

文章编号:1000-8055(2011)05-1166-06

磁悬浮柔性转子系统变学习速率 单神经元自适应 PID 控制

庄华强, 谢振宇, 章淑镁, 吴凯峰, 石庆才
(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 为同时保证磁悬浮轴承柔性转子系统所需的低频和高频特性, 在一般单神经元 PID(proportion integration differentiation)控制的基础上, 将转速信号引入磁悬浮轴承数字控制器, 在不同转速段选择不同的学习速率以调节控制参数得到合适的磁悬浮轴承的刚度和阻尼. 试验结果表明, 变学习速率单神经元自适应 PID 控制能够明显减小转子在各阶临界转速时的振幅, 有助于磁悬浮轴承柔性转子系统的安全稳定运行.

关 键 词: 主动磁悬浮轴承; 柔性转子; 单神经元;

自适应 PID(proportion integration differentiation)控制; 变学习速率

中图分类号: TH133.3

文献标志码: A

Adaptive PID control for flexible rotor supported by active magnetic bearings based on single neuron with varying learning rates

ZHUANG Hua-qiang, XIE Zhen-yu, ZHANG Shu-ying,
WU Kai-feng, SHI Qing-cai

(College of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: To satisfy the requirements of active magnetic bearing system that operates on both low frequency and high frequency, the signal of the rotation speed was introduced into the control based on normal single neuron PID (proportion integration differentiation) control, and different learning rates at varying rotation speeds were selected to adjust the control parameters and obtain the active magnetic bearings with suitable stiffness and damping. The experimental results show that adaptive PID control based on single neuron with varying learning rates can reduce vibration of the rotor obviously at critical speeds, and help the system operate safely.

Key words: active magnetic bearing; flexible rotor; single neuron;
adaptive PID (proportion integration differentiation) control;
varying learning rates

收稿日期:2010-04-26; 修订日期:2010-05-25

基金项目:国家自然科学基金(10702028,50675105)

作者简介:庄华强(1986—),男,江苏苏州人,硕士生,研究方向为磁悬浮轴承. E-mail:tomorrow1986@126.com

为了减小磁悬浮轴承柔性转子系统越过临界转速时的振动,国内外许多文献从两方面进行了研究:一是采取同步振动抑制技术;二是运用现代控制理论或鲁棒控制理论设计控制方案以提高支承阻尼.德国研究人员 Adler K 等采用在线闭环平衡技术使转子越过二阶临界转速,工作频率达到 170 Hz^[1]. Fujiwara H 等人采用数字 PID(proportion integration differentiation)控制器加陷波器的综合控制方法,实现了转子越过二阶弯曲临界转速,在 250 r/s 处稳定旋转^[2]. Schonhoff U 等人采用 μ 综合理论设计控制器,在试验台上成功实现了转子越过一阶临界转速^[3]. Murata M 等人也将 PID 控制器和 LQ(linear quadratic)控制器相结合,控制转子越过一阶和二阶临界转速时有效地减小了振动^[4]. 赵雷等人设计了鲁棒控制器,使得转子顺利越过二阶弯曲临界转速,工作频率达到 800 Hz^[5]. 谢振宇等人通过在一般磁悬浮轴承转子系统的基础上增加磁悬浮阻尼器的方法,提高了系统在弯曲模态振动时的阻尼,使系统顺利越过二阶弯曲临界转速,在 16 000 r/min 以上稳定运行^[6-7].

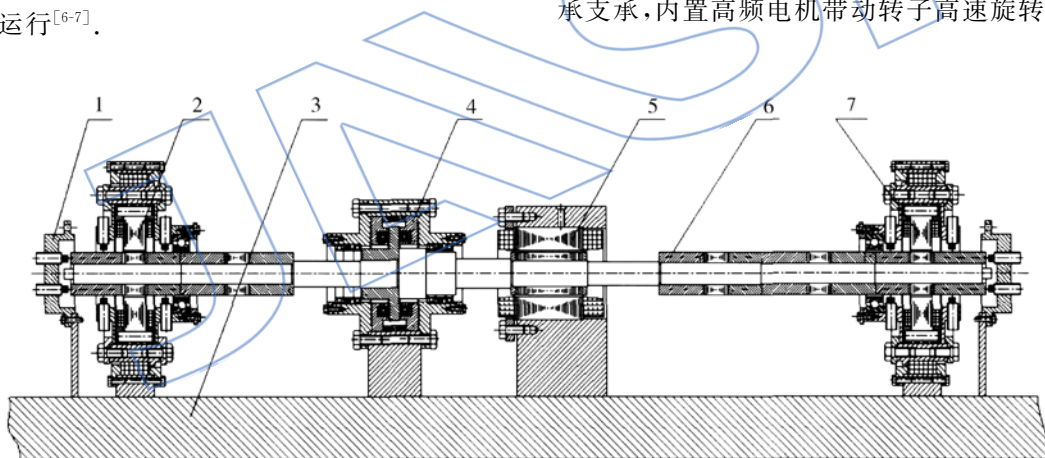
已有的研究结果表明,将磁悬浮轴承支承在金属橡胶环上,构成磁悬浮轴承金属橡胶环组合支承,有利于系统平稳越过第一阶弯曲临界转速^[8]. 但是金属橡胶材料是一种迟滞非线性材料,恢复力不但和系统的瞬时变形状态有关,还取决于系统的变形历史^[9],另外对于磁悬浮轴承柔性转子系统,由于转速范围较大,固定的控制参数很难同时保证系统所需的低频和高频特性.

单神经元作为构成神经网络的基本单位,具有自学习和自适应能力,结构简单且易于应用^[10]. 本文拟通过在不同转速下采用不同学习速率的单神经元自适应 PID 控制策略,补偿金属橡胶环非线性的影响,并同时保证系统所需的低频和低频特性.

1 试验系统

1.1 试验台机械装置

图 1 为组合支承试验装置的机械结构图. 转子由两个径向组合轴承支承和一个轴向磁悬浮轴承支承,内置高频电机带动转子高速旋转.



1 轴向传感器组件(两端); 2, 7 径向组合支承组件(含金属橡胶环、磁悬浮轴承及径向传感器);
3 基座; 4 轴向磁悬浮轴承组件; 5 高频电机组件; 6 转子组件

图 1 试验装置机械结构图

Fig. 1 Schematic illustration of mechanical structure

1.2 转子模型和临界转速

忽略非线性环节的影响,用 k_1 和 k_2 分别表示磁悬浮轴承与金属橡胶环的支承刚度, c_1 和 c_2 分别表示磁悬浮轴承与金属橡胶环的支承阻尼, m_1 和 m_2 分别表示两个径向磁悬浮轴承质量,将转子简化为具有 79 个集总质量及集总转动惯量的节点模型,如图 2 所示. 转子各节点间用不同的

无质量等截面弹性轴段来连接,在第 6 节点和第 74 节点处各有一个磁悬浮轴承金属橡胶环组合支承.

根据模态分析的结果^[8],系统的各阶临界转速为:平动临界转速 1 572 r/min,锥动临界转速 2 316 r/min,一阶弯曲临界转速 3 438 r/min,二阶弯曲临界转速 13 548 r/min.

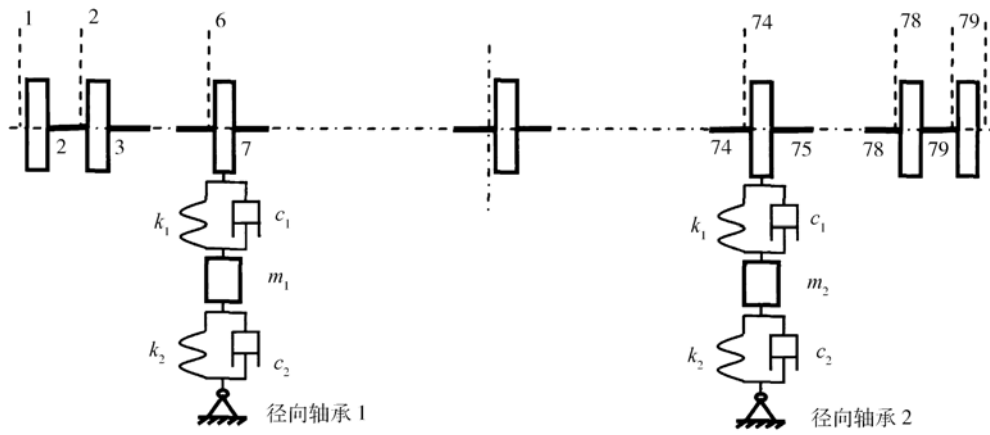


图 2 转子离散化模型

Fig. 2 Dispersed model of the rotor

2 单神经元自适应 PID 控制

2.1 有监督的 Hebb 学习规则

神经网络有监督的 Hebb 学习规则可表示如下:

$$\Delta w_{ij}(k) = n[d_i(k) - o_i(k)]o_i(k)o_j(k) \quad (1)$$

其中 o_i 表示单元 i 的激活值, o_j 表示单元 j 的激活值, d_i 为网络期望目标输出, w_{ij} 表示从 i 单元到 j 单元的连接权值系数。

这种学习规则使神经网络通过关联搜索对未知的外界做出反应,即在教师信号 $d_i(k) - o_i(k)$ 的引导下,对环境进行相关学习和自组织,使相应输出增强或减弱^[8]。

2.2 单神经元自适应 PID 控制

磁悬浮轴承系统单神经元自适应 PID 控制器如图 3 所示。

对 $x_i(k)$ 处理如下所示:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = \sum_{j=1}^k e(j) \\ x_3(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (2)$$

考虑到加权系数 $w_i(k+1)$ 应和神经元的输入、输出和输出的偏差三者的相关函数有关,采用有监督的 Hebb 学习算法时,有

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + nv_i(k) \quad (3)$$

$$v_i(k) = z(k)u(k)x_i(k) \quad (4)$$

其中 $v_i(k)$ 为递进信号, $z(k)$ 为输出误差信号 $z(k) = e(k)$, 相当于 $d_i(k) - o_i(k)$, n 为学习速率, c 为常数, 本文取 $c=0$ 。

单神经元采用有监督的 Hebb 学习算法后, 权值的修正算法为

$$w_i(k+1) = w_i(k) + nz(k)u(k)x_i(k) \quad (5)$$

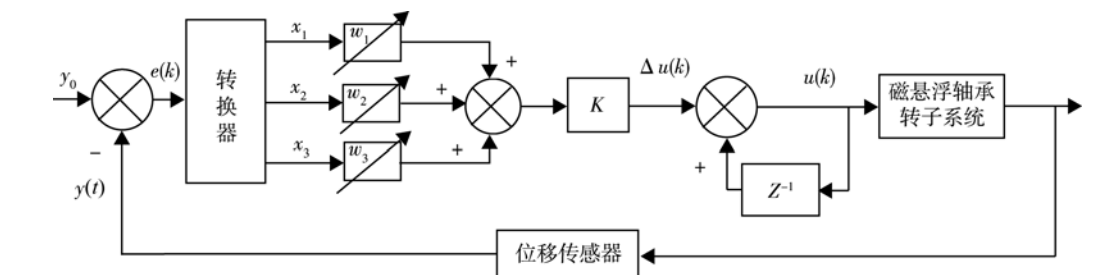


图 3 单神经元自适应 PID 控制原理图

Fig. 3 Illustration of adaptive PID control based on single neuron

通过教师信号 $z(k)$ 的导引,单神经元控制器不断对环境信息进行相关学习和自组织,使相应

的输出(比例控制项、积分控制项和微分控制项)增强或减弱^[11-12]。

由此得到基于有监督的 Hebb 学习算法的单神经元自适应 PID 控制的表达式如下:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \\ w_1(k+1) = w_1(k) + n_p z(k) u(k) x_1(k) \\ w_2(k+1) = w_2(k) + n_i z(k) u(k) x_2(k) \\ w_3(k+1) = w_3(k) + n_d z(k) u(k) x_3(k) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 n_p , n_i , n_d 分别为比例学习速率、积分学习速率、微分学习速率。

3 基于转速的单神经元自适应 PID 控制

3.1 不同参数对系统动态性能的影响

在四种不同控制参数下分别进行高速旋转试验. 试验中控制参数分别如表 1 和表 2 所示. 表中 K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数. 在试验 1 和试验 2 中, K_p 不同, 其余参数相同; 在试验 3 和试验 4 中, K_d 不同, 其余参数相同.

表 1 试验 1 和试验 2 中的控制参数

Table 1 Control parameters in experiments 1 and 2

	K_p	K_i	K_d
试验 1	1.4	1.43	1.8
试验 2	2.6	1.43	1.8

表 2 试验 3 和试验 4 中的控制参数

Table 2 Control parameters in experiments 3 and 4

	K_p	K_i	K_d
试验 3	2.2	1.43	1.1
试验 4	2.2	1.43	2.4

试验系统如图 4 所示, 包括: 机械装置部分、



图 4 试验系统实物照片

Fig. 4 Photo of the set up

传感器及其变换电路、功率放大器、基于 TMS320F2812DSP 的数字控制器、光电转速表、个人电脑等。

试验时, 先将转子稳定悬浮, 然后通过高频电机带动转子由 0 r/min 稳定运行至 14 400 r/min.

系统在运行过程中, 转子的同频振幅由 HP35670A 动态信号分析仪实时获得. 降速过程中, 转子在第 71 节点处随转速变化的同频振幅如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 可知, 在 0~3 600 r/min 转速段, 比例系数 K_p 越小, 微分系数 K_d 越大, 转子的振幅越小; 在 3 600~4 200 r/min 转速段, 比例系数 K_p 越小, 微分系数 K_d 越小, 转子的振幅越小; 在 4 200~7 200 r/min 转速段, 比例系数 K_p 越大,

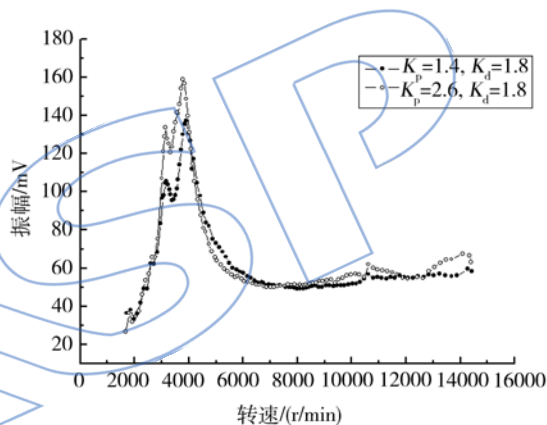


图 5 比例系数 K_p 变化时转子在第 71 节点处的同频振幅

Fig. 5 Vibration of the 71st rotor node under different K_p

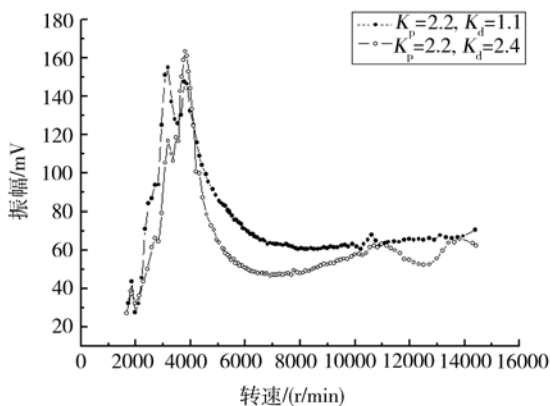


图 6 微分系数 K_d 变化时转子在第 71 节点处的同频振幅

Fig. 6 Vibration of the 71st rotor node under different K_d

微分系数 K_d 越大,转子的振幅越小;在 7 200~14 400 r/min 转速段,比例系数 K_p 越小,微分系数 K_d 越大,转子的振幅越小。

3.2 不同转速段学习速率的维度和程度

学习速率的维度是指在实时调节控制参数时,需要赋给学习速率正值使控制参数增大,还是赋给负值使控制参数减小。学习速率的程度是指学习速率绝对值的大小,在调节控制参数时,该学习速率首先要保证系统不会因改变控制参数过大而失稳,其次,要能够保证改变控制参数取得满意的减振效果。

根据上述试验结果,将整个转速域分为 0~3 600 r/min, 3 600~4 200 r/min, 4 200~7 200 r/min, 7 200~14 400 r/min 四个转速段。各段单神经元学习速率的维度如表 3 所示。表中 n_p 为比例学习速率, n_d 为微分学习速率(积分学习速率维度为正,且在各转速段相同)。

根据试验结果,各转速段单神经元学习速率程度如表 4 所示(积分学习速率 n_i 程度为 1,且在各转速段相同)。

表 3 单神经元学习速率维度

Table 3 Dimension of learning rates on single neuron

转速/(r/min)	n_p	n_d
0~3 600	负	正
3 600~4 200	负	负
4 200~7 200	正	正
7 200~14 400	负	正

表 4 单神经元学习速率程度

Table 4 Degrees of learning rates on single neuron

转速/(r/min)	n_p	n_d
0~3 600	20	100
3 600~4 200	20	80
4 200~7 200	10	50
7 200~14 400	10	50

3.3 高速旋转试验

上述变学习速率方法的有效性可通过系统高速旋转试验进行验证。试验 5 采用常规 PID 对磁悬浮轴承转子系统进行控制,试验 6 采用基于单神经元自适应 PID 对磁悬浮轴承转子系统进行控制。基本控制参数如表 5 所示,学习速率参数则

由表 3 和表 4 综合得到。

在试验 5 和试验 6 中,先将转子稳定悬浮,然后通过高频电机带动转子由 0 r/min 稳定运行至 14 400 r/min。

表 5 试验 5 和试验 6 中的控制参数

Table 5 Control parameters in experiments 5 and 6

	K_p	K_i	K_d
试验 5	1.8	1.43	1.3
试验 6	1.8	1.43	1.3

系统在运行过程中,转子的同频振幅由 HP35670A 动态信号分析仪实时获得。降速过程中,转子在第 71 节点处随转速变化的同频振幅如图 7 所示。

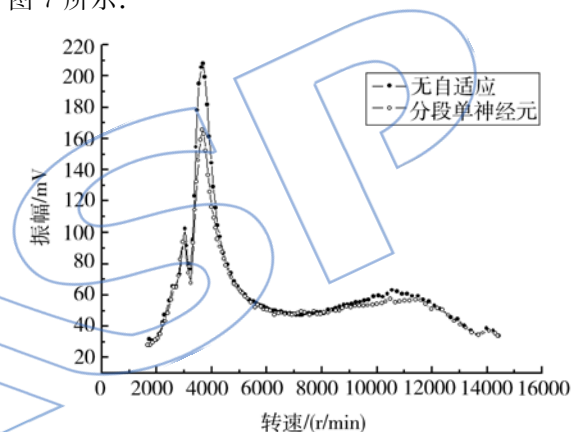


图 7 转子在第 71 节点处的同频振幅

Fig. 7 Vibration of the 71st rotor node

从图 7 看出,转子的振幅在一阶弯曲临界转速(3 600 r/min 左右)附近有显著下降,在二阶弯曲临界转速(10 800 r/min 左右)附近也有明显下降,在 2 880 r/min 转速附近也有下降,这说明基于转速的变学习速率单神经元自适应 PID 控制算法在磁悬浮柔性转子系统整个转速范围均有良好减振作用。

4 结 论

由于磁悬浮轴承柔性转子系统转速范围很大,固定的控制参数很难同时保证系统所需的低频和高频特性。根据不同控制参数对系统动态性能的影响,在一般单神经元自适应 PID 控制的基础上,将转速信号引入数字控制器,在不同转速段采用不同的学习速率。试验证明,该控制方法在一阶弯曲、二阶弯曲临界转速附近具有良好的减振效果,有助于柔性转子系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] Adler K, Schalk C, Nordmann R, et al. Active balancing of a supercritical rotor on active magnetic bearings[R]. Martigny, Switzerland: The 10th International Symposium on Magnetic Bearings, 2006.
- [2] Fujiwara H, Ebina K, Ito M, et al. Control of flexible rotors supported by active magnetic bearings[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Magnetic Bearings. Mito, Japan: Ibaraki University, 2002: 145-150.
- [3] Schonhoff U, LUO Jihao, LI Guoxin, et al. Implementation results of μ -synthesis control for an energy storage fly-wheel test rig[C]//Proc. of the 7th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Zurich: ETH, 2000: 317-322.
- [4] Murata M, Tajima H, Watanabe T, et al. New modeling and methods for flexible rotors with magnetic bearings toward passing through critical speeds caused by elastic mode[R]. Martigny, Switzerland: The 10th International Symposium on Magnetic Bearings, 2006.
- [5] ZHAO Lei, LI Hongwei, GU Huidong, et al. Investigation of an AMBs-flexible rotor for pass through two bending mode frequencies[R]. Martigny, Switzerland: The 10th International Symposium on Magnetic Bearings, 2006.
- [6] 谢振宇, 李克雷, 赵钦泉, 等. 带阻尼器磁悬浮轴承转子系统性能的实验分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1312-1317.
XIE Zhenyu, LI Kelei, ZHAO Qinquan, et al. Experimental analysis on characteristics of the system supported by magnetic bearings and magnetic damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1312-1317. (in Chinese)
- [7] 谢振宇, 张景亭, 高华, 等. 带阻尼器磁悬浮轴承转子系统的不平衡响应[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 327-329.
XIE Zhenyu, ZHANG Jingting, GAO Hua, et al. Unbalance response of active magnetic bearing system with magnetic damper[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(3): 327-329. (in Chinese)
- [8] 谢振宇, 王彤, 张景亭, 等. 磁悬浮轴承金属橡胶环组合支承转子系统的动态性能[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 378-383.
XIE Zhenyu, WANG Tong, ZHANG Jingting, et al. Dynamic characteristics of active magnetic bearing system with metal rubber annuluses[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 378-383. (in Chinese)
- [9] 闫辉, 姜洪源, 刘文剑, 等. 具有迟滞非线性的金属橡胶隔振器的参数识别研究[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5238-5242.
YAN Hui, JIANG Hongyuan, LIU Wenjian, et al. Identification of parameters for metal rubber isolator with hysteretic nonlinearity characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5238-5242. (in Chinese)
- [10] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
TAO Yonghua. New PID control and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 彭天好, 徐兵, 杨华勇. 变频泵控马达调速系统单神经元自适应PID控制[J]. 中国机械工程, 2003, 14(20): 1780-1783.
PENG Tianhao, XU Bing, YANG Huayong. Single neuron adaptive PID control of variable frequency pump-control-motor speed governing system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(20): 1780-1783. (in Chinese)
- [12] 施虎, 龚国芳, 杨华勇, 等. 基于单神经元的盾构推进速度自适应PID控制[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 138-141.
SHI Hu, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Adaptive PID control for thrust speed of shield based on single neuron[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 138-141. (in Chinese)