

6-1-2020

Research of Vibration Control on Nonlinear Rotor System with Fuzzy-PID

Liu Jun

Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechanical System, Tianjin 300384, China;

Zhenwang Liu

Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechanical System, Tianjin 300384, China;

Jianen Chen

Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechanical System, Tianjin 300384, China;

Liangfu Wang

Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechanical System, Tianjin 300384, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of Vibration Control on Nonlinear Rotor System with Fuzzy-PID

Abstract

Abstract: *In order to overcome the problems which are the model of the nonlinear restoring force and the nonlinear vibration control, the vibration control of the nonlinear rotor system and the processing the nonlinear restoring force were accomplished based on the electromagnetic actuator using the FUZZY-PID controller with the fitness function of the variable width and variable geometric shapes. Using the Jeffcott rotor model with the nonlinearities of the forces of the bearing and the electromagnetic actuator, the simulations of the vibration control on the rotor system were performed. Through comparing with the control methods of the traditional PID and the FUZZY-PID and their results, the simulation results show the proposed FUZZY-PID controller can process the model of the nonlinear restoring force by the self-study and the nonlinear vibration control in the vicinities of the major critical speed and sub-harmonic critical speed and the rotor system is improved with a stronger ability of the interference rejection.*

Keywords

FUZZY-PID control, electromagnetic actuator, nonlinear rotor, vibration control, simulation

Recommended Citation

Liu Jun, Liu Zhenwang, Chen Jianen, Wang Liangfu. Research of Vibration Control on Nonlinear Rotor System with Fuzzy-PID[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 200-205.

基于模糊 PID 对转子系统的非线性振动控制的研究

刘军, 刘振旺, 陈建恩, 王亮富

(天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384)

摘要: 针对转子系统的非线性恢复力模型与非线性振动控制问题, 采用变宽度与变形状的隶属度函数构成的模糊规则的模糊 PID 控制的电磁作用器, 实现对转子系统的非线性恢复力的处理和非线性振动的完全控制。使用具有非线性恢复力的轴承和电磁作用器的 Jeffcott 模型, 进行转子系统的非线性振动控制的仿真计算, 并通过使用模糊 PID 与传统 PID 两种控制方法的仿真及比较, 表明使用所提出的模糊 PID 控制器能对非线性恢复力进行自学习的模糊处理和实现转子系统的主谐波和分数谐波区域的完全振动控制, 也强化了转子系统的适应能力。

关键词: 模糊 PID 控制; 电磁作用器; 非线性转子; 振动控制; 仿真

中图分类号: TH113.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 01-0200-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701026

Research of Vibration Control on Nonlinear Rotor System with Fuzzy-PID

Liu Jun, Liu Zhenwang, Chen Jianen, Wang Liangfu

(Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechanical System, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to overcome the problems which are the model of the nonlinear restoring force and the nonlinear vibration control, the vibration control of the nonlinear rotor system and the processing the nonlinear restoring force were accomplished based on the electromagnetic actuator using the FUZZY-PID controller with the fitness function of the variable width and variable geometric shapes. Using the Jeffcott rotor model with the nonlinearities of the forces of the bearing and the electromagnetic actuator, the simulations of the vibration control on the rotor system were performed. Through comparing with the control methods of the traditional PID and the FUZZY-PID and their results, the simulation results show the proposed FUZZY-PID controller can process the model of the nonlinear restoring force by the self-study and the nonlinear vibration control in the vicinities of the major critical speed and sub-harmonic critical speed and the rotor system is improved with a stronger ability of the interference rejection.

Keywords: FUZZY-PID control; electromagnetic actuator; nonlinear rotor; vibration control; simulation

引言

在现代工业中, 旋转机械(如: 大型汽轮发电机, 航空/航天发动机及压缩机)正向高速和精密的

方向发展, 但是由于加工精度、装配或外界扰动的影响, 不平衡质量引起的转子系统振动是难以完全避免的, 随着转速不断提高, 外激振力会呈现平方倍激增, 转子的振动响应也将进一步增强。转子系统振动的发生不但影响了机械系统的精度, 甚至可能引起转子系统的失稳进而导致机械损坏, 发生严重事故。

转子系统的振动抑制问题吸引了国内外学者



收稿日期: 2015-04-27 修回日期: 2015-07-30;
基金项目: 国家自然科学基金(11402170), 天津市自然科学基金(14JCYBJC19400);
作者简介: 刘军(1961-), 男, 北京, 博士, 教授, 研究方向为非线性转子动力学; 刘振旺(1989-), 男, 天津, 硕士, 研究方向旋转机械。

<http://www.china-simulation.com>

• 200 •

的关注。电磁作用器^[1-3]由于无机械接触、无需润滑、无磨损、寿命长和刚度与阻尼可控等优点, 为控制转子系统的振动提供了一种有效的方法。文献[4-5]采用被动式电磁阻尼器, 它的结构类似于电磁轴承, 使用直流电源供电, 无需闭环控制, 研究结果显示该电磁阻尼器提供的阻尼能够有效地控制转子系统的振动幅值。但是, 当转子系统的工作环境改变或受到外力干扰, 系统的振动幅值会出现比较大的波动, 甚至可能引起失稳。文献[6-8]采用主动式电磁作用器实现对转子系统的振动控制, 取得了良好的效果。但上述的研究中电磁作用器的工作点通常设在系统平衡点附近, 使系统中非线性作用力能被线性化处理。该线性化会使系统抗大扰动影响的能力显不足。

杨静等^[9]提出非线性模糊控制方法, 采用语言型控制规则, 适用于解决控制中的非线性问题, 系统具有良好的鲁棒性和抗干扰性。但由于系统中无积分作用, 在重力作用下存在稳态误差。文献[10-12]结合模糊控制和传统 PID 控制算法的优点, 提出了模糊 PID 控制方法, 它对环境的变化有较强的适应能力。文献[13-14]研究了一种模糊参数自适应 PID 控制方法, 该方法超调控制性能优于传统 PID 控制方法, 具有良好的抗扰动性能。但是, 上述研究中大多采用三角形的隶属度函数构建模糊规则, 由于隶属度函数的选择单一, 波形变化快, 易引起输出参数较剧烈的变化, 导致转子系统振动控制的稳定性和抗干扰性相对降低。

本文针对上述研究中的问题以及电磁作用器的非线性电磁力和转子系统的轴承支撑处的非线性恢复力引起的非线性振动问题, 使用模糊 PID 控制器对电磁作用器进行控制, 并实现对转子系统的非线性振动控制。设计并使用变宽度与变形状的隶属度函数构建模糊规则, 同时在建立相应的转子系统的数学模型基础上, 使控制系统既可保证转子系统的振动控制灵敏度, 又彻底改善了转子系统的抗干扰能力。通过使用具有非线性恢复力和电磁作用器的 Jeffcott 转子模型进行数值仿真计算, 计算

结果验证了提出方案的有效性, 并能实现转子系统的主谐波和分数谐波振动的完全控制。

1 转子系统的动力学模型

本研究采用的 Jeffcott 转子模型如图 1 所示, 圆盘安装在水平支撑的转子中央, 转子系统存在一定的偏心量。转子系统一端采用单列深沟球轴承支撑时, 系统的弹性恢复力将会出现不同阶次的非线性项, 它将引起转子系统的非线性振动现象。电磁作用器(Electromagnetic Actuator, EMA)固定在圆盘的外侧, 用来实现转子系统的非线性振动控制。

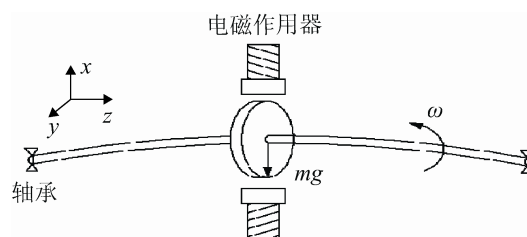


图 1 具有电磁作用器的 Jeffcott 转子模型
Fig.1 Jeffcott Rotor Model with EMA

电磁作用器采用 4 极 C 型结构, 其含有 8 个定子极, 每两个相邻定子磁极的极性相反, 当电磁作用器的电磁线圈通电后, 相邻定子可形成一个 C 形磁通回路, 在 x 和 y 坐标轴的 4 个方向产生电磁合力分别为 F_{mx} 和 F_{my} 。如转子位于第一象限时, 上下和左右线圈的电流分别为 $I_0 - i_x$, $I_0 + i_x$, $I_0 - i_y$ 和 $I_0 + i_y$, 上下左右电磁铁产生的电磁合力分别 F_{mx} 和 F_{my} 。具有电磁作用器作用的转子系统的动力学微分方程^[15]如下:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + k_0 x + N_x = \\ \quad mg + me\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) + F_{mx} \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + k_0 y + N_y = me\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) + F_{my} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为圆盘质量; c 为阻尼系数; k_0 为弹性转子的刚度系数; ω 为旋转速度; t 为时间; e 为圆盘的不均匀质量; φ_0 为转子不平衡方向初始相位角。

电磁作用器的电磁合力 F_{mx} 和 F_{my} 的表达式分别为:

$$\begin{cases} F_{m_x} = k_m \frac{(I_0 - i_x)^2}{(R_0 + \delta - x)^2} - k_m \frac{(I_0 + i_x)^2}{(R_0 + \delta + x)^2} \\ F_{m_y} = k_m \frac{(I_0 - i_y)^2}{(R_0 + \delta - y)^2} - k_m \frac{(I_0 + i_y)^2}{(R_0 + \delta + y)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中： R_0 为气隙； I_0 为偏置电流； i_x 与 i_y 分别为在 x 和 y 方向的控制电流； k_m 和 δ 为电磁作用器的特征常数。

转子系统的微分方程(1)中弹性恢复力的数学模型的非线性项 N_x ， N_y [15-16] 的表达式如下：

$$\begin{cases} N_x = 4 \beta^{(0)} (x^2 + y^2) x + 3 \beta^{(1)} x^2 \\ N_y = 4 \beta^{(0)} (x^2 + y^2) y + 2 \beta^{(1)} x y \end{cases} \quad (3)$$

2 模糊 PID 控制器的设计

由于具有电磁作用器的转子系统是一个非线性系统，并可工作在较高的旋转速度区域，必须通过反馈调节才能使转子系统稳定的工作。系统中非线性电磁力和非线性恢复力的描述模型采用在转子系统的平衡点附近进行线性化处理来表示，然而这种方法适用范围小，缩短了转子系统稳定的工作范围，抗干扰性差。

2.1 模糊规则

本研究针对上述问题，采用如图 2 所示的模糊 PID 控制器，它由两部分组成：可实时调整参数的 PID 控制部分和模糊处理部分。模糊处理部分实现对 PID 三个参数的自动校正和对非线性作用力的自学习模糊处理，可调整参数的 PID 控制部分完成对转子系统的振动控制。因此，选择模糊处理器的输入变量是转子的位移偏差 e 和位移偏差变化率 de/dt ，其模糊论域定义了七个模糊集合，分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输出变量为 PID 参数修正量 Δk_p ， Δk_i 和 Δk_d ，通过模糊 PID 控制器实时输出控制电压 u ，控制电磁铁线圈的电流大小，实现所需转子系统的振动控制的平衡力。根据模糊论域确定量化因子：若变量的基本论域为 $[xx_{min}, xx_{max}]$ ，模糊论域为 $[x_{min}, x_{max}]$ ，量化因子

$k = (x_{max} - x_{min}) / (xx_{max} - xx_{min})$ 。根据上述讨论，绘制表 1 的相关参数，得到其语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域及量化因子。针对转子系统中的非线性振动特性，本研究提出了变宽度与变形状的隶属度函数的模糊规则如图 3 所示。转子位于平衡点附近，该规则采用梯形隶属度函数，它使系统具有稳定的响应。当转子系统的输入处于变化率小时，其输出变化也会比较低，使控制具有高稳定性。相反，转子在平衡点的远处，该规则采用高斯和三角形隶属度函数，它们的波形变化比较剧烈，使系统具有高的分辨率，当转子系统的输入处于变化率大时，它输出变化比较剧烈，控制误差的分辨率比较高，但转子系统的振动被拉回平衡点和使系统具有好的稳定性。

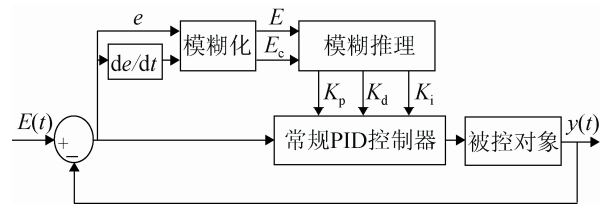


图 2 模糊 PID 控制器结构
Fig.2 FUZZY-PID Controller Structure

表 1 模糊 PID 参数表

Tab.1 FUZZY-PID Parameter List

变量	e	e_c	Δk_p	Δk_i	Δk_d
语言变量	E	E_c	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
基本论域	[-1 1]	[-1 1]	[50 100]	[0 2]	[0 2]
模糊论域	[-3 3]	[-3 3]	[50 100]	[0 2]	[0 2]
量化因子	3	3	1	1	1

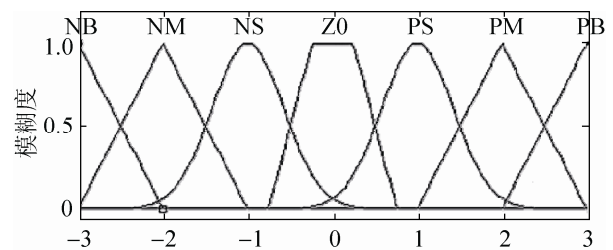


图 3 E 的模糊定义
Fig.3 Fuzzy Definition of E Parameter

2.2 可调整 PID 参数的获取

模糊 PID 控制器为实时的建立 PID 三个控制

参数与输入变量 e 和 de/dt 之间的关系, 需在运行中实时检测 e 和 de/dt 变量并参与计算, 以满足输出参数的实时调整, 其规则如下:

(1) 当 $|e|$ 较大时, 为了消除误差和提高转子系统的响应速度, 系统输出较大的比例系数 k_p 。同时, 为避免初期偏差 e 的瞬间增大和微分过饱和, 使控制超出许可的范围, 系统输出应取较小的微分系数 k_d 。为防止转子系统的阻尼过小和积分饱和, 应限制积分作用或去除。

(2) 当 $|e|$ 和 $|de/dt|$ 处于中间值时, 为使转子系统响应具有较小的超调值, 比例系数 k_d 取小值, 而积分系数 k_i 的取值可适当调整。

(3) 当 $|e|$ 较小时, 为使转子系统有良好的稳定性能, 应增加比例系数 k_p 和积分系数 k_i 的取值, 同时为避免转子系统在工作区附近出现振荡和系统的抗干扰性能降低, 一般当 $|de/dt|$ 较小时, 比例系数 k_p 可取大值; 当 $|de/dt|$ 较大时, 微分系数 k_d 应取小值。

根据上述模糊自调整规则, 可以得到比例系数 k_p 、积分系数 k_i 和微分系数 k_d 等 3 个控制参数, 其 k_p 的模糊控制规则如表 2 所示。由于论文篇幅有限, 参数 k_i 和 k_d 的模糊规则不在此表述了。

表 2 K_p 模糊控制表Tab.2 Fuzzy Control Table of K_p

模糊集	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	Z0	Z0
NM	PB	PB	PM	PS	Z0	Z0	NS
NS	PM	PM	PS	Z0	Z0	NS	NS
Z0	PM	PM	PS	Z0	Z0	NS	NM
PS	PS	PS	Z0	Z0	NS	NS	NM
PM	PS	Z0	Z0	NS	NM	NM	NB
PB	Z0	Z0	NS	NS	NM	NB	NB

3 仿真分析

如图 1 所示转子系统的仿真中所使用的参数如下: 转子的质量 $m=3.55$ kg, 刚度 $k=29\ 314.0$ kg/s², 阻尼 $c=4.03$ kg/s, 转子偏心距 $e=0.1$ mm, 非线性项 $\beta^{(0)}=16\ 931.4$ N/mm³, $\varepsilon^{(1)}=8\ 465.7$ N/mm²。

分析在转速 $\omega=800$ rad/s 时, 非线性转子系统的振动特性的时间历程表现为转子系统刚开始运行时振动比较剧烈, 运行 2 s 左右达到稳定状态, 偏离平衡位置最大位移为 0.24 mm。

3.1 模糊 PID 控制

为实现转子系统振动控制, 采用一组实验数据进行仿真, 部分数据如上述所示, 位移刚度 $a_n=67887$ kg/s², 电流刚度 $b_n=56573$ kgmm/A·s², 功率放大器增益 $k=2$ 。由于转子系统在 x 和 y 方向运动与控制器情况大致相同。所以仿真时只研究 x 方向的位移响应。当转子系统工作时, 给转子系统施加一个幅值为 0.13 的阶跃信号, 分别得到传统 PID、单一隶属度函数和可变形状与宽度的模糊 PID 控制下转子系统的位移响应曲线如图 4 所示, 横坐标为时间 t , 纵坐标为转子系统的非线性振动位移 mm。其中, 实线为传统 PID 控制下转子系统的位移响应曲线, 细虚线为单一隶属度函数的模糊 PID 控制下转子系统的位移响应曲线, 粗虚线为可变形状与宽度的模糊 PID 控制下转子系统的位移响应曲线。采用传统 PID 控制时, 系统的位移响应超调值较大, 超调量为 69.23%, 调节时间为 0.02 s。采用单一隶属度函数的模糊 PID 控制时, 系统参数得到了相对改善, 超调量为 38.46%, 调节时间为 0.01 s。而采用可变形状与宽度的模糊 PID 控制时, 系统位移响应的超调量和调节时间都得到了进一步的控制, 超调量为 23.07%, 调节时间仅为 0.005 s, 转子系统振动也比较平稳。相比于传统 PID 控制和单一隶属度函数的模糊 PID 控制, 可变形状与宽度的模糊 PID 控制具有更小的位移响应, 调节时间更短。在仿真进行到 0.05 s 时, 分别给使用不同的控制方法的转子系统加入干扰信号, 比较传统 PID 和可变形状与宽度的模糊 PID 两种控制方法的抗干扰性的优劣, 仿真结果如图 5 所示。在有外部干扰的情况下, 实线表示使用传统 PID 控制的系统会出现干扰抖动, 其值比较大, 稳定调节时间比较长, 易受到干扰的影响。虚线表示为可变

形状与宽度的模糊 PID 控制的系统，它基本不出现干扰抖动，控制器能实时自我调整参数，使转子系统平稳的转动，具有强的抗干扰能力。

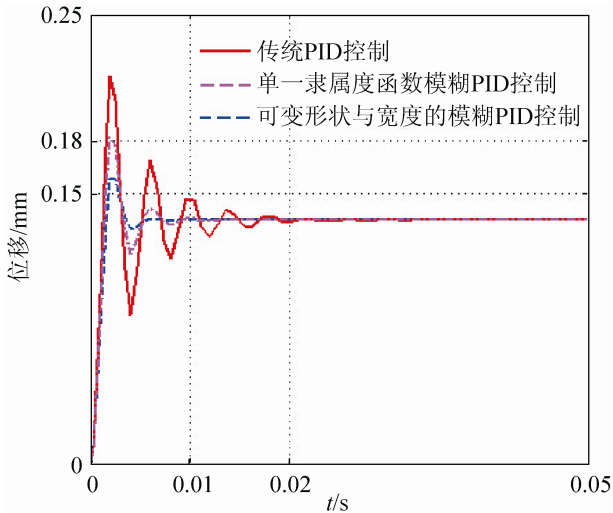


图4 3种类型控制的系统响应曲线

Fig.4 System Resonance Curves of Three Types

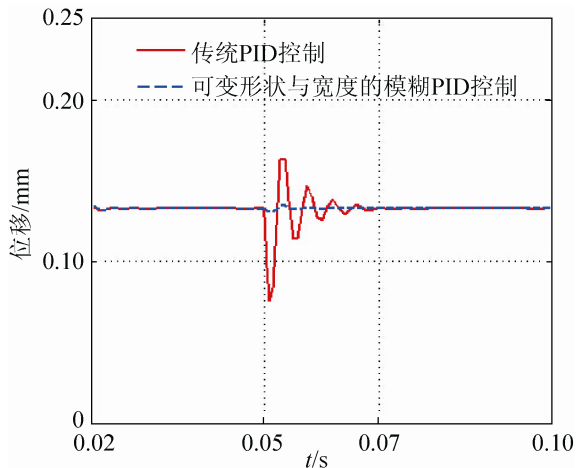


图5 系统受干扰时的位移响应曲线

Fig.5 System Resonance Curves with Disturbance

3.2 数值仿真计算

对转子系统进行非线性振动的数值仿真计算，使用转子系统的动力学微分方程如公式(1)，并进行无量纲化处理，利用龙格-库塔方法进行微分方程求解，参数如上节所示。共振曲线如图6所示，横坐标为转速 ω ，纵坐标为振动幅值 $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ ，曲线1表示转子系统没有电磁作用器的作用。由于非线性电磁力和非线性弹性恢复力的影响，转子系统

在 $\omega = 0.7$ 、 $\omega = 1.4$ 和 $\omega = 2.8$ 时，分别发生超谐波、主谐波和分数谐波共振，同时响应曲线中也产生跳跃现象、渐硬型弯曲和主谐波共振处有多分枝稳定解存在。曲线2表示使用具有模糊PID控制的电磁作用器实现对转子系统的非线性振动控制，结果显示转子系统的超谐波、主谐波和分数谐波共振的峰值得到很好的控制。另外，质量不平衡引起的振幅也被限制在很小的幅值。综上所述，采用具有本研究提出方法控制的电磁作用器能够实现转子系统的非线性振动控制。

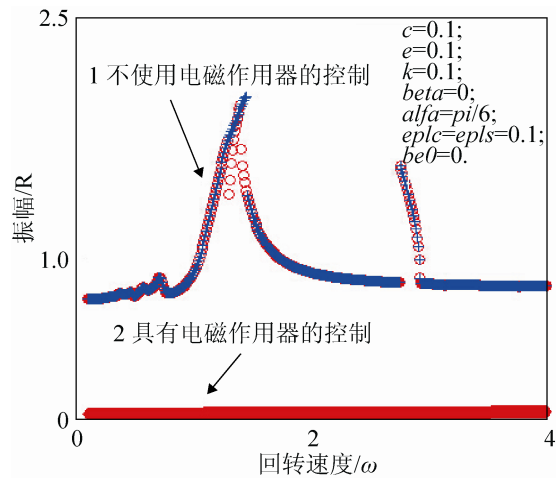


图6 非线性转子系统的共振曲线

Fig.6 Resonance Curves of Nonlinear Rotor System

4 结论

针对转子系统中电磁作用器的非线性电磁力和支撑轴承的非线性弹性恢复力引起的非线性振动问题，本研究采用变宽度与变形形状的隶属度函数的模糊规则，设计了可调整参数的模糊PID控制器控制电磁作用器，也构建了转子系统的动力学模型。通过对两种控制方法的仿真和比较，结果显示使用变宽度与变形形状的隶属度函数构成的模糊PID控制器能够有效的对非线性力进行自学习的模糊处理和实现转子系统在其主谐波共振和分数谐波共振区域内完全振动控制，克服了转子系统的非线性和不稳定性，也彻底改善了转子系统的抗干扰能力和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 顾艳庆. 电磁轴承转子系统的仿真与实验研究 [J]. 科技创新与应用, 2012 (12):15-16 (Gu Y Q. Simulation and experimental study on rotor system of electromagnetic bearing [J]. Technology Innovation and Application, 2012 (12): 15-16.)
- [2] Tang M, Zhu C S. Self-sensing active magnetic bearing using real-time duty cycle [J]. Journal of Zhejiang University Science (S1869-1951), 2013, 14(8): 600-611.
- [3] 唐明, 祝长生. 基于占空比补偿的电磁轴承无传感器运行 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(8): 1418-1423. (Tang M, Zhu C S. Sensorless operation of electromagnetic bearing based on duty ratio compensation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(8): 1418-1423.)
- [4] 郑水英, 马振飞. 被动式电磁阻尼器的原理和实验研究 [J]. 振动工程学报, 2005, 18(1): 80-83. (Zheng S Y and Ma Z F. Principle and Experimental Study of Passive Electromagnetic Dampers [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(1): 80-83.)
- [5] 周瑾, 蔡永飞, 徐龙祥. 被动式电磁阻尼器对磁悬浮转子系统不平衡响应的影响 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 744-747. (Zhou J, Cai Y F, Xu L X. Influence of Passive Electromagnetic Damper on Unbalance Response of Magnetic Suspension Rotor System [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6): 744-747.)
- [6] 占智军. 主动电磁轴承的设计与分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (Zhan Z J. Design and Analysis of Active Magnetic Bearings [D]. Zhejiang, China: Zhejiang University, 2013.)
- [7] 姚剑飞, 王维民, 杨佳丽, 等. 转子-轴承系统中电磁作动器的力学特性分析及实验研究 [J]. 北京化工大学学报, 2012, 39(5): 102-107. (Yao J F, Wang W M, Yang J L, et al. Analysis and experimental study on mechanical characteristics of electromagnetic actuator in rotor - bearing system [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2012, 39(5): 102-107.)
- [8] 常思勤, 李波, 林树森. 一种高功率密度的二自由度电磁执行器 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 56-61. (Chang S Q, Li B, Lin S S. A high power density 2 - DOF electromagnetic actuator [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 56-61.)
- [9] 杨静, 何钦象, 李旗. 主动型磁浮轴承的非线性模糊控制 [J]. 机械科学与技术, 2000, 19(2): 244-245. (Yang J, He Q X, Li Q. Nonlinear fuzzy control of active magnetic bearings [J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19(2): 244-245.)
- [10] Tung P C, Tsai M T, Chen K Y, et al. Design of model-based unbalance compensator with fuzzy gain tuning mechanism for an active magnetic bearing system [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2011, 38(10): 12861-12868.
- [11] Chen H C. Optimal fuzzy PID controller design for an active magnetic bearing system based on adaptive genetic algorithms [J]. Mathematical Structures in Computer Science (S0960-1295), 2014, 24(5): No.e240516:1-14.
- [12] Wang J, Li Zeng. The fuzzy control study for magnetic bearing system [C]// International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. 2011: 858-860.
- [13] 肖闽进, 张建生, 钱显毅. 基于模糊自适应的主动磁悬浮系统稳定性控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 27(3): 390-395. (Xiao M J, Zhang J S, Qian X Y. Stability control of active magnetic suspension system based on fuzzy adaptive [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 27(3): 390-395.)
- [14] 时浩浩, 吕洪波, 孙启国. 面向主动磁轴承不平衡振动问题的模糊 PID 控制 [J]. 制造业自动化, 2013, 67(20): 43-45. (Shi H H, Lu H B, Sun Q G. Fuzzy PID control for unbalanced vibration of active magnetic bearings [J]. Manufacturing Automation, 2013, 67(20): 43-45.)
- [15] Wang L F, Liu J. Preliminary research of delaying crack extension on an aero-engine rotor [C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China. USA: IEEE, 2014: 1751-1756.
- [16] Tsuyoshi I, Liu J. Vibration Control and Unbalance Estimation of a Nonlinear Rotor System Using Disturbance observer [J]. Journal of Vibration and Acoustics (S1048-9002), 2009, 131(6): 837-838.