

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.04.08

# 模态测试设备系统校准方法研究

卢瑜<sup>1</sup>, 林淡<sup>2</sup>, 杨军<sup>3</sup>, 赵威<sup>2</sup>, 胡鑫<sup>2</sup>

(1. 四川航天计量测试研究所, 四川 成都 610000; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100039;  
3. 四川航天技术研究院总体设计部, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为了解决模态测试设备面向模态参数的校准问题, 研究了模态分析与模态叠加理论, 根据该理论得到一个闭环模态信号控制算法, 由该闭环控制算法构建一个由5台激振器构成的闭环系统, 该组激振器模拟模态测试过程中的一组信号, 此组信号包含了标准模态参数的信号, 最后用该组信号来校准模态测试设备。根据该方法进行了数值模拟和试验测试, 结果显示该校准方法是可行的, 并且可以脱离具体的模态结构, 不同模态信号的模拟也可灵活实现。

**关键词:** 模态; 模态参数; 校准; 数值模拟

**中图分类号:** TB935

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2016)04-0026-07

## Research on System Calibration Method of Modal Test Equipment

LU Yu<sup>1</sup>, LIN Dan<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>3</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>, HU Xin<sup>2</sup>

(1. Sichuan Aerospace Measurement & Test Research Institute, Chengdu 610000, China; 2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100039, China; 3. Sichuan Academy of Aerospace Technology The General Design Department, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of modal parameter calibration of modal test system, the modal analysis and modal superposition theory are studied. According to this theory, a closed-loop mode signal control algorithm is proposed. The closed-loop system is composed of 5 exciters. According to this method, the numerical simulation and experiment test are carried out. The results show that the calibration method is feasible, and can be separated from the concrete modal structure, and the simulation of different modes can be realized.

**Key words:** modal; modal parameter; calibration; numerical simulation

## 0 引言

结构的动态特性因直接关系到产品研制的质量(性能、寿命、可靠性、安全性和经济性), 而成为各个行业共同关注的问题。而结构的动态特性参数的测试是通过模态分析和模态测试的方法来确定的, 模态测试设备的准确性直接关系到结构动态性能参数的最终确定。但在实际的测试中, 模态测试系统的校准却存在种种问题。

目前, 国内外对模态测试系统进行校准主要采取以下办法: ①仪器单元分立校准: 测量通道上各仪器单元分别按各自的计量规程校准, 综合得到测量通道上的系统性能参数的准确度。此种校准方法无法计入由于各仪器单元之间性能匹配不一致所造成的系统误

差, 同时没有考虑到作为系统重要组成部分的软件的影响。②测量通道系统标定: 测定从传感器前端到数据采集器整个测量通道系统(即硬件部分)的性能参数。此种校准方法只对测量通道性能指标进行了系统校准, 也无法反映后期数据处理软件进行数据处理的精度以及硬软件性能匹配方面带来的误差。③采用标准结构件(如双U型梁)的全系统校准: 此方法制造标准结构件, 该结构件的模态参数通过有限元、模态分析等方法获得。而该方法一个标准件只能包含一组模态参数, 造成标准构件制造成本较高, 灵活性、可实现性较差, 不利于现场校准测试; 另外校准测试的准确度无法定量描述, 量值的溯源性得不到满足。

本文根据模态分析和模态叠加理论, 通过构建虚拟的5自由度结构物理参数模型并随机输入一组标准激励, 得到模态参数的理论值与5路稳态响应波形。将此标准激励与稳态响应波形输出给被校准系统进行测量, 被校准系统根据测量得到的激励与响应信号进

**收稿日期:** 2015-07-07

**作者简介:** 卢瑜(1982-), 男, 工程师, 研究方向为振动、冲击计量测试技术。

行模态参数识别以实现综合校准。

## 1 校准系统的构成与理论依据

### 1.1 系统构成

该系统由笔记本电脑、波形驱动控制器、激振器、动态信号分析仪、计算软件和控制软件等组成,如图1所示。笔记本电脑实现校准系统的用户交互操作界面,通过构建5自由度结构物理参数模型,设定5阶标准模态参数,形成激励和5通道响应波形数据并下传数据到波形驱动控制器,按需要向波形产生驱动控制器输入启动信号。波形产生驱动控制器接收电脑的波形数据并存入波形数据存储器,在接受数据处理计算机的启动信号后将波形数据转换为激励和响应电信号波形,并经功率放大器输入激振器,激振器上的加速度传感器拾取振动的信号,并实现闭环修正控制。从而实现响应电信号波形到机械波形的转换,产生表征标准模态参数的激励力信号(电信号模拟)与响应信号,该组信号作为标准校准信号提供给被校模态测试系统,被校模态测试系统分析得出模态参数与校准系统设定的模态参数比较,从而实现对模态测试系统综合误差的校准。

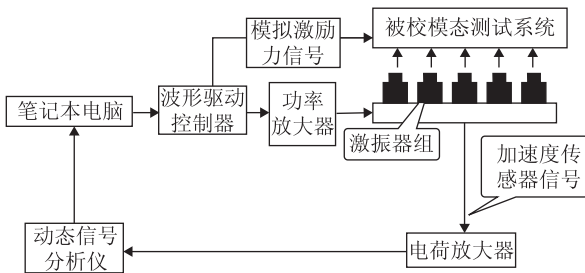


图1 模态测试系统综合校准系统组成图

### 1.2 模态参数的理论求解

要实现对模态测试系统的校准,需要先将多自由度系统的模态参数的理论解求出,并给定一组激励产生多组标准响应由被检测模态测试系统采集。被校准的模态测试系统接收标准的激励和响应信号求解计算模态参数,并与理论解相比较实现对被校准系统模态参数的检定。模态参数包括模态质量、模态刚度、模态阻尼及模态振型。

#### 1) 矩阵的确定

多自由度系统的矩阵包含有质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵。矩阵里的各个数值是事先随机输入的一组数值。由此可确定质量矩阵  $M$ 、刚度矩阵  $K$ 、阻尼矩阵  $C$ 。

#### 2) 固有频率及阵型

假设系统是  $n$  个自由度系统,因此其固有频率有  $n$  个不同的值,各阶振型对应一列向量,因此系统的振型为一个  $n \times n$  的矩阵。

设定固有频率为  $\omega$ ,振型矩阵为  $A$ 。将质量矩阵  $M$ 、刚度矩阵  $K$ 、固有频率  $\omega$ 、振型矩阵  $A$  带入主振型方程

$$(K - \omega^2 M)A = 0 \quad (1)$$

令式(1)中的系统行列式为零,则可以求出各固有频率  $\omega_i$  的具体数值。

令  $A_i$  表示与  $\omega_i$  相应的主阵型向量,则

$$(K - \omega_i^2 M)A_i = 0 \quad (2)$$

可以求解出振型  $A$ 。

当振型矩阵  $A$  求出,模态坐标确定后,模态质量、模态刚度和模态阻尼即可确定。

$$K_i = A^T K A$$

$$M_i = A^T M A$$

$$C_i = A^T C A \quad (3)$$

式中:  $K_i$  为第  $i$  阶模态刚度;  $M_i$  为第  $i$  阶模态质量;  $C_i$  为第  $i$  阶阻尼矩阵。

阻尼比为

$$\xi_i = C_i / 2M_i \omega_i \quad (4)$$

#### 3) 响应求解

假设给定多自由度系统的激励为  $P(t)$ ,则第  $i$  阶模态坐标的稳态响应(输出)为(Duhamel积分)<sup>[1]</sup>

$$y_i(t) = \frac{1}{M_i \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}} \int_0^t P_i(\tau) e^{-\xi_i \omega_i (t - \tau)} \sin[\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} (t - \tau)] d\tau \quad (5)$$

式中:  $\omega_i$  为第  $i$  阶固有频率;  $\xi_i = C_i / 2M_i \omega_i$  为第  $i$  阶阻尼比。

### 1.3 输出参数的修正

当  $n$  自由度系统的  $M$ ,  $K$ ,  $C$  值确定后,其模态参数就唯一确定,所以系统给定一组激励必定有  $n$  组的响应输出。激励信号与  $n$  组响应输出需要通过波形驱动控制器、激振器等中间环节后输出并被采集。这些中间环节必定会带入误差,所以需要输出参数进行修正。参数的调整包括一组模拟激励的输出和各阶次响应的输出,各组输出的修正是并行进行的。

设  $y_i(t)$  为各组计算得到的响应输出(或激励),经过激振器等中间环节后,实际响应输出(或激励)变为  $y_i'(t)$ 。

对  $y_i(t)$ ,  $y_i'(t)$  都进行傅里叶变换,得到  $Y_i'(\omega)$

和  $Y_i'(\omega)$ 。

$$\text{令 } H_i(\omega) = \frac{Y_i'(\omega)}{Y_i(\omega)} \quad (6)$$

$$H_i'(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{Y_i'(\omega)} \quad (7)$$

要想最终的输出为  $Y_i(\omega)$  与设定值相同，则修正后给中间环节的输入应该为  $X(\omega)' = Y_i(\omega) \cdot H_i'(\omega)$ 。由此，系统的最终输出为  $YY(\omega) = X_i'(\omega) \cdot H_i(\omega)$ ，再转换为时域函数并传递给被校准的系统。

$$YY(t) = \text{ifft}(YY(\omega)) \quad (8)$$

## 2 模态测试系统综合校准方法数值模拟

为验证本模态测试系统综合校准方法的可行性与正确性。在 Matlab 上构造一个虚拟的五自由度系统，给定一组激励并以某一自由度上的响应作为输出进行演示推导以验证其可行性。数值模拟由模态测试系统综合校准流程、模态参数的比较、稳态响应的求解和输出参数的修正组成。

### 2.1 模态测试系统综合校准流程

模态测试系统综合校准流程图如图 2 所示。

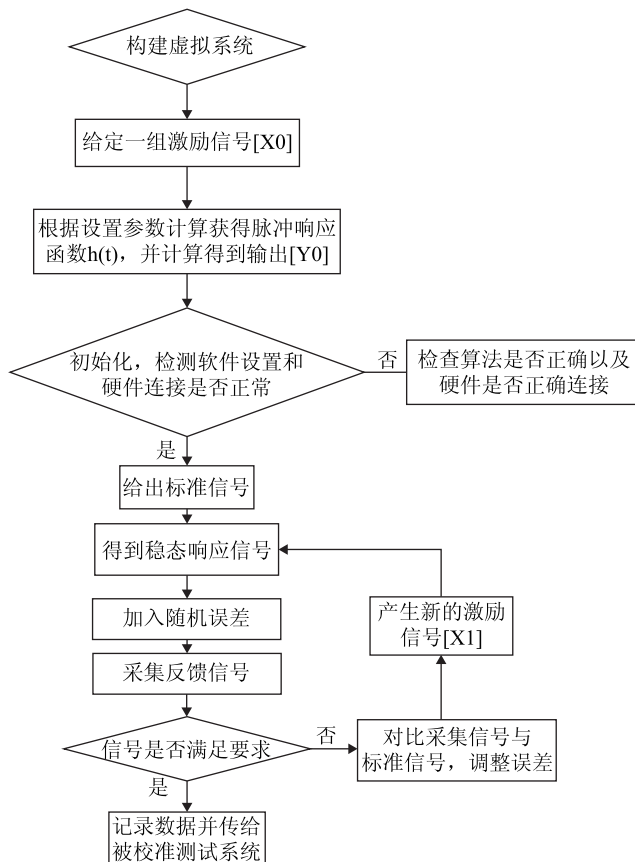


图 2 模态测试系统综合校准流程图

模态测试系统综合校准的具体过程为：

①构建虚拟系统：分别随机输入  $n$  个  $M, K$  的值、比例阻尼系数  $\alpha, \beta$  以组成比例阻尼  $C = \alpha M + \beta K$ ，根据模态分析理论及模态叠加原理求出  $n$  个模态参数并将模态参数进行保存(设质量  $m_i = 1, (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ ，刚度  $k_i = 1000 \text{ N/m}$ ，阻尼比例系数  $\alpha = 4 \times 10^{-4}$ ， $\beta = 4 \times 10^{-4}$ )；②给定激励信号：随机在任意一质量块上输入一组激励信号  $[X0]$ ；③根据以上二步可计算获得脉冲响应函数  $h(t)$ ，并计算得到输出  $[Y0]$ ；④检测连接是否正常：初始化，检测软件设置和硬件连接是否正常；⑤给出标准信号：将激励  $[X0]$  输入给模态测试系统作为激励信号；⑥得到稳态响应信号：由于刚度矩阵  $K$ 、质量矩阵  $M$  以及阻尼矩阵  $C$  都已确定，即该系统的模态参数已确定，因此给定一组激励定会得到 5 路稳态响应信号；⑦加入随机误差：由于在实际过程中将信号通过波形产生驱动控制器与功率放大器实现机械波形的转换，此过程必然会引入误差导致输出给被测系统的激励信号与稳态信号与理论值不一致。因此，在数值模拟中随机加入一组数值信号模拟此过程产生的误差；⑧采集反馈信号：将混入误差信号的输出激励和响应信号进行采集，并与 5 自由度系统求解得到的激励与理论响应信号进行比较；⑨如果符合误差要求，则将信号传递给被校准模态测试系统采集；如果不符合误差要求则需要进行信号修正，并产生新的输入；⑩新的输出信号经过⑥至⑨，直至到达误差要求并输出给被校准模态测试系统。

### 2.2 模态参数的比较

将理论求解出的五自由度系统的各阶固有频率、振型和阻尼比与软件运算得到的解相互比较以验证运算是否正确，具体数值如表 1、表 2 所示。

表 1 固有频率与阻尼值

阶次	频率/Hz		阻尼比/%	
	理论值	运算解	理论值	运算解
1	2.605	2.6052	0.34	0.34
2	5.033	5.0329	0.64	0.64
3	7.118	7.1176	0.90	0.90
4	8.717	8.7173	1.10	1.10
5	9.723	9.7229	1.23	1.23

### 2.3 稳态响应

假设在第一个质量块上输入一组随机激励  $P$ ，然后求出各质量块对这组激励的响应输出。作用在第一

表2 五自由度系统振型值

响应	一阶振型		二阶振型		三阶振型		四阶振型		五阶振型	
	理论值	运算解	理论值	运算解	理论值	运算解	理论值	运算解	理论值	运算解
响应 1	1.00	1	-1.00	-1	1.00	1	-1.00	-1	1.00	1
响应 2	1.73	1.732	-1.00	-1	0	0	1.00	1	-1.73	-1.732
响应 3	2.00	2.0	0	0	-1.00	-1	0	0	2.00	2
响应 4	1.73	1.732	1.00	1	0	0	-1.00	-1	-1.73	-1.732
响应 5	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1

个质量块上的激励  $P$  如图 3 所示。

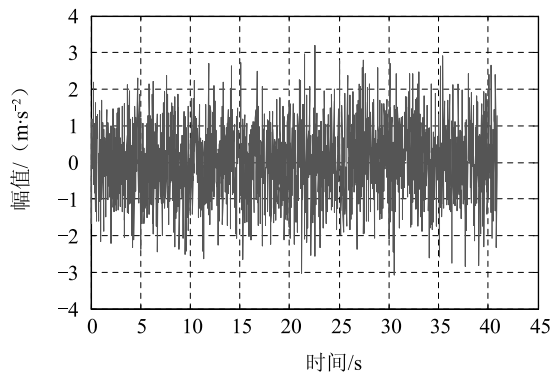


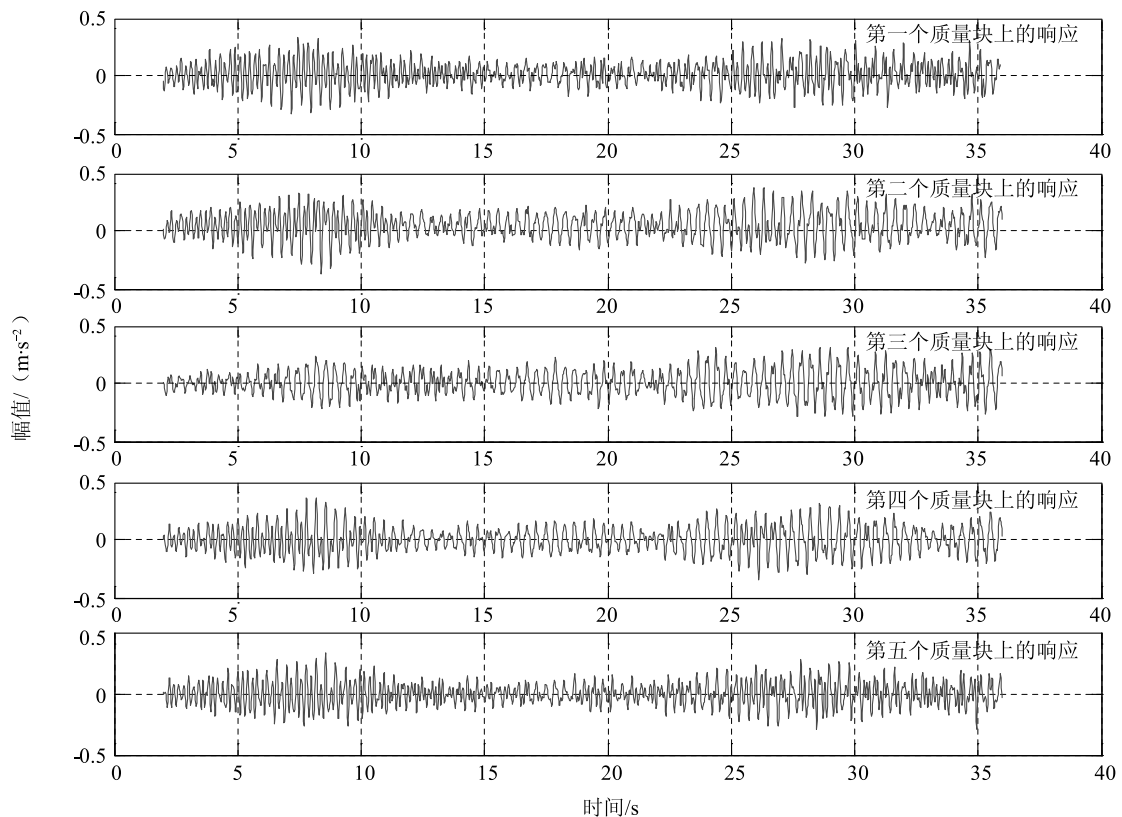
图3 作用在第一个质量块上的一组随机激励

根据稳态响应公式(5)可以求出各质量块上的响应,其响应如图 4 所示。

## 2.4 输出参数的修正

由于软件数值求解得到的输出必须要经过中间环节才能最终把信号传给被检定的设备,而这个中间环节必然会带入误差。因此,需要对输出参数进行修正。本文中,仅以第一个质量块上的响应输出进行修正为例,其它路的信号采用同样的方法进行修正。

第一质量块上的响应输出与经过中间环节后的输出如图 5 所示,可以看出经过中间环节后,响应输出发生了变化。

图4 五个质量块对随机激励  $P$  的响应



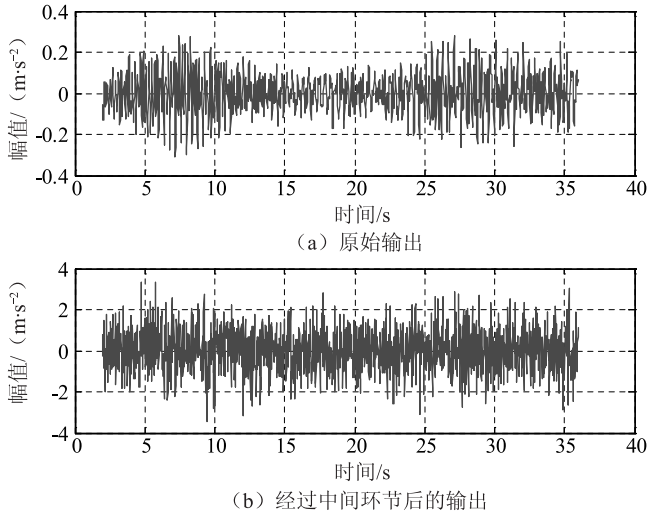


图5 原始输出与加入中间环节误差后的输出

分别对原始响应输出和经过中间环节后的响应输出做频谱分析,其图形如图6所示。

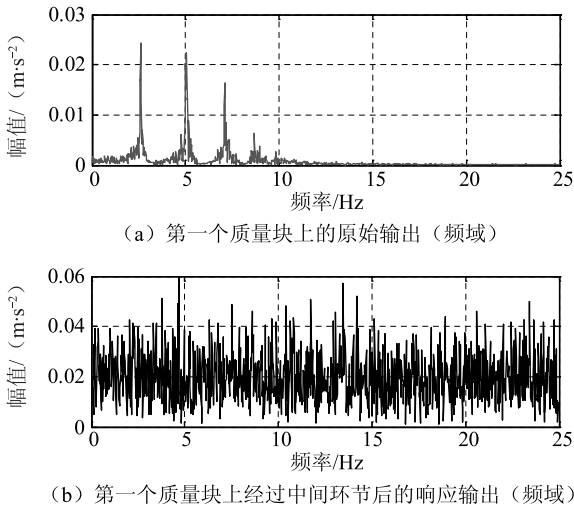


图6 原始响应输出和经过中间环节后的响应输出

由图5、图6可以看出,经过中间环节后的响应输出与原始响应输出差异较大,因此需要对要传递给激振器的输出信号进行修正。

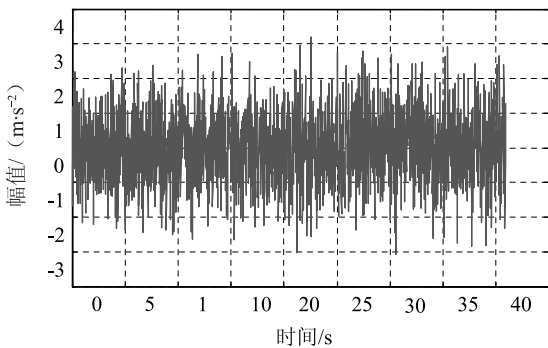


图7 修正后的输入

将修正后的输入再次通过中间环节进行传递,采集修正后的信号如图8、图9所示。

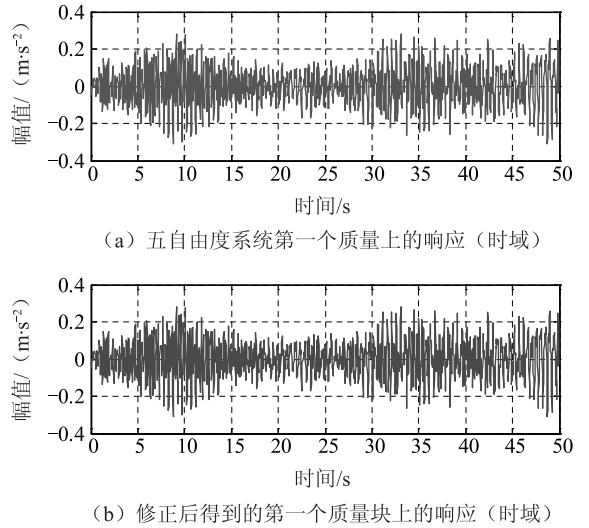


图8 原始响应输出与修正后的响应输出(时域表示)

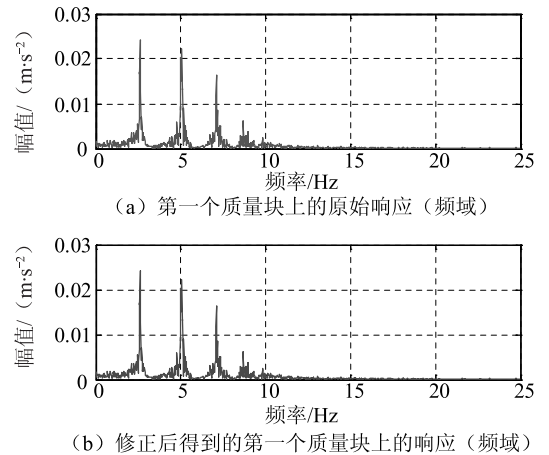


图9 原始响应输出与修正后的响应输出(频域表示)

把原始响应输出与经过修正后的响应输出放在同一张频响图里进行比较,如图10所示。

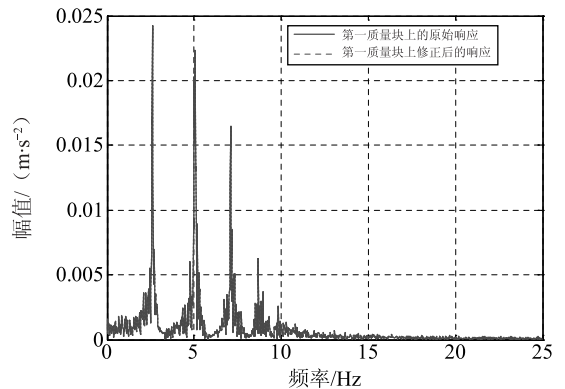


图10 原始响应输出与修正后的响应输出(频域表示)

由图 8 至图 10 可以看出, 原始输出与修正轴的响应输出一致性很好。

### 3 系统试验结果

根据仿真的结果, 用 LabVIEW 软件编写了系统控

制软件。构建了基于图 1 的模态测试系统综合校准系统, 校准系统根据理论计算得到一组理论值, 并给出实际的信号。使用东华 MDR 模态测试设备采集了模态校准系统给出的信号。做了三组试验, 试验的初步结果如表 3、表 4。

表 3 标准模型各阶固有频率和试验结果对比

Hz

试验	一阶		二阶		三阶		四阶		五阶	
	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值
第一组	64.064	64	187.002	187	294.791	295	378.697	379	431.923	432
第二组	66.747	66.5	170.901	171	263.346	263.5	361.519	361.5	497.558	497.5
第三组	10.129	10	29.568	29.5	46.611	46.5	59.877	60	68.293	68.5

表 4 振型识别值与标准模型值对比

Hz

试验	一阶		二阶		三阶		四阶		五阶	
	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值
第一组	0.284	0.306	0.763	0.775	1.000	1.000	0.919	0.931	0.547	0.549
	0.547	0.559	1.000	1.000	0.284	0.301	-0.763	-0.763	-0.919	-0.936
	0.763	0.786	0.547	0.532	-0.919	-0.931	-0.284	-0.293	1.000	1.000
	0.919	0.920	-0.284	-0.291	-0.547	-0.560	1.000	1.000	-0.763	-0.773
	1.000	1.000	-0.919	-0.904	0.763	0.772	-0.547	-0.545	0.329	0.279
MAC 值	0.9997		0.9998		0.9999		0.9999		0.9990	
第二组	0.068	0.066	0.219	0.215	-0.166	-0.170	-0.473	-0.485	1.000	1.000
	0.299	0.258	0.855	0.845	-0.521	-0.525	-0.909	-0.921	-0.386	-0.385
	0.503	0.506	1.000	1.000	-0.162	-0.163	1.000	1.000	0.117	0.116
	0.825	1.000	0.135	-0.135	1.000	1.000	-0.342	-0.350	-0.015	-0.015
	1.000	0.985	-0.886	-0.868	-0.575	-0.585	0.083	0.085	0.002	0.002
MAC 值	0.9888		0.9716		0.9999		0.9999		0.9999	
第三组	0.285	0.232	-0.832	-0.882	1.000	1.000	0.918	0.960	0.546	0.601
	0.546	0.592	-1.089	-1.119	0.285	0.372	-0.763	-0.877	-0.919	-0.776
	0.764	0.698	-0.595	-0.617	-0.918	-0.956	-0.284	-0.285	1.000	1.000
	0.918	0.811	0.310	0.322	-0.546	-0.562	1.000	1.000	-0.763	-0.769
	1.000	1.000	1.000	1.000	0.764	0.835	-0.546	-0.508	0.284	0.270
MAC 值	0.9946		0.9996		0.9971		0.9960		0.9924	

由表 3 中不难看出, 三组标准模型下, 信号采集仪采集得到的模型各阶频率和标准模型的各阶频率均非常接近, 标准模型各阶频率与实际测试得到的模型各阶频率之间相差最大不超过 0.3 Hz。

表 4 中 MAC 计算公式定义如式(9)。

$$MAC = \frac{[\mathbf{A}^T \mathbf{B}]^2}{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})(\mathbf{B}^T \mathbf{B})} \quad (9)$$

式中: MAC 为模态振型一致性;  $\mathbf{A}$  为标准理论振型列阵;  $\mathbf{B}$  为试验识别振型列阵。

MAC 表示标准理论阵型和试验识别出的模态振型的一致性。取值范围 0~1, MAC 值越接近 1, 表示两个模态测试系统振型一致性越好。

由表 4 中不难看出, 三组标准模型下, 理论振型按照最大值归一化后计算得到的标准模型各阶模态振型与

试验得到的模型各阶振型之间的 MAC 值均超过 0.97, 说明标准信号采集仪采集得到的模型各阶模态振型和标准模型的模态振型之间的一致性良好。

需要说明的是: 系统的试验结果未考虑激振器和传感器对系统输出的影响。

### 4 结论

通过以上分析和模拟结果, 以及试验得到的结果可知: 模拟标准模态参数的信号来校准模态测试系统的方法是有效的新方法。该系统突破了传统校准方法的局限, 可以根据理论计算给出灵活的包含模态参数的激励和响应信号, 脱离了具体的结构限制。可以认为激振器模拟的每一个点是结构上的任意位置的响应信号。同

时, 面向模态参数的校准思维, 为模态测试的准确性提供了全新的校准方法。用数值计算获得的模态参数与理论求解的模态参数一致性良好, 试验测试得到的结果与校准系统数值求解得到的一致性良好, 说明本模态校准方法是可行的。接下来, 对于激振器和传感器对系统模拟振动信号的具体影响将做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 姜万中. 关于杜哈梅积分的注释[J]. 石河子农学院学报, 1986.
- [2] 海伦. 模态分析理论与试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [3] 李永军, 马立元, 王天辉. 基于单点输入多点输出系统的模态参数测试系统设计[J]. 现代电子技术, 2011.



## 中图仪器亮相高血压大数据论坛 2016

2016 年 7 月 3 日, 高血压大数据论坛 2016 暨高血压大数据联合实验室成立大会在中国科技会堂举行, 本次会议的主题是聚焦高血压的精准诊断。中图仪器作为专业的血压计检定仪生产企业参加了此次会议。



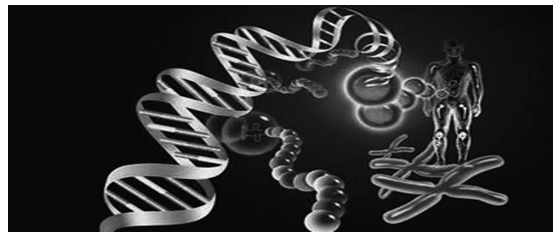
防治高血压, 众多专家都提倡用血压计定期测量血压, 记录血压水平, 因而血压计的质量决定着高血压防治效果, 那么对血压计进行精准检测就成了重中之重, 中图仪器推出的 SJ99D 无创血压计动态检定仪是一种应用于示波法无创血压监护仪的多用途检测仪器, 在市场上应用广泛。本次会议, 中图仪器现场展出了 SJ99D 无创血压计动态检定仪, 吸引了不少与会代表驻足观看了解, 并与工程师交流探讨。

中图仪器一直为医疗器械检测仪器国产化而努力, 相继推出了血压计检定仪、无线婴儿培养箱检测仪、PCR 温度校验仪等产品, 为公众的健康保障尽一份力量。

(罗健 报道)

## 计量, 实现精准医疗的钥匙——美国将计量标准作为优先发展重点研究领域

继“人类基因组计划”后, 2015 年 1 月, 美国总统奥巴马宣布了美国“精准医学计划”, 其本质是通过准确采集个体化大数据信息并加以分析, 建立个体化数据与特定疾病类型及进行进展状态之间的关系, 从而精确寻找到病因并实施具有针对性的个性化治疗, 以期达到最佳治疗效果的目的。



精准医疗的概念最早源于“精准武器”, 其核心是“精准”。精准医疗的实施依赖于准确的测量, 而这前提是有准确的“尺子”或“砝码”。计量则为各类测量提供各种量值及精度的计量标准作为“尺子”和“砝码”, 以保证测量结果的准确有效。据统计, 医生诊断结论 80% 的信息来自于临床检验结果, 如果胆固醇检测偏差减少 3%, 临床诊断假阴性率将降低 9%-20%; 如果肿瘤标志物的检测偏差减少 10%, 假阴性率将降低 10%-50%, 因此通过计量标准的使用提升检验结果的准确度, 势必大幅提高诊断的可靠性。可以说, 计量是实现精准医疗的钥匙。

(本刊综合报道)