

动不平衡测量电路频率特性原位补偿技术研究

宋菊平, 秦如, 蔡萍, 赵鼎鼎

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要:通用硬支承动平衡机测量电路中低通滤波器的带宽小于信号带宽,故要求对频率特性进行补偿。对动不平衡测量电路进行频率特性补偿时,通常以按电路元件标称值求取的频率特性为补偿对象,为保证补偿效果,需要对电路中的电阻电容进行严格筛选和配对,费工费时,而且无法应对因环境温度等因素引起的参数漂移问题。为此,探索了一种原位频率特性补偿方法,基于动不平衡测量系统自身的软硬件资源即可进行参数辨识,使得频率补偿可以方便地按需进行。介绍了原位频率补偿的实现方法,对激励信号频率的合理选择进行了讨论分析,分析了用方波和三角波替代正弦波激励对参数估计误差的影响,进行了全转速范围的频率特性补偿实验。在通用硬支承动平衡机上进行性能指标校验,比较原位频率补偿前后的精度指标,实验结果验证了原位频率补偿方法的有效性。

关键词:动不平衡测量;频率响应特性辨识;原位频率补偿

中图分类号: TH877 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Study on in-situ frequency compensation of dynamic unbalance measurement system

Song Juping, Qin Ru, Cai Ping, Zhao Dingding

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The bandwidth of the low pass filter in its signal conditioning circuits of the hard bearing dynamic balancing machine is less than that of the signal, so frequency characteristics of the circuits should be compensated. Generally, the compensated frequency characteristics are calculated with nominal values of the electronic components. To ensure the effect of compensation, dozens of filtering resistances and capacitors should be screened or matched strictly, which is of time consuming and cost ineffective. And the compensation effect will be degraded when temperature drift and time drift of element parameter occurs. This paper investigates an in-situ and self-contained frequency compensation method, to identify the frequency response characteristics of the third order low-pass filter circuit with the system's original hardware and software resources. The selection of the exciting frequencies is investigated. The parameter estimation error caused by replacing the sine wave excitation with the square wave and triangular wave is analyzed. The frequency compensation experiments and performance verification of the hard bearing dynamic balancing machine are conducted. Experimental results prove the effectiveness of the proposed in-situ frequency compensation method.

Keywords: dynamic unbalanced measurement; frequency response characteristic identification; in-situ frequency compensation

1 引言

不平衡振动是旋转机械失效的主要原因之一,大多数旋转机械在生产和使用过程中需进行动不平衡检测与校正。动不平衡测量和平衡校正是旋转机械制造中的一

道重要工序,机床主轴、发电机转子、电机转子和风机等在加工和安装过程中都需要通过动平衡试验进行平衡校正^[1]。随着工业制造对机械设备性能要求的不断提高,对动平衡机测量系统的性能也提出了更高的要求。测量系统性能的长期稳定一直是相关领域科技人员追求的目标^[2-3]。

动平衡测试系统中摆架的受迫振动 v 不仅与转子不平衡量 U 有关,还与旋转频率有关。为得到不平衡量 U ,需要将拾振传感器输出信号中的转速因子 ω^n 消去,转速因子 ω^n 中的幂次 n 与所采用的拾振传感器类型有关。不失一般性,本文讨论采用振动速度传感器的情况,这时 $n=3$,即传感器输出与转速的3次方成正比。理论上,用3次积分电路可以完全消除转速因子的影响,但这会产生严重的直流漂移,因此,通常用三阶低通滤波电路来衰减转速因子 ω^3 的影响同时抑制转子驱动与支承部件产生的高频干扰振动的影响。该低通滤波器的截止频率通常远小于其信号带宽 100 Hz(本研究中的低通滤波器截止频率为 9 Hz)。显然,三阶低通滤波器的频率特性与振动速度信号的频域特性不能完全抵消,由此引起频率误差。常用的解决办法是通过软件模块实现对三阶低通滤波器的频率特性进行补偿或者说求逆^[4]。

通过软件模块进行频率特性补偿,一种做法是以按电路元件标称值求取的频率特性为补偿对象。为保证补偿效果,需要对电路中的电阻电容进行严格筛选和配对,不仅费工费时,而且无法应对因环境温度等因素引起的参数漂移问题。另一种做法是跟踪辨识补偿,国防科技大学的张玉光^[5]采用查表法来进行通道补偿;上海师范大学的李传江^[6]采用向后传播算法(back-propagation, BP)神经网络的方法对测量通道进行辨识、补偿。但他们都是采用离线的方案,需要借助外部仪器设备,需要专业人员干预。此外,使用过程中环境温度等的变化引起的电阻值和电容值的变化会削弱补偿效果甚至使补偿无效。为获得更好的补偿效果,本文提出原位频率特性补偿方法,利用测量电路自身的硬件资源对滤波电路频率特性进行辨识,不需要另外的仪器辅助,可以随时跟踪元件参数的变化,保证测量系统在长期使用中的性能。

对频率特性进行补偿或修正的方法有频域修正法、数值微分法和反滤波法等^[7-9]。频域修正法是由测试系统的频率特性和输出信号的频谱求出输入信号频谱,再通过傅里叶反变换得到输入信号估计值的方法。该方法在求系统函数时会带进混迭误差、泄漏误差和栅栏效应。数值微分法是根据滤波器系统的微分方程,由实验曲线估计出系统微分方程的系数,基于该方程,通过数值微分,由测量结果恢复出被测信号。因无法获得实际滤波器系统的准确微分方程,故所得的只是个近似的表达式,影响修正效果^[10]。反滤波器法是由滤波器频率特性的逆构建反滤波器,滤波器输出经由该反滤波器后即还原出输入信号,该方法简单有效、重构效果较好^[11-13]。

本文采用反滤波进行频率补偿,不同于已有方法之处在于利用测量电路自身的软硬件资源进行补偿对象的参数辨识和补偿,即原位补偿。

2 原位频率特性补偿方法与实现

2.1 动不平衡测量原理及频率误差分析

动平衡机测量系统原理如图1所示^[14-15]。图1中,两路拾振传感器的输出经滤波放大后再经模数转换送至微处理器,光电传感器输出的转速信号经锁相倍频后作为微处理器控制 A/DC 的触发信号,实现整周期采样。两路振动信号经正交互相关运算后即得不平衡量的幅值和相位。系统具有自检功能,用于测试电路系统各模块功能是否正常。自检时,由微处理器发出方波信号替代来自拾振传感器和光电传感器的信号。

图1中点划线框住的部分为数字相关处理和频率补偿模块。频率补偿模块实现三阶滤波电路传递函数的逆,一般的做法为按滤波电容电阻标称值算得的响应特性频率进行按标称值的补偿,或离线跟踪补偿。本研究采用辨识得出的实际频率响应特性进行补偿,可以应对因环境温度等因素引起的参数漂移问题,可以降低生产过程中对电阻电容进行严格筛选和配对的工艺要求。

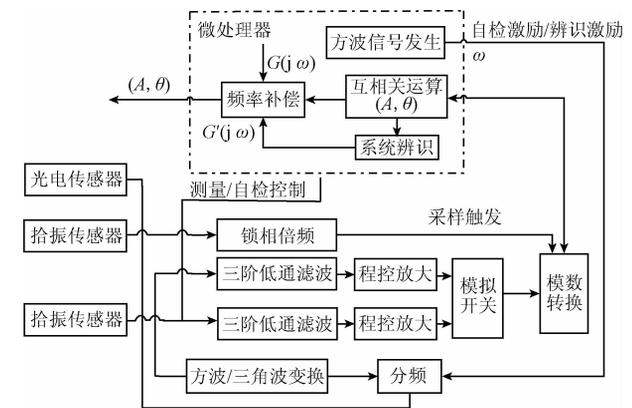


图1 动平衡机测量系统原理及原位频率补偿模块
Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system of balancing machine and In-situ frequency compensation

2.2 原位参数辨识补偿误差分析

系统频率响应特性辨识过程如图2所示。图中 a 、 b 和 c 为待辨识的三阶低通滤波器传递函数的系数。

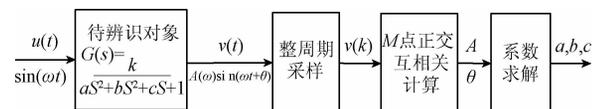


图2 系统辨识过程

Fig. 2 System identification process

动平衡测量系统的自检模块、整周期采样和相关运算功能正可被利用来进行系统辨识,在机原位补偿之说即来自于此。但动平衡测量系统现有资源只具备产生方波或三角波的能力,用方波或三角波替代正弦波激励不可避免会引起辨识误差,本节即对此误差进行分析。

基频为 ω_i 的单位方波信号 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_i t] \quad (1)$$

该信号经三阶低通滤波电路的衰减后再与参考正弦信号进行相关。三阶低通滤波电路对20倍以上谐波的衰减大于60 dB,其影响可以忽略,因此有:

$$x'(t) \approx \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^9 \frac{1}{2n+1} A((2n+1)\omega_i) \cdot \sin[(2n+1)(\omega_i t + \theta_i)] \quad (2)$$

式中: $A((2n+1)\omega_i)$ 为三阶低通滤波的幅频特性, θ_i 为滤波电路的相频特性。

方波替代正弦波与正弦参考信号相关产生的误差不会超过 ε_{smax} :

$$\varepsilon_{smax} = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^9 \frac{1}{2n+1} A((2n+1)\omega_i) \cdot \sin\left[(2n+1)\left(\omega_i \frac{k}{M} + \theta_i\right)\right] \cdot \sin\left(\omega_i \frac{k}{M}\right) \quad (3)$$

式中: M 为每周期的采样点数。

谐波分量与余弦参考信号相关后产生的误差不会超过 ε_{cmax} :

$$\varepsilon_{cmax} = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^9 \frac{1}{2n+1} A((2n+1)\omega_i) \cdot \sin\left[(2n+1)\omega_i \frac{k}{M} + \theta_i\right] \cdot \cos\left(\omega_i \frac{k}{M}\right) \quad (4)$$

频率为 ω_i 的三角波信号 $y(t)$ 可表示为:

$$y(t) = \frac{1}{2} + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos(2n+1)\omega_i t \quad (5)$$

同理,该信号经低通滤波器衰减后,20次及以上谐波的衰减大于60 dB,可以忽略,其与正弦参考信号相关后,产生的误差不会超过 ε'_{smax} :

$$\varepsilon'_{smax} = \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^9 \frac{1}{(2n+1)^2} A((2n+1)\omega_i) \cdot \cos\left[(2n+1)\left(\omega_i \frac{k}{M} + \theta_i\right)\right] \cdot \sin\left(\omega_i \frac{k}{M}\right) \quad (6)$$

同理可得谐波分量与余弦参考信号相关后,产生的误差不会超过 ε'_{cmax} :

$$\varepsilon'_{cmax} = \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^9 \frac{1}{(2n+1)^2} A((2n+1)\omega_i) \cdot \cos\left[(2n+1)\left(\omega_i \frac{k}{M} + \theta_i\right)\right] \cdot \cos\left(\omega_i \frac{k}{M}\right) \quad (7)$$

由式(3)、(4)、(6)、(7)可知, $A((2n+1)\omega_i)$ 为三阶低通滤波器的幅频特性,随着频率的增大,趋于

$1/\omega_i^3$ 。设方波和三角波的谐波分量与参考信号相关运算后的值分别为 S_{square} 和 $S_{triangle}$,则有:

$$S_{square} < S_1 = \frac{1}{3^4} + \frac{1}{5^4} + \dots + \frac{1}{(2n+1)^4} \quad (8)$$

$$S_{triangle} < S_2 = \frac{1}{3^5} + \frac{1}{5^5} + \dots + \frac{1}{(2n+1)^5} \quad (9)$$

式中: S_1 为方波的谐波分量引起误差的系数和, S_2 为三角波的谐波分量引起误差的系数和。

式(8)和(9)右边和式的值可根据柯西收敛准则进行计算。对于任意给定的正数 ε ,总存在正整数 N ,使得当 $n > N$,对于任意的正整数 p ,都有 $|x_{n+1} + x_{n+2} + \dots + x_{n+p}| < \varepsilon$,即有 $|S_n - S| < \varepsilon$ 。其中, ε 为序列的收敛半径, S 为序列和的上确界。选定收敛半径 $\varepsilon = 0.0001$,此时计算谐波分量的误差小于0.01%,影响可忽略不计。已知 $1 + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{5^4} + \dots = \frac{\pi^4}{96}$,

$1 + \frac{1}{3^5} + \frac{1}{5^5} + \dots = \frac{20\pi^5}{6093}$,当 $n > 8$ 时,有

$|S_1 - 0.0147| < 0.0001$,所以 S_1 收敛于0.0147。类似地, $n > 5$ 时,有 $|S_2 - 0.0045| < 0.0001$,所以 S_2 收敛于0.0045。因此,方波激励参数辨识幅值残差上限为

$2\sqrt{S_1^2 + S_1'^2} = 0.0516$,三角波激励参数辨识幅值残差上限为

$2\sqrt{S_2^2 + S_2'^2} = 0.0128$,后者约为前者的1/4。

由三角函数系的正交性质可知,连续的方波信号和三角波信号与基波频率相等的正弦信号相关,其谐波项都会被抑制。但信号被有限点的离散采样后,谐波分量引起的误差不能被完全消除。

M 分别取值为8、16、32、64、128,对前9项进行求和,误差项均方根的最大相对误差如表1所示。

表1 取样点数与误差的关系

Table 1 Error vs the number of points (%)		
采样点	方波	三角波
8	-2.03	-0.386
16	-0.981	-0.094
32	-0.466	-0.023
64	-0.213	-5.670
128	-0.078	-1.220

由表1可知,三角波替代正弦波引起的误差小于方波替代正弦波引起的误差,每周期取样的点数越多,谐波引起的最大相对误差越小,取样点数为64时,三角波谐波项引起的相对误差为方波的0.026%。再增加点数,误差减小不明显。故选取每周期64点的采样方案。与用网络分析仪得到三阶滤波电路的传递函数为参考,本方法以方波和三角波激励进行参数辨识得到的系统幅频和相频特性误差曲线如图3所示。

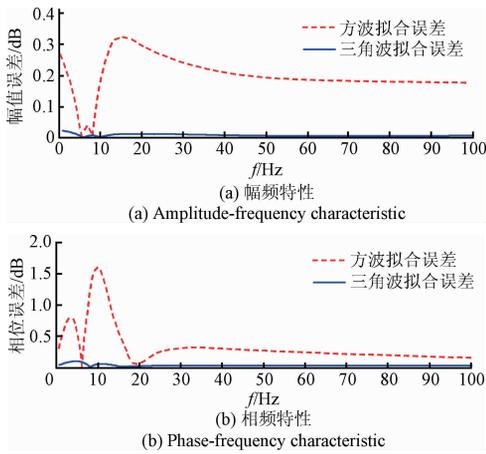


图3 方波、三角波替代正弦波激励引起的误差
Fig.3 Identification error by triangular wave and square wave

从图3可以看出,采用方波激励辨识其幅频特性最大偏差大约为0.6 dB,相位最大偏差为1.6°。而采用三角波激励得到的结果与正弦波激励得到的结果趋于一致,幅频特性误差小于0.01 dB,相位误差小于0.01°。

2.3 参数辨识激励信号频率序列选取

进行参数辨识时,取样的点数以及取样频率的分布对参数辨识的准确性有很大影响^[16-18]。采用在机方式实现可利用的资源相对受限,有必要对激励频率序列选取方案进行优化。

考察了在2~100 Hz范围内分别选取3、4、5、8和10个频率点对电路进行激励的情况。5组实验辨识参数频率特性与实际频率特性的偏差如图4所示。从图4中可以看出,幅频误差与频点数量之间并不是单调关系,幅频误差均不超过0.03 dB,相频误差在靠近零频处急剧上升,截止频率(9 Hz)附近误差较大。

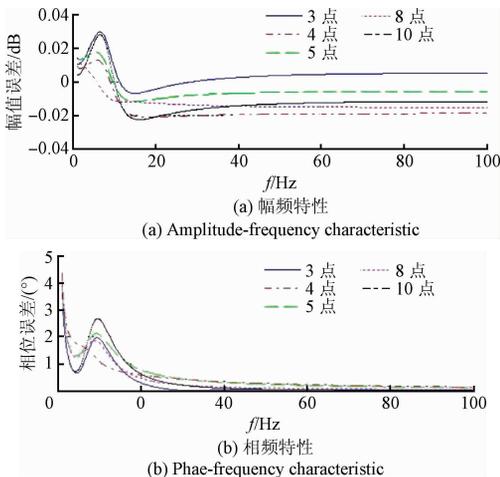


图4 频率点数不同时的辨识误差
Fig.4 Identification error under the different quantity of exciting frequencies

综合考虑测量电路的资源以及频率补偿误差的大小,选用3个频点的激励方案。图5所示为激励频率在通带、过渡带和阻带中各取一点,频率间隔分别取3、5、6、9 Hz的辨识误差。误差曲线表明,几种频率间隔中,间隔为5 Hz时误差较小,幅值误差最大为0.03 dB,相位误差最大为1.8°。

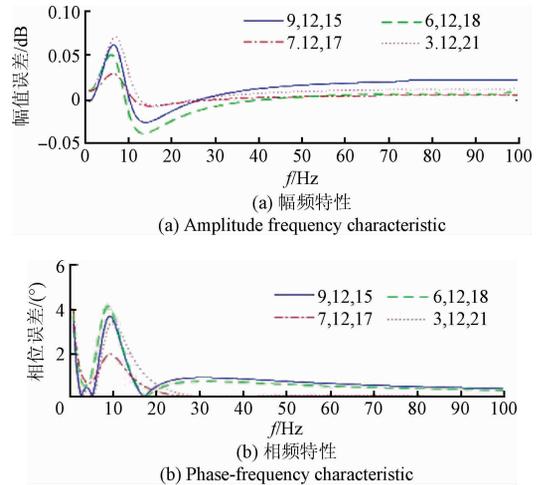


图5 频率分布不同时的辨识误差
Fig.5 Identification error under the different quantity of exciting frequencies

综上,选择三角波信号作为激励信号,激励频率点分别为7、12、17 Hz。采用该方案辨识得到的幅频特性和相频特性与标准的频率特性比较如图6所示。幅值误差在0.2 dB左右,相位误差在0.6°左右,满足动平衡的测量标准。

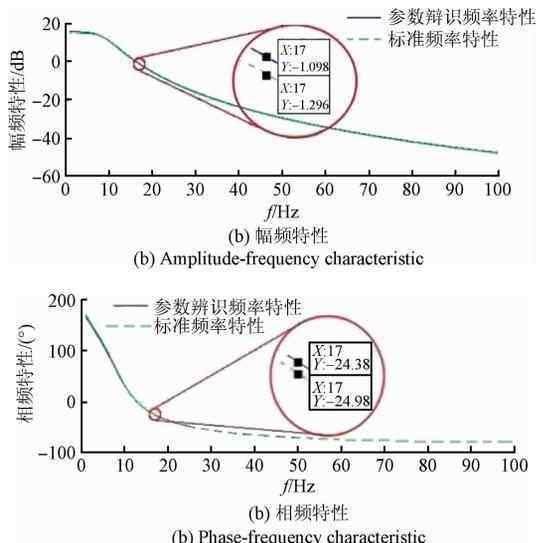


图6 测量通道频率特性曲线
Fig.6 Frequency characteristics of measurement circuit

3 频率特性补偿性能综合测试

按照机械振动平衡机描述与评估国际标准 ISO 2953-2001,采用最小可达剩余不平衡量 e_{mar} 和一次不平衡量减少率(unbalance reduction ratio, URR)对频率特性补偿效果进行测试与评估。测试在 HY4UB 硬支承动平衡机上进行,校验转子质量为 160 kg,采用 3.811 g 的试重进行性能校验。实验装置如图 7 所示。



图 7 动平衡实验装置
Fig. 7 Experiment arrangement

最小可达剩余不平衡量是衡量平衡机最高平衡能力的性能指标^[20]。实验采用 8 点校验法,用两个试重 $10U_{mar}$ (3.811 g),同时同相分别加在校验转子的两个校正面的 8 个位置上,转动转子至额定转速,读出校正显示值,即可得到最小可达剩余不平衡量。

按标称值补偿时,由于 RC 低通滤波电路中电容的容值分散性比较大,通常情况下电容值的变化范围在 $\pm 10\%$ 左右,此外,环境温度等的变化引起的电阻值和电容值的变化,这使得按器件标称值获得的传递函数与实际不符,补偿效果不佳。

比较根据标称值补偿与辨识参数补偿得到的最小可达剩余不平衡量结果,标称值补偿结果如表 2 所示,辨识参数补偿的数据如表 3 所示。

表 2 最小可达剩余不平衡量实验(标称值补偿)

Table 2 Experiments of the minimum achievable residual unbalance (Compensation with normal value)

位置/(°)	平面 1		平面 2	
	幅值/g	相位/(°)	幅值/g	相位/(°)
0	3.083	357	3.197	4
45	3.059	40	3.207	49
90	3.046	85	3.073	96
135	3.037	129	2.782	144
180	3.038	173	2.967	187
225	3.243	128	3.042	235
270	3.376	259	2.791	281
315	3.192	307	2.783	323
平均值	3.134		2.98	

表 3 最小可达剩余不平衡量实验(辨识参数补偿)

Table 3 Experiments of the minimum achievable residual unbalance (Compensation with identified value)

位置/(°)	平面 1		平面 2	
	幅值/g	相位/(°)	幅值/g	相位/(°)
0	3.141	359	3.059	1
45	3.051	42	2.987	43
90	3.076	88	2.970	89
135	3.145	136	2.967	137
180	3.153	181	3.024	182
225	3.186	136	3.080	227
270	3.236	270	3.104	271
315	3.192	314	3.094	316
平均值	3.148		3.036	

两种补偿方式的最小不平衡量分布如图 8 所示。

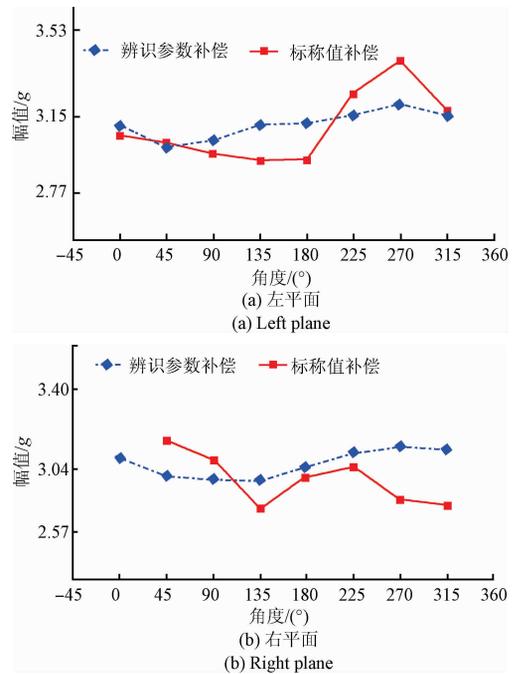


图 8 最小可达剩余不平衡量曲线比较

Fig. 8 Experimental results of the minimum achievable residual unbalance

图 8 中实线代表根据按标称值补偿的结果,虚线代表根据辨识参数补偿的结果。用标称值补偿,最小可达剩余不平衡量在均值附近的波动量左平面为 8%,右平面为 6%;而参数辨识补偿的波动量分别为 4% 和 2%。

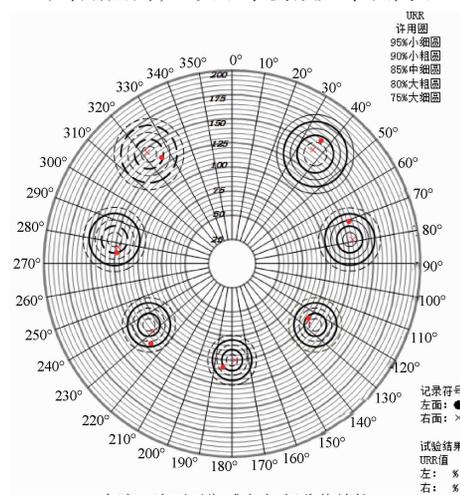
一次 URR 代表了平衡机的平衡效率,表示转子经过一次平衡校正后所减少的不平衡量与转子的初始不平衡量之比:

$$URR = \frac{U1 - U2}{U1} =$$

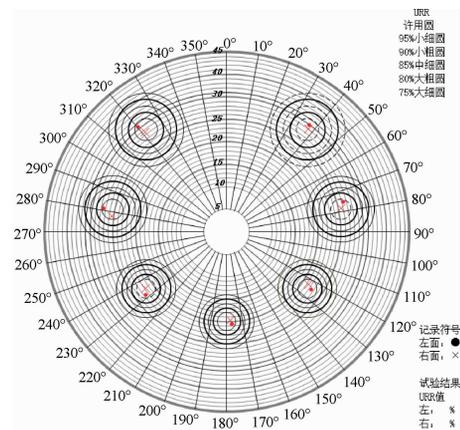
$$1 - \sqrt{1 + (1 + \gamma)^2 - 2(1 + \gamma) \cos\phi} \quad (13)$$

式中: U_1 为转子的初始不平衡量, U_2 为按平衡机指示进行一次平衡校正后的转子剩余不平衡量, γ 为幅值误差, ϕ 为相位误差。

按照国际标准 ISO 2953-2001^[19],在许用圆图上绘出测点。分别采用标称值频率补偿和原位参数辨识频率补偿的一次不平衡减少率评估结果如图9所示。可以看到,使用标称值补偿时,一次不平衡减少率试验的所有测点落在在85%的许用圆内;而用辨识所得参数补偿,所有测点落在95%的许用圆内,一次不平衡减少率提高了10%。



(a) Experiment results on allowable round(By nominal value)



(b) Experiment results on allowable round (By In-situ method)

图9 高阶一次不平衡减少率实验

Fig.9 Experimental results of unbalance reduction ratio

4 结 论

本文针对动平衡测量系统中三阶低通滤波器的频率特性与平衡机振动响应特性不能完全对消而引起测量误差的问题,提出了原位频率补偿方法,进行了方法实现以及实验验证。本文分析了方波和三角波替代正弦波作为激励的参数辨识误差,对有限的采样点引起的幅频和相频特性误差进行了数值分析,估计了滤波器幅频特性误

差的上限,选择三角波作为激励;分析了激励频点的选取对频域辨识结果的影响,得到优化的频率选择点为7、12、17 Hz。根据原位参数辨识得到的频率特性与标准的频率特性一致性很高。最小可达剩余不平衡量与一次不平衡减少率动平衡领域评估综合性能的标准,实验结果表明,原位参数辨识频率补偿能明显提高平衡机的测量精度和测量效率,达到国内外领先水平。

参考文献

- [1] 张韧. 旋转机械故障特征提取技术及其系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
ZHANG R. Research on feature extracting technology and feature extracting software system for faults of rotating machinery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [2] 陶利民. 转子高精度动平衡测试与自动平衡技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
TAO L M. Research on technology of high-precision dynamic balancing measurement and automatic balancing for rotors[D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2006.
- [3] 张禄林,段滋华,李多民,等. 现场动平衡技术的研究进展[J]. 化工机械,2012,39(6):690-694.
ZHANG L L, DUAN Z H, LI D M, et al, Research progress of field balancing technology [J]. Chemical Machinery, 2012, 39(6): 690-694.
- [4] 黄锦旺,李广明,冯久超,等. 一种无线传感器网络中的混沌信号重构算法[J]. 物理学报,2014,63(14): 81-87.
HUANG J W, LI G M, FENG J CH, et al. A chaotic signal reconstruction algorithm in wireless sensor networks[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(14): 81-87.
- [5] 张玉光. 动平衡测试技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
ZHANG Y G. Research on technology of dynamic balance measurement [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [6] 李传江. 用于动平衡检测系统中通道补偿的神经网络建模方法, 中国, 授权号: ZL200910197621. 2 [P]. 2012-2-22.
LI CH J. Method of unbalance signal extraction in high precision dynamic balancing measurement with Neural Network, China, No: ZL200910197621. 2 [P]. 2012-2-22.
- [7] 成晓南. 差动变压器式位移传感器动态误差分析及补偿技术研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
CHENG X N. Dynamic error analysis and compensation technology research of linear variable differential transformer[D]. Wuhan: Wuhan Technology University, 2015.

- [8] 孙海波,孔德仁,何瑛,等. 传感器动态误差修正方法探讨[J]. 南京理工大学学报,2000,24(4):330-333.
SUN H B, KONG D R, HE Y, et al. Transducer's dynamic error correction method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(4): 330-333.
- [9] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
LI SH M, GUO H D, LI D R. Review of vibration signal processing methods [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(8):1907-1915.
- [10] 陈新国,王洁芸. 混沌振子在不同初值下检测弱信号的性能分析[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12):2857-2862.
CHEN X G, WANG J Y. Performance analysis of weak signal detection based on chaotic oscillator under different initial condition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012,33(12):2857-2862.
- [11] 梁凤岗,徐敏. 信号重构中的时域反滤波及其应用[J]. 振动测试与诊断,1997(2):17-21.
LIANG F L, XU M. Inverse filtering in the time domain and its application to waveform reconstruction [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis. 1997(2):17-21.
- [12] 张志杰,祖静,张爱萍. 多参数模型的反滤波方法研究[J]. 计量学报,1999,20(2):143-150.
ZHANG ZH J, ZU J, ZHANG AI P. Research on inverse filtering with multi-parameter model [J]. Acta Metrologica Sinca,1999,20(2):143-150.
- [13] 杜红棉,张志杰,王文廉,等. 反滤波方法在冲击波超压测试中的应用[J]. 仪器仪表学报,2006,37(增刊2):1249-1250.
DU H M, ZHANG ZH J, WANG W L, et al. Application of inverse filtering on blast pressure measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 2):1249-1250.
- [14] 赵鼎鼎. 高精度、高效率硬支承平衡机测量系统若干关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
ZHAO D D. Studies on key technologies in hard bearing dynamic unbalance measurement [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2013.
- [15] 叶能安. 动平衡原理与动平衡机[M]. 武汉:华中工学院出版社,1985.
YE N AN. Dynamic balance principle and dynamic balancing machine[M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1895.
- [16] GEVERS M. A personal view of the development of system identification: A 30-year journey through an exciting field[J]. IEEE Control Systems, 2007, 26(6): 93-105.
- [17] COHEN L. Time-frequency distributions-a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941-981.
- [18] 秦如. 动不平衡测量系统频域特性分析及其补偿技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.
QIN R. Study on frequency characteristic and compensation of dynamic unbalance measurement system[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2016.
- [19] ISO 2953-2001. 机械振动-平衡机-描述与评估国际标准[S]. IX-ISO, 2001.
ISO 2953-2001. Mechanical vibration-balance machines-description and evaluation[S]. IX-ISO, 2001.

作者简介



宋菊平,2014年于厦门大学获得学士学位,2017年于上海交通大学获取硕士学位,现为上海华为技术有限公司职员,主要研究方向为检测技术与测试理论。

E-mail: jp. song@rcstech. org

Song Juping received her B. Sc. degree from Xiamen University of Science & Technology in 2014, and received her M. Sc. degree from Shanghai JiaoTong University in 2017. Now she is an office clerk in Huawei. Her main research direction is inspection technology and measurement theory.



蔡萍(通讯作者),分别于1982年、1988年和1999年在上海交通大学获得学士、硕士和博士学位,现为上海交通大学教授,主要研究方向为动态检测技术和生物医学工程。

E-mail: pcai@sjtu. edu. cn

Cai Ping (Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Shanghai JiaoTong University in 1982, 1988 and 1999, respectively. Now she is a full professor of Instrument Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests mainly focus on dynamic measurement and biomedical engineering.