

# 大型电动振动台机电耦合建模及参数辨识方法

李淑霏, 陈怀海, 任思宇, 贺旭东

(南京航空航天大学航空学院 南京, 210016)

**摘要** 针对大型电动振动台电流测量困难的问题,提出了一种不依赖电流信号的机电耦合模型构建及参数辨识方法。首先,基于驱动电压至台面加速度的频响函数,建立振动台的集中参数模型;其次,以某大型电动振动台及其配套传感器系统为对象,在 5~2 000 Hz 频率范围内开展扫频实验,获取频响数据;然后,采用结合粒子群优化与信赖域反射法的混合优化算法实现机械参数与电气参数的一体化辨识,有效替代传统的分步优化策略,显著简化识别流程;最后,以铝合金平板为典型测试件开展验证实验,并同步进行振动台-测试件有限元联合仿真,完成对所得振动台模型的初步应用验证。结果表明,模型仿真与实测频率响应曲线在全频段内吻合良好,测试件前 3 阶共振频率的识别误差均低于 2%,该方法有效规避了电流测量环节,为大型振动台的高精度建模与仿真分析提供了可靠的技术途径。

**关键词** 电动振动台;机电耦合;频响函数;物理参数识别

**中图分类号** TH39;TH113

## 0 引言

振动测试是产品开发中验证结构可靠性与环境适应性的关键环节。为提升研发效率、降低实验成本,数字孪生与虚拟实验技术已成为业界重点发展的数字化测试手段<sup>[1-3]</sup>。振动台作为测试系统的核心设备,其模型精度直接决定数字孪生与虚拟实验结果的可靠性。非参数频响函数模型虽常用于工程且结构简洁,但属于黑箱模型,预测能力受限<sup>[4]</sup>。参数建模方法可弥补这一缺陷,按物理结构可分为电气建模<sup>[5]</sup>与机械建模<sup>[6]</sup>,二者结合可构建机电耦合模型,从而完整描述从电信号到机械响应的传递过程<sup>[7-8]</sup>。目前,最常用的是三自由度机电耦合模型,通过实测电流-加速度传递函数辨识机械参数,利用电流-电压传递函数提取电气参数<sup>[9-10]</sup>。部分研究从电阻抗角度分析电流-电压特性<sup>[11-12]</sup>,但仍需输出响应数据完成机械参数辨识。为提高识别精度,一种方法是在激振器主体与台面间安装刚性结构,通过交替约束自由度逐一识别参数<sup>[13-14]</sup>;另一种方式则是将电枢简化为刚体,基于电压-位移传递关系并结合静态与动态测量获取全部参数<sup>[15]</sup>。

目前,小型激振器的建模方法已较成熟,但大型电动振动台的系统性建模研究仍显不足。大型振动台是高端装备地面验证的核心基础设施,可实现重

大装备的整机级全周期力学环境模拟,远优于仅适用于元器件级测试的小型激振器。现有建模方法普遍依赖线圈电流的高精度测量或额外手段获取机电参数,但大型振动台电流线缆尺寸超出常规测量范围,封闭结构导致内部参数难以直接测量。相比之下,电压信号易于采集。为此,笔者提出一种无电流测量的参数辨识方法,仅依据驱动电压与台面加速度响应之间的传递关系,以最简测量手段实现振动台全部物理参数的辨识。

## 1 电动振动台的物理特性

图 1 为振动台机械结构横截面示意图<sup>[7]</sup>。与扬声器类似,其核心部件为一个悬挂在径向磁场中的线圈。当电流流经线圈时会产生瞬态磁场,该磁场与原有的径向磁场相互作用,进而产生与电流大小成正比的轴向驱动力。该力传递至用于安装测试件的工作台,最终激发试件振动。

振动台径向磁场的形成主要依托 3 大导磁结构,分别为:导磁内极片、带中心通孔且环绕内极片布置的导磁外极片,以及轴向磁化的永磁体或电磁体。磁通量从磁体的两极传导至内、外极片,从而在内极片(北极)与外极片(南极)之间的气隙中形成径向磁场。

驱动线圈、线圈骨架与工作台结构共同组成电枢组件。电枢组件须精确安装在内外极之间的狭窄气隙中,并通过柔软的弹性悬架系统实现仅沿轴向的自由运动,同时约束其他方向的自由度。

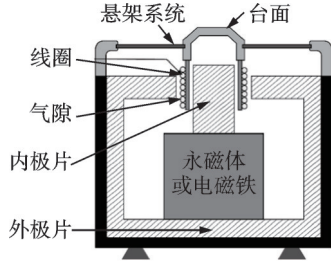


图1 振动台机械结构横截面示意图

Fig.1 Cross-sectional schematic of the shaker mechanical structure

## 2 电动振动台的数学建模

电动振动台采用集总参数法进行建模。在空载状态下,将工作台面、线圈和主体结构分别视为离散质量块,可将其机械系统构建成三自由度模型。由于振动台底座采用隔振设计,底座固有模态频率远低于振动实验工作频带,因此这里忽略底座动力学特性,将三自由度系统简化为二自由度模型。图2为振动台机电耦合模型。如图2(a)所示,该简化模型由台面质量 $m_t$ 和线圈质量 $m_c$ 两个自由度构成,其位移分别用 $x_t$ 和 $x_c$ 表示。台面与主体之间的悬架系统通过刚度 $k_h$ 与阻尼 $c_h$ 进行建模,线圈与台面之间则通过刚度 $k_c$ 与阻尼 $c_c$ 相连。

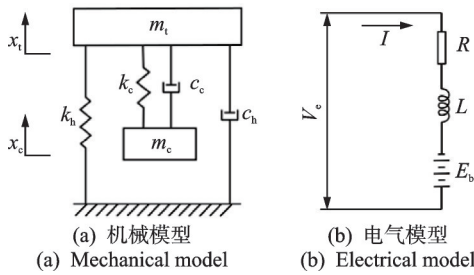


图2 振动台机电耦合模型

Fig.2 Electromechanical coupling model of shaker

工作台面的振动方程为

$$m_t \ddot{x}_t + c_h \dot{x}_t + k_h x_t = c_c (\dot{x}_c - \dot{x}_t) + k_c (x_c - x_t) \quad (1)$$

线圈的振动方程为

$$m_c \ddot{x}_c + c_c (\dot{x}_c - \dot{x}_t) + k_c (x_c - x_t) = K_f I(t) \quad (2)$$

其中: $K_f = Bnl$ ,近似视为力-电流常数,表示在磁感应强度为 $B$ 的磁场中,有效长度为 $l$ 、匝数为 $n$ 的线圈内通过单位电流时产生的安培力。

该机电耦合关系表明,动圈输入驱动力与线圈电流呈线性关联,现有研究大多依托线圈电流-台面加速度频响函数实现振动台机械动力学参数辨识,正是基于该机理。

由于电气系统与机械系统之间存在紧密的耦合关系,两者共同构成振动台整体机电动力学响应,因此在构建振动台模型时,还需考虑电气部分的建模。如图2(b)所示,当线圈在磁场内移动时,线圈上会产生与速度成正比的电压,即反电动势。线圈两端电压 $V_c$ 由电感 $L$ 、电阻 $R$ 及反电动势 $E_b$ 共同决定,其表达式为

$$V_c(t) = L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + E_b \quad (3)$$

其中: $E_b = K_f \dot{x}_c$ 。

驱动电压信号易于采集是笔者所提辨识方法成立的基本前提,若无法实现电压便捷测量,则本研究思路失去实际意义。由于受功率放大器(简称“功放”)的影响,施加于线圈的电压与实际设备输出的驱动信号之间存在偏差,因此引入增益因子 $g$ 进行补偿修正。修正后,线圈两端电压 $V_c$ 与放大器输入端的驱动电压 $V$ 满足

$$V_c(t) = gV(t) \quad (4)$$

对式(1)~(4)进行拉普拉斯变换,整理得到电压-加速度传递函数模型为

$$H_{acc,v} = \frac{s^2 X_t}{V} = \frac{g(p_1 s^3 + p_2 s^2)}{p_3 s^5 + p_4 s^4 + p_5 s^3 + p_6 s^2 + p_7 s + p_8} \quad (5)$$

其中: $s$ 为拉普拉斯变换中的复频率。

传递函数多项式系数与振动台参数之间的关系为

$$\begin{cases} p_1 = K_f c_c \\ p_2 = K_f k_c \\ p_3 = m_c m_t L \\ p_4 = m_c m_t R + (m_c c_h + c_c M) L \\ p_5 = m_t K_f^2 + (m_c c_h + c_c M) R + \\ \quad (m_c k_h + c_c c_h + k_c M) L \\ p_6 = (c_c + c_h) K_f^2 + (m_c k_h + c_c c_h + k_c M) R + \\ \quad (c_c k_h + k_c c_h) L \\ p_7 = (k_c + k_h) K_f^2 + (c_c k_h + k_c c_h) R + k_c k_h L \\ p_8 = k_c k_h R \end{cases} \quad (6)$$

其中: $M$ 为可移动部分质量, $M = m_t + m_c$ 。

在数据处理以及可视化阶段,令 $s = j2\pi f$ , $j$ 为虚数单位,则式(5)转化为频率响应函数(frequency response function, 简称FRF)。后文所述FRF均特指

驱动电压-台面加速度频率响应函数。

式(5)和式(6)建立了驱动电压与振动台台面加速度响应之间的线性关系,式中的 $m_t, m_c, k_h, k_c, c_h, c_c, K_f, R, L$ 和 $g$ 这10个物理参数即为下一步参数识别工作的目标。

### 3 参数识别

#### 3.1 参数确定方法

为提高复杂系统参数识别的精度与稳定性,研究者提出了结合振动响应分析与优化策略的方法<sup>[16-17]</sup>。对于基于响应数据的传递函数模型参数反演问题,曲线拟合是工程中常用的实现手段之一,其本质上可看作一个两步优化过程。首先,对式(5)进行归一化处理,由归一化模型拟合实测数据,得到多项式系数 $p_1 \sim p_8$ ;然后,借助优化算法求解式(6),进而反推全部目标物理参数<sup>[6,14-15]</sup>。然而,由于所建立的传递函数模型阶数较高、待识别参数较多,系统呈现高度非线性特征。若完全依赖传统数学途径识别所有参数,则两步优化方法的适用性存在明显局限。具体来说,第1步虽可在数学上拟合实测FRF曲线,但所得多项式系数缺乏物理约束,可能偏离真实物理意义,偏离过大时会导致第2步优化失败。此外,为保证多项式系数的唯一性而采用的归一化处理,会丢失一个独立方程,从而需要通过额外测量至少一个物理参数来弥补方程数量不足,这既增加了识别工作的复杂性,也违背简化流程的初衷。

针对上述问题,本研究提出直接以振动台物理参数为优化变量的方法,以避免多项式系数优化所带来的不稳定性与适用性局限。需要注意的是,式(5)描述的高维强非线性模型属于典型非凸优化问题,难以直接应用梯度下降、高斯-牛顿等确定性算法。其主要难点在于参数数量级差异显著,导致初始值难以设定,算法易陷入局部最优。为此,笔者提出一体化混合优化策略,即以振动台的物理参数为优化变量,先采用随机优化进行全局搜索,得到近似全局最优解后,再以该解作为确定性算法的初始值进行局部精细优化。

笔者选用粒子群优化(particle swarm optimization, 简称PSO)算法完成参数初步辨识。该算法在搜索空间内初始化一群粒子,每个粒子代表一组潜在解(即参数组合),并通过迭代更新其位置与速度,逐步导向全局最优区域。尽管PSO在全局探索方面表现出色,能够有效避免早熟收敛,但其局部开发

能力相对有限。因此,在完成初步寻优后,引入确定性优化算法进行局部精细搜索。所谓确定性算法,指搜索方向严格由数学规则决定,其搜索路径与结果具有确定性和完全可重复性。笔者根据问题特征采用信赖域反射法(trust region reflection, 简称TRR),该算法兼具梯度下降法的稳定性和牛顿法的快速收敛特性,无需引入罚函数即可处理边界约束,有效提升了参数辨识精度。

常用的目标函数评价指标包含残差绝对值、残差平方和、均方误差(mean squared error, 简称MSE)和归一化均方根误差等。笔者采用模型预测FRF与实测FRF之间的均方误差作为全局与局部优化的目标函数度量指标,依据为:①相较于残差绝对值指标,MSE的平方项具有连续可微的数学特性,便于采用梯度类优化算法进行高效求解;②MSE对较大偏差更为敏感,有助于抑制频响曲线高幅值区间的拟合误差,从而在全频带范围内获得更均衡的精度;③在系统识别阶段,目标函数的核心任务是减小模型响应与实测曲线之间的差异,而非追求其评估结果的绝对普适性。从优化本质上讲,最小化残差平方、最小化MSE、最小化均方根误差以及归一化均方根误差在最优解层面相互等价,但均方根误差与归一化均方根误差需进行平方根运算,增加冗余计算量,影响识别效率。相比之下,MSE在保持与样本容量无关的可比性的同时,减少了额外计算负担,更适用于本研究的识别流程。在构建目标函数时,还可根据实际需求对目标频率点增大权重,降低特定频带的拟合误差。

目标函数的表达式为

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

其中: $N$ 为离散时域信号经快速傅里叶变换后得到的离散谱线数; $y_i$ 为实测频响函数; $\hat{y}_i$ 为模型预测频响函数; $\lambda_i$ 为权重因子,且 $\sum_{i=1}^N \lambda_i = N$ 。

在初始化阶段,若已通过出厂标定或其他途径获得振动台参数的参考值,可将其作为特定粒子的初始位置输入优化程序,以显著提升迭代收敛效率;若无先验信息,则采用随机初始化策略。搜索空间通过设定各参数上下限予以定义,其边界值依据设备手册、相关文献或工程经验确定。关于功率放大器的增益参数,现有公开资料较少。其核心作用是将低功率输入电信号转换为高电流信号输出,典型的输入信号为有效值 $\pm 5 \text{ V}$ 的电压,而大型电动振

动台配套功率放大器的额定输出电压一般在 200~1 000 V 之间,因此推算增益因子的搜索范围在数十倍至上百倍。种群规模与最大迭代次数的设置,需结合问题维度与复杂度,在计算成本与辨识精度之间完成折中配置。

3.2 仿真算例

在正式实验开展前构建仿真算例,用来校验所提出参数辨识方案的可行性,并定量评价辨识精度。给振动台模型各参数指定一个数值,模拟该二自由度系统的 FRF,并将模拟 FRF 作为实测信号输入参数识别程序。各参数赋值为: $m_t=59\text{ kg}$ , $m_c=13\text{ kg}$ , $k_h=3.29\times 10^5\text{ N/m}$ , $k_c=1.95\times 10^9\text{ N/m}$ , $c_h=3\,000\text{ N}\cdot\text{s/m}$ , $c_c=2\,400\text{ N}\cdot\text{s/m}$ , $K_t=136\text{ N/A}$ , $R=0.2\,\Omega$ , $L=1\times 10^{-4}\text{ H}$ , $g=100$ 。目标函数由式(7)确定,为实现全频带均匀拟合,权重因子统一设为 1。所有待识别参数的初始最优值通过随机生成,优化前的初始模型 FRF 与理论 FRF 对比如图 3 所示。

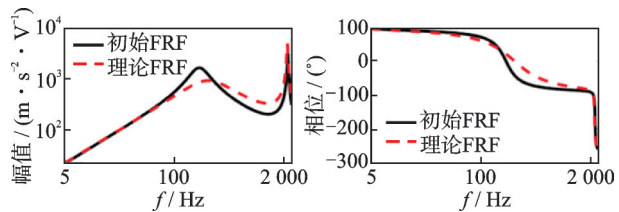


图 3 优化前的初始模型 FRF 与理论 FRF 对比  
Fig.3 Comparison between the initial model and theoretical FRF before optimization

基于上述频响数据,采用本研究方法进行参数识别,仿真算例识别结果如表 1 所示。结果分析表明,部分参数识别结果与真实值之间存在显著误差,但利用该参数集建立的仿真模型所得的频响函数与

理论 FRF 对比,呈现出良好的一致性。优化后的仿真 FRF 与理论 FRF 对比结果如图 4 所示。可见,二者均方误差仅为  $2.705\times 10^{-6}$ ,表明优化过程本身并未失败。这说明,在仿真频响函数能够较好复现理论曲线的情况下,参数识别结果仍可能存在不唯一性,即不同的参数组合可能产生相近的频响特性。

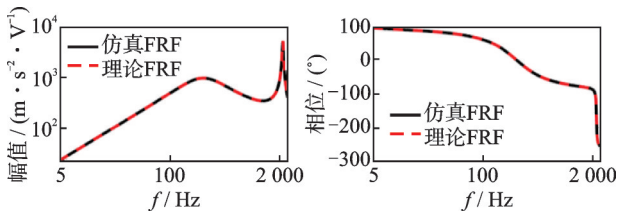


图 4 优化后的仿真 FRF 与理论 FRF 对比  
Fig.4 Comparison between simulated FRF and theoretical FRF after optimization

为此,笔者在识别过程中引入附加质量法,同时对空载和加载两种工况进行识别分析。图 5 为加装 37 kg 负载的二自由度系统示意图。假设负载与台面刚性连接。将负载工况数据纳入目标函数后,重复参数识别流程。仿真算例参数识别结果如表 2 所示。可以看出,所有参数识别误差均降至 1% 以内,仿真与理论频响之间的 MSE 降至  $8.7\times 10^{-11}$ 。

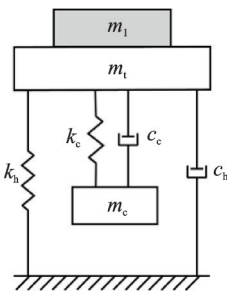


图 5 加装 37 kg 负载的二自由度系统示意图  
Fig.5 Mechanical model of shaker with 37 kg load added

| 表 1 仿真算例识别结果                                    |                      |                      |        |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Tab.1 Identification results of simulation case |                      |                      |        |
| 参数                                              | 理论值                  | 识别值                  | 相对误差/% |
| $m_t/\text{kg}$                                 | 59.00                | 44.23                | -25.03 |
| $m_c/\text{kg}$                                 | 13.00                | 10.03                | -22.79 |
| $k_h/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$              | $3.29\times 10^5$    | $2.49\times 10^5$    | -24.22 |
| $k_c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$              | $1.95\times 10^9$    | $1.50\times 10^9$    | -23.04 |
| $c_h/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ | 3 000.00             | 2 441.98             | -18.60 |
| $c_c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ | 2 400.00             | 1 872.07             | -21.99 |
| $K_t/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$              | 136.00               | 140.21               | 3.09   |
| $R/\Omega$                                      | 0.200                | 0.282                | 41.11  |
| $L/\text{H}$                                    | $1.00\times 10^{-4}$ | $1.42\times 10^{-4}$ | 41.67  |
| $g$                                             | 100.00               | 103.36               | 3.35   |

| 表 2 仿真算例参数识别结果                                            |                      |                      |        |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------|
| Tab.2 Parameter identification results of simulation case |                      |                      |        |
| 参数                                                        | 理论值                  | 识别值                  | 相对误差/% |
| $m_t/\text{kg}$                                           | 59.00                | 59.00                | 0      |
| $m_c/\text{kg}$                                           | 13.00                | 13.00                | 0      |
| $k_h/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$                        | $3.29\times 10^5$    | $3.29\times 10^5$    | 0      |
| $k_c/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$                        | $1.95\times 10^9$    | $1.95\times 10^9$    | 0      |
| $c_h/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$           | 3 000.00             | 2 999.98             | 0      |
| $c_c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$           | 2 400.00             | 2 400.00             | 0      |
| $K_t/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$                        | 136.00               | 135.79               | -0.16  |
| $R/\Omega$                                                | 0.200                | 0.199                | -0.31  |
| $L/\text{H}$                                              | $1.00\times 10^{-4}$ | $9.97\times 10^{-5}$ | -0.31  |
| $g$                                                       | 100.00               | 99.84                | -0.16  |

该结果表明,采用多工况数据是确保参数识别准确性的关键前提。本算例验证了所提出方法的有效性,并揭示了数据多样性在缓解参数识别结果中的非唯一性问题,为后续实验测量与辨识提供了理论依据。

### 3.3 实验辨识

实验以某款电动振动台为例,其额定正弦峰值推力为117.6 kN,工作频率为2~2 500 Hz。实验目标为测量驱动电压-台面加速度FRF。将加速度传感器安装在台面中心并连接信号线,分别在空载与加装37 kg负载条件下进行正弦扫频实验并记录实验数据。

基于前述方法及相关参数设置,同时对两组实测数据进行辨识,得到模型的最优参数集,再利用式(5)合成仿真频响函数,进一步与实测曲线进行对比以验证建模的有效性。优化前后仿真FRF与实测FRF对比如图6所示。

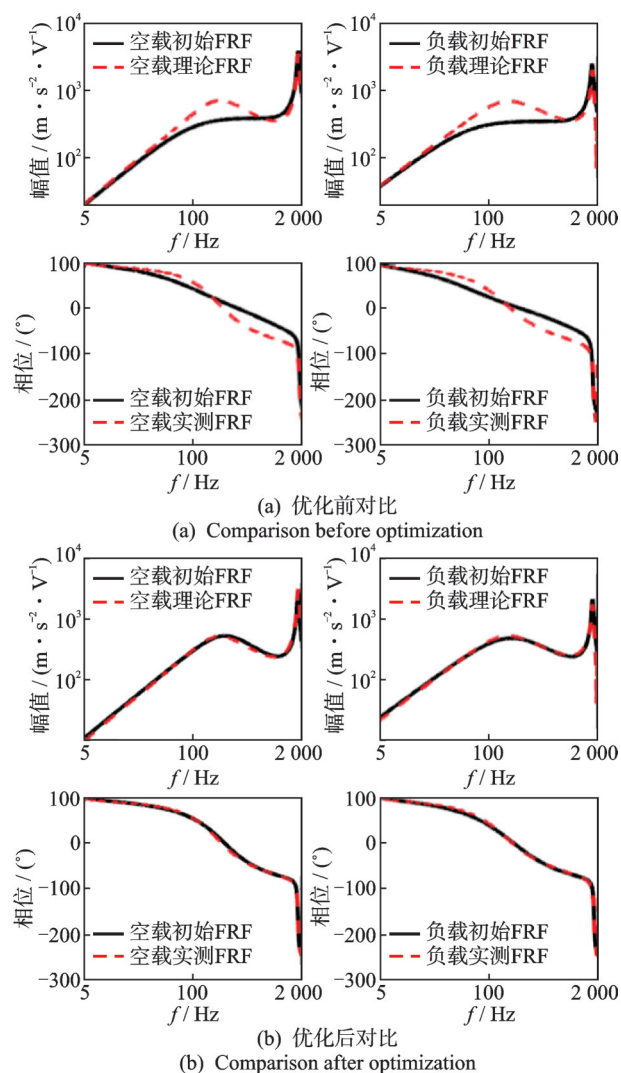


图6 优化前后仿真FRF与实测FRF对比

Fig.6 Comparison between simulated FRF before and after optimization and actual measured FRF

在空载工况下,仿真与实验数据的拟合度为88.1%, $MSE=1\ 659$ ;负载工况下拟合度为76.7%, $MSE=2\ 059$ 。为进一步量化误差,引入归一化均方根误差(normalized root mean square error,简称NRMSE)作为评价指标。图7为仿真FRF与实测FRF的NRMSE对比。在1 600 Hz以下频段,最大误差不超过7%,表明模型在该区间拟合良好;在负载工况的高频段,误差升至29.5%。该偏差主要源于两方面:①高频段幅值显著升高导致绝对误差增大;②实验误差,例如附加质量块的非理想刚体特性,以及负载与台面之间的非理想连接条件,均可能导致高频段测量曲线失真。尽管在高频幅值精度上存在偏差,频响函数作为输入与输出间的传递关系,其能准确反映共振频率。可见,本模型表现出良好的辨识能力。

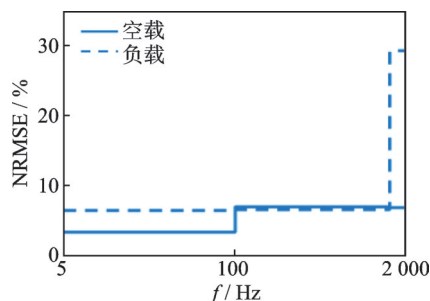


图7 仿真FRF与实测FRF的NRMSE对比

Fig.7 Comparison of NRMSE between simulated FRF and measured FRF

为了提高搜索到全局最优概率,令程序独立运行10次,多次优化均收敛到相同或相似的误差水平。图8为独立运行10次的MSE结果。可以看出,该识别流程相对稳定且对初始值不敏感,从而增加了方法的可信度。

图9为最佳MSE随迭代步数的收敛变化曲线,反映了最优寻优过程中目标函数随迭代次数的收敛过程。可以看出,目标函数值在前20次迭代内快速

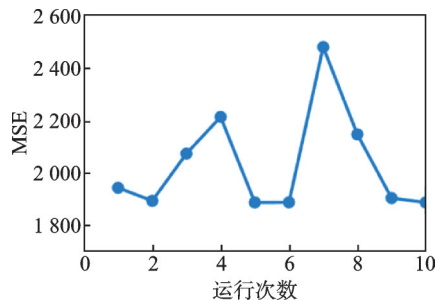


图8 独立运行10次的MSE结果

Fig.8 MSE for 10 independent runs

下降,MSE从初始的 26 736.61 迅速降低至 2 088.7;随着迭代进行至 40 次,函数值逐渐趋于稳定。该收敛过程充分说明了此识别方法具有良好的稳定性和较高的优化效率。

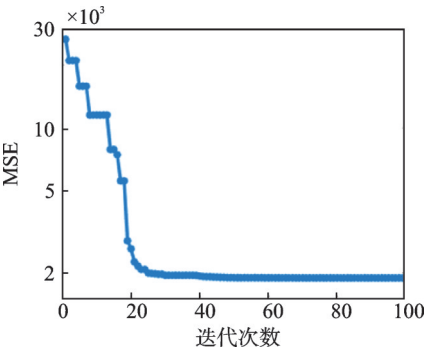


图 9 最佳 MSE 随迭代步数的收敛变化曲线  
Fig.9 Evolution of the optimal MSE with optimization iterations

3.4 平板测试件验证

为验证建模方法的可行性,笔者对铝合金平板测试件进行正弦扫频振动实验。将振动台台面的加速度响应信号作为对试件结构的基础运动激励,通过测试获得试件加速度与基础加速度之间的传递函数,完成试件模态分析。试件尺寸为 160 mm × 120 mm × 10 mm,有 2 个直径为 12 mm 的通孔用于与振动台台面连接。实验共布设 6 个加速度传感器:1 个布置在台面中心,用于监测运动激励,其余 5 个分布在试件表面以采集响应信号。图 10 为实验测点布置示意图。

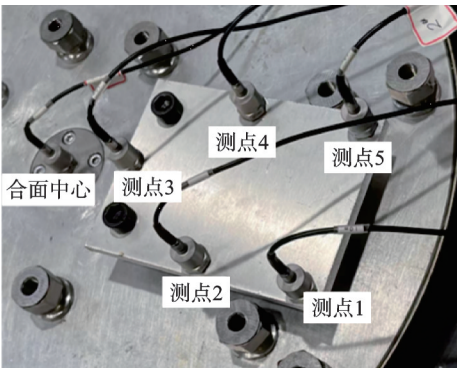


图 10 实验测点布置示意图  
Fig.10 Experimental measurement point arrangement

在有限元软件中,基于前文得到的机械参数,建立振动台二自由度模型。将台面与动圈等效为刚体,几何构型不受实际外形约束,为简化建模与后续分析,统一简化为矩形。铝合金平板的弹性模量设

为 71 GPa,泊松比取 0.3。根据实际测量的平板、线缆、传感器、螺栓与螺母的质量、几何尺寸以及安装位置进行精确建模。各组件独立建模后进行装配,考虑实际连接中存在的间隙与不对称性,在连接处适当降低了弯曲刚度,并设置差异化的竖向连接刚度。振动台-测试件装配体有限元模型如图 11 所示。对其进行模态分析,得到平板前 3 阶模态频率的实验与仿真对比,如表 3 所示。

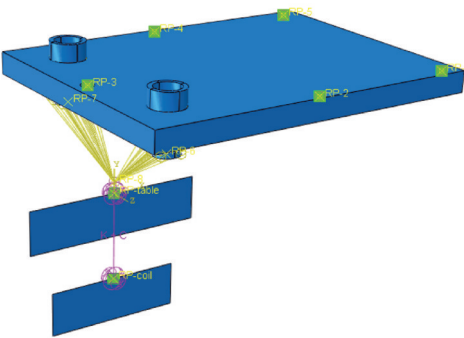


图 11 振动台-测试件装配体有限元模型  
Fig.11 Finite element model of the vibration shaker-test specimen assembly

表 3 平板前 3 阶模态频率的实验与仿真对比

| Tab.3 Comparison of experimental and simulated results for the first 3 modal frequencies of the plate |               |               |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|-------|
| 模态阶次                                                                                                  | 实验模态频率/<br>Hz | 仿真模态频率/<br>Hz | 误差/%  |
| 1                                                                                                     | 300.98        | 300.69        | -0.10 |
| 2                                                                                                     | 815.44        | 818.37        | 0.36  |
| 3                                                                                                     | 1 690.06      | 1 709.50      | 1.15  |

由表 3 可知,铝合金平板前 3 阶模态频率的有限元仿真值与实验值之间的误差均小于 2%,验证了整体模型构建的合理性。在此基础上,建立从输入电压到电磁驱动力间的传递函数,将实采的电压信号转换为仿真电磁力载荷,施加在装配体模型的线圈位置。通过动力学分析获取 5 个测点及台面的加速度响应数据,进而计算得到各测点相对于台面的仿真加速度频响函数。

铝合金平板 5 个测点与台面的实测加速度幅频响应与仿真结果对比如图 12 所示。其中,纵坐标幅值为量纲一的量。可以看出,在 1 000 Hz 以上频段,有限元仿真结果略高于实测值,该误差主要来源于连接条件的简化及其他建模假设。总体而言,整体仿真幅频曲线与实验曲线吻合程度良好,验证了笔者所建振动台模型的准确性与工程应用价值。

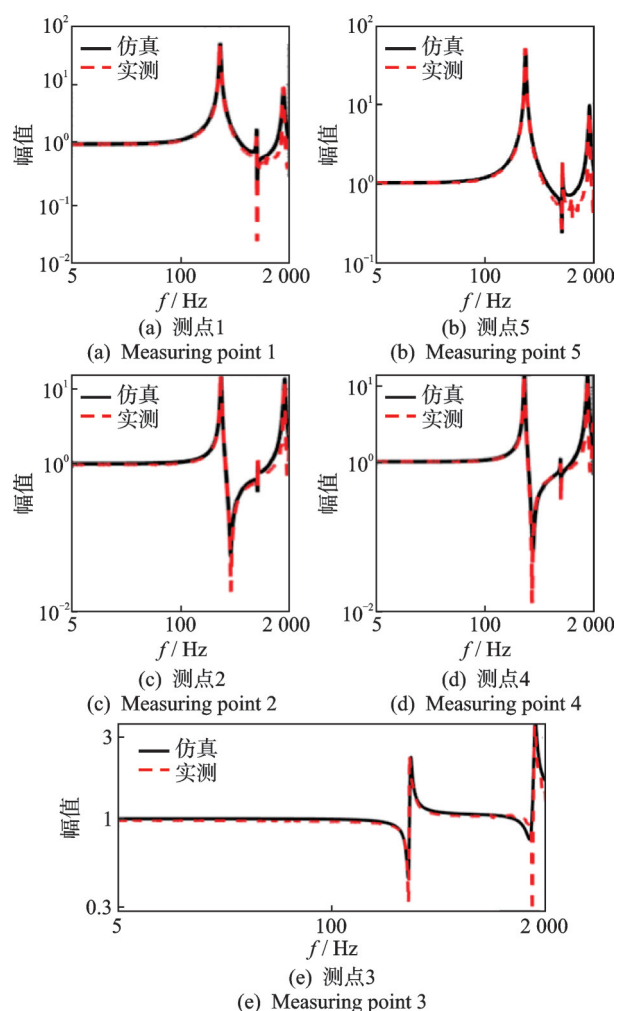


图12 平板5个测点与台面的实测加速度幅频响应与仿真结果对比

Fig.12 Comparison of measured and simulated acceleration amplitude-frequency responses between 5 points on the plate and the table

针对3.1节提出的参数辨识多解性问题,为量化不同参数解对后续仿真结果的影响规律,选取两组优化结果开展对比验算:一组为目标函数 $MSE=1\ 890.57$ 的最优参数解,另一组为 $MSE=1\ 891.04$ 的次优参数解。在有限元模型的其余建模条件保持不变的前提下,仅替换振动台对应的两套辨识参数,分别开展铝合金平板加速度传递特性仿真计算。

图13为两组不同参数的测点-台面加速度幅频响应对比。其中,纵坐标幅值为量纲一的量。可以看出,两组不同参数所得的仿真曲线几乎完全重合。这表明:只要振动台模型的频响函数与实测结果充分吻合,即便振动台模型的物理参数无法被唯一确定,仍能在有限元仿真中准确预测结构的振动传递特性。

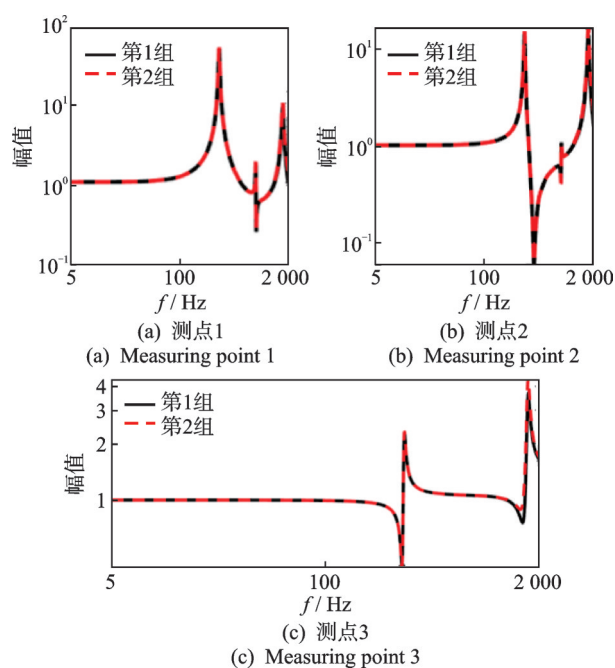


图13 两组不同参数的测点-台面加速度幅频响应对比  
Fig.13 Comparison of acceleration amplitude-frequency responses between measurement points and the table with 2 different parameters

## 4 结 论

1) 所提出方法在保证精度的同时,显著简化了建模步骤,其参数识别过程仅需依赖不少于2个工况的频响数据,以改善识别结果不唯一的问题。

2) 装配体的有限元分析结果表明,仿真频响在主要频段与实测数据高度吻合,且不同识别参数组合均可得到近似的结果。这证明预测试件传递特性的关键在于振动台模型能否准确复现实测的驱动电压-台面中心加速度频响函数,而无需依赖电流信号的测量。

3) 本研究方法存在一定局限性:模型未考虑实际工况中的横向效应,同时在负载工况下忽略了连接因素的影响。后续研究可在此基础上进一步针对上述非线性变量展开分析,以实现更复杂测试场景的精细化建模。

## 参 考 文 献

- [1] 钱海玥,胡冠杰,张在超,等.基础激励下的振动台变压器虚拟实验研究[J].变压器,2025,62(1): 51-60.  
QIAN Haiyue, HU Guanjie, ZHANG Zaichao, et al. Research on virtual test of shaker transformer structure under basic excitation[J]. Transformer, 2025, 62(1): 51-60.(in Chinese)

- [2] 杨来浩,罗旭良,南长峰,等.数字孪生框架下叶片裂纹稀疏定量诊断方法[J/OL].振动、测试与诊断,1-9 [2026-06-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1361.V.20260128.1018.002>.  
YANG Laihao, LUO Xuliang, NAN Changfeng, et al. Digital twin-driven quantitative diagnostic method of rotor blade cracks with sparse regularization[J/OL]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1-9 [2026-06-07]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1361.V.20260128.1018.002>. (in Chinese)
- [3] 黄磊,郭熠铭,蒋兴沛,等.数字孪生技术在航天器环境实验中的应用研究[J].机械设计,2025,42(增刊1):194-200.  
HUANG Lei, GUO Yiming, JIANG Xingpei, et al. Application research of digital twin technology in spacecraft environmental experiments[J]. Journal of Machine Design, 2025, 42(S1): 194-200. (in Chinese)
- [4] 王伟.三轴向振动实验系统及其关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [5] 左曙光,黄荣奎,冯朝阳,等.考虑驱动线圈位移变化的电动振动台非线性电磁力建模与分析[J].电工技术学报,2019,34(21):4441-4448.  
ZUO Shuguang, HUANG Rongkui, FENG Chaoyang, et al. Modeling and analysis of nonlinear electromagnetic force of electric shaker considering displacement change of driving coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4441-4448. (in Chinese)
- [6] 陈颖,陈怀海.一种二自由度系统物理参数识别方法[C]//第十届全国振动理论及应用学术会议.南京:中国振动工程学会,2011:207-213.
- [7] LANG G F, SNYDER D. Understanding the physics of electrodynamic shaker performance[J]. Sound and Vibration, 2001, 35(10): 24-33.
- [8] VAROTO P S, DE OLIVEIRA L P R. Interaction between a vibration exciter and the structure under test [J]. Sound and Vibration, 2002, 36(10): 20-26.
- [9] COPPOTELLI G, MASTRODICASA D, WAIMER S, et al. Challenges of coupling effective masses and shaker models for virtual shaker testing[C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, FL: AIAA, 2020: 2020-1444.
- [10] 郑威,贺旭东,陈怀海.虚拟振动台实验技术在多维随机振动实验中的应用[J].导弹与航天运载技术,2020(3):102-106.  
ZHENG Wei, HE Xudong, CHEN Huaihai. Application of virtual shaker testing in multi-dimensional random vibration test[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(3): 102-106. (in Chinese)
- [11] SCHULTZ R. Calibration of shaker electro-mechanical models[C]//Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Cham: Springer, 2020: 133-144.
- [12] PUSTKA M, ČERNÍK M, PALSOVICS N. Estimation of electrodynamic exciter parameters by means of circle-fit method[J]. Acta IMEKO, 2025, 14(1): 1-6.
- [13] MARTINO J, HARRI K. Virtual shaker modeling and simulation, parameters estimation of a high damped electrodynamic shaker[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151: 375-384.
- [14] LI J P, DENG K, WANG G, et al. An effective small electrodynamic shaker modeling method [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2457(1): 012026.
- [15] SHISHKOVSKI D, PECIOSKI D, IGNJATOVSKA A, et al. Modeling and characterizing of electrodynamic shaker ESE 211[C]//2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro: IEEE, 2024: 1-4.
- [16] 刘纲,罗钧,李荣富.基于ERA和Gabor最优分解的结构阻尼比识别方法[J].振动、测试与诊断,2025,45(4):642-649.  
LIU Gang, LUO Jun, LI Rongfu. Damping Ratios Identification Based on Eigensystem Realization Algorithm and Optimized Gabor Decomposition [J]. Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(4): 642-649. (in Chinese)
- [17] 徐希堃,洪彧,许靖业,等.基于先验振型的贝叶斯结构模态参数识别方法[J].振动、测试与诊断,2026,46(3):636-643.  
XU Xikun, HONG Yu, XU Jingye, et al. Bayesian structural modal parameter identification method based on prior vibration mode shapes[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2026, 46(3): 636-643. (in Chinese)



**第一作者简介:**李淑霏,女,1999年3月生,硕士。主要研究方向为振动台建模及参数识别、动力学仿真。  
E-mail:suey324@nuaa.edu.cn

**通信作者简介:**贺旭东,男,1978年8月生,博士、副教授。主要研究方向为振动测试与控制。  
E-mail:hexudong@nuaa.edu.cn