

# 用于直升机现场计量的低频振动校准技术

杨霖 郑术力

(工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

**摘要** 本文面向直升机健康与使用监测系统(HUMS)的现场计量保障需求,针对其中振动传感器在低频段尚无法实现现场校准的现状,提出了基于直线电机驱动技术的便携式低频振动校准技术方案。该方案利用高精度直线电机构造低频标准振动源,采用稳定性高的石英挠性加速度计作为标准加速度计,具有体积小、精度高、现场环境适应性好的特点,非常适用直升机 HUMS 的现场计量保障。根据不确定度评估结果,该方案能够实现 0.5 Hz ~ 20 Hz 频率范围,0.01 m/s<sup>2</sup> ~ 20 m/s<sup>2</sup> 加速度范围内不超过 1% 的校准不确定度( $k=2$ )。

**关键词** 健康与使用监测系统 加速度计 低频振动 现场校准 直线电机

## On-site Calibration Technique for Helicopter Vibration Sensors in Low Frequency Range

YANG Lin ZHENG Shu-li

(China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 510610, China)

**Abstract** This paper presents a technique to fill the void in on-site calibration of accelerometers in helicopter health and usage monitoring systems (HUMS) within low frequency range. The technique employs a compact linear-motor-driven reference vibration exciter and a thermo-stabilized quartz flexible accelerometer to construct a portable, precise, and stable calibrating apparatus, which is quite fit for the on-site calibration of helicopter HUMS. According to the uncertainty estimation and calculation, an expanded calibrating uncertainty ( $k=2$ ) of no more than 1% is expected of the apparatus over the frequency range of 0.5 Hz ~ 20 Hz and the acceleration range of 0.01 m/s<sup>2</sup> ~ 20 m/s<sup>2</sup>.

**Key words** Health and usage monitoring systems Accelerometers Vibration in low frequency range On-site calibration Linear motor

## 1 引言

直升机是近地、近海低空作战中不可或缺的重要空中力量。如图 1 所示,直升机在使用过程中,旋翼、尾桨、发动机、传动装置等旋转运动部件要产

生交变载荷,引起机体结构的受迫振动。机体结构的受迫振动会给直升机的使用带来严重后果:如主要零部件、燃油动力系统的振动疲劳失效,机载装备因产生振动而功能失效或失准,座舱的受迫振动影响驾驶员和乘员的舒适性等<sup>[1]</sup>。因

此,对直升机振动水平进行监测及控制有着重要的现实意义。

为了监控一些影响飞行安全的参数,现代直升机上都装备有健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)。一般在 HUMS 中有数十个加速度计来监测、记录直升机旋翼、发动机、传动系统及机体等关键部位的振动水平<sup>[2]</sup>。鉴于旋翼主桨的低频振动是直升机整体振动的主要来源<sup>[2]</sup>,这些加速度计的工作频率下限均要求能达到如 1 Hz 甚至更低的频率值,因而在低频段对这些加速度计进行计量校准是保障直升机飞行安全、作战性能及座舱舒适性的关键内容。

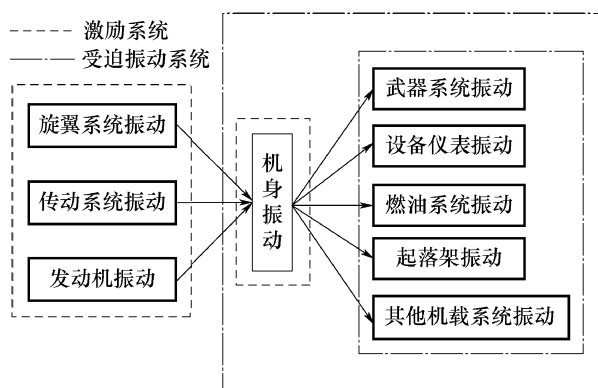


图1 直升机装备振动传递路线图

尽管加速度计的校准有成熟的技术方案,然而据我们所知,受限于现有低频振动台的加速度输出幅值及测量信噪比,目前针对直升机 HUMS 加速度计的低频校准均在实验室中进行,尚无法实现现场校准。而实验室校准往往存在计量周期长的问题,严重影响装备的训练计划和快速响应能力,因而需要周期更短在现场计量的保障方式。

为了解决现有直升机装备低频振动现场计量需求无法得到满足的问题,本文提出了一种便携式低频振动校准系统的技术方案,通过利用直线电机作为驱动源构造紧凑型低频标准振动台,结合低噪声、高稳定性的石英挠性加速度计作为标准加速度传感器,开发一种能够输出高加速度、低失真波形,适用现场计量的低频振动校准装置。

## 2 校准技术方案

### 2.1 总体技术方案

根据 JJG 233—2008《压电加速度计检定规

程》<sup>[3]</sup>的相关要求,直升机上 HUMS 系统的加速度计作为工作用传感器,可采用比较法进行计量检定。据此我们可以制定本文所提出的低频振动校准系统的总体方案,其组成结构如图 2 所示。

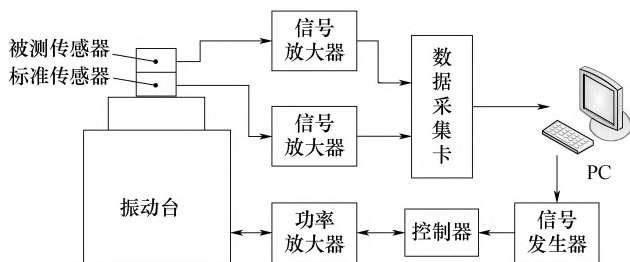


图2 比较法低频振动校准系统组成结构

如图 2 所示,比较法低频振动校准系统主要由标准加速度计套组(标准加速度计与信号适调器)、低频标准振动台(包括振动台体及其控制部分)、数据采集与分析模块(包括数据采集卡与分析软件)三部分组成。该校准系统的一般测量方法描述如下。

标准加速度计与被检加速度计背靠背刚性连接,安装在振动台的台面上,两加速度计的灵敏轴方向与振动台运动方向在一条直线上。上位机 PC 通过控制信号发生器产生一正弦信号,驱动振动台进行单频稳态正弦往复运动。标准加速度计与被检加速度计对振动台的同一振动参量产生响应,其输出分别经两精密信号适调器放大调理后输入到一两通道的数据采集模块,数据采集模块通过对两路电压信号进行采样后传输到上位机 PC 进行数据分析处理,结合标准加速度计的灵敏度计算得到被检加速度计的灵敏度测量值。

将上述过程写成数学表达式,则被检加速度计的灵敏度可以表达为:

$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} \cdot S_1 \quad (1)$$

式中: $S_1, S_2$ ——标准加速度计和被检加速度计的灵敏度幅值; $X_1, X_2$ ——标准加速度计和被检加速度计的输出电压值(同为最大值、有效值或频谱幅值)。标准加速度计的灵敏度幅值  $S_1$  一般由绝对法校准得到。

为了便于下文对整个校准系统的不确定度进行评估,此处我们根据现场计量的需求对校准系统各部分进行了初步选型,其方案见表 1。

表 1 低频振动校准系统各部分初步选型方案

| 部 件      | 准确度、最大允许误差或不确定度  | 选 型          |
|----------|--|--------------|
| 低频标准振动台  | 频率范围:0.5Hz~20Hz,最大位移峰峰值/行程:200mm,加速度谐波失真度:≤10%,横向运动比:≤10%。         | 自 制          |
| 标准加速度计套组 | 0.2% (参考点 16Hz,10m/s <sup>2</sup> ),0.4% (通频带 0.5Hz~20Hz), $k=2$ 。 | 定制(含精密信号放大器) |
| 数据采集分析模块 | 交流电压最大允许误差:±0.2%。  | B&K PULSE    |

2.2 标准加速度计套组方案

在表 1 中,校准系统的标准加速度计套组拟采用定制的高精度石英挠性加速度计。石英挠性加速度计是目前国内外水平最高的加速度计,在各类装备、神舟系列飞船、探月工程等重大工程任务中均有广泛使用,其工作原理如图 3 所示。

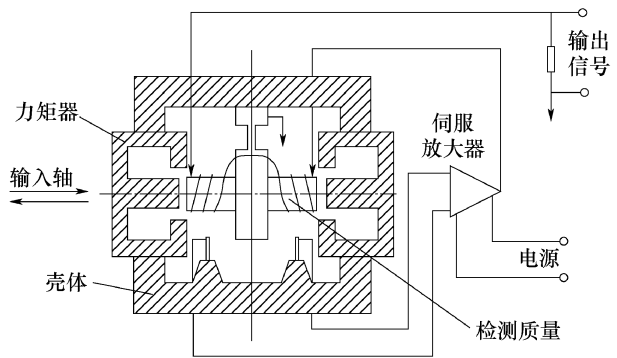


图 3 石英挠性加速度计工作原理示意图

如图 3 所示,石英挠性加速度计是一个机电结合的惯性器件,系统主要由以下几部分组成:a) 检测质量摆组件,当感受到载体加速度时能产生惯性力;b) 电磁力矩器;c) 差动电容传感器,传感到检测质量做功时,其间电容值发生的变化;d) 电子放大器。

当沿加速度计的输入轴方向有加速度  $a$  作用时,由挠性摆和力矩线圈组成的检测质量块将由于惯性作用相对于平衡位置发生微小偏转,从而产生惯性力  $F_i$  或惯性力矩,则差动电容器间距发生改变导致电容量发生变化,再通过伺服放大器电路检测这一变化并变换成相应的输出电流信号,电流信号被反馈送到处于恒定磁场中的力矩器而产生反馈力  $F_f$  或反馈力矩,与输入加速度引起的惯性力  $F_i$  或惯性力矩相平衡,直到再次恢复到平衡位置,电流大小通过检测采样电阻两端电压而得出。

石英挠性加速度计测量噪声小、精度高、灵敏度优,常用于高精度惯性导航、地震测量及钻井倾斜测量等需求场合,是作为振动计量标准器的良好选择。此外,通过使用温度误差补偿技术,石英挠性加速度

计的温度系数可以控制在很小的量级,温度稳定性大大提升,环境适应性大大增强,非常适合直升机现场计量温度条件变化大的使用场景。

2.3 低频标准振动台方案

2.3.1 低频标准振动台的研制特点

与中高频振动计量不同,一般来说,低频振动计量的难点在于如何提高传感器的信噪比。鉴于振动台的振幅存在上限,当振动频率较低时,最大加速度幅值也随之较小,使得传感器的测量信噪比偏低,校准精度不能保证。因此,对低频标准振动台来说,增大振幅/行程可认为是提高低频校准精度的最有效的手段。

对低频标准振动台而言,大行程的运动特点使得其拥有特定的研制难点。按驱动原理划分,低频标准振动台的现有设计方案主要分为两类:电磁型和电机型。如图 4 所示,对于电磁型振动台来说,大行程的特点使得其长气隙内磁场分布不均匀,从而增加了振动台运动控制的复杂度和台体结构设计、加工方面的困难。

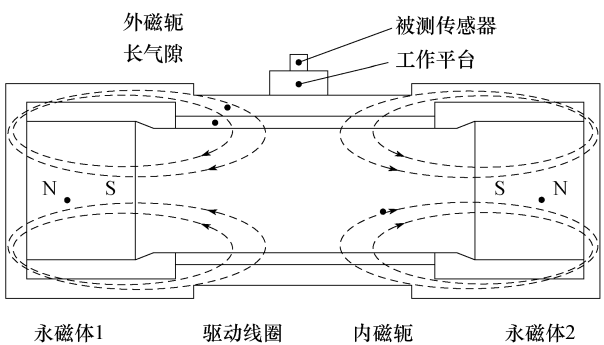


图 4 某种具有闭合双磁路结构的低频电磁型振动台

而对于电机型振动台而言,如图 5 所示,鉴于直线电机内部磁场可以无限延展,其不存在由大行程带来的研制难点,只需克服直线电机内部磁场局部不平顺带来的推力波动的问题,而该问题已随近年来直线电机的工艺及控制技术的快速发展而得到解决。

2.3.2 低频标准振动台的技术方案

针对以上低频标准振动台的研制特点,我们可以

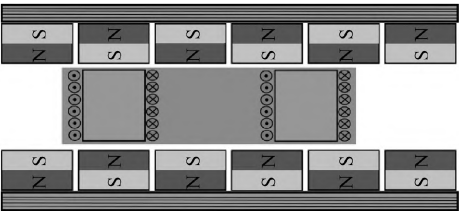


图5 直线电机内部原理图

分析得出,从直升机装备的现场计量实际需求出发,电机型方案相比电磁型方案有以下几方面的优点:

1)电机型方案磁场均匀,行程可以做大。而对同样的大行程,电磁型方案振动台的研制难度则大得多。考虑到直升机现场的工作环境较复杂,现场计量不仅要求振动台具有好的自稳定和抗干扰特性,而且需要振动台能够有较大的行程,输出大的加速度幅值从而提高传感器的测量信噪比,保障计量校准的精度。

2)电机型方案控制简单,研制难度低。相比电磁型方案因为复杂的机电耦合模型和非均匀的磁场分布而导致的研制困难,电机型方案直接采用较为成熟先进的直线电机产品作为振动台台面的直接驱动源,控制简单方便。

3)选用U型槽结构的电机,电机型方案的推力波动可以控制在很小。针对直线电机存在的局部磁场不平顺、推力波动的问题,采用磁铁间距较小的U型槽直线电机,磁场局部不平顺大大改善,加上线圈动子的无铁芯设计,齿槽效应不明显,输出推力波动大大减小。

图6所示为我们选定的电机型低频标准振动台方案的结构组成。从图中我们可以看出,该振动台系统主要由直线电机、导轨及运动平台、直线编码器

(光栅尺)、驱动器、控制器等部分组成。其中直线电机与直线编码器均安装在导轨内部,运动平台与直线电机动子相连,其上设计有夹具安装孔,用来与安装加速度计传感器的夹具(图6中未画出)相连。驱动器与直线电机、直线编码器相连,结合计算机与控制器实现对运动台(直线电机动子)位移的精确控制。

根据图6所示设计方案,直线电机导轨运动台尺寸预计不超过40cm×15cm×10cm,整个校准系统预计不超过60cm×40cm×25cm,单一仪器箱可以容纳,方便现场计量使用。

直线电机位移伺服控制原理如图7所示,伺服控制系统的被控对象为直线电机;检测单元为电流传感器、位置传感器及其信号调理电路等;控制器为位置、速度和电流三闭环控制器;执行单元为直线电机驱动器的功率驱动电路等。通过电流环、速度环、位置环共三层的闭环反馈控制,可以实现对直线电机推力、速度、位移的实时精确控制。

伺服控制系统的核心就是控制器的设计,而控制器中常用的控制算法是根据偏差进行控制的PID控制算法<sup>[4]</sup>。典型的数字PID算法可由式(2)表示:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p \{e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \\ &= K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)], \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $e(k)$ ——系统第 $k$ 次输入偏差; $e(k-1)$ ——系统第 $k-1$ 次输入偏差; $u(k)$ ——系统第 $k$ 次输出; $K_p, K_i, K_d$ ——比例系数、积分系数和微分系数。

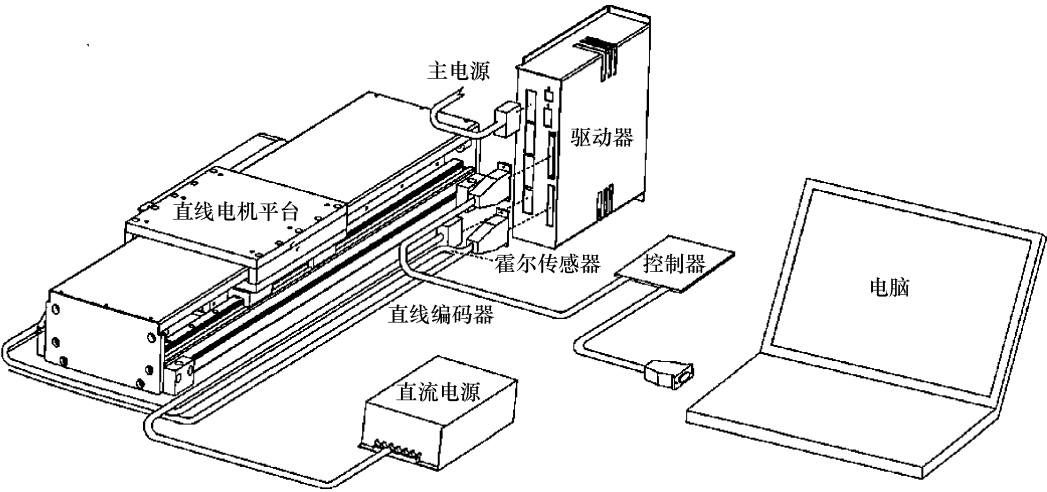


图6 电机型低频标准振动台设计方案

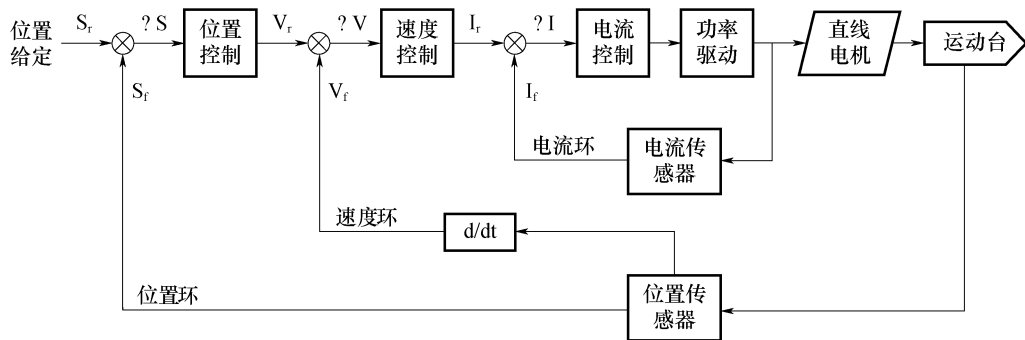


图7 直线电机伺服控制系统原理图

数字 PID 的参数设置对伺服控制系统的性能有很大影响,通常,伺服系统的控制器可以选择 P 控制器、PI 控制器、PD 控制器和 PID 控制器。根据被控对象的特点以及控制精度等要求确定采用何种控制器。在运动伺服控制系统中最常用的是 PI 控制器,PI 控制器具有较好的动态特性并且能够消除稳态误差,能够满足大部分运动控制系统性能要求。

在本文所提出的低频标准振动台方案中,其运动控制所输出的是正弦往复运动,位移、速度、加速度三者均为连续交变的正弦曲线,因而对伺服运动控制系统中的位置控制、速度控制、电流控制三个控制器均应设定合适的 PID 调节参数,以消除稳态误差并保持良好的动态特性。具体的 PID 参数需要在实际测试中反复调节选定。

### 3 实验验证

为了在实验上验证本文提出的低频振动校准系统的技术方案可行,我们对其中的低频标准振动台的部分技术性能进行了初步的验证。

我们以 Newport 公司的 IDL225 直线电机运动台测试样机作为研究样品,进行初步的正弦往复运动测试。如图 8 所示,给定直线电机的位移输入为频率 0.4Hz、振幅 100mm 的正弦运动曲线,对直线电机进行伺服运动控制,运动台实际位移如图 8(a),通过光栅尺进行测量,并通过两次求导得到加速度测量曲线如图 8(c)。

根据 JJG 298—2015《标准振动台检定规程》<sup>[5]</sup>,振动台的加速度谐波失真度  $\gamma$  定义为:

$$\gamma = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2}}{a_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $a_1$ ——基波的加速度幅值;  $a_i$ —— $i$  次谐波的

加速度幅值 ( $i = 2, 3, 4, 5$ )。

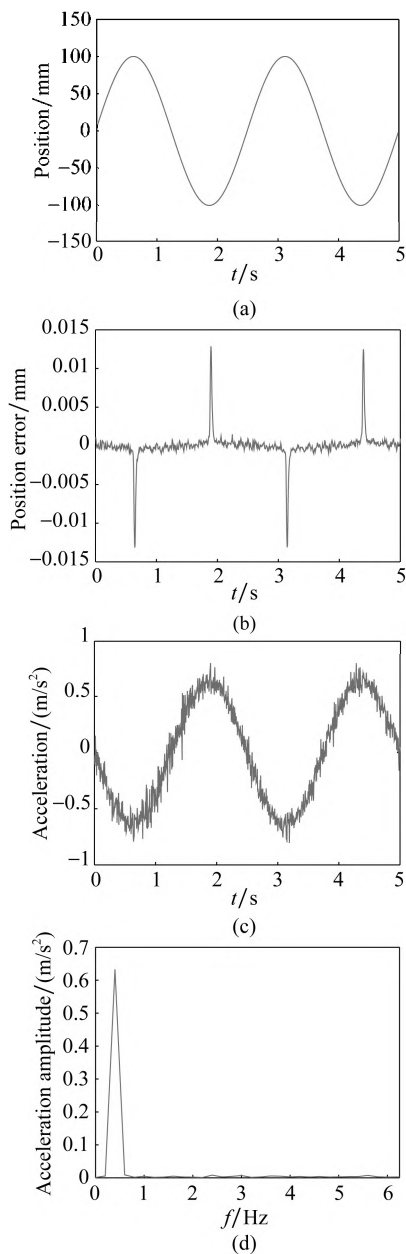


图8 频率为 0.4Hz、振幅为 100mm 的正弦运动测试数据



根据以上定义,加速度曲线的高频噪声(高于5次谐波)不会对振动台的加速度谐波失真度产生影响。据此,由图8(c)和图8(d)中的数据可以算得,振动台的加速度谐波失真度为0.96%,远小于JJG 298—2015规定的10%的技术指标。

除此之外,我们还对上述测试样机在2Hz和20Hz正弦往复运动下的数据进行了测试,其结果如图9和图10所示。

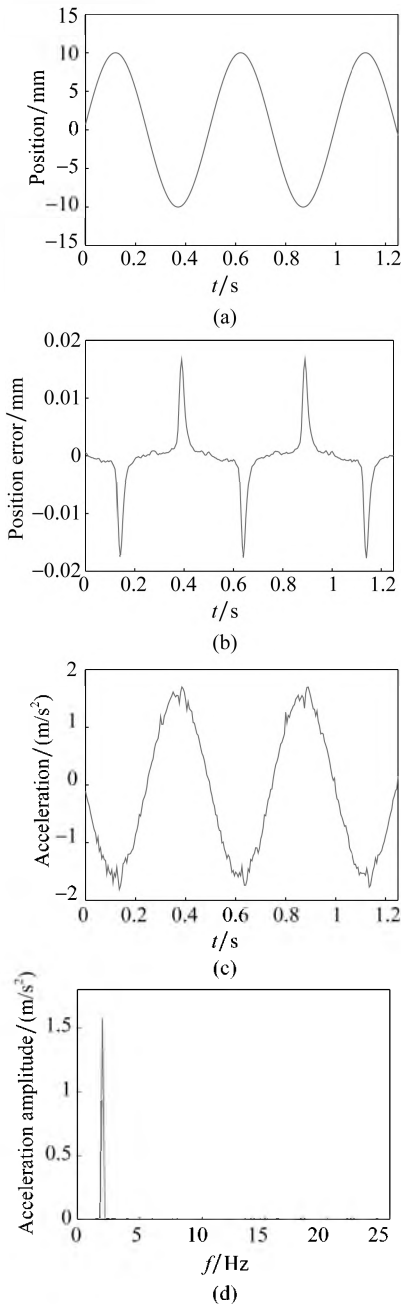


图9 频率为2Hz、振幅为10mm的正弦运动测试数据

根据式(3)的定义,我们可以计算得到2Hz(图9)和20Hz(图10)时正弦往复运动的加速度谐波失真度分别为0.86%和4.63%,同样小于JJG 298—2015规定的10%的技术指标。

由此可以说明,采用直线电机作为低频标准振动台的技术方案在实施上是可行的,本文提出的电机型低频标准振动台方案是可以满足表1所给出的低频标准振动台的指标要求的。

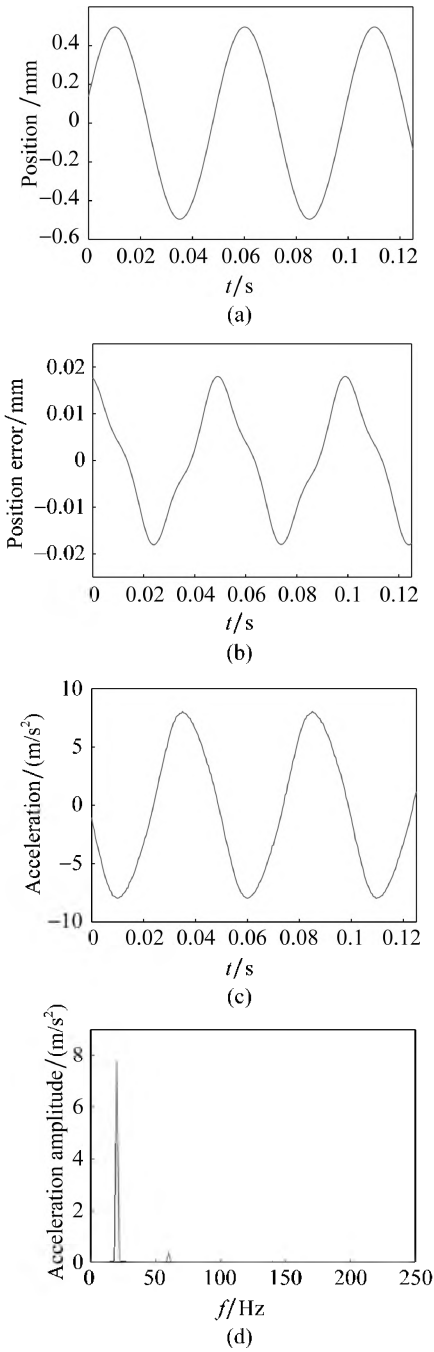


图10 频率为20Hz、振幅为0.5mm的正弦运动测试数据

## 4 校准不确定度评估

结合表 1 给出的系统各部分的选型方案,我们可以对校准系统的不确定度进行整体评估。根据 JJG 233—2008 和 JJG 298—2015 检定规程所列相关误差项,可以分析得出低频振动校准系统总体校准不确定度主要有如下分量:

### 1) 读数的重复性

该部分可由被测加速度计的 10 次独立重复测量结果求得。一般情况下,我们可以估计该部分的标准不确定度分量  $u_1$  不超过 0.1%。

### 2) 标准加速度计套组的灵敏度引入的不确定度

表 1 中选用的主标准器为定制的石英挠性加速度计,经校准后其精度指标可以达到:参考点扩展不确定度 ( $k=2$ ) 为 0.2%,通频带扩展不确定度 ( $k=2$ ) 为 0.4%。因此,我们可以估计该部分的标准不

$$u_4 \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \left[ 1 - \frac{S_2(3f_{ref})}{S_2(f_{ref})} \right] = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(10\%)^2}{1 + (10\%)^2} (1 - 0.99) = 0.005716\% \approx 0.006\%$$

### 5) 横向振动引入的不确定度

根据表 1 给出的标准振动台的技术指标,标准台的横向运动比不超过 10%,标准加速度计的最大横向灵敏度比不大于 2%,360°合成方差,按均匀分布,则可以估计该部分的标准不确定度分量  $u_5$  不超过:

$$u_5 \leq \frac{0.02 \times 0.1}{\sqrt{3} \times 3} = 0.067\% \approx 0.07\%$$

### 6) 温度、基座应变、磁场、安装扭矩和其他环境因素引入的不确定度

根据经验确定各项影响的极限为 0.2%,按均匀分布,则可以估计该部分的标准不确定度分量  $u_6$  不超过:

$$u_6 \leq \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.115\% \approx 0.12\%$$

### 7) 标准套组的年稳引入的不确定度

根据主标准器的定制指标,振动标准套组年稳小于 0.5%,假设正态分布,则该部分的标准不确定度分量  $u_7$  不超过:

$$u_7 \leq \frac{0.5\%}{2} = 0.25\%$$

以上各不确定度分量间相互独立,根据以上设定值,我们可以合成总的标准不确定度  $u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^7 u_i^2} = 0.40\%$ ,则相应的扩展不确定度 ( $k=2$ ) 为  $U = ku_c = 0.80\%$ ,在整个测量范围内不超过 1%。

确定度分量  $u_2$  不超过:

$$u_2 \leq \frac{1}{2} \max\{0.002, 0.004\} = 0.2\%$$

### 3) 数据采集精度引入的不确定度

根据 Brüel & Kjaer 公司的 PULSE 采集分析模块的出厂指标,其单通道的电压采集精度为 0.2%,则我们可以估计该部分的标准不确定度分量  $u_3$  不超过:

$$u_3 \leq \frac{\sqrt{0.002^2 + 0.002^2}}{\sqrt{3}} = 0.16\%$$

### 4) 标准台台面失真度引入的不确定度

根据表 1 给出的标准振动台的技术指标,整个频率范围内,其加速度谐波失真度  $\gamma$  不超过 10%。按照 GB/T 20485.21—2007 附录 D 给出的不确定度计算方法,我们可以估计该部分的标准不确定度分量  $u_4$  不超过:

## 5 结束语

本文结合直升机 HUMS 系统现场计量保障的需求,针对其中加速度传感器在低频段无法现场校准的现状,提出了基于直线电机的低频振动现场校准专用系统的研制技术方案。通过实验与不确定度评估初步验证,该方案能够实现 0.5Hz ~ 20Hz 频率范围,0.01m/s<sup>2</sup> ~ 20m/s<sup>2</sup> 加速度范围内不超过 1% 的校准扩展不确定度 ( $k=2$ )。

### 参考文献

- [1] 尹春望,童国荣. 直升机振动水平控制技术途径探讨[J]. 直升机技术,2009,4:26~30.
- [2] 曾烈田. 直升机振动监测分析[J]. 科技致富向导,2013,35:142.
- [3] 全国振动冲击转速计量技术委员会. JJG 233—2008, 压电加速度计[S]. 北京:中国计量出版社,2008.
- [4] Ang K H, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE T Contr Syst T, 2005, 13(4):559~576.
- [5] 全国振动冲击转速计量技术委员会. JJG 298—2015, 标准振动台[S]. 北京:中国质检出版社,2015.