

基于 MATLAB/Simulink 多输入多输出随机 振动试验模拟研究

叶焰杰 陈怀海 贺旭东 郑 威

(南京航空航天大学振动工程研究所 南京 210016)

摘 要: 在建立双电振动台刚体模型与物理参数模型的基础上,结合梁有限元模型并采用控制方法进行了多输入多输出随机振动试验模拟研究。首先采用 Virtual. lab 软件实现双振动台的多体动力学刚体模型与梁有限元模型的刚柔耦合建模,并在 MATLAB/Simulink 中建立双振动台电磁作动系统模型。然后,研究并使用矩阵幂次控制算法建立多输入多输出的振动控制系统模型,进行梁试验件的多输入多输出随机振动控制试验的仿真。仿真结果表明,使用此机电耦合的联合仿真方法,可实现包括多输入多输出振动控制、仿真信号的持续输入输出、电磁及振动台机械系统的闭环控制虚拟振动试验。

关键词: 多输入多输出;振动控制;虚拟实验;振动台

中图分类号: TP391.9;TB123 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Simulation study on MIMO random vibration test based on MATLAB/Simulink

Ye Yanjie Chen Huaihai He Xudong Zheng Wei

(Institute of Vibration Engineering Research, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the rigid-body and parameterized models for double electrodynamic shaker, using a control algorithm the MIMO random vibration simulation with beam finite element model is studied. By using the software Virtual. lab, a coupled rigid-flexible model is created with the method of coupling the multi-body dynamics rigid model and the beam finite element model. Then the coupled electro-mechanical lumped parameter shaker model is established in the MATLAB/Simulink. A vibration controller model is then implemented, based on existing algorithms. At this stage, the MIMO random vibration simulation test is run. Results show that the electromechanical coupling simulation method can properly carry out the closed-loop control virtual random vibration test.

Keywords: MIMO; vibration control; virtual test; shaker

1 引 言

航空航天领域中,振动环境试验往往是检测产品性能的有效手段,通过振动台进行振动环境试验可以直观地观察到产品在不同激励下的响应情况,得到的试验数据一般情况下正确可靠,方法直接简便,但同时也存在着一些缺陷。例如试验周期较长,耗资巨大;在试验台也难以实现实际工程中的振动情况;对一些结构复杂的产品,局部的应力应变数据难以采集;对于尺寸巨大的产品如大型飞机,难以在振动台上实现全尺寸振动试验等^[1]。因此,针对以上的几个问题,采用新的技术手段,加快试验效率并保证一定的正确性,成为了现如今主流的研究方向。虚拟振动试验仿真技术便能弥补这些缺陷,其具有效率高、成本低的优点,而且能得到实际试验无法测得

的数据,提高了试验前预示能力和试验后分析能力。在国外,RICCI S 等人^[2]在随机振动虚拟仿真试验方面进行了系统的研究,建立了一套对具体实验设备的仿真精度较高的模拟实验系统。

随着工程试验需求的提高,单自由度振动环境试验已难以满足产品试验需要,多自由度随机振动试验的研究逐渐引起重视。而在多自由度随机振动试验中,为了防止试验件的过试验,确保其安全性,需要利用随机振动控制理论使控制谱能快速的均衡到预期范围内。贺旭东等人^[3-4]对差分修正算法进行了一些改进,提出了比例均方根算法以及矩阵幂次算法,矩阵幂次控制算法具有稳定收敛的自功率谱控制性能,同时还具有互功率谱的控制能力,且易于工程实现。

通过 Virtual. lab 软件、Patran 建模软件建立起双振动台

刚体与梁有限元柔性体的刚柔耦合模型,并借助 MATLAB/Simulink 强大的数字信号处理能力和便捷的数学模型仿真功能^[5-7]建立双振动台电磁作动系统与多输入多输出随机振动控制系统,从而进行梁试验件的多输入多输出随机振动控制虚拟试验,使控制结果在计算机终端显示。

2 虚拟试验联合建模

作为提供作动力的激振器种类繁多^[8-9],而航空航天

$$\begin{cases} m_c \ddot{x}_c + c_c \dot{x}_c - c_c \dot{x}_t + k_c x_c - k_c x_t = K_f i \\ m_t \ddot{x}_t - c_c \dot{x}_c + (c_c + c_a) \dot{x}_t - c_a \dot{x}_b - k_c x_c + (k_c + k_s) x_t - k_s x_b = 0 \\ m_b \ddot{x}_b - c_a \dot{x}_t + (c_a + c_b) \dot{x}_b - k_a x_t + (k_a + k_b) x_b = -K_f i \\ e = iR + L \frac{di}{dt} + K_f (\dot{x}_c - \dot{x}_b) \end{cases} \quad (1)$$

振动试验广泛使用的是电振动台,它具有频带范围宽、波形完整、较好控制等优点。从机械结构考虑,电振动台主要由动圈与线圈组合体、静圈构成。动圈骨架与线圈之间可视作通过弹簧阻尼系统连接,动圈组合体通过弹簧钢片悬挂在静圈上,而静圈又通过空气弹簧与地面固连。其中线圈受到电磁力影响,其反作用力作用于静圈。因此电振动台的机电模型可由以下式子表示:

表 1 电振动台机电模型各参数具体值

变量	数值	变量	数值	变量	数值
m_c /kg	3.92	m_t /kg	41.08	m_b /kg	346
k_c /(N/m)	5.47×10^8	k_a /(N/m)	5.25×10^5	k_b /(N/m)	7.21×10^4
c_c /(kg/s)	484	c_a /(kg/s)	4367	c_b /(kg/s)	25 000
R / Ω	0.61	L /mH	0.81	K_f /(N/A)	38

根据以上物理参数在 Virtual.lab 中建立如图 1 所示的电振动台刚体模型,并在模型上创建输入输出控制节点。首先分别创建两个 force 输入节点,一个作用在线圈上,另一个作用在静圈底部;然后将线圈速度与动圈加速度作为输出节点,运行计算 solution.set 后得到一个可在 MATLAB/Simulink 中运行的 plantout.m 的 M 文件。最后在 Simulink 中建立如图 2 所示的振动台电磁作动的联合仿真模型。

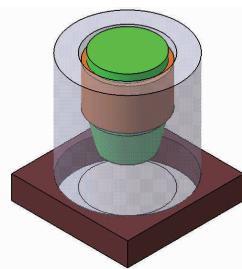


图 1 Virtual. lab 中电振动台刚体模型

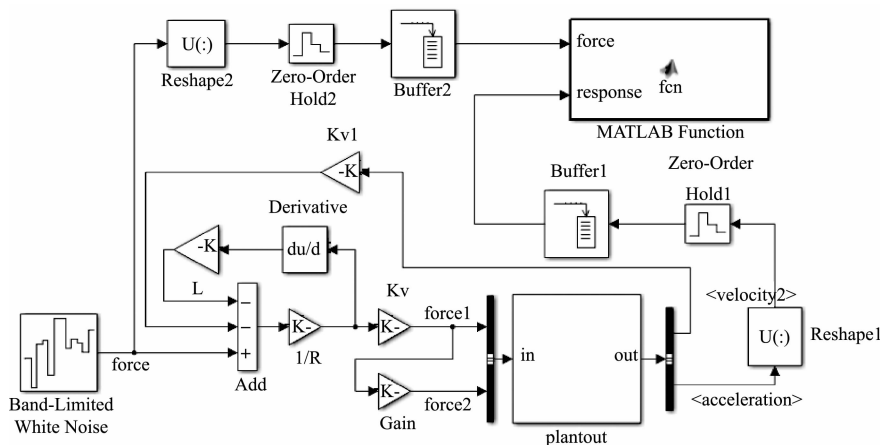


图 2 MATLAB/Simulink 中电振动台联合仿真模型

研究单电振动台机电模型的联合仿真后,在此基础上再加一个同样参数的振动台,形成双振动台双点激励输入模型。在 Patran 建模软件中建立梁有限元模型形成 bdf 文件后,导入进 Virtual. lab 中,对原梁模型进行柔性化处理。通过夹具将梁模型连接与振动台台面上后,采用 Craig-Bampton 模态综合法,对振动台刚体模型和梁有限元模型进行刚柔耦合模态分析,并剔除 2 000 Hz 以上的高阶模态,选取梁有限元模型与夹具连接点的加速度作为控制对象,形成双振动台梁试验件的多输入多输出振动仿真模型,如图 3 所示。最后在 MATLAB/Simulink 中建立双电振动台机电数学参数模型。

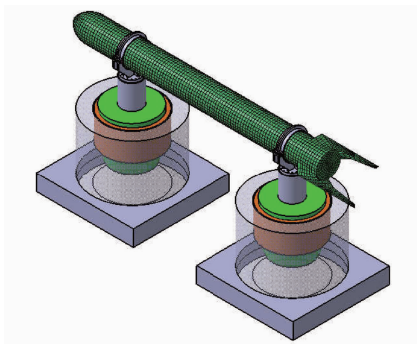


图 3 双振动台梁试验件多输入多输出
振动试验仿真模型

3 多输入多输出频响函数估计及控制算法

建立的多输入多输出随机振动试验仿真模型不涉及噪声影响,故采用输出噪声估计模型进行加速度频响函数计算。假设一个多输入多输出系统 G , 输入端测得输入信号 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$, 输出端测得响应信号 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_p]^T$, 此时激励信号 X 、响应信号 Y 和输出噪声 N 之间关系可写成:

$$Y = GX + N \quad (2)$$

对式(2)两端同时乘 X^H , 并求数学期望可得:

$$S_{yx} = GS_{xx} + S_{nx} \quad (3)$$

式中: S_{yx} 是响应信号与激励信号之间的互功率谱矩阵, S_{xx} 是激励信号的自功率谱矩阵, S_{nx} 是输出噪声与激励信号之间的互功率谱矩阵。当输出噪声与激励信号不相关时:

$$S_{nx} = E(N, X^H) = 0 \quad (4)$$

此时频响函数估计公式便为:

$$G_1 = S_{yx} S_{xx}^{-1} \quad (5)$$

根据此公式在建立的双振动台机电数学参数模型中编辑 MATLAB Function 模块,进行多输入多输出加速度频响函数估计,仿真模型如图 4 所示。计算得到的频响函数如图 5 所示,可以看出曲线较为光滑,峰值明显,仿真效果良好。

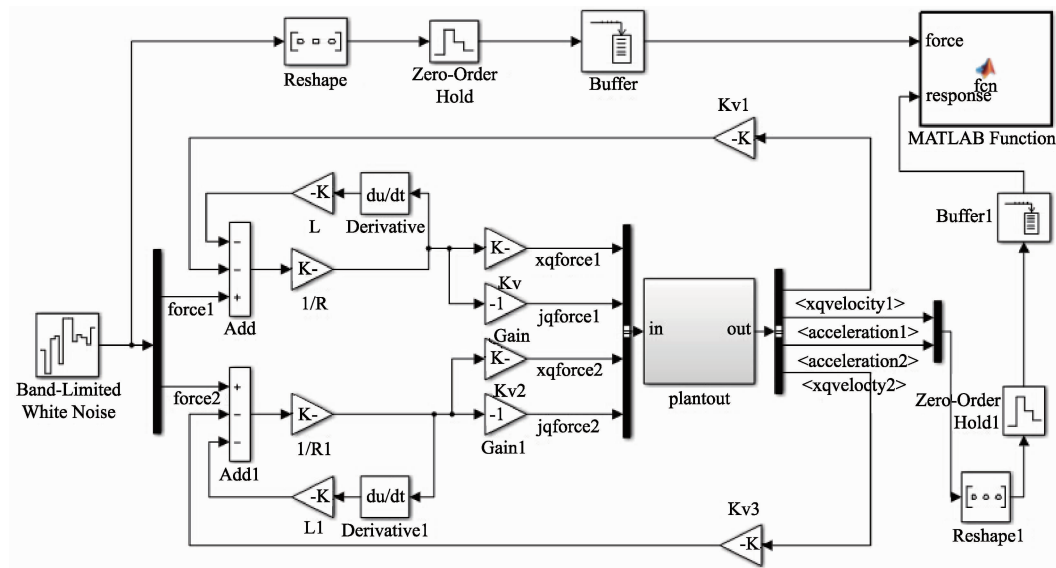


图 4 多输入多输出加速度频响函数计算模型

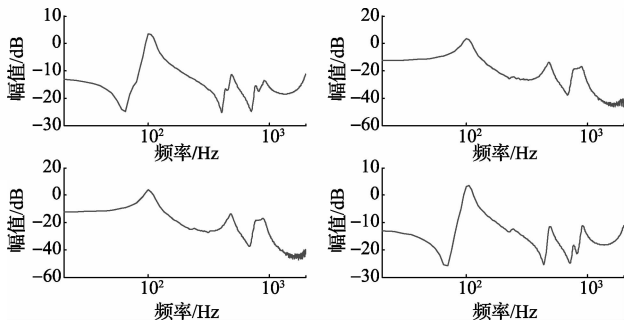


图5 多输出多输出加速度/电压频响函数

多输入多输出随机振动控制的目标是使控制谱和参考谱一致,一般以响应的功率谱 S_{yy} 作为控制谱,由振动理论可得:

$$S_{yy} = G S_{dd} G^H = R \quad (6)$$

式中: G 为系统频响矩阵, S_{dd} 为驱动谱矩阵, R 为参考谱矩阵。分别对 R 和 S_{yy} 进行 Cholesky 分解:

$$R = L L^H \quad (7)$$

$$S_{yy} = L_s L_s^H \quad (8)$$

由于频响函数测量及其他因素的影响,频响函数往往存在估计误差,定义误差修正矩阵 Δ ,使得:

$$\Delta S_{yy} \Delta^H = R \quad (9)$$

根据式(7)、(8)、(9)可知:

$$\Delta L_s L_s^H \Delta^H = L L^H \quad (10)$$

比较上式两端可得:

$$\Delta = L L_s^{-1} \quad (11)$$

因此,可由计算得到的 Δ 修正 L ,为了保证修正的收敛和提高控制精度,在此引入收敛幂指数 ϵ ,即:

$$L_{new} = \Delta^\epsilon L_{old} \quad (12)$$

式(8)、(11)、(12)便是矩阵幂次法的主要构成,矩阵幂次控制算法具有自谱和互谱控制能力,不会出现“负值问题”,具备了稳定收敛的控制特性,控制过程不需要做“归一化”处理。

4 多输入多输出随机振动控制联合仿真

综合所建立的双电振动台和梁柔性体的联合仿真模型以及矩阵幂次控制算法,使用 MATLAB/Simulink 中 Stateflow 模块进行持续信号多输入和多输出的随机振动控制试验仿真。Stateflow 模块^[11]具有可改变系统状态的功能,可在修正与非修正状态下互相切换,建立的持续控制仿真模型如图6所示。图中 Chart 模块能够实现信号的持续输出与反馈信号的接收和处理,并通过 MATLAB Function 可实时监测梁有限元模型上两个控制点的加速度功率谱密度变化。两个输出点控制频段范围均为 20~2 000 Hz,自谱密度中设置 20~100 Hz 为 +3 dB 的上升谱,100~1 000 Hz 为幅值为 0.1g 的平直谱,1 000~2 000 Hz 为 -3 dB 的下降谱;互谱密度中设置相干系数为 20~2 000 Hz 值从 0.1 线性增加到 0.8,相位设置两点相差 90°。

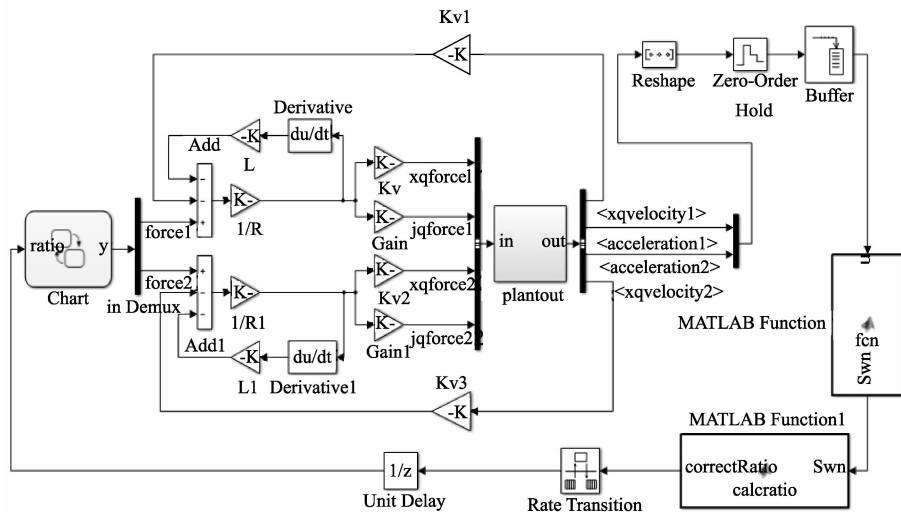


图6 多输入多输出随机振动控制 Simulink 模型

图7为修正后的加速度功率谱密度结果。从图中可以看出加速度响应曲线未超出3 dB的控制容许界限,修正后控

制点响应曲线与参考谱曲线基本吻合,控制效果良好。这说明仿真和试验控制精度较高,满足试验条件要求。

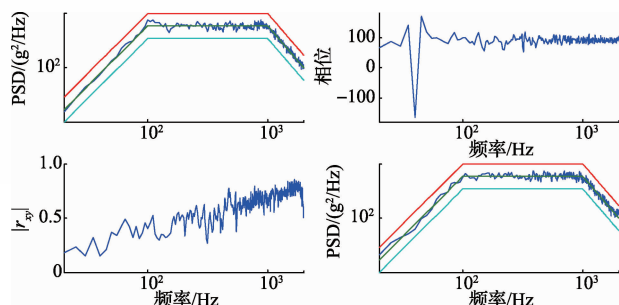


图7 加速度功率谱密度控制结果

同时在 Simulink 中仿真的结果能自动导入 Virtual. lab 中去,在 Virtual. lab 中可展现整个虚拟实验的实物过程,并且能够得到梁试验件未测点的速度、位移、加速度、应力应变等传统实验难以采集的数据,方便工程师进行实验缺陷的弥补和结构的优化改进。

5 结论

通过 Virtual. lab 与 MATLAB/Simulink 的多学科联合仿真,实现了包括多输入多输出振动控制、仿真信号的持续输入输出、电振动台机械系统及电磁作动的闭环控制虚拟振动实验。仿真结果表明使用该虚拟振动试验系统以及矩阵幂次控制算法能较好的实现多输入多输出随机振动控制,并且能展示虚拟实验的实物振动过程、采集传统实验难以得到的数据,有助于更好的对实物实验进行优化改进。当虚拟实验精度足够高时,能够替代部分多输入多输出振动测试试验。而影响多输入多输出随机振动控制虚拟实验仿真精度以及控制精度的因素有很多,比如夹具与试验件的连接方法、频响函数的估计手段等,这将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 邱吉宝,王建民. 航天器虚拟动态试验技术研究及展望[J]. 航天器环境工程,2007,24(1):1-14.
- [2] RICCI S, PEETERS B, DEBILLE J, et al. Virtual shaker testing: A novel approach for improving vibration test performance[C]. International Conference on Noise and Vibration Engineering, 2008.
- [3] 贺旭东,陈怀海,申凡,等. 双振动台随机振动综合控制研究[J]. 振动工程学报, 2006,19(2): 145-149.
- [4] 崔旭利. 多输入多输出随机振动试验控制算法及若干问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [5] 丁硕,崔总泽,巫庆辉,等. 基于 SVPWM 的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(6):81-85.
- [6] 丁硕,张放,巫庆辉. 基于 MATLAB/Simulink 的正弦稳态电路建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015,34(4):68-72.
- [7] 薛文忠,潘昌荣,苏奇文,等. 基于 MATLAB/Simulink 的导弹攻击高速目标遭遇结果计算模型[J]. 电子测量技术, 2011,34(5):41-44,56.
- [8] 方一鸣,李宫胤,李建雄. 伺服电机驱动连铸结晶器振动系统建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2615-2623.
- [9] 刘大龙,陈怀海,贺旭东. 一种微型激振器研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(11):43-46.
- [10] 李霖圣. 航天器虚拟振动试验系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [11] 尹安东,宫闪闪,江昊,等. 动态转矩协调的 ISG 混合动力系统控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):145-150.

作者简介

叶焰杰,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为振动试验与控制。

陈怀海,教授,博士生导师。主要研究方向为振动试验控制系统,结构动力学。

E-mail:chhnuaa@nuaa.edu.cn