

基于信号流循环的振动试验控制回路分析研究

夏江宁^{1,2}, 逯志国¹, 宋汉文²

(1. 北京强度环境研究所, 北京 100076; 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要: **目的** 总结分析振动试验信号循环全过程的数学模型及传递关系。**方法** 根据信号传递过程中的作用, 将振动设备划分为五类关键设备, 并且将信号流在信号转换、信号可测及运动可控等方面的传递关系进行分析汇总, 最后给出以控制仪为回路节点的两类开环故障的影响分析。**结果** 通过对信号流循环过程的分析研究, 总结了闭环反馈控制过程各环节中的信号传递关系, 分析了各关键设备性能对振动试验信号传递的影响, 以便于试验人员更好地开展振动试验。**结论** 信号流循环的正常运转是振动试验顺利开展的基础, 深入了解信号传递关系和影响因素, 可以高质量地开展振动试验。

关键词: 振动试验; 闭环反馈控制; 信号流; 传递模型; 开环故障

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.015

中图分类号: TJ01; V216.2⁺¹ **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0084-04

Control Circuit in the Vibration Test Based on Signal Flow Cycle

XIA Jiang-ning^{1,2}, LU Zhi-guo¹, SONG Han-wen²

(1. Beijing Institute of Strength & Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the mathematic model and transfer relationship of the signal flow cycle process in the vibration test. **Methods** According to the action of the signal in the transmission process, the test device was divided into five kinds of key equipment and the transfer models of the signal in various stages including signal conversion, detection and control were summarized and analyzed, and finally the influence of two kinds of open-loop fault using the controller as the circuit node was presented. **Results** According to the analysis of the signal flow cycle process, the signal transfer relationship in each stage during the closed-loop feedback control process, and the influence of the key device performance on the signal transmission of the vibration test was comprehensively analyzed, in order to help the engineer carry out the vibration test more conveniently. **Conclusion** The normal operation of the signal flow is the basis for smooth conduction of the vibration test, so it is necessary to deepen the knowledge on the relationship of the signal transmission and the influencing factors during the process of the vibration test.

KEY WORDS: vibration test; closed-loop feedback control; signal flow; transfer model; open-loop fault

振动试验是验证设备承受寿命周期内振动环境 的主要方法, 振动台系统是最常见的振动试验设备,

收稿日期: 2015-10-17; 修订日期: 2015-10-25

Received: 2015-10-17; Revised: 2015-10-25

作者简介: 夏江宁(1976—), 男, 山东人, 高级工程师, 主要研究方向为结构动力学及环境试验技术。

Biography: XIA Jiang-ning(1976—), Male, from Shandong, Senior engineer, Research focus: structural dynamics and environmental testing technology.

主要由振动台、信号发生及调理系统、信号分析与控制系统、振动记录及显示系统、运动传感器等^[1]设备组成。常见的振动试验类型有正弦振动试验、随机振动试验、混合模式振动试验、冲击试验和时域波形再现试验^[2]等。此外,根据运动信号参与控制反馈过程的方式不同,振动控制技术主要有开环控制、离线迭代控制和在线迭代控制^[3]等。

目前,振动试验研究主要集中在控制策略与算法^[4-6]、环境条件制定^[7-8]以及振动夹具设计^[9]等方面,而对于振动试验闭环反馈控制全过程,不同设备之间信号传递关系的研究较少。不同类型的信号贯穿于各类设备之间,保证了振动试验的顺利进行。在闭环反馈控制的振动试验过程中,由运动信号和电学信号组成的信号流会在设备之间循环传递,并实时进行信号修正的闭环反馈控制以确保实现控制点的给定运动。

文中首次将振动试验过程总结为信号流的循环过程,并根据电动振动台和压电传感器的动力学模型、电荷放大器的传递特性,然后结合振动控制仪的闭环反馈流程,最后得到信号流传递的数学模型,并且分析信号流循环中常见的试验故障,对辨析试验故障和发现设备异常有很强的指导意义。

1 振动试验信号流

振动试验过程,由电荷、电压等电信号和加速度、位移等运动信号组成的闭环回路如图1所示。根据加速度传感器输出信号的不同可分为电压型和电荷型传感器,二者的不同在于是否将电荷放大模块集成到传感器内部。因此,无论加速度传感器是何种类型,电荷放大功能都包含在信号流回路中。



图1 振动试验的信号流回路

Fig.1 Signal flow circuit diagram of the vibration test

根据图1可知,振动控制仪的输入信号为参与控制的加速度传感器产生的并经过电荷放大器放大的

电压信号,而输出电压信号传递到功率放大器后产生驱动振动台动圈的电磁力,实现了运动与激励的信号转换及根据参考谱的闭环控制。电荷放大器和功率放大器均起到信号放大作用,提升了信号流的信噪比。加速度传感器和振动台分别利用压电效应和电磁感应原理实现了加速度-电荷和电流-电磁力的能量转换。因此,信号流在循环过程中完成了信号转换、信号可测及运动可控等功能,使得振动台动圈及固定在其上的试验件实现了控制点可按照给定振动参考谱的运动。

2 信号流子系统分析

根据信号在振动试验过程中的作用,可分为机电换能、信号放大以及信号闭环反馈控制等三个过程,期间历经如图1所示的五类主要试验设备。振动试验全过程的数学传递关系如下所述。

2.1 电动振动台

振动控制加速度与振动台输入电压之间的传递关系为^[10-11]:

$$G(s) = \frac{A(s)}{U_0(s)} = \frac{\Gamma s^2}{(ms^2 + cs + k)(sL + R) + \Gamma^2 s} \tag{1}$$

式中: Γ 为电磁力常数, $\Gamma=Bl$; B 为磁通量密度; l 为动圈导线的有效长度; U_0 为振动台的输入电压; L 为动圈绕组的感应系数; R 为绕组动圈的电阻; A 为控制点加速度; m, k 和 c 为动圈与试验件组合体的质量、刚度和阻尼。

2.2 压电式加速度传感器

当 $\omega \ll \omega_0$ 时,可得^[12]:

$$q = dkA/\omega_0^2 = m_s dA \tag{2}$$

式中: ω 和 ω_0 分别为测量频率和传感器固有频率; d 为压电系数; m_s 为传感器内部的质量块; k_s 为压电元件的弹性系数。

2.3 电荷放大器

高阻抗电荷放大器输入电荷和输出电压值的传递关系为^[13-14]:

$$U_o = \frac{Tq}{C_a + C_c + C_i + (1 + T)C_f} \tag{3}$$

式中: U_o 为电荷放大器的输出电压; T 为电荷放大器开环放大倍数; C_a 为传感器的内部固有电容; C_c 为

连接电缆的分布电容; C_i 为放大器的等效电容; C_f 为电荷转换级的反馈电容。

通常情况下, $T=10^4\sim 10^6$, 则 $(1+T)C_i \gg C_a+C_c+C_f$, 可得:

$$U_o \approx \frac{q}{C_f} \quad (4)$$

2.4 振动控制仪

在均衡化或预试验的过程中, 振动控制仪基于控制信号与驱动信号进行系统频响函数识别, 信号传递公式为^[15]:

$$\hat{H}(f) = G_{ad}(f)/G_{dd}(f) \quad (5)$$

式中: $\hat{H}(f)$ 为振动试验系统的频响函数; $G_{ad}(f)$ 是控制加速度和驱动信号的互功率谱函数; $G_{dd}(f)$ 是驱动信号的自功率谱函数。

2.5 功率放大器

功率放大器能够线性放大控制仪输出的驱动信号, 其信号放大公式为:

$$U_p = \Psi U_d \quad (6)$$

式中: Ψ 为功率放大器的电压线性放大倍数。

3 振动的闭环反馈控制

以振动控制仪作为回路节点, 将振动试验的信号流可分为两个环节, 即运动信号转换为电压信号的过程(环节一)和电压信号转换为运动信号的过程(环节二)。其中, 环节一为振动控制仪识别加速度信号的过程, 而环节二则实现了振动台的运动可控性。

根据公式(1)~(5), 加速度信号转换为可识别电压信号的传递关系为:

$$U_o = \frac{MdA}{C_f} = \frac{S_q A}{C_f} \quad (7)$$

式中: S_q 为传感器的电荷灵敏度。

根据式(7)可知, 控制仪的输入电压与传感器的电荷灵敏度成正比, 而与电荷放大器的反馈电容成反比。因此, 当电荷灵敏度输入值大于真实值时, 控制仪识别的加速度值也将大于真实值, 反之亦然。

对于振动台不安装试验件时, 振动控制仪的输出电压信号与台面控制传感器的加速度信号之间传递关系为:

$$A(s) = \frac{\Gamma s^2}{(ms^2 + cs + k)(sL + R) + \Gamma^2 s} \Psi U_d(s) =$$

$$H(s) U_d(s) \quad (8)$$

根据式(8)可知, 振动试验在均衡化过程中识别的加速度信号与驱动信号的传递函数实质上是机电耦合系统频响函数 $H(s)$ 的辨识值。

将式(2)的两边都乘以加速度信号的共轭转置, 可得:

$$G_{aa}(s) = H(s) G_{dd} H^H(s) \quad (9)$$

式中: G_{aa} 为控制传感器的加速度谱; G_{dd} 为振动台的驱动谱。

振动控制仪在闭环反馈控制过程中不断更新驱动电压, 从而实现高精度的频谱再现。驱动电压功率谱的频域更新方程为:

$$G_{dd}(s)_{k+1} = G_{dd}(s)_k + \alpha \hat{A}(s)_k G_{ee}(s)_k \hat{Z}(s)_k^H \quad (10)$$

$$G_{ee}(s)_k = G_{rr}(s)_k - G_{aa}(s)_k \quad (11)$$

式中: $G_{dd}(s)_{k+1}$ 和 $G_{dd}(s)_k$ 为第 $k+1$ 次和第 k 次的驱动谱; $G_{ee}(s)_k$ 为第 k 次的控制误差谱; $G_{rr}(s)$ 和 $G_{aa}(s)_k$ 为参考谱和第 k 次的响应谱; α 为反馈增益; $\hat{A}(s)_k$ 和 $\hat{A}(s)_k^H$ 是机电耦合系统的第 k 次阻抗函数及其共轭转置, 并且阻抗函数与频响函数之间的关系为 $\hat{A}(s) = \hat{H}(s)^{-1}$ 。

将式(9)和式(11)代入式(10), 可得:

$$G_{dd}(s)_{k+1} = G_{dd}(s)_k + \Xi_a(s)_k - \Gamma_d(s)_k \quad (12)$$

式中: Ξ_a 为加速度参考谱的修正值(参考谱 $G_{rr}(s)$ 一般为简单的三折线谱形), $\Xi_a(s)_k = \alpha \hat{Z}(s)_k G_{rr}(s) \cdot \hat{Z}(s)_k^H$; $\Gamma_d(s)_k$ 为第 k 次驱动谱的修正值, $\Gamma_d(s)_k = \alpha \cdot \hat{Z}(s)_k H(s) G_{dd}(s)_k H^H(s) \hat{Z}(s)_k^H$ 。当不考虑外部噪声和辨识误差等影响因素时, 理想状态下的驱动谱修正值 $\Gamma^0 = \alpha G_{dd}(s)_k$ 。

根据式(12)可知, 振动试验闭环反馈控制中, 每一步获得的传递函数辨识值 $\hat{Z}(s)$ 都参与到加速度参考谱和驱动谱的修正过程。因此, 机电耦合系统阻抗函数 $\hat{Z}(s)_k$ 的辨识精度直接影响振动试验的控制精度, 而反馈增益决定了振动试验控制的稳定性。

4 信号流影响因素分析

振动试验出现的各类故障都与信号流直接相关, 信号循环的各个环节都会对试验结果产生显著影响。只有对信号流的工作流程有充分的认识, 才能确保振动试验可准确安全地完成。

当信号流回路出现开环时,振动试验将中止。不同环节的开环会造成不同的影响,主要体现在以下方面。

1) 环节一的开环故障。根据式(7)可知,当加速度传感器(S_a)和电荷放大器(C_f)或连接电缆出现故障造成信号流断路时,振动控制仪将不能获得输入信号 U_0 。此时,根据式(8)可知,振动控制仪会在预试验阶段不断加大输出,以期获得控制加速度信号,从而使得功放柜出现“过电压保护”故障,严重时甚至会损坏振动台。

2) 环节二的开环故障。功放柜(Ψ)或连接电缆出现故障时,由于无输入电气信号,使得振动台不产生运动响应信号,则振动控制仪会出现“控制信号丢失”的故障。

此外,根据式(7)可知,环节一易于受到人为因素的影响,主要是传感器和电荷放大器以及振动控制仪的灵敏度设置一致性问题。

5 结语

振动试验过程中,信号流在闭环反馈控制回路中单向循环运转,实现了信号转换、信号放大、信号识别及信号修正等功能。此外,振动试验出现的各类故障都与信号流循环特性有着直接的相关性。因此,正确认识信号流的概念及其作用不但能够确保振动试验的顺利进行,还能够对各关键设备的工作原理加深理解,进而提升振动试验质量。

参考文献:

- [1] SILVA De C W. Vibration and Shock Handbook[M]. England: Taylor & Francis Group, 2005.
- [2] 王述成. 振动试验实时控制系统的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
WANG Shu-cheng. Study of the Real-time Control System of the Vibration Test[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [3] 杨志东. 液压振动台振动环境模拟的控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
YANG Zhi-dong. Research on the Control Technology of the Vibration Environment Simulation of Hydraulic Shaker[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [4] 姜双燕, 陈怀海, 贺旭东, 等. 多轴振动试验控制的整型权函数法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 136—139.
JIANG Shuang-yan, CHEN Huai-hai, HE Xu-dong, et al. Method of Loop-shaping Weighting Functions for Multi-axis Vibration Test Control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 136—139.
- [5] 王志鹏, 何闻, 于梅, 等. 基于专家系统的振动台振级调整算法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(22): 58—61.
WANG Zhi-peng, HE Wen, YU Mei, et al. Vibration Level Adjustment Algorithm for a Vibration Exciter Based on an Expert System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(22): 58—61.
- [6] 陈家焱, 陈章位, 周建川, 等. 基于泊松过程的超高斯随机振动试验控制技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 19—22.
CHEN Jia-yan, CHEN Zhang-wei, ZHOU Jian-chuan, et al. Super-Gaussian Random Vibration Test Control Technique Based on POISSON Process[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 19—22.
- [7] 颜诗源, 李新俊, 吴勋, 等. 基于HHT方法的公路运输振动信号时频分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 23—26.
YAN Shi-yuan, LI Xin-jun, WU Xun, et al. Frequency Analysis for Vibration Signal from Road Transportation Using HHT[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 23—26.
- [8] 翟波, 蔡良续, 祝耀昌. 实验室环境试验条件及其剪裁技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 87—91
ZHAI Bo, CAI Liang-xu, ZHU Yao-chang. The Conditions of Laboratory Environmental Tests and Its Tailoring Techniques[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 23—26.
- [9] 于韶明, 卫国, 杨峰, 等. 振动试验夹具设计与实践[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 81—86.
YU Shao-ming, WEI Guo, YANG Feng, et al. Fixture Design and Practice for Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 81—86.
- [10] CHEN T H, LIAW C M. Vibration Acceleration Control of an Inverted-fed Electrodynamic Shaker[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(1): 60—70.
- [11] 郭继峰, 任万滨, 康云志, 等. 电动振动台模型辨识方法及其应用的研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 241—244.
GUO Ji-feng, REN Wan-bin, KANG Yun-zhi, et al. Modal Identification Method for a Electrodynamic Vibration Shaker and Its Application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 241—244.
- [12] 刘俊, 秦岚, 刘京诚, 等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 903—909.
LIU Jun, QIN Lan, LIU Jing-cheng, et al. A Novel Differential Piezoelectric Accelerating Sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 903—909.
- [13] 高长银, 赵辉, 马龙梅, 等. 电荷放大器对石英传感器动态特性的影响[J]. 压电与声光, 2006, 28(6): 654—656.

- Strength Aluminium Alloys[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(21):6870—6874.
- [6] PATHAK S S, BLANTON M D, MENDON S K, et al. Investigation on Dual Corrosion Performance of Magnesium-rich Primer for Aluminum Alloys under Salt Spray Test (ASTM B117) and Natural Exposure[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4):1453—1463.
- [7] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- CAO Chu-nan. Natural Environmental Corrosion China Materials[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.
- [8] 李慧连, 王文涛, 李莉, 等. 汽车仪表板材料氙灯老化试验与自然曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):30—33.
- LI Hui-lian, WANG Wen-tao, LI Li, et al. Car Dashboard Material Xenon Lamp Aging Test and Natural Exposure Test Correlation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):30—33.
- [9] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):34—38.
- WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Natural Environmental Spectrum is Transformed into the Method of Accelerating Test Environment Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):34—38.
- [10] LYU Sheng-Li, CUI You, GAO Xiao-sheng, et al. Influence of Exposure to Aggressive Environment on Fatigue Behavior of a Shot Peened High Strength Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 574:243—252.
- [11] LEE E W, OPPENHEIM T, ROBINSON K, et al. The Effect of Thermal Exposure on the Electrical Conductivity and Static Mechanical Behavior of Several Age Hardenable Aluminum Alloys[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8):1538—1549.
- [12] HUANG Z W, SUN C. On the Role of Thermal Exposure on the Stress Controlled Fatigue Behaviour of a High Strength Titanium-aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 615:29—41.
- [13] LUCAS E L, BERTRAND P, GUAZZETTI S, et al. Impact of Ferromanganese Alloy Plants on Household Dust Manganese Levels: Implications for Childhood Exposure[J]. Environmental Research, 2015, 138:279—290.
- [14] 郝文魁, 刘智勇, 王显宗, 等. 舰艇用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1):54—62.
- HAO Wen-kui, LIU Zhi-yong, WANG Xian-zong, et al. Present Situation and Development Trend of High Strength and Corrosion Resistance of High Strength Steel for Naval Ships[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1):54—62.
- [15] SCHNEIDER M, KREMMER K, LMMEL C, et al. Galvanic Corrosion of Metal/Ceramic Coupling[J]. Corrosion Science, 2014, 80:191—196.
- [16] KEISUKE F, HIROYUKI F, REI T, et al. Quantitative Evaluation of Initial Galvanic Corrosion Behavior of CNTs Reinforced Mg-Al Alloy[J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(5):833—837.

(上接第87页)

- GAO Chang-yin, ZHAO Hui, MA Long-mei, et al. Influence of Charge Amplifier on Dynamic Characteristics of Quartz Sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(6):654—656.
- [14] 陆兆峰, 秦旻, 陈禾, 等. 压电式加速度传感器在振动测试系统的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7):3—9.
- LU Zhao-feng, QIN Min, CHEN He, et al. Application and Investigation of Piezoelectric Accelerometer on Vibration Measurement System[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(7):3—9.
- [15] LDS-Dactron Shaker Control User Guide Rev.6.2[S].