

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.06.05

随机角振动控制系统研究

赵剑波, 彭军

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 通过对随机角振动控制系统的研究, 实现了随机控制技术在角振动上的广泛应用。利用设置的参考谱与反馈的响应信号功率谱来修正驱动谱, 根据驱动谱产生驱动信号, 利用驱动信号与反馈的响应信号实时精准地控制角振动台进行角振动, 最终实现响应谱稳定在参考谱容差带范围以内。通过构建出控制系统, 分析控制算法, 解决了角振动台实现随机角振动的问题。实验验证了控制算法的可行性和控制系统的可靠性, 完成了角振动台转动的角速度和角加速度的功率谱复现。

关键词: 功率谱; 随机角振动; 控制系统

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)06-0020-05

Research on the Random Angular Vibration Control System

ZHAO Jianbo, PENG Jun

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The random angular vibration control system is studied in order to realize the application of random control technology to angular vibration. By setting the reference spectrum and feedback response signal power spectrum to modify the driving spectrum, we can generate driving signals according to the driving spectrum, control the angular vibration table of angular vibration in real-time accurately by using the driving signals and response signal feedback, and finally realize the stable response spectrum in the reference spectrum with tolerance range. By constructing the control system and analyzing the control algorithm, we solve the problem of realizing the random angular vibration of the angular vibrator. The feasibility of the control algorithm and the reliability of the control system are verified by the experiment, and the power spectrum of angular and angular acceleration of the angular vibrator is completed.

Key words: power spectrum; random angular vibration; control system

0 引言

近年, 角运动传感器在国防和民用方面都得到广泛使用。实际应用中, 角运动传感器所处的环境具有一定的随机性。因此, 进行模拟实际环境的随机角振动试验是角运动传感器安全合理应用的保障。而研究随机角振动控制系统则是进行随机角振动环境试验的前提。目前, 国内外关于随机线振动的研究很多^[1], 对于随机角振动控制系统的研究甚少, 角振动控制系统主要针对正弦角振动激励和半正弦角冲击激励而设计。对于能够产生随机角振动激励的控制系统, 需要从角振动硬件系统和随机振动控制技术两方面综合研究设计。

随机角振动控制包括功率谱复现与时域波形复现。

功率谱复现注重幅频特性, 用于模拟平稳随机环境; 时域波形复现关注相位变化, 用于模拟非平稳随机环境。目前大部分随机环境试验都是指平稳随机环境, 因此, 本文对随机角振动控制的目的是为了实现功率谱复现。随机角振动的应用有很多, 对于角振动计量校准方面, 随机角振动校准相对目前采用正弦激励在不同频率点进行多次重复试验的校准方法, 不仅可以提高工作效率, 还能更贴近实际应用。

1 控制系统设计

随机角振动控制系统是由控制单元、测量单元及角振动台组成的闭环系统, 系统示意图如图 1 所示。

角振动台采用伺服电机作为激励装置, 利用控制伺服电机来控制角振动台的角运动。伺服控制是角振动台实现各种角振动的前提, 但是在控制角振动台响应功率谱方面, 伺服控制无法满足控制精度的要求。

收稿日期: 2017-11-25

作者简介: 赵剑波(1994-), 男, 硕士, 主要从事角振动控制技术研究。

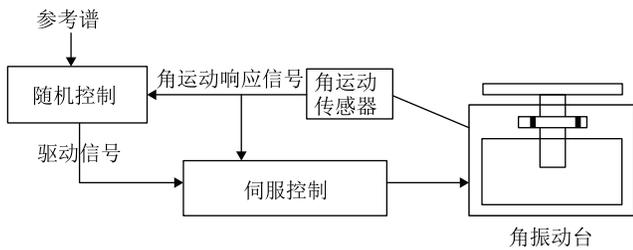


图1 随机角振动系统示意图

因此，增加外环的随机控制，来精确地使角振动台的响应信号功率谱复现出给定的参考谱。

角运动传感器包括角位移传感器、角速度陀螺及角加速度计。测量单元作为反馈环节，测出响应信号传递给控制器。伺服控制环节中，采用圆光栅角位移传感器作为测量单元。随机控制环节中，对于角速度功率谱复现时，采用光纤陀螺作为测量单元；对于角加速度功率谱复现时，采用液环式角加速度计作为测量单元。

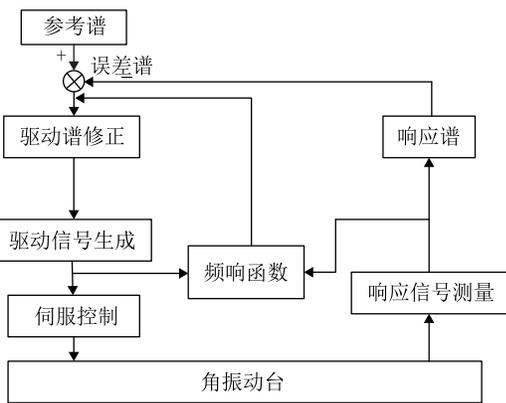


图2 随机角振动控制原理图

随机控制环节中，对角振动台响应信号进行谱估计得到响应谱，将响应谱和参考谱作差得到误差谱，并通过频响函数来对驱动谱进行不断闭环补偿，驱动谱的补偿最终会减小误差谱，从而达到对响应谱的精确控制。传递给伺服控制的驱动信号则是由驱动谱通过算法得出。由于此处设计的角振动台可以考虑为线性时不变系统，频响函数可以通过预实验进行测试得到。控制原理如图2所示。

伺服控制环节采用三闭环控制^[2]，分别是位置环、速度环及电流环，三闭环能够提高系统的抗干扰性能和动态跟踪性能。电流环证电机的相电流尽可能等于设定电流，控制电机转矩。速度环抑制速度波动，增强系统抗扰动能力。位置环保证系统静态精度和动态跟随能力，使整个系统能稳定且高性能的运

行，从而为随机控制提供控制的基础。各闭环采用PID算法，通过对参数的调节，使角振动台快速准确地响应出所给定的驱动信号，产生角振动。

随机角振动控制系统中，功率谱主要有角加速度功率谱 $G_a(f)$ 和角速度功率谱 $G_v(f)$ ，关系式为

$$G_a(f) = (2\pi f)^2 G_v(f) \quad (1)$$

设置伺服控制器只进行角速度控制，对于角速度功率谱控制，直接将角速度驱动谱生成的驱动信号传递给伺服控制器；对于角加速度功率谱控制，利用式(1)将角加速度驱动谱转化成角速度驱动谱，然后生成驱动信号传递给伺服控制器。伺服控制器根据角速度驱动信号控制电机进行角振动，将对应类型的传感器采集到的角振动信号反馈到随机控制中，随机控制算法即可完成对不同类型响应谱的控制。

2 随机控制技术的实现

随机控制系统中，随机控制部分的软件设计是实现响应功率谱复现的关键，以下是对涉及的控制技术的详细分析。

2.1 随机信号的产生

随机信号的产生指根据驱动谱产生驱动信号的过程。产生的方案如图3所示，以加窗重叠为重点，先频域随机化，后时域随机化^[3]。

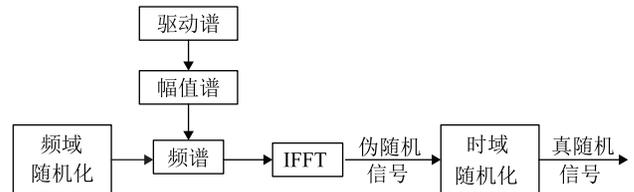


图3 随机信号产生方法示意图

为将频域谱转化成时域驱动信号，需得到具有幅值和相位的频谱。驱动谱没有相位信息，利用式(2)将离散驱动谱 $G_{xx}(k)$ 转化成离散幅值谱 $|X(k)|$ 。

$$|X(k)| = \left(\frac{G_{xx}(k) \cdot f_s}{2N} \right)^{\frac{1}{2}} \left(k=0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \right) \quad (2)$$

式中， f_s 为采样频率； N 为采样一帧信号点数。

幅值谱一致则代表信号在频域范围内等价，幅值谱加入均匀分布的随机相位 $[-\pi, \pi]$ 是为了满足信号具有随机性的要求。随机相位可以利用线性同余法产生。

令 $\theta(0) = \theta\left(\frac{N}{2}\right) = 0$ ，加入随机相位，频谱表示为

$$X(k) = |X(k)| e^{j\theta(k)} \left(k=0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \right) \quad (3)$$

为确保快速傅里叶逆变换 (IFFT) 后为实数序列, 令

$$X(N-k) = X^*(k) \quad \left(k=0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1 \right) \quad (4)$$

式中: $X^*(k)$ 为 $X(k)$ 的共轭复数, 令 $X(0) = 0$ 以保证时域信号均值为 0。对 $X(k)$ 进行 IFFT 变换即可得到时域随机信号 $x_0(n)$ 。

由于 $x_0(n)$ 是以 $\frac{N}{f_s}$ 为周期的伪随机信号, 不满足要求。因此需对其进行时域随机化来保证无周期性, 先对其随机移位后进行加窗叠加, 这种方法可以使信号不重复的延伸, 因而获得无周期的随机信号, 此时可认为是真随机信号。

2.2 功率谱估计

功率谱估计用于将响应信号转化成响应谱。通过对不同谱估计方法的分析, 由于实时性的要求, 采用 Welch 法进行谱估计^[4]。

假设采集到的信号帧数为 M , 每帧信号有 N 个采样点, 将每帧信号按时间顺序相连并分成 L 段, 每段信号长度也为 N , 并要求相邻段重叠 50%, 则

$$L = \frac{N \cdot M - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \quad (5)$$

对各段加 Hamming 窗 $\omega(n)$ 后求傅里叶变换为

$$X_i(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi fn} \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (6)$$

求各段功率谱的平均为

$$S_x(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{N f_s U} |X_i(f)|^2 \quad (7)$$

式中: U 为幅值修正系数, 保证功率谱估计的结果是无偏估计。

Welch 估计法采用加窗处理, 能够减少功率谱在估计时的泄露。对每个频率点进行平均处理, 可以提高功率谱估计的精度。

在实际工程中, 由于负频率没有意义, 因此常常只取正频率部分的功率谱, 即单边功率谱, 在随机角振动控制系统中就是采用单边自谱, 公式为

$$G_x(f) = \begin{cases} 2 S_x(f), & f \geq 0 \\ 0, & f = 0 \end{cases} \quad (8)$$

因此, Welch 法单边自功率谱估计结果为

$$G_x(f) = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{N f_s U} |X_i(f)|^2 \quad (9)$$

2.3 功率谱均衡算法

利用误差谱修正驱动谱是控制的核心技术, 修正的目的是减小误差谱。驱动谱 $G_{xx}(f)$ 与响应谱 $G_{yy}(f)$ 满足 $G_{xx}(f) \cdot |H(f)|^2 = G_{yy}(f)$ 。由于系统可以考虑为线性时不变系统, 因此可以通过一个预实验, 给一个低量级的参考驱动谱作为驱动信号, 利用 H_v 法求出系统的频响函数 $H(f)$ ^[5]。然后利用响应的参考谱 $G_{RR}(f)$ 与此频响函数得出初始给定的驱动谱。随后就可以进行迭代控制, 迭代控制采用线性域数字积分算法, 迭代公式为

$$G_{xx}(f)_{k+1} = G_{xx}(f)_k + \alpha \tilde{Z}(f) G_{ee}(f)_k \tilde{Z}(f)^* \quad (10)$$

式中: $G_{ee}(f)_k$ 为误差谱, $G_{ee}(f)_k = G_{RR}(f) - G_{yy}(f)_k$; α 为反馈增益; $\tilde{Z}(f)$ 为阻抗函数, 系统的阻抗即为系统频响函数的逆, 即 $\tilde{Z}(f) = \tilde{H}(f)^{-1}$; $\tilde{Z}(f)^*$ 为 $\tilde{Z}(f)$ 的转置。在此均衡算法中, 通过控制反馈增益来动态地调节误差谱对驱动谱的修正程度。

3 实验验证

3.1 随机信号的检验

随机角振动控制系统中, 随机信号是角振动台驱动信号和响应信号的时域表现形式。信号发生模块产生的随机驱动信号是否满足实验要求决定着控制是否具有意义。因此, 需要对随机驱动信号进行分析, 考核其平稳性、各态历经和高斯分布等指标^[6]。

3.1.1 平稳性检验

截取一段驱动信号样本数据, 应用轮次检验法检验其平稳性。将其分成等间距的 32 个字段, 每个字段的均方值分别为 1.04467, 1.03312, 0.790972, 1.02826, 0.802044, 0.908789, 0.930669, 1.20313, 0.917673, 0.991094, 1.28368, 0.900855, 1.06422, 1.19697, 0.960729, 0.9865, 0.857756, 1.09389, 0.939721, 0.922586, 0.77894, 1.27439, 0.984973, 1.11635, 1.05643, 0.75278, 1.20732, 0.768847, 0.995991, 0.90442, 1.10301, 1.1026。

对这些均方值求均值 0.99698, 采用大于均值和小余均值的方法对 32 个均方值进行标记, 可以得到大于和小于轮换的次数为 18, 查轮次分布表知在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下, 轮次数目应在 11~22 之间。现在轮次数目为 18, 落在 (11, 22) 区间内, 故接受此假设, 说明信号中没有明显的潜在趋势, 此随机信号是平稳的。

3.1.2 正态性检验

采集几帧随机驱动信号，绘制概率密度曲线，如图4所示，曲线呈对称钟形，且平滑没有尖锋，可认为被测信号的概率密度呈正态分布。计算出曲线的偏度为-0.0261(理论值为0)，峰度为3.0032(理论值为3)，说明随机信号的具有高斯性。另外，均值为-0.0122(理论值为0)，标准差为1.0051(理论值为1)，峰值为0.3969(理论值为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \approx 0.3989$)，此随机信号可认为满足标准正态分布。

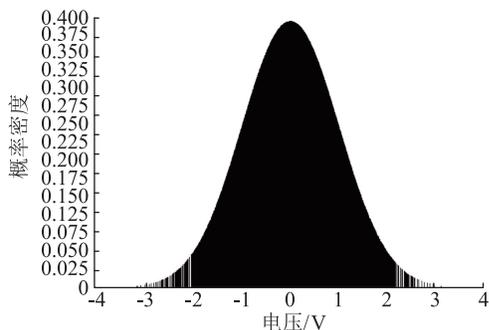


图4 概率密度分布

3.1.3 周期性检验

截取一段输出信号数据，计算所得的自相关函数曲线如图5所示。在延迟大时，自相关函数接近于0，可以认为输出信号为无周期信号，且自相关函数的衰减不含周期震荡，可以认为输出信号中不存在周期分量。

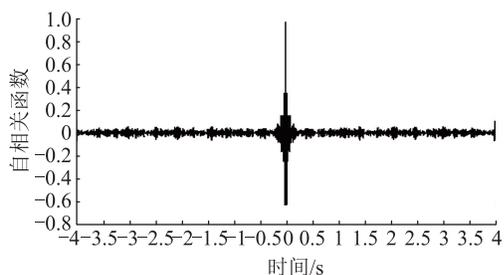


图5 自相关函数曲线

3.1.4 各态历经性检验

由随机过程理论可知，一个具有连续平稳和高斯分布的随机过程一定是各态历经的。

根据以上实验结果可知，利用文中方法产生的随机信号满足平稳和各态历经的高斯随机信号特性，因此生成的随机信号进行随机实验完全可行。利用虚拟示波器采集的信号，生成模块产生的随机驱动信号如图6所示。

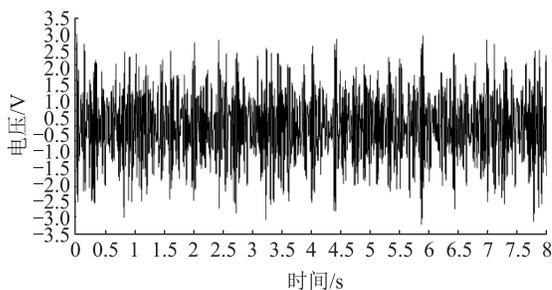


图6 某一帧随机信号

3.2 功率谱估计实验

设置一个参考驱动谱，通过随机信号产生方法生成随机信号，并只利用功率谱估计子程序，对生成的随机信号进行谱估计，直接验证谱估计的精确度，如图7所示。

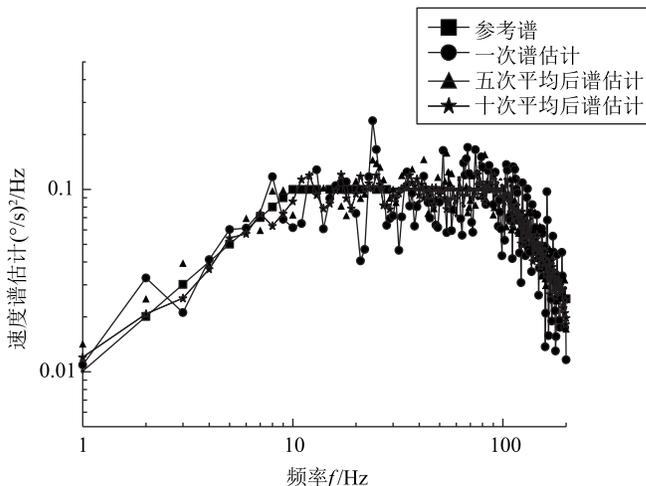


图7 不同平均次数的谱估计结果对比

由实验结果对比可以看出，谱估计平均的次数越多，即谱估计结果使用的实验数据量越大，谱估计的效果越好。但由于随机角振动控制对实时性有一定的要求，综合考虑谱估计的实时性以及谱估计结果的精确度，采用前十次的谱估计结果进行平均处理后作为谱估计的基础谱，之后的每次谱估计都是对基础谱一定程度的修改，既可以保证实时性的要求，也加强了谱估计的精确性。

3.3 功率谱复现算法的实验

使用Hv法进行频响函数估计，时域随机化方法进行随机信号生成和Welch法功率谱估计实时算法进行谱估计，来进行功率谱复现算法的实验。

3.3.1 驱动谱修正算法的效果验证

设置同一参考响应谱，分别在开环控制与闭环控制的情况下进行功率谱复现实验，如图8所示。

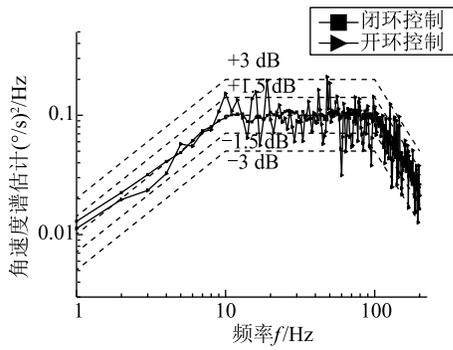


图8 同一参考谱的不同控制方法

由图8可知,使用驱动谱修正算法的闭环控制,响应谱基本稳定在±1.5 dB以内;驱动谱不变的开环控制,响应谱就只能勉强维持在±3 dB以内。

3.3.2 功率谱复现的重复性

各设置同一角速度参考响应谱和同一角加速度参考谱,均采用驱动谱修正算法的闭环控制,修正系数相同,进行四次角速度功率谱复现实验,如图9,图10所示。

由图可知,四次角速度功率谱复现实验和四次角加速度功率谱复现实验的结果都能稳定在±1.5 dB以内,因此,利用本课题的算法进行角速度和角加速度功率谱复现实验具有比较好的重复性。

3.3.3 不同角速度参考谱的复现效果

设置不同的参考响应谱,采用驱动谱修正算法的闭环控制。如图11和图12所示。由实验结果可知,本文所设计的控制系统可以满足随机角振动功率谱复现的要求。

4 结论

将随机控制与伺服控制结合,设计出随机角振动控制系统,实现了角振动台的响应功率谱复现。通过对

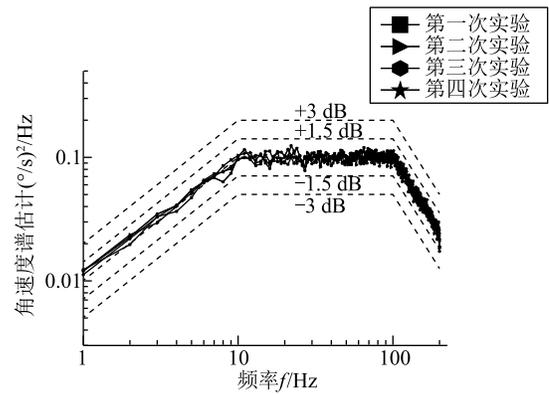


图9 角速度功率谱复现重复性实验

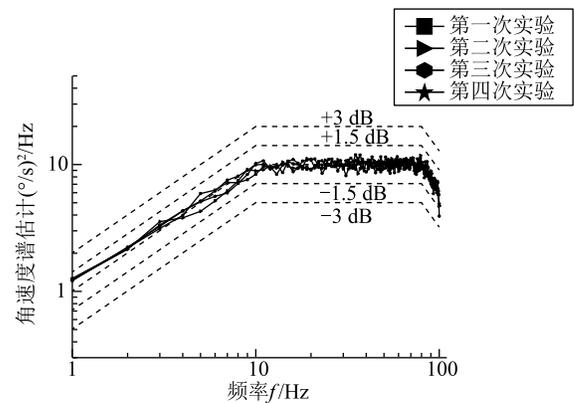


图10 角加速度功率谱复现重复性实验

随机信号进行检验,证明所采用的随机信号产生方法能够生成各态历经的高斯随机信号。对功率谱估计方法进行直接测试验证,总结出功率谱估计的实时算法。最后,对整个系统的功率谱复现能力进行测试,证明功率谱复现具有很好的重复性,并且能够高精度地复现不同的谱型,验证了设计出的随机角振动控制系统的可行性。本研究对角运动传感器动态性能的提高具有深远的意义。

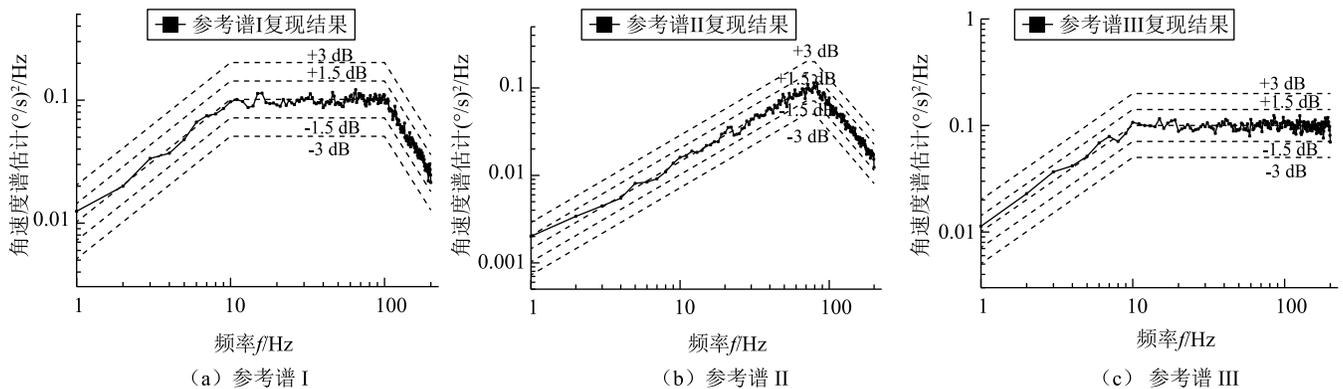


图11 不同角速度参考谱的控制结果

通过对测量的露点温度进行拉乌尔效应影响值补偿,提高了露点测量结果的准确性。经过拉乌尔效应补偿后的露点数据依然存在实验组 c 的准确性高于其他实验组。冷镜表面污染并不仅是拉乌尔效应造成露点测量误差,表面污染对于露点测量的影响较大,滴入一颗酒精,吹扫镜面后加热蒸发残留清洁可以减少较多由于污染引起的露点测量误差。

冷镜表面的污染大多是有有机物、油脂及灰尘组成的,灰尘采用吹扫镜面方式可以去除,油脂、有机物类的污染物更溶于酒精,而且酒精的沸点更低。所以相较于水,酒精的镜面清洁效果更好。

4 结论

通过实验分析,我们找到了利用溶液冰点变化值估算拉乌尔效应对露点影响值的方法,并对几种清洁

方式后的冷镜拉乌尔效应进行了估算,并利用所得拉乌尔效应进行露点温度的补偿,使所得露点温度更准确。在实验中我们发现对冷镜最好的清洁方法是滴入一滴酒精吹扫后加热蒸发残留,会大大减少拉乌尔效应对测量的影响。但是随着露点仪的使用会继续受污染影响,所以需要经常清洁冷镜表面,保持冷镜的清洁。

参考文献

- [1] Curtis B. Campbell. Dew Point Hygrometer With Constant Resistance Humidity Transduce[M]. Curtis B. Campbell.
- [2] 罗丽, 王晓蕾. 凯尔文效应影响露点仪测量准确度的分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2002(2): 14-19.
- [3] 易洪. 我国湿度测量仪器的现状与发展[J]. 中国仪器仪表, 2009(9): 25-28.
- [4] 张文学, 张奎山, 孙晔. 拉乌尔效应对露点的影响及其补偿方法研究[J]. 湿度·水分·气体, 1998(3): 55-59.

(上接第 24 页)

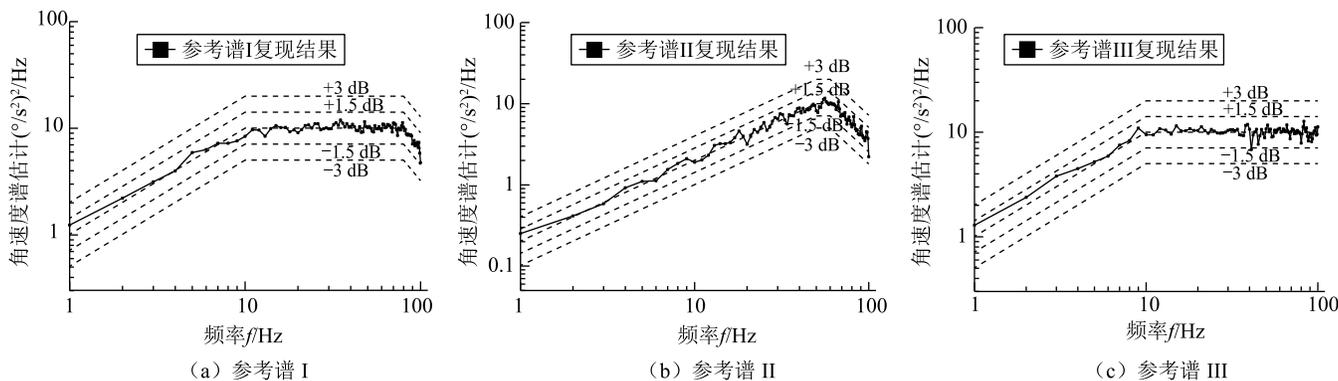


图 12 不同角加速度参考谱下的控制结果

参考文献

- [1] 刘宗华, 刘天同, 董达. 振动试验技术综述[J]. 科技创新导报, 2014(22): 42-43.
- [2] 王少洁, 杨立永, 陈为奇. 永磁同步电机三闭环系统仿真与实验研究[J]. 北华大学学报(自然), 2012, 13(3): 360-364.
- [3] Smallwood D O, Paez T L. A frequency domain method for the generation of partially coherent normal stationary time domain signals[J]. Shock & Vibration, 1991(1): 45-53.
- [4] 张峰, 石现峰, 张学智. Welch 功率谱估计算法仿真及分析[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(4): 353-356.
- [5] Mao Z, Told M. Statistical modeling of frequency response function estimation for uncertainty quantification [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 38(2): 333-345.
- [6] 杨志东. 液压振动台振动环境模拟的控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.



扫码

加微信号qctest,与朋友同事共分享!