

基于位移信号的磁悬浮飞轮转速估计

刘虎, 杨振鹏, 武登云

引用本文:

刘虎, 杨振鹏, 武登云. 基于位移信号的磁悬浮飞轮转速估计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1116–1123.

LIU hu, YANG Zhen-peng, WU Deng-yun. Estimation of rotor speed using displacement signals in magnetic suspended flywheel[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1116–1123.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

力自由不平衡控制下的高速磁悬浮飞轮系统在线动平衡

On-line balancing of high-speed magnetic suspended flywheel system under force free control of imbalance

光学精密工程. 2017, 25(7): 1796–1806 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1796>

主被动磁悬浮高速转子系统的自动平衡控制

Autobalancing control of high-speed rotor suspended by active-passive hybrid magnetic bearings

光学精密工程. 2015, 23(3): 714–722 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152303.0714>

主被动磁悬浮转子的不平衡振动自适应控制

Adaptive control for unbalance vibration of active-passive hybrid magnetically suspended rotor

光学精密工程. 2015, 23(1): 122–131 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152301.0122>

磁悬浮飞轮锁紧保护效果的检测

Detection of locking protection effect for magnetic bearing flywheel

光学精密工程. 2015, 23(1): 157–164 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152301.0157>

基于复数相移陷波的磁悬浮转子系统自平衡控制

Autobalancing control of magnetically suspended motor systems based on plural phase-shift notch filter

光学精密工程. 2016, 24(4): 764–770 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0764>

文章编号 1004-924X(2020)05-1116-08

基于位移信号的磁悬浮飞轮转速估计

刘 虎^{1,2}, 杨振鹏^{1,2*}, 武登云³

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 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;

3. 北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘要:针对测速传感器故障情况下磁悬浮飞轮不平衡振动抑制所需的高精度的转速信息的提取,提出了一种通过预先提取转子位移信号和转速信号构建BP神经网络模型,从而通过位移信号实时估计转速的方法;通过MATLAB/Simulink构建了磁悬浮飞轮系统模型,以仿真得到的位移和转速数据训练出一个神经网络模块,以此实时估计转速,得到恒速和变速两种情形下的转速估计结果,并与测速传感器获得的转速进行比较。仿真和实验结果证明,该转速估计方法在恒速和变速时均估计效果良好,实验估计误差不超过20 r/min。

关键词:磁悬浮飞轮;转速估计;BP神经网络;不平衡振动;位移信号

中图分类号:V19 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202805.1116

Estimation of rotor speed using displacement signals in magnetic suspended flywheel

LIU hu^{1,2}, YANG Zhen-peng^{1,2*}, WU Deng-yun³

(1. *School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

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

3. *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)*

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

Abstract: To acquire the high-precision rotational speed information necessary to suppress unbalanced vibration in a magnetic suspension flywheel under the circumstance of speed sensors failure, a BP neural network model was constructed by pre-extracting the rotor displacement signal and the rotational speed signal to estimate the rotational speed in real time using the displacement signal. The magnetic suspension flywheel system model was constructed using MATLAB/Simulink. A neural network module was trained using simulated displacement and rotational speed data to estimate the rotational speed in real time, and the estimation results under constant speed and variable speed were obtained and compared with the system speed acquired from the speed sensor. The simulation and

收稿日期:2019-10-31;修订日期:2019-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61503015, No. 61773038);北京市自然科学基金资助项目(No. 3182024)

experimental results show that the speed estimation method demonstrates good estimation accuracy at both constant speed and variable speed, with an estimation error of less than 20 r/min throughout the experiment.

Key words: magnetic suspended flywheel; rotor speed estimation; Back Propagation (BP) neural network; unbalanced vibration; displacement signal

1 引言

磁悬浮飞轮是目前较理想的姿态控制执行机构^[1-2],所使用的磁悬浮轴承的免接触特性使其具有长使用寿命、在无须润滑的特点^[3-5],而且,磁悬浮飞轮通过数字控制器可以实现主动振动控制,从而对不平衡扰动进行抑制,保证姿态控制精度。

对于磁悬浮飞轮的不平衡振动的抑制问题,国内外学者做了很多研究,可以采取自适应 LMS (Least Mean Square) 算法^[6]、重复控制^[7]、卡尔曼滤波^[8]等方法来实现。其中陷波器^[9-10]是使用较为普遍的方案,而通过陷波器对不平衡的振动过程中转子的精确转速信息不可缺少。

在磁悬浮飞轮系统中,转速的获取通常通过霍尔转速传感器来实现,磁悬浮飞轮通过计算单位时间内传感器上接收到的转子脉冲数量处理后得到转速,可以得到精确的转速信号。由于安装偏差和磁场干扰等因素的存在,传感器测速结果难免有误差,且传感器故障时,失去转速信号将导致系统无法进行振动抑制。此外,对于磁悬浮球等应用,无法安装霍尔传感器或者编码器进行测速。因此,需要考虑无测速传感器情况下的振动抑制方法。文献[11-12]中提出使用自适应观测器、锁相环等方法估计不平衡振动信号的幅值频率,但未考虑倍频信号而无法保证振动控制效果。由于传感器检测面、转子不平衡质量等因素的存在,磁悬浮飞轮转子位移传感器传感器信号中存在丰富同频和倍频分量,为转速检测提供了新的途径。Chen^[13]通过自适应陷波提出磁悬浮转子径向 x, y 两轴同频位移信号,并假设两者同幅度且正交,但由于安装误差及系统参数的不对称,多数系统并不满足位移信号正交和幅度一致的条件。张染^[14]基于位移传感器信号的中高倍频分量提出采用 Hilbert 变换进行经验模态分解和谱分析求取转速,具有较高精度,但由于低频时的倍频成分易

受污染导致该方案不能在全转速情况下适用。

本文提出一种通过飞轮某个方向位移量预测转子转速的估计方法,利用神经网络对非线性模型的拟合优势,在输入输出关系式无法确定的情况下能按照输出误差值调整内部参数使得估计模型符合实际的输入输出。该方法依据已知的位移和转速数据,构建神经网络模型,并通过网络参数调整达到较好训练效果,具有良好的测速精度,实验误差在 20 转左右,相对于张染^[14]所提出的方法,拓展了转速辨识的范围;在 MATLAB/Simulink 中构建了磁悬浮飞轮的模拟系统,并加入神经网络模块进行仿真,并在磁悬浮飞轮样机上进行了转速估计试验,仿真及实验结果体现该方案的可实现性及精度。

2 基于位移信号的转速估计原理

在磁悬浮飞轮系统中,转子运行时会因为各种干扰作用而偏离平衡位置,需要不断调整控制电流从而改变电磁力大小使转子回到期望位置,而这个过程调整的依据便是转子的位移,因而与转速传感器不同,系统中必须载有位移传感器,涡流位移传感器的输出可以表示为:

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

式中: x 表示传感器所测方向位移量, A 表示位移幅值, n 表示谐波次数, ω_0 表示转子转频, φ 表示初始相位。可知位移信号中的同频信号和倍频信号都包含了转子转速信息。

将式(1)写作如下形式:

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[n\omega_0 \left(t + \frac{\varphi}{n\omega_0} \right) \right]. \quad (2)$$

再将式(2)进行傅里叶变换,得到:

$$fft(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \pi A_n e^{\frac{j\varphi n}{\omega_0}} [\delta(\omega - n\omega_0) - \delta(\omega + n\omega_0)], \quad (3)$$

式中 δ 表示冲激函数。

考虑其中频率值大于 0 的成分,得到:

$$fft(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \pi A_n e^{\frac{\varphi}{m\omega_0}} \delta(\omega - n\omega_0). \quad (4)$$

初始相位 φ 在 $[0, 2\pi]$ 区间内变化,相比于分母 $n\omega_0$ 很小,初始相位的变化带来的影响可以忽略不计,可知位移量频域成分是关于转速 ω_0 的函数,但具体函数关系式由于缺乏相关理论研究难以得知。

而神经网络模型具有良好的非线性拟合能力,选定网络的层数、神经元数及激活函数 F 后,通过初始化网络权值 W ,再将位移量 X 作为输入导入网络模型,线性叠加后通过激活函数处理得到预测输出 O ,即:

$$O = F(WX). \quad (5)$$

将网络预测输出 O 与期望输出(转频值) R 比较得到误差值 E ,通过求导等方式用以更新网络权值 W ,重复该过程直至误差 E 符合要求,从而得到一个以位移量 X 和转子转频 R 为输入输出,通过网络权值 X 和激活函数拟合函数特性的网络模型用以估计转速。

图 1 所示为磁悬浮飞轮转子某方向位移信号的瀑布图。对于位移信号中的同频分量,其诱发因素包含转子的不平衡质量、传感器检测面不均匀以及磁场不均匀等,而倍频信号是传感器安装偏差和磁轴承非线性等引起的,磁轴承非线性指的是磁轴承系统的电磁力与转子位移和控制电流之间的非线性关系,这些都是难以避免的因素,因而倍频信号是位移传感器输出中无法避免的成分,且倍频信号包含转子转频信息,因而倍频信号可以充当转频信号获取的一个有效途径。

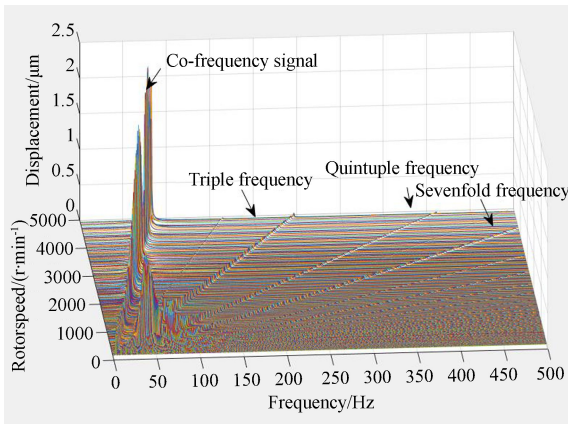


图 1 位移信号瀑布图

Fig. 1 Rotor displacement signal waterfall

3 磁悬浮飞轮系统模型

如图 2 所示为磁悬浮飞轮的结构图^[15],包含一对轴向磁轴承和一个径向磁轴承,其中轴向磁轴承用以控制转子径向扭转和轴向平动,径向磁轴承控制径向平动。磁轴承通过电磁力控制转子悬浮,转子所受电磁力线性化^[16]后公式如下:

$$F = m\ddot{x} = k_x x + k_i i, \quad (6)$$

式中: m 表示转子质量, x 表示转子位移, i 表示控制电流, k_x 表示位移刚度系数, k_i 表示电流刚度系数。

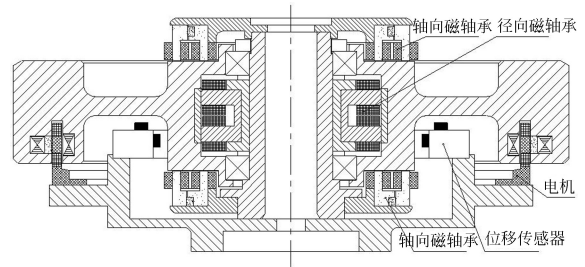


图 2 磁悬浮飞轮结构图

Fig. 2 Configuration of magnetic suspended flywheel

如图 3 所示为磁悬浮飞轮系统示意图,飞轮工作时,通过转子的位移量反馈控制信号和陷波器的振动抑制反馈信号叠加放大,用以调整飞轮中绕组线圈电流值,从而调整飞轮转子所受电磁力,以保持飞轮稳定悬浮工作。

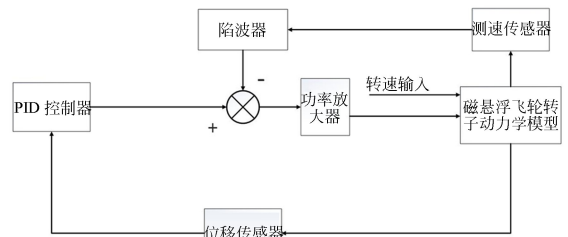


图 3 磁悬浮飞轮系统框图

Fig. 3 Magnetic suspended flywheel system

图 4 所示为飞轮转子的动力学模型,其中 r, i 分别表示输入转速和线圈电流, m 为转子质量, k_b 为静不平衡度(为简化模型,仿真过程仅考虑转子静不平衡), d 为随机噪声。图 5 所示为陷波器结构示意图,其中 ω 为转子转频。

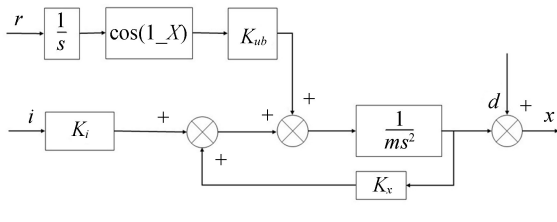


图 4 磁悬浮飞轮转子动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of magnetic suspended flywheel

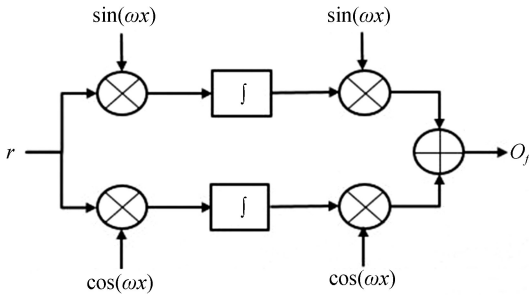


图 5 陷波器结构图

Fig. 5 Configuration of notch filter

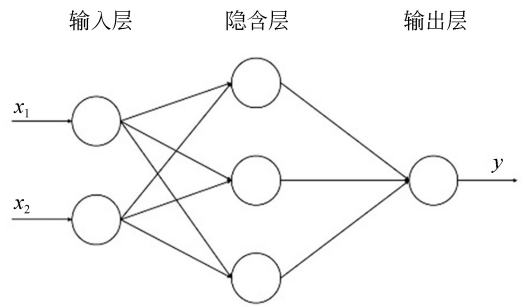


图 6 BP 神经网络示意图

Fig. 6 BP neural network

的学习能力和对信息的处理能力均会大打折扣,然而数量过大时,一方面使网络过分庞大复杂,学习过程陷入局部极小点的可能性增大,达不到最好的效果,另一方面还增加了学习过程的耗时。对隐含层节点数目的选取并没有一个完整理论,但可以通过一个经验公式^[18]提供参考:

$$s = \sqrt{0.43nm + 0.12n^3 + 2.43m + 0.77n + 0.35} + 0.51, \tag{7}$$

式中 m, n 分别表示输出层和输入层神经元数。

4 神经网络训练

由于测速传感器的安装误差等局限性,本文提出通过训练神经网络模型进行转速估计的方案来替代测速传感器,以位移信号和转速信号分别作为模型输入输出,构建经典 BP(Back Propagation)神经网络,通过 LM(Levenberg-Marquardt)法训练,将得到的模型用以实时转速估计。

4.1 BP 神经网络

BP 神经网络^[17]是目前应用最广泛的神经网络,是一种全连接式的前向传播网络,图 6 是一个简单的三层神经网络,由输入层、一个隐含层和输出层组成。网络包含函数信号和误差信号,函数信号从输入层正向传播经过隐含层至网络输出层,而误差信号从输出层反向传播经由隐含层到达输入层,并在此过程中调整相邻网络层之间的权重和偏置。

图 6 中每个单元对于一个神经元,模型如图 7 所示,神经元将输入进行线性组合后经由一个非线性映射的激活函数得到输出值。神经网络具有很强的非线性系统拟合能力,并且可以通过增加隐含层层数和突触数目提升拟合效果。同时,当网络的隐含层中节点(即突触结构)太少,网络

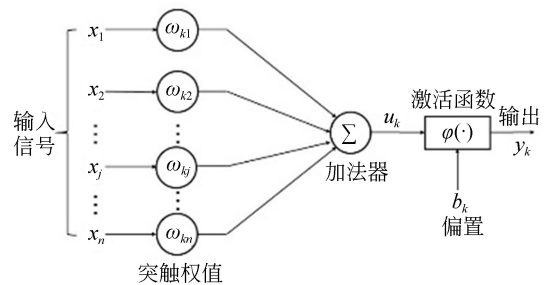


图 7 神经元模型

Fig. 7 Artificial neuron model

4.2 LM 算法(Levenberg-Marquardt)

列文伯格-马夸尔特法(Levenberg-Marquardt, LM 算法)通常是收敛速度最快的训练算法,是有监督学习使用较多的算法,局限之处在于运算过程中相比其他算法需要占用较大存储空间。LM 算法是将梯度下降法和高斯-牛顿法结合而成的^[19],兼具二者的优点,该算法下权重值更新的表达式为:

$$\Delta w = -[J^T(w)J(w) + \mu I]^{-1} J^T(w)e(w), \tag{8}$$

其中: μ 为 LM 法自适应参数, I 为单位矩阵, $e(w)$ 表示神经网络的代价函数, $J(w)$ 代表雅各比矩阵,表达式如式(9)所示:

$$J(\boldsymbol{w}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\boldsymbol{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1(\boldsymbol{w})}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_1(\boldsymbol{w})}{\partial w_n} \\ \frac{\partial e_2(\boldsymbol{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2(\boldsymbol{w})}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_2(\boldsymbol{w})}{\partial w_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial e_n(\boldsymbol{w})}{\partial w_1} & \frac{\partial e_n(\boldsymbol{w})}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_n(\boldsymbol{w})}{\partial w_n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当 μ 取值为 0 时算法变成了高斯-牛顿法,当 μ 趋近无穷时则实现梯度下降法的功能。

5 仿真及实验

5.1 仿真系统参数

磁悬浮飞轮转子系统的结构与仿真参数如表 1、表 2 所示。

表 1 磁悬浮飞轮结构参数

Tab. 1 Structural parameters of magnetic flywheel

参数	数值
转子质量	4.2 kg
径向双边保护间隙	0.22 mm
径向磁轴承通道电流刚度	130.26 N/A
径向磁轴承位移刚度	0.3532×10^6 N/A
静不平衡度	0.5×10^{-5}

表 2 磁悬浮飞轮仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of magnetic flywheel

参数	数值
径向 PID 平动比例系数	0.288
径向 PID 积分比例系数	4
径向 PID 平动微分系数	0.00085
径向 PID 平动不完全微分系数	0.00125
采样频率	5000 Hz

5.2 数据的获取及处理

在仿真系统的基础上,采集一组飞轮升速过程的转速和位移数据,求取位移量的频谱。由位移的瀑布图可知,倍频量中的 1,3,5,7 倍频为主要成分,依据位移量各倍频点幅值的极值特性采集 3,5,7 倍频的位移分量及其频率值和飞轮转速

值,随机选取其中 95% 用作模型构建,其余用以测试模型的准确度。

神经网络模型构建前,为防止因输入输出的数量级差距太大导致网络估计误差增大,同时加快网络训练收敛速度,需先将数据经过线性归一化处理至 $[0,1]$ 区间,归一化表达式如下:

$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min}) \times (x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (10)$$

式中: x, y 分别表示归一化前后的数据; x_{\min}, x_{\max} 分别表示归一化前的数据最值; y_{\min}, y_{\max} 分别表示数据归一化后的最值。

以归一化后的位移量和转速值分别作为输入输出构建一个 5 层,节点数分别为 6,30,50,35,1 的 BP 神经网络,输入层选取传输函数为 tansig 函数,各隐含层和输出层传递函数为 logsig 函数。按照 LM 法进行训练,得到一个用以转速估计的模块。

5.3 仿真结果

基于磁悬浮飞轮转子系统及神经网络转速估计模块,进行飞轮转子恒速和变速两种情况的仿真。

对于转子恒速转动情况的仿真,选取了转频分别为 30 Hz (1800 r/min) 和 85 Hz (5100 r/min) 的低、高速的仿真结果图 8,图 9 所示。对于变速情况,模拟了飞轮以 15 r/s 的速度升速的过程,选取从 3000 r/min 升速至 5000 r/min 的转速估计结果如图 10。

每次转速估计时,需要先采集 2048 个点做傅里叶变换,从频谱中采集倍频极值点,所以具有一定延时性。由图可见,磁悬浮飞轮转子恒速运动时,估计误差均未超过 30 r/min,误差百分比控制在 2% 以内。

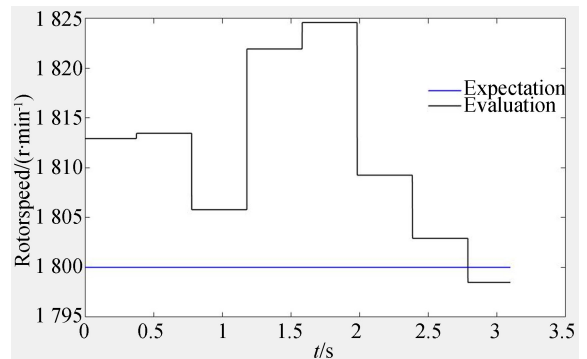


图 8 30 Hz 转速估计结果

Fig. 8 Rotorspeed estimation of 30 Hz

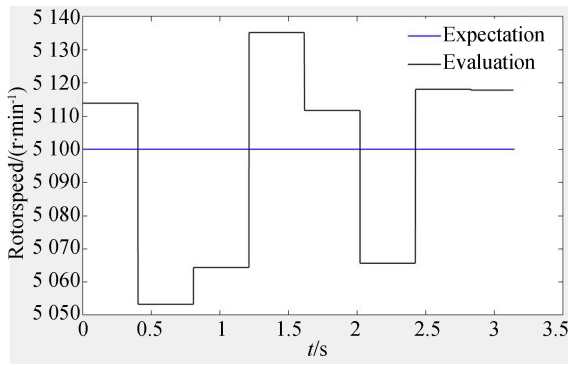


图 9 85 Hz 转速估计结果

Fig. 9 Rotorspeed estimation of 85 Hz

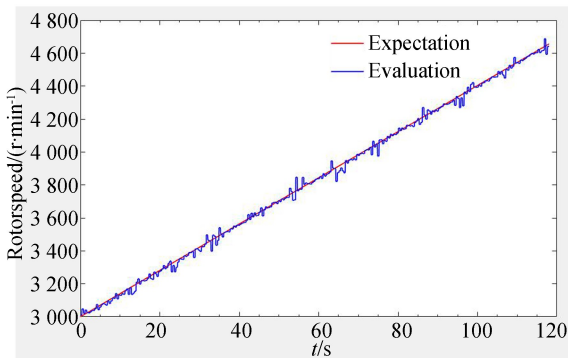


图 10 升速过程转速估计曲线

Fig. 10 Rotorspeed estimation of acceleration process

在磁悬浮飞轮升速仿真过程中,转速的估计曲线具有一些估计误差较大的点,但绝对误差控制在 80 r/min 以内,转速估计精度稍差于飞轮恒速时,误差百分比大约在 2%。

5.4 实验验证

为进一步试验本文所提的转速估计方案的可行性,在某型号的磁悬浮飞轮系统上进行了实验,系统如图 11 所示。

磁悬浮飞轮系统除了飞轮、控制盒、电源及上位机,还借助采用主辅拓扑结构^[20]的型号为 TMS320C6678(如图 12 所示)的 DSP 板块及 FPGA 板块,通过 FPGA 实现采样等功能,经 FPGA 处理的数据通过 DSP 沿仿真器传输至 PC 机,通过 PID 控制算法再将控制信号传回飞轮控制盒实现飞轮稳定悬浮。

将飞轮升速过程所记录的位移数据和转速数据导出至 MATLAB 处理,选择其中一路位移信号取求频谱图像,并由此得到位移倍频量,并归一化处理。并以位移量和对应转速分别作为输入输

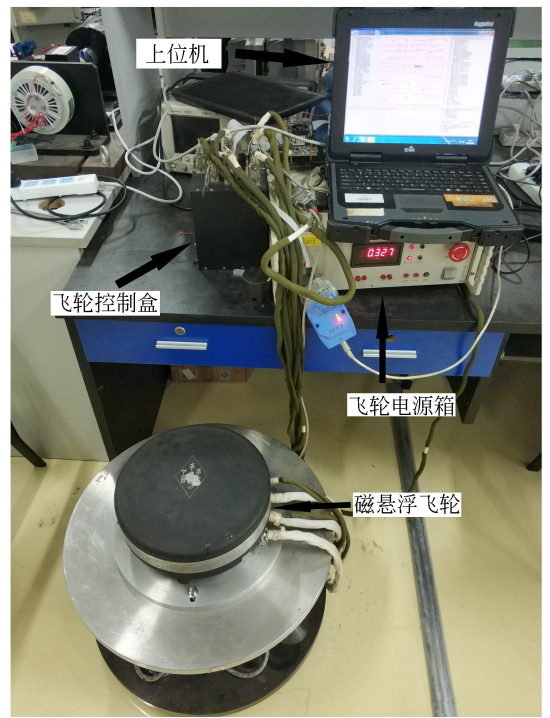


图 11 磁悬浮飞轮及控制系统

Fig. 11 Magnetic suspended flywheel with controlling system

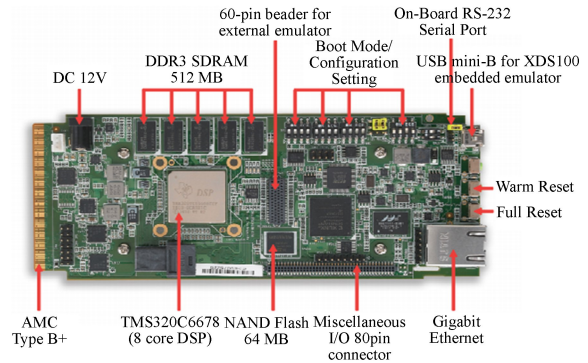


图 12 TMS320C6678 评估板

Fig. 12 Evaluation board of TMS320C6678

出,构建神经网络模型,以 LM 法进行训练,并通过模型参数调整达到最佳训练效果,最终得到一个 5 层,节点数分别为 6,16,20,16,1 的神经网络。同样模型构建过程中,随机选取 90%的数据作为训练。

剩余 10%用以验证模型的准确度。训练数据误差和验证数据误差曲线如图 13,图 14 所示,可以得知本文所提方法的转子转速估计误差在 20 r/min 以内,低转速时误差所占百分比相较于高转速更大,但也控制在 3%以内。

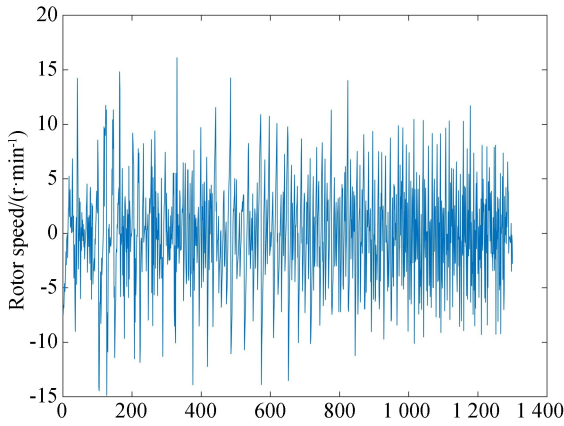


图 13 训练数据绝对误差值

Fig. 13 Absolute error of training datas

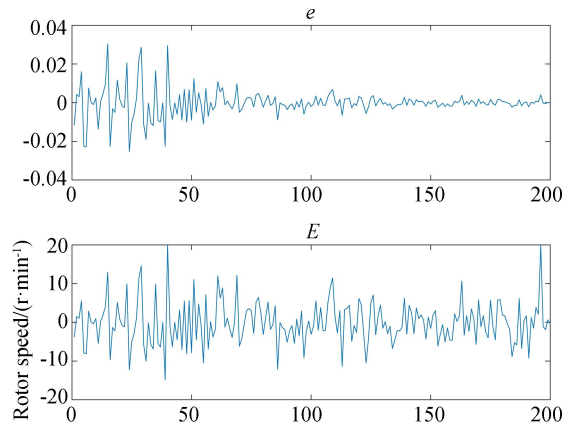


图 14 验证数据相对误差 e 和绝对误差 E

Fig. 14 Absolute error and relative error of validation datas

6 结 论

本文针对无测速传感器的磁悬浮飞轮系统的转速获取问题,提出了一种通过构建输入输出分别为飞轮某通道倍频位移量和转子转速值的模型,实现得到高精度的实时转速数据的方法,并在

MATLAB/Simulink 环境下对此进行了仿真实验。仿真实验分别在低速、高速情形下对转子恒速和变速进行了转速估计,转速误差最多至几十 (r/min)。然后在磁悬浮飞轮控制系统上试验了该方法,转速估计误差小于 $20 r/min$ 。综上,结果表明了该方案用于磁悬浮球等无法配置测速传感器的场景是具有一定可行性的。

参考文献:

- [1] 刘虎, 房建成, 刘刚. 基于磁悬浮动量轮微框架能力的卫星滚动-偏航姿态稳定控制研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1063-1069.
LIU H, FANG J CH, LIU G. Satellite roll-yaw axis attitude stable control based on magnetically suspended momentum wheel with vernier gimbaling capacity [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1063-1069. (in Chinese)
- [2] KENNY B H, JANSEN R, KASCAK P, *et al.*. Integrated power and attitude control with two flywheels [J]. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 2005, 41(4): 1431-1449
- [3] 刘强, 赵勇, 代峰燕, 等. 磁悬浮陀螺飞轮用隐式洛伦兹力磁轴承 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 399-409.
LIU Q, ZHAO Y, DAI F Y, *et al.*. Novel internal Lorentz magnetic bearing for magnetic bearing gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 399-409. (in Chinese)
- [4] 李海涛, 侯林, 韩邦成. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺

框架系统的扰动抑制 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 868-878.

LI H T, HOU L, HAN B CH. Disturbance rejection for the DGMSCMG's gimbal system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 868-878. (in Chinese)

- [5] 韩邦成, 贺赞, 翟鲁鑫, 等. 单框架磁悬浮控制力矩陀螺的损耗计算及热-结构耦合分析 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2463-2474.
HAN B CH, HE Z, ZHAI L X, *et al.*. Loss calculation and thermal-structural coupling analysis of a single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2463-2474. (in Chinese)
- [6] XIANG M, WEI T. Autobalancing of high-speed rotors suspended by magnetic bearings using LMS adaptive feedforward compensation [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014, 20(9): 1428-1436.
- [7] HILLERSTROM, G. Adaptive suppression of vibrations - a repetitive control approach [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(1): 72-78.
- [8] BITTANTIS, SAVARESIS M. Frequency tracking via extended Kalman filter: parameter design

- [C]. *American Control Conference. IEEE*, 2000.
- [9] HERZOG R, BÜHLER P, GÄHLER C. Unbalance compensation using generalized notch filter in the multivariable feedback of magnetic bearings [J]. *Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(5):580-586
- [10] SHIQIANG ZHENG, RUI FENG. Feedforward compensation control of rotor imbalance for high-speed magnetically suspended centrifugal compressors using a novel adaptive notch filter [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 366.
- [11] VAHEDFOROUGH E, SHAFAI B, BEALE S. Estimation and rejection of unknown sinusoidal disturbance using a generalized adaptive forced balanced method [C]. *American Control Conference*, New York, USA, July 9-13, 2007.
- [12] KARIMI-GHARTEMANI M, KARIMA H, IRAVANI M R. A magnitude/phased-locked loop system based on estimation of frequency and in-phase/quadrature amplitudes [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(2):511-517.
- [13] CHEN Q, LIU G, HAN B. Unbalance vibration suppression for AMBs system using adaptive notch filter [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 93:136-150.
- [14] 张染, 刘虎, 樊亚洪. 一种磁悬浮飞轮转子位移信号转速估计方法 [J]. *宇航学报*, 2017, 38(12):1314-1323.
- ZHANG R, LIU H, FAN Y H. Estimation method of rotor speed using signal of displacement sensor in magnetic suspension flywheel [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(12):1314-1323. (in Chinese)
- [15] 张激扬, 陈宗基, 刘虎. 磁悬浮飞轮位移传感器谐波扰动的主动抑制 [J]. *宇航学报*, 2015, 36(11):1289-1295.
- ZHANG J Y, CHEN Z J, LIU H. Active control of multi-frequency vibration caused by displacement sensor runout in magnetic suspension flywheel [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(11):1289-1295. (in Chinese)
- [16] 陈小飞, 吉莉, 刘焜. 基于 BP 神经网络的磁悬浮飞轮控制 [J]. *航天控制*, 2010, 28(5):3-8.
- CHEN X F, JI L, LIU K. Control of magnetic suspended flywheel using bp neural network [J]. *Aerospace Control*, 2010, 28(5):3-8. (in Chinese)
- [17] TANG M, ZHU C. New method of position estimation for self-sensing active magnetic bearings based on artificial neural network [C]. *International Conference on Electrical & Control Engineering, IEEE*, 2010.
- [18] 庞杰. 基于神经网络理论的主动磁悬浮轴承的控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- PANG J. *Research on the Magnetic Bearing Control Based On Neural Network Theory*[D]. Nanjing: Nanyang University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [19] HEGAN M, MENHAJ M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm [J]. *IEEE transactions on Neural Networks*, 1994, Vol. 5(6), pp. 989-993
- [20] 吴灏, 肖吉阳, 范红旗, 等. TMS320C6678 多核 DSP 的核间通信方法 [J]. *电子技术应用*, 2012, 38(9):11-13.
- WU H, XIAO J Y, FAN H Q, et al.. Inter-processor communication method of TMS320C6678 multicore DSP [J]. *Application of Electronic Technique*, 2012, 38(9):11-13. (in Chinese)

作者简介:



刘 虎(1981—),男,河北武邑人,讲师,2003年,2010年于北京航空航天大学分别获得学士、博士学位,主要从事磁悬浮轴承的控制方法及工业应用方面的研究。E-mail: liuhu99@buaa.edu.cn

通讯作者:



杨振鹏(1995—),男,江西抚州人,硕士研究生,2017于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事磁悬浮轴承主动振动控制研究。E-mail: yangzp_zp@163.com