

磁悬浮轴承磨床电主轴中拍振现象的分析

卞斌¹, 刘淑琴¹, 贺思艳², 李德广¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电子职业技术学院自动化工程系, 山东 济南 250200)

摘要:为减小拍振现象对高速精密磨床电主轴加工精度的影响,利用磁悬浮轴承自身的传感器及数字信号处理部件,在不外加其他设备的情况下对电主轴中的拍振进行了观察实测。通过时域、频域分析以及小波变换,提取振动信号的特征,经分析发现拍振现象是由转子机械不平衡以及转子动态偏心共同引起的。在磁悬浮轴承电主轴拍振机理的分析基础上,通过磁悬浮轴承系统的主动控制调节主轴动态特性,有针对性地对拍振现象进行抑制,可以有效改善高速精密磨床磁悬浮电主轴系统的稳定性和精密度。

关键词:拍振;磁悬浮轴承;电主轴;小波分析;主动控制

中图分类号:TH133.3; TP13 **文献标志码:**A

Analysis of beat vibration phenomenon in the AMB spindle

BIAN Bin¹, LIU Shu-qin¹, HE Si-yan², LI De-guang¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Automation Engineering, Shandong College of Electronic Technology, Jinan 250200, China)

Abstract: In order to reduce the effect of the beat vibration phenomenon on the machining accuracy of the high-speed precision grinder active magnetic bearing spindle, its own sensor and digital signal processing components of the magnetic bearing were used to observe and measure the beat vibration without other equipment being attached. Time domain analysis, frequency domain analysis and wavelet transform were applied to extract the characteristics of the vibration signal. The analysis showed that the beat vibration phenomenon was caused by rotor mechanical imbalance and the rotor dynamic eccentricity. Based on the mechanism analysis of the beat vibration in the magnetic bearing electric spindle, the active control could be used to adjust the spindle dynamic characteristics, and therefore to realize the suppression of beat vibration phenomenon, the stability and precision of the magnetic levitation high-speed precision grinder spindle system could be effectively improved.

Key words: beat vibration; magnetic bearing; spindle; wavelet analysis; active control

0 引言

磁悬浮轴承是一种新型高性能轴承,利用可控电磁力对铁磁材料的吸引实现对转子的无接触支承,可以实现高速旋转。磁悬浮轴承应用于高速精密磨床电主轴,可以提高磨削加工精度和效率。

拍振是一种特殊的振动,在回转机械的工作中经常会碰到^[1-7],其现象为振幅随时间做周期性缓慢变化的振动。拍振会导致设备寿命缩短,甚至引

起故障。文献[1]研究了压缩机组中的拍振现象,对信号进行了实测分析,确定了拍振故障的报警限值;文献[2]和文献[3]对异步电动机中的拍振现象进行了分析研究;文献[4]研究了航空发动机中拍振产生的机理和特征。时域分析和频谱分析是解释拍振信号的两种常用方法^[8-9],小波变换具有高低频分离的特点,可在不丢失原信号重要信息成分的前提下,突出信号的重要特征,在振动信号分析中也得到了越来越广泛的应用^[10]。磁悬浮轴承消除了旋转部件与支撑机构之间的机械摩擦,但这种新

型支撑的旋转系统中,也存在拍振现象。文献[11]对高速主动磁悬浮轴承转子系统受力分析,建立了径向子系统的力学振动方程,并根据该力学模型解释了系统中的拍振现象。

在磁悬浮支撑的高速精密磨床电主轴系统中,拍振会影响高速旋转的稳定性,降低磨床的磨削精度[12-13]。因此有必要对磁悬浮轴承支撑下,转子拍振的特性和产生机理进行研究。本研究利用磁悬浮轴承自身的传感器,在不外加设备的情况下对高速精密磨床磁悬浮轴承电主轴系统中的拍振现象进行了实测,对拍振信号进行时域、频域分析和小波分析,研究其产生机理,提出抑制拍振的措施。

1 拍振原理

拍振是由两个频率相差较小的振动相互叠加形成的^[14]。设这两个振动分量分别为

$$X_1 = A_1 \cos(\omega_1 + \phi_1), \quad (1)$$

$$X_2 = A_2 \cos(\omega_2 + \phi_2). \quad (2)$$

式中, A_1, A_2 分别为两个振动分量的振幅; ω_1, ω_2 为角速度; ϕ_1, ϕ_2 为初相位。这两个信号的叠加,得

$$X = X_1 + X_2 = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos\left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right]} \times \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \phi + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right), \quad (3)$$

其中 $\tan\phi = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \tan\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$ 。

由式(3)绘制出合成的拍振波形,如图1所示。拍振信号是以 $(\omega_1 - \omega_2)/(4\pi)$ 为调幅频率的振动信号,振动信号本身频率为 $(\omega_1 + \omega_2)/(4\pi)$ 。

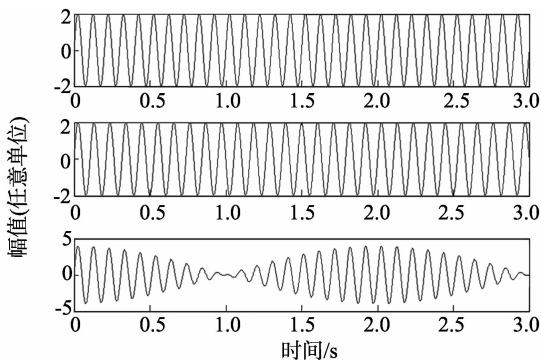


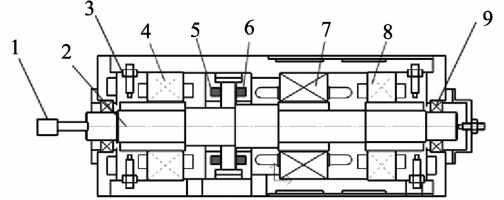
图1 拍振示意图

Fig. 1 The diagram of beat vibrations

2 磁悬浮轴承电主轴中的拍振现象

本研究中用于数控磨床的磁悬浮轴承高速电主

轴系统主要由主轴转子、电机部分、磁悬浮支承系统、辅助支承系统组成^[15-16],如图2所示。磁悬浮轴承系统包括2个径向磁悬浮轴承和1个轴向磁悬浮轴承,它们约束电主轴系统除轴向旋转外的其余5个自由度,为主轴转子提供无接触无摩擦的悬浮支撑,使得转子能够稳定高速地旋转,进行高精度高刚度的磨削。



1—磨头; 2—主轴转子; 3—传感器; 4, 8—径向磁悬浮轴承; 5, 6—轴向磁悬浮轴承; 7—电机; 9—辅助轴承。

图2 高速精密磨床电主轴结构图

Fig. 2 Structure of high-speed precision grinding AMB spindle

主动磁悬浮轴承系统的工作原理如图3所示,它由转子、位移传感器、控制器、功率放大器和电磁铁组成,通过传感器感知转子的位置,并将位置信号传递给控制器,控制器基于实际位置与设定值之间的偏差信号按照一定的控制规律输出控制信号至功率放大器,由功率放大器根据控制信号调节电磁铁线圈上的励磁电流,从而产生适当的电磁力使转子于设定值稳定悬浮。磁悬浮轴承可以利用自身的传感器,无需外接任何设备对转子振动情况进行检测。也可以利用磁悬浮轴承对主轴转子进行主动控制,主动抑制电主轴振动。

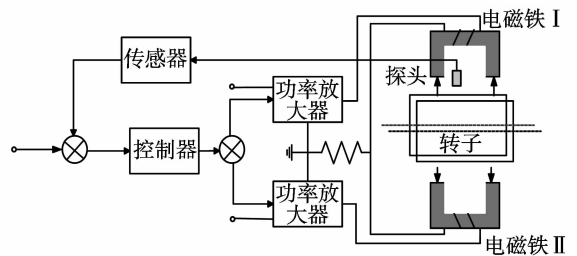


图3 主动磁悬浮轴承系统的工作示意图

Fig. 3 Diagram of active magnetic bearing system

磨床磁悬浮轴承电主轴系统中,共有5路电涡流位移传感器,分别检测电主轴径向前端垂直、水平方向位移,径向后端垂直、水平方向位移,以及轴向位移。在主轴变频器频率设定为333 Hz时,使用这5路传感器测得的振动情况如图4所示。图4中图形自上而下为径向前端垂直位移、径向前端水平位移、径向后端垂直位移和径向后端水平位移。可以看到在径向平面上的位移出现低频振动,而轴向没有。

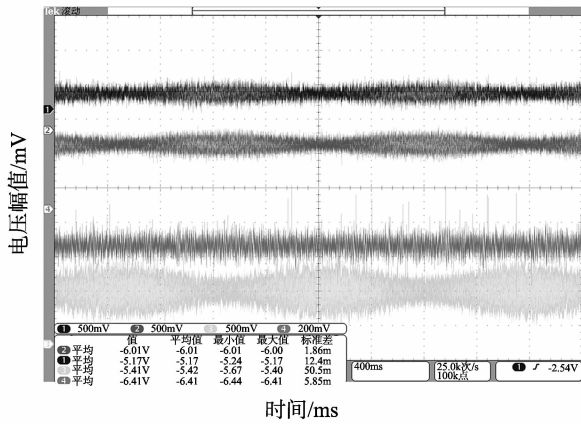


图4 333 Hz 旋转时各位移传感器的输出波形

Fig. 4 Output waveform of the displacement sensor in 333 Hz rotation

径向前端水平方向的位移振动信号如图5(a)所示,对它进行FFT(fast Fourier transform)分析后,发现低频部分没有相应的峰值,只有在332.5 Hz和333 Hz两处频率有较大的峰值,如图5(c)所示。根据拍振理论公式(3),这两个振动信号叠加后的包络线的频率为0.25 Hz,周期为4 s,与图5(a)相符。振动频率为332.75 Hz,周期约为0.003 s,与图5(b)相符。说明观察得到的低频振动是由332.5 Hz和333 Hz这2个频率上的振动叠加产生的拍振现象。

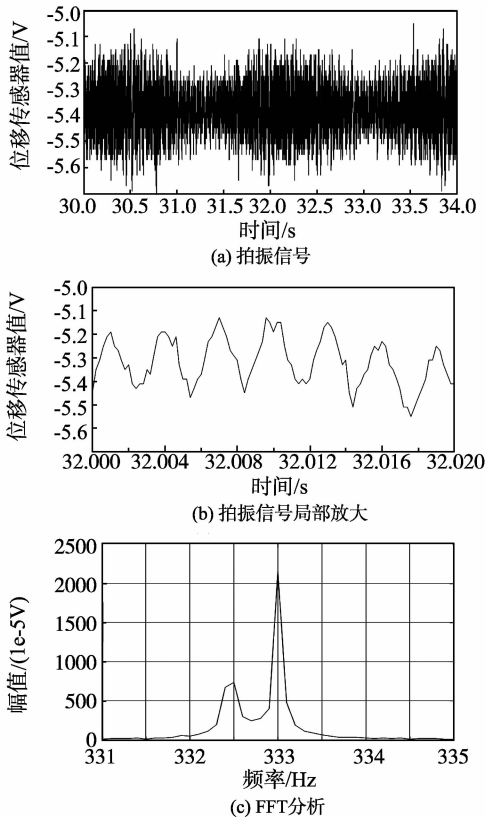


图5 磁悬浮轴承电主轴系统径向前端水平位移信号中的拍振 Fig. 5 Beat vibration in radial horizontal displacement signal of AMB system

3 拍振现象的实验研究及分析

3.1 拍振现象的实验判断

与电主轴有关的振动问题主要分为2种:一种可以称为“机械”问题,一种可以称为“电磁”问题。为了确定磁悬浮轴承电主轴中拍振的来源,本研究设计了2个实验。其中对主轴转子位移的检测使用了磁悬浮轴承中内置的传感器,而无需外接设备。

实验1 随主轴转速上升,观察拍振信号特征的变化。改变变频器频率(即主轴转速),观察拍振变化。由前文的分析可知,拍振现象是由2个相近频率的振动叠加而成,因此这里就直接根据这2个频率的特性来研究拍振。由低到高逐渐增加变频器频率,观察拍振的变化。记录主轴转子振动数据并进行FFT分析,提取频谱中合成拍振的2个频率的幅值,所得结果如表1所示。

表1 转速变化时径向前端水平方向的位移信号中拍振频率分量

Table 1 Frequency components of radial horizontal displacement signal when speed changes

变频器频率/Hz	f_1 频率 /Hz	f_1 幅值 /mV	f_2 频率 /Hz	f_2 幅值 /mV	f_2/f_1
200	199.7	17.2	200	153.0	0.998 5
250	249.6	27.0	250	96.3	0.998 4
300	299.5	19.8	300	69.8	0.998 5
350	349.5	28.6	350	42.3	0.998 4
400	399.4	28.3	400	42.0	0.998 5
450	449.3	32	450	36.3	0.998 4
500	499.2	28	500	38.9	0.998 4

通过实验发现,在转速上升的过程中,振动信号的频谱中始终存在两个突出相近的峰,正是这两个分振动共同合成了观察到的拍振。拍振信号中这两个频率分量的幅值随转速的变化情况如图6所示。其中一个峰与转子转速同频,将其称为 f_1 ;另外一个峰与变频器同频(同步转速),将其称为 f_2 。随着转速上升,振动信号的频谱中, f_1 处的幅值没有明显的变化趋势, f_2 处的幅值基本呈下降趋势。两者合成的拍振的幅度也相应减小。

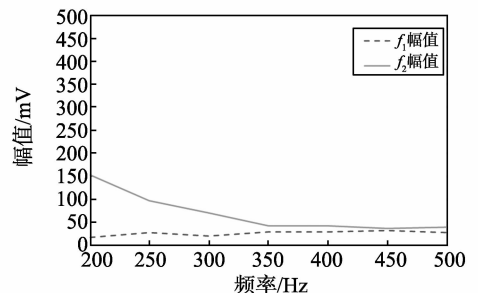


图6 转速变化时拍振信号中频率分量幅值的变化 Fig. 6 Frequency components amplitude of radial horizontal displacement signal when speed changes

实验 2 在旋转过程中,关闭电机电源。变频器设定为 333 Hz,转子在稳定旋转的情况下关闭电动机电源,观察拍振变化,采集到的振动信号如图 7(a)所示。可以看出,在前 15 s 中,时域信号中存在拍振现象,在第 15 s 电动机电源关闭后,拍振现象立即消失。

对电动机电源关闭前的振动信号进行 FFT 分析,在图 7(b)的频谱图上可以看出,此刻的信号中 f_1 和 f_2 频率处存在很大的峰值,它们合成了拍振。图 7(c)是对振动信号进行的小波分析时频图,从图中可以看出,在前 15 s 中,振动信号的频谱中 f_1 和 f_2 处存在峰值;关闭电动机电源后, f_2 (333 Hz) 上的峰立即消失,说明这一频率与电动机工作有关,属于“电磁”原因引起的振动分量。而频率 f_1 在电动机关闭后仍然存在,只是频率值随着主轴转子转速的下降从 332.5 Hz 开始逐步降低,说明 f_1 与电动机工作无关,属于“机械”原因引起的振动分量。

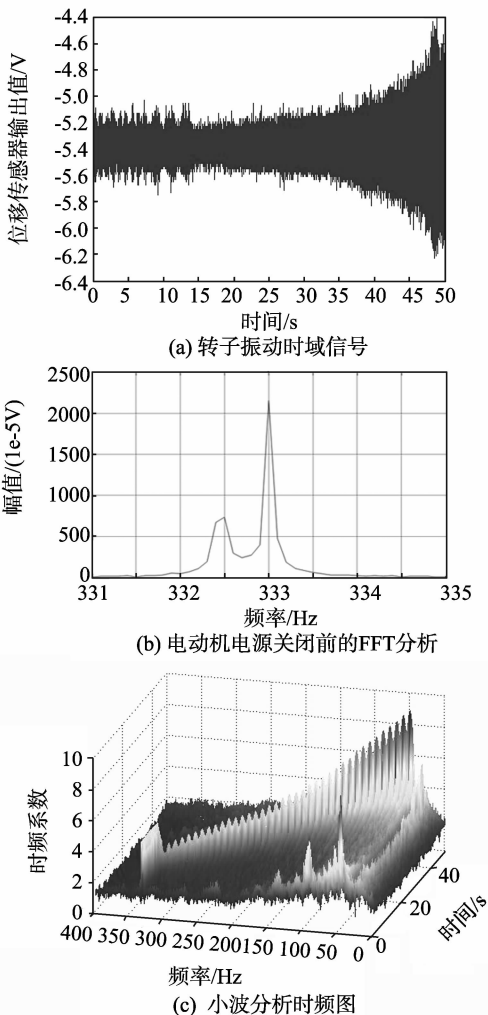


图 7 电机电源关闭时径向前端水平方向的位移信号变化
Fig. 7 The front radial horizontal displacement signal changes as the electrical power was turned off

3.2 拍振机理分析

通过实验 1 和实验 2 的分析可知,磁悬浮轴承电主轴的拍振现象,是由两个频率相近的振动源合成的。其中一个频率 f_1 与转子转速同频,主要振动平面在径向方向;另一个频率 f_2 与电动机工作有关,电动机电源关闭后立即消失,这一频率上的振动是由“电磁”原因引起的。

在高速精密磨床磁悬浮轴承电主轴中,由于机械制造、安装误差或运行过程中热变形等因素,使得转子系统不可避免地存在不平衡、不对心等情况。由这些“机械”原因造成的振动问题列于表 2。

表 2 常见的“机械”问题及其引起的振动类型
Table 2 Common “mechanical” problems and that caused vibration types

问题类型	主要频率分量	主要平面
不平衡	1 倍转子转速	径向
弯轴,不对心(角度)	1、2 倍转子转速	轴向
不对心(不平行)	1、2 倍转子转速	径向
机械松动	1、2 倍转子转速	径向

在磁悬浮轴承电主轴中,合成拍振现象的频率 f_1 上振动分量的特征为与 1 倍转子转速同频,2 倍的转子转速上没有明显的峰值,且主要振动平面在径向。分析表 2 可以判断出 f_1 主要是由转子不平衡造成的振动。

图 8 是电主轴中感应电动机的结构示意图。三相定子线圈中通入变化的电流,产生旋转磁场,在转子导体中感应出电流。转子导体中的电流产生转子磁场,与定子磁场一起,产生使转子旋转的力。当电主轴电动机每一侧的力平衡时,产生驱动转矩,当各方的吸引力不平衡时,就会产生振动,这可能是由电流或气隙的变动引起的。

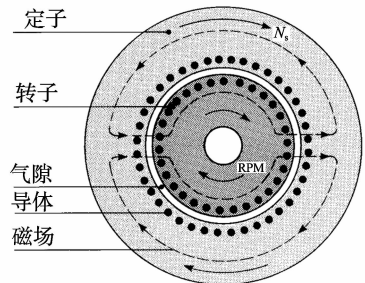


图 8 电主轴电动机示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the spindle motor

传统轴承支撑的回转机械中,由“电磁”原因引起的都是 2 倍变频器频率上的振动^[17]。而磁悬浮轴承电主轴中,“电磁”原因引起了 1 倍变频器频率的振动,这主要是转子的动态偏心引起的^[18]。由于磁悬浮轴承可以进行主动控制,所以可以针对动态偏心设计专门的控制算法,对这部分振动进行抑制。

4 拍振的抑制

由于磁悬浮轴承能够通过在线调节控制参数实现动态特性调节^[19-21],因此工作过程中可以通过对控制参数的调节实现拍振的抑制。通过上面的分析可知,拍振主要是由两个频率相近的振动造成的,这两个振动的原因分别是由转子机械不平衡和转子的动态偏心引起的。因此,拍振现象的减小或者消除,可以通过抑制这两个振动实现。具体可以通过改变控制器参数,增加系统在这两个频率附近的刚度。

使用PID控制器令磁悬浮轴承磨床电主轴处于稳定工作状态,旋转频率为333 Hz,未进行控制参数调整前,电主轴转子振动情况如图9(a)所示,其中有明显地拍振现象;对PID控制参数进行调整,调整后的转子振动如图9(b)所示,可以看出,通过控制器调节,可以对拍振现象进行有效抑制。

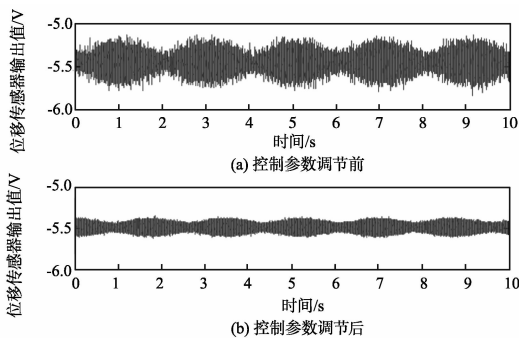


图9 控制参数调节前后的转子拍振

Fig. 9 Rotor beat-vibration before and after the control parameters adjustment

5 结论

通过实验发现,与传统轴承电主轴系统类似,在磁悬浮轴承电主轴系统中也会产生拍振现象。通过对振动信号的测量分析,确定高速精密磨床磁悬浮电主轴系统中拍振的来源是转子转速同频和变频器同频这两个频率上的振动。对磁悬浮轴承电主轴中的拍振信号进行小波变换,分析拍振的产生机理,发现了引起拍振现象的两个相近振动频率中,转子转速同频振动主要是由转子机械不平衡引起的,而变频器同频振动主要是由转子动态偏心引起。本研究对拍振机理的分析,可以帮助改善磁悬浮轴承系统的主动控制,从而抑制拍振现象,并进一步提高精密高速磨床磁悬浮电主轴系统的稳定性和精密度。

参考文献:

[1] 赵晴,贾民平,黄跃光,等. 回转机械振动中的拍频分析

[J]. 东南大学学报:自然科学版,2003,33(1):312-315.

ZHAO Qing, JIA Minping, HUANG Yueguang, et al. Analysis on the vibration clap-frequency of rotation machinery[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(1):312-315.

[2] MA Yunpeng. Analysis of the beat vibration for AC induction motor[J]. S & M Electric Machines, 1985(6): 16-20.

[3] MA Yunpeng. Reanalysis of the beat vibration for AC induction motor[J]. Electric Machines & Control Application, 1989(4):2-7.

[4] 韩军,高德平,胡绚,等. 航空发动机双转子系统的拍振分析[J]. 航空学报,2007,28(11):1369-1373.

HAN Jun, GAO Deping, HU Xuan, et al. Research on beat vibration of dual-rotor for aero-engine [J]. Acta Aeronautica Et Astronaut Ica Sinica, 2007, 28(11): 1369-1373.

[5] 游斌,吴彦东,马丽华,等. 多联机双风轮系统拍振分析与性能优化研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(2): 223-226.

YOU Bin, WU Yandong, MA Lihua, et al. Analysis and optimization of beating vibration noise of double-fan system of the VRF air conditioner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2):223-226.

[6] 姚运仕,冯忠绪,马芳武,等. 冷却风扇“拍振”对转向盘抖动影响的研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2011,36(2):211-215.

YAO Yunshi, FENG Zhongxu, MA Fangwu, et al. Effects of cooling fan beat vibration on steering wheel dithering [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(2):211-215.

[7] 陈茉莉,李舜酩,温卫东,等. 多源拍振分析方法与试验[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(2):202-206.

CHEN Moli, LI Shunming, WEN Weidong, et al. Analysis and experiment on multi-source beat vibration [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2):202-206.

[8] CANUTO E. Active vibration suppression in a suspended fabry-protcavity [J]. ISA Transactions, 2006, 45(3): 329-346.

[9] 王永涛,臧勇,吴迪平. CSP 轧机扭振中“伪拍振”的研究[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(2):209-213.

WANG Yongtao, ZANG Yong, WU Diping. Fake beating vibration in main driving torsion of CSP mill[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2):209-213.

[10] 牟世刚,冯显英,晏志文,等. 基于小波分析的动平衡机不平衡量提取方法研究[J]. 山东大学学报:工学版,2011,41(3):62-67. (下转第142页)

- [14] 余杨, 王穗. 地下渗灌方法在农业灌溉上的应用研究[J]. 云南农业大学学报, 2003(12):422-425.
YU Yang, WANG hui. The study of underground subirrigation application on the agricultural irrigation [J]. Yunnan Agriculture University Press, 2003(12):422-425.
- [15] 杨光, 王晓东, 刘庆华. 渗灌——一种新型节水灌溉技术[J]. 农业与技术, 2004, 24(3):129-130.
YANG guang, WANG Xiaodong, LIU Qinghua. The infiltrating irrigation—a new type of water saving irrigation technology [J]. Agriculture and Technology, 2004, 24(3):129-130.
- [16] 张海峰, 逢德霞. 渗灌技术在公路绿化带中应用的探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2003(12):298-299.
ZHANG Haifeng, FENG Dexia. The discussion of the irrigation technique applications in highway green belts [J]. Inner Mongolia Science Technology and Economy, 2003(12):298-299.
- [17] 黄刚. 高速公路中央分隔带绿化渗灌技术研究[D]. 山东:山东大学, 2008.
- HUANG Gang. Research of highway central space irrigation technology [D]. Shandong:Shandong University, 2008.
- [18] 赵京运. 华北、东北公路工程造价管理络网会论文集[C]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [19] 殷昭峰. 渗灌在高速公路中央分隔带绿化灌溉中的试验研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2011, 7(1):195-199.
- [20] 中国灌溉排水发展中心, 中国农业大学. GB/T 50485-2009, 微灌工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.
- [21] 李道西, 罗金耀, 彭世彰. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2002, 23(4):26-28.
LI Daoxi, LUO Jinyao, PENG Shizhang. Laboratory test research of soil water movement in subsurface drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage Water Journal, 2002, 23(4):26-28.

(编辑:孙培芹)

(上接第137页)

- MU Shigang, FENG Xianying, YAN Zhiwen, et al. Study on unbalanced signal extraction from a dynamic balancing machine based on wavelet analysis [J]. Journal of Shandong University:Engineering Science, 2011, 41(3):62-67.
- [11] 高辉, 徐龙祥. 主动磁悬浮轴承系统拍振现象分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13):104-112.
GAO Hui, XU Longxiang. Analysis of beat vibration for active magnetic bearing system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13):104-112.
- [12] SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings [M]. Switzerland: vdf Hochschulverlag AG, 1994:75-77.
- [13] LIU Shuqin, BIAN Zhongguo, YIN Chunlei. The application of high speed and optimal control in electromagnetic bearing system based on DSP [C]//BENTLY D E, GOSIEWSKI Z. Proceedings of The Second International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery. Gdansk: Bently Pressurized Bearing Press, 2003:4-8.
- [14] WEAVER W Jr, TIMOSHENKO S P, YOUNG D H. Vibration problems in engineering [M]. New York: Wiley-Interscience, 1990:76-78.
- [15] 卞斌, 刘淑琴. 基于 DSP 的磁悬浮轴承电主轴数据监测系统 [C]//于溯源, 徐咏. 第二届中国电磁轴承学术会议论文集. 北京:原子能出版社, 2007:27-30.
BIAN Bin, LIU Shuqin. DSP-based amb spindle data monitoring system [C]//YU Shuyuan, XU Chang. The Second China Magnetic Bearing Conference Proceedings. Beijing:Atomic Energy Press, 2007:27-30.
- [16] BIAN Bin, LIU Shuqin, LI Deguang, et al. Backstepping-based nonlinear robust controller for AMB spindle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 150(1):133-138.
- [17] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [18] ROBINSON R C. Line-frequency magnetic vibration of AC machines [J]. Power Apparatus and Systems, 1962, 81(4):675-679.
- [19] 刘淑琴, 刘庆亮, 陈大融. 基于 DSP 的快速最优 PID 控制在磁悬浮轴承中的应用 [J]. 机械设计与研究, 2003(5):43-45.
LIU Shuqin, LIU Qingliang, CHEN Darong. The application of high speed and optimal control in magnetic suspension bearing system based on DSP [J]. Machine Design and Research, 2003(5):43-45.
- [20] 虞烈. 可控磁悬浮转子系统 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [21] 赵雷, 丛华, 赵鸿宾. 可控磁悬浮轴承刚度与阻尼特性研究 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(4):96-99.
ZHAO Lei, CONG Hua, ZHAO Hongbin. Study on stiffness and damping characteristic of active magnetic bearing [J]. J T singhua Univ: Sci & Tech, 1999, 39(4):96-99.

(编辑:孙培芹)