

基于双 DSP 的噪声模拟试验系统研究^{*}

马 明^{1,2}, 沈润杰^{1*}, 方 兵², 何 闻¹

(1. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州, 310027; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州, 310027)

摘要:针对多参数复合环境试验系统中噪声环境的生成要求,提出了一种以双数字信号处理器(DSP)为核心的噪声环境模拟系统的控制结构。该系统与上位机通讯采用异步串口,DSP之间传输数据或命令采用同步串口。在对模糊PID算法进行深入分析和研究的基础上,利用该控制算法对测量噪声信号进行了频域控制,从而实现了噪声模拟系统的闭环自动控制。实验结果表明,在控制之前,其声谱的声压级波动范围在50 dB以上,并且频率在4 kHz以上的声压级均值有一定的衰减;控制后,其声谱的声压级波动范围控制在10 dB左右,同时声压级均值也较平直,证明该控制方法是有效的。

关键词:白噪声控制;数字显示器;数字信号处理器;模糊PID

中图分类号:TB535;TP302.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)06-0719-04

Study on dual-DSP-based testing system of noise environment simulation

MA Ming^{1,2}, SHEN Run-jie¹, FANG Bing², HE Wen¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Considering the generated requirements of noise environment in a complex multi-parameter test system, a dual-core digital signal processor (DSP) control structure of noise simulation system was presented. The system was communicated with PC by the asynchronous serial and transmitted datas or commands from DSP1 to DSP2 by the synchronization serial. After the theory of fuzzy PID algorithm was deeply analyzed and researched, the noise signal was controlled in frequency domain, so that the closed-loop automatic control of noise simulation system was realized. The results of experiments show that the pressure level of sound spectrum fluctuated much greatly before it is controlled, and the scope of fluctuation reached as much as 50 dB, and also the mean sound pressure level, which the frequency is above 4 kHz, is somewhat inclined. On the contrary, the extent of fluctuation in the pressure level of sound spectrum could be controlled within 10 dB. The mean sound pressure level is also relatively straight. All these things above can prove that the control method is available and much effective.

Key words: white noise control; digital display scope (DDS); digital signal processor (DSP); fuzzy PID

0 引 言

噪声本质上是一种空间分布且具有一定频率分布特性的动态的随机载荷,就像电荷一样,它也有自己的场。当噪声载荷较小时,不会对场中的物体产生影响,但是随着声场声压级的增大,在120 dB以上时,就有

可能对声场中的元器件产生影响,使整个系统装置的可靠性变差,甚至产生灾难性的结果。因而对航天装置元器件进行噪声场的可靠性检测分析是十分必要的。而在空间分布的噪声场中,主要以白噪声为主,所以在噪声环境模拟试验中,以白噪声作为发波信号,驱动扬声器,形成一个声场^[1-2]。

收稿日期:2010-12-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863计划”)资助项目(2007AA04Z440);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QNA4002);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0494);浙江省“钱江人才计划”资助项目(2009R10026)

作者简介:马 明(1984-),男,甘肃天水人,主要从事嵌入式控制系统方面的研究. E-mail: mamingwq@qq.com

通信联系人:沈润杰,男,博士,副研究员,硕士生导师. E-mail: shenrunjie@163.net

在国内,噪声场模拟主要以混响室单声源为主^[3],这样使得声场不均匀,并且大多数噪声控制是在上位机上进行,这样使得系统运行速度慢,具有很大的时滞性,没有办法进行实时控制^[46]。本研究应用以双 DSP 为核心的嵌入式控制系统,实时性好,并且应用 4 个平板扬声器作为声源,使实验舱中的声场更加均匀。

整个噪声环境模拟系统主要有发波 DSP、驱动电路、传声器适配电路、采样 - 控制 - 通讯 DSP 以及环境仓。本研究利用模糊 PID 控制算法,对噪声频域信号进行控制,然后将频域的控制结果经过 IFFT 运算产生新的发波数组发送给发波模块,并通过驱动电路对信号进行功率放大,驱动环境试验仓内扬声器,在舱内形成需要的噪声场,从而实现模拟噪声系统的闭环自动控制。

1 白噪声控制系统结构

噪声测控系统基本组成结构示意图如图 1 所示,

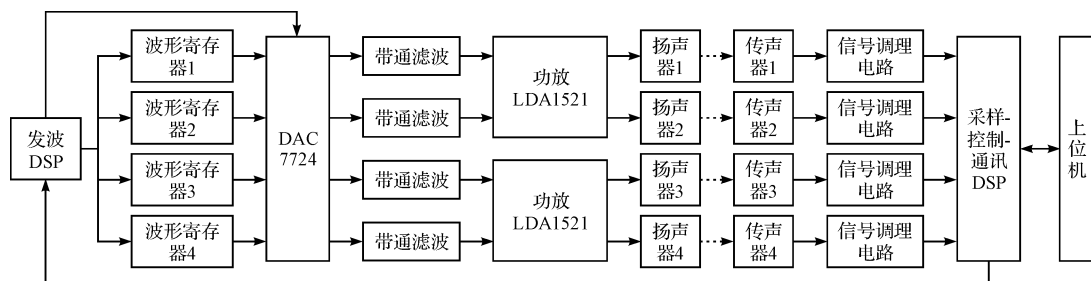


图 2 噪声系统电路原理图

1.1 发波 DSP

白噪声的产生是利用 DDS 技术,将指定的白噪声时域信号数组存储到一段可读写数据存储单元中。在实际应用中,由于数组多,并且占据内存较大,运行在内部 RAM 中内存不够,必须把较大的数组运行在 SRAM 中,而把动态、较小的数组运行在内部 RAM 中。这里通过 #pragma 和 DATA_SECTION 伪指令把数组定义在外部 SRAM 中。再根据 DSP2 定时器中断控制发波频率,顺序循环读取 SRAM 中的数据,并运用 DSP2812 影射寄存器控制 DAC7724 的两级寄存器进行 D/A 转换。

为了实现 4 路信号的同步发生,用 DSP2 的 4 个影射寄存器分别控制 4 个通道第 1 级缓冲,实现每个通道对应点的数据输入,但不将输入数据转换为模拟输出,而是用 DSP2 的一个影射寄存器同时控制 DAC7724 4 个通道的第 2 级缓冲,将第 1 级缓冲的输入数据分别打入相应的输出寄存器,并将输入数据转换为模拟输出,从而实现 4 通道波形的同时发出。并通过驱动电路将信号放大,实现对扬声器的驱动^[7-9]。

系统主要包括上位机、发波 DSP、驱动电路、传声器适配电路、采样 - 控制 - 通讯 DSP 以及环境试验仓。

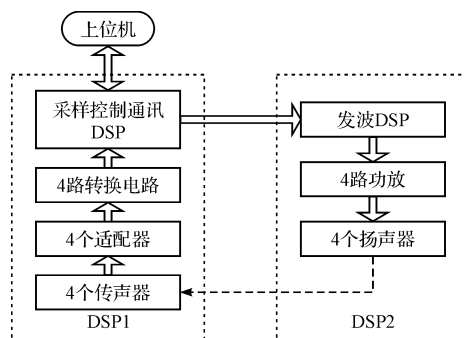


图 1 白噪声控制系统结构

该结构以 2 个 DSP2812 为核心,其中 1 个 DSP(以下称 DSP2,发波 DSP)专门负责 4 路白噪声的发生,另外 1 个 DSP(以下称 DSP1,采样控制通讯 DSP)则负责与上位机通讯、4 路信号采样、对信号处理及生成白噪声序列。相应的噪声系统电路原理图如图 2 所示。

发波 DSP 流程图如图 3 所示:首先对发波 DSP 系统初始化,设置好初始发波的参数,根据白噪声发波原理,对发波频率做相应的设置,使发出的波形频率带宽与要求相吻合。开始 CPU 定时器中断,对发波数组中的数据逐点、顺序循环输入改变模拟输出的值来产生白噪声波形。

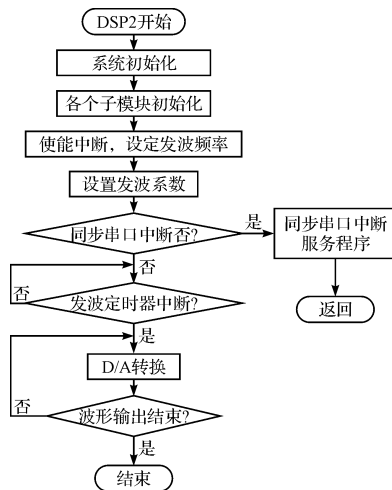


图3 发波流程

1.2 采样-控制-通讯 DSP

在该系统中,此部分主要负责与上位机通讯、4路信号采样、对信号处理及生成白噪声序列。

采样-控制-通讯 DSP 流程图如图 4 所示:上位机通过异步串口给下位机 DSP1 控制系统发送产生噪声的指令,并告知下位机噪声的声压级及声场波动度指标。DSP1 将产生初始的随机白噪声数组,通过同步串口将发波数组传送给发波 DSP2, DSP2 接收数组后,开始发波,发出的波形经过功率放大分别驱动 4 个扬声器。经过一段时间的运行后,在试验箱内,用传声器测量声压级,通过适配器将测量值转换为电压信号,经过转换电路把电压信号缩小在 0 V ~ 3 V 的范围内, A/D 中断开始采样和控制, DSP2 利用中断操作进行数据的间歇采样,每次测量 4 组数据,并将其转化成频域数据进行控制,将控制后的新数组经过 IFFT 变换产生时域数组传给 DSP2,发波模块开始重新发波,从而实现模拟噪声系统的闭环自动控制^[10]。

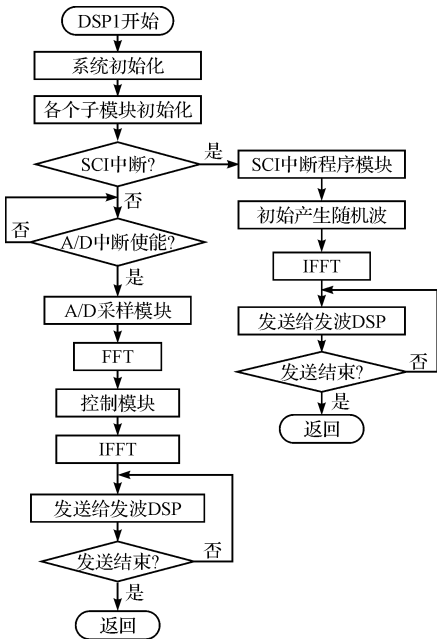


图 4 采样-控制-通讯流程

2 噪声系统控制算法研究

2.1 自适应模糊 PID 控制算法

本研究利用自适应模糊 PID 控制器,以误差 e 和误差变化 Δe 作为输入,通过不同时刻的 e 、 Δe 对 PID 参数进行自整定。根据模糊控制原理对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行实时修改,以满足不同的 e 与 Δe 时对控制参数的不同要求,从而使被控对象有良好的动、静态性能^[11]。

在该试验中, e 是 FFT 计算后频域中每个频率点

对应的电压(声压)与设定(声压)电压的差值,而 Δe 对应的是同一频率点采样两次电压误差的差值,也就是误差的变化量。

控制算法结构如图 5 所示,在噪声模拟系统中是逐点进行比较判断电压误差,在模糊推理表中查找到一组合适的 PID 参数,进行 PID 控制。当所有的比较值都控制在 H 的范围之内,就说明其控制结束,开始稳态运行。如果比较值大于 H ,则控制参数进行对应点的控制,产生新的发波数组,再次发波,等到噪声场稳定后开始采样控制,直到达到要求。

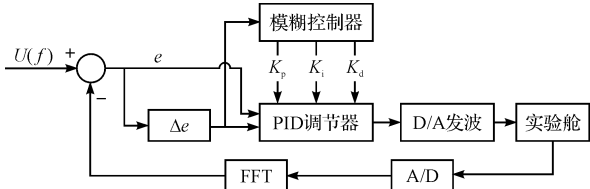


图 5 控制算法结构

2.2 软件控制流程

软件控制流程图如图 6 所示,当用模糊 PID 控制时,以频域中每个频率点的功率值与功率均值的误差为 e ,这个误差的变化量为 Δe ,进行计算 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,根据 e 、 Δe 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集的隶属度、各个模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊调整模型,运用模糊推理计算出 PID 参数,这是整定系统模糊控制算法的核心。这个整定过程,需要在 Matlab 里计算好,存入数据存储器中供查询。 K_p 、 K_i 、 K_d 的参数调整算式为:

$$\begin{cases} K_p = K_p^0 + \Delta K_p \\ K_i = K_i^0 + \Delta K_i \\ K_d = K_d^0 + \Delta K_d \end{cases}$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d —PID 控制器的参数; K_p^0 、 K_i^0 、 K_d^0 —PID 的初始系数。

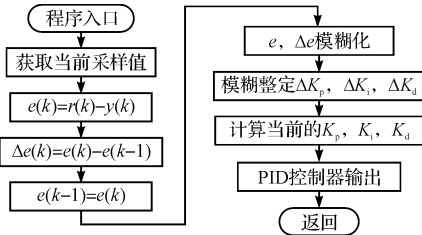


图 6 模糊 PID 流程图

在运行过程中,本研究实时地检测系统的输出值,并计算出偏差和偏差变化率,然后将它们模糊化,得到 e 和 Δe ,通过查询模糊控制表得到 3 个 PID 参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的调整量,从而得到参数的调整。

3 噪声系统实验研究

3.1 控制前实验数据分析

本研究设定的控制目标:频带宽度为 500 Hz ~ 5 000 Hz;频率分辨率为 10 Hz;声压级 (SPL) 为 100 dB。通过 DSP 直接采样后,经过 FFT 后进行声压级的计算,并将 4 路信号进行平均。开环控制时其噪声场频谱如图 7 所示,从图中可以看出,有的频率点上声压级比较大,有的频率点上声压级比较小,形成比较大的波动,波动的范围接近 50 dB,并且在 4 kHz 以上出现了明显的下降趋势。这与传声器的频率响应曲线相吻合,说明传声器对 4 kHz 以上的波形有一定的抑制作用。这样可以通过改变频域驱动电压的系数进行 IFFT,形成时域的随机的驱动电压驱动扬声器。

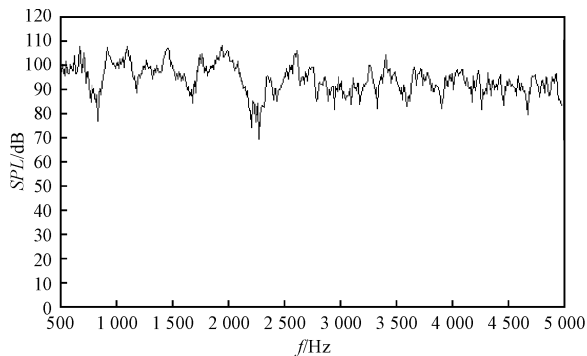


图 7 控制前声谱

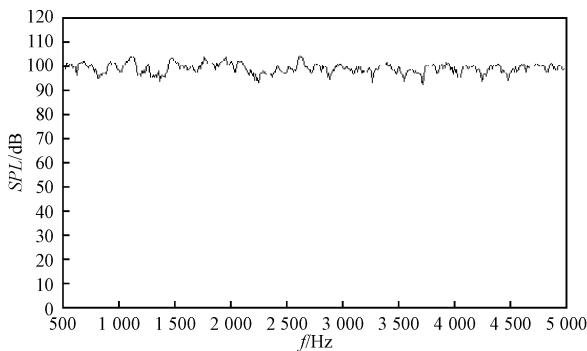


图 8 控制后声谱

3.2 闭环控制后实验数据分析

经过对噪声系统进行模糊 PID 的控制,控制后的声谱如图 8 所示。很明显,声谱的声压级波动减小,使声压级波动的范围控制在一个较小的范围内,其波动量为 10 dB 左右。4 kHz 以上的声压级均值也得到了提升,使整个设定的频率范围内,声压级在比较水平的一条线上波动,比较理想地达到了预定的目标。

4 结束语

在本研究中,通过一个 DSP 进行持续发波,另一个 DSP 进行采样、控制和通讯,这使整个系统的响应速度快、能够在一次控制时间间隔内持续的发波、可以更好地进行实时控制。在进行 FFT 和 IFFT 计算和模糊 PID 控制中,DSP 能够提高运算速度,使整个控制过程更快。本研究采用了自适应模糊 PID 控制算法对噪声频域信号进行控制,从而实现了噪声模拟系统的闭环自动控制。从实验结果可以看出其声谱的声压级波动大幅减小,声谱的波动控制在 10 dB 以内,达到了预定的目标,证明该控制方法是有效的。

参考文献 (References):

- [1] 王裕清,武良成. 白噪声在机械系统分析中的应用[J]. 焦作矿业学院学报,1995,14(4):7-12.
- [2] 周伟,范云霞,门爱东. 基于 DSP 的实时高斯白噪声产生方案[J]. 无线电工程,2006,36(10):56-58.
- [3] 邵闯,黄文超. 机载设备的噪声环境实验研究[J]. 装备环境工程,2009,6(3):46-50.
- [4] BRIGHAM E O, MORROW R E. The fast Fourier transform [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 12(4):63-70.
- [5] GEORGE V. Real-Time Multi-Channel Simulation of Sonar Signals by Spectral Shaping of White Noise Using an Array of Digital Signal Processors [C]//2004 International Symposium on Digital Object Identifier. Portugal: [s. n.], 2004: 187-191.
- [6] TAN Wei, YANG Sen-bin, CHEN Yan-pu, et al. Research on DFT Domain Digital Audio Watermarking Algorithm Based on Quantization [C]//2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science, Portugal: [s. n.], 2009:736-739.
- [7] 张瑞华,刘庆华,周德新. 伪随机噪声算法及 DSP 实现 [J]. 声学及电子工程,2003. 70(2):22-23.
- [8] 苏奎峰,吕强,常天庆,等. TMS320X281X DSP 原理及 C 程序开发 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [9] 殷福亮,宋爱军. 数字信号处理 C 语言程序集 [M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2000:30-56.
- [10] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理 [M]. 北京:中国铁道出版社,1983:176-296.
- [11] 王晓冲. 模糊参数自整定 PID 温控系统的设计与研究 [D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2007:42-70.

[编辑:张翔]