

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.022

高通量筛选摇床在线自适应动平衡系统设计*

王海宽 尹志辉

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200072)

摘要:针对高通量筛选摇床的在线测量和负载不平衡量校正的需求,设计了在线自适应动平衡系统。首先针对菌种筛选摇床载荷实时动态变化的特性,提出了高效率的在线自适应动平衡方案;然后考虑系统组成和结构功能,提出了改进的窄带跟踪滤波和动平衡校正方法以及自适应控制策略;最后自主研发了实验装置,进行了系统调试,测试结果表明,系统实验装置可行且有效。

关键词:动平衡;窄带跟踪滤波;高通量筛选;自适应控制

中图分类号: TH877; TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of online adaptive dynamic balancing system for high throughput screening platform

Wang Haikuan Yin Zhihui

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An online adaptive balancing system is described in this paper. This system is mainly used for measuring and correcting imbalances of load adaptively in high throughput screening platform. Firstly, an online adaptive efficient balancing scheme for this system is proposed according to the characteristics of load of high throughput screening platform dynamic changes. Then, considering the system composition and structure, the method of the improved narrow band tracking filter and dynamic balance correction is proposed, meanwhile the adaptive control strategy is investigated. Finally, the experimental device is developed and the system is debugged to illustrate the effectiveness of the proposed method. The testing results show that the system of experimental device is feasible and valid.

Keywords: dynamic balancing; narrowband tracking filtering; high throughput screening; adaptive control

1 引言

近几年,随着电子、计算机和测试技术的发展,动平衡技术已经得到了很大的发展。人们越来越关注转子动平衡控制方法^[1]。转子动平衡技术的研究成果在促进旋转机械向高速、高效和高稳定性方向发展起到很重要的作用。由机械原理可知,在旋转部件中,具有固定的旋转轴线部分称为转子。转子的质量相对于旋转轴的分布决定转子是否平衡^[2]。

高通量筛选是针对庞大的样品库,利用高灵敏度的

检测系统和高效的数据处理系统以及自动化操作平台,实现数以万计样品的筛选。筛选结果将直接决定微生物菌种在工业生产上的应用效果。在菌种培养过程中,光通量(OD)对于菌种筛选具有十分重要价值,它提供了菌种的浓度值、增殖活性、增殖周期、生长速度等菌种筛选的关键信息。通常的OD检测采用的离线方式,只能获得菌种浓度值信息,为了获取更多的关键信息,实现OD在线检测意义重大。但由于高通量筛选摇床平台的质量分布的不均匀性,微孔板负载的不均匀性,以及在线OD检测机构的运动,转子就产生了质量不均匀。随着机械摇床旋转,不均匀的质量就产生了不平衡惯性力使机器

产生振动、噪声,而在大多数情况下,机械振动是有害的,进而降低机器性能、工作效率和使用寿命。因此,研究转子质量不平衡的校正问题在现代工业发展中极其重要。

关于转子不平衡问题,国内外已有大量研究。文献^[3]通过分别将谱分量法、传递矩阵法应用于转子动平衡中达到了减少校正质量、平衡周期和提高转子平衡精度的目的。文献^[4-6]提出了一种高速动平衡的数据采集与处理方法,解决了转速波动时振动幅值与相位的跳动问题。文献^[7]提出了一种基于最小均方算法的自适应 LMS 滤波器对 BIM 转子振动进行补偿控制,有效地抑制转子偏心振动,降低转子的振动幅值。以上方法大多涉及电机转子质心不平衡问题并没涉及窄带跟踪和负载与电机转子的不平衡问题。

本文针对高通量筛选摇床过程中转子质心偏移引起的振动问题,提出了一种窄带跟踪自适应控制方案,具体做法是根据不同的电机转速,窄带跟踪滤波模块自动调整滤波范围,信号进入主控器后通过 FFT 数字信号处理技术和自适应控制策略实现在线摇床过程中振动不平衡量的补偿技术。在不同转速条件下的实验结果表明,所提的控制策略能够有效地抑制转子的偏心振动,较少平台的振动幅值。

2 系统总体架构设计

由于机械摇床振动平台质量分布的不均匀,微孔板负载的不均匀性,随着工作转台旋转,不平衡质量就产生了不平衡惯性力,使机器产生振动、噪声,进而降低机器性能、工作效率和使用寿命^[8]。高通量菌种筛选摇床平台具有负载实时动态变化的特性,这就要求所设计的动平衡系统具备在线实时进行测量和校正的功能,保证减小摇床振动平台的有害振动,达到菌种筛选的要求,有利于保护机械摇床的寿命。

针对上述情况,创新设计了一个自适应动平衡模块,用来针对载荷动态变化情况下的高通量菌种筛选摇床平台,实现在线自适应动平衡。该系统总体框架如图 1 所示,它由动平衡机构、测量系统和控制系统组成。动平

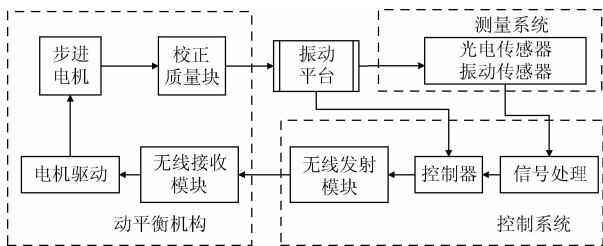


图 1 系统的总体架构

Fig. 1 Overall architecture of system

衡机构内的电源供电方式可选可充电电池、通过环环由外部供电以及感应变压器等。

测量系统工作原理如图 2 所示,通过 AD1000T 振动传感器测得工作转台振动信号,如果振动幅度超标,则控制系统通过无线方式发射移动控制指令;通过 BF5RD1-N 光电传感器测量转台振动相位信号,控制移动方向,以实现动平衡机构内的电机通过丝杠带动 3 个校正质量块(由螺母和配重块构成)沿丝杠轴向移动,其惯性力合成大小和方向可变的校正力矢,以抵消不平衡。

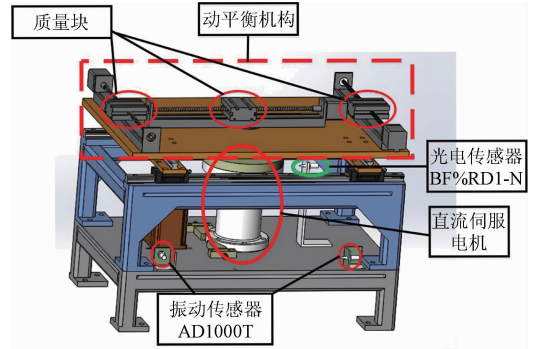


图 2 动平衡机构

Fig. 2 Dynamic balancing mechanism

动平衡机构就是实现校正质量位置控制的装置。如图 2 所示,其控制策略:1)控制 3 个校正质量块的惯性力合成方向与不平衡质量的半径呈 180°,实现相位平衡控制;2)通过电机传动丝杠控制 3 个校正质量块同时接近或远离工作转台中心点,在保持合力方向不变的情况下,调整 3 个校正质量块惯性力合成的大小与不平衡质量的大小,由此实现质量平衡控制。

3 控制系统实现方案

在线自适应动平衡系统的具体实现过程,就是借助于自动平衡装置使转子的惯性主轴与旋转轴相重合的自动调整过程。重点在于从振动信号中提取与转速同频的振动分量(幅值和相位),达到快速、高精度平衡的控制目的。在机械摇床的旋转机构动平衡检测中,通过旋转周期对应的脉冲信号触发进行整周期 A/D 采样,然后进行离散傅里叶变换,从而得到不平衡信号的幅值和相位。

机械摇床振动系统可以简化为线性二阶系统,其激励与振动响应间的相位有关,对于线性转子振动系统,激励间的相位差与相应振动响应的相位差相等^[9]。在研究动平衡系统实现方案时,可以利用以上研究成果推算出振动所需校正质量块的相对位置。

3.1 自适应动平衡控制方案设计

如图 3 所示,振动传感器测得振动信号经过前置放

大器、变增益放大器、窄带跟踪滤波、增益放大和高速 A/D 转换传递给微处理器 DSP^[10], 其中窄带跟踪滤波器根据转子的转速调整窄带频率范围实现同频信号的获取; 光电传感器检测驱动轴转速和相位传递给微处理器 DSP; 然后微处理器 DSP 根据光电传感器传来的转速脉冲信号启动 A/D 转换进行不平衡相位的采集, 保证每组采样数据是从转轴的同一角度位置开始; 微处理器 DSP 利用 DFT、CZT 等频域数字信号处理技术精确提取同频信号幅值和相位, 快速单面坐标轮换寻优策略, 运用自适应控制, 将平衡相位和平衡幅值轮换多次迭代寻优, 微处理器 DSP 驱动平衡头上的步进电机, 使步进电机带动平衡质量块移动到可以使系统到达平衡的位置。

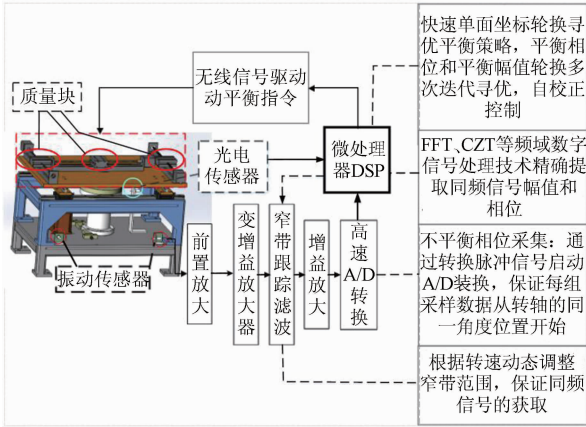


图3 自适应平衡控制方案

Fig. 3 Adaptive balancing control scheme

3.2 自适应平衡系统的自校正控制策略.

作为自适应控制的一种形式, 随着执行工业控制器总数的持续增长, 自校正控制在近些年里一直受到很高的关注。自适应控制系统由常规控制系统和自适应机构组成^[11]。本文中所讲的高通量筛选摇床平台的自适应平衡系统可以看作是以下动态控制过程, 如图4所示。

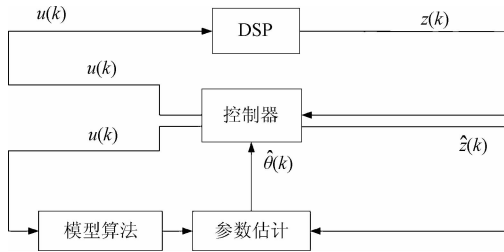


图4 自校正控制系统结构

Fig. 4 Block diagram of self-correction control system

用最小二乘法来估计动态过程参数, 把被控系统模型看作离散线性差分方程:

$$A(Z)z(k) = B(Z)u(k) + v(k) \quad (1)$$

$$A(Z) = 1 + a_1 z^{-1} + \Lambda a_n z^{-n} \quad (2)$$

$$B(Z) = b_1 z^{-1} + \Lambda b_m z^{-m} \quad (3)$$

式中独立的随着噪声 $v(k)$ 满足以下要求:

$$E(v(k)) = 0 \quad (4)$$

$$E\{v(i)v(j)\} = \begin{cases} \sigma^2, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v(k)^2 < \infty \quad (6)$$

将式(1)化成矩阵向量形式, 如下:

$$z(k) = \varphi^T(k)\theta + v(k) \quad (7)$$

$$\theta = [a_1, a_2, \Lambda, a_n, b_1, b_2, \Lambda, b_m]^T$$

$$\varphi(k) = [-z(k-1), \Lambda, -z(k-n), u(k-1), \Lambda,$$

$$u(k-n)]^T \quad (9)$$

式中: $z(k)$ 表示系统期望的输出, $u(k)$ 表示系统的输入, $\varphi(k)$ 表示系统的信息向量, θ 表示系统的参数向量。

最小二乘法准则函数如下:

$$J = \sum_{k=1}^N [z(k) - \varphi(k)^T \hat{\theta}]^2 \quad (10)$$

模型参数 θ 最可能的值是在实际观测值和计算值之累次误差的平方和达到最小值处, 所得到的这种模型输出最好的接近实际过程的输出。定义信息矩阵:

$$\Phi_N = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \vdots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z(0) & \cdots & -z(1-m) & u(0) & \cdots & u(1-n) \\ -z(1) & \cdots & -z(2-m) & u(1) & \cdots & u(2-n) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -z(N-1) & \cdots & -z(N-m) & u(N-1) & \cdots & u(N-n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

输出矩阵:

$$Z_N = [z(1) \times z(2) \times \cdots \times z(N)] \quad (12)$$

误差向量:

$$V_N = [v(1) \times v(2) \times \cdots \times v(N)] \quad (13)$$

定义遗忘因子因子为 $\Lambda(k)$, 则遗忘因子矩阵为:

$$\Lambda_N = \begin{bmatrix} \Lambda(1) & & & \\ & \Lambda(2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Lambda(N) \end{bmatrix} \quad (14)$$

遗忘因子取值 $0 < \Lambda(k) < 1$, 可削弱历史数据对参数拟合的影响, 加快拟合速度。准则函数最小时, θ 的最优值为:

$$\theta_{WLS} = (H_N^T \Lambda_N H_N)^{-1} H_N^T \Lambda_N Z_N \quad (15)$$

由于此方法使用时, 占内存大, 且不能用于在线辨识, 故可以将此一次完成算法转化为递推最小二乘算法,

具体过程如下:

定义矩阵 \mathbf{P} 如下:

$$\mathbf{P}^{-1}(k) = \sum_{i=1}^k \mathbf{A}(i)\boldsymbol{\varphi}(i)\boldsymbol{\varphi}^T(i) \triangleq \mathbf{H}_k^T \mathbf{A}_k \mathbf{H}_k \quad (16)$$

定义增益矩阵 \mathbf{K} 如下:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k)\boldsymbol{\varphi}(k)\mathbf{A}(k) \quad (17)$$

递推最小二乘算法如下:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{z}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \quad (18)$$

$\mathbf{K}(k) =$

$$\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k) \left[\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k) + \frac{1}{\mathbf{A}(k)} \right]^{-1} \quad (19)$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)]\mathbf{A}(k) \quad (20)$$

最小二乘迭代方法每次迭代过程中根据最新数据的值对估计参数进行校正,当迭代次数足够大时,估计模型逐渐接近真实系统。

对于系统 $\mathbf{z}(k) = \frac{\mathbf{B}(Z)}{\mathbf{A}(Z)}\mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k)$, 其中, $\mathbf{A}(Z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} = 1 + 0.35z^{-1} - 0.75z^{-2}$, $\mathbf{B}(Z) = b_1z^{-1} + b_2z^{-2} = 0.214z^{-1} + 0.428z^{-2}$, $\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, b_1, b_2]^T = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T = [0.35, -0.75, 0.214, 0.428]^T$, $\{\mathbf{v}_k\}$ 为均值为 0, 方差为 $\sigma^2 = 0.16$ 的噪声。假设参数估计初值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = [0, 0, 0, 0]^T$, 遗忘因子为 0.998, 输入 $\mathbf{u}(1) = 10 \times \mathbf{u}(2) = 10$, 当迭代次数 $k \geq 3$ 时, $\mathbf{u}(k) = (\mathbf{z}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1))^2$, 即输入 \mathbf{u} 选取为输出误差的平方, 由最小二乘方法输出误差最小原则, 每次迭代输入 \mathbf{u} 的值变小, 如图 5 所示。

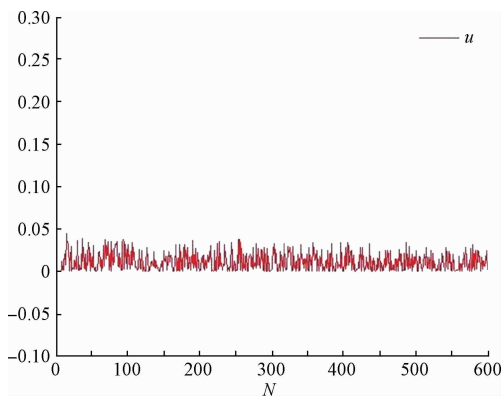


图 5 系统输入参数
Fig. 5 System input parameters

自校正控制将在线参数估计和调节器的设计结合在一起, 有效地消除了被控系统的参数扰动所造成的影响^[12]。将自校正控制应用在高通量筛选摇床平台在线自适应动平衡系统中, 即校正由高通量筛选摇床平台的一些可变因素所引起的不平衡量。其应用到动态变载荷

在线自适应动平衡系统中, 可以有达到高速、高效和高稳定性的动平衡效果。

3.3 信号预处理电路设计与实现

不平衡量和转子同频的振动分量是线性关系。然而, 由于转子轴承、结构和环境的影响, 不平衡的转子旋转产生的振动信号中, 除包含同频振动分量外, 还包括很多噪声信号, 当高通量筛选摇床平台的不平衡很小的情况时, 信噪比很低^[13]。高通量筛选摇床平台的转速是不恒定的, 由不平衡离心力引起的振动信号频率随着转速的改变而改变。一般情况下, 转速不恒定以及振动信号中存在的干扰噪声对动平衡测试的精度影响很大^[14]。因此, 在动平衡系统中, 采用窄带跟踪滤波技术从振动信号中提取与转速同频的振动分量^[15]。

由于高通量筛选摇床平台的转速可能会发生变化, 这就要求动平衡测试系统中的滤波器能够跟踪转速的变化。模拟带通滤波器主要由电阻、电容、电感、运放等器件搭建而成。它可以实现高品质的滤波效果, 但参数调节比较难实现, 所以也比较难实现跟踪滤波。开关电容滤波器可以很好的解决这个问题。据此, 在开发高通量筛选摇床平台在线自适应动平衡系统的滤波方面, 选用 MAXIM 公司的 MAX267 可编程开关电容带通滤波器芯片。MAX267 是二阶开关电容带通有源滤波器, 能达到精确的滤波效果。MAX267 芯片通过对引脚编程来确定中心频率 f_c , 品质因素 Q 和工作模式。然而由于泄漏、混迭等因素, 仅仅依靠数字滤波技术不能达到高速和高精度滤波。因此, 如图 6 所示的窄带跟踪滤波由模拟低通滤波器和开关电容带通滤波组成来抑制振动噪声和速度波动对测试精度的影响。窄带跟踪滤波器主要包括锁相倍频电路、低通滤波器、基准电压源和开关电容滤波器等。

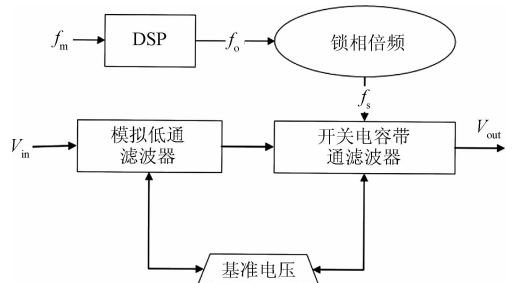


图 6 窄带跟踪滤波器结构
Fig. 6 Narrowband tracking filter structure

为使窄带跟踪滤波器工作频率的精确跟踪, f_0 是由 DSP 控制器模块根据光电传感器测得的转速脉冲信号 f_m 输出相等频率且占空比为 0.5 的脉冲信号。锁相倍频电路对 f_0 进行 n 倍频, 得到控制开关电容滤波芯片的脉冲信号 f_s , 脉冲信号 f_s 和转速脉冲信号 f_0 即:

$$\frac{f_s}{f_0} = n \tag{21}$$

窄带跟踪滤波器中的低通滤波部分的作用是滤除输入信号 V_{in} 中的高频干扰噪声,从而可以避免开关电容滤波芯片采样过程中造成的频谱混迭。为了避免输入信号 V_{in} 发生畸变,模拟低通滤波器和开关电容滤波器采用同一个基准电压。

模拟低通滤波器是一个二阶压控型有源低通滤波器。该滤波器的传递函数如下式:

$$A_v(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sCR + (sCR)^2} \tag{22}$$

由式(22)可知,为保证滤波电路稳定性,滤波器通带增益 A_{vp} 应小于 3 dB,则可有效滤除高频。

通过比较图7和8中的波形图,可以看出原始输入波形(图7)有很多干扰噪声,而经过窄带跟踪滤波之后的波形(图8)效果更好。

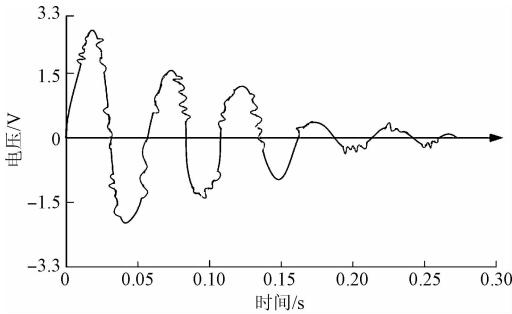


图7 原始输入波形 (V_{in})

Fig.7 The original input waveform

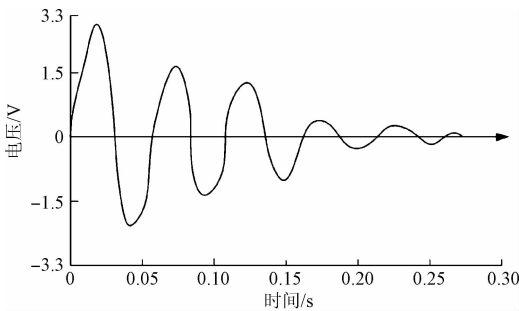


图8 滤波后的波形 (V_{out})

Fig.8 Filtered waveform (V_{out})

4 实验结果分析

为了验证提出的自适应跟踪滤波方法的有效性,在实验室样机平台上进行了试验验证。实验硬件结构如图9所示。实验中采用 SEED-DEC138 控制器来实现自适

应跟踪滤波算法。为了安全考虑,在试验中,摇床实验平台的转子轴承转速被设定在 0 ~ 800 r/min,在没有采用在线自适应动平衡控制之前,由转子不平衡所引起的最大加速度达到 0.025g。采用在线自适应动平衡控制之后,由转子不平衡所引起的加速度减小到 0.011g。

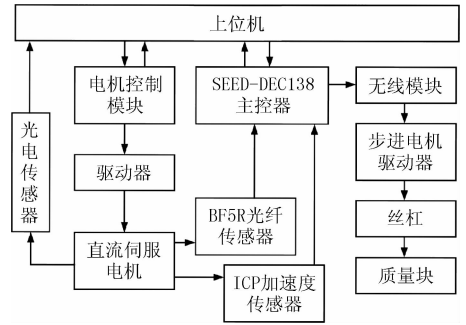


图9 实验硬件结构

Fig.9 The experiment hardware structure

表1是该摇床平台不同转速下动平衡测试和校正的部分结果,从中可以看出,质量块第二次移动后的震动加速度比质量块第一次移动后的震动加速度明显减小,校正后的震动加速度数据最小,说明质量块第二次校正后动平衡效果比第一次明显改善,校正后的实验效果最好。

表1 动平衡部分测量结果

Table 1 The part of balancing measurement results

质量块移动 后测试	转子转速/($r \cdot \min^{-1}$)			
	50	100	150	200
第1次移动 位置后测试	0.011 581g	0.023 583g	0.025 123g	0.028 637g
第2次移动 位置后测试	0.008 214g	0.015 762g	0.023 898g	0.017 443g
校正后测试	0.003 217g	0.006 292g	0.011 323g	0.013 758g

摇床装置在线动态变化时,运用本文所设计的动平衡测控系统得出的不平衡量的变化波形如图10所示,x轴表示时间,y轴表示不平衡幅值,时间越小的数据越新。可以看出当载荷实时动态发生变化时,改动平衡校正系统可以有效、快速的进行在线动态校正,使摇床始终工作在有害振动较小的状态之下,提高了菌种筛选工作状态的可靠和稳定。

5 结论

高通量筛选摇床平台在线自适应动平衡系统的实验所得到的结果表明,当转速在 0 ~ 800 r/min 时能实现对高通量筛选摇床平台的不平衡量的进行有效地校正,并

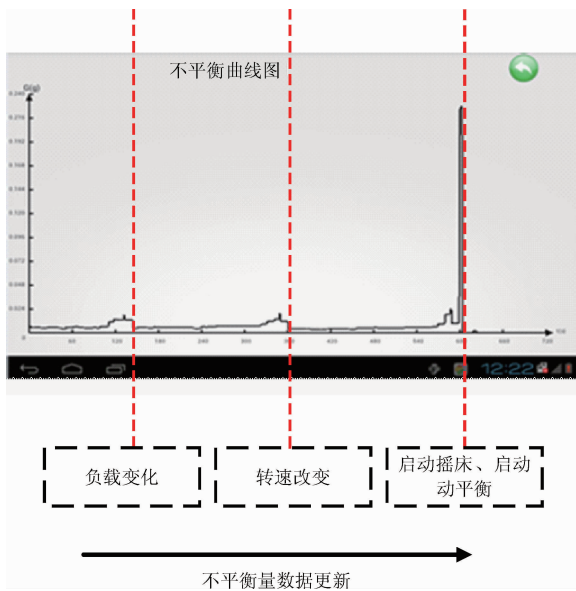


图10 动平衡校正效果

Fig.10 Balancing correction effect

且通过自适应控制系统对摇床实验平台可以实现高速度,高效率的在线动平衡。在以后的测试和研发过程中,将会继续验证该高通量筛选摇床平台在线自适应动平衡系统进行实时变载荷情况下动态平衡的高效性。

参考文献

- [1] LIU S. A modified low-speed balancing method for flexible rotors based on holospectrum [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1): 348-364.
- [2] GAO F, WANG H, WANG Q, et al. Mass imbalance measurement of incomplete spherical superconducting rotor with air suspension [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61 (12): 3318-3323.
- [3] 陈绪龙. 高速转子动平衡技术研究及系统开发 [D]. 绵阳:西南科技大学, 2015.
CHEN X L. Research and development of high speed rotor dynamic balancing technology [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.
- [4] 张珂,李桐,邓华波,等. 一种电主轴在线动平衡测试算法[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2016, 01: 148-155.
ZHANG K, LI T, DENG H B, et al. An electrical spindle dynamic balancing test algorithm [J]. *Shenyang Architecture University*, 2016(1): 148-155.
- [5] LI W Q. Development and research on DSP-based portable field dynamic balance test instrument [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [6] 陈曦,廖明夫,王四季,等. 转子高速动平衡数据采集与处理方法研究 [J]. *推进技术*, 2016, 37(3): 554-562.
- [7] 杨泽斌,董大伟,孙晓东,等. 无轴承异步电机转子质量偏心振动补偿控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(4): 871-878.
YANG Z B, DONG D W, SUN X D, et al. Bearingless induction motor rotor eccentric mass vibration compensation control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(4): 871-878.
- [8] KRAL C, PIRKER F, PASCOLI G. The impact of inertia on rotor fault effects theoretical aspects of the vienna monitoring method [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008, 23(4): 2136-2142.
- [9] HONG W F, MIN Q J, HENG L. Program design of an online dynamic balancing system for grinding-wheel and spindle [C]. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 2011: 173-177.
- [10] ZHI J J, JING M Q, FAN H W, et al. Study on monitoring and control system for rotor online dynamic balancing based on DSP & FPGA [C]. *5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, 2013: 1072-1075.
- [11] 张利,陈时楨,徐娟,等. 基于模糊控制的转子动平衡变步长寻优方法 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(23): 3167-3171.
ZHANG L, CHEN SH ZH, XU J, et al. Based on fuzzy control rotor balancing variable step optimization method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(23): 3167-3171.
- [12] CAO X, YUAN H F, GAO J J. A study on PC/104 embedded automatic balancing control system [J]. *Journal of Donghua University*, 2010, 27(5): 665-668.
- [13] 晁慧泉. 高速主轴在线动平衡系统的研究应用 [D]. 北京:北京工业大学, 2011.
ZHAO H Q. High-speed spindle dynamic balancing system application [D]. Beijing: Beijing University, 2011.
- [14] 樊红卫,景敏卿,智静娟,等. 转子在线动平衡嵌入式控制系统开发与验证 [J]. *振动测试与诊断*, 2015, 35(4): 746-751.
- [15] 徐娟,罗轶超,张利,等. 在线动平衡中振动信号提取

方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 972-976.

XU J, LUO Y CH, ZHANG L, et al. Vibration extraction method research for on-line dynamic mass balance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(11): 972-976.

作者简介



王海宽(通讯作者), 1999年于武汉大学获得学士学位, 分别于2005年和2010年获得上海大学硕士和博士学位, 现为上海大学讲师, 主要研究方向为嵌入式仪器仪表及系统、工业网络通信。

E-mail: hkwang@shu.edu.cn

Wang Haikuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University in 1999, obtained M. Sc degree and Ph. D degree both from Shanghai University in 2005 and 2010, respectively. He is now a Lecturer in Shanghai University. His research interests include embedded instrumentation and systems, industrial network communication.



尹志辉, 上海大学硕士研究生, 主要研究方向为动平衡测控系统、信号完整性。

E-mail: yinzhihui55@163.com

Yin Zhi-Hui is a master student in Shanghai University. His research interests cover dynamic balance measurement and control system, and signal integrity.

罗德与施瓦茨引领 28 GHz 的 5G 外场测试

通过提供世界第一个 28 GHz 的外场覆盖测量方案, 罗德与施瓦茨为 5G 铺平了道路。最近罗德与施瓦茨为关键客户展示了最新的 5G 网络空口的覆盖测试演示方案。

世界上第一个 5G 网络将会在 28 GHz 频段部署, 美国和韩国的运营商主导了进度。鉴于 5G 在频率, 带宽和复杂性方面有跳跃性的增长, 例如下一代网络使用的波束赋形, 在外场测试网络性能对该技术的进步是至关重要的。目前罗德与施瓦茨移动网络测试部门提供的演示方案使得测试全新的 5G 覆盖成为了可能。

基于 5G 行业领导者发布的技术规范和 Verizon 5G 论坛的出版, 新的演示方案基于 R&S 的轻便型扫频仪 TSME 和路测软件 ROMES 来完成 5G 网络空口覆盖测试方案。除此之外, 本次测试采集的在 28 GHz 上的传播信号的数据可以用来帮助优化接收 CPE 的天线位置, 并且

可以用来验证和改进网络规划工具。

罗德与施瓦茨移动网络测试部门的总裁兼 SwissQual 的首席执行官, Hanspeter Bobst 评论说: “随着运营商开始确定他们的应用, 时间点以及 5G 的部署, 我们看到了客户验证早期 5G 网络性能的需求。通过使用外场路测扫频仪和目前用于优化和定位 LTE-advanced 网络问题的软件方案, 罗德与施瓦茨又一次演示了技术上领先的移动网络测试方案。我们很高兴的在早期能为行业提供 5G 覆盖测试演示方案。在早期 5G 生态系统中, 合作伙伴的反馈是非常正面的。”

5G 外场测试演示方案将在 2017 年全球移动大会上展出, 展位为罗德与施瓦茨网络测试展位 (6B50), 关于罗德与施瓦茨参展 2017 年全球移动大会的信息可以在 www.rohde-schwarz.com/mwc 上得到。