

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614952

基于神经网络逆模型在线迭代优化的 三轴标准振动台解耦控制*

张旭飞, 武艺凡, 王 硕, 魏 鑫, 许 佗

(太原理工大学机械工程学院 太原 030024)

摘 要:为确保三轴振动传感器的校准精度,需由三轴标准振动台输出低耦合、低失真的振动信号。然而,由于三轴标准振动台结构的复杂性和非线性特性,其输出信号存在显著的残余耦合和谐波失真。为此,提出一种神经网络逆模型在线迭代解耦控制方法,以实现轴间解耦并提高输出信号精度。首先,以簧片式三轴标准振动台为研究对象,对其解耦结构及轴间运动耦合特性进行了理论分析,并量化了正交振动抑制比和谐波失真度。然后,利用神经网络构建了三轴标准振动台系统的逆模型,并采用前馈串联方式对原系统实施控制,初步改善了轴间耦合干扰和谐波失真。在此基础上,为更精准表征三轴标准振动台的动态耦合特性,引入在线迭代学习机制,通过动态更新样本对逆模型进行周期性迭代优化,逐步提升其拟合精度,从而实现了三轴标准振动台轴间耦合和谐波失真的精确控制。最后,基于 AD7606B 搭建了振动采集分析系统,并集成构建了三轴标准振动台实验测试系统。实验分析结果表明,神经网络逆模型在线迭代解耦控制方法可将三轴标准振动台的正交振动抑制比控制在 2% 以内,同时将谐波失真度控制在 1% 以内,验证了该解耦控制方法的有效性,为多轴振动测试系统的高精度解耦控制提供了技术参考。

关键词: 三轴标准振动台;轴间耦合;谐波失真;神经网络逆模型;逆模型迭代优化

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Decoupling control of tri-axial standard vibrator based on online iteration optimization of neural network inverse model

Zhang Xufei, Wu Yifan, Wang Shuo, Wei Xin, Xu Tuo

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To ensure the calibration accuracy of tri-axial vibration sensors, it is necessary for the tri-axial standard vibrator to output low-coupling and low-distortion vibration signals. However, due to the complexity and nonlinearity of the tri-axial standard vibrator structure, the output signals exhibit significant residual coupling and harmonic distortion. To address this issue, this paper proposes a neural network inverse model online iterative decoupling control method to achieve decoupling between axes and improve the accuracy of the output signals. Firstly, taking the leaf-spring-type tri-axial standard vibrator as the research object, the decoupling structure and the coupling characteristics of inter-axis motion were theoretically analyzed, and the orthogonal vibration suppression ratio and harmonic distortion were quantified. Then, the inverse model of the tri-axial standard vibrator system was constructed using the neural network, and the original system was controlled by feedforward series method, which initially improved the inter-axis coupling interference and harmonic distortion. On this basis, to more accurately characterize the dynamic coupling characteristics of the tri-axial standard vibrator, an online iterative learning mechanism was introduced. By dynamically updating the samples, the inverse model was periodically iteratively optimized to gradually improve its fitting accuracy, thereby achieving precise control of the inter-axis coupling and harmonic distortion of the tri-axial standard vibrator. Finally, a vibration acquisition and analysis system was built based on AD7606B, and an experimental test system for the tri-axial standard vibrator was integrated and constructed. The experimental analysis results show that the neural network inverse model online iterative decoupling control method can control the orthogonal vibration suppression ratio of the tri-

收稿日期: 2026-02-12 Received Date: 2026-02-12

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52375544)、山西省研究生实践创新项目(2025SJ125)资助

axial standard vibrator within 2% and the harmonic distortion within 1%, verifying the effectiveness of the decoupling control method and providing a technical reference for high-precision decoupling control of multi-axis vibration test system.

Keywords: tri-axial standard vibrator; inter-axis coupling; harmonic distortion; neural network inverse model; inverse model iterative optimization

0 引 言

近年来,随着三轴振动测量在工业生产和科研领域的广泛应用^[1-3],对测量过程中使用的三轴振动传感器的精度要求日益严格。针对直流响应或准静态响应的三轴振动传感器,通常采用静态重力校准法对其灵敏度等参数进行校准^[4-5];而对于交流耦合或动态响应的三轴振动传感器,则多采用单轴激励动态校准法^[6]。然而,该方法受限于单维度激励,为获取三维信息只能进行重复标定,导致操作过程繁琐,会引入多次装调误差,且无法准确获得交叉灵敏度等关键耦合参数。为获得完整的动态灵敏度矩阵,需进一步采用三轴激励动态校准法^[7-8]。该方法利用三轴标准振动台提供总谐波失真度(total harmonic distortion, THD)低于 2% 的三轴同步振动激励^[9-10],由标准三轴振动传感器与待标定三轴振动传感器同步检测激励信号,通过比较两者的输出信号,获得待标定传感器的计量特性参数。在校准过程中,三轴标准振动台各轴间耦合导致基频激励信号的幅值与相位精度下降。同时,系统非线性特性及轴间耦合使输出激励信号引入高次谐波成分,产生明显谐波失真。特别是在三轴标准振动台用于低频振动传感器校准时,通常需增加行程来提高输出激励信号信噪比。但在大行程振动时,轴间耦合对输出信号精度的影响更加显著,导致严重的谐波失真^[11-12]。

针对三轴标准振动台的轴间运动耦合问题,Saadatz 等^[13]利用球窝关节设计了可解耦三轴振动台。Liu 等^[14]则采用空气静压轴承实现各轴向驱动力传递与运动引导,从而构建了低交叉耦合的三轴振动台结构。然而,上述基于精密机械结构的解耦方法较为复杂,对装配精度要求较高,导致成本昂贵且维护困难。为此,部分学者基于柔性解耦结构开展了进一步研究:何闻等^[15]提出了一种基于簧片式解耦结构的三分量标准振动台,通过两组正交布置柔性簧片,有效抑制了非传动轴方向的振动干扰,实现了三分量振动台优化解耦。张旭飞等^[16]基于非支配排序遗传算法,进一步对簧片解耦结构进行了多参数优化。Hao^[17]通过在空间结构中巧妙布置柔性梁和铰链,形成特定运动学链,从而实现了整体结构的运动解耦。

基于柔性解耦结构优化设计的三轴标准振动台轴间耦合现象已得到有效抑制。然而,由于解耦结构的复杂性和非线性特性,残余耦合与波形失真仍无法避免。目前国内外研究仍集中于单轴振动台的谐波失真控制。

She 等^[18]和 Guan 等^[19]分别基于模糊控制策略和复域直接前馈位置控制算法搭建了振动台的闭环反馈控制系统。Zhang 等^[20]则在不使用传感器的条件下准确获取振动信号,并通过反馈系统有效抑制了单轴波形失真。然而,上述闭环控制系统仍存在不稳定和自激振荡等问题。为此,Qiu 等^[21]提出了基于非线性动力学模型的开环谐波补偿方法,通过计算高阶谐波补偿电流抑制波形失真。安欣等^[22]和马立英等^[23]分别采用粒子群迭代学习和位移迭代控制方法,实现了对单轴振动台输出波形的迭代修正和谐波抑制。上述控制方法虽能有效改善单轴振动台的输出性能,但无法实现对多轴振动台的轴间动态耦合特性的有效解耦控制。

综上所述,针对三轴振动台存在的轴间耦合和谐波失真问题,现有结构解耦方法难以彻底消除残余耦合,而传统控制系统多局限于单轴振动台的谐波抑制。为此,本文提出基于神经网络逆模型在线迭代的解耦控制方法。该方法不依赖于被控对象的具体机械结构或动作原理,仅利用系统的输入输出响应特性,通过在线学习逼近并迭代更新系统逆模型。从而在无精确物理模型的情况下实现多轴动态解耦与谐波抑制,适用于各类三轴振动激励结构。为更直观地展示该方法的适用性与工程价值,本文以广泛应用的簧片式三轴标准振动台为例,系统分析其轴间运动耦合特性,从而明确构建解耦控制方法的必要性及有效性。

1 簧片式三轴标准振动台

本章以簧片式三轴标准振动台为研究对象,对其解耦结构及轴间运动耦合特性进行理论分析。

1.1 簧片式解耦结构

图 1 所示的簧片式三轴标准振动台主要由三轴运动平台、3 个单轴电磁激振器及沿 x 、 y 、 z 轴布置的簧片式解耦结构组成。

簧片式解耦结构包含两组正交布置的平行簧片及其连接件,其中靠近单轴激振器的一组称为内部簧片,靠近三轴运动平台的一组称为外部簧片。三轴标准振动台各轴采用独立的电磁激振器驱动,产生的激励通过簧片结构传递至三轴运动平台。由于三轴标准振动台的结构特性,某一轴的激励会对其余两轴产生耦合干扰。以簧片式解耦结构实现 z 轴方向的解耦过程为例,当 x 轴输出振动激励信号时,在 z 轴会产生耦合干扰。该干扰通过 z

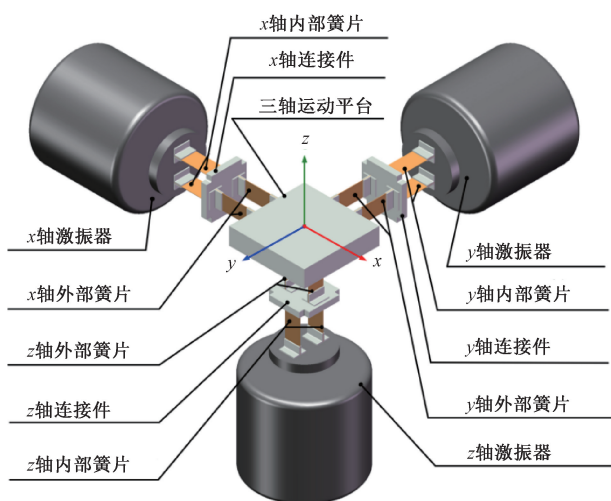


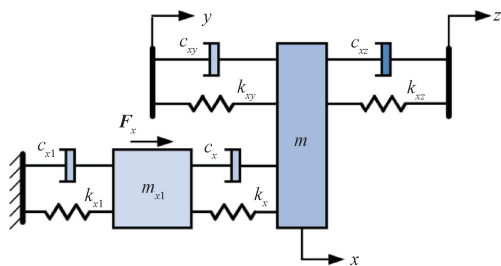
图1 簧片式三轴标准振动台

Fig. 1 Leaf-spring-type tri-axial standard vibrator

轴内部簧片沿 x 轴的弹性形变抵消;而 y 轴对 z 轴的耦合干扰则由 z 轴外部簧片的弹性形变抵消。同理,其余轴的运动解耦基于相同原理实现。然而,由于材料特性和解耦原理的限制,三轴运动平台的等效阻尼和刚度参数具有非线性特征,导致轴间运动耦合无法被完全消除。

1.2 轴间运动耦合特性分析

为量化轴间运动耦合特性,并明确耦合干扰因素,将簧片式三轴标准振动台系统沿三轴向分解为3个单轴的等效耦合模型。原系统的多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 耦合问题可转化为3个独立的单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 系统进行分析。以 x 轴耦合系统为例,将原系统的 MIMO 耦合模型沿 x 轴分解,并将 x 轴作为系统激励轴, y 、 z 轴作为耦合轴,可得到如图2所示的耦合等效模型。

图2 x 轴耦合等效模型Fig. 2 x -axis coupling equivalent model

定义 x 轴输出的激励力 F_x 为自身输入的正弦激励力与 y 、 z 轴传递的耦合干扰力的线性叠加。参数 x 、 y 和 z 分别表示运动平台沿3个轴的位移输出。 m 和 m_{x1} 分别为三轴运动平台和 x 轴运动部件的等效质量。 k_{ij} 和 c_{ij} ($i, j = x, y, z$ 且 $i \neq j$) 表示簧片式振动台系统中各激励

轴 i 与耦合轴 j 因相对运动而产生的等效刚度和等效阻尼系数。其中, x 对 y 、 z 轴产生的等效刚度和阻尼参数分别为 k_{xy} 、 c_{xy} 和 k_{xz} 、 c_{xz} ; x 轴支撑装置的等效刚度和阻尼参数为 k_{x1} 和 c_{x1} 。为简化分析,将 x 轴运动部件与三轴运动平台视为刚性连接,后续分析中忽略 x 轴对运动平台产生的等效刚度和阻尼 (k_x 和 c_x) 的影响。假设运动平台在 x 轴方向上的振动位移、速度及加速度信号分别为 x 、 $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$,其动力学方程为:

$$F_x = m_{xx}\ddot{x} + (c_{xx} + c_{xy} + c_{xz})\dot{x} + (k_{xx} + k_{xy} + k_{xz})x - c_{xy}\dot{y} - k_{xy}y - c_{xz}\dot{z} - k_{xz}z \quad (1)$$

式中: $m_{xx} = m + m_{x1}$; $k_{xx} = k_{x1}$; $c_{xx} = c_{x1}$ 。

同理,将原系统的 MIMO 耦合模型分别沿 y 和 z 轴进行分解,其耦合等效模型的动力学方程分别为:

$$F_y = m_{yy}\ddot{y} + (c_{yy} + c_{yx} + c_{yz})\dot{y} + (k_{yy} + k_{yx} + k_{yz})y - c_{yx}\dot{x} - k_{yx}x - c_{yz}\dot{z} - k_{yz}z \quad (2)$$

$$F_z = m_{zz}\ddot{z} + (c_{zz} + c_{zx} + c_{zy})\dot{z} + (k_{zz} + k_{zx} + k_{zy})z - c_{zx}\dot{x} - k_{zx}x - c_{zy}\dot{y} - k_{zy}y \quad (3)$$

式中: $m_{yy} = m + m_{y1}$; $k_{yy} = k_{y1}$; $c_{yy} = c_{y1}$; $m_{zz} = m + m_{z1}$; $k_{zz} = k_{z1}$; $c_{zz} = c_{z1}$ 。结合式(1)~(3),可得簧片式三轴标准振动台的 MIMO 耦合动力学矩阵方程为:

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中: } [M] = \begin{bmatrix} m_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & m_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & m_{zz} \end{bmatrix}; \quad [C] =$$

$$\begin{bmatrix} c_{xx} + c_{xy} + c_{xz} & -c_{xy} & -c_{xz} \\ -c_{yx} & c_{yy} + c_{yx} + c_{yz} & -c_{yz} \\ -c_{zx} & -c_{zy} & c_{zz} + c_{zx} + c_{zy} \end{bmatrix}; \quad [K] = \begin{bmatrix} k_{xx} + k_{xy} + k_{xz} & -k_{xy} & -k_{xz} \\ -k_{yx} & k_{yy} + k_{yx} + k_{yz} & -k_{yz} \\ -k_{zx} & -k_{zy} & k_{zz} + k_{zx} + k_{zy} \end{bmatrix}。$$

由式(4)可知,各轴振动响应均受到自身激励力及其他两轴耦合作用的共同影响。为量化轴间耦合的影响,设定正交振动抑制比 C 表征激励轴在耦合轴上产生的非期望输出。下文所述抑制比公式及后续分析均基于稳态正弦激励。令 A_x 、 A_y 和 A_z 分别表示各轴向振动加速度的峰值。当系统仅受 x 轴激励时,正交振动抑制比可表示为:

$$C_x = \frac{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}{A_x} \times 100\% \quad (5)$$

当 x 、 y 轴同为激励轴时,正交振动抑制比可表示为:

$$C_{xy} = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \times 100\% \quad (6)$$

同理,对于三轴标准振动台输出的其余振动响应,其轴间耦合影响也可通过相应的正交振动抑制比表征。

1.3 簧片式三轴标准振动台耦合特性仿真分析

为量化簧片式三轴标准振动台输出精度受轴间耦合与谐波失真的影响,基于 Ansys 建立了簧片式三轴标准振动台有限元仿真模型。受现有电磁激励器出力及位移范围的限制,驱动簧片式三轴标准振动台仿真模型分别沿单轴(x 和 y 轴)和双轴(x/y 轴)输出位移幅值为 3 mm 的正弦激励信号,频率范围为 0.5~5 Hz。在双轴激励时,进一步设置相位差分别为 0°(同相)和 180°(反相)。基于 Ansys 仿真结果,提取各轴的响应加速度信号,并根据式(5)和(6)计算了不同激励条件下的正交振动抑制比 C 。同时,对激励轴的加速度时域信号进行频谱分析,并依据相关振动校准标准要求,提取基波及前 20 次谐波成分的幅值,根据式(7)计算各激励轴的谐波失真度 T 。

$$T = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{20} A_n^2}}{A_1} \times 100\%$$

(7)

式中: A_1 表示基波加速度的幅值; A_n 表示第 n 次谐波加速度的幅值($n=2, 3, \cdots, 20$)。

计算得到的各激励条件下的正交振动抑制比和谐波失真度如表 1 和 2 所示。

表 1 正交振动抑制比(仿真)

Table 1 Orthogonal vibration suppression ratio (simulation)

频率/Hz	单轴激励/%		(同相) 双轴 激励/%	(反相) 双轴 激励/%
	C_x	C_y	C_{xy}	C_{xy}
0.5	12.79	11.65	9.24	8.18
0.8	10.83	10.28	8.75	7.46
1.0	9.57	9.75	7.48	6.98
2.0	7.98	8.59	7.12	6.87
5.0	8.24	8.43	7.35	7.15

表 2 加速度谐波失真度(仿真)

Table 2 Acceleration total harmonic distortion (simulation)

频率/ Hz	单轴激励/%		(同相) 双轴 激励/%		(反相) 双轴 激励/%	
	T_x	T_y	T_x	T_y	T_x	T_y
0.5	4.22	4.15	5.12	5.4	5.92	4.44
0.8	3.95	3.69	4.77	4.87	5.03	4.56
1.0	3.63	3.07	4.32	4.26	4.59	4.49
2.0	3.29	2.94	4.12	3.99	4.18	4.27
5.0	2.68	2.65	3.49	3.43	3.63	3.56

可见,在整个测试频率范围内,单轴激励正交振动抑制比普遍高于 7.98%,双轴激励则高于 7.12%。同时,各激励轴加速度谐波失真度均超过 2% 的要求值。特别是在 0.5~2 Hz 频段,正交振动抑制比和谐波失真均随频率降低而显著增加,表明簧片式三轴标准振动台在低频段存在明显的轴间耦合和谐波失真现象。因此,有必要建立解耦控制方法,以实现轴间解耦并提高输出信号精度,从而满足高精度振动标定需求。

2 神经网络逆模型解耦控制方法

基于三轴标准振动台系统的可逆特性,本章利用神经网络的 MIMO 结构及其非线性逼近能力^[24],构建了三轴标准振动台系统的逆模型,并设计了相应的解耦控制系统,从而实现对轴间耦合的有效抑制。

2.1 神经网络逆模型解耦控制策略

为提高三轴标准振动台神经网络逆模型的训练效率并避免结构冗余,将神经网络设计为 3 层结构。其中,输入层为各轴输出的振动位移及其微分后的速度和加速度信号,输出层为各轴激励信号,隐含层神经元个数设置为 19。进一步,为全面覆盖系统的动态特性并获取有效的训练样本,在系统工作频率范围(0.5~5 Hz)和振幅范围(0~3 mm)采用均匀采样策略。在 1 Hz 以下以 0.1 Hz 为步长选取频率点,1 Hz 以上以 1 Hz 为步长,振幅范围内以 0.5 mm 为步长采样。考虑到实际激励中相位叠加的复杂特性,在上述样本基础上引入 0°、90°、180°和 270°这 4 种相位差。随后,对具有相同相位差和振幅的单轴、双轴及三轴输出样本进行去重处理,最终得到 1 320 组训练样本。基于所获样本,利用 Matlab/Nftool 神经网络工具箱对逆模型进行训练,最终获得了能准确描述三轴标准振动台 MIMO 耦合动力学特性的神经网络逆模型。

为实现三轴标准振动台解耦控制,以训练得到的神经网络逆模型为核心,构建了如图 3 所示的解耦控制系统。

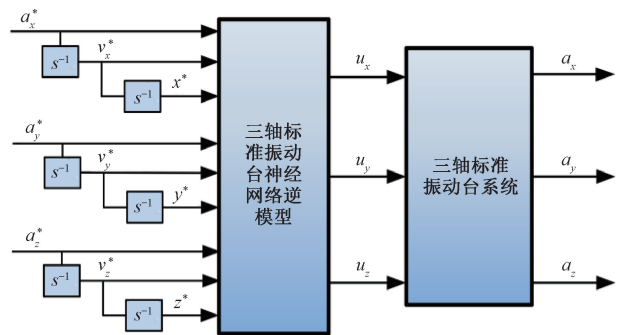


图 3 神经网络逆模型解耦控制系统

Fig. 3 Neural network inverse model decoupled control system

该系统将神经网络逆模型作为前馈控制器,与原非线性耦合系统串联。通过施加逆向补偿,抵消交叉耦合影响,从而实现三轴标准振动台的解耦控制。具体而言,将期望振动加速度(a_x^* , a_y^* , a_z^*)、速度(v_x^* , v_y^* , v_z^*)及位移(x^* , y^* , z^*)作为逆模型的输入信号。神经网络逆模型根据其训练所得的系统逆动态映射关系,计算出实现期望响应所需的驱动控制信号(u_x , u_y , u_z)。随后,将驱动控制信号输入三轴标准振动台耦合系统,最终获得系统实际输出的加速度响应(a_x , a_y , a_z)。

2.2 神经网络逆模型解耦控制仿真分析

为验证上述控制方法的有效性,构建了逆模型与原系统模型串联的解耦控制仿真系统。根据表1和2的分析结果,三轴标准振动台轴间耦合与谐波失真在0.5 Hz时最显著,因此选取该频率进行仿真验证。基于构建的解耦控制系统,驱动三轴标准振动台仿真模型输出位移幅值为3 mm的正弦信号,所得系统响应加速度波形如图4所示。其中,图4(a)和(b)分别为单轴(x 轴)激励与双轴(x/y 轴同相)激励下的三轴加速度波形。

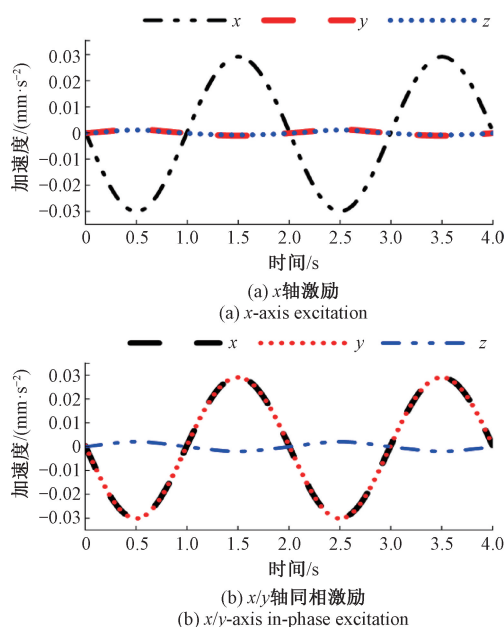


图4 逆模型控制的三轴加速度波形(仿真)

Fig. 4 Tri-axial acceleration waveforms with inverse model control (simulation)

基于上述仿真结果,对各激励轴的加速度谐波失真度进行了计算。采用神经网络逆模型解耦控制后,加速度谐波失真度均降至2%以下,满足相关标准要求,验证了该方法对三轴标准振动台谐波失真的抑制效果。为进一步评估解耦性能,计算得到的单轴激励正交振动抑制比 C_x 由控制前的12.79%降至4.86%,双轴激励下, C_{xy}

由9.24%降至4.24%。尽管耦合输出量有所降低,但其正交振动抑制比仍高于4%,表明神经网络逆模型解耦控制后三轴标准振动台仍存在明显的残余耦合。因此,需进一步优化神经网络逆模型,满足其对三轴标准振动台轴间耦合的精确控制需求。

3 神经网络逆模型在线迭代解耦控制方法

为更精准表征三轴标准振动台动态耦合特性,本章进一步引入在线迭代学习机制,对神经网络逆模型进行周期迭代优化,逐步提升逆模型拟合精度,从而实现更优的三轴振动解耦控制性能。

3.1 神经网络逆模型在线迭代辨识策略

由2.2节仿真结果可知,单次辨识得到的逆模型难以充分表征系统的非线性耦合特性。因此,可通过对逆模型进行多次迭代,使其逐步逼近系统真实的逆动态特性。具体而言,对单次逆模型解耦控制后的输入输出数据进行再次采样,提高新增样本在训练数据中的比例,使逆模型在训练过程中更频繁地接触新增样本,从而更关注新增样本所表征的动态特性。在此基础上,对逆模型进行迭代训练,使其持续学习前一轮迭代未能充分表征的系统耦合特性。

在2.1节所述神经网络逆模型辨识策略基础上,构建了如图5所示的神经网络逆模型在线迭代辨识策略。首先,利用初次辨识得到的神经网络逆模型对三轴标准振动台系统实施解耦控制,并对产生的输入输出数据对 $\{a_x, v_x, x, \dots, v_z, z\}$ 进行持续采集与累积,直至新增数据与原训练样本集的重复率 R 达到预设阈值200%后,将其加入原训练样本集 $\{X_{i-1}, Y_{i-1}\}$ 中,从而形成新的训练样本集 $\{X_i, Y_i\}$ 。

进一步,基于新构建训练样本集对逆模型进行迭代训练。为确保逆模型拟合精度在迭代过程中持续提升,引入多指标加权评价方法,选取决定系数(R-squared, R^2)、误差平方和(sum of squared errors, SSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方误差(mean squared error, MSE)及均方根误差(root mean square error, RMSE)作为关键性能参数,分别从整体解释能力、累积误差量、平均误差幅度及大偏差放大效应等角度综合评估逆模型的拟合性能。基于三轴标准振动台对解耦控制的性能需求,结合工程经验对各参数赋予相应权重。具体而言,以逆模型整体拟合精度为核心,给予 $1-R^2$ 最高权重0.4,优先保证逆模型对系统逆动态特性的充分表征。同时,为有效抑制解耦控制中的误差波动,避免较大误差对三轴标准振动台输出精度的干扰,赋予RMSE较高权重0.3。其余误差指标SSE、MAE、MSE均分剩余权重(各0.1),确保均衡评估模型性能,避免优化过程偏向单一误

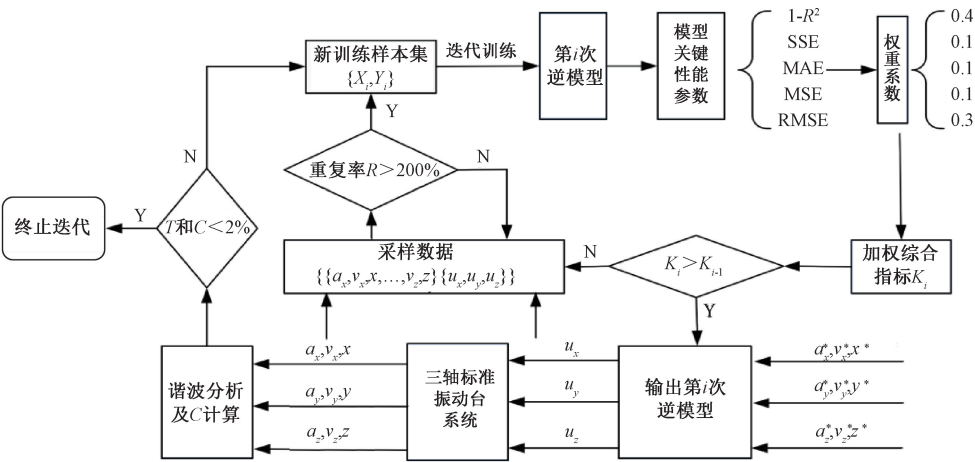


图 5 神经网络逆模型在线迭代辨识策略

Fig. 5 Online iterative identification strategy for neural network inverse models

差类型。基于上述权重系数计算加权综合指标 K , 将本轮次训练的逆模型 K_i 与上一轮 K_{i-1} 进行比较, 当且仅当 $K_i > K_{i-1}$ 时, 终止当前轮次逆模型迭代训练, 从而确保逆模型具有良好的非线性拟合性能。

最后, 重复应用上述策略进行多次逆模型迭代。在每一轮迭代后, 基于输出响应的谐波失真度与正交振动抑制比对解耦控制效果进行量化评估。当两者均低于 2% 时, 终止整体迭代过程。通过该迭代优化策略, 最终获得精确表征三轴标准振动台非线性耦合特性的神经网络逆模型, 从而实现更优的解耦控制效果。

3.2 逆模型在线迭代解耦控制仿真分析

为验证提出的逆模型在线迭代解耦控制方法对三轴标准振动台轴间耦合现象的控制效果, 基于图 5 所示逆模型在线迭代辨识策略, 对 2.1 节训练得到的逆模型进行迭代训练, 直至满足终止条件。进而利用迭代优化后的逆模型驱动三轴标准振动台仿真模型, 输出与 2.2 节设定一致的振动信号, 所得系统响应加速度波形如图 6 所示。其中, 图 6(a) 和 (b) 分别为单轴 (x 轴) 激励与双轴 (x/y 轴同相) 激励下的三轴加速度波形。

基于上述仿真结果分析可知, 逆模型在线迭代解耦控制后各激励轴的加速度谐波失真度均降至 1% 以下。

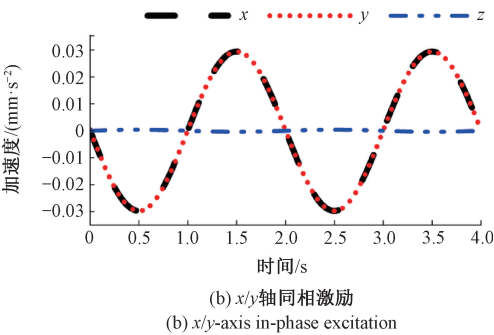
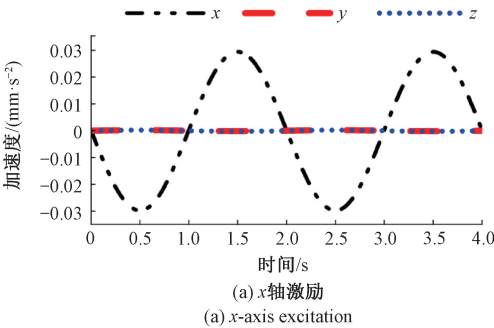


图 6 逆模型迭代控制的三轴加速度波形 (仿真)

Fig. 6 Tri-axial acceleration waveforms with inverse model iterative control (simulation)

与未迭代优化的逆模型控制方法相比, 该方法能更有效地抑制三轴标准振动台的谐波失真。为进一步分析逆模型迭代次数对解耦性能的影响, 基于仿真结果提取了不同迭代次数下的耦合输出量, 计算了相应的正交振动抑制比, 迭代解耦效果对比如图 7 所示。

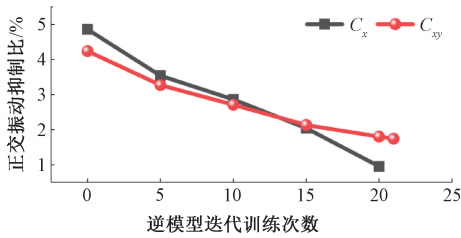


图 7 迭代解耦效果对比 (仿真)

Fig. 7 Comparison of iterative decoupling effects (simulation)

由对比曲线可知, 三轴标准振动台耦合输出量随逆模型迭代次数增加而显著减小。单轴激励下, 经过 20 次迭代后, 正交振动抑制比 C_x 由 4.86% 降至 0.95%。双轴

激励下,经过 21 次迭代后, C_{xy} 由 4.24% 降至 1.74%。上述结果表明,提出的逆模型在线迭代控制方法能显著抑制轴间耦合干扰,有效提升系统解耦性能。

4 实验验证

在仿真分析基础上,搭建了基于 AD7606B 的振动采集分析系统,实时捕获逆模型训练样本并进行迭代训练,并集成构建了三轴标准振动台实验测试系统,对逆模型在线迭代解耦控制方法进行了实验验证。

4.1 三轴标准振动台实验测试系统

在实验过程中,需实时采集三轴标准振动台的输出响应信号。为此,基于模数转换芯片 AD7606B 与微控制器 STM32H750 搭建了下位机数据采集模块。其中,AD7606B 支持多通道同步采样,其关键性能参数如表 3 所示,性能指标完全满足本实验系统对三轴振动信号采集的精度与同步性要求。

表 3 AD7606B 关键性能参数

Table 3 Key performance parameters of AD7606B

参数	指标
分辨率	16 位
通道数	8 通道同步采样
通道间采样偏差	<1 ns
最高采样频率	800 kSPS
输入阻抗	1 MΩ
信噪比	90 dB

基于 AD7606B 模块的振动采集与处理流程如图 8 所示。

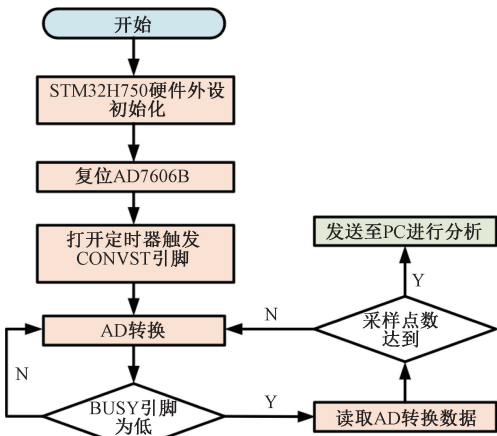


图 8 采集及处理流程

Fig. 8 Sampling and processing flowchart

器采样频率配置为 10 kHz。随后,通过复位信号完成 AD7606B 的芯片复位,并利用定时器触发其 CONVST 引脚启动模数转换。当 BUSY 引脚触发外部中断时,MCU 读取转换结果并存储至缓冲区。最后,当采样数据达到预设点数后,将全部数据通过通信串口发送至上位机进行进一步处理与分析。

为确保振动采集分析系统适用于逆模型在线迭代过程,进一步基于 MATLAB/APP Designer 开发了相应的上位机数据分析程序,并结合 3.1 节所述的逆模型在线迭代辨识策略,设计了如图 9 所示的基于振动采集分析系统的逆模型在线迭代流程。

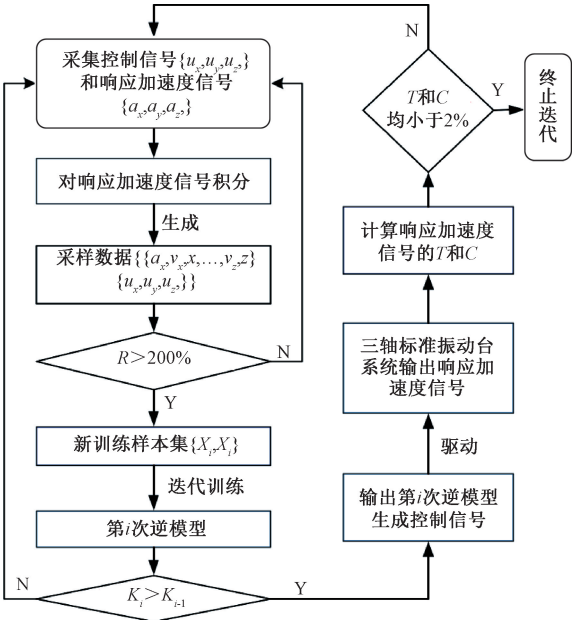


图 9 基于振动采集分析系统的逆模型在线迭代流程

Fig. 9 Online iterative process of inverse model based on vibration acquisition and analysis system

首先,通过上位机和下位机分别采集控制信号 $\{u_x, u_y, u_z\}$ 与响应输出加速度信号 $\{a_x, a_y, a_z\}$,并由上位机对响应加速度信号进行积分处理,生成包含各轴加速度、速度及位移的采样数据 $\{\{a_x, v_x, x, \dots, v_z, z\} \{u_x, u_y, u_z\}\}$ 。随后,将该采样数据加入原训练样本集 $\{X_{i-1}, Y_{i-1}\}$ 中,并计算其重复率 R 。若 $R > 200\%$,生成新的训练样本集 $\{X_i, Y_i\}$;否则,再次采集输入输出数据,重新构建样本集。基于新生成的训练样本集对逆模型进行迭代训练,得到第 i 次逆模型,计算其加权综合指标 K_i 。若 K_i 大于上一轮次 K_{i-1} ,输出当前逆模型;否则,返回数据采集环节,重复逆模型迭代过程。最后,利用第 i 次逆模型控制三轴标准振动台,驱动其输出响应加速度信号,并计算谐波失真度 T 与正交振动抑制比 C 。若 T 和 C 均小于 2%,则满足终止条件,结束迭代过程;否则,

采集第 i 次逆模型控制过程中产生的输入输出数据,再次执行数据采集、样本构建与逆模型迭代过程。

基于上述振动采集分析系统,并结合实验室现有设备,搭建了如图 10 所示的三轴标准振动台实验测试系统。

该系统由信号发生器、功率放大器、三轴加速度传感器、电荷放大器、簧片式三轴标准振动台、下位机 (AD7606B 和 STM32H750) 以及上位机 (计算机) 组成。其中,簧片式三轴标准振动台由三轴运动平台、3 个单轴电磁激励器及沿 x 、 y 、 z 轴布置的簧片式解耦结构组成。实验过程中,上位机通过 MATLAB/Instrument Control

Toolbox 工具箱的 SCPI 指令与信号发生器通信。上位机将第 i 次逆模型预测生成的三轴控制信号发送至信号发生器,使其输出三路模拟控制信号。各路信号经功率放大器放大后,分别驱动对应的单轴电磁激励器产生激励,并通过簧片式解耦结构解耦并传递至三轴运动平台,使其沿 x 、 y 、 z 这 3 个方向产生振动。安装在运动平台上的三轴加速度传感器实时检测振动响应,经电荷放大器转换为模拟电信号后,由下位机采集并传输至上位机。上位机对采集数据进行处理,最终计算得到各轴加速度谐波失真度及正交振动抑制比等关键参数。

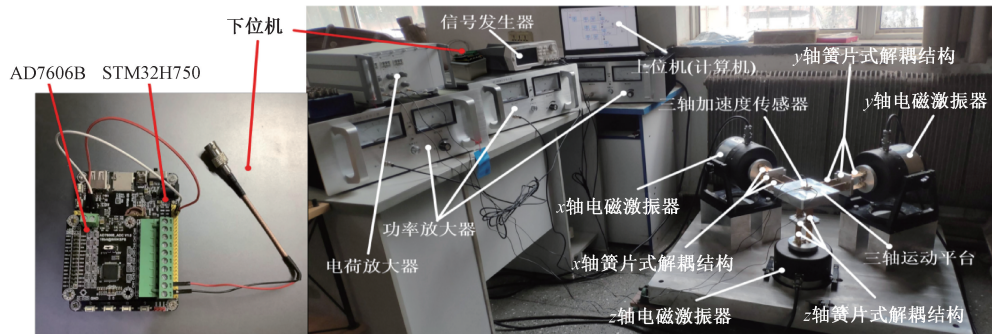


图 10 三轴标准振动台实验测试系统

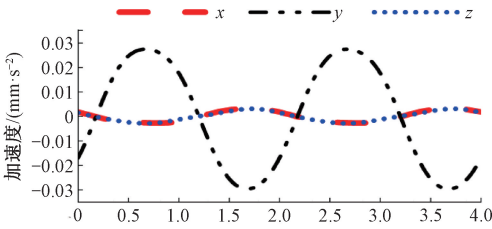
Fig. 10 Tri-axial standard vibrator experimental test system

4.2 实验测试及结果分析

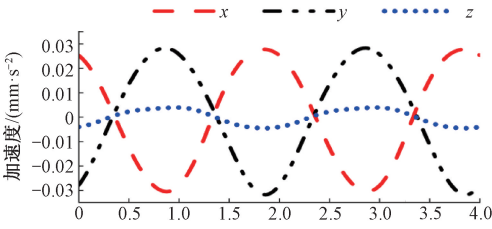
为验证所提出控制方法的有效性,并与仿真结果进行对比,驱动三轴标准振动台实验测试系统分别沿单轴 (y 轴) 和双轴 (x/y 轴反向) 输出频率为 0.5 Hz、位移幅值为 3 mm 的正弦信号。在未对实验测试系统施加任何控制的情况下,采集得到的三轴加速度波形如图 11 所示。

通过对谐波失真和轴间耦合的量化分析可知,单轴激励谐波失真度 T_y 为 5.18%,正交振动抑制比 C_y 为 14.08%。双轴激励 T_x 和 T_y 分别为 5.18% 和 6.05%, C_{xy} 为 10.39%。上述结果表明,未施加控制时,三轴标准振动台存在明显的谐波失真和轴间耦合干扰。因此,需通过解耦控制方法对其进行抑制。

采用 2.1 节所述的神经网络逆模型解耦控制策略驱动实验测试系统,测得的三轴加速度波形如图 12 所示。分析实验结果可知,各激励轴的加速度谐波失真度均降至 2% 以下,满足相关标准要求,验证了该方法对谐波失真的显著抑制效果。进一步,计算得到正交振动抑制比 C_y 与 C_{xy} 分别为 4.88% 和 4.62%。与未施加控制时相比,虽然耦合输出量有所降低,但正交振动抑制比仍高于 4%,表明神经网络逆模型解耦控制后,三轴标准振动台仍存在明显的残余耦合现象。



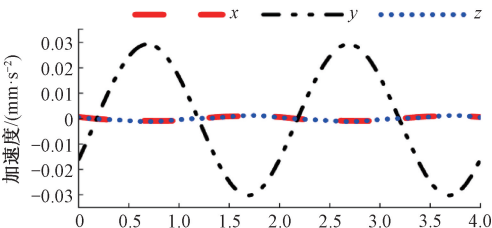
(a) y轴激励
(a) y-axis excitation



(b) x/y轴反相激励
(b) x/y-axis anti-phase excitation

图 11 未控制的三轴加速度波形(实验)

Fig. 11 Uncontrolled tri-axial acceleration waveforms (experiment)



(a) y轴激励
(a) y-axis excitation

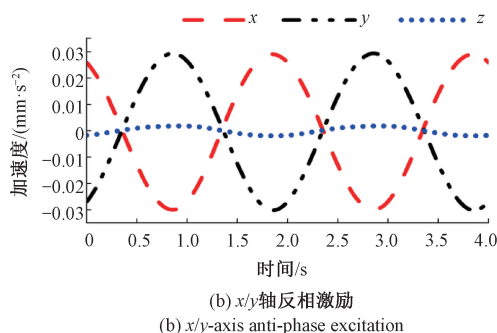


图12 逆模型控制的三轴加速度波形(实验)

Fig. 12 Tri-axial acceleration waveforms with inverse model control (experiment)

进一步,采用3.1节所述的逆模型在线迭代辨识策略驱动实验测试系统,测得的三轴加速度波形如图13所示。分析实验结果可知,各激励轴的加速度谐波失真度均降至1%以下,该方法比未迭代优化的逆模型控制方法具有更好的谐波失真抑制效果。为分析逆模型迭代次数对解耦性能的影响,计算了相应的正交振动抑制比,并绘制了如图14所示的迭代解耦效果对比曲线。

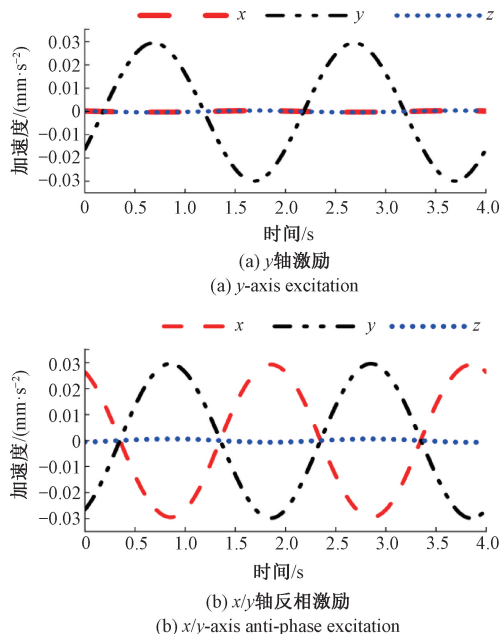


图13 逆模型迭代控制的三轴加速度波形(实验)

Fig. 13 Tri-axial acceleration waveforms with inverse model control (experiment)

可见,三轴标准振动台耦合输出量随逆模型迭代次数的增加而显著下降。单轴激励下, C_x 经过26次迭代后降至0.73%。双轴激励下, C_{xy} 经过27次迭代后降至1.53%。上述结果表明,相较于常规逆模型控制策略,经

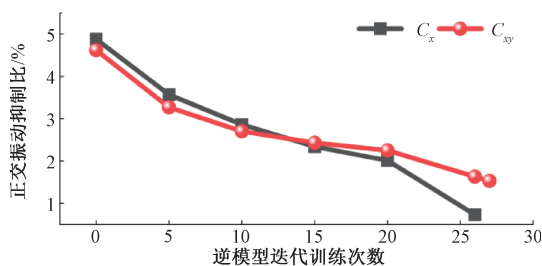


图14 迭代解耦效果对比(实验)

Fig. 14 Comparison of iterative decoupling effects (experiment)

在线迭代优化的逆模型控制方法更有效地抑制了轴间耦合干扰,显著提升了系统解耦性能。

5 结 论

针对三轴标准振动台存在的轴间耦合和谐波失真问题,在簧片式三轴标准振动台有限元模型分析的基础上,通过神经网络逆模型解耦控制及在线迭代优化方法,实现了轴间耦合干扰的有效抑制和振动激励信号的高精度输出,并通过仿真与实验验证了该方法的有效性,主要结论为:

1) 神经网络逆模型解耦控制方法将谐波失真度降至2%以下,有效抑制了三轴标准振动台的谐波失真。但相应的正交振动抑制比仍高于4%,表明该方法需进一步优化。

2) 所提出的神经网络逆模型在线迭代解耦控制方法将正交振动抑制比降至2%以下,同时将谐波失真度稳定在1%以下,显著抑制了三轴标准振动台的轴间耦合和谐波失真。

3) 神经网络逆模型在线迭代解耦控制方法实现了对三轴标准振动台轴间耦合和谐波失真的精确控制。该方法不依赖于标准振动台的具体机械结构,具备较好的结构通用性,适用于各类结构原理的多轴耦合振动台系统,为多轴振动测试系统的高精度解耦提供技术参考。

参考文献

- [1] CHOI J, CHUNG J, KIM K, et al. Seismic-induced permanent displacement estimation combining acceleration and computer vision measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110504.
- [2] 余旭涛, 吴威, 牛刚. 磁浮列车双冗余加速度传感器故障检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 138-144.
- YU X T, WU W, NIU G. Research on fault detection of double redundant acceleration sensor for maglev

- train[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 138-144.
- [3] EL ZAHAB S, AL SAKKAF A, MOHAMMED ABDELKADER E, et al. A machine learning-based model for real-time leak pinpointing in buildings using accelerometers[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 29(7/8): 1539-1553.
- [4] GEIST J, AFRIDI M Y, MCGRAY C D, et al. Gravity-based characterization of three-axis accelerometers in terms of intrinsic accelerometer parameters[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2017, 122(32): 1-14.
- [5] 邹泽兰, 徐同旭, 徐祥, 等. 基于两步修正法的 MEMS 三轴陀螺仪标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 191-198.
- ZOU Z L, XU T X, XU X, et al. MEMS triaxial gyroscope calibration based on two-step correction method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 191-198.
- [6] YANG M, LIU ZH H, CAI CH G, et al. Monocular vision-based calibration method for the axial and transverse sensitivities of low-frequency triaxial vibration sensors with the elliptical orbit excitation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13763-13772.
- [7] USUDA T, WEIBENBORN C, MARTENS H J V. Theoretical and experimental investigation of transverse sensitivity of accelerometers under multiaxial excitation[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(5): 896-904.
- [8] 于梅. 三轴向振动加速度校准系统的研究[J]. 计量学报, 2010, 31(6): 517-519.
- YU M. Research on the three-dimensional vibration calibration system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31(6): 517-519.
- [9] Methods for the calibration of vibration and shock transducers, part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry; ISO 16063-11[S]. Geneva: ISO, 1999.
- [10] RIPPER G P, DIAS R S, GARCIA G A. Primary accelerometer calibration problems due to vibration exciters[J]. Measurement, 2009, 42(9): 1363-1369.
- [11] 杨明, 蔡晨光, 刘志华, 等. 基于长冲程振动台导轨弯曲校正的低频振动传感器校准方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 116-120.
- YANG M, CAI CH G, LIU ZH H, et al. Calibration method of low frequency vibration sensor based on guideway bending correction of long stroke shaker[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(1): 116-120.
- [12] LI W, CUI J N, BIAN X Y, et al. Minimizing phase delay of feedback control signals for electromagnetic vibrators to reduce measurement uncertainty in ultra-low frequency vibration calibration[J]. Measurement, 2025, 242: 115980.
- [13] SAADATZI M, SAADATZI M N, TAVAF V, et al. Aeve 3D: Acousto electrodynamic three-dimensional vibration exciter for engineering testing[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1897-1906.
- [14] LIU ZH H, CAI CH G, YANG M, et al. Development of a tri-axial primary vibration calibration system[J]. ACTA IMEKO, 2019, 8(1): 33-39.
- [15] 何闻, 张旭飞, 贾叔仕, 等. 基于簧片式解耦装置的三分量标准振动台: CN104596720A[P]. 中国, 2015-08-12.
- HE W, ZHANG X F, JIA SH SH, et al. Three-dimensional standard vibrator based on leaf-spring-type decoupling device: CN104596720A[P]. China, 2015-08-12.
- [16] 张旭飞, 张锋阳, 刘欣超, 等. 三轴标准振动台簧片解耦结构遗传算法多参数优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 167-176.
- ZHANG X F, ZHANG F Y, LIU X CH, et al. Multi-parameter optimization design for leaf-spring decoupling structure of tri-axial standard vibrator based on the genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 167-176.
- [17] HAO G. Towards the design of monolithic decoupled XYZ compliant parallel mechanisms for multi-function applications[J]. Mechanical Sciences, 2013, 4(2): 291-302.
- [18] SHE T L, YANG Q Y. The feedback control of an ultralow frequency vibration table based on a fuzzy self-tuning PID controller[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 274: 575-578.
- [19] GUAN G F, XU X ZH, XIONG W, et al. Adaptive acceleration waveform control of two-degree-of-freedom dual electrohydraulic shaking tables[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(23/24): 2274-2285.
- [20] ZHANG X F, HE W, WANG CH Y. Self-sensing

- waveform control for a low-frequency electromagnetic vibrator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 785-793.
- [21] QIU Y T, ZHANG L, LIU X K, et al. Reduce the waveform distortion using high-order harmonical driving current for a vibrator [J]. IEEE Access, 2021, 9: 54657-54622.
- [22] 安欣, 高峰, 杨巧玉, 等. 基于前馈补偿的振动台粒子群迭代学习控制算法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 213-220.
- AN X, GAO F, YANG Q Y, et al. PSO iterative learning control algorithm for shaking table based on feedforward compensation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(1): 213-220.
- [23] 马立英, 周铨. 位移控制电液伺服振动台加速度谱再现研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 889-894.
- MA L Y, ZHOU H. Study on acceleration spectrum replication of electro-hydraulic servo test rig based on displacement control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 889-894.
- [24] ZHANG X F, CAO CH Q, WANG SH, et al. Decoupling control for tri-axial standard vibrator based on optimized neural network inverse model [J]. Journal of Vibration and Control, 2025: 282449221.

作者简介



张旭飞(通信作者), 2012年于海南大学获得学士学位, 2017年于浙江大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授, 主要研究方向为振动计量、测试与控制。

E-mail: zhangxufei@tyut.edu.cn

Zhang Xufei (Corresponding author)

received his B.Sc. degree from Hainan University in 2012, and his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2017. He is currently a professor at Taiyuan University of Technology. His main research interests include vibration metrology, testing and control.