 94
8	1.497	0.000 71	4.392	0.014 63	3.666	0.007 08	4.271	0.001 56
9	1.516	0.000 25	7.834	0.014 43	6.923	0.013 32	14.178	0.063 33
10	1.662	0.001 48	8.664	0.022 20	3.808	0.000 84	10.992	0.036 32

图 5 给出了典型组合(组合 1)的振型辨识结果与传统方法辨识结果的对比,前 2 阶振型模态正交值(modal assurance criterion, 简称 MAC)分别为 0.997 和 0.991。

从以上结果可以得出以下结论:

1) 在各测点组合情况下,前 4 阶模态中,第 2 阶和第 4 阶模态频率和阻尼比散布较大,且第 1 阶和第 3 阶模态频率与功率谱密度曲线的谐振峰一致,因此可以确定第 1 阶和第 3 阶模态为真实模态。与传统方法获取的模态特性结果对比,频率结果基

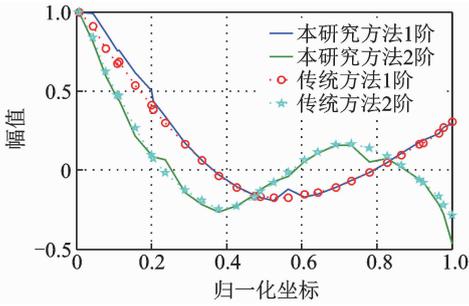


图5 典型组合模态振型辨识结果与传统方法结果对比  
Fig. 5 The comparison of the modal shapes identification between ARMA method and traditional method

本一致,最大偏差在1.4%左右,阻尼比偏差稍大,1阶阻尼比偏差基本在50%左右,2阶偏差除组合7和9偏差达到14%和100%左右外,基本在6%左右;

2) 对比组合2,3,5和组合1可以发现,该3个工况测点分布较广,且数目较多,因此辨识结果散差与组合1类似;

3) 对比组合4和组合1,2,3,5可以发现,仅导

弹后段有测点,且测点较集中,该处振型值较小,因此其辨识结果散差较其他工况较大;

4) 对比组合6,7和组合1,2,3,5可以发现,测点较少但分布较广时,辨识结果散差与组合1类似;

5) 对比组合8~10和组合6~7可以发现,当测点较少且分布较为集中时,辨识结果与测点所在处振型大小关系密切。组合8测点所在处振型较大,振型按最大值归一化后幅值在0.3~0.7,而组合9和10的振型幅值分别在0.1~0.2和0~0.1,因此组合9和10辨识结果散差较其他工况较大;

6) 辨识的模态振型结果与传统方法的结果一致性较高。

## 4 数据品质对辨识结果的影响分析

本节研究在各种组合下,各测点响应均叠加某一程度的噪声量级,研究测试噪声对辨识结果的影响。各通道增加30%噪声后,使用ARMA方法辨识出前4阶模态频率和阻尼比,结果如表4、表5所示。

表4 增加30%噪声后各测点组合下模态频率辨识结果

Tab. 4 Modal frequencies identification of different measuring point combination by adding 30% noises

组合	f/Hz							
	1阶		2阶		3阶		4阶	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	34.32	2.852 3	36.35	0.626 6	78.22	0.948 1	101.66	8.680 1
2	34.48	2.226 6	36.45	0.788 2	78.19	0.849 2	101.24	7.409 3
3	35.38	0.700 0	36.64	0.935 8	77.80	0.602 2	100.96	10.518 7
4	33.47	1.713 0	36.23	0.046 0	78.10	0.327 2	95.93	1.471 3
5	34.01	1.828 3	36.21	0.056 5	78.10	0.739 5	96.00	7.726 1
6	34.89	1.094 0	36.26	0.286 7	78.11	0.827 0	103.38	10.890 1
7	35.72	0.421 2	36.41	0.403 7	77.73	0.650 4	101.36	13.063 9
8	35.66	0.259 1	36.17	0.047 8	77.31	0.179 6	99.94	3.631 8
9	35.92	0.235 1	36.13	0.016 3	76.77	5.421 9	95.63	16.262 6
10	36.12	0.027 9	52.24	15.526 2	76.79	2.435 2	100.66	17.412 2

表5 增加30%噪声后各测点组合下模态阻尼比辨识结果

Tab. 5 Modal damping identification of different measuring point combination by adding 30% noises

组合	阻尼							
	1阶		2阶		3阶		4阶	
	均值/%	标准差	均值/%	标准差	均值/%	标准差	均值/%	标准差
1	15.4	0.232 46	3.9	0.050 45	4.1	0.005 23	13.4	0.084 08
2	14.5	0.212 07	4.1	0.057 83	4.1	0.005 76	13.9	0.095 32
3	7.9	0.049 99	10.6	0.219 90	3.9	0.004 94	14.5	0.069 60
4	9.8	0.078 12	1.8	0.001 20	5.2	0.007 98	11.4	0.017 91
5	11.7	0.078 21	1.9	0.002 09	3.9	0.003 23	13.2	0.048 56
6	10.6	0.068 38	2.8	0.022 61	3.8	0.005 04	12.3	0.091 69
7	6.0	0.048 74	4.5	0.032 95	3.7	0.009 58	9.4	0.057 99
8	5.1	0.007 71	2.1	0.000 73	3.9	0.005 96	8.7	0.022 35
9	6.1	0.033 17	3.5	0.028 29	18.2	0.097 54	17.9	0.201 65
10	1.7	0.001 23	31.1	0.265 82	5.9	0.045 29	9.9	0.139 58

从以上结果可以得出以下结论:

1) 增加噪声后的模态辨识结果与传统方法的模态辨识结果对比,偏差较增加噪声前增大,模态频率结果偏差增大至 2% 左右,阻尼偏差增大较大,1 阶模态阻尼比偏差除组合 4,5,8 偏差在 80% 内,其他工况偏差基本在 100% 以上。2 阶阻尼比偏差除组合 9 偏差依然较大外,其他阶阻尼比偏差在 100% 以内,较多工况在 10% 左右;

2) 对比增加噪声前、后的辨识结果可以发现,在统一组合工况下,增加噪声后的辨识结果散布较大,尤其是虚假模态的散布增大较多;

3) 增加噪声后,辨识出的前 2 阶模态频率比较接近,均在多项式拟合结果附近,散布均较小,出现了“双 1 阶”的现象;

4) 对比组合 9,10 和组合 8 可以发现,测点较少且分布较为集中的组合,若其振型幅值较小,其辨识结果对噪声更为敏感,尤其是较高阶模态,组合 10 的 2 阶模态频率和阻尼比的标准差较组合 8 大一个数量级。

## 5 结 论

1) 在各测点组合情况下,各通道数据辨识的真实模态稳定性较好,而虚假模态散布较大。与传统辨识方法获取的模态特性对比,模态频率偏差较小,基本在 1% 左右。阻尼比偏差稍大,1 阶阻尼比偏差基本在 50% 左右,2 阶偏差基本在 6% 左右。

2) 测点数目较多,且测点布置在振型数值较大位置,辨识结果较好;相反的,测点数目较少,布置在节点附近位置,辨识结果较差。

3) 对比增加噪声前、后的辨识结果可以发现,在统一组合工况下,增加噪声后的辨识结果散布较大,尤其是虚假模态的散布增大较多。与传统方法的模态辨识结果对比,偏差较增加噪声前增大,模态频率结果偏差增大至 2% 左右,阻尼偏差增大较大,1 阶模态阻尼比基本在 100% 以上,2 阶阻尼比偏差基本在 10% 左右。

4) 增加噪声后,辨识出的前 2 阶模态频率比较接近,均在多项式拟合结果附近,散布均较小,出现了“双 1 阶”的现象。

5) 增加噪声后,测点较少且布置在节点附近,其辨识结果对噪声更为敏感。

## 参 考 文 献

[1] COLE H A. On-line failure detection and damping measurements of aerospace structures by rand decre-

ment signature[R]. USA:NASA, 1973.

- [2] IBRAHIM S R. Efficient random decrement computation for identification of ambient Responses[C]// Proceeding of Process of the 19<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference. Florida, USA:IMAC, 2001:1-6.
- [3] ASMUSSEN J C. Modal analysis based on the random decrement technique [D]. Denmark: Aalborg University, 1997.
- [4] PAPPAS R S. Close-mode identification performance of TTD[C] // 24<sup>th</sup> Structures Dynamics and Materials Conference. Lake Tahoe, Nevada, USA:[s. n.], 1983.
- [5] 王亮,蔡毅鹏,朱辰. 基于 ARMA-NExT 的飞行模态辨识技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(1): 18-21.
- WANG Liang, CAI Yipeng, ZHU Chen. Operational mode identification of the aircraft based on ARMA-NExT[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(1): 18-21. (in Chineses)
- [6] 张建伟, 曹克磊, 赵瑜. 考虑不同库水耦合模式的拱坝振动特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6): 1183-1189.
- ZHANG Jianwei, CAO Kelei, ZHAO Yu. Dynamic characteristic analysis of arch dams with different forms of reservoir water coupling [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6): 1183-1189. (in Chineses)
- [7] BONATO B, CERAAVOLO R, A DE S. Use of cross-time-frequency estimators for structural identification in non-stationary conditions and under unknown excitation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(5): 775-791.
- [8] MAKKI ALAMDARIA M, LI J, SAMALI B. Damage identification using 2-D discrete wavelet transform on extended operational mode shapes[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(3): 698-710.
- [9] MARTINEZ-LUENGO M, KOLIOS A, WANG L. Structural health monitoring of offshore wind turbines: a review through the statistical pattern recognition paradigm [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 91-105.
- [10] NADINE B, MATTHIAS K, PETER C. Modeling the design and operational mode of a continuous membrane reactor for enzymatic lignin modification [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 124: 88-98.



第一作者简介:王亮,男,1985年9月生,博士、高级工程师。主要研究方向为战术导弹载荷与环境设计。曾发表《考虑轴向运动效应的梁类结构动力学特性研究》(《振动工程学报》2016年第29卷第1期)等论文。

E-mail: wangliang@nuaa.edu.cn

(第 40 卷卷终)