

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0065-04

多轴随机激励振动控制技术<sup>\*</sup>

陈 循, 温熙森

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 针对多轴随机激励的控制问题, 从多输入多输出线性系统的假定出发, 研究了均衡控制算法、驱动谱矩阵模拟以及控制系统设计等问题; 在此基础上, 提出了多轴随机激励的闭环控制算法, 仿真运算结果证明了该算法的有效性。文章最后给出了控制系统软件与硬件的设计方案。

**关键词:** 多轴振动控制; 均衡原理; 谱矩阵模拟; 系统设计

**中图分类号:** TH113.1; O324 **文献标识码:** A

## Research on Multi-axes Vibration Control Technology with Random Exciting

CHEN Xun, WEN Xi-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aiming at the multi-axes vibration control with random exciting, starting from the supposition of multi-input and multi-output linear system, the paper deals with equalization control method, exciting spectrum matrix simulation and control system design. Based on the study, the paper proposes a close-loop control arithmetic for multi-axes vibration control with random exciting. The simulating calculation proves that this arithmetic is valid. Finally, the paper offers a scheme of the control system including hardware and software.

**Key words:** multi-axes vibration control; equalization principle; spectrum matrix simulation; system design

在模拟振动环境的应力试验中, 目前普遍采用的振动控制技术都是针对单轴振动台而言的。激励信号分为正弦、冲击和随机三大类, 其中以随机激励的试验效能最高<sup>[1]</sup>。

单轴振动台只能提供单点单向激励, 而在装备的真实服役环境中, 实际振源往往是多点多方向的。显然, 装备在多点多向激励下得到的模态激发与疲劳方式与单向激励的情况不一样, 所以, 用单轴振动台来模拟实际的多点多向激励振动环境是不完备的, 对于大型结构或设备, 如各种飞行器和陆用车辆而言尤其如此<sup>[2,3]</sup>。

对于绝大多数机电设备的使用环境来说, 随机激励更有普遍意义, 因此, 本文在相关学者<sup>[4~6]</sup>研究工作的基础上, 提出一种多轴随机激励振动控制系统的设计方案, 为多点多向随机激励振动环境的模拟奠定基础。

### 1 多轴随机激励均衡控制

图 1 所示为由控制器和  $q$  个振动台为主体构成的  $q$  轴随机激励振动控制系统框图。图中  $x_1(t) \sim x_q(t)$  表示由控制器生成的  $q$  路随机激励信号;  $y_1(t) \sim y_q(t)$  表示由加速度计拾取的  $q$  路响应信号。假设整个系统近似运行于线性区间, 那么系统响应与激励之间有如下关系式成立<sup>[2]</sup>。

$$G_y = H \cdot G_x \cdot H^*{}^T \quad (1)$$

式中, 上标  $*$ ,  $T$  分别表示共轭和转置。

$G_y$  为系统控制点响应功率谱矩阵,

\* 收稿日期: 1999-08-31

作者简介: 陈 循 (1964), 男, 副教授, 博士。

$$G_y = \begin{bmatrix} G_{11}^{(y)} & G_{12}^{(y)} & \dots & G_{1q}^{(y)} \\ G_{21}^{(y)} & G_{22}^{(y)} & \dots & G_{2q}^{(y)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{q1}^{(y)} & G_{q2}^{(y)} & \dots & G_{qq}^{(y)} \end{bmatrix}, \text{其中主对角线元素 } G_{ii}^{(y)} (i = 1, 2, \dots, q) \text{ 表示响应信号 } y_i(t) \text{ 的自}$$

谱,  $G_{ij}^{(y)} (i, j = 1, 2, \dots, q, i \neq j)$  表示响应  $y_i(t)$  和  $y_j(t)$  间的互谱。

$$G_x \text{ 为系统激励(驱动)功率谱矩阵, } G_x = \begin{bmatrix} G_{11}^{(x)} & G_{12}^{(x)} & \dots & G_{1q}^{(x)} \\ G_{21}^{(x)} & G_{22}^{(x)} & \dots & G_{2q}^{(x)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{q1}^{(x)} & G_{q2}^{(x)} & \dots & G_{qq}^{(x)} \end{bmatrix}, \text{其中主对角线元素 } G_{ii}^{(x)} (i = 1,$$

$2, \dots, q)$  表示激励信号  $x_i(t)$  的自谱,  $G_{ij}^{(x)} (i, j = 1, 2, \dots, q, i \neq j)$  表示激励信号  $x_i(t)$  和  $x_j(t)$  间的互谱。

$$H \text{ 为系统频响函数矩阵, } H = \begin{bmatrix} H_{y_1x_1} & H_{y_1x_2} & \dots & H_{y_1x_q} \\ H_{y_2x_1} & H_{y_2x_2} & \dots & H_{y_2x_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{y_qx_1} & H_{y_qx_2} & \dots & H_{y_qx_q} \end{bmatrix}, \text{矩阵元素 } H_{y_ix_j} (i, j = 1, 2, \dots, q, i \neq j) \text{ 表}$$

示激励  $j$  与控制点  $i$  之间的频响函数。

一般而言, 振动控制的目标是使(1)式中的响应谱矩阵  $G_y$  与实际环境谱  $G_r$  匹配(这里匹配可理解为统计意义上近似相等)。  $G_r$  的取值一般为实测谱的统计平均值, 在振动控制中,  $G_r$  称为参考谱。

所谓均衡控制是指: 当给定参考谱矩阵  $G_r$  后, 控制器根据  $G_y$  和  $H$  矩阵的实测值实时修正  $G_x$  矩阵, 使  $G_y$  和  $G_r$  匹配。事实上, 当令  $G_y = G_r$  时, 由(1)式不难导出  $G_x$  的计算公式。

$$G_x = H^{-1} \cdot G_r \cdot (H^* T)^{-1} \quad (2)$$

其中,  $H$  矩阵的计算公式为

$$H = Y \cdot X^* T \cdot (X \cdot X^* T)^{-1} \quad (3)$$

式中,  $X$ 、 $Y$  分别为  $q$  路激励和  $q$  路响应信号向量的幅值谱。

由于随机过程的功率谱估计肯定存在误差, 加上系统可能存在的时变性会使  $H$  矩阵的值发生变化, 因此, (2)、(3) 式的运算在控制过程中需持续不断地进行, 以保证  $G_y$  和  $G_r$  总是严格匹配。

## 2 驱动谱矩阵模拟

当用(2)式计算得到  $G_x$  后, 必须将  $G_x$  映射到时域得到一组随机驱动信号  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_q(t)]^T$ , 实现随机激励, 如图1所示。

设  $X_i$ 、 $X_j$  分别对应  $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$  的富里叶变换, 那么, 根据功率谱的定义有

$$G_{ij}^{(x)} = \frac{2}{T} E[X_i^* \cdot X_j] \quad i, j = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

式中,  $G_{ij}^{(x)}$  为  $G_{ij}^{(x)}(f) (f > 0)$  的简写形式。另设  $X = [X_1, X_2, \dots, X_q]^T$ 。

根据谱矩阵模拟原理<sup>[6]</sup>,  $X$  可用  $q$  个独立的白噪声源通过一个数字滤波器来实现, 如图2中的虚线框所示。图中  $w(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_q(t)]^T$  为具有单位功率谱密度, 且两两相互独立的一组白噪声源。

图2中数字滤波器的数学表达式为

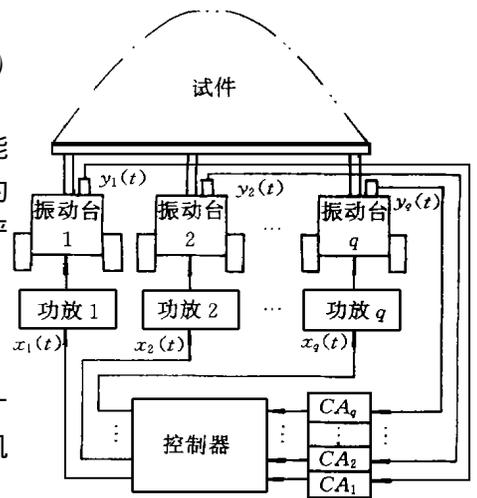


图1 多轴随机激励振动控制系统  
Fig 1 Multi-axes vibration control system with random exciting

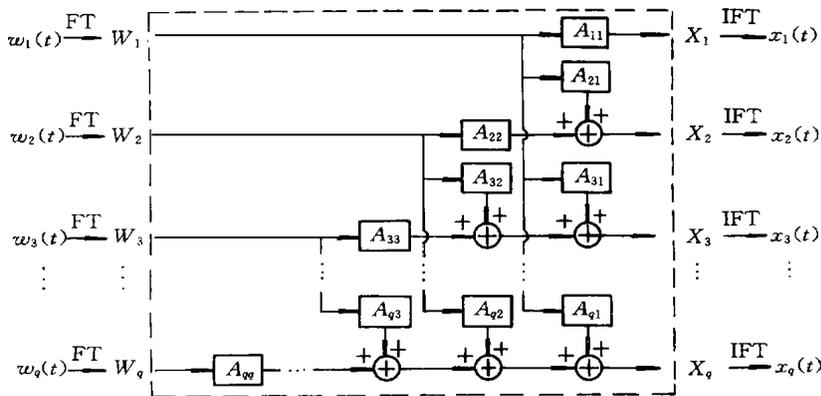


图2 驱动谱矩阵模拟数字滤波器模型框图

Fig 2 Digital filter model pattern for exciting spectrum matrix simulation

$$X_i = \sum_{k=1}^i A_{ik} W_k \quad i = 1, 2, \dots, q \tag{5}$$

由(4)、(5) 两式及  $w(t)$  的定义, 可导出矩阵元素  $A_{ij}$  与  $G_{ij}^{(x)}$  之间的关系如下:

$$A_{jj} = \sqrt{G_{jj}^{(x)}/2 - \sum_{k=1}^{j-1} |A_{jk}|^2} \quad j = 1, 2, \dots, q \tag{6a}$$

$$A_{ij} = \left( G_{ji}^{(x)}/2 - \sum_{k=1}^{j-1} A_{jk}^* A_{ik} \right) / A_{jj} \quad i = j + 1, \dots, q \tag{6b}$$

综上所述, 利用一组白噪声源通过数字滤波, 即可生成一组时域随机驱动信号  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_q(t)]^T$ ,  $x(t)$  的功率谱矩阵与  $G_x$  等价。

### 3 控制系统设计

随着微机性价比的不断提高, 目前以微机 + DSP + 接口电路 + 软件构成的“虚拟仪器”在过程控制、信号处理分析等领域逐渐替代专用仪器已为大势所趋, 这里, DSP 指数字信号处理芯片。

基于上述事实, 本文提出一种基于“虚拟仪器”概念的多轴随机激励振动控制系统的设计方案。以下阐述该系统的基本构成及工作原理。

#### 3.1 硬件构成

图3 为多轴随机激励振动控制系统的硬件构成框图。其中:

• 微机

微机是系统的主控单元, 也是系统控制软件的运行平台, 主要担负系统接口控制信号生成、响应信号采集、程控放大、试验过程信息显示和与人机交互等控制操作; 此外还要担负试验前后的数据或谱图录入、打印、存储、建档等日常管理操作。为获得尽可能高的控制精度和系统总体性能, 微机主频当然越高越好。但如果综合考虑实际的试验规程要求和微机的性价比, 根据我们在虚拟仪器开发中积累的经验, 具有基本配置的 586 奔腾系列微机均足以担纲。

• DSP

担负 FFT (快速富里叶变换) 和各种驱动信号波形数据的生成运算。

• 接口电路

接口电路包括 A/D (D/A) 转换和程控放大电路。

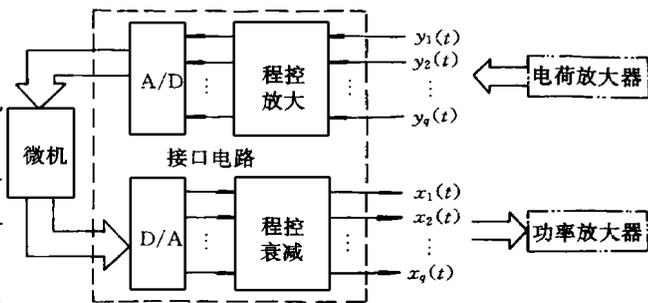


图3 系统硬件构成框图

Fig. 3 System hardware pattern

基于上述硬件配制,我们先期开发了一套单轴随机激励振动控制系统,各项性能及技术指标均能达到国军标 GJB150.16-86 的要求<sup>[7]</sup>。

### 3.2 控制软件流程

图4为多轴随机激励振动控制软件的流程框图。其中:

#### •参考谱设置

参考谱矩阵  $G_r$  的设置与系统频响函数矩阵  $H$  的相位因子有关,当设置  $G_r$  的相位因子矩阵与  $H$  的相同时,均衡更易实现<sup>[4]</sup>。故在设置参考谱矩阵前,必须预先测出矩阵  $H$  的值。

#### •驱动信号生成

在本文设计的系统中,振动台驱动信号的生成过程是:首先在 DSP 中生成波形数据,然后按一定的送数频率将数据送至 D/A 端口,生成电压模拟信号。为同时兼顾信号采样等其它操作,送数操作通过调用定时中断服务程序进行<sup>[8]</sup>。

#### •均衡达标判别

通过响应谱矩阵  $G_y$  和参考谱矩阵  $G_r$  之差的范数来判别两者间的匹配精度。

按照图4做的仿真运算结果初步验证了前述控制算法是正确且有效的<sup>[8]</sup>,限于篇幅,仿真实验结果将在后续发表的文献中给出。

## 4 结语

本文针对多轴随机激励的控制问题,研究了均衡控制算法和互谱模拟等问题;在此基础上,提出利用多轴随机激励的闭环控制算法来解决特性随动问题,并给出了控制系统设计方案。由于试验条件的限制,本文没有完成多轴随机激励的控制实验,但却通过仿真算例验证了控制算法的正确性和有效性。由于本系统算法是基于线性系统的假设给出的,因此对于存在严重非线性和时变性的振动实验系统而言,控制系统采用本文的算法时控制精度将大大下降。然而,实践证明:对于绝大多数试件紧固在振动台面上的实验系统而言,近似线性系统的假设是有效的。

## 参考文献:

- [1] 何国伟. 可靠性试验技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] Pate J, Tessier E D. Multi shaker testing of large test specimen [C]. Proc. 62nd Shock Vib. Symp., 1991, 1 (10).
- [3] Tustin W. Multipleshaker are required for multi-axis vibration [J]. Test, 1993, 10.
- [4] 吴家驹. 振动试验中的多轴并激技术 [J]. 强度与环境, 1992, 22 (1): 1-5.
- [5] 吴家驹. 多点随机激励的互谱模拟技术 [J]. 强度与环境, 1986, 16 (6): 26-31.
- [6] 贝达特, 皮尔索著. 相关分析和谱分析的工程应用 [M]. 凌福根译. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [7] 中华人民共和国国家军用标准. GJB150.16-86, 军用设备环境试验方法 (振动试验) [S]: 89-160.
- [8] 陈 循. 环境应力试验及振动控制技术研究 [D]. 国防科技大学研究生院博士学位论文, 1999.

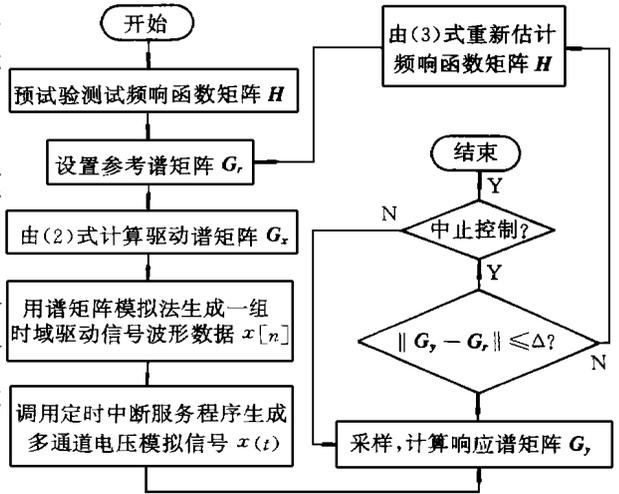


图4 多轴随机激励振动控制过程软件框图

Fig. 4 Software flow chart of multi-axes random exciting vibration control