导弹道路运输振动环境模拟试验激励信号重构

凌启辉[1*] 严勇勇[1] 李新宇[1] 戴巨川[1] 胥小强[1,2]
1.湖南科技大学机电工程学院,湘潭,411201
2.苏州韦博试验仪器有限公司,苏州,215156

摘要:导弹道路运输振动环境模拟试验对装备研发及可靠性验证至关重要。传统整车模拟试验存在周期长、真实激励信号获取困难等问题,导致复杂耦合振动环境难以有效复现。为此,提出一种数据驱动的激励信号重构方法,并以模型驱动方法为基准框架进行精度对比验证。首先构建量子粒子群算法(QPSO)优化的长短期记忆(LSTM)神经网络模型(QPSO-LSTM),实现高精度激励信号重构。然后基于多体动力学理论构建"运输车辆-包装箱-弹体-导弹部件"刚柔耦合模型,获取模型驱动重构信号。最后通过不同路面、车速模拟试验对比分析重构精度。试验结果表明,数据驱动方法的均方根相对误差平均值(1.54%)低于模型驱动方法的相应值(5.15%)。这一性能优势凸显了数据驱动方法在工程实践中的优越性。

关键词:弹体运输;信号重构;数据驱动;模型驱动;神经网络
中图分类号:TJ06
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.025 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Reconstruction of Excitation Signals for Vibration Environment Simulation Tests of Projectile Road Transportation

LING Qihui[1*] YAN Yongyong[1] LI Xinyu[1] DAI Juchuan[1] XU Xiaoqiang[1,2]
1.School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan ,411201
2.Suzhou Weibo Test Instrument Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215156

Abstract: Vibration environment simulation tests for missile road transportation are essential for equipment development and reliability verification. Conventional full-vehicle simulation tests, however, suffer from long development cycles and difficulties in obtaining realistic excitation signals, which often leads to inadequate reproduction of the complex coupled vibration environment. To address this issue, this study proposes a data-driven excitation signal reconstruction method and compares its accuracy with that of a model-driven approach as the benchmark. First, a long short-term memory (LSTM) neural network model optimized by the quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm (QPSO-LSTM) is constructed to achieve high precision signal reconstruction. Second, a rigid-flexible coupled model of the "transport vehicle-packaging box-missile body-missile components" is established based on multi-body dynamics theory to obtain the model-driven reconstructed signal. Finally, the reconstruction accuracy of both methods is compared through simulation tests under different road surfaces and vehicle speeds. The experimental results indicate that the data-driven method achieves an average root-mean-square relative error of 1.54%, which is significantly lower than the 5.15% obtained by the model-driven method. This performance advantage demonstrates the superiority of the data-driven method in engineering practice.

Key words: projectile transportation; signal reconstruction; data-driven; model-driven; neural network

0 引言

在导弹全寿命周期中,多频次道路运输是保障装备部署能力的关键环节。运输过程中复杂振动环境引发的结构损伤累积效应将直接影响武器系统的战备完好性指标,因此,弹体道路运输试验尤为重要,能够对其运输过程进行全面评估,进而提高其研发效率。当前工程领域主要采用三种振动环境试验方法:实地跑车试验[1]、运输模拟台模拟试验[2]和振动台模拟试验[3]。实地跑车试验虽能反映真实运输环境,但通常在装备研制后期开展,存在试验场地受限、周期长及成本高昂等现实矛盾,难以满足现代装备快速迭代的研发需求。

收稿日期:2025-08-07
基金项目:国防科工局基础科研项目

运输模拟台试验依据QJ/T815.1—1994标准构建的实验室测试体系，虽具有操作便捷、参数可控等优势，但其核心缺陷在于未建立标准试验谱与真实运输振动环境的等效转换模型，仍需依赖实车试验数据作为基准。振动台模拟试验则依据GJB 150.16A—2009和MIL-STD-810G标准[4]，在实验室环境下实现振动环境复现。然而，该方法在工程实践中仍存在振动环境模拟精度不足，标准谱型存在对特定车速、典型路况及装备构型等适配问题。

传统激励信号重构方法多依赖于模型驱动框架，即通过建立系统的动力学模型（如微分方程、传递函数或状态空间模型），结合参数辨识技术（如最小二乘法、极大似然估计）实现对激励信号的逆向推导[5-7]。这类方法在模型结构已知且参数误差可控的场景下能够通过物理规律约束反求输入（激励信号），在机电系统动力学、电力系统建模等领域长期占据主导地位。然而，随着智能建模技术的迭代发展，国内外学者持续探索激励信号识别的新路径。如黄大伟等[8]采用长短期记忆（long short-term memory，LSTM）网络构建载荷-响应特征映射关系，实现冲击载荷识别。ZHOU等[9]基于深度递归神经网络（recurrent neural network，RNN）解码结构非线性响应中的载荷信息。针对弹体运输中的复杂工况，王光定等[10]通过建立弹体包装箱整体模型分析运输随机激励。WANG等[11]针对多回路空调压缩机时变负载激励无法直接识别的问题，运用径向基函数（radial basis function，RBF）神经网络识别空调压缩机时变负载。韩庆等[12]运用雨流投影法对多维载荷进行加速处理，开展了基于时域波形再现的振动环境模拟。在结构响应预测领域，CHOU等[13]基于图神经网络预测建筑物正交水平地面响应。郭俊锋等[14]提出一种基于自适应二次临近项交替方向乘子的压缩感知缺失信号重构方法。ZHANG等[15]通过双层LSTM模型精准预测框架结构地震响应。WEI等[16]证明了集成模型在桥梁抗震分析中的优越性。WANG等[17]构建知识增强型算法来预测风致结构响应。ZHANG等[18]开发纯数据驱动模型用于地震预测。混合方法的研究也取得显著进展，如HANIFI等[19]系统梳理物理模型与统计方法的融合路径。LI等[20]和毛建峰等[21]分别探索LSTM在车桥振动预测中的新应用。ZHOU等[22]通过建立高速列车振动源函数实现建筑振动波精准模拟。综上，物理模型虽能对导弹运输振动环境中的多因素耦合力学效应进行很好的描述和预测，但其高昂的计算复杂度限制了实用性。相比之下，数据驱动模型通过挖掘海量数据的内在规律，在保持预测精度的同时显著提高了计算效率，已在多个领域展现出强大潜力。

本文研究基于数据驱动的激励信号重构方法，用于准确等效不同工况下运输车辆对包装箱直接激励的振动信号，以简化弹体道路运输试验过程和试验周期，降低全周期测试成本，获取可追溯的振动环境数据。

1　道路运输模拟试验激振模式设计

本文聚焦于导弹道路运输振动环境模拟试验，研究基于数据驱动的激励信号重构方法。旨在突破传统试验限制，为弹体运输提供等效复现真实振动环境的解决方案，简化激振方式并显著提高试验效率。图1所示为本文研究路线。

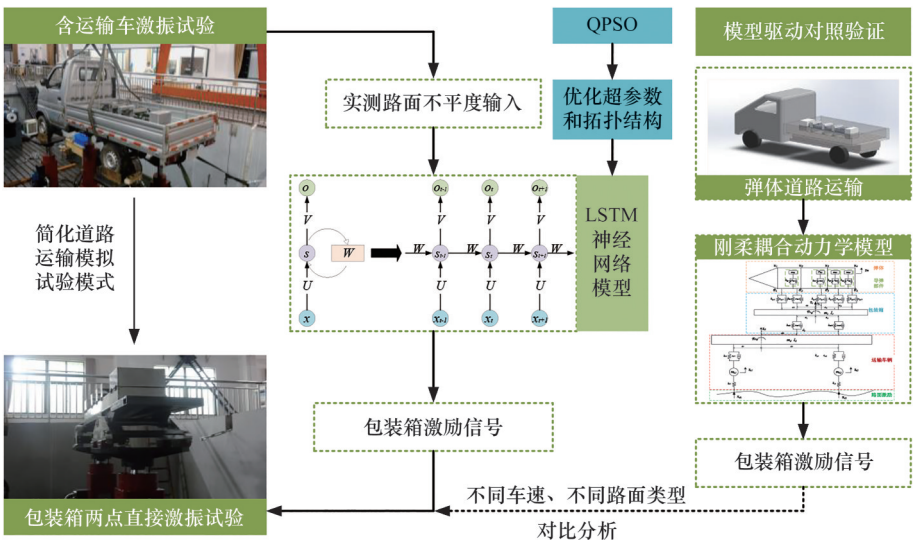


图1　研究路线

Fig.1　Research route

道路模拟试验平台(图2)是基于电液伺服系统的闭环控制试验系统,通过计算机实时调控液压动力单元与多个独立液压作动器的协同运作,精准复现道路运输中的复杂力学环境。该平台的核心原理在于将实测道路谱或理论计算的路面激励转化为电信号,经数字控制器处理后驱动电液伺服阀控制作动器输出激振力与位移,形成"数据采集-模型计算-伺服执行-传感器反馈"的闭环控制;关键检测装置包括高精度加速度计(监测振动加速度)、压力传感器(测量作动器输出载荷)及磁栅式位移传感器(测量作动器输出位移)。因此,平台可以通过调整控制算法中的频率响应函数与相位补偿参数,模拟多种车速、不同路面类型的激励,实现砂石路、起伏路、铺面路等典型运输路面的等效再现,其高精度、可重复的振动与载荷控制能力为导弹运输适应性验证提供了接近实际的振动环境模拟测试环境。



图2 道路模拟试验平台

Fig.2 Experimental platform

然而,利用道路模拟试验平台进行导弹道路运输模拟试验需要全车试验,试验时准备的周期长,涉及车辆调度、安全防护等非技术性耗时,而且难以复现所有车速、不同路面类型的运输工况。为此,本文提出导弹道路运输振动环境模拟试验的简化方案,即基于导弹模态特性的两点激振方案,其基本思想是:通过有限元分析确定导弹前两阶弯曲模态的节点位置(大约位于箱体纵向1/4与3/4处),在此布置两个垂直方向激振器以激发主导振动模式。不难发现,两点激振方式省略了运输车的中间传递过程,激振方式更为简单,但其关键是如何构建用于两点激振的载荷谱。

为重构两点激振的载荷谱,本文利用道路模拟试验平台开展实车-包装箱-模型弹的道路运输模拟试验,以获取激励信号重构所需的数据样本。试验工况如表1所示,激振器输出砂石路谱、起伏路谱、戈壁路谱、铺面路谱、随机路谱和正弦扫频激励信号,加速度传感器用于监测包装箱前后支撑点的竖向加速度响应,通过信号预处理(自适应频域去噪与零相位滤波处理[23],剔除高频噪声与低频趋势项,保留有效振动成分)和二次积分处理得到相应的位移响应,本文用y_{d1}和y_{d2}分别表示包装箱前后支撑的竖向位移响应。

表1 试验工况

Tab.1 Test conditions

试验工况	试验项目	车速或激振频率
1	戈壁路运输模拟	10 km/h
2	铺面路运输模拟	10 km/h
3	起伏路运输模拟	10 km/h
4	砂石路运输模拟	10 km/h
5	铺面路运输模拟	40 km/h
6	随机路谱试验	
7	正弦扫频激励试验	1～20 Hz

2 基于数据驱动的激励信号重构模型

2.1 QPSO-LSTM神经网络模型

LSTM神经网络[22,24]在长时序数据处理上能力优异,通过门控机制动态调控时序信息流可缓解梯度异常问题,但其性能受超参数和拓扑结构制约,而手动调整参数易受人为因素的影响。为此,本文采用量子粒子群优化(quantum-behaved particle swarm optimization,QPSO)算法[25]构建参数-结构协同优化框架,对LSTM神经网络模型的超参数和拓扑结构进行优化。QPSO算法利用量子计算与粒子群优化的优势及强大的全局搜索能力和快速的收敛速度,有效克服了传统优化算法易陷入局部最优解的缺陷,提高了算法的鲁棒性和稳定性。

QPSO-LSTM模型结构如图3所示,其核心流程包含参数智能优化与动态训练两个耦合模块。首先对原始数据进行标准化处理、训练/测试集划分,通过归一化消除量纲差异对模型训练的影响;随后将预处理数据输入LSTM网络进行初步特征提取,同步使用QPSO优化进程。QPSO算法通过以下步骤实现LSTM网络超参数和拓扑结构的优化:

1)相关参数初始化。设定粒子群维度(隐藏层节点数、学习率和网络训练迭代次数)、种群规模和迭代次数等参数,随机生成初始粒子位置。

2)适应度值计算。将训练集的均方误差作为粒子适应度函数f,有

$$f=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i-y_i)^2 \tag{1}$$

式中:N为训练集样本的个数;$\hat{y}_i$为训练集样本预测输出值的第i个值;y_i为训练集样本真实值的第i个值。

3)粒子位置更新。根据量子势阱模型计算粒子移动概率,动态更新个体最优解与全局最优解。

4)迭代终止判定。当适应度变化趋于稳定或

达到预设迭代次数时，输出最优参数组合。

5）模型强化训练。将优化后的超参数嵌入LSTM网络进行再训练，最终通过反归一化处理输出预测结果。

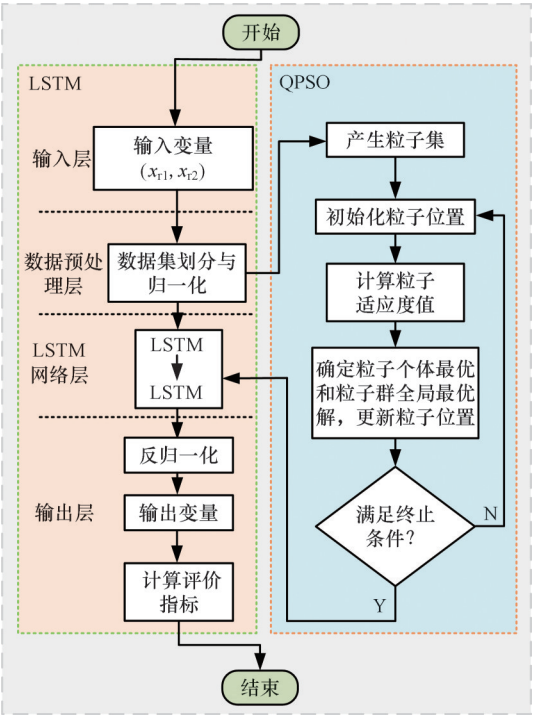


图3　QPSO-LSTM网络模型

Fig.3　QPSO-LSTM network model

2.2　模型训练精度评价指标

为直观体现所构建的QPSO-LSTM网络模型的预测性能，采用均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和拟合系数（R^2）作为模型预测的评价标准，其数学表达式略。RMSE和MAE用来评价所建网络模型的准确性，计算结果越小，模型的拟合效果越好、预测精度越高，而R^2值越接近1，模型对数据的拟合效果越好。

2.3　QPSO-LSTM模型算法验证

基于道路运输振动试验数据构建输入-输出映射模型，选取前/后轮路面激励（x_{r1}、x_{r2}）作为输入变量，包装箱支撑点位移响应（y_{d1}、y_{d2}）作为输出变量。按照一定的规则抽取不同路面、不同车速下的试验数据以及随机路面激励试验数据，组合成一个包含多个试验工况的数据集。采用7∶3的比例将数据集划分为训练集与测试集，通过QPSO优化LSTM网络参数，设置粒子群的空间维度为4，粒子群粒子个数为30，最大迭代次数取40，学习率的取值范围为[0.001，0.01]，隐藏层节点数的取值范围为[10，200]，网络训练次数的取值范围为[10，200]。对粒子位置做取整处理，以保证隐藏层节点数和网络训练次数在整数空间内寻优。采用固定学习率初始化LSTM网络架构并嵌入QPSO优化模块，通过动态更新个体/全局最优解实现离散-连续参数空间的同步搜索，网络模型适应度值的收敛轨迹如图4所示。

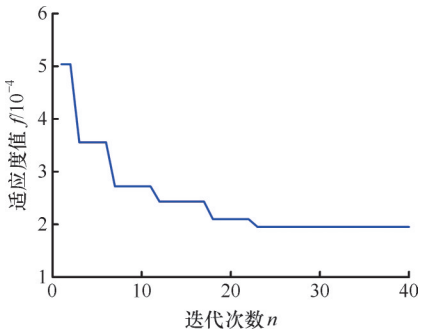
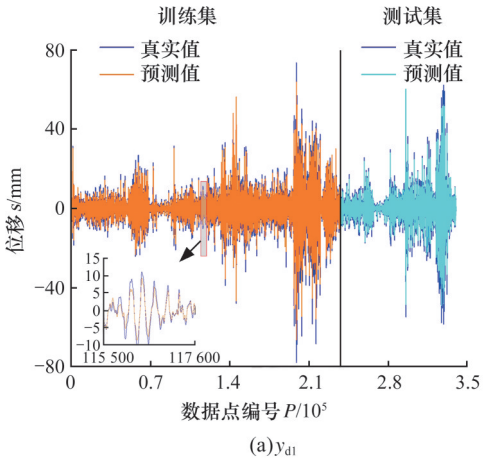


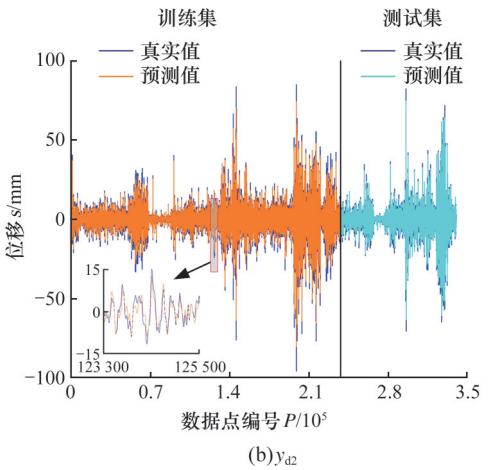
图4　粒子适应度值曲线

Fig.4　Particle fitness curve

由图4可知，其适应度值逐渐减小，经过23次迭代后达到稳定状态。此时，最优网络参数组合如下：隐藏层节点数分别为111、138，学习率为0.0017，网络训练次数为137。将网络参数嵌入LSTM网络进行训练，得到QPSO-LSTM网络模型。模型在训练集和测试集样本上的预测结果如图5所示，可看出模型在训练集与测试集



(a) y_{d1}



(b) y_{d2}

图5　不同位置训练预测结果

Fig.5　Prediction results of training at different locations

上均展现出高精度映射能力，证明了参数优化的有效性。

为进一步说明QPSO优化算法的有效性，构建了LSTM网络模型和PSO-LSTM网络模型进行对比分析（图6）。结果表明，传统的LSTM网络模型在预测y_{d1}和y_{d2}时会出现较大的局部误差，经PSO优化后预测精度有所改善，而QPSO-LSTM模型的预测曲线与实测数据吻合度最高。分别计算三种模型预测结果的RMSE、MAE值和R^2评价指标，计算结果如表2所示。由表2可知，传统的LSTM模型的R^2约0.66，而PSO-LSTM模型和QPSO-LSTM模型的R^2在0.93以上，预测精度显著提高。PSO-LSTM模型和QPSO-LSTM模型的RMSE、MAE值均远小于传统的LSTM模型的相应值，并且QPSO-LSTM模型比PSO-LSTM模型的预测效果更好。因此，QPSO-LSTM网络模型可为包装箱动态载荷识别提供高精度、强鲁棒性的重构模型。

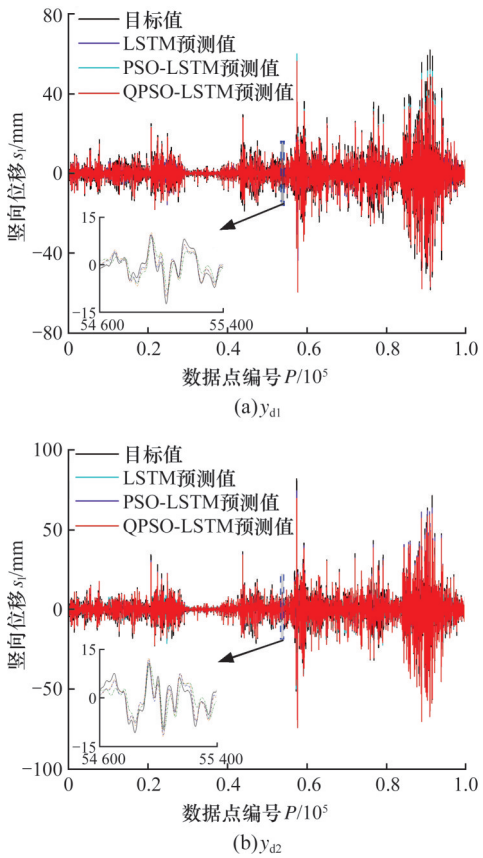


图6 各模型不同位置预测结果对比

Fig.6 Comparison of prediction results for different positions of various models

表2 各模型预测精度对比

Tab.2 Comparison of prediction accuracy among various models

预测模型	预测目标	RMSE值	MAE值	R^2
LSTM	y_{d1}	4.02	2.49	0.727
	y_{d2}	5.01	3.16	0.664
PSO-LSTM	y_{d1}	1.71	1.45	0.940
	y_{d2}	1.89	1.31	0.933
QPSO-LSTM	y_{d1}	1.69	1.16	0.951
	y_{d2}	1.79	1.21	0.956

3 基于模型驱动的激励信号重构模型

3.1 刚柔耦合动力学模型

本文以模型驱动方法作为对照，系统评估数据驱动方法在激励信号重构中的性能优势。由于弹体属于薄壁、大长径比结构，易引发弯曲与俯仰振动模态，故重点考虑路面不平度激励、车辆悬挂参数及包装箱支撑刚度等多因素耦合作用，通过刚柔耦合建模技术精确表征系统能量传递路径。为此，本文建立18自由度运输车辆-包装箱-弹体-导弹部件刚柔耦合动力学模型，如图7所示。该模型通过逆向求解车体支撑点振动响应，实现基于物理模型驱动的运输车辆对包装箱直接激励信号的重构。

首先利用变截面欧拉-伯努利梁模型来模拟弹体的动力学特性，根据弹体的模态分析将弹体分为三个单元，采用有限单元法推导弹体柔性模型；然后，应用牛顿法分别建立运输车辆、包装箱、弹体和导弹部件的动力学模型；最后根据模型各部分的自由度匹配原则构建“运输车辆-包装箱-弹体-导弹部件”刚柔耦合动力学模型。具体过程如下：

1）根据弹体的模态，采用有限单元法得到弹体梁单元离散模型：

$$\boldsymbol{M}_a\ddot{\boldsymbol{Z}}_a+\boldsymbol{C}_a\dot{\boldsymbol{Z}}_a+\boldsymbol{K}_a\boldsymbol{Z}_a=\boldsymbol{H}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_a-\boldsymbol{H}_b^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_b \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}_a$、$\boldsymbol{C}_a$、$\boldsymbol{K}_a$分别为弹体的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{Z}_a$、$\dot{\boldsymbol{Z}}_a$、$\ddot{\boldsymbol{Z}}_a$分别为弹体梁单元的节点振动位移向量、振动速度向量和振动加速度向量；$\boldsymbol{H}_a$为弹体支撑与弹体作用点的位置矩阵；$\boldsymbol{H}_b$为导弹部件与弹体作用点的位置矩阵；$\boldsymbol{F}_a$为弹体支撑和弹体的相互作用力矩阵；$\boldsymbol{F}_b$为导弹部件和弹体的相互作用力矩阵。

2）根据牛顿定律，得到导弹部件的动力学模型：

$$\boldsymbol{M}_b\ddot{\boldsymbol{Z}}_b-\boldsymbol{C}_b\boldsymbol{H}_b\dot{\boldsymbol{Z}}_a+\boldsymbol{C}_b\dot{\boldsymbol{Z}}_b-\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{H}_b\boldsymbol{Z}_a+\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{Z}_b=0 \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_b$、$\dot{\boldsymbol{Z}}_b$、$\ddot{\boldsymbol{Z}}_b$分别为导弹部件的振动位移向量、振动速度向量和振动加速度向量；$\boldsymbol{M}_b$、$\boldsymbol{C}_b$、$\boldsymbol{K}_b$分别为导弹部件的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

3）联合式（2）和式（3）得到弹体的动力学模型：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{M}_a\ddot{\boldsymbol{Z}}_a+(\boldsymbol{C}_a+\boldsymbol{H}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{ac}\boldsymbol{H}_a+\boldsymbol{H}_b^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_b\boldsymbol{H}_b)\dot{\boldsymbol{Z}}_a+\\&(\boldsymbol{K}_a+\boldsymbol{H}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{ac}\boldsymbol{H}_a+\boldsymbol{H}_b^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{H}_b)\boldsymbol{Z}_a-\boldsymbol{H}_b^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_b\dot{\boldsymbol{Z}}_b-\\&\boldsymbol{H}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}_{ac}\boldsymbol{H}_c\dot{\boldsymbol{Z}}_c-\boldsymbol{H}_b^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_b\boldsymbol{Z}_b-\boldsymbol{H}_a^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{ac}\boldsymbol{H}_c\boldsymbol{Z}_c=0\end{aligned} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_c$、$\dot{\boldsymbol{Z}}_c$分别为包装箱质心的振动位移向量和振动速度向量；$\boldsymbol{C}_{ac}$、$\boldsymbol{K}_{ac}$分别为弹体支撑的阻尼矩阵和刚度矩阵；

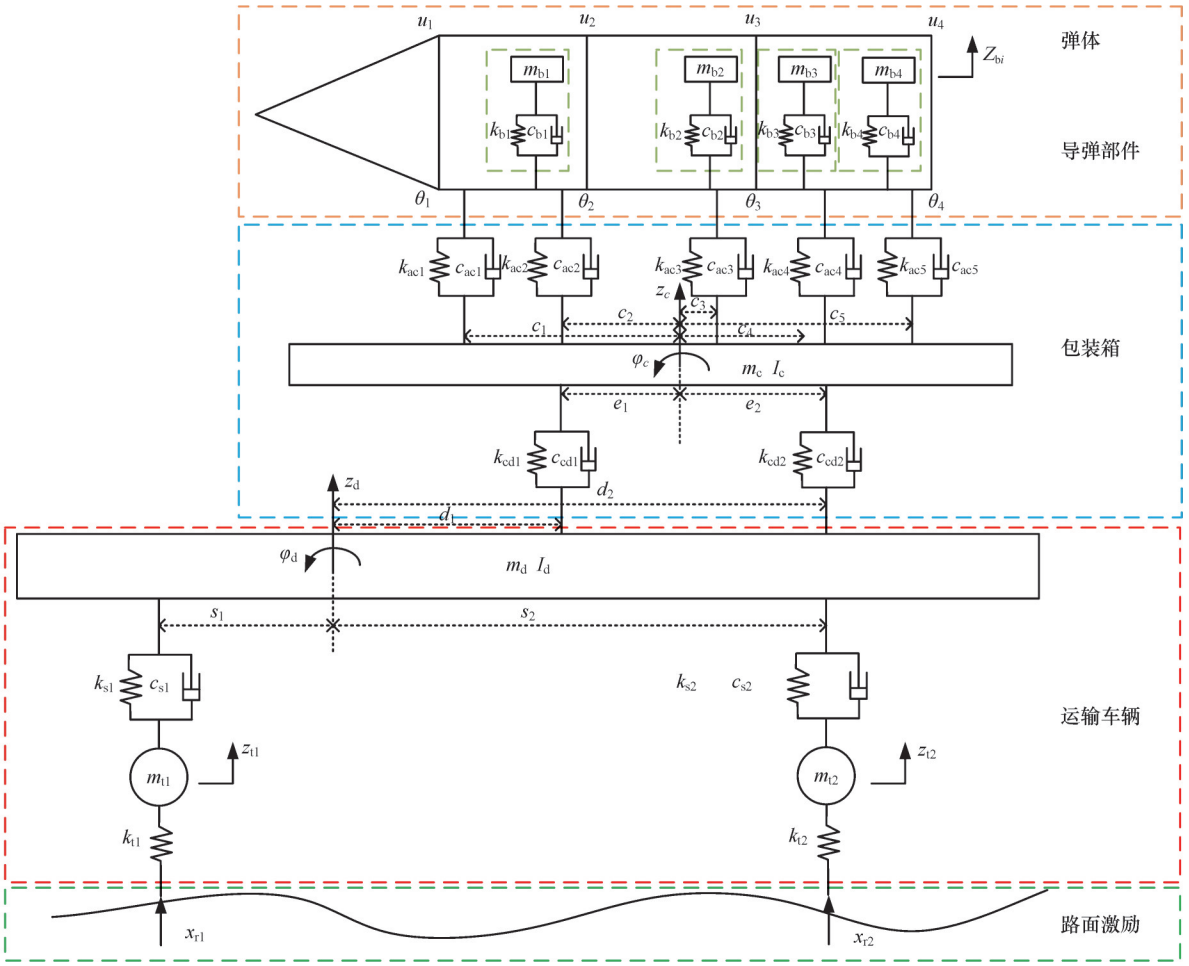


图7　“运输车辆-包装箱-弹体-导弹部件”耦合动力学模型

Fig.7　Coupled dynamic model of transportation vehicle packaging box missile body missile components

H_c为弹体支撑与包装箱作用点的位置矩阵。

4)同理,可得导弹运载箱的动力学模型:

$$M_c\ddot{Z}_c-H_c^{\mathrm{T}}C_{ac}H_a\dot{Z}_a+(H_c^{\mathrm{T}}C_{ac}H_c+H_e^{\mathrm{T}}C_{cd}H_e)\dot{Z}_c-H_c^{\mathrm{T}}C_{cd}H_d\dot{Z}_d+(H_c^{\mathrm{T}}K_{ac}H_c+H_e^{\mathrm{T}}K_{cd}H_e)Z_c-H_c^{\mathrm{T}}K_{ac}H_aZ_a-H_e^{\mathrm{T}}K_{cd}H_dZ_d=0 \tag{5}$$

式中:M_c为包装箱的质量矩阵;$\ddot{Z}_c$为包装箱质心振动加速度向量;Z_d、$\dot{Z}_d$分别为运输车辆质心的振动位移向量和振动速度向量;C_{cd}、K_{cd}分别为包装箱支撑的阻尼矩阵和刚度矩阵;H_e为包装箱支撑与包装箱作用点的位置矩阵。

5)运输车辆车体的动力学模型为

$$M_d\ddot{Z}_d-H_d^{\mathrm{T}}C_{cd}H_e\dot{Z}_c+(H_s^{\mathrm{T}}C_sH_s+H_d^{\mathrm{T}}C_{cd}H_d)\dot{Z}_d-H_s^{\mathrm{T}}C_s\dot{Z}_t+(H_s^{\mathrm{T}}K_sH_s+H_d^{\mathrm{T}}K_{cd}H_d)Z_d-H_d^{\mathrm{T}}K_{cd}H_eZ_c-H_s^{\mathrm{T}}K_sZ_t=0 \tag{6}$$

式中:M_d为运输车辆车体的质量矩阵;$\ddot{Z}_d$为运输车辆质心振动加速度向量;Z_t、$\dot{Z}_t$分别为运输车辆车轮质心的振动位移向量和振动速度向量;C_s、K_s分别为运输车辆悬架的阻尼矩阵和刚度矩阵;H_d为包装箱支撑与运输车辆作用点的位置矩阵;H_s为运输车辆悬架与运输车辆作用点的位置矩阵。

6)运输车辆车轮的动力学模型为

$$M_t\ddot{Z}_t-C_sH_s\dot{Z}_d+C_s\dot{Z}_t-K_sH_sZ_d+(K_t+K_s)Z_t=K_tZ_r \tag{7}$$

式中:M_t为运输车辆车轮的质量矩阵;$\ddot{Z}_t$为运输车辆车轮振动加速度向量;K_t为运输车辆车轮的刚度矩阵;Z_r为路面不平度输入。

7)最后根据自由度匹配原则,得到“运输车辆-包装箱-弹体-导弹部件”刚柔耦合动力学方程:

$$M\ddot{Z}+C\dot{Z}+KZ=EZ_r \tag{8}$$

其中,M、C、K分别为动力学方程的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;Z、$\dot{Z}$、$\ddot{Z}$分别为动力学方程的振动位移向量、振动速度向量和振动加速度向量。且有

$$C=\begin{bmatrix} C_a+H_a^{\mathrm{T}}C_{ac}H_a+H_b^{\mathrm{T}}C_bH_b & -H_b^{\mathrm{T}}C_b & -H_a^{\mathrm{T}}C_{ac}H_c & 0 & 0\\ -C_bH_b & C_b & 0 & 0 & 0\\ -H_c^{\mathrm{T}}C_{ac}H_a & 0 & H_c^{\mathrm{T}}C_{ac}H_c+H_e^{\mathrm{T}}C_{cd}H_e & -H_e^{\mathrm{T}}C_{cd}H_d & 0\\ 0 & 0 & -H_d^{\mathrm{T}}C_{cd}H_e & H_s^{\mathrm{T}}C_sH_s+H_d^{\mathrm{T}}C_{cd}H_d & -H_s^{\mathrm{T}}C_s\\ 0 & 0 & 0 & -C_sH_s & C_s \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$K=\begin{bmatrix} K_a+H_a^{\mathrm{T}}K_{ac}H_a+H_b^{\mathrm{T}}K_bH_b & -H_b^{\mathrm{T}}K_b & -H_a^{\mathrm{T}}K_{ac}H_c & 0 & 0 \\ -K_bH_b & K_b & 0 & 0 & 0 \\ -H_c^{\mathrm{T}}K_{ac}H_a & 0 & H_c^{\mathrm{T}}K_{ac}H_c+H_e^{\mathrm{T}}K_{cd}H_e & -H_e^{\mathrm{T}}K_{cd}H_d & 0 \\ 0 & 0 & -H_d^{\mathrm{T}}K_{cd}H_e & H_s^{\mathrm{T}}K_sH_s+H_d^{\mathrm{T}}K_{cd}H_d & -H_s^{\mathrm{T}}K_s \\ 0 & 0 & 0 & -K_sH_s & K_t+K_s \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$M=\begin{bmatrix} M_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_t \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$E=\begin{bmatrix} 0 & K_t \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

基于上述步骤完成了“运输车辆-导弹运载箱-弹体-导弹部件”刚柔耦合动力学模型的构建，通过开发数值求解程序实现动力学方程解析，其中图7所示模型的关键参数详见表3。

表3 刚柔耦合动力学模型参数

Tab.3 Parameters of rigid flexible coupling dynamic model

导弹部件和支撑	弹体和支撑	运输车辆
m_{b1}=5.35 kg	L_1=0.68 m	m_c=25.68 kg
m_{b2}=6.15 kg	L_2=0.37 m	I_c=9.53 kg·m^2
m_{b3}=9.35 kg	L_3=0.71 m	m_d=500 kg
m_{b4}=4.23 kg	x_{a11}=0.09 m	I_d=2.9×10^3 kg·m^2
k_{b1}=3.97×10^5 N/m	x_{a12}=0.43 m	m_{ti}=32.5 kg
k_{b2}=9.76×10^7 N/m	x_{a21}=0.16 m	k_{cdi}=1.9 MN/m
k_{b3}=9.36×10^7 N/m	x_{a31}=0.19 m	c_{cdi}=200 N·s/m
k_{b4}=7.10×10^7 N/m	x_{a32}=0.66 m	k_{si}=1.243×10^5 N/m
c_{b1}=1.5 kN/(m·s)	c_1=0.73 m	c_{si}=3.6 kN·s/m
c_{b2}=2.5 kN/(m·s)	c_2=0.23 m	k_{ti}=600 kN/m
c_{b3}=3 kN/(m·s)	c_3=0.04 m	e_1=0.23 m
c_{b4}=1.7 kN/(m·s)	c_4=0.38 m	e_2=0.38 m
x_{b11}=0.48 m	c_5=0.84 m	d_1=1.22 m
x_{b21}=0.22 m		d_2=1.83 m
x_{b31}=0.21 m		s_1=0.9 m
x_{b32}=0.56 m		s_2=1.8 m

3.2 模型有效性验证

为验证刚柔耦合动力学模型的有效性，利用道路模拟试验平台开展导弹-包装箱-运输车的正弦扫频试验。将道路模拟试验时所使用的扫频信号作为刚柔耦合动力学模型的输入并进行数值模拟，获得相应的动态位移响应y_{d1}和y_{d2}。通过对比y_{d1}和y_{d2}的试验与仿真幅频特性曲线（图8、图9），发现两者在3 Hz附近均呈现显著共振峰。为进一步量化模型精度，提取3 Hz（图10）、5Hz（图11）特征频率点的响应峰值进行对比分析。在3 Hz共振工况下，y_{d1}和y_{d2}的仿真峰值误差分别为0.55%和0.49%；在5 Hz非共振频段，对应误差增至6.01%和4.98%。幅频特性曲线分布特征表明，动态响应y_{d1}和y_{d2}的仿真与试验结果吻合度较高，表明所建的刚柔耦合动力学模型可有效表征包装箱-弹体系统的动态传递特性。基于验证后的动力学模型进一步提出逆向激励重构：通过提取车体支撑点动态响应建立包装箱输入激励的数学表征模型。获取物理模型驱动的导弹道路运输振动环境模拟试验激励谱。

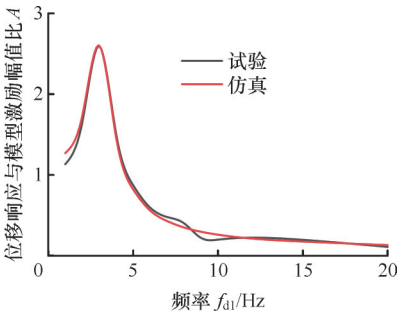


图8 y_{d1}幅频曲线对比

Fig.8 Comparison of y_{d1} amplitude frequency curve

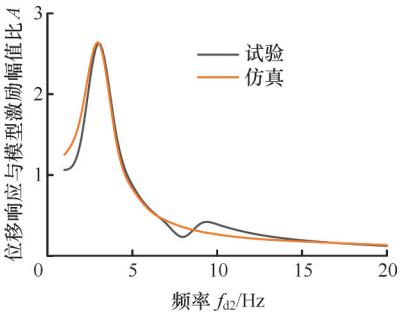


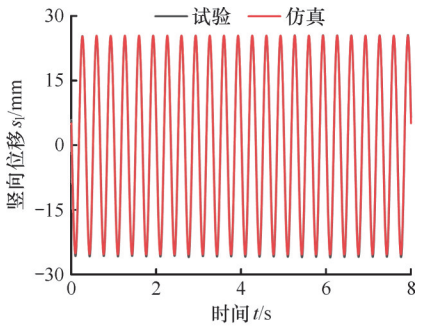
图9 y_{d2}幅频曲线对比

Fig.9 Comparison of y_{d2} amplitude frequency curve

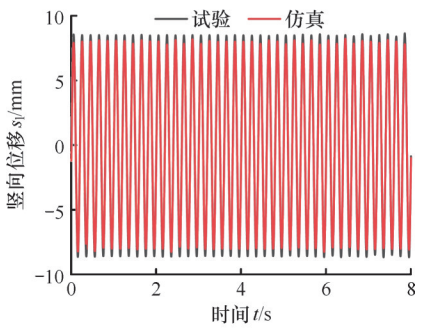
4 讨论分析

本文通过10 km/h戈壁路、铺面路、起伏路、砂石路及40 km/h铺面路等多工况运输模拟试验，系统对比车辆-包装箱耦合动力学模型（模型驱动）与QPSO-LSTM智能算法（数据驱动）对包装箱前后支撑点y_{d1}和y_{d2}激励重构的差异性。10 km/h起伏路工况下位移时程曲线及功率谱密度的对比结果如图12、图13所示。各试验工况下的位移均方根值见表4。

通过不同工况下包装箱前后支撑点（y_{d1}和y_{d2}）激励信号重构的对比分析（图12、图13，表4）不难发现：①基于模型驱动的激励信号重构结果与实测位移时程趋势基本一致，均方根相对误差控制在13%以内；②结合前文发现，路面运输模拟试验误差大于正弦扫频试验结果，表明单一激励模式的验证难以全面评估模型在复杂路况下的适用性；③相较而言，基于QPSO-LSTM智能算



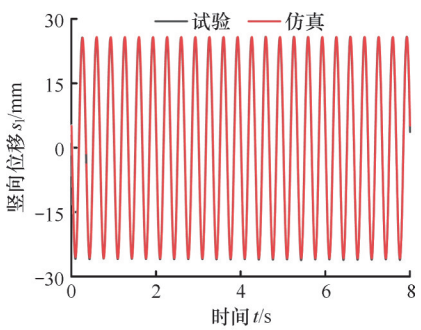
(a)3 Hz



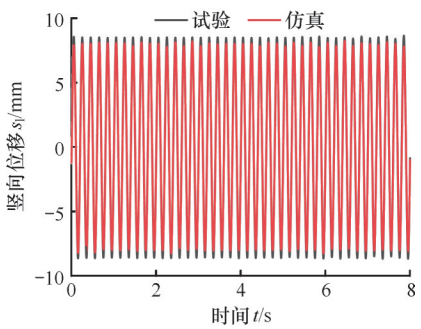
(b)5 Hz

图 10　不同频率下 y_{d1} 对比

Fig.10　Comparison of y_{d1} at different frequencies



(a)3 Hz

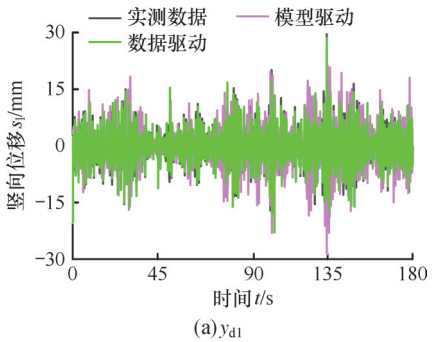


(b)5 Hz

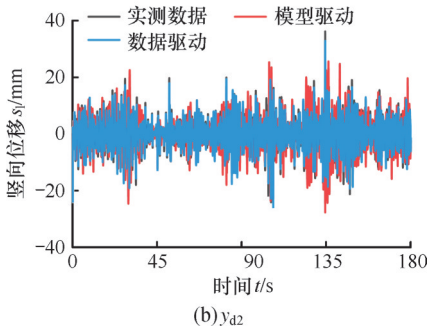
图 11　不同频率下 y_{d2} 对比

Fig.11　Comparison of y_{d2} at different frequencies

法的激励信号重构结果与实测数据的吻合度更高，且整体的均方根相对误差低于3%；④数据驱动方法在低频段的吻合度更好，说明数据驱动方法在非线性激励特征提取方面更具优势，低频段涵盖了道路运输的绝大部分能量，更能真实反映实际运输车辆振动环境；⑤对比 GJB 150.16A—



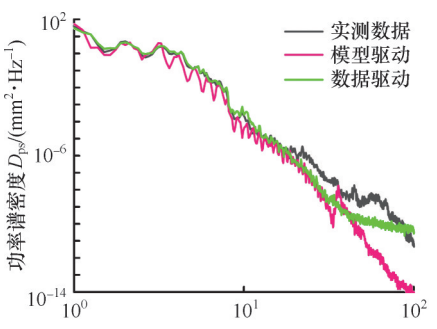
(a)y_{d1}



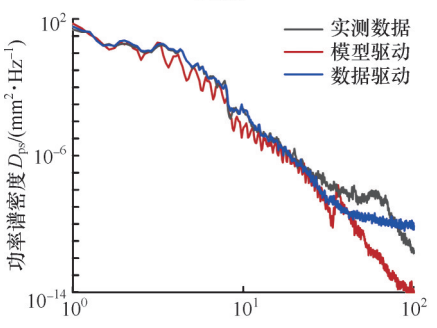
(b)y_{d2}

图 12　10 km/h 起伏路不同位置位移对比

Fig.12　Comparison of displacement at different positions on 10km/h undulating roads



(a)y_{d1}



(b)y_{d2}

图 13　10 km/h 起伏路不同位置功率谱对比

Fig.13　Comparison of power spectra at different positions on 10 km/h undulating roads

2009 道路运输标准载荷谱，本文重构的激励信号功率谱能量更高，与实际运输车辆等效的振动环境模拟试验的功率谱更吻合，这反映了弹体道路运输振动环境模拟试验激励信号重构的必要性。

表4 各工况的位移均方根值对比

Tab.4 Comparison of root mean square displacement values under various operating conditions

试验工况	测点位置	实测数据	模型驱动	模型驱动相对误差/%	数据驱动	数据驱动相对误差/%
1	y_{d1}	3.40	3.49	2.65	3.35	1.47
	y_{d2}	3.90	4.07	4.36	3.79	2.82
2	y_{d1}	1.81	1.80	0.55	1.79	1.10
	y_{d2}	1.78	1.82	2.25	1.81	1.69
3	y_{d1}	4.76	5.02	5.46	4.81	1.05
	y_{d2}	5.46	5.80	6.22	5.50	0.73
4	y_{d1}	6.29	6.92	10.02	6.44	2.38
	y_{d2}	7.02	7.87	12.11	6.93	1.28
5	y_{d1}	4.51	4.59	1.77	4.59	1.77
	y_{d2}	5.57	5.91	6.10	5.63	1.08
均值				5.15		1.54

5 结论

1)本文提出的QPSO-LSTM智能重构方法融合量子化参数搜索与深度学习特征提取,重构信号整体的均方根相对误差控制在3%以内,在低频段的吻合度则更高,能够真实反映实际运输车辆振动环境。

2)通过对比模型驱动、数据驱动方法重构的激励信号,定量分析证实了数据驱动方法的精度优势:在五种测试工况下,其均方根相对误差的平均值(1.54%)显著低于模型驱动方法的相应值(5.15%),平均相对误差减小70.1%,且波动范围更小,证明数据驱动方法在激励信号重构中具有更高的精度、更好的适应性和更强的鲁棒性。

3)试验分析结果表明,通用标准的道路运输振动环境载荷谱存在振动能量低估风险,实验室振动环境试验需针对弹体实际运输环境定制载荷谱。基于数据驱动的激励信号重构方法为复杂装备运输振动环境试验提供了具有工程实用性的解决方案。

参考文献:

[1] 商霖,张海瑞,李璞. 导弹前定向件公路机动运输疲劳载荷谱的编制及寿命预估[J]. 振动与冲击,2019,38(9):88-93.
SHANG Lin, ZHANG Hairui, LI Pu. Compilation of Fatigue Load Spectrum and Life Estimation for Missile Front-sliders in Road Motorized Transport Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 88-93.

[2] 杨森,吴斌,郑旸. 机械式模拟运输台仿真研究[J]. 装备环境工程,2012,9(5):106-111.
YANG Sen, WU Bin, ZHENG Yang. Simulation Research of the Mechanical Simulation of Transport Vibration Test Stand [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 106-111.

[3] 刘新佳,郭迅. 空空导弹运输振动试验方法研究[J]. 航空科学技术,2020,31(4):54-58.
LIU Xinjia, GUO Xun. Study on the Test Method of Airborne Missile Transportation Vibration [J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(4): 54-58.

[4] GÜMÜŞ M S, KALYONCU M. Fatigue Failure of High Strength Steels under Extreme Vibrations of Military Standards: a Comparative Study[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(3): 1059-1068.

[5] LÜ Tiegang, ZHANG Xiaowen, QIAO Junfu, et al. Theoretical Research on Dynamic Modeling of Rigid-flexible Coupling System with Double Joint Folded Wing [J]. AIP Advances, 2024, 14(4): 045002.

[6] 于永利,张国伟,焦明亮,等. 发射架体带弹运输环境下的安全性评估及提升方法[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(增刊1):182-186.
YU Yongli, ZHANG Guowei, JIAO Mingliang, et al. Safety Assessment and Lifting Methods of a Launcher Body in a Projectile Transport Environment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(S1): 182-186.

[7] TIEGANG L, GUOGUANG C, SHUAI L. Kinematic Characteristics of Longitudinal Double Folding Wings[J]. The Aeronautical Journal, 2021, 125(1293): 1977-2001.

[8] 黄大伟,陈立昆,高亚东. 基于LSTM和响应分解的冲击载荷识别方法研究[J]. 振动与冲击,2024,43(3):69-76.
HUANG Dawei, CHEN Likun, GAO Yadong. Impact Load Identification Method Based on LSTM and Response Decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(3): 69-76.

[9] ZHOU J M, DONG Longlei, GUAN Wei, et al. Impact Load Identification of Nonlinear Structures Using Deep Recurrent Neural Network[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106292.

[10] 王光定,陶文斌,纵兆生,等. 某军用包装箱动力学仿真与试验研究[J]. 包装工程,2019,40(23):117-123.
WANG Guangding, TAO Wenbin, ZONG Zhaosheng, et al. Dynamic Simulation and Experiment on Plastics Ammunition Package [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(23): 117-123.

[11] WANG Lu, FANG Qiansheng, GAO Lifu, et al. Research on Load Excitation Identification Method of Multi-connected Air Conditioning Compressor Based on RBF Network with Multi-strategy Fusion SSA [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2024, 15(11): 5185-5198.

[12] 韩庆,房强,范伟光,等. 特种车辆多维载荷谱加速方法及在振动环境模拟试验中的应用[J]. 装备环境工程,2024,21(6):45-52.
HAN Qing, FANG Qiang, FAN Weiguang, et al. Multi-dimensional Load Signals Acceleration Method for Special Vehicles and Its Application in Vibration Environment Simulation Test [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 45-52.

[13] CHOU Y T, KUO P C, LI Kuangyao, et al. Inductive Graph-based Long Short-term Memory Network for the Prediction of Nonlinear Floor Responses and Member Forces of Steel Buildings Subjected to Orthogonal Horizontal Ground Motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2025, 54(2): 491-507.

[14] 郭俊锋,胡婧怡,王智明. 基于压缩感知的缺失机械振动信号重构新方法[J]. 振动与冲击,2024,43(10):197-204.
GUO Junfeng, HU Jingyi, WANG Zhiming. Novel Method for Missing Mechanical Vibration Signal Reconstruction

Based on Compressed Sensing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(10): 197-204.
[15] ZHANG Ruiyang, CHEN Zhao, CHEN Su, et al. Deep Long Short-term Memory Networks for Nonlinear Structural Seismic Response Prediction[J]. Computers & Structures, 2019, 220: 55-68.
[16] WEI Biao, ZHENG Xianglin, JIANG Lizhong, et al. Seismic Response Prediction and Fragility Assessment of High-speed Railway Bridges Using Machine Learning Technology [J]. Structures, 2024, 66: 106845.
[17] WANG Haifeng, WU Teng. Knowledge-enhanced Deep Learning for Wind-induced Nonlinear Structural Dynamic Analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (11): 04020235.
[18] ZHANG Bo, HU Ziang, WU Pin, et al. EPT: a Data-driven Transformer Model for Earthquake Prediction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123: 106176.
[19] HANIFI S, LIU Xiaolei, LIN Zi, et al. A Critical Review of Wind Power Forecasting Methods—Past, Present and Future[J]. Energies, 2020, 13(15): 3764.
[20] LI H L, WANG T Y, YAN H. Real-time Prediction of Dynamic Irregularity and Acceleration of HSR Bridges Using Modified LSGAN and In-service Train [J]. Smart Structures and Systems, 2023, 31(5): 501-516.
[21] 毛建锋，李铮，伍军，等. 基于PSO-LSTM的重载铁路车轨桥系统随机振动响应预测方法[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(9)：3661-3671.
MAO Jianfeng, LI Zheng, WU Jun, et al. Predicting Random Vibration Response of Heavy-haul Train-track-bridge System Based on PSO-LSTM[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(9): 3661-3671.
[22] ZHOU Zhiyang, JIA Baoxin, YUAN Wenya, et al. Vibration Response Prediction and Vibration Safety Assessment Method for Building Structures around Viaducts under the Action of High-speed Railway Trains[J]. Construction and Building Materials, 2024, 422: 135877.
[23] 凌启辉，张维，赵前程，等. 轧机垂直系统动力学参数辨识[J]. 钢铁，2019，54(11)：123-129.
LING Qihui, ZHANG Wei, ZHAO Qiancheng, et al. Dynamic Parameter Identification of Rolling Mill Vertical System[J]. Iron and Steel, 2019, 54(11): 123-129.
[24] ZHANG Jinhua, ZHAO Zhengyang, YAN Jie, et al. Ultra-short-term Wind Power Forecasting Based on CGAN-CNN-LSTM Model Supported by Lidar[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4369.
[25] DENG Wanyi, MA Xiaoxue, QIAO Weiliang. A Hybrid Intelligent Optimization Algorithm Based on a Learning Strategy[J]. Mathematics, 2024, 12(16): 2570.

（编辑　陈　勇）

作者简介：凌启辉*（通信作者），男，1986年生，教授、博士研究生导师。研究方向为复杂机电系统动力学与控制。E-mail：lqh_hunan@163.com。

本文引用格式：
凌启辉，严勇勇，李新宇，等. 导弹道路运输振动环境模拟试验激励信号重构[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：2058-2067.
LING Qihui, YAN Yongyong, LI Xinyu, et al. Reconstruction of Excitation Signals for Vibration Environment Simulation Tests of Projectile Road Transportation[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 2058-2067.

（上接第2057页）

[20] PENG Linfa, XU Zhutian, LAI Xinmin. An Investigation of Electrical-assisted Solid-state Welding/Bonding Process for Thin Metallic Sheets: Experiments and Modeling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228 (4): 582-594.
[21] LI Yongfang, DAS H, HONG S T, et al. Electrically Assisted Pressure Joining of Titanium Alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 681-686.
[22] ZHANG Shengwei, GAO Kun, HONG S T, et al. Electrically Assisted Solid State Lap Joining of Dissimilar Steel S45C and Aluminum 6061-T6 Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 271-282.
[23] 李玉龙，杨泓，刘冠鹏，等. 铜/钢爆炸焊接头界面组织及力学性能研究[J]. 材料科学与工艺，2020，28(1)：39-45.
LI Yulong, YANG Hong, LIU Guanpeng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Explosive Welded Joint of Copper/Steel[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(1): 39-45.
[24] 李国栋，栗卓新，李宏林，等. 等离子堆敷铜-钢异种金属焊接接头性能及结合机理研究[J]. 中国机械工程，2008，19(5)：606-609.
LI Guodong, LI Zhuoxin, LI Honglin, et al. Study on the Bonding Properties and Mechanism of Copper-steel Dissimilar Metal Joint Deposited by Plasma Arc[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 606-609.
[25] 侯林涛，陈文革，刘盈斌，等. 铜钢异质复合材料连接特性的分析[J]. 材料研究学报，2015，29(9)：693-700.
HOU Lintao, CHEN Wenge, LIU Yingbin, et al. Analyses on Connection Characteristics of Composites of Steel-copper[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(9): 693-700.
[26] ZHU Y H, JIANG Y B, LIU X M. Electropulsing Induced Circular Phase Transformations of a Cold-deformed ZA27 Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 737: 630-636.
[27] 尹飞，陈裕，华林，等. 电脉冲辅助冷却的M50钢热环轧组织性能调控[J]. 轴承，2024(11)：77-85.
YIN Fei, CHEN Yu, HUA Lin, et al. Microstructure and Properties Control of M50 Steel during Hot Ring Rolling with Electric Pulse Assisted Cooling [J]. Bear, 2024(11): 77-85.

（编辑　陈　勇）

作者简介：张胜伟，男，1990年生，副教授。研究方向为异种金属的电辅助固相压力焊接和金属的电脉冲快速强韧化。E-mail：swzhang@dlmu.edu.cn。高　坤*（通信作者），男，1990年生，副教授。研究方向为材料搅拌摩擦焊及轻量化设计。E-mail：qcgaokun@lnut.edu.cn。

本文引用格式：
张胜伟，王景雨，于彦，等. 电辅助固相压力焊接铜和不锈钢的微观组织及力学性能研究[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：2049-2057.
ZHANG Shengwei, WANG Jingyu, YU Yan, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Electroassisted Solid-state Pressure Welding of Copper and Stainless Steel[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 2049-2057.