

基于模糊逻辑系统的 转子振动控制方法研究*

西安交通大学 屈文忠** 姚国治 邱阳 张陵

【摘要】 电流变液作为一种智能材料在振动控制工程领域有着广泛的应用。由于电流变效应具有非线性特性,使得难以设计基于常规控制理论的控制律。本文利用模糊逻辑系统能够逼近非线性函数的特性,设计了电流变阻尼器-转子振动系统自适应模糊控制方案。针对该转子系统的仿真计算表明,转子系统的振幅能够得到有效的抑制,自适应模糊控制器性能良好。

关键词: 转子 振动 控制 模糊控制论

分类号: V 231.92

1 引言

近年来,电流变液作为一种极具发展前景和工程应用价值的新型智能材料,由于其具有反应快、控制方便、能耗小的特点,在振动控制方面有着广泛的应用^[1]。Nikolajsen^[2]等首次将电流变液应用于转子振动控制,姚国治^[3]利用开关控制研究了转子电流变阻尼器的控制效果。性能良好的电流变液在电场的作用下能产生明显的电流变效应,即在液态和固态间进行快速可逆的转化,这种转变极为迅速,仅需几个毫秒,且转变可控,因而可与计算机结合,实现实时控制。作为电流变液装置的工业应用,建立适当的控制方法越来越成为各方面研究的一个重点^[4]。由于电流变效应关于电场强度等参量的非线性特性,难以建立起基于常规控制方法的控制律^[5],因此许多学者致力于发展有关的非线性控制策略,如神经网络控制^[6]等。

模糊控制作为一种非线性智能控制方法近年来已得到广泛应用。本文基于模糊逻辑系统能够逼近任一非线性函数的特性,设计了文献[3]中转子系统电流变阻尼器的自适应模糊控制方法。针对该转子系统的仿真计算表明了该方法的有效性,转子系统的振幅得到了抑制。

2 转子系统自适应模糊控制方法

模糊逻辑系统一般由四部分组成:模糊化、模糊规则库、模糊推理机和解模糊判决。当采用单值模糊化、高斯型隶属函数、乘积形式推理方法、重心法解模糊判决时,可表示为如下^[7]:

$$f(x) = \sum_{l=1}^M y_l \left[\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - c_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right] / \sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_i - c_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right) \right] \quad (1)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, M$ 为模糊规则的总数; $i = 1, 2, \dots, n$ 为模糊逻辑系统输入变量的个数;

1998年6月收稿; 1998年12月收到修改稿。

* 本文系国家自然科学基金资助项目, 编号: 59875068 和中国博士后科学基金资助项目

** 男 30岁 博士 讲师 西安交通大学 710049

y^l 为输出模糊集合的中心; c_i^l 和 d_i^l 为输入变量模糊子集高斯型隶属函数的参数。对于转子振动控制问题, 模糊控制器可以采用 2 个输入变量, 即转子振动的振幅及其变化速度, 即 $n=2$ 。

具有式 (1) 形式的模糊逻辑系统可以在任意精度上一致逼近任何定义在致密集上的非线性函数^[8]。这给出了模糊逻辑系统能够用于非线性建模问题的理论依据。

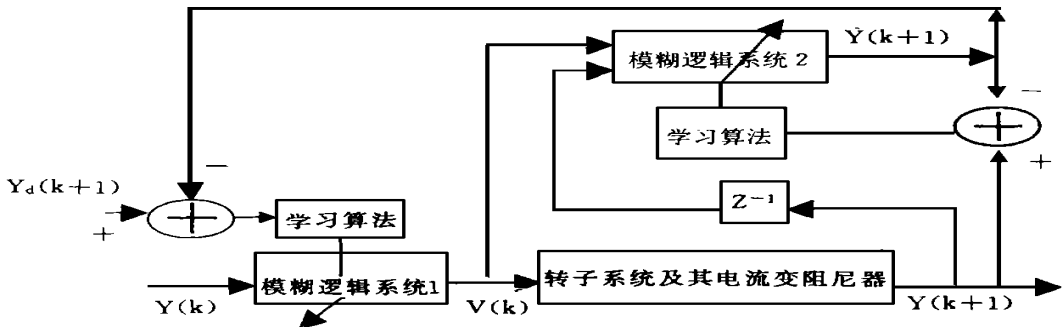


图1 转子系统自适应模糊控制系统框图

图1为本文提出的转子系统自适应模糊控制系统框图。图中模糊逻辑系统1为转子系统的控制器, 其输入向量 $Y(k)$ 为转子振动的输出, 即振动的幅值及其变化率, 输出为控制作用 $V(k)$, 即电流变阻尼器的控制电压。自适应学习信号为: $J = (1/2) [Y_d(k+1) - Y(k+1)]^2$, 其中 $Y(k+1)$ 表示转子系统的实际输出, $Y_d(k+1)$ 为二维期望输出向量, 在此为零向量, 即控制的目的是抑制振动。模糊逻辑系统2为转子系统的建模系统, 用于动态辨识转子系统及其电流变阻尼器模型并且为模糊逻辑系统1提供学习信号 $\partial Y(k)/\partial V(k)$ 。模糊逻辑系统2的输入为 $V(k)$ 和 $Y(k)$, 输出为 $\hat{Y}(k+1)$, 它的学习信号为: $E = (1/2) [Y(k+1) - \hat{Y}(k+1)]^2$ 。

模糊逻辑系统1表示的转子系统模糊控制器可以利用专家的语言信息构成初始模糊控制器。如输入变量振动幅值 R 及其变化速率 $\dot{R}$ 可分别划分为4个和3个模糊子集: $\{ZE, PS, PM, PB\} = \{\text{“零”、“正小”、“正中”、“正大”}\}$, $\{N, ZE, P\} = \{\text{“负”、“零”、“正”}\}$ 。输出变量控制作用电压 V 也可划分为4个模糊子集, 即 $\{ZE, PS, PM, PB\} = \{\text{“零”、“正小”、“正中”、“正大”}\}$ 。上述振动幅值和控制电压的论域是一个正的区间范围, 而一般模糊控制器的论域是一个正负对称的区间。该初始模糊控制器完备的模糊规则共12条。

转子系统在开始阶段受初始模糊控制器的控制。当模糊逻辑系统2可以提供学习信号时, 再通过学习算法在线调整模糊控制器的各个参数 y^l , c_i^l 和 d_i^l , 即成为自适应模糊控制器。

作为辨识器的模糊逻辑系统2可在线选择其初始参数^[7]。在最初 M 时刻内, 不采用学习算法。取辨识器参数 $c_i^l(M) = V_i(l)$, $y^l(M) = f[V(l)]$, $i=1, 2, \dots, n$; $l=1, 2, \dots, M$, 此时 $V(l) = [V_1(l), V_2(l), \dots, V_n(l)]$ 为受控系统和辨识器的输入, $f[V(l)]$ 为模糊逻辑系统2在输入为 $V(l)$ 时的期望输出, 即转子系统的输出。已证明, 只要 d_i^l 的取值足够小, 具有式 (1) 形式的模糊逻辑系统可以将 $l=1, 2, \dots, M$ 对控制对象的输入-输出数据拟合到任意精度。模糊辨识器的在线调整过程从 $M+1$ 时刻开始, 并同时给模糊逻辑系统1的模糊控制器提供学习信号。

式 (1) 表示的模糊逻辑系统的性能在某种程度上取决于其参数 y^l , c_i^l 和 d_i^l , 可以利用误差反向传播学习算法对3个参数进行在线调整, 达到自适应控制的效果。

作为转子系统辨识器的模糊逻辑系统2的学习信号为 $E = (1/2) (f - d)^2$, 其中 f 为模

模糊逻辑系统的输出 $\hat{Y}(k+1)$, d 为网络的期望输出即转子系统的实际输出 $Y(k+1)$ 。学习的目的是使得学习信号即网络输出与期望输出的均方差最小。学习的过程是通过在线调整模糊逻辑系统参数 y^i , c_i^j 和 σ_i^j , 使得 E 最小。3 个参数的在线学习算法分别为:

$$y^i(t+1) = y^i(t) - \alpha[(f - d)/b]z^i + \eta \Delta y^i(t) \quad (2)$$

$$c_i^j(t+1) = c_i^j(t) - \alpha \frac{f-d}{b} (y^i - f) z^i \frac{2[x_i - c_i^j(t)]}{\sigma_i^j(t)} + \eta \Delta c_i^j(t) \quad (3)$$

$$\sigma_i^j(t+1) = \sigma_i^j(t) - \alpha \frac{f-d}{b} (y^i - f) z^i \frac{2[x_i - c_i^j(t)]^2}{\sigma_i^j(t)^3} + \eta \Delta \sigma_i^j(t) \quad (4)$$

$$\text{式中: } z^i = \prod_{j=1}^n \exp\left[-\frac{(x_j - c_i^j)^2}{\sigma_i^j(t)^2}\right], \quad a = \sum_{i=1}^M (y^i z^i), \quad b = \sum_{i=1}^M (z^i), \quad f = \frac{a}{b}$$

α 和 η 分别为学习率和动量因子, 可分别取为 0.3 和 0.5。

自适应模糊逻辑系统的学习算法可归纳为两步, 首先对于输入向量, 计算出模糊逻辑系统的有关参数 z^i , a , b 和 f , 然后利用式 (2) ~ (4) 分别对参数 y^i , c_i^j 和 σ_i^j 进行调整。

模糊逻辑系统 2 从 $M+1$ 时刻起给模糊逻辑系统 1 控制器提供学习信号 $\partial Y(k)/\partial v(k)$:

$$\frac{\partial Y(k)}{\partial v(k)} \approx \frac{\partial \hat{Y}(k)}{\partial v(k)} = \frac{\partial}{\partial v(k)} \frac{\partial}{\partial y^i} = \frac{y^i - f}{b} z^i \left[-\frac{2(x_i - c_i^j)}{\sigma_i^j(t)^2} \right] \quad (5)$$

模糊逻辑系统 1 的学习信号 $J = (1/2) [Y_d(k+1) - Y(k+1)]^2$, 自适应学习算法为:

$$y^i(k+1) = y^i(k) - \alpha(\partial J/\partial y^i)|_k + \eta \Delta y^i(k) \quad (6)$$

$$\text{其中 } \frac{\partial J}{\partial y^i} = -[Y_d(k) - Y(k)] \frac{\partial Y(k)}{\partial v(k)} = -[Y_d(k) - Y(k)] \frac{\partial Y(k)}{\partial y^i} \frac{1}{b} z^i, \quad \frac{\partial Y(k)}{\partial v(k)}$$

可由式 (5) 提供。其另外 2 个参数 c_i^j 和 σ_i^j 的学习算法也可类似于式 (6) 推得。

3 转子系统仿真

转子电流变阻尼器系统的结构可见文献 [3], 其运动微分方程为:

$$\begin{cases} m_D \ddot{x}_D + c_D \dot{x}_D + k_{rr}[x_D - (1 + a/l)x_B] + k_{\varphi}\alpha = m_1 e \omega^2 \cos \omega t \\ m_D \ddot{y}_D + c_D \dot{y}_D + k_{rr}[y_D - (1 + a/l)y_B] + k_{\varphi}\beta = m_1 e \omega^2 \sin \omega t \\ I_d \ddot{\alpha} + I_p \ddot{\beta} + k_{\varphi} x_D + k_{\varphi} \alpha = 0 \\ I_d \ddot{\beta} - I_p \ddot{\alpha} + k_{\varphi} y_D + k_{\varphi} \beta = 0 \\ m_B \ddot{x}_B + k_{rr}[(1 + a/l)x_B - x_D] + K_s x_B + c_B \dot{x}_B + c_{ER} \dot{x}_B = F_{ERx} \\ m_B \ddot{y}_B + k_{rr}[(1 + a/l)y_B - y_D] + K_s y_B + c_B \dot{y}_B + c_{ER} \dot{y}_B = F_{ERy} \end{cases}$$

式中: m_D 和 m_B 分别是悬臂盘和支点处的质量, c_D 和 c_B 为外阻尼, m_1 为悬臂盘处的不平衡质量, e 为偏心距, ω 为转轴的轴旋速度, I_d 和 I_p 分别为悬臂盘的直径转动惯量和极转动惯量, c_{ER} , F_{ERx} 和 F_{ERy} 分别为电流变阻尼器的阻尼系数和 x 和 y 向摩擦力。由于电流变液的屈服应力与电场强度的平方成正比, 因此电流变阻尼器的库仑阻尼力与外加电压 V 是非线性函数。

需要指出的是, 上述转子电流变阻尼器系统模型是仅为数值仿真求取转子振动响应而建立的。在实际过程中, 转子系统是由模糊逻辑系统进行辨识并控制的。

利用本文提出的模糊逻辑控制系统对转子电流变阻尼器系统进行了数值仿真研究。图 2 是转子系统无控和受控时在 x 方向上的振动响应曲线。从图中可以看出电流变阻尼器能够有效地抑制转子系统过临界转速及其它转速下的振动幅值。

模糊控制器具有鲁棒性强的优点。为了验证这一点, 我们在转子系统突加不平衡的情况

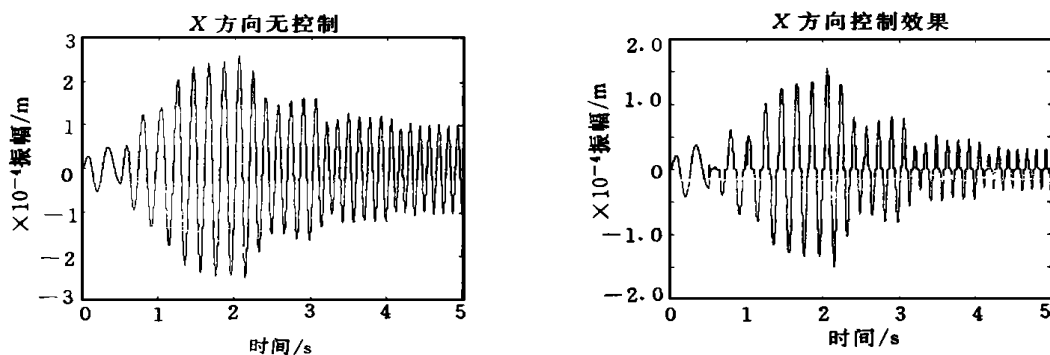


图 2 转子系统无控和受电流变阻尼器模糊控制时的振动响应曲线

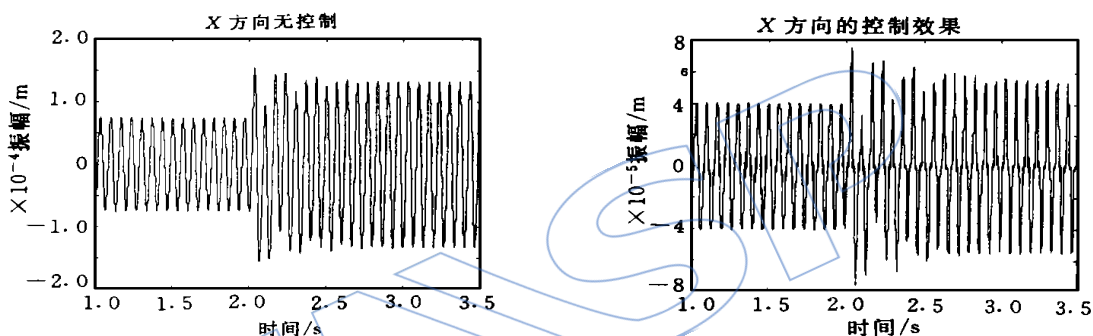


图 3 转子电流变阻尼器系统突加不平衡无控和受控时 x 方向的响应曲线

下利用上述模糊控制器对电流变阻尼器施加控制。图 3 是转子系统突加不平衡无控制及其受控制下的 x 方向振动响应曲线。同样, 模糊控制器对突加不平衡也有良好的控制效果。

参 考 文 献

- 1 Coulter J P, Weiss K D, Carlson J D. Engineering Applications of Electrorheological Materials. J. of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4: 248- 259
- 2 Nikolajsen J L, Hoque M S. An Electroviscous Damper for Rotor Applications. J. of Vibration and Acoustics, Trans ASME, 1990, 112: 440- 443,
- 3 姚国治: [博士学位论文] 西北工业大学, 1997
- 4 Sim S N D, Stanway R, Beck S B M. Proportional Feedback Control of an Electro- Rheological Vibration Damper. J. of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8: 426- 433
- 5 Kim Y S, Wang K W, Lee H S. Feedback Control of ER- Fluid Based Structures for Vibration Suppression. J. of Smart Materials and Structures, 1992, 1: 139- 145
- 6 Morishita S, Ura T. ER- Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neural- Net Controller. J. of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4: 366- 372
- 7 Wang L X. Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1994
- 8 Wang L X, Mendel J M. Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation and Orthogonal Least- Squares Learning. IEEE Trans Neural Networks 1992, 3: 807- 814

behavior of rotor is more complicated. In addition to existence of an unstable limit cycle below the threshold speed, there are large- amplitude stable limit cycles both above and below the threshold speed. That explains why jump phenomena and hysteresis in the amplitude may occur in a rotor-sliding bearing system.

Key Words Rotors Sliding bearing Bifurcation

VIBRATION CONTROL OF ROTOR ELECTRO- RHEOLOGICAL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGICAL SYSTEM

Qu Wenzhong, Yao Guozhi, Qiu Yang

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

ABSTRACT Electro- rheological (ER) fluids have extensive application in the field of vibration control as a kind of intelligent materials. It is very difficult to develop a conventional control system due to the nonlinearity of the ER effect in regard to electric field strength, temperature or shear rate. An adaptive fuzzy control system is composed of a structural identification system and a controller system, and introduced for the ER damper- rotor vibration system due to the function approximator property of fuzzy logical system. A numerical study indicates the validity of the adaptive algorithm and the effective suppression of the rotor vibration.

Key Words Rotor Vibration Control Fuzzy control theory Adaptive algorithms

A ROTATIONAL SYMMETRY FINITE ELEMENT MODEL OF GAS TURBINE ROTOR IN CHARACTERISTICS ANALYSIS

Zhou Chuanyue, Wen Xueyou, Liu Xueyi

(Harbin No. 703 Research Institute, Harbin)

Zou Jingxiang

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT A rotational symmetry finite element model is provided to calculate gas turbine shaft critical speeds and unbalance response analysis. A Fourier series representation allows the three- dimensional shaft geometry to be modeled in a basic section by using three- dimensional element. Unlike a beam element model, a solid element representation allows the actual rotor geometry to be modeled. A matrix reduction technique is used to reduce the degrees of freedom. An engineering example of marine gas turbine rotor is applied to the verification of the provided model.

Key Words Rotor Dynamic characteristics Fourier series Finite Element Model