

独特的微机正弦扫频振动控制技术*

陈 循 唐丙阳 温熙森 卢天颢

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘 要 以通用微机为主控单元进行正弦扫频振动控制的独特之处在于驱动信号的生成、修正, 响应信号的采样、分析以及系统传递函数计算等控制功能均主要由微机软件完成。本文主要介绍上述控制功能的软件设计原理, 并给出相应的实验结果。

关键词 扫频控制; 微机系统; D/A 中断送数; 同步采样

分类号 TB534.2

正弦振动信号具有容易控制、能量集中而有助于寻找试件中的薄弱频带及模态等优点, 因此, 在模态分析实验中, 利用正弦扫频对试件进行传递函数测试十分有效; 在振动环境试验中, 正弦扫频控制实验是当今, 尤其是国内厂家较常采用的一种实验方法。

1 微机振动控制系统概述

随着通用微机性能的不断改善, 其价格低、易于维护、软件编程调试方便等诸多优点, 使目前以通用微机作为主控单元实施各种自动化控制的研究领域越来越广泛。本文所述的微机正弦扫频振动控制技术, 无需专门的正弦信号发生器或电路板, 正弦驱动信号的产生与控制、响应信号采样

与分析等功能主要依靠完备的微机软件实现。扫频实验总体硬件框图如图1所示, 振动台、功率放大器、传感器、滤波器以及电荷放大器等为振动实验中的常规设备; 虚线框内的程控放大、D/A、A/D由数据转换板完成, 该板的工作方式通过若干个口地址由微机软件进行设置, 数据通过总线进行传递。

与国内外同类专用系统或仪器相比, 采用微机系统进行正弦扫频控制具有以下特点:

(1) 控制准确。微机系统的信号产生方式独特, 其主要原理是先微机中生成离散的正弦数字序列, 然后按一定的送数频率向D/A端口依次、循环地送出序列的值, 产生

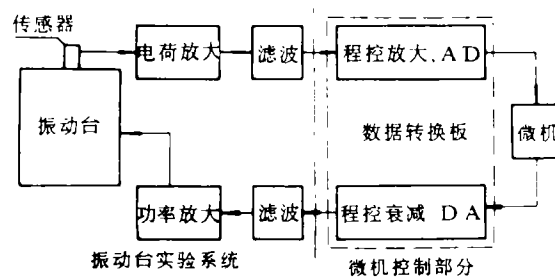


图1 以微机为主控单元的振动实验控制系统硬件框图

* 1993年11月5日收稿

连续且具有一定频率的正弦电压信号，此信号经功率放大后驱动振动台作简谐振动。与模拟电路生成的正弦信号相比，数字式生成的信号频率与幅值更准确，而且不会产生频率漂移现象；此外，程控放大电路的应用可保证 A/D、D/A 转换单元的工作动态范围总是保持较大值，进一步保证了控制的准确性。

(2) 控制速度快。由于本系统的正弦驱动信号的产生，响应信号的采样等操作均直接由微机软件进行控制，自动化程度高，控制环节少，使得系统在控制过程中的回路时间短，控制效率高。

(3) 操作方便。充分利用微机软件易于开发的长处，每一步操作前均可在微机显示器上给出明确的操作提示，并可采用直观图象实时显示控制结果。

(4) 功能扩展性强。利用图 1 中的硬件配置进一步扩充软件功能后还能实现随机、冲击振动控制以及其它的动态信息综合测试与分析。

2 正弦信号的软件产生与控制机理

2.1 D/A 中断送数

若采用通用微机作为振动控制单元，那么在控制过程中，微机既要按送数频率 F_s 不断向 D/A 端口送数产生连续的正弦驱动信号，又要进行信号修正、采样分析等其它控制（且称之为控制主流程）操作，因此，控制系统必须借助 DOS 操作系统中的中断服务功能进行分时操作，以同时兼顾驱动信号生成和控制主流程的运行。为此，需编制定时中断服务程序（中断频率即为 F_s ），每执行一次中断服务程序，则依次、循环地将送数序列 $x(n)$ ($n=0,1,2,\dots,N-1$) 中的一点送至 D/A 口，这个过程简称为 D/A 中断送数。与此同时，控制主流程则在中断间隙中运行。

2.1.1 D/A 中断送数的编程处理

控制过程中要实现 D/A 中断送数，系统首先必须向微机 CPU 定时发出中断请求信号，该信号可利用数据转换板中的定时器产生，定时器的计数频率和时间常数等参数则通过口地址由微机软件指令预先进行设置，这样，在控制过程中 CPU 便能定时接收到中断请求信号，并从控制主流程中跳转至中断服务程序执行向 D/A 端口送数的操作。

为使中断服务程序的执行速度更快，以便腾出更多的时间给控制主流程，中断服务程序最好用汇编语言编程，并进行优化处理，优化措施包括尽量减少或避免重复运算以及浮点运算，简化数据存储结构及其读数方式等。

2.1.2 中断送数频率 F_s

采用 D/A 中断送数方式生成驱动信号，当扫频信号的频率需改变时，控制软件的实现途径有二：一是保持正弦序列的值及其长度 N 不变，通过改变中断送数频率 F_s 来改变信号频率；但改变中断频率需停止 D/A 中断送数，重新设置中断参数；如此，将造成扫频驱动信号的停顿，使得扫频过程不连续。第二种方式是保持送数频率 F_s 不变，通过改变送数序列 $x(n)$ 的值及其长度 N 来改变信号频率，这样，当信号频率变化时，虽然控制软件主流程重新计算 N 和 $x(n)$ 需花费时间，但可保证 D/A 中断送数操作的连续进行。

设驱动信号频率为 f ，那么正弦送数序列 $x(n)$ 单周期的序列长度计算值 N_0 为

$$N_0 = F_s / f \quad (1)$$

为保证信号的输出波形质量, N_0 不能太小, 系统能够输出的信号最大频率 f_{\max} 应能满足扫频控制的频宽要求, 故由(1)式可知, F_s 应取较大值; 但是, F_s 过大又会使控制主流程所占的时间比率减小, 从而造成控制速度减慢。所以, 实际选择 F_s 时应综合考虑控制频宽、控制速度以及微机主频和数据转换板的 D/A 转换最大速率等因素。

2.2 正弦送数序列 $x(n)$ 的生成

首先, 须确定序列 $x(n)$ 的长度 N , 若取 $N = [N_0] + 1$ ($[\]$ 为截尾取整符号), 实际生成的正弦信号频率 F 为

$$F = \frac{F_s}{N} = \frac{F_s}{[N_0] + 1} \quad (2)$$

取整运算有时会使 F 与 f 之间的偏差较大, 其偏差大小为

$$\Delta(1) = f - F = f - \frac{F_s}{[N_0] + 1} \quad (3)$$

如果取 $N = [cN_0] + 1$ ($c = 1, 2, \dots$) (4)

则信号的频率偏差为

$$\Delta(c) = f - F = f - \frac{cF_s}{[cN_0] + 1} \quad (5)$$

不难证明, $\Delta(c)$ 为一非负且单调递减的函数, 因此, 利用(1)、(4)式求 N 时只需逐渐增加 c 的值, 直至 $f - F \leq \Delta f$ (Δf 为系统正弦信号的频率分辨力)。

当 N 确定后, 序列 $x(n)$ 的值便可依下式很快求出

$$x(n) = X \sin\left(\frac{2\pi n}{N_0}\right), (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

式中 X 为正弦信号的输出幅值。在控制过程中, 为使序列 $x(n)$ 的生成速度更快, 可预先在微机内存中驻留一个正弦数据表, 采用汇编语言编程, 利用插值运算得到 $x(n)$ 的值。

2.3 驱动信号修正后的连续输出

在扫频振动控制中, 正弦驱动信号的幅值和频率在不断变化, 为能将经修正变化后的送数序列 $x(n)$ 的值及时送至 D/A 端口, 以确保驱动信号输出的连续性, 可对送数序列 $x(n)$ 进行双区存储/取数操作。其基本原理为: 在内存中的指定区域开辟两个数据缓冲区, 设原送数序列 $x_1(n)$ 存放在缓冲区 1, 在控制主流程对原送数序列进行的修正运算完成之前, D/A 中断送数程序从缓冲区 1 的 $x_1(n)$ 中依次循环取数; 待主流程修正运算完成后, 将修正结果 $x_2(n)$ 存放在缓冲区 2, 同时中断服务程序转从 $x_2(n)$ 中取数并送至 D/A 口。这样, 两个缓冲区被轮番取数、轮番刷新, 保证了驱动信号修正后的连续输出。

其他类型的驱动信号, 如冲击信号和随机信号, 同样可利用 D/A 中断送数的方式产生, 只不过送数序列 $x(n)$ 的生成和处理方式不同而已。

3 同步采样

采样是控制过程中的重要环节, 通过采样获取的响应信号幅值和相位信息是计算系统传递函数以及修正扫频控制驱动信号的重要依据。微机系统在控制过程中的采样操作与 D/A 中断送数操作同步, 此即“同步采样”的含义。同步采样方式可以非常准确地捕获响应信号与驱动信号之间的相位差, 无疑这对准确测试系统的传递函数十分有利。同

步采样的软件设计原理如下。

在采用汇编语言编制的采样程序中，每次执行 A/D 转换指令之前，程序首先执行 HLT 指令，该指令的作用是暂停程序执行，直至微机 CPU 接收到外部中断请求信号后，方执行后续指令。由于中断服务程序的优先级别高，一旦 CPU 接收到中断请求信号后，微机系统立即从采样程序中跳转至中断服务程序先执行 D/A 送数操作，然后再转回采样程序，利用软件指令启动 A/D 转换。待一次 A/D 转换及存储数据等操作完成后，采样程序重新执行 HLT 指令，等待下一个中断信号的到来，之后重复上述过程，直至采完额定的点数。

4 传递函数测试

用扫频方式测试系统的传递函数，其原理很简单，用公式表述即为

$$|H(f)| = \frac{Y(f)}{XC_xC_y} \quad (7)$$

$$H(f) = |H(f)|e^{j\theta(f)} \quad (8)$$

式中 $H(f)$ 为系统在 f 频率点上的传递函数值， $|H(f)|$ 为其模； X 为驱动序列 $x(n)$ 的最大幅值，扫频测试过程中 X 值保持不变，利用程控衰减调节功放增益，使振动台的振幅在测试过程中始终控制在允许的范围内； $Y(f)$ 为系统在 f 频率点上的加速度响应幅测量值。本系统同步采样时的采样点数与驱动序列 $x(n)$ 的点数 N 相同（为整周期采样）， $Y(f)$ 可以在 N 点采样数据中取最大者作为加速度响应幅测量值； C_x 为 D/A 端的程控衰减倍数，实际的驱动信号幅值为 XC_x ； C_y 为 A/D 端的程控放大倍数，系统利用程控放大自动调节进入 A/D 端的信号接近其工作满量程，以提高信噪比，实际的加速度响应幅为 $Y(f)/C_y$ ； $\theta(f)$ 为 $H(f)$ 的相角，可通过比较驱动序列与同步响应序列的相位差得到。

5 扫频振动控制中的补偿反馈控制

在扫频控制过程中，为了保证振动台面控制点在控制频带内处处按额定振幅振动，必须对驱动信号的送数幅进行实时补偿。在实施扫频控制之前，必须先对控制频带内的振动台及试件系统的传递函数进行扫频测试，为驱动信号的幅值补偿修正提供依据。补偿除了要考虑系统的传递函数外，还要考虑系统在控制过程中可能存在的动特性漂移，驱动信号送数幅的补偿修正公式为

$$X_k = \frac{H_0C_0A_kX_0}{H_kC_kA_0E_k}, (k = 0, 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

式中 X_0 、 X_k 为第 0 、 k 扫频点的送数幅； H_0 、 H_k 为第 0 、 k 扫频点的传递函数值； C_0 、 C_k 为第 0 、 k 扫频点的 D/A 端程控衰减倍数； A_0 、 A_k 为第 0 、 k 扫频点的额定加速度振幅； E_k 为第 k 扫频点的漂移修正系数。

扫频开始前， $E_0=1$ ，控制过程中， E_k 按

$$E_k = \frac{E_{k-1}a_{k-1}}{A_{k-1}}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

进行修正，式中 a_{k-1} 为第 $k-1$ 扫频点的响应幅实测值。控制过程中，修正系数 E_k 对消除传递函数值的单调趋势性偏差影响效果显著，但在传递函数值存在随机性误差时， E_k 可

能会使(9)式的运算产生振荡效应, 为避免这种情况发生, E_k 可按下式进行修正。

$$E_k = E_{k-1} \left[1 + \left(\frac{a_{k-1}}{A_{k-1}} - 1 \right) p \right], \quad (k = 0, 1, 2, \dots, M) \quad (11)$$

式中 p 为阻尼系数, 其取值范围为 $(0, 1)$, p 越小则(9)式发生振荡的可能性越小, 但与此同时, 偏差的修正速度将减慢。

6 实验结果

利用上述原理编程得到的正弦扫频振动控制软件对 B&K4808 振动台进行空台传递函数扫频测试和振动控制的结果分别如图 2(a)、(b)所示。其中, 20~2000Hz 的扫频测试时间仅为 3.1 分钟(扫频频率间隔为 1Hz, 主控微机为 386/33 兼容机); 扫频振动控制过程中, 99% 的扫频点振幅控制误差小于 1%。

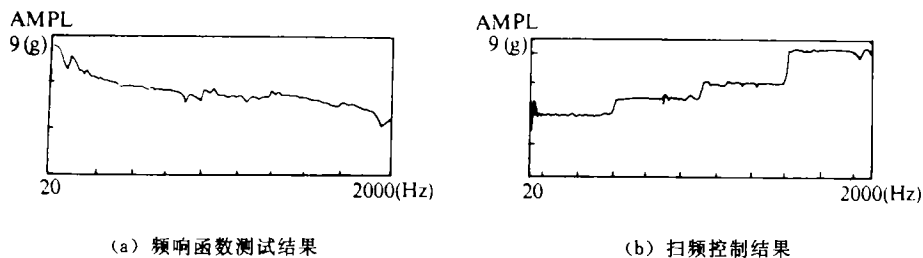


图 2 B&K4808 振动台空台扫频测试及控制结果

参 考 文 献

- 1 黄友仙等译. 数字振动控制系统使用手册. 强度与环境, 1983
- 2 R S. Norin, E A Slone. A New Algorithm for Improving Digital Random Control System Speed and Accuracy. IES, 1982, 195~201

A Distinctive Minicomputer Control Technology on Sine Frequency-sweep Vibration

Chen Xun Tang Bingyang Wen Xisen Lu Tiankuang

(The Department of Mechantronics and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract

The distinction of sine frequency-sweep vibration controlled by current minicomputer is almost all control function, such as producing and modifying of driving signal, sampling and analysing of responding signal, transfer function calculation etc., being worked by computer software. This paper mainly deals with software design principle of the functions described above, and shows relevant experiment results.

Key words frequency-sweep vibration control; minicomputer system; D/A interruption sent data; synchronously sampling