

重大工程装备

一种非平稳随机振动试验控制系统设计

邓婷, 严侠, 王宇飞

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 实现非平稳随机振动试验控制, 在传统随机振动试验控制理论上, 提出一种针对非平稳连续振动方式下的随机试验控制方法。**方法** 将均方根时变的非平稳随机振动过程近似等效为一个均方根和PSD谱的乘积模型, 通过实时计算归一化的驱动谱, 利用均方根实时跟随控制策略, 更新驱动信号, 实现连续非平稳随机振动控制。利用软件编程实现控制算法和策略, 并基于工控机、实时控制器、数据采集模块等硬件, 设计一套非平稳随机振动试验控制系统。将该控制系统与振动台试验系统连接, 开展时变随机功能验证试验。**结果** 归一化后的PSD谱控制误差在 ± 3 dB范围内, 控制效果和精度能够满足设计要求。**结论** 使用所设计的控制系统开展非平稳随机振动试验是可行的, 能够实现对参考时变均方根曲线的实时跟随控制。

关键词: 非平稳; 随机振动; 均方根时变; 归一化; 控制系统

中图分类号: TP20

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)03-0094-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.014

A Control System Design of Non-Stationary Random Vibration Experiment

DENG Ting, YAN Xia, WANG Yu-fei

(Institute of Systemic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: To control the non-stationary random vibration system, based on the traditional control theory of random vibration experiments, a new control for the random experiments was proposed in the condition of non-stationary continuous vibration. The non-stationary random vibration process of time varying Root Mean Square (RMS) was approximately equivalent to a product model of RMS and PSD spectrum. The normalized driving spectrum was calculated in real time, and the driving signal was updated by root mean square real-time following control strategy to realize continuous non-stationary random vibration control. The control arithmetic actualized through software program, and designed a control system of non-stationary random vibration experiments by Industrial Personal Computer, embedded real-time controller, data acquisition module. The control system was connected with the shaking table test system to carry out the verification test. Results showed that the normalized PSD spectrum control precision was less than ± 3 dB, and the control effect and accuracy can meet the design requirements. In conclusion the designed control system can synchronously follow and keep the reference

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2021-12-17

Received: 2021-11-04; Revised: 2021-12-17

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目 (JSHS2018212C001)

Fund: Technical Basic Research Project of National Defense Science and Technology Bureau (JSHS2018212C001)

作者简介: 邓婷 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为测控技术、振动环境试验装备研发。

Biography: DENG Ting (1988—), Female, Master, Engineer, Research focus: test and control, vibration environmental test equipment development.

引文格式: 邓婷, 严侠, 王宇飞. 一种非平稳随机振动试验控制系统设计[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 094-100.

DENG Ting, YAN Xia, WANG Yu-fei. A Control System Design of Non-stationary Random Vibration Experiment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 094-100.

RMS with a design-satisfied control effect.

KEY WORDS: non-stationary; random vibration; time varying RMS; normalization; control system

随机振动试验是模拟各类振动工况的常用方式之一，例如公路、铁路运输，机载、舰载，弹上飞行等振动环境。随机振动通常按照其统计特性又可分为平稳和非平稳随机振动。平稳随机振动一般是指具有高斯分布函数、各态历经特性、均方根值和谱型固定不变的随机振动。实际的振动环境往往出现一些非平稳、非高斯的特征，如均方根值时变、均值时变、频率结构时变等^[1-3]。本文主要探讨均方根时变这种非平稳随机振动试验控制系统。

早期由于受到技术水平的限制，只能采用统计学和功率谱包络的方式将非平稳随机近似等效或加严为平稳随机条件来模拟。这种方法对于产品的环境适应性或耐久性考核是可行的，但对于一些功能性、可靠性考核，则存在一定程度上的欠试验或过试验问题^[4-10]。传统的随机振动试验方法仅能进行平稳随机振动试验模拟，考虑到产品所经实际振动环境多是非平稳随机振动，传统的平稳随机振动试验常常无法准确模拟产品在真实振动环境下的失效情况。因此，设计非平稳随机振动控制系统可以有效解决这个问题，实现对随机振动环境的更加真实模拟。

目前，针对非平稳随机振动环境的模拟方法主要为利用实测数据开展波形再现试验。例如，车辆道路谱再现模拟试验，就是对测量得到的时域目标载荷谱进行重现^[11-14]。这种时域波形跟踪模拟方式是以相同功率谱的激励引起相同损伤假设和振动载荷为各态历经的平稳随机过程假说为基础，从一定程度上实现了对振动载荷的幅值域模拟，而目前市面上尚未见到针对非平稳随机振动进行频域模拟的商用成熟控制器产品。文中拟引入功率谱归一化控制、均方根实时跟

踪的控制方法，实现基于功率谱的频域模拟，在确保所施加的随机载荷的功率谱与真实工作载荷的功率谱相同的同时，使均方根时变曲线保持一致，以更加准确地再现非平稳随机振动过程中能量的变化过程。

1 非平稳随机振动简介

1.1 控制原理

非平稳随机振动控制的难点在于系统均衡时间短，非线性变化明显。平稳随机控制试验的时间一般从几分钟到几小时，全程均在不断均衡修正控制结果；而非平稳随机振动试验的量级（通常指均方根）随时间变化迅速，要求快速识别并跟踪系统特性，实时在线修正驱动输出信号，并对下一步控制信号进行预处理，以获得期望的控制响应。

本文的非平稳随机振动控制原理是在传统平稳随机振动试验控制理论基础之上^[15-20]，针对时变均方根非平稳随机振动的特点，提出的一种振动试验控制方法及其实现。与传统随机振动试验控制相比，非平稳随机振动控制可同时实现 PSD 谱的谱形控制和非平稳随机信号的均方根时间变化曲线受控。基本控制原理是将非平稳随机振动过程近似等效为一个均方根和 PSD 谱的乘积模型，其中均方根随时间的变化反映了非平稳随机振动过程中能量随时间的变化过程。PSD 谱的谱形保持不变，表明在整个振动过程中的频率特性基本维持稳定，这与真实的振动环境工况非常接近。当均方根值不随时间发生变化时，即等效为平稳随机振动。非平稳随机控制的原理如图 1 所示。

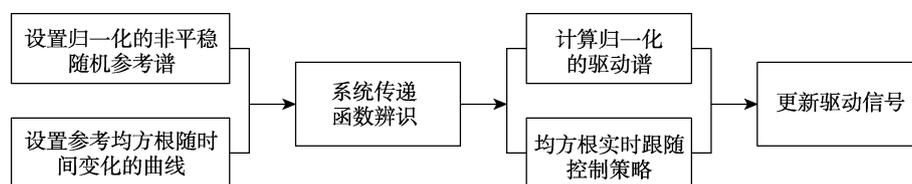


图 1 非平稳随机控制原理

Fig.1 Diagram of the non-stationary random vibration control system

非平稳随机控制的具体实现过程如下所述：

1) 设置归一化的非平稳随机参考谱，同时设置非平稳随机参考均方根随时间变化的曲线。

2) 通过发送低量级随机信号采集控制点响应信号的方式，进行系统传递函数的辨识，获得系统传递函数和传递函数的逆。

3) 根据归一化的参考谱和归一化的控制谱，实时修正得到更新后的归一化驱动谱，驱动谱相位随机

化后，进行 IFFT 变换和信号搭接。同时，根据参考均方根随时间的变化曲线，引入均方根实时跟随控制策略，以获得驱动信号的均方根增益，利用归一化驱动帧数据搭接和驱动信号均方根增益乘积，更新输出的驱动信号。

4) 通过控制信号 PSD 与参考信号的 PSD 进行比较，进一步修正驱动信号，以保证控制信号的归一化控制谱及均方根随时间变化曲线均控制在一定的容

差范围内。

1.2 控制算法

平稳随机过程的统计量可以用时间平均值代替集合平均值,因为平稳随机过程的统计特性不随时间和各次实现的不同而变化,因此一次实现的统计量时间平均值,会随时间的增长而趋于真值。但非平稳的随机过程,各个时刻的统计特性不相同,统计量按时间平均的意义不大,因为不可能用时间平均来推断集合的统计特性。从理论上讲,非平稳随机过程只有用集合平均的方法才能得到各个时刻的统计特性。

非平稳随机振动环境,大多数情况下可以认为其振动的频率成分保持不变,振动量值随时间有规律的变化。这种非平稳随机振动可用乘积模型来表示,即非平稳随机过程 $\{x(t)\}$ 可以由确定的函数 $a(t)$ 和平稳随机过程 $\{u(t)\}$ 的乘积来表示。数学表达式为:

$$\{x(t)\} = a(t)\{u(t)\} \quad (1)$$

$\{x(t)\}$ 的自相关函数可表达为:

$$R_{xx}(\tau, t) = E[x(t-\tau/2)x(t+\tau/2)] = R_{aa}(\tau, t)R_{uu}(\tau) \quad (2)$$

式中: $R_{aa}(\tau, t) = a(t-\tau/2)a(t+\tau/2)$, $R_{uu}(\tau) = E[u(t-\tau/2)u(t+\tau/2)]$ 。

因为 $\{u(t)\}$ 是平稳随机过程,所以 $R_{uu}(\tau)$ 只是落后时间 τ 的函数,而与时间 t 无关。假设 $a(t)$ 是一个比 $u(t)$ 下限频率还低的非负函数时,可以有如下近似关系:

$$R_{aa}(t) \approx a^2(t) \quad (3)$$

$$R_{xx}(\tau, t) \approx a^2(t)R_{uu}(\tau) \quad (4)$$

$R_{xx}(\tau, t)$ 通过 FFT 变换可得到 $\{x(t)\}$ 的单边自谱密度函数 $G_{xx}(f, t)$:

$$G_{xx}(f, t) \approx a^2(t)G_{uu}(f) \quad (5)$$

对于非平稳随机过程,若使式(4)中的 $R_{uu}(\tau)$ 归一化,即 $R_{uu}(0) = 1$, 当 $\tau=0$, 式(4)可表达为:

$$R_{xx}(0, t) \approx a^2(t) = \psi_{xx}^2(t) \quad (6)$$

$\psi_{xx}^2(t)$ 表示过程 $\{x(t)\}$ 的方差随时间的变化,在振动过程中可以看作振动信号的均方根值随时间的变化。按归一化方式可取 $u(t)$ 为零均值且标准差为 1 的平稳遍历高斯随机过程。根据式(5)和式(6)可得到非平稳随机信号的乘积模型,见式(7)。

$$G_{xx}(f, t) \approx \psi_{xx}^2(t)G_{uu}(f) \quad (7)$$

因此,在非平稳控制算法设计中,将 $G_{uu}(f)$ 作为归一化的参考谱,需考虑 $\psi_{xx}^2(t)$ 的短时计算方法。另外,本方法建立在假定乘积模型中的 $a(t)$ 变化频率低于 $u(t)$ 的最低频率的基础上,否则式(7)不成立。

1.3 关键技术

1.3.1 归一化控制谱

首先对控制测量信号进行单帧测量,然后对信号

进行加窗、FFT 处理,再变换成 PSD 谱,将得到单帧的控制 PSD 谱进行归一化处理。归一化 PSD 谱方法见式(8)。

$$\bar{C}_{\text{new}} = \left(\frac{1}{C_{\text{rms}}} \right) * C_{\text{new}} \quad (8)$$

式中: \bar{C}_{new} 为当前帧归一化的 PSD 谱; C_{new} 为当前帧的 PSD 谱; C_{rms} 为当前帧 PSD 谱频域均方根。

为了保证归一化控制谱的均衡精度,首先对控制谱进行指数平均,再进行 4 帧的算术平均,见式(9)。

$$\bar{C}_n = \theta * \bar{C}_{\text{new}} + (1-\theta) * \bar{C}_{n-1} \quad (9)$$

式中: \bar{C}_{n-1} 为上一次的归一化控制谱; \bar{C}_{new} 为新计算的归一化控制谱; \bar{C}_n 为更新的归一化控制谱;

θ 为更新权系数,与自由度 n_{DOF} 有关, $\theta = \frac{16}{n_{\text{DOF}} + 8}$,

n_{DOF} 一般取 8~200。

1.3.2 均方根跟随控制

将参考均方根时间变化曲线与控制均方根进行均方根实时跟随控制策略,计算更新得到当前驱动均方根增益。驱动均方根增益的计算公式见式(10)。

$$D_{\text{rms}}(k) = \frac{D_{\text{rms}}(k-1)}{T(k)} \quad (10)$$

其中,均方根修正系数 $T(k)$ 为:

$$T(k) = 1 - \left(\frac{R_{\text{rms}}(k)}{C_{\text{rms}}(k)} \right)^\gamma / 2 \quad (11)$$

式中: γ 为修正系数,取值 0.5~2; $R_{\text{rms}}(k)$ 为当前时刻的参考均方根; $C_{\text{rms}}(k)$ 为当前帧 PSD 谱频域均方根。

2 非平稳随机振动控制系统设计

2.1 总体结构设计

非平稳随机振动控制系统采用分布式集散控制模式进行设计,控制系统的总体结构如图 2 所示。采用高性能工控机作为非平稳随机振动控制软件的载体,也是数据分析、处理、显示的人机交互界面。配套的伺服控制器采用实时控制器,负责数据实时采集、控制算法运算以及驱动信号输出等。通过伺服控制软件实现对振动台内环的伺服控制功能,伺服控制软件上下位机之间通过以太网方式实现数字通讯,并与非平稳随机振动控制软件形成全数字的软件连接。通过功率放大器输出驱动信号,激励振动台进行振动信号发生,再由数据采集系统采集实时控制加速度作为反馈信号,最终完成整个振动系统的闭环控制。其中非平稳随机振动控制系统由非平稳随机控制软件及伺服控制器(上、下位机)组成。

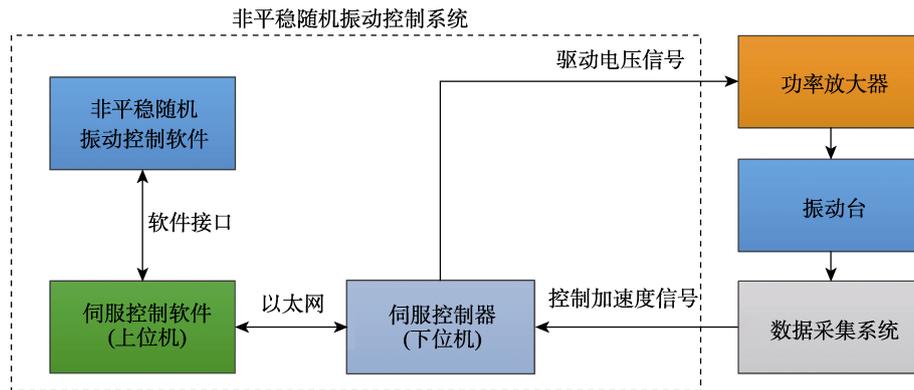


图 2 非平稳随机振动控制系统总体结构

Fig.2 Structure chart of the non-stationary random vibration control system

2.2 硬件配置

为实现非平稳随机振动控制算法，利用高性能的

工控机、实时控制器、机箱、数据采集模块等搭建了一套控制系统硬件平台，从而保证控制系统的可靠性、稳定性和运算速度。具体配置见表 1。

表 1 非平稳随机控制系统硬件配置

Tab.1 Hardware configuration list of the non-stationary random vibration control system

序号	名称	数量	技术指标	功能
1	工控机	1 台	i7 处理器，内存 500 G，Win7 操作系统	安装非平稳随机振动控制软件、伺服控制软件等的载体
2	实时控制器	1 台	高性能嵌入式控制器，搭载 2.3 GHz 八核处理器，具有最多 16 个超级线程虚拟内核和三通道 1866DDR4 内存	控制算法运行硬件平台，作为伺服控制器的下位机
3	控制机箱	1 个	4 槽	实时控制器插接机箱
4	数据采集模块	1 块	8 通道输入输出模块，输入输出电压范围：-10V~10V；最大采样速率 750 ks/s	驱动电压信号输出，控制加速度信号采集

2.3 软件设计

控制系统软件作为人机相互界面，主要负责完成系统参数设置、参考谱设置、初始驱动信号生成、系统自检、系统传递函数计算、振动信号发生及信号采集分析等功能。根据该控制系统基本功能分析及性能要求，所设计的非平稳随机振动控制软件主要完成以下几个方面的任务：

1) 时变随机控制，将实现非平稳随机信号参考谱及均方根时变曲线的高精度模拟控制，从而完成非平稳随机振动试验任务。主要功能包括试验参数设

置、参考谱设置、谱处理、传递函数设置、系统辨识、振动运行、迭代修正等几个步骤。

2) 信号监测，负责完成试验系统运行过程中所有系统信号的监测，以及系统的故障监测与处理。

3) 数据管理，包括试验数据的回读与显示，数据时频域分析。

4) 另外，控制软件还具备系统保护以及系统日志等功能。

软件的功能模块设计如图 3 所示。控制软件界面设计如图 4 所示。

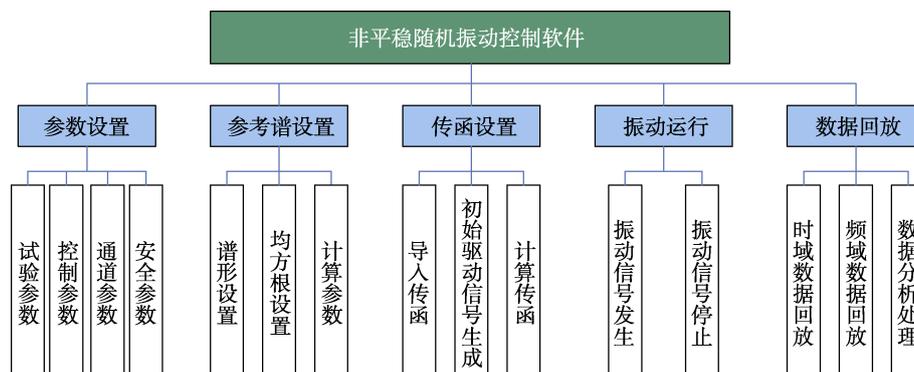


图 3 非平稳随机振动控制软件功能模块

Fig.3 Function module diagram of the non-stationary random vibration control software

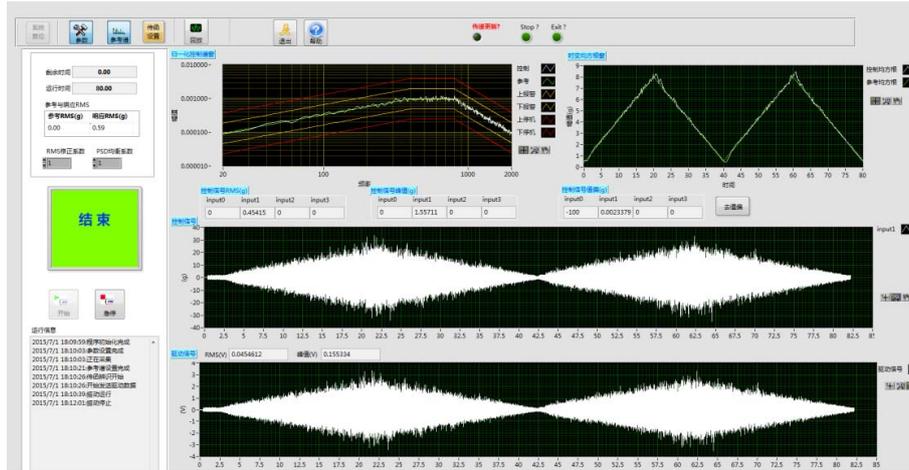


图4 非平稳随机振动控制软件主界面

Fig.4 Main interface of the non-stationary random vibration control software

控制软件的具体功能如下所述。

1) 参数设置: 如试验信息、控制参数、传递函数辨识参数、自检参数、安全参数、通道设置。

2) 参考谱设置: 参考谱输入; 根据参考谱数据, 计算出参考随机 PSD 谱; 均方根随时间轴变化的曲线输入; 计算并显示频率范围、最大速度、最大加速度、最大位移。

3) 自检: 按照设置的参数进行低量级的预试验。

4) 系统辨识: 根据预试验的结果估算系统传递函数。

5) 振动运行控制: 进行振动信号发生、停止流程控制, 同时在振动过程中不断更新系统传递函数, 在单帧周期内利用新的传函计算下一帧参考谱所需的驱动信号, 同时引入误差信号进行修正。

6) 数据回放: 数据的时域回放, 包括多数据曲线的显示、截取, 误差分析; 数据频域回放, 包括多数据曲线的谱显示及误差分析。数据后处理: 数据的时域处理, 频域处理, 及处理后数据保存。

3 验证试验

本文提出的非平稳随机振动控制试验方法是在传统随机振动试验控制基础之上, 另一种针对时变均方根的非平稳连续随机振动试验控制方法。为验证系统控制功能和效果, 选择连振动台进行试验验证, 分别开展了平稳随机振动控制模拟试验和均方根时变的非平稳随机振动控制模拟试验。

3.1 连台验证试验

3.1.1 平稳随机振动控制模拟试验

利用设计的非平稳随机控制系统连接某激振系统, 在加 50 kg 试件负载的情况下, 设置梯形谱随机振动信号作为目标参考谱, 目标信号的均方根值设为恒定值 1g, 信号频率为 20~2000 Hz, 试验时间为 30 s。

选取台面的中心点粘贴一只振动加速度传感器作为控制点, 采用单点控制方式, 加速度反馈闭环控制, 开展平稳随机振动控制的结果如图 5 所示。

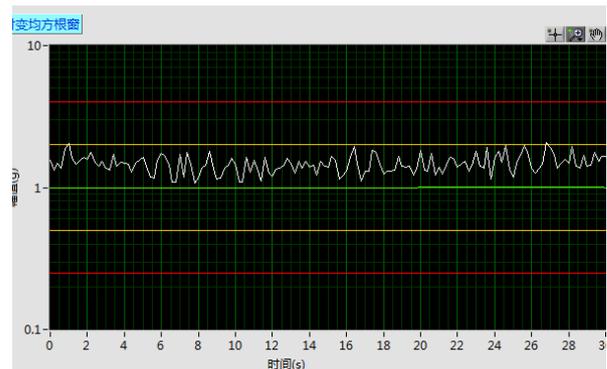


图5 连台平稳随机振动控制均方根跟随效果

Fig.5 Results of the stationary random vibration control system with vibration table

3.1.2 非稳态随机振动控制模拟试验

连接某电动振动台, 在振动台不加负载的情况下, 选取一段均方根值时变的非平稳随机振动信号作为目标信号, 目标信号的归一化参考谱及均方根变化曲线见图 6 的上半部分。其中参考谱信号的频率为 10~2000 Hz, 参考均方根时间变化曲线的总长度为 120 s, 其中均方根值为 0.5g~4g。按照固定斜率规则变化, 均方根变化的时间间隔为 0.2 s。选取振动台面的中心点粘贴一只振动加速度传感器作为控制点, 采用单点控制方式, 加速度反馈闭环控制。利用所设计的非平稳随机振动试验控制系统连电动台进行随机控制的结果如图 6 所示。

3.2 试验结果分析

根据随机振动控制试验结果来看, 当设置目标的均方根变化曲线为恒定值时, 即目标为平稳随机振动信号, 均方根曲线稳定受控, 验证了所设计的随机振

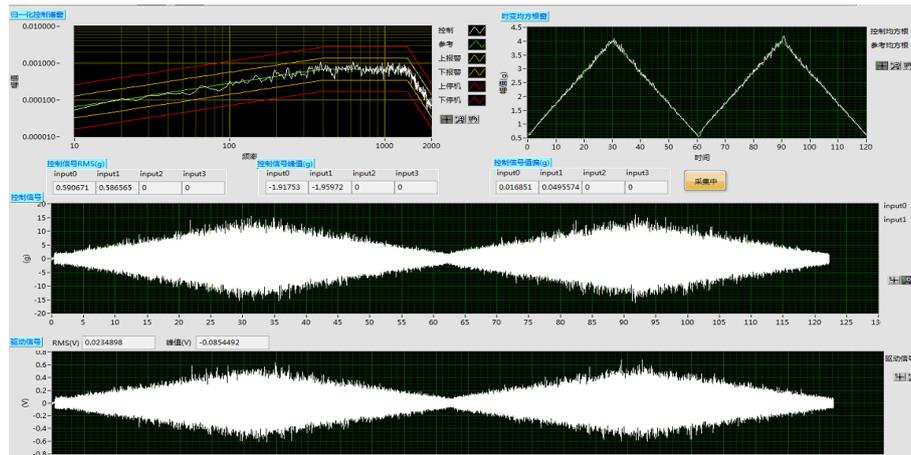


图 6 连台非平稳随机振动控制效果

Fig.6 Results of the non-stationary random vibration control system with vibration table

动控制系统功能可行。当设定目标均方根不是恒定值，而是随时间发生变化的曲线时，利用设计的非平稳随机振动控制系统，经过系统传递函数辨识，驱动实时修正，最终可实现归一化后的控制 PSD 谱误差在 ± 3 dB 范围以内，且控制的均方根变化曲线也取得了较好的跟随效果。证明了该非平稳随机振动控制算法正确有效，实现了预期的设计目标。

4 结语

提出了一种区别于传统平稳随机控制的非平稳随机振动控制方法，主要采用归一化的 PSD 谱修正与均方根跟随补偿相结合的方式，来实现时变均方根的非平稳连续随机振动控制。将该控制系统与通用振动台试验系统相连接，可开展非平稳随机振动试验。在连台试验中，采用单点、响应控制方式，取得了较好的均方根时变曲线跟随效果。归一化后的控制 PSD 谱误差在 ± 3 dB 范围内，验证了控制方法的正确性和有效性。针对一些复杂非线性系统的非平稳随机振动控制，还可以从跟踪修正的速度、引入实时非线性补偿因子等方面继续开展深入研究，进一步对控制策略进行优化提升。

参考文献：

- [1] 李杰, 陈涛, 郭文翠, 等. 汽车非平稳随机振动统计特性求解的一种新方法[J]. 汽车工程, 2021, 43(6): 917-923.
LI Jie, CHEN Tao, GUO Wen-cui, et al. A New Method for Solving the Statistical Characteristics of Vehicle Non-Stationary Random Vibration[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(6): 917-923.
- [2] 蒋瑜, 陶俊勇, 程红伟. 非高斯随机振动疲劳分析与试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
JIANG Yu, TAO Jun-yong, CHENG Hong-wei. Non-

Gaussian Random Vibration Fatigue Analysis and Test Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.

- [3] 曾昕, 蒋瑜, 范政伟, 等. 包装运输试验中非平稳随机振动表征和模拟方法[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 1-10.
ZENG Xin, JIANG Yu, FAN Zheng-wei, et al. Characterization and Simulation Method of Non-Stationary Random Vibration in Packaging and Transportation Test[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 1-10.
- [4] 何浩祥, 范少勇, 闫维明. 时频非平稳地震动模型及结构随机振动应用[J]. 振动测试与诊断, 2019, 39(6): 1189-1197.
HE Hao-xiang, FAN Shao-yong, YAN Wei-ming. Time-Frequency Nonstationarity Stochastic Ground Motion Model and Application in Structural Random Vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(6): 1189-1197.
- [5] 雷良育, 张卫平, 王江涛. 非平稳随机路面模拟与分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4): 877-880.
LEI Liang-yu, ZHANG Wei-ping, WANG Jiang-tao. Simulation and Analyses on Nonstationary Random Road[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 877-880.
- [6] 孙涛, 徐桂红, 柴陵江. 四轮非平稳随机激励路面模型的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 868-872.
SUN Tao, XU Gui-hong, CHAI Ling-jiang. A Study on the Road Model with Four-Wheel Non-Stationary Random Excitations[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(10): 868-872.
- [7] 帅健, 许葵. 埋地管道的非平稳随机振动[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 130-134.
SHUAI Jian, XU Kui. Non-Stationary Random Vibrations of Buried Pipelines[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5): 130-134.
- [8] 王世辉, 张磊, 李铁, 等. 固体火箭发动机振动试验过试验分析与控制[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(4): 247-250.

- WANG Shi-hui, ZHANG Lei, LI Tie, et al. Analysis and Control of Excessive Level in Vibration Test for Solid Rocket Motor[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(4): 247-250.
- [9] 蒋瑜, 陈循, 陶俊勇. 非高斯随机振动试验控制技术研究[C]//第九届全国振动理论及应用学术会议论文集. 杭州: [出版者不详], 2007.
- JIANG Yu, CHEN Xun, TAO Jun-yong. Study on the Non-Gaussian Random Vibration Control[C]//9th National Vibration Technology and Application. Hangzhou: [s. n.], 2007.
- [10] 徐飞, 李传日, 姜同敏, 等. 非高斯随机振动的模拟方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(9): 1239-1244.
- XU Fei, LI Chuan-ri, JIANG Tong-min, et al. Simulation of Non-Gaussian Random Vibration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(9): 1239-1244.
- [11] 范文涛, 姜同敏, 刁晓翔. 基于电动振动台的非高斯随机振动控制技术的研究和实现[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 41-43.
- FAN Wen-tao, JIANG Tong-min, DIAO Xiao-xu. Research and Realization of Non-Gaussian Random Vibration Control Technology Based on Electrodynamics Shaker[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(2): 41-43.
- [12] 吴家驹, 贺智国, 王璟南. 非平稳随机振动与烈度控制[J]. 强度与环境, 2019, 46(2): 1-6.
- WU Jia-ju, HE Zhi-guo, WANG Jing-nan. Non-Stationary Random Vibration and Intensity Control[J]. Structure & Environment Engineering, 2019, 46(2): 1-6.
- [13] 刘大维, 蒋荣超, 朱龙龙, 等. 基于遗传算法的路面有理函数功率谱密度参数识别[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 128-133.
- LIU Da-wei, JIANG Rong-chao, ZHU Long-long, et al. Parameters Identification of Rational Function Power Spectral Density of Pavement Based on Genetic Algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 128-133.
- [14] 蒋瑜, 陶俊勇, 王得志, 等. 一种新的非高斯随机振动数值模拟方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 169-173.
- JIANG Yu, TAO Jun-yong, WANG De-zhi, et al. A Novel Approach for Numerical Simulation of a Non-Gaussian Random Vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19): 169-173.
- [15] STEINWOLF A. Random Vibration Testing beyond PSD Limitations[J]. Sound and Vibration, 2006, 40(9): 12-21.
- [16] ROUILLARD V, SEK M A. Synthesizing Nonstationary, Non-Gaussian Random Vibrations[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(8): 423-439.
- [17] GARCIA-ROMEU-MARTINEZ M A, ROUILLARD V. On the Statistical Distribution of Road Vehicle Vibrations[J]. Packaging Technology and Science, 2011, 24(8): 451-467.
- [18] ROUILLARD V, SEK M. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(2): 82-95.
- [19] 徐俊, 傅耘, 张建军, 等. 基于最大谱的非平稳随机振动数据分析处理方法研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 54-60.
- XU Jun, FU Yun, ZHANG Jian-jun, et al. The Research of Processing Method Based on Maximum Spectral for Non-Stationary Random Vibration Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 54-60.
- [20] 夏江宁, 逮志国, 宋汉文. 基于信号流循环的振动试验控制回路分析研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 84-87.
- XIA Jiang-ning, LU Zhi-guo, SONG Han-wen. Control Circuit in the Vibration Test Based on Signal Flow Cycle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(2): 84-87.