

文章编号:1671-6833(2007)01-0021-05

自适应神经模糊推理系统在起重机稳钩控制中的应用

黄士涛, 胡全义, 马进元, 乔 桐

(郑州大学 机械工程学院, 河南省 郑州 450001)

摘要: 起重机小车—吊重系统具有多变量、非线性和钢丝绳长度不确定性的特点,造成吊物移动过程中摇摆很难控制. 提出一种基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的控制方法应用于起重机的稳钩控制,该方法采用反向传播算法(BP)和最小二乘法(LS)的混合算法对小车—吊重系统样本数据进行学习,调整各变量的隶属度函数,自动产生模糊规则. 仿真结果表明,这种控制方法对小车—吊重系统的摇摆角度和小车位置的控制过程具有良好的动态性能和较强的鲁棒性能,说明了自适应神经模糊推理系统在起重机稳钩控制中的有效性.

关键词: 自适应神经模糊推理系统; 防摇控制; 混合学习算法

中图分类号: TM 712 文献标识码: A

0 引言

减小和防止起重机吊重的摇摆及缩短小车到位时间是提高起重机装卸效率及提高吊装安全性的重要环节. 稳钩装置通过对起重机小车进行运行控制来减小重物的摇摆,它不依赖于操作人员的经验,是实现装卸自动化的发展方向.

起重机小车—吊重系统由于钢绳长度和负荷具有不确定性及吊装时存在风力干扰等因素,难以建立统一的数学模型,而模糊控制具有不依赖于对象的数学模型、便于利用人的经验知识及鲁棒性强的优点,但隶属度函数确定的随意性和难提取模糊规则是模糊系统设计的瓶颈问题^[1]. 自适应神经网络模糊推理系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)^[2]是将 Sugeno 一阶模糊模型以网络的形式来实现而得到的一种多输入单输出系统,使其既具有模糊控制不要求掌握被控对象模型及强鲁棒性的优点,又具有神经网络自学习的优点.

作者首先建立起起重机小车—吊重系统的非线性模型和近似线性模型,然后提出一种基于自适应神经模糊推理系统的起重机稳钩控制方法,并通过仿真验证自适应神经模糊推理系统在起重机稳钩控制中的有效性.

1 小车—吊重系统数学模型

起重机小车—吊重系统的结构如图 1 所示.

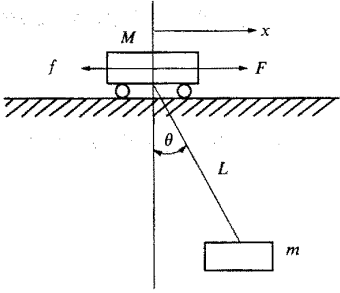


图 1 小车—吊重系统力学模型

Fig. 1 The dynamic model of the trolley-load system

小车—吊重系统的参数为:小车质量 M ,吊重质量 m (忽略吊钩及钢丝绳质量),钢丝绳的长度 L ,重力加速度 g ,小车位置 x ,吊重摇摆角度 θ ,作用在小车上的驱动力 F 及摩擦阻力 f .

运用牛顿动力学方法可得小车—吊重系统的非线性运动方程

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + mL\ddot{\theta}\cos\theta - mL\dot{\theta}^2\sin\theta = F - f \\ \ddot{x}\cos\theta + g\sin\theta + L\ddot{\theta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

忽略摩擦阻力 f ,并在平衡位置附近对(1)式进行近似线性化处理(要满足摆角 $\theta < 12^\circ$)^[2],可得小车—吊重系统的近似线性方程.

收稿日期:2006-10-18;修订日期:2006-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50177028).

作者简介:黄士涛(1946-),男,上海,汉,郑州大学教授,硕士生导师,研究方向为机械故障诊断.

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x}+mL\ddot{\theta}=F \\ \ddot{x}+g\theta+L\ddot{\theta}=0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)转换为状态方程表达式得

$$\begin{cases} \ddot{x}=Ax+Bu \\ y=Cx+Du \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u=[F]$, $x=y=[\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$,

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(M+m)g}{ML} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{mg}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{ML} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix}, C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

2 基于 ANFIS 的起重机稳钩控制方法

2.1 ANFIS 自适应神经模糊推理系统^[3]

自适应神经网络模糊推理系统(ANFIS)方法基于 Sugeno 模糊模型,采用类似于神经网络的结构,用反向传播算法和最小二乘算法调整模糊推理系统的隶属度函数参数,并能自动产生模糊规则,以解决模糊推理系统设计中隶属度函数确定的随意性和模糊规则提取难的问题。

图 2 所示为一具有两个输入变量 x 和 y 、一个输出变量 f 和两条模糊规则的一阶 Sugeno 模糊推理系统,模糊规则为

Rule1: If x is A_1 and y is B_1 Then $f_1=p_1x+q_1y+c_1$
Rule2: If x is A_2 and y is B_2 Then $f_2=p_2x+q_2y+c_2$
其中, A_i 、 B_i 为输入变量的模糊集合,隶属度函数为 $\mu_{A_i}(x)$ 、 $\mu_{B_i}(y)$ ($i=1,2$)。

与该一阶 Sugeno 模型等价的 ANFIS 结构如图 2 所示。

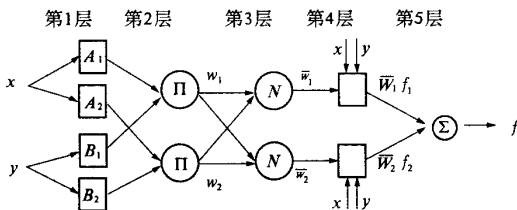


图 2 ANFIS 结构图

Fig. 2 The ANFIS structure

ANFIS 的结构由 5 层组成,每层节点具有相同的函数类型,其中方形节点为自适应节点,需要进行参数调整,圆形节点为固定节点,设第 j 层第 i 个节点的输出为 O_i^j 。

第 1 层:节点是自适应节点,它的输出获得输入的隶属度,隶属度函数是参数化的,该参数集 $\{a_i, b_i, c_i\}$ 为前提参数。

第 2 层:节点是乘法器,产生激发强度 w_1 和 w_2 。

$$w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad (i=1,2)$$

第 3 层:将激发强度 w_1 和 w_2 归一化处理,得

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (i=1,2)$$

第 4 层:节点是自适应节点,第 i 个节点输出:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1$$

参数集 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 为结论参数,结论参数的个数为 $n+1$ (n 为输入变量的个数)。

第 5 层:计算所有输入信号之和作为系统输出:

$$\begin{aligned} f = O_1^5 &= \sum_{i=1,2} \bar{w}_i f_i = \sum_i \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \\ &= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 \\ &\quad + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \end{aligned}$$

ANFIS 系统中的自适应节点参数通过对给定的输入输出数据集进行学习调整,通常采用一种混合学习算法。首先确定前提参数 $\{a_i, b_i, c_i\}$ 的初始值,用最小二乘法调整结论参数 $\{p_i, q_i, r_i\}$,然后采用反向传播算法更新前提参数。

2.2 起重机稳钩控制设计

所设计起重机小车一吊重系统模型的参数取为:小车质量 $M=1\ 000\text{ kg}$,重物的质量 $m=1\ 500\text{ kg}$,钢绳的长度分 3 种工况: $L=0.5\text{ m}$ 工况, $L=1.0\text{ m}$ 工况和 $L=1.5\text{ m}$ 工况。初始状态 $x_0=[0\ 0\ 0\ 0]^T$ 。

起重机小车一吊重系统的控制指标为摆角 θ 、摆速 $\dot{\theta}$ 、小车位置 x 和小车速度 \dot{x} ,系统的数学模型以状态方程式(3)表示,输入变量为小车的驱动力 F ,状态变量 $x=[\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$ 系统输出 $y=[\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$,将状态变量 x 与设定目标位置信号相比较,差值作为控制器的输入信号系统原理框图如图 3 所示,控制目标为驱动小车使小车一吊重系统以一定速度接近目标位置,当吊物到达目标位置时吊重不摇摆,且小车停止移。

训练 ANFIS 控制器的样本数据从基于线性二次型最优控制方法得到的最优调节器(LQR)作用于小车一吊重系统时的输入输出数据中选取。

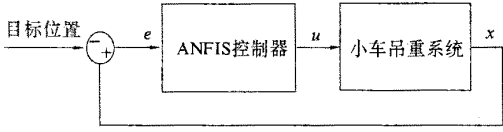


图 3 起重机稳钩控制原理框图

Fig. 3 The frame of the anti - swing equipment

2.2.1 基于线性二次型最优控制的控制方法

已知起重机小车一吊重系统模型的动态方程如式(3)所示,目标位置信号为方波信号,幅值为 1,周期 $T=10\text{ s}$ 。

基于线性二次型最优级控制(LQR)方法^[4,5]设计控制器就是确定最佳控制向量矩阵 K ,系统输出 $u(t)=-Kx(t)$,使得性能指标 J 达到最小,其中

$$J=\int_0^{\infty}(x^*Qx+u^*Ru)dt$$

矩阵 Q 、 R 确定了误差和能量损耗的相对重要性,在上述系统的控制器设计中,选取

$$Q=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R=[0,1]$$

求得不同钢绳长度工况时的最佳控制向量矩阵 K ;
 $L=0.5\text{ m}$ 工况时, $k=[-86.6\ 2.76\ 31.6\ 27.0]$,
 $L=1.0\text{ m}$ 工况时, $k=[-81.2\ 10.6\ 31.6\ 26.3]$,
 $L=1.5\text{ m}$ 工况时, $k=[-75.2\ 18.3\ 31.6\ 25.6]$ 。

2.2.2 基于 ANFIS 的稳钩控制器设计^[6]

起重机小车一吊重系统中 ANFIS 稳钩控制器为四输入单输出系统,每个输入变量对应两个钟形隶属度函数。

$$\mu_{A_i}(x)=\frac{1}{1+\left[\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^2\right]^{b_i}}\quad i=1,2$$

输出采用一阶线性输出,输入空间被划分为 16 个区域,共有 16 条模糊规则,ANFIS 结构图如图 4 所示。

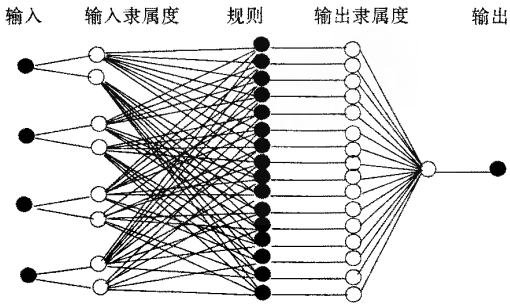


图 4 小车 - 吊重系统 ANFIS 网络结构图

Fig. 4 The ANFIS structure of the trolley - load system

基于 2.2.1 所设计的钢绳长度分别为 $L=0.5\text{ m}$ 、 $L=1.0\text{ m}$ 和 $L=1.5\text{ m}$ 的 3 种最优控制方法作用于小车一吊重系统时得到的输入输出数据中各选取 1 000 组数据组成训练样本数据,来训练所设计的 ANFIS 控制器,目标位置为常数 $x=1$ 。

经过 51 次迭代,训练结果的均方根误差 $RMSE=0.100\ 59$,得到所设计 ANFIS 控制器的前提参数和结论参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 前提参数 $\{a_i, b_i, c_i\}$

Tab. 1 Precedent parameters $\{a_i, b_i, c_i\}$

变量	前提参数 $\{a_i, b_i, c_i\}$	变量	前提参数 $\{a_i, b_i, c_i\}$
摆角	$[0.203\ 1.999\ -0.3666]$	小车	$[1.968\ 1.942\ -2.064]$
	$[0.2103\ 2.009\ 0.4576]$	位置	$[2.042\ 2.06\ 1.898]$
摆速	$[2.075\ 2.002\ -1.811]$	小车	$[1.942\ 1.989\ -2.263]$
	$[2.18\ 2.028\ 2.599]$	速度	$[1.954\ 1.973\ 1.365]$

表 2 结论参数

Tab. 2 Conclusion parameters

规则	结论参数	规则	结论参数
1	$[-424.5\ -150.2\ 107.9\ -22.5\ -38.69]$	9	$[453.6\ 251.2\ -155.2\ -216\ 308]$
2	$[420.6\ 58.78\ 73.26\ -29.61\ 233.3]$	10	$[118.7\ -30.79\ -12.88\ 130.7\ -236.2]$
3	$[-31.36\ 72.94\ 50.75\ 32.22\ 12.93]$	11	$[-9.535\ -7.143\ -14.96\ 2.709\ 8.644]$
4	$[-262.5\ -157.8\ 71.16\ 37.88\ -268.2]$	12	$[133.8\ -6.749\ -91.89\ -30.5\ 86.7]$
5	$[16.81\ -44.35\ -30.39\ 214.9\ 168.1]$	13	$[518.1\ -293.7\ 634.1\ -886.9\ -638.1]$
6	$[110.8\ 9.085\ -350.8\ -53.26\ -465.5]$	14	$[324.8\ 111.7\ 151.2\ -185.6\ 607.4]$
7	$[415\ 26.54\ -103.9\ -88.02\ 8.542]$	15	$[334.3\ 25.45\ 163.7\ 40.61\ -486.9]$
8	$[12.1\ -84.4\ -166.1\ 0.07063\ 491.6]$	16	$[-805.6\ -96.61\ 183.8\ -82.85\ -84.97]$

3 起重机小车一吊重系统仿真结果与分析

作者用 Matlab 软件进行起重机小车一吊重系统在 ANFIS 稳钩控制方法作用下吊重摆角和小车位置的动态响应仿真。

起重机小车一吊重系统模型采用状态方程式(3)进行动态响应仿真,初始状态 $x_0=[0\ 0\ 0\ 0]$,目标状态 $x=[0\ 0\ 1\ 0]$,加入干扰信号为 1 dBW 的白噪声信号。

从仿真曲线图 5 可以看出,基于 ANFIS 稳钩

控制方法的小车—吊重系统可以较好地实现控制小车—吊重系统跟踪目标位置信号,且到达目标位置时重物停止摆动,实现起重机稳钩的目的,且响应速度较快,摆角超调量较小,调节时间为 3.85 s,最大摇摆角度为 11.5° 。

针对起重机实际吊装时钢绳长度随吊装要求

选取不同的长度,笔者基于 $L=0.5\text{ m}$ 、 $L=1.0\text{ m}$ 和 $L=1.5\text{ m}$ 这 3 种工况产生的样本数据来训练 ANFIS 稳钩控制器,如图 5 所示为训练后的 ANFIS 稳钩控制器在 $L=0.8\text{ m}$ 、 $L=1.2\text{ m}$ 和 $L=1.6\text{ m}$ 3 种工况都具有较好的控制效果,说明了训练后的 ANFIS 稳钩控制器具有很好的鲁棒性。

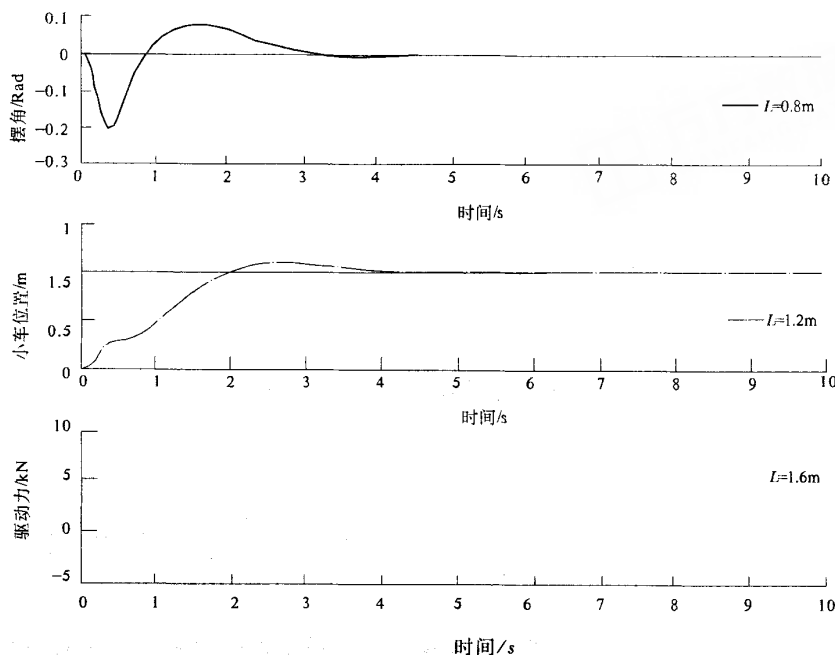


图 5 各工况动态响应图(无干扰)

Fig. 5 The dynamic response of the three states (without disturbance)

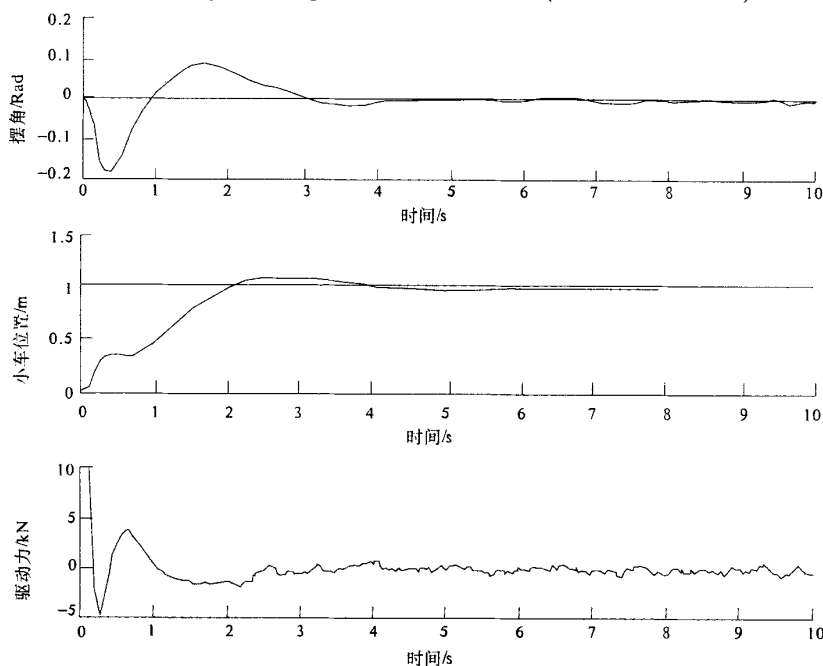


图 6 $L=1.6$ 工况动态响应图(加入白噪声)

Fig. 6 The dynamic response of the $L=1.6$ (with white noise)

由图5可以看出,随着钢丝绳长度在一定限定范围内的增加,系统都是稳定的,且调节时间、响应速度和摆角超调量基本不变,但小车驱动力有所变化。

将ANFIS稳钩控制器用于起重机小车一吊重系统 $L=1.6\text{ m}$ 工况并加入1dBW的白噪声信号,如图6所示,控制器仍可以较好地实现控制目的,说明训练后的ANFIS稳钩控制器具有良好的抗干扰性能。

由于ANFIS控制器采用Sugeno模型,由多个局部映射组合而成,算法简单,并且每个局部映射的参数采用线性最小二乘法进行调整,这就使得它的收敛速度较快,在计算时不需要进行大量的矩阵运算,因而适合用于实时控制的情况。

4 结论

自适应神经模糊推理系统利用输入输出数据调整隶属度函数和自动产生模糊规则,克服了模糊系统隶属度函数确定的随意性和模糊规则提取难的问题。针对起重机小车一吊重系统的多变量、非线性和参数不确定性控制问题,作者提出一种基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的控制方

法应用于钢绳长度小范围变化的起重机稳钩控制,经仿真验证,该控制方法达到了较好的控制效果,具有动态响应快、鲁棒性好和算法简单等特点。但对于钢绳长度大范围变化及负荷变化较大时如何保持稳钩控制的有效性仍需做进一步研究。

参考文献:

- [1] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 王迎军译. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 孟巧荣,廉自生. 倒立摆控制系统的建模与仿真[J]. 机械工程与自动化,2004,4(2):7-9.
- [3] JANG J-S R. ANFIS: adaptive - network - based fuzzy inference system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665 - 685.
- [4] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [5] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真. 北京:科学出版社,2001.
- [6] JYH-SHING R J. Neuro - fuzzy modeling and control [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(3): 110 - 115.

Application of Adaptive Neuro - fuzzy Inference System in Anti - Swing Control of the Crane Hook

HUANG Shi - tao, HU Quan - yi, MA Jin - yuan, QIAO Tong

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: It is difficult to control the swing motion and the transfer time of the load while the crane trolley carries the load to a desired position because the trolley - load system has the characteristics of multi - variable, nonlinear and uncertainty of the rope length. An anti - swing control method based on adaptive neuro - fuzzy inference system is proposed in the paper. For the sample data the hybrid algorithm of back propagation algorithm (BP) and least squares algorithm (LS) is applied in the paper. Thus the parameters of membership functions are adjusted and all of the fuzzy rules are generated automatically. The simulation results demonstrate that the method based on adaptive neuro - fuzzy inference system is valid and effective for decreasing the swing motion of the load and minishing the transfer time.

Key words: adaptive neuro - fuzzy inference system; anti - swing controller; hybrid algorithm