

文章编号 1004-924X(2017)04-0910-09

磁悬浮高速离心式鼓风机的喘振检测

韩邦成, 王 凯*, 郑世强, 张 寅

(1. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室

新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191;

2. 北京市高速磁悬浮电机技术及应用工程技术研究中心, 北京 100191)

摘要: 针对磁悬浮高速离心式鼓风机的喘振问题, 提出了一种基于磁悬浮轴承的喘振检测方法。该方法采用通用同频陷波器滤除转子位移中的同频分量, 消除了同频扰动对喘振检测的影响; 通过分析不同收敛因子对喘振频率估计的作用, 基于自适应估计提出了变收敛因子的喘振频率和幅值估计方法, 减小了低频信号的干扰, 提高了喘振信号检测的快速响应能力。最后, 分析了改进检测算法的收敛性, 并在 100 kW 磁悬浮离心式鼓风机测试系统上进行了实验验证。实验结果表明, 改进后的喘振检测算法可在喘振发生前检测出喘振先兆旋转失速信号, 在喘振发生 0.23 s 内检测出喘振信号, 较改进前的检测结果提高了 2.6 s。该检测方法无需外加其它检测单元, 算法简单、快速, 计算量小、并可有效地反映喘振发生过程中频率与振幅的变化。

关键词: 磁悬浮高速离心式鼓风机; 喘振检测; 转子位移; 自适应估计

中图分类号: TH442 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0910

Surge detection of magnetically suspended high-speed centrifugal blower

HAN Bang-cheng, WANG Kai*, ZHENG Shi-qiang, ZHANG Yin

(1. *Science and Technology on Inertial Laboratory, Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. Beijing Engineering Research Center of High-speed Magnetically Suspended Motor Technology and Application, Beijing 100191, China)

** Corresponding author, E-mail: wangkai_199201@163.com*

Abstract: For the surge problem existing in a magnetically suspended high-speed centrifugal blower, a surge detection method based on a magnetic bearing was proposed. A universal co-frequency wave trap was adopted to filter the co-frequency components in the process of rotor displacement for eliminating the influences of co-frequency perturbation on surge detections. By analyzing effects of different convergence factors on estimated functions of surge frequency, an adaptive estimation algorithm with variable convergence factors was proposed to reduce the interference of low frequency signals and to improve the quick reaction capacity to surge signal detection. Finally, the convergence of the proposed

收稿日期: 2016-08-16; 修订日期: 2016-10-16.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. YWF-16-BJ-J24); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61573032); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2012YQ040235)。

detection method was analyzed, and a verification experiment was performed on a test system for the 100 kW magnetically suspended centrifugal blower. The experimental result shows that the improved surge detection algorithm detects premonitory signals of surge rotating stall before the surge occurs and detects surge signals within 0.23 s after the surge occurs, which shortens the detection time by 2.6 s as compared with that of common algorithms. The proposed algorithm is characteristics by simple, high velocity, less calculation and can be implemented without other auxiliary systems. Moreover, it can reflect the changes of frequency and amplitude during the surges.

Key words: magnetically suspended high-speed centrifugal blower; surge detection; rotor displacement; adaptive estimation

1 引言

与传统的机械轴承相比,磁悬浮轴承具有无摩擦、无需润滑、寿命长、振动可控、噪音低、能量密度高等优点^[1-3],故其越来越多地应用在透平类机械当中。磁悬浮离心式鼓风机采用了磁悬浮轴承技术的透平设备,它的主要结构是将鼓风机增压部分直接安装在电机轴的延伸端上,省略了增速器及联轴器,实现了由高速电机直接驱动离心式鼓风机。

喘振是透平式压缩机械在流量减少到一定程度时所发生的一种非正常工况下的振动。喘振不仅会使得压缩机械工作效率下降、性能急剧恶化,还有可能会破坏叶片,造成严重的事故。磁悬浮鼓风机也会发生喘振,其对风机系统造成的危害更加严重。引起喘振的原因主要有两个:一个是风机系统的气流出现了旋转失速,产生局部的失速团,而这种旋转失速一般是喘振的前兆;第二个原因与管网系统有关,即当管网系统阻力增大时,风机的工况点会发生改变^[4]。目前关于喘振的研究主要集中在两方面:一是优化机械结构来改善鼓风机与压缩机械的性能^[5];二是通过主动/被动控制使鼓风机与压缩机的工作点远离喘振区^[6]。喘振抑制涉及喘振的检测,快速准确的喘振检测方法不仅仅有益于压缩机械安全稳定运行,也是喘振控制过程中的关键技术。

针对喘振检测问题,国内外学者做了许多工作。喘振的显著特点是管道内气流压力的起伏波动,因此出口压力常被用于喘振检测的指示信号^[7]。Liu^[8]等人通过分别测量与分析系统的压力、温度和噪声信号来判断压缩机械的喘振点。但是压力、温度与噪声信号受外界干扰较大,灵

敏度低。秦海波^[9]等将特定时间段内压力动态变化的幅值作为气动不稳定的参数;朱智富^[10]计算出了出口压力的均方差,并将其作为判断是否发生喘振的关键参数。文献^[11]涉及的相关系数法是通过计算当前信号与前期信号之间的相互关联程度并根据系数大小来判断是否发生喘振。这类关键参数方法算法简单,容易实现,计算量小,但是单一的参数难以反映出喘振发生过程的动态变化。Fourier变化^[12]与小波分析^[13]近年来被越来越多的用于喘振与旋转失速检测分析中。Wu^[14]等人利用经验模态分解(EMD)与连续小波变换(CWT)进行喘振检测,发现基于经验模态分解的喘振检测方法优于小波变换。Mohamed^[15]等人利用模糊神经模型来检测涡轮压缩机的喘振现象,通过仿真模拟,模糊系统可有效地检测压缩机械的喘振。这类方法可以有效地反映出喘振过程中信号的变化,但是计算量大,难以实现实时检测,多用于喘振信号的分析。自适应陷波器(ANF)由Regalia^[16]提出,用于正弦周期信号的幅值与频率估计,近年来自适应估计经改进后已被应用于磁轴承系统^[17]与电力系统^[18]中进行信号跟随与频率估计,取得了一定的效果。

本文针对磁悬浮高速离心式鼓风机系统的喘振问题,提出了一种基于磁悬浮轴承的喘振检测方法。该方法结合磁悬浮轴承系统的特性,利用转子位移信号进行磁悬浮离心式鼓风机的喘振检测。为了消除同频扰动对喘振检测的影响,采用通用同频陷波器滤除位移信号中与转速同频的分量。在此基础上,基于自适应估计,通过信号跟随和频率估计,得到喘振信号的频率和幅值。为提高喘振信号检测的快速响应能力,文中提出了一种变收敛因子的喘振频率估计方法,同时对改进检测算法的收敛性进行了分析。在北航100 kW

磁悬浮离心式鼓风机测试平台上测得的实验结果证明了该方法的有效性。

2 位移信号的同频扰动滤波

磁悬浮轴承系统中的转子位移信号具有噪声小、精度高、受外界干扰较小和采样频率高等优点,为磁悬浮鼓风机系统所特有且能用于喘振检测。不过,受加工误差,装配工艺等影响,转子会存在一定的残余不平衡量。因此,当转子高速旋转时,极易产生与转速同频的周期性不平衡振动力,从而引起与转速同频的位移波动。在喘振的初始发生阶段,同频振动的振幅与喘振信号幅值相近,从而给喘振检测带来了一定干扰。为了避免位移信号中同频振动对喘振检测速度的影响,这里采用中心陷波频率随转速变化的同频陷波器来滤除同频信号。

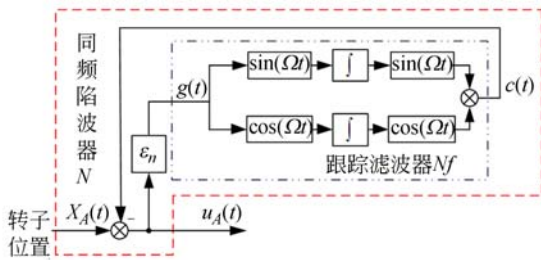


图 1 同频陷波器原理框图

Fig. 1 Block diagram of synchronous notch filter

同频陷波器的原理框图如图 1^[19]。陷波器 $N(s)$ 的核心是跟踪滤波器 $N_f(s)$, 其中心频率随转速变化; Ω 为转子转速; ϵ_n 为反馈系数, 其决定了陷波器的收敛速度与中心陷波带宽。

设 $g(t)$ 为跟踪滤波器 N_f 的输入, $c(t)$ 为跟踪滤波器 N_f 的输出, 则有:

$$c(t) = (\sin(\Omega t)\cos(\Omega t)) \begin{bmatrix} \int \sin(\Omega t) g(t) dt \\ \int \cos(\Omega t) g(t) dt \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对公式进行两次求导, 可知 $c(t)$ 与 $g(t)$ 满足以下微分方程:

$$\ddot{c}(t) + \Omega^2 c(t) = \dot{g}(t). \quad (2)$$

对公式进行拉普拉斯变换, 可知跟踪滤波器 N_f 的传递函数为:

$$N_f(s) = \frac{c(s)}{g(s)} = \frac{s}{s^2 + \Omega^2}. \quad (3)$$

同频陷波器 N 的输入 $X_A(t)$ 至输出 $u_A(t)$ 的传递函数为:

$$N(s) = \frac{u_A(s)}{X_A(s)} = \frac{s^2 + \Omega^2}{s^2 + \epsilon_n s + \Omega^2}. \quad (4)$$

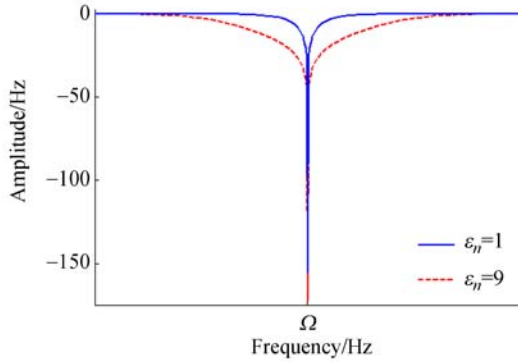


图 2 陷波器的幅频特性曲线

Fig. 2 Amplitude-frequency curves of notch filter

图 2 为反馈系数 ϵ_n 分别为 1 和 9 时采用的同频陷波器的幅频特性曲线。由图 2 可见, ϵ_n 决定了陷波器的 $N(s)$ 的中心陷波带宽, 当 ϵ_n 增大时, 陷波效果变差。

3 喘振自适应估计

3.1 喘振信号跟随估计

喘振发生时鼓风机系统内质量流量和压力会发生变动, 使得作用在转子叶轮上的外力发生改变, 从而引起磁悬浮轴承系统转子位移发生波动。

设由喘振引起的转子位移波动为:

$$u(t) = A\sin(\omega_0 t + \delta), \quad (5)$$

其中幅值 A 、相角 δ 都为未知量。在鼓风机系统的管道长度与容积确定, 电机转速一定的条件下, 系统经典喘振频率 ω_0 在一段时间内可近似认为不变。

定义两个状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 用 $x_1(t)$ 作为喘振信号 $u(t)$ 的估计值, 同时引入与 $x_1(t)$ 幅值相等, 相位相差 $\pi/2$ 的 $x_2(t)$ 。令 $\mathbf{v}(t) = (v_1(t) \ v_2(t))^T$ 为状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的正余弦分量, 则状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) & \cos(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t) & -\sin(\omega_0 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则喘振信号的幅值估计为:

$$\bar{A} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}. \quad (7)$$

设 $e(t) = u(t) - x_1(t)$ 为跟随估计误差,依据最小方差原则,定义代价函数为^[20]:

$$J(v(t), t) = 0.5 e^2(t) = 0.5 (u(t) - x_1(t))^2. \quad (8)$$

根据自适应估计器梯度下降方法,使得状态变量的变化方向为代价函数的负梯度方向,即

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_0 \cos(\omega_0 t) & -\omega_0 \sin(\omega_0 t) \\ -\omega_0 \sin(\omega_0 t) & -\omega_0 \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) & \cos(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t) & -\sin(\omega_0 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_1(t) \\ \dot{v}_2(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由公式(6)、公式(10)和公式(11),可得喘振信号跟随估计式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (12)$$

在零初值条件下,对公式(12)进行拉普拉斯变换,得:

$$\begin{bmatrix} x_1(s) \\ x_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\epsilon s}{s^2 + \epsilon s + \omega_0^2} \\ \frac{-\epsilon \omega_0}{s^2 + \epsilon s + \omega_0^2} \end{bmatrix} u, \quad (13)$$

令 $s = j\omega$,当参数 ϵ 不为 0 时有:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(j\omega) \\ x_2(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} u & \omega = \omega_0 \\ \begin{bmatrix} x_1(j\omega) \\ x_2(j\omega) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \omega > \omega_0 \text{ 或 } \omega < \omega_0 \end{cases}, \quad (14)$$

公式(14)表明,当参数 ϵ 不为 0,状态变量 $x_1(t)$ 可有效跟随输入信号 $u(t)$ 。

3.2 喘振频率估计

在信号跟随估计结果稳态时,根据公式(12),喘振频率 ω_0 可用下式计算^[21]:

$$\hat{\omega}_0 = \frac{d}{dt} \left[\arctan\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \right] = \frac{\dot{x}_1 x_2 - x_1 \dot{x}_2}{x_1^2 + x_2^2} = \omega_0 + \frac{\epsilon x_2 (u - x_1)}{x_1^2 + x_2^2}, \quad (15)$$

当喘振频率 ω_0 未知时,为了实现喘振频率估计功能,引入了变量 $\tilde{\omega}_0$,以 $\tilde{\omega}_0$ 作为 ω_0 的估计值,并用 $\tilde{\omega}_0$ 代替公式中的 ω_0 ,可得:

$$\hat{\omega}_0 - \tilde{\omega}_0 = \frac{\epsilon x_2 (u - x_1)}{x_1^2 + x_2^2}, \quad (16)$$

上式表明计算值 $\hat{\omega}_0$ 与估计值 $\tilde{\omega}_0$ 之间存在误差,采用积分控制可以使该误差逐渐减小。设积分系数为 k_v ,且 $k_v > 0$,则有:

$$\dot{v}(t) = -\epsilon \frac{\partial J}{\partial v} = \epsilon (u(t) - x_1(t)) \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, ϵ 为正常数,用于调节收敛速度,展开可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1(t) \\ \dot{v}_2(t) \end{bmatrix} = \epsilon \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix} u(t) - \epsilon \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix} x_1(t). \quad (10)$$

对公式两边同时求导可得:

$$\frac{\dot{\tilde{\omega}}_0}{\tilde{\omega}_0} = \frac{k_v/s}{1 + k_v/s} = \frac{k_v}{s + k_v}, \quad (17)$$

由公式(16)与公式(17),可推出:

$$\dot{\tilde{\omega}}_0 = k_v (\hat{\omega}_0 - \tilde{\omega}_0) = k_v \frac{\epsilon x_2 (u - x_1)}{x_1^2 + x_2^2}. \quad (18)$$

由于 $\frac{k_v \epsilon}{x_1^2 + x_2^2} > 0$ 始终成立,故公式(18)可写成:

$$\dot{\tilde{\omega}}_0 = \mu x_2 (u - x_1), \quad (19)$$

其中 μ 为大于零的常数,称为收敛因子。

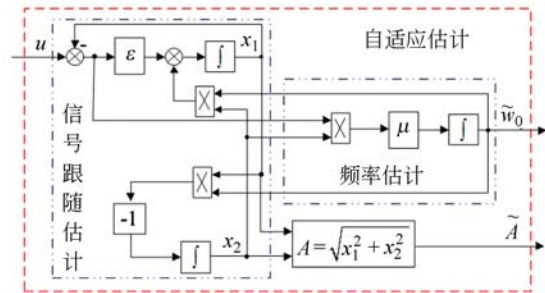


图 3 自适应估计结构图

Fig. 3 Structure of adaptive estimation

用 $\tilde{\omega}_0$ 代替公式(12)中的 ω_0 ,结合喘振频率估计式(19)得到喘振信号自适应估计为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon & \tilde{\omega}_0 \\ -\tilde{\omega}_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon \\ 0 \end{bmatrix} u \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 = \mu x_2 (u - x_1) \end{cases}. \quad (20)$$

自适应估计的结构图如图 3 所示,频率估计部分根据信号跟踪估计的结果 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 及输入信号 $u(t)$ 进行喘振频率估计;信号跟随估计部分根据频率估计结果 $\tilde{\omega}_0$ 进行喘振信号的跟随估计。

4 喘振检测算法的改进

4.1 变收敛因子喘振频率估计

在实际应用过程中,位移信号中除了同频扰动及喘振信号,还含有一定的小幅干扰信号,这使得频率估计结果会有一些小幅波动^[20]。不同收敛因子的频率估计结果如图 4 所示,其中 μ_1 最大而 μ_5 最小。当收敛因子 μ 偏大时,响应速度较快但是抗干扰能力不足;当收敛因子 μ 偏小时,抗干扰能力较强,但是响应时间较长。

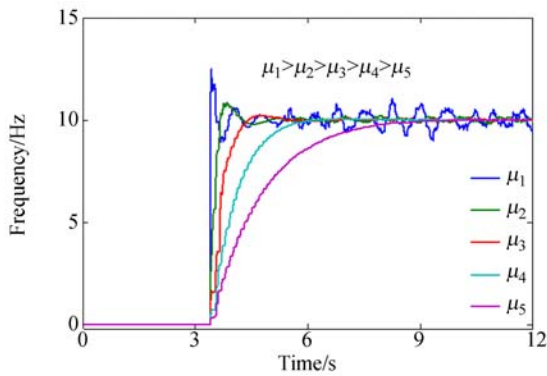


图 4 不同收敛因子的频率估计曲线

Fig. 4 Curves of frequency estimation with different convergence factors

磁悬浮离心式鼓风机的喘振信号检测是一个从无到有的过程,喘振信号幅值会逐渐增大至稳定。固定的收敛因子 μ 难以同时满足喘振检测的快速性与抗干扰性的要求。为了保证喘振检测的快速性与抗干扰性,本文对自适应估计算法中的喘振频率估计进行改进。在收敛因子中引入喘振信号的幅值估计 \tilde{A} ,收敛因子大小随着喘振幅值而改变,结合公式(7)得:

$$\mu = \frac{\mu_0}{A} = \frac{\mu_0}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \quad (21)$$

在喘振初始阶段,喘振信号的幅值较小,则收敛因子较大,提高了响应速度;而在系统发生喘振时,振幅较大,则收敛因子就会减小,提高了抗干扰性。

将根据公式(19)和公式(21)可得:

$$\tilde{\omega}_0 = \frac{\mu_0 \cdot x_2 (u - x_1)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \quad (22)$$

用式(22)代替式(20)中的喘振频率估计,可得到改进后用于喘振检测的自适应估计算法为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon & \tilde{\omega}_0 \\ -\tilde{\omega}_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon \\ 0 \end{bmatrix} u \\ \tilde{\omega}_0 = \frac{\mu_0 x_2 (u - x_1)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \end{cases} \quad (23)$$

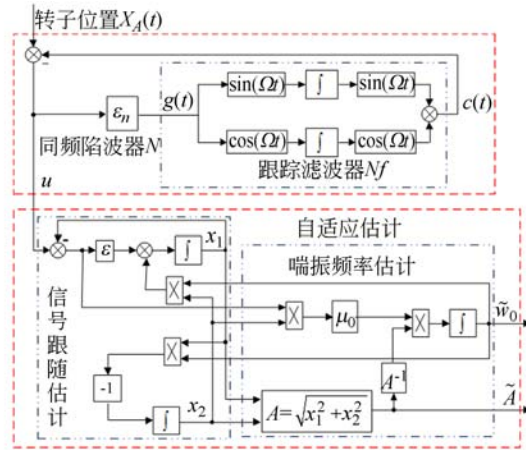


图 5 改进的检测算法结构图

Fig. 5 Structure of proposed detection algorithm

结合位移信号的同频扰动滤波,得到改进的喘振检测算法的结构如图 5 所示。磁悬浮轴承系统的位移信号经同频陷波器滤除了同频分量,在此基础上,基于改进的自适应估计方法,通过喘振信号跟随和喘振频率估计,可得到喘振信号的频率和幅值。

4.2 喘振频率估计收敛性分析

当 $\mu \neq 0$ 时,在喘振频率估计值 $\tilde{\omega}_0$ 处,改进后自适应估计算法的响应为 $x_1^0(t, \tilde{\omega}_0)$, $x_2^0(t, \tilde{\omega}_0)$,可算出^[17]:

$$\begin{bmatrix} x_1^0(t, \tilde{\omega}_0) \\ x_2^0(t, \tilde{\omega}_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ -B \cos(\omega_0 t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:

$$\begin{aligned} B &= \frac{A \epsilon \omega_0}{\sqrt{(\tilde{\omega}_0^2 - \omega_0^2)^2 + \epsilon^2 \omega_0^2}} \\ \varphi &= \delta + \arctan \frac{\tilde{\omega}_0^2 - \omega_0^2}{\epsilon \omega_0} \end{aligned} \quad (25)$$

令

$$f(t, \tilde{\omega}_0) = \frac{x_2^0(t, \tilde{\omega}_0) (u - x_1^0(t, \tilde{\omega}_0))}{\sqrt{x_1^0(t, \tilde{\omega}_0)^2 + x_2^0(t, \tilde{\omega}_0)^2}} \quad (26)$$

根据公式(22), $\tilde{\omega}_0$ 可表示为

$$\tilde{\omega}_0 = \mu_0 f(t, \tilde{\omega}_0) \quad (27)$$

对公式(27)运用平均方法,以 $\tilde{\omega}_{0a}$ 表示 $\tilde{\omega}_0$ 的平均值,得到其平均方程为:

$$\dot{\tilde{\omega}}_{ba} = \mu_0 \bar{f}(\tilde{\omega}_{ba}), \quad (28)$$

其中

$$\bar{f}(\tilde{\omega}_{ba}) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t, \tilde{\omega}_{ba}) dt = - \frac{0.5 A \epsilon (\tilde{\omega}_{ba}^2 - \omega_b^2)}{\sqrt{(\tilde{\omega}_{ba}^2 - \omega_b^2)^2 + (\epsilon \omega_b)^2}} \quad (29)$$

由上式可知 $\tilde{\omega}_{ba} = \omega_b$ 是 $\bar{f}(\tilde{\omega}_{ba})$ 的孤立奇点。

且

$$\left. \frac{\partial \bar{f}(\tilde{\omega}_{ba})}{\partial \tilde{\omega}_{ba}} \right|_{\tilde{\omega}_{ba} = \omega_b} = -A < 0. \quad (30)$$

根据文献[22]中的定理 4.1 可知,对于任意 $\mu_0 \in [0, \mu_1]$ ($\mu_1 > 0$), $\tilde{\omega}_b$ 是一致渐进稳定的。在 $\tilde{\omega}_{ba} = \omega_b$ 附近,利用泰勒公式展开公式(28),得到:

$$\dot{\tilde{\omega}}_{ba} \approx \mu_0 \bar{f}(\omega_b) + \mu_0 \left. \frac{\partial \bar{f}(\tilde{\omega}_{ba})}{\partial \tilde{\omega}_{ba}} \right|_{\tilde{\omega}_{ba} = \omega_b} (\tilde{\omega}_{ba} - \omega_b) = -\mu_0 A (\tilde{\omega}_{ba} - \omega_b), \quad (31)$$

根据公式(31)可知, $\tilde{\omega}_b$ 收敛到 ω_b , 收敛速度取决于 $\mu_0 A$ 的大小,且频率收敛速度与输入信号幅值成正比。

5 实验验证

5.1 实验平台

利用图 6 所示的磁悬浮离心式鼓风机系统试验平台进行了试验验证。图中的风机为 100 kW 磁悬浮鼓风机,风机与管道参数见表 1。磁轴承的控制采用以数字信号处理器(DSP)为核心的数字控制系统。其中 DSP 对转子位移信号进行采样与控制运算(采样和运算频率为 6.67 kHz),输出多路 PWM 信号,经过功率放大电路控制流过磁轴承线圈的电流,从而改变作用在转子上的电磁力,使转子稳定悬浮于给定位置。

表 1 实验系统参数

Tab.1 Parameters of test system

实验系统参数	数值
额定功率 P/kW	100
额定转速 N/(r · min ⁻¹)	30000
极转动惯量 J _z /kg · m ²	0.024
管道长度 L/m	3.0
管道内径 D/m	0.16
管道流通面积 A _c /m ²	0.0201
管道体积 V/m ³	0.0603

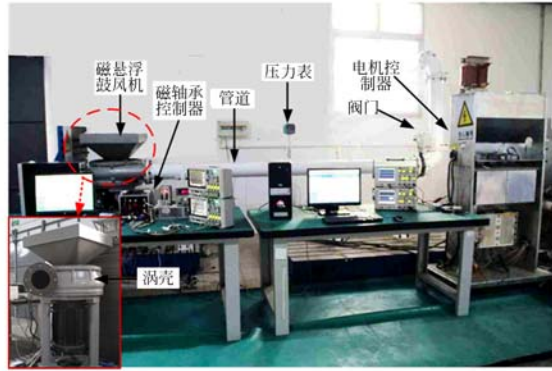


图 6 磁悬浮离心式鼓风机系统实验平台

Fig.6 Setup of magnetically suspended centrifugal blower

在试验过程中,转子转速稳定在 10 000 r/min(167 Hz),在保持转速不变的情况下逐渐关闭管道出口处的阀门使管道内压力升高,从而鼓风机的工况点逐渐靠近喘振区域。管道内的气动不稳定现象十分明显时快速打开阀门,使得鼓风机回到正常稳定工作状态,从而完成一次喘振试验。在整个试验过程中,通过 CAN 卡将 DSP 控制器与上位机相连,并将转子位移的信号传给上位机并进行数据的保存。实验中喘振检测的参数如表 2 所示。

表 2 喘振检测参数

Tab.2 Parameters for surge detection

试验系统参数	数值
位移传感器的分辨率 $k_s/V \cdot \text{mm}^{-1}$	6.25
陷波器反馈系数 ϵ_n	3
频率估计收敛因子 μ_0	198
信号跟随估计参数 ϵ	10

5.2 试验结果及分析

图 7 为喘振实验过程中转子轴向位移 S_z 、径向 A 端位移 S_A (A 端为上端,靠近叶片与蜗壳)及径向 B 端位移 S_B (B 端为下端,远离叶片与蜗壳)随时间变化的曲线。随着阀门的开度逐渐减小,鼓风机系统逐渐发生喘振。在稳定状态下(0 ~ 1 s),轴向、A 端与 B 端的位移振幅分别为 4、7、5 μm ;在旋转失速过程中(1 ~ 3.4 s),A 端的位移振幅增大到 10 μm ,轴向与 B 端位移振幅保持不变;在过渡过程中(3.4 ~ 6 s),轴向与 A 端的位移振幅逐渐增大;在喘振工况下(6 ~ 10 s),轴向与 A 端的位移振幅分别长大到 20、21 μm ;而 B 端位

移在喘振实验过程中幅值不变。

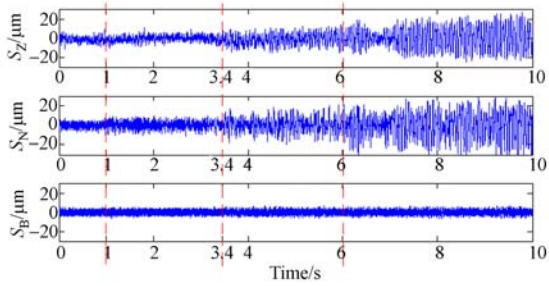
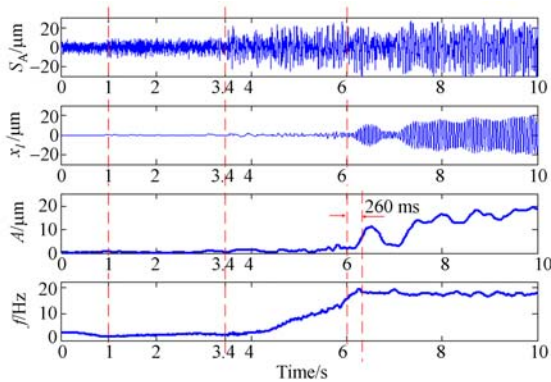


图 7 轴向、A 端、B 端转子位移

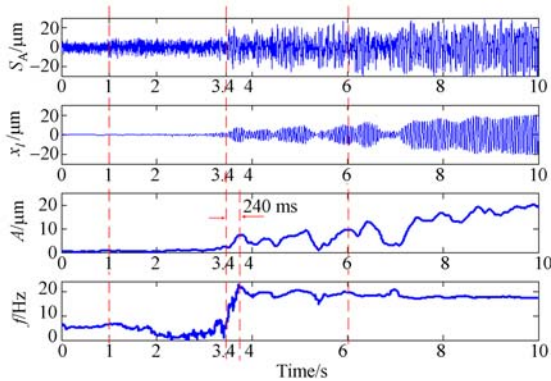
Fig. 7 Axial and radial rotor displacements

磁悬浮轴承系统中径向 B 端由于远离叶片与蜗壳,在喘振发生时位移信号并没有出现明显的波动;径向 A 端由于靠近叶片与蜗壳,发生喘振时,位移信号发生了大幅抖动,且 A 端位移信号中含有喘振先兆旋转失速信号;轴向位移信号只有在发生喘振时才会发生波动。因此,径向 A 端位移信号中含有的喘振信息最全,这里利用径向 A 端位移信号进行喘振信号检测。



(a) 传统算法检测结果

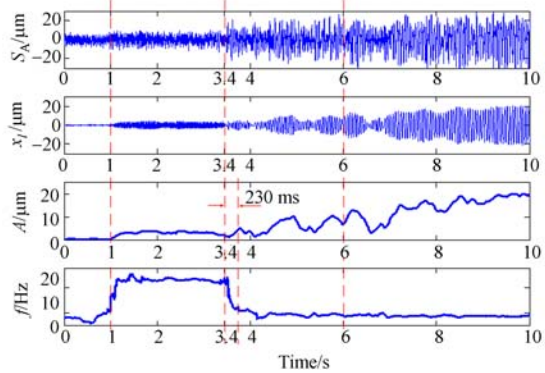
(a) Detection results of traditional method



(b) 改进算法检测结果(未加同频陷波)

(b) Detection results of proposed method

(without synchronous notch filter)



(c) 改进算法检测结果(加同频陷波)

(c) Detection results of proposed method

(with synchronous notch filter)

图 8 检测结果对比

Fig. 8 Comparison of detection results

图 8 为采用不同检测算法时转子 A 端位移信号 S_A 、喘振信号跟随估计 x_1 、喘振幅值 A 和喘振频率 f 变化曲线的对比。传统检测算法需要在 6.26 s 时才能检测出喘振信号,如图 8(a),此时位移波动已十分明显;而不加同频陷波时,改进的检测算法在 3.64 s 时就能检测出喘振信号如图 8(b),此时位移信号刚开始波动。加入同频陷波器后,改进的喘振检测算法结果如图 8(c)所示,在 1~3.4 s 时间段内频率估计为 46 Hz,幅值为 $5 \mu\text{m}$,此时为喘振的先兆旋转失速信号。旋转失速发生之后逐渐发生喘振,频率估计曲线在 3.63 s 时下降至 17.6 Hz 附近,在喘振发生 0.23 s 内检测出了喘振。加入陷波器后,改进后的喘振检测算法可在喘振发生前检测出喘振前的旋转失速信号,在喘振发生 0.23 s 内检测出了喘振信号,较改进前的检测结果提高了 2.6 s。

6 结 论

本文利用磁悬浮系统的转子位移信号进行喘振检测,提出了一种基于磁悬浮轴承的磁悬浮离心式鼓风机喘振检测方法。实验结果表明:基于磁轴承的喘振检测算法可在喘振发生前检测出喘振前的旋转失速信号,在喘振发生 0.23 s 内检测出喘振信号,较改进前的检测结果提高了 2.6 s。实验验证了该方法的有效性,实现了喘振的快速精确检测。

本检测方法无需外加设备,磁悬浮系统本身

所具有的电流感测器、霍尔传感器与位移传感器为本喘振检测方法提供了充足的检测设备,无需外加其它检测单元;同时本检测方法算法简单、计

算量小、能实现实时检测,可有效地反映出喘振发生过程中频率与振幅的变化。

参考文献:

- [1] ZHENG S Q, FENG R. Feedforward compensation control of rotor imbalance for high-speed magnetically suspended centrifugal compressors using a novel adaptive notch filter [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2016, 366: 1-14.
- [2] 刘强,房建成,韩邦成. 磁悬浮飞轮锁紧保护技术研究与发展现状[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2465-2475.
LIU Q, FANG J C, HAN B C. Research and development status of locking protection technologies for magnetic bearing flywheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2465-2475. (in Chinese)
- [3] 王英广,房建成,郑世强,等. 磁悬浮电机的高效高精度在线动平衡[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):2884-2892.
WANG Y G, FANG J C, ZHENG S Q, *et al.*. Field balancing of magnetically levitated motor in high-efficiency and high-accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2884-2892. (in Chinese)
- [4] 罗尧. 透平压缩机机组控制系统的调速与防喘振研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
LUO Y. *Research for speed and anti-surge control of turbine centrifugal compressor* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [5] 高闯,谷传纲,王彤,等. 无叶扩压器内的射流-尾迹型扰动分析[J]. *动力工程*, 2009, 29(4): 326-329,341.
GAO CH, GU CH G, WANG T, *et al.*. Jet-wake type disturbance analysis in vaneless diffuser [J]. *Journal of Power Engineering*. 2009, 29(4), 326-329,341. (in Chinese)
- [6] YOUNG S Y, LIN Z L, ALLAIRE P E. *Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings* [M]. London:Springer, 2013, 221-260.
- [7] 高闯. 离心压缩机无叶扩压器失速与系统喘振先兆分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
GAO CH. *Investigation and analysis of vaneless diffuser stall and system surge precursor* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [8] LIU A X, ZHENG X Q. Methods of surge point judgment for compressor experiments [J]. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2013, 51:204-213.
- [9] 秦海波,孙健国. 某型发动机防喘/消喘控制系统分析研究[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(1):201-206.
QIN H B, SUN J G. Investigation on aircraft engine anti-surge/surge eliminating control system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(1): 201-206. (in Chinese)
- [10] 朱智富,马朝臣,张志强,等. 车用涡轮增压器喘振判断方法的研究[J]. *内燃机工程*, 2010, 31(4): 59-62,68.
ZHU Z F, MA CH CH, ZHANG ZH Q, *et al.*. Investigation on surge judging method for automotive turbochargers [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2010, 31(4): 59-62, 68. (in Chinese)
- [11] GHINGRA M, ARMOR J, NEUMEIER Y, *et al.*. Compressor surge: a limit detection and avoidance problem [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. AIAA, 2005.
- [12] GALINDO J, SERRANO J R, GUARDIOLA C, *et al.*. Surge limit definition in a specific test bench for the characterization of automotive turbochargers [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30(5): 449-462.
- [13] ALBARBAR A. An investigation into diesel engine air-borne acoustics using continuous wavelet transform [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2013, 27(9): 2599-2604.
- [14] WU X, LIU Y B, LIU R, *et al.*. Surge detection methods using empirical mode decomposition and continuous wavelet transform for a centrifugal compressor [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2016, 30(4): 1533-1536.
- [15] WALY M A, TARRAD I F, FOUAD M M. Surge detection system for centrifugal compressor [J]. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2014, 3(2): 692-698.
- [16] REGALIA P A. An improved lattice-based adaptive IIR notch filter [J]. *IEEE Transactions on*

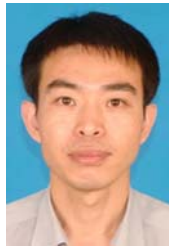
- Signal Processing*, 1991, 39(9): 2124-2128.
- [17] CHEN Q, LIU G, HAN B C. Suppression of imbalance vibration in AMB-rotor systems using adaptive frequency estimator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7696-7705.
- [18] ARABLOUEI R, DOĞANCA Y K, WERNER S. Adaptive frequency estimation of three-phase power systems [J]. *Signal Processing*, 2015, 109:290-300.
- [19] 崔培玲, 盖玉欢, 房建成, 等. 主被动磁悬浮转子的不平衡振动自适应控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(01): 122-131.
- CUI P L, GE Y H, FANG J C, *et al.*. Adaptive control for unbalance vibration of active-passive hybrid magnetically suspended rotor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(01):122-131. (in Chinese)
- [20] 储昭碧. 基于自适应陷波滤波器的电力信号时频分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
- CHU ZH B. *Adaptive notch filter-based time-frequency analysis of signals in power system* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [21] ZHANG Q, BROWN L J. Noise analysis of an algorithm for uncertain frequency identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(1): 103-110.
- [22] RIEDLE B, KOKOTOVIC P. Integral manifolds of slow adaptation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(4): 316-324.

作者简介:



王 凯(1992—),男,安徽休宁人,硕士研究生,2014年于合肥工业大学获得学士学位,研究方向为磁悬浮高速电机磁轴承控制。E-mail: wangkai_199201@163.com

导师简介:



韩邦成(1974—),男,辽宁灯塔人,博士,研究员,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事磁悬浮技术及应用、磁悬浮电机、磁悬浮飞轮与磁悬浮控制力矩陀螺技术等机电一体化技术的研究。E-mail: hanbangcheng@buaa.edu.cn