

一种带有干扰观测器的自适应模糊控制方案

以LT50m模型为研究载体, 针对一类多输入多输出非线性系统研究了一种带有干扰观测器的自适应模糊控制方案。考虑到实际系统中存在外界扰动不确定和数学模型不精确的情况, 首先设计干扰观测器来估计系统的不可测状态; 然后利用模糊系统的万能逼近性, 设计一种具有监督控制能力的自适应模糊控制器; 最后对其进行仿真分析。结果表明, 该控制方案不仅能满足控制准确度的要求, 而且对系统参数及非参数等方面的不确定性有很好的鲁棒性。

李长华^{1, 2}/1. 中煤科工集团唐山研究院有限公司 2. 河北省煤炭洗选工程技术研究中心

0 引言

随着人工智能技术的不断发展, 其在电气自动化方面的应用, 给电气传动控制领域带来了前所未有的革新变化。本文以LT50m模型为研究载体, 以自适应与模糊技术为例探讨了人工智能技术在电气传动控制中的应用。

LT50m模型是500 m口径大型射电望远镜FAST设计方案粗调子系统的缩比模型, 它由六根绳索驱动馈源舱完成大范围的扫描跟踪。实际运行过程中, 馈源舱需要进行高准确度的轨迹跟踪, 而风荷、轨迹突变等外界扰动, 负荷质量、绳索刚度等参数不确定问题以及其他的多种非参数不确定问题, 都会对LT50m模型的运行产生负面作用^[1]。因此, 寻求一种抗干扰能力强、鲁棒性好的控制方案, 对LT50m模型的高准确度轨迹跟踪有着重要的意义。

模糊控制不依赖被控对象的数学模型, 对系统参数摄动和外界扰动具有良好的鲁棒性, 且物理实现简单, 很好

地解决了被控对象参数等不确定的问题。然而模糊控制规则完全是凭操作者的经验或专家知识获取的, 难免存在一定的粗糙性, 使得系统的控制品质受到影响^[2]。为弥补这一不足, 本文将模糊控制与自适应控制相结合, 研究了自适应模糊控制方案。

自适应模糊控制以未知参数的形式对系统动力学模型的不确定性进行描述, 并对其进行实时估计, 根据估计值对模糊控制规则进行在线修正, 以降低系统不确定性的影响。其既具有模糊控制高度非线性、强鲁棒性的特点, 又具有自适应控制自组织、自学习的能力, 对系统参数不确定的问题有很强的免疫性。然而, 自适应模糊控制本质上还是依赖于被控对象的动力学模型的, 在抑制其他非参数方面不确定性的影响时还存在一些不足^[3]。

干扰观测器的基本思想是将系统的建模误差、外界扰动以及其他非参数方面的不确定性均视为一个广义的扰动, 对其进行观测、估计, 并在控制的输入端进行补偿抑制, 提高已有控制器的控制性能。干扰观测器能够有效地降低外界过大的扰动和非参数不确定性对系统造成的影响, 基于干扰观测器的控制方案已经在MIMO非线性系统控制领域得到了广泛的关注^[4-5]。

本文将自适应模糊控制与干扰观测器相结合, 有效地提高了LT50m模型控制的鲁棒性和轨迹跟踪准确度, 为此类不确定系统控制问题的研究提供了一定的思路。



李长华/助理工程师

关键词/Keywords

干扰观测器 ·
自适应模糊控制 ·
LT50m模型 ·
鲁棒性 ·

1 LT50m模型的动力学模型

针对LT50m模型的控制问题,采取了机器人控制领域常用的控制策略——分散控制策略,对每一根绳索子系统进行单独控制,其控制模型为^[6]

$$\begin{cases} \dot{x}_{1i} = x_{2i} \\ \dot{x}_{2i} = -2\xi_i\omega_i x_{2i} - \omega_i^2 x_{1i} - f_i[x_{1i}, x_{2i}, \varsigma(t)] + \frac{k_u u_i}{I} \\ y_i = x_{1i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, y_i 为第 i ($i=1,2,\dots,6$) 根绳索的长度; u_i 为系统的控制输入量; (x_{1i}, x_{2i}) 为系统的状态变量,分别为第 i 根绳索的长度及其变化率; ξ_i, ω_i 分别为绳索的阻尼比率和自然频率; I 为系统等效的转动惯量; k_u 为等效增益系数, $f_i[L_i(t), \dot{L}_i(t), \varsigma(t)]$ 代表系统的不确定性,其中 $\varsigma(t)$ 为外界扰动。

2 干扰观测器的设计

考虑到外界的各种扰动和机构非参数方面的不确定性,系统采用干扰观测器对各种扰动信息进行补偿控制。干扰观测器的一般结构如图1所示。其作用是对扰动 d 、 ξ 造成的实际模型 $G_0(s)$ 与名义模型 $G_n(s)$ 输出的差异 $\hat{d}$ 进行有效的观测、估计,并在控制的输入端进行补偿控制,以抑制这些扰动对系统的影响。

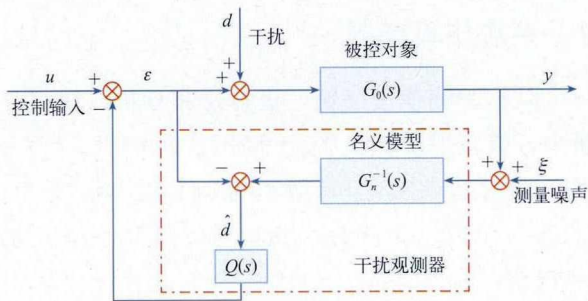


图1 干扰观测器的一般结构

图1中, u 、 y 分别为系统的控制输入量和输出量; $Q(s)$ 为滤波器。进一步分析可求得

$$G_{uy}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_0(s)G_n(s)}{G_n(s) + Q(s)[G_0(s) - G_n(s)]} \quad (2)$$

$$G_{dy}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_0(s)[G_n(s)(1-Q(s))]}{G_n(s) + Q(s)[G_0(s) - G_n(s)]} \quad (3)$$

$$G_{\xi y}(s) = \frac{Y(s)}{\xi(s)} = \frac{G_0(s)Q(s)}{G_n(s) + Q(s)[G_0(s) - G_n(s)]} \quad (4)$$

由此可以看出, $Q(s)$ 是设计的关键。考虑到 d 和 u 大部分都是低频信号,而 ξ 又是高频信号的实际,同时为保证干扰观测器的物理可实现性,应将 $Q(s)$ 设计为低频时幅值接近于1的低通滤波器,且其阶次高于 $G_n(s)$ 的阶次。结合文献[7]中低通滤波器的设计思路,本文中滤波器应具有如下形式,即

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \alpha_k (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N} \quad M=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

$$\alpha_k = \frac{N!}{k!(N-k)!} \quad (6)$$

综合以上分析,考虑到LT50m模型的实际,本文对滤波器作如下设定,即

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1} \quad (7)$$

3 控制器设计

基于以上分析,本文控制方案结构如图2所示。

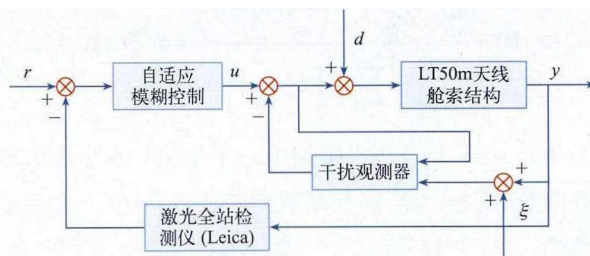


图2 控制系统结构图

控制器的目标是设计一个自适应模糊控制系统,使系统输出 y 能够在一定范围内跟踪理想输出 y_m 。其关键是反馈控制器 $u = u_D(x|\theta)$ 和调整参数向量 θ 的设计。具体步骤如下。

步骤1。将式(1)改写为

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu \\ y = x \end{cases} \quad (8)$$

式中, u 为控制的输入量; y 为输出量; f 、 b 分别为未知函数和未知常数。

步骤2。定义实际输出 y 与理想输出 y_m 的误差为 e , 则有

$$e = y_m - y = y - x \quad (9)$$

$$e = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T \quad (10)$$

约定系统的理想控制规律为

$$u^* = \frac{1}{b} [-f(x) + y_m^{(n)} + K^T e] \quad (11)$$

式中, $K = [k_n, k_{n-1}, \dots, k_1]^T$, 且使 $s^{(n)} + k_1 s^{(n-1)} + \dots + k_n s = 0$ 中 s 的根均小于等于零。

将式(9)、式(10)带入式(8)中可得

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (12)$$

由式(11)中 K 的约束条件, 可得实际输出 y 能够收敛于理想输出 y_m , 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

步骤3. 反馈控制器 $u = u_D(x|\theta)$ 和调整参数向量 θ 的设计。

1) 利用模糊系统万能逼近的能力, 对状态变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 定义 N_i 个模糊集合 $F_i^1, F_i^2, \dots, F_i^{N_i}$, 且对模糊控制规则作如下约定。

if x_1 为 $F_1^{l_1}$ and $\dots$ and x_n 为 $F_n^{l_n}$, then y 为 $y_u^{l_1 \dots l_n}$, 其中, $l_i = 1, 2, \dots, N_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。

2) 根据以上定义, 由中心平均法, 可构造反馈控制器, 即

$$u_D(x|\theta) = \frac{\sum_{l_1=1}^{N_1} \dots \sum_{l_n=1}^{N_n} \bar{y}_u^{l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^{l_i}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{N_1} \dots \sum_{l_n=1}^{N_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^{l_i}(x_i) \right)} = \theta^T \xi(x) \quad (13)$$

式中, $\bar{y}_u^{l_1 \dots l_n}$ 为 $y_u^{l_1 \dots l_n}$ 的模糊中心平均值; θ 为调整参数向量; $\xi(x)$ 为模糊基函数向量, 且其第 $l_1 \dots l_n$ 个元素为

$$\xi_{l_1 \dots l_n}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^{l_i}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{N_1} \dots \sum_{l_n=1}^{N_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i}^{l_i}(x_i) \right)} \quad (14)$$

步骤4. 设计调整参数向量 θ 的自适应控制规律。

1) 将 u 和 u^* 分别带入式(8), 可得

$$e^{(n)} = -K^T e + b[u^* - u_D(x|\theta)] \quad (15)$$

$$\text{令 } \Lambda = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & -k_1 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{pmatrix}.$$

则轨迹跟踪误差状态方程式(15)可表示为

$$\dot{e} = \Lambda e + b[u^* - u_D(x|\theta)] \quad (16)$$

将式(13)带入式(16)进一步等价变化得

$$\dot{e} = \Lambda e + b(\theta^* - \theta)^T \xi(x) - b\omega \quad (17)$$

其中, $\theta^* = \arg \min_{\theta \in R^{n+1}} \left[\sup_{x \in R^n} |u_D(x|\theta) - u^*| \right]$ 为最优参数, $\omega = u_D(x|\theta^*) - u^*$ 为最小逼近误差。

2) 求解自适应规律。定义Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b}{2\gamma} (\theta^* - \theta)^T (\theta^* - \theta) \quad (18)$$

其中, γ 为正常数; P 为一个正定矩阵且满足 $A^T P + P A = -Q$, Q 为任意一个 $n \times n$ 的正定矩阵。

对其求导, 并将式(17)带入, 得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e - \frac{b}{\gamma} (\theta^* - \theta)^T [\gamma e^T P_n \xi(x) - \dot{\theta}] - e^T P_n b \omega \quad (19)$$

式中, P_n 为矩阵 P 的最后一列。

选择自适应变化规律为 $\dot{\theta} = \gamma e^T P_n \xi(x)$, 则有

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P_n b \omega \quad (20)$$

当 $|e^T P_n b \omega| < \frac{1}{2} e^T Q e$ 时, $\dot{V}$ 为负。因此, 在此自适应变化规律下, 只要设计足够多的模糊系统控制规则, 便可使反馈模糊控制器 $u_D(x|\theta)$ 无限地接近于理想控制规律 u^* , 且保持系统的稳定性。

4 系统仿真结果

以LT50m模型为例, 进行仿真分析。仿真分析中, 模型相关参数为 $\xi_i = 0.702$, $\omega_i = 0.1$, $k_u/I = 0.1$, 考虑到参数及非参数不确定性的影响, 取 $f = 0.32[\sin(0.8t) \sin(1.1t) \sin(t) \sin(1.5t) \sin(0.9t) \sin(1.5t)]^{T[8]}$ 。

Matlab仿真中, 白噪声幅值 $\xi = 0.02$, 控制器的参数如下: $\tau = 0.51$, $k_1 = 5$, $k_2 = 0.01$, $\gamma = 100$,

$Q = \begin{pmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{pmatrix}$; 反馈模糊控制器 $u_D(x|\theta)$ 中误差 e 及其导数 e_c 的论域均为 $(-3, 3)$, 隶属函数为

$$\begin{cases} \mu_{F_1}(x_i) = 1 / \{1 + \exp[5(x_i + 2)]\} \\ \mu_{F_2}(x_i) = \exp[-(x_i + 1.5)^2] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mu_{F_1^3}(x_i) = \exp[-(x_i + 0.5)^2] \\ \mu_{F_1^4}(x_i) = \exp[-(x_i - 0.5)^2] \\ \mu_{F_1^5}(x_i) = \exp[-(x_i - 1.5)^2] \\ \mu_{F_1^6}(x_i) = 1 / \{1 + \exp[-5(x_i - 2)]\} \end{cases} \quad i = 1, 2$$

图3、图4分别为轨迹跟踪目标为 $\sin(t)(m)$ 、仿真时间为10 s时, 1[#]绳索(其他类同)的跟踪轨迹及其误差曲线, 由图4可见, 轨迹跟踪误差在 ± 5 mm以内, 满足LT50m模型轨迹跟踪准确度的要求, 鲁棒性良好。图5、图6为去掉干扰观测器条件下绳索的跟踪轨迹及其误差曲线, 对比图3、图4可以看出, 干扰观测器对建模误差、风荷扰动和测量噪声等扰动有很好的抑制作用。图7、图8为系统转动惯量变为原来的两倍, 即 $k_u/I = 0.05$,

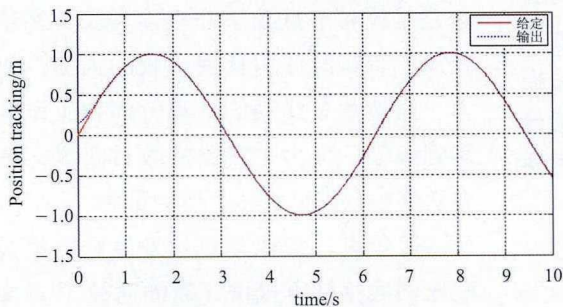


图3 绳索长度的跟踪轨迹

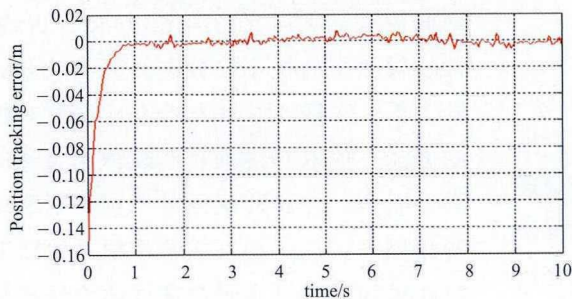


图4 绳索长度的轨迹误差

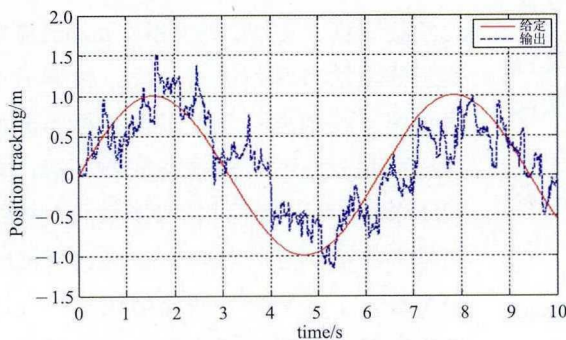


图5 无干扰观测器时绳索长度的跟踪轨迹

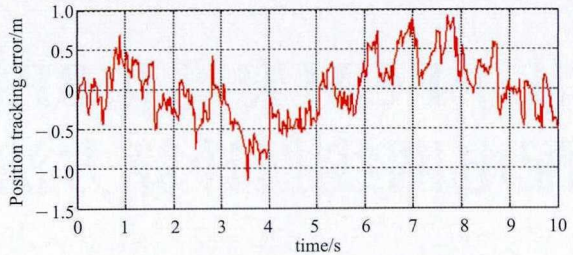


图6 无干扰观测器时绳索长度的轨迹误差

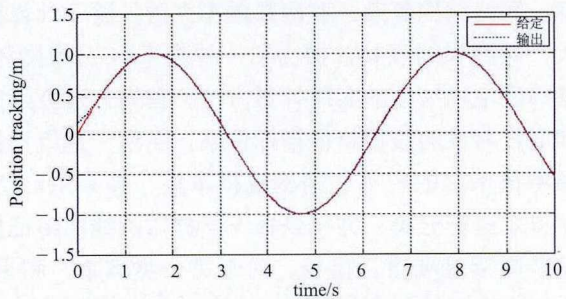


图7 系统转动惯量改变时绳索长度的跟踪轨迹

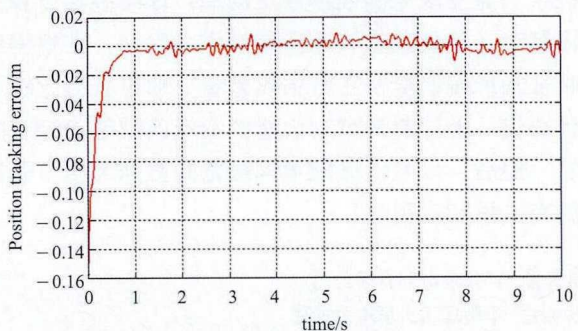


图8 系统转动惯量改变时绳索长度的轨迹误差

其他条件均不变时, 系统的跟踪轨迹及其误差曲线。实验表明, 在系统被控对象模型发生微小的变化时, 系统仍就有着良好轨迹跟踪性能, 本文所设计的控制器鲁棒性明显, 免疫性强, 对不同的非线性系统有着一定的通用性。

5 结束语

本文以LT50m模型为研究载体, 针对其数学模型不精确和外界扰动不确定两方面问题进行分析, 研究了一种带有干扰观测器的自适应模糊控制方案。Matlab仿真结果表明, 该控制方案能满足轨迹跟踪的准确度要求, 鲁棒性良好, 对外界扰动也有较强的抑制作用。为此类不确定系统控制问题的研究提供了一定的思路。

(下转第49页)

- 22 (2): 79-82.
- [6] 李秀卿, 赵丽娜, 孟庆然, 等. IGA优化的神经网络计算配电网理论线损 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (5): 87-91.
- [7] 文福拴, 韩祯祥. 联合采用Kohonen模型和BP模型的配电网线损计算 [J]. 电工技术学报, 1993 (3): 16-20.
- [8] 黄训诚, 何方国, 齐欢. 基于支持向量回归的配电网线损计算模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (18): 51-54.
- [9] 张勇军, 石辉, 翟伟芳, 等. 局域层次分析法—灰色综合关联及多灰色模型组合建模的线损率预测 [J]. 电网技术, 2011, 35 (6): 71-76.
- [10] 刘涛, 杨劲锋, 阙华坤, 等. 基于聚类的线损分析研究 [J]. 华东电力, 2013, 41 (7): 1452-1455.
- [11] 姜惠兰, 安敏, 刘晓津, 等. 基于动态聚类算法径向基函数网络的配电网线损计算 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10): 35-39.
- [12] 伍忠东, 高新波, 谢维信. 基于核方法的分类属性数据集模糊聚类算法 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004 (9): 23-28.
- [13] 肖位枢. 模糊数学基础及应用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [14] 曲福恒, 崔广才. 模糊聚类算法及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [15] 王德明, 王莉, 张广明. 基于遗传BP神经网络的短期风速预测模型 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46 (5): 837-841.
- [16] 李松, 刘力军, 翟曼. 改进粒子群算法优化BP神经网络的短时交通流预测 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32 (9): 2045-2049.
- (收稿日期: 2016-12-10) **EA**

(上接第43页)

然而本文仅是在Matlab数值仿真的基础上对此类不确定系统的控制问题进行了必要的分析, 有必要根据其机构模型, 构建其ADAMS 模型, 并结合Matlab仿真软件进行联合仿真, 以进一步验证系统模型的正确性和算法的可行性。同时, 若将所有理论分析应用于实际, 还需要一套完整的硬件系统, 这也是今后研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 王永富, 柴天佑, 迟瑛, 等. 基于干扰观测器的一类非线性系统的自适应模糊控制 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22 (3): 395-401.
- [2] 石如冬. 自适应模糊控制算法研究及其实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [3] 刘霞, 黄琦, 陈勇. 不确定遥操作系统带干扰观测器的自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (5): 681-687.
- [4] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47 (4): 932-938.
- [5] Nikoobin A, Haghghi R. Lyapunov-based nonlinear disturbance observer for serial n-link robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 55 (2/3): 135-153.
- [6] 誉斌. 超大型天线馈源指向跟踪系统的力学分析及控制研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [7] Ho Seong Lee. Robust digital tracking controllers for high-speed/high-accuracy positioning systems [D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [8] 马娟. 大射电望远镜馈源柔索支撑系统的建模与控制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [9] 刘柏廷, 吴云洁, 黄延福. 基于模糊干扰观测器的自适应反演滑模控制研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (8): 1677-1680.
- [10] 于靖, 陈谋, 姜长生. 基于干扰观测器的非线性不确定系统自适应滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31 (8): 993-999.
- (收稿日期: 2016-08-20) **EA**