

超低频振动校准自动控制系统的研究^{*}

王志鹏¹, 何 闻^{1*}, 于 梅², 沈润杰¹

(1. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江省先进制造技术重点实验室, 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要:针对超低频振动校准过程中测试时间长且效率较低的问题,设计了一种基于个人计算机及虚拟仪器技术开发的超低频振动校准自动控制系统。该系统由超低频标准振动台、功率放大器、激光测振仪、位移传感器、信号发生器、频比计数器、数据采集卡、计算机与测控软件等组成。通过线性逼近与逐步移频相结合的算法,精确控制振动台在超低频时迅速到达设定振级。试验结果证明该系统满足超低频振动校准要求,提高了超低频振动传感器的测试精度和自动化程度。

关键词:超低频;校准;自动控制;软件设计;LabVIEW

中图分类号:TH825;TP273; TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)06-0693-05

Research of automatic control system for ultralow frequency vibration calibration

WANG Zhi-peng¹, HE Wen¹, YU Mei², SHEN Run-jie¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Institute of Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: Aiming at the demerits of time-consuming and low efficiency during the process of ultralow frequency vibration calibration, an automatic ultralow frequency vibration calibration system based on personal computer and virtual instrument was presented. The system was consisted of ultralow frequency standard vibrator, power amplifier, laser vibrometer, displacement transducer, signal generator, universal counter, data acquisition card, computer, control software, etc.. The strategy which via combining the method of linear approximation and step-by-step frequency shift could make the vibrator reach the pre-set vibration level quickly and precisely. The experiment results show that the system is suitable for the calibrating ultralow frequency vibration transducers very well and improves the automation of ultralow frequency calibrating vibration.

Key words: ultralow frequency; calibration; automatic control; software design; LabVIEW

0 引 言

超低频振动测量是目前许多前沿学科的重要技术基础。在诸如航空航天、地震与海啸监测、资源勘探、精密加工、大型建筑等领域的结构动力学研究都需要

使用超低频测振传感器。因此,为保证超低频振动测量结果的精度和可靠性,建立超低频振动校准系统具有重大的意义。为确保标定的一致性和精度,振动和冲击计量规程对振动传感器在整个测试频带内规定了特定的运动量要求^[1]。而且,传感器校准过程的时间

收稿日期:2010-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50675200);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:王志鹏(1985-),男,宁夏银川人,主要从事机械振动测试及控制方面的研究. E-mail: wzhp.009@163.com

通信联系人:何 闻,男,教授,博士生导师. E-mail: hewens@263.net

不应过长。所以对于超低频振动校准自动控制系统必须设计一种合理的振级调整方法,使振动台可以快速、精确地达到预定振级。目前比较普遍的振级调整方法是逐次逼近法^[2-3],这种方法的基本思路是:首先采集标准传感器若干个周期的信号,然后用计算电压有效值的方法得到振动台的当前振级,再以一个步长逐次递增信号发生器发出的激励信号,直到振动台稳定在预定振级下。但是,低频到超低频(≤ 0.01 Hz,即 $T \geq 100$ s)信号的采样时间随测量周期的增大而大幅增长,因而实现振动信号的快速精确测量的难度很大^[4],如对于 0.01 Hz 传感器的标定,振级增加一次就需要至少一个周期即 100 s,振级调整过程将会非常缓慢。

本研究对超低频振级校准自动控制系统中的振级调整方法进行了研究,对振动台在高频、低频和超低频工作时分别采用不同的控制方案,减少了振级调整时间。

1 超低频振动校准系统组成

超低频振动校准系统由硬件和软件两部分组成。硬件部分包括超低频标准振动台、功率放大器、激光测振仪等;软件部分主要实现对各仪器的控制,使之能够对测振传感器进行自动校准。系统总体结构如图 1 所示。

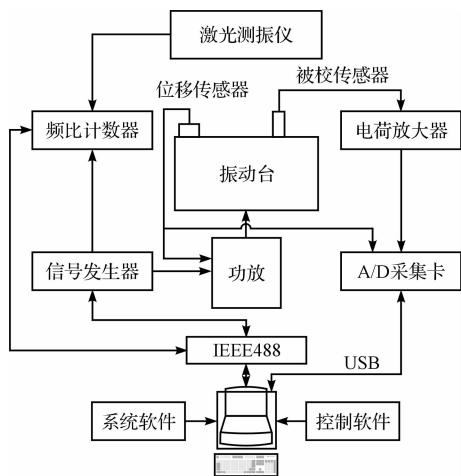


图 1 超低频振动校准系统结构

1.1 系统硬件组成

系统硬件部分主要包括超低频标准振动台、功率放大器、激光测振仪、信号发生器、频比计数器、多通道同步数据采集卡、位移传感器和计算机。其中,数据采集卡可通过计算机自带的 USB 接口与其连接,频比计数器和信号发生器通过 IEEE488 接口卡与计算机相连。IEEE-488 总线是并行总线接口标准。它按照位并行、字节串行双向异步方式传输信号,连接方式为总

线方式,仪器设备直接并联于总线上而不需中介单元,但总线上最多可连接 15 台设备。

硬件部分的功能是通过信号发生器产生一定频率和幅值的标准正弦信号,经过功率放大器放大后给振动台提供一个恒定的激励信号,使振动台产生一定频率和振动量级的运动,用采集卡测量传感器信号幅值,通过频比计数器测量激光测振仪输出信号与振动信号频率之比,从而得到传感器的校准值。位移传感器有两个作用:一个是在超低频时进行位移反馈,将标准振动台输出波形的失真度降低至理想水平;另一个是在超低频时测量位移,实现振级快速调整。

1.2 系统软件总体结构

超低频振动校准软件是整个系统的核心,在振动校准系统中,所有硬件的控制命令都是由软件发出的,系统各个部分都在它的统一协调下进行各自的工作,以保证系统的稳定运行。校准软件包括两个部分:功能模块子系统和振动校准子系统。功能模块子系统是对信号发生器、频比计数器、A/D 采集卡进行控制,通过该模块,经人机交换界面输入控制量,可以控制硬件信号的发生、数据的采集。振动校准子系统是本系统软件的主要部分,通过该模块控制各个子模块动作,完成传感器的校准。振动校准软件设计的总体结构如图 2 所示。

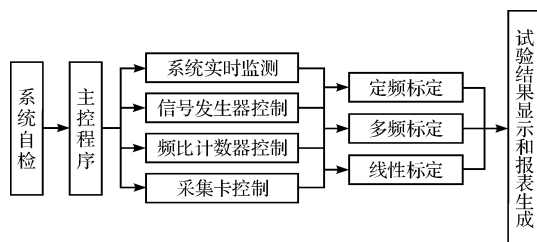


图 2 振动校准软件设计的总体结构

系统自检是对系统中各个硬件模块的功能和物理连接进行检查,保证系统能够安全稳定的运行。主控程序是整个软件的重要组成部分,它的作用是对信号发生器、频比计数器和采集卡进行设置和控制,并对系统进行实时监测。信号发生模块、频比计数模块和采集卡工作模块受主控程序控制,把测量结果返回到主程序。系统实时监测模块的功能是对当前振动台振级和硬件运行状态进行监测。一旦因用户操作失误导致振级超过设定振级一定范围或硬件出现错误,实时监测模块就会向主控程序发出报警,主控程序就会使信源信号幅值以适当的速率降至最低值,同时提醒用户关闭功率放大器增益开关,这样可以避免意外发生、对整个系统造成损坏。振动校准软件设计主要包括对传感器的灵敏度、幅频响应和幅值线性等指标的校准程序。试验结果显

示和报表生成模块的功能是对来自硬件的测量数据进行计算处理,并把最终结果在屏幕上列表显示,打印输出或保存在硬盘,从而实现振动校准的自动化。

2 振级调整算法

振级调整是整个振动校准自动控制系统中用时最长的一个环节,因此如何设计振级调整程序是一个关键问题。振级调整的基本思路是按振动台工作的3个不同频段,即高频($f \geq 2 \text{ Hz}$)、低频($0.1 \text{ Hz} \leq f < 2 \text{ Hz}$)、超低频($f < 0.1 \text{ Hz}$),采用分段控制的方法。在高频段和低频段时均采用线性逼近的控制方法,但两个频段实时测试振级的方式不同。在高频时,使用频比计数器来进行振级的实时测量。在低频段时,由于频比计数器至少需要一个周期才能测得准确值,实际情况下为了确保振级的准确性一般要测量3次频比,取平均值,振级调整将会非常耗时,所以用位移传感器来测得振动台的实时振级。在超低频时,振动信号的幅值变化缓慢,周期很长,每次信源电压调整过后,要等很长的时间使振级达到稳定,才能得到准确的振动波形。考虑到系统处于超低频段时使用位移反馈技术,在等电压输入条件下,位移振动量基本为一常量。所以为避免超低频振级测量用时过长,本研究采用逐步移频技术,即先在 0.1 Hz 下用线性逼近算法使振动台位移调整至设定值,然后逐步递减信源输出信号频率,直至测试频率,从而实现超低频段时振级的快速调整。

严格来说,振动校准系统是一个具有高阶传递函数的非线性机电耦合系统,且有许多不确定参数,要使这一系统稳定工作,有相当的难度^[5]。但是这一系统也有它的特点,在一定的工作范围内,可以认为,系统有近似的线性时不变的性质。另外,要求标定用振动台在运行过程中工作平稳,不允许出现冲击现象^[6]。根据这些特点,本研究设计了线性逼近的振级调整控制算法。即在振动台的工作频段中,可近似认为振动台的输出相对于信源信号的幅值是增函数,而且局部还是线性关系。此时振动台系统的输入信号电压 u 与输出振级 x 的关系可假设为 $x = ku$ 。根据输入信号的电压值和相应的位移传感器测得的数据,算出系统比例因子 k ,用它近似表示输入信号与振动台输出振级的线性关系。

线性逼近模型如图3所示, $u_i(f_k)$ 为振动台校准系统输入信号电压, $x_o(f_k)$ 为振动台振级。本研究首先计算振动台系统的比例因子 $k = x_o(f_k)/u_i(f_k)$ 。根据设定振级 $x(f_k)$ 可得到信号发生器应达到目标电压

值 $u_s(f_k) = x(f_k)/k$,继而可得信号发生器的电压增量 $\Delta u = u_s(f_k) - u_i(f_k)$ 。因为校准系统不是绝对的线性系统,在根据比例因子计算要产生的信号电压时,该电压不一定对应设定振级。引入增量电压修正系数 s ,使信号发生器的目标电压为 $u_s(f_k) = u_i(f_k) + s \times \Delta u$ 。由于振动台系统在低频时处于反馈控制,信号发生器的输出电压不能发生跳跃,必须平稳地到达目标电压,这就要求信源电压在较短的时间内逐步加至目标电压。

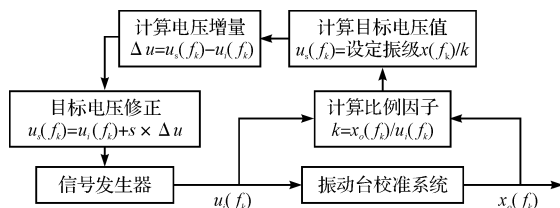


图3 线性逼近模型

程序使用两次线性逼近来快速调整振级。第1次是在调整起始阶段,信号发生器输出的幅值较小,振动台位移很小,得到的振动台位移波形容易受噪声影响,为了防止振动台发生过冲,修正系数应取较小值,取 $s = 0.4$ 。信号发生器输出电压达到第1次计算目标电压后,振动台输出振级相对较大,位移波形受噪声影响很小,系统的线性特性明显,此时再计算一次系统斜率,取 $s = 0.9$,得到信号发生器的目标电压,可使振级迅速到达目标值附近。

当线性逼近控制完成后,振动台振级已经接近设定值,需要十分精确地控制振动量级。此时用逐次逼近控制法将振动台振级逐步控制到设定值的误差范围之内,误差范围可以根据用户需求自由设定。程序中使用一个非常小的电压步长 $step = 0.05 \text{ V}$ 来控制信号发生器,使振级逐步逼近设定值。

在整个振级调整过程中,振级实时测量模块是决定调整时间长短的重要环节,传统的方法至少要采集一个周期长度的位移传感器波形才能计算出波形峰值,从而得到振级,严重影响振动台低频及超低频时振级调整的速度。为减少测量环节的耗时,本研究利用 LabVIEW 中 Signal Processing 目录下 Signal Operation 模块提供的 Peak Detector.vi 函数来实时探测振动波形的峰值,设置该函数的相关参数可以测量出当前振动波形的正峰值与负峰值,通过计算正负峰值的平均值即可得到当前振级^[7-12]。若采用这种方法,只需采集正峰值与负峰值之间的半个周期波形信号就可以测出当前振动量值,大大节省了振动台振级调整时间。

低频及超低频振级调整算法如图4所示。

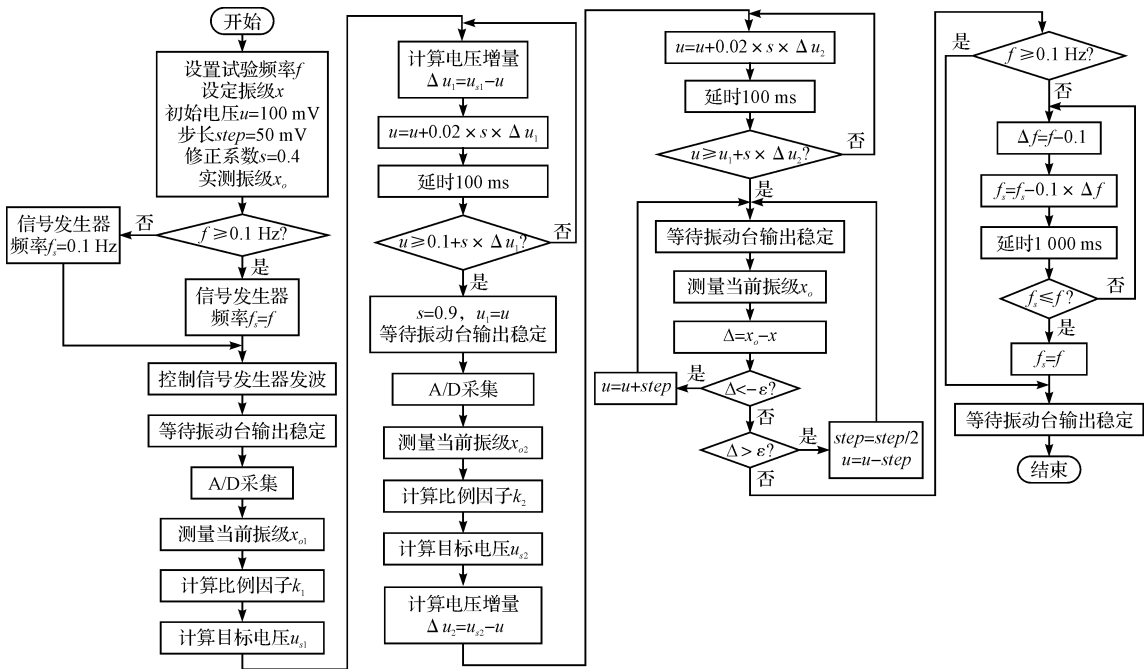


图 4 振级调整算法

f —实验频率; f_s —信号发生器信号频率; x —设定振级; $step$ —电压增长步长; u —信号发生器信号电压; s —增量电压修正系数; x_{oi} —线性逼近时所测振级; k_i —线性逼近的比例因子; u_{si} —线性逼近时计算得出的目标电压; Δu_i —线性逼近时的电压增量; u_1 —第一次线性逼近后信号发生器信号电压; x_o —实测振级; Δ —当前振级与设定振级之差; ε —用户所设振级调整误差范围; Δf —频率增量。

3 实验研究

为了检验低频与超低频段振级调整算法的快速性与准确性,进行了一组试验,对不同频率下振级调整时间与调整精度进行测试。试验结果如表 1 所示,软件中振级调整误差设为 1%。从试验数据中可以看出,振动量值的误差均分布在 0.5% 左右,完全满足设定精度。振级调整时间与试验周期之比随试验频率呈逐渐减小趋势,如图 5 所示(图中: γ —调整时间与试验周期之比),即虽然随着试验频率的降低,使振级调整时间延长,但调整效率却不断提高,而且频率越低,这种效果越明显。所以,采用上述算法在超低频可以快速并有效地控制振动量级,满足了试验要求。校准系统主界面如图 6 所示。

表 1 振级调整测试结果

实验频率	试验周期	设定振级	实测振级	振级误差	调整时间
f/Hz	T/s	x/mm	x_0/mm	$\varepsilon/\%$	t/s
0.1	10	10	9.956	0.44	180
0.05	20	10	9.965	0.35	210
0.02	50	10	9.945	0.55	240
0.01	100	10	9.941	0.59	300
0.005	200	10	9.957	0.43	400

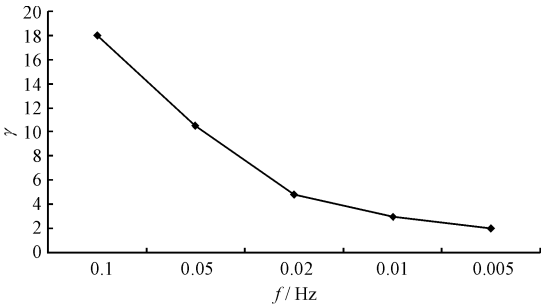


图 5 调整时间与试验周期之比随试验频率变化趋势图

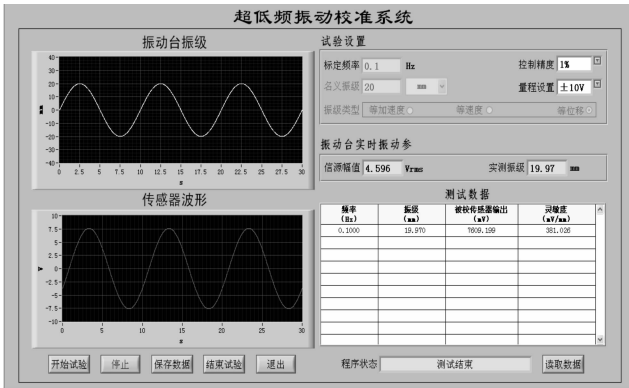


图 6 校准系统主界面

4 结束语

本研究探讨了超低频振动自动校准系统,提出了

振动台在低频及超低频时快速调整振级的方案。基本思想是按振动台工作的不同频段,采用线性逼近和逐步移频相结合的分频段控制策略,实现了振级的迅速、精确调整。

该系统充分应用 LabVIEW 图形化编程语言的优势,方便地实现了仪器控制、数据采集等功能。人机界面友好、操作方便可靠,测试精度和效率较高,实际应用效果良好,提高了超低频振动校准的自动化程度。

参考文献(References):

- [1] 应海雄,许晓鸣,郑家龙. 振动传感器的计算机自动标定系统设计[J]. 上海交通大学学报:自然科学版,1997,31(6):119-122.
- [2] 王光庆. 改善振动校准系统性能相关技术问题的研究及其实现[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2003:56-57.
- [3] 王光庆,何 闻,贾叔仕. 振动校准自动控制系统中软件设计的研究[J]. 机电工程,2001,18(5):193-195.
- [4] 于 梅. 低频超低频振动计量技术的研究及展望[J]. 振动与冲击,2007,28(11):83-86.
- [5] 董林玺. 振动校准装置测控系统的研究[D]. 杭州:浙江

大学机械工程学院,2001.

- [6] 郑家龙,沈士三,陈隆道. 振动传感器自动标定系统的研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1994,28(5):481-488.
- [7] 丁勇山,蒋东翔,李 凯,等. 基于 LabVIEW 的振动数据采集与分析系统[J]. 振动与冲击,2006,25(8):482-484.
- [8] 孟 凯,陈小虎. 基于 LabVIEW 的数据采集、监测系统的设计[J]. 机械,2009,36(11):35-37.
- [9] GANI A, SALAMI M J E. A LabVIEW based Data Acquisition System for Vibration Monitoring and Analysis [C]// Student Conference on Research and Development Proceedings, Malaysia: [s. n.],2002:62-65.
- [10] ABU-MULAWEH H I, MUELLER D W. The use of labVIEW and data acquisition to monitor and control a bench-top air-to-water heat pump [J]. **Computer Applications in Engineering Education**,2008,6(2):83-91.
- [11] 阮奇桢. 我和 LabVIEW:一个 NI 工程师的十年编程经验[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [12] 李青霞,任 焱,陈俊达. 基于 LabVIEW 的“振动自动测试与分析系统”[J]. 振动与冲击,2003,22(2):30-32.

[编辑:柴福莉]

(上接第 670 页)

4 结束语

该系统成功地将 SINUMRIK802D sl 和 S7-300 PLC 应用于圆盘锯床及其生产线自动控制系统中,既发挥了 802D sl 的精确伺服驱动能力和 PLC 的自动控制功能,又在基于 Profibus 总线技术的基础上降低了现场施工和调试工作量。系统工作稳定可靠,调试维护方便,具备完善的自诊断和故障处理能力。

通过 802D 和 S7-300 PLC 的成功应用,使系统性能大幅提升,快进快退速度由 3 m/min 提高到 4.5 m/min,进给精度误差由 0.01 mm/z 提高到 0.005 mm/z,锯切面粗糙度由 Ra25 提高到 Ra12.5,系统连续无故障运行时间达 48 天,操作工数量则由原来的 2~3 人缩减为仅需 1 人监控。目前,该圆盘锯床设备已经通过内蒙古自治区级科技成果鉴定。鉴定结果表明:该系统具有较高的控制精度、稳定性和自动化程度,应当尽快投入量产。

参考文献(References):

- [1] 郭北涛. 国内外金切锯床的现状与发展趋势[J]. 制造技

术与机床,2004(2):32-33.

- [2] 丁家国. Profibus 现场总线在圆盘锯控制系统中的应用[J]. 安徽工业大学学报,2004,21(2):134-137.
- [3] 穆晓明,朱建伟,杜 威. Profibus 现场总线在锯切系统中的应用[J]. 冶金工业自动化,2009(S1):57-59.
- [4] 姜晓勇,张继深. 圆盘锯床减速箱的主轴滑移机构. 发明专利:ZL2009 10100447. 5[P]. 2010-12-01.
- [5] 姜晓勇,张继深. 圆盘锯床的导轨减振阻尼机构. 发明专利. ZL200910100448. x[P]. 2010-12-01.
- [6] 徐 忠,王万良,蒋一波,等. 基于 Profibus-DP 的远程数控系统通讯研究[J]. 机电工程. 2009,26(2):42-45.
- [7] IBRAH M O. Building an interconnection between profibus and ATM networks[J]. **Journal of Network and Computer Applications**,2007,30(2):1082-1084.
- [8] 刘 锴,周 海. 深入浅出西门子 S7-300 PLC[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [9] SIEMENS Ltd. SINUMERIK 802D Solution Line 简明调试手册: 2008. 1[M]. SIEMENS Ltd. ,2008.
- [10] 龚仲华. S7-200/300/400PLC 应用技术(通用篇)[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [11] SIEMENS Ltd. . Description of PLC Subroutine Library V02. 00. 00 for SINUMERIK 802D sl [M]. SIEMENS Ltd. ,2006.

[编辑:李 辉]