

文章编号: 1001-0920(2012)07-1117-04

基于二次仿射传播聚类的非线性系统多模型 LSSVM 建模

张 懿¹, 刘国海¹, 魏海峰², 赵文祥¹

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 针对复杂非线性系统单模型建模存在计算量大和精度差的问题, 提出一种采用仿射传播聚类的多模型 LSSVM 建模方法, 通过仿射传播聚类对样本数据按输入集和输出集二次聚类划分, 并分别建立 LSSVM 子模型, 非线性系统模型通过子模型加权合成. 将该方法应用于两电机变频调速系统的张力和速度模型辨识, 仿真结果表明, 该建模方法具有较高的精度, 能准确拟合系统的非线性特性.

关键词: 非线性系统; 仿射传播聚类; 多模型; 最小二乘支持向量机; 两电机变频调速系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multi-model LSSVM modeling for nonlinear systems based on twice affinity propagation clustering

ZHANG Yi¹, LIU Guo-hai¹, WEI Hai-feng², ZHAO Wen-xiang¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China. Correspondent: ZHANG Yi, E-mail: zyi82@126.com)

Abstract: For complex nonlinear systems, a single model suffers from heavy burden calculation and bad accuracy. A modeling method based on multi-model least squares support vector machines(LSSVM) using affinity propagation clustering algorithm is proposed. The clustering algorithm is successively applied to group the data into clusters according to input set and output set, and LSSVM is used to construct sub-models. The model of nonlinear system is constructed by weighting all LSSVM sub-models. The proposed method is used to identify tension and speed model for two-motor variable frequency speed-regulating system. Simulation results show that the proposed method can be used to fit nonlinear characteristics of the system with high precision.

Key words: nonlinear systems; affinity propagation clustering; multi-mode; least squares support vector machines; two-motor variable frequency speed-regulating system

1 引 言

复杂工业控制对象具有多变量、非线性、工况范围广和变量间有多重相关性的特点. 从输入输出数据入手, 采用 Hammerstein 和 Wiener 模型结构对其模型辨识, 未能考虑输入、输出数据之间的联系和差异, 会引起过程匹配不佳、模型精度低和外推能力差等问题^[1]. 实际工业生产中, 往往要使生产装置处于不同工况下, 现场得到的样本数据多且按工作点呈聚类 and 迁移特性. 若直接利用现场检测到的大批量数据建模, 亦会导致过于庞大的模型结构和冗长的训练时间.

对样本数据聚类, 采用多模型方法建模是解决这

一问题的有效途径. 文献 [2] 提出了基于条件正定核函数的核模糊 C 均值聚类算法, 能实现对不规则形状数据的聚类. [3] 提出了基于减法聚类的多模型在线辨识算法, 根据最小二乘递推算法在线更新模型参数. [4] 提出了基于粒子群优化的聚类算法, 可缓解传统聚类方法对初始值敏感、易陷入局部最优的问题. 但这些聚类算法普遍存在聚类数目需事先给定, 精度依赖数据分布和收敛速度慢等问题. 而且, 传统聚类方法仅利用了样本数据的输入部分, 由于数据的不一致性和不完备性, 不利于模型精度的提高. 多模型建模中常用的神经网络方法也存在过学习、局部极小等缺

收稿日期: 2010-12-06; 修回日期: 2011-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874014, 51077066); 江苏省自然科学基金项目(BK2010327); 江苏省研究生创新计划项目(CX09B.201Z).

作者简介: 张懿(1982—), 女, 博士生, 从事非线性智能控制的研究; 刘国海(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电机控制、复杂系统控制等研究.

陷,影响了模型的泛化能力。

针对上述不足,本文提出一种多模型 LSSVM (least squares support vector machines) 建模方法,利用仿射传播 (AP) 聚类将样本按输入集、输出集聚类,对二次聚类后得到的子类进行 LSSVM 回归估计,继而采用加权和形式构造系统模型。最后,通过两电机变频调速系统张力、速度的实例仿真,验证了所提出建模方法的有效性。

2 仿射传播聚类

仿射传播聚类是一种新型聚类算法^[5],该算法无需预先给定聚类数目,聚类结果不会受初始聚类中心选择失当的影响,可快速有效地对大批量数据聚类。

AP 聚类通过吸引度 $r(i, k)$ 和归属度 $a(i, k)$ 的计算,不断地从数据中选出合适的聚类中心。其中: $r(i, k)$ 表示数据点 x_k 作为数据点 x_i 聚类中心的适合度, $a(i, k)$ 表示数据点 x_i 选择数据点 x_k 作为聚类中心的适合度。 $r(i, k)$ 和 $a(i, k)$ 越大,点 x_k 成为最终聚类中心的可能性越大。 $s(i, k)$ 表示任意样本点 x_i 和 x_k 之间的相似度。

依据文献 [5] 计算吸引度 r 和归属度 a , 有

$$r(i, k) = s(i, k) - \max_{k' \text{ s.t. } k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\}, \quad (1)$$

$$a(i, k) = \min \left\{ 0, r(k, k) + \sum_{i' \text{ s.t. } i' \notin \{i, k\}} \max\{0, r(i', k)\} \right\}, \quad (2)$$

$$a(k, k) = \sum_{i' \text{ s.t. } i' \neq k} \max\{0, r(i', k)\}, \quad (3)$$

$$r(k, k) = s(k, k) - \max_{k' \text{ s.t. } k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\} = p(k) - \max_{k' \text{ s.t. } k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\}. \quad (4)$$

式中偏向参数 p 表示数据点 x_k 被选作聚类中心的倾向性^[6]。每一循环迭代中, $r_i(i, k)$ 和 $a_i(i, k)$ 与前一迭代过程的 $r_{i-1}(i, k)$ 和 $a_{i-1}(i, k)$ 加权更新,即

$$\begin{cases} r_i(i, k) = (1 - \lambda)r_{i-1}(i, k) + \lambda r_{i-1}(i, k), \\ a_i(i, k) = (1 - \lambda)a_{i-1}(i, k) + \lambda a_{i-1}(i, k), \end{cases} \quad (5)$$

式中 λ 为阻尼因子。

对于数据点 x_i , 使得 $\{a(i, k) + r(i, k)\}$ 最大的数据点 x_k 即为一个聚类中心。算法的收敛条件为聚类中心 10 次迭代不发生变化,或达到规定的最大迭代次数。迭代过程结束后,输出 C 个聚类中心及聚类。

3 多模型 LSSVM 建模

LSSVM 具有能精确逼近任意非线性函数的特点,计算效率高,可用于子模型的构建^[7]。选择高斯核函数

$$K(x, x_j) = \exp\left(\frac{-\|x - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

高斯核是典型的局部性核函数,函数值受距离测试点近的数据影响较大。因此,可根据聚类内数据和聚类中心的平均距离来确定核宽度参数,保证该聚类内的数据对核函数值影响较大,而非聚类内数据对其影响较小^[2]。计算公式如下:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \|x_{ij} - v_i\|^2}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, C, j = 1, 2, \dots, n_i.$$

式中: v_i 为第 i 个聚类中心, x_{ij} 为属于第 i 聚类的第 j 样本点, n_i 为第 i 个聚类所包含的样本数。

多模型建模依据分解合成思想,分解非线性系统,在每个适应域内,对应的局部模型能很好地逼近系统的非线性特性。输入数据样本为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 输出为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。将 \mathbf{X}, \mathbf{Y} 分为训练样本集 $\mathbf{X}_{\text{train}}, \mathbf{Y}_{\text{train}}$ 和检验样本集 $\mathbf{X}_{\text{test}}, \mathbf{Y}_{\text{test}}$ 。建模具体步骤如下:

Step 1: 设定 AP 聚类算法参数: 阻尼因子 λ , 偏向参数 p 和最大迭代次数;

Step 2: 利用 AP 聚类对训练样本集中的 $\mathbf{X}_{\text{train}}$ 聚类,确定聚类数目 $1C$, 将训练样本集 $\mathbf{X}_{\text{train}}, \mathbf{Y}_{\text{train}}$ 划分为若干类: $\mathbf{X}_{11}, \mathbf{Y}_{11}, \mathbf{X}_{12}, \mathbf{Y}_{12}, \dots, \mathbf{X}_{1C}, \mathbf{Y}_{1C}$;

Step 3: 对得到的子类集 $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, i = 11, \dots, 1C$, 按 \mathbf{Y}_i 进行二次 AP 聚类,确定总的聚类数目 C ;

Step 4: 对二次聚类后的每一子类建立最小二乘支持向量机子模型 LSSVM₁, \dots , LSSVM_C;

Step 5: 多模型输出为各子模型输出的加权和,权值为待测样本对每个子类的模糊隶属度,有

$$\mu_i = \frac{1/\|x_{\text{test}} - v_i\|}{\sum_{i=1}^C 1/\|x_{\text{test}} - v_i\|}, \quad i = 1, 2, \dots, C. \quad (8)$$

根据待测样本与聚类中心的距离,进行 LSSVM 子模型权值的调整,可以从整体上提高模型的精度。

4 仿真实例

多电机变频调速系统是一个典型的多入多出、非线性、高阶、强耦合的复杂系统,系统的张力由两台感应电机的转速之差形成。现代工业生产过程中,特别是在造纸、纺织、建材等领域,经常采用多电机变频调速系统带动共同负载,传送和卷取产品^[8]。为保证产品不被拉断或堆积,提高产品卷绕的效率和质量,要求各台电机必须协调同步运行,同时张力能跟随给定值的变化,并且不受电机速度的影响。因此,张力和速度的有效控制是系统同步运行的关键^[9-10]。本文以两电机变频调速系统为例,采用多模型 LSSVM 建模方法获得系统张力和速度的模型辨识。

矢量控制模式下,根据虎克定律,两电机变频调

速系统的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{r1} = \frac{n_{p1}}{J_1} \left[(\omega_1 - \omega_{r1}) \frac{n_{p1} T_{r1}}{L_{r1}} \psi_{r1}^2 - (T_{L1} + r_1 F) \right], \\ \dot{\psi}_{r1} = \frac{-1}{T_{r1}} \psi_{r1} + \frac{L_{m1}}{T_{r1}} i_{sm1}, \\ \dot{\omega}_{r2} = \frac{n_{p2}}{J_2} \left[(\omega_2 - \omega_{r2}) \frac{n_{p2} T_{r2}}{L_{r2}} \psi_{r2}^2 - (T_{L2} - r_2 F) \right], \\ \dot{\psi}_{r2} = \frac{-1}{T_{r2}} \psi_{r2} + \frac{L_{m2}}{T_{r2}} i_{sm2}, \\ \dot{F} = \frac{K}{T} \left(\frac{1}{n_{p1}} r_1 k_1 \omega_{r1} - \frac{1}{n_{p2}} r_2 k_2 \omega_{r2} \right) - \frac{F}{T}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_r 为电气角速度, n_p 为电机极对数, J 为转子转动惯量, ψ_r 为转子磁链, T_r 为电磁时间常数, T_L 为负载转矩, F 为皮带张力, $K = E/V$ 为传递系数, E 为皮带杨氏弹性模量, V 为期望速度, $T = L_0/AV$ 为张力变化时间常数, L_0 为机架间距离, A 为皮带截面积, r 和 k 分别为带轮半径和速比, 下标 1 和 2 表示第 1 台和第 2 台交流电机.

仿真实验样机参数: $U_{e1} = U_{e2} = 380 \text{ V}$, $P_{e1} = P_{e2} = 2.2 \text{ kW}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $n_{p1} = 2$, $J_1 = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L_{m1} = 0.1 \text{ H}$, $T_{r1} = 0.5 \text{ H}/\Omega$, $L_{r1} = 0.2 \text{ H}$, $r_1 = 0.1 \text{ m}$, $k_1 = 1/15$, $n_{p2} = 2$, $J_2 = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L_{m2} = 0.2 \text{ H}$, $T_{r2} = 0.5 \text{ H}/\Omega$, $L_{r2} = 0.3 \text{ H}$, $r_2 = 0.09 \text{ m}$, $k_2 = 1/15$, $K = 10$, $T = 1$. 采用具有不同幅值的方波信号激励系统, 得到样本 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, x_i, y_i 均为 2 维向量, $n = 1000$. 随机选择 975 组样本用于建模, 其余 25 组样本作测试, 得到的测试结果如图 1 和图 2 所示. 图 1 为张力测试曲线和测试误差曲线, 图 2 为速度测试曲线和测试误差曲线. 由结果可知, 多模型 LSSVM 建模方法测试误差小, 预测精度高, 表明该建模方法对张力和速度样本的跟踪效果较好, 具有优良的泛化性能.

为进一步定量说明建模方法的效果, 使用均方根误差 (RMSE) 评价模型, 结果见表 1. 可看出多模型

LSSVM 方法获得的模型比只用一个 LSSVM 获得的模型具有更好的测试结果. 这是因为多模型 LSSVM 考虑了样本局部特征, 具有更好的局部拟合能力.

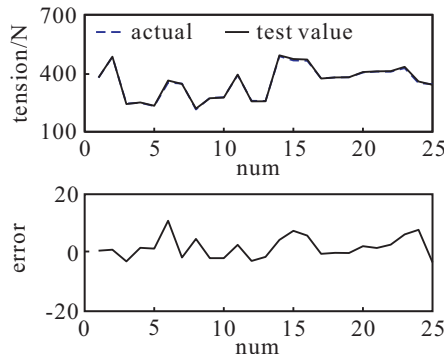


图 1 张力测试结果

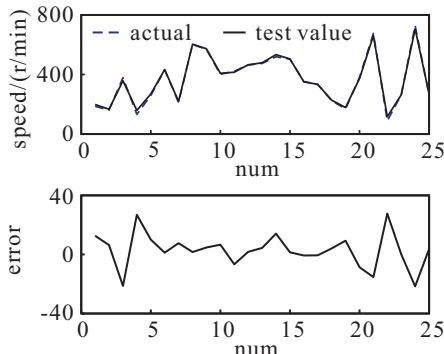


图 2 速度测试结果

表 1 测试结果比较(RMSE)

RMSE	多模型 LSSVM	LSSVM
张力	4.09	6.45
速度	11.63	14.28

在 Matlab 仿真环境下, 建立两电机变频调速系统控制模型, 结构如图 3 所示. 采用最为简单、工程应用最多的 PID 调节器对张力和速度进行控制.

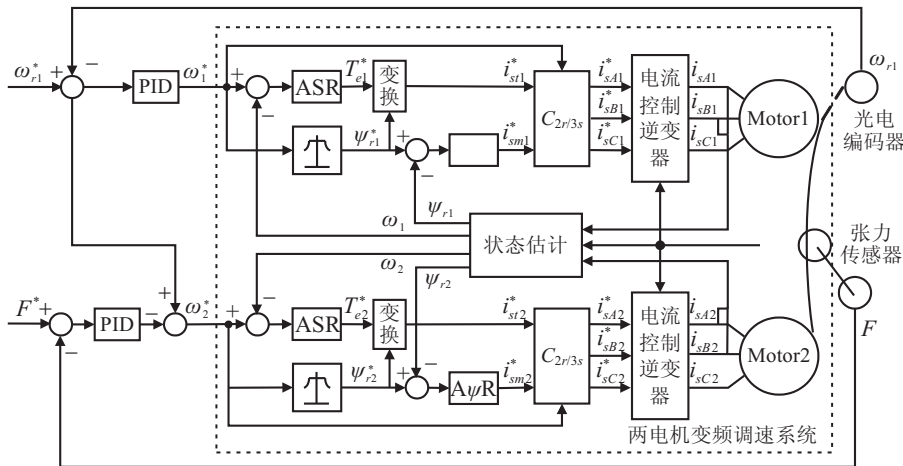


图 3 两电机变频调速系统控制模型

用 LSSVM 多模型代替虚线框中的两电机同步系统机理模型, 图 4 和图 5 分别给出了机理模型和 LSSVM 多模型下的张力、速度控制结果. 仿真时, 设置速度给定在第 50 s 时从 350 r/min 突加至 500 r/min, 张力给定在第 100 s 时从 400 N 突减至 300 N, 以分析 LSSVM 多模型对系统动态响应的辨识性能. 如图所示, 两种模型下张力、速度的动态控制效果接近, 特别是在张力、速度突变时, LSSVM 多模型可以准确显示出另一者随之变化的情况, 揭示了两电机变频调速系统非线性、强耦合的系统特征.

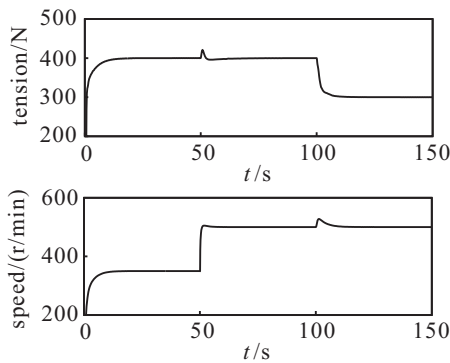


图 4 机理模型控制效果

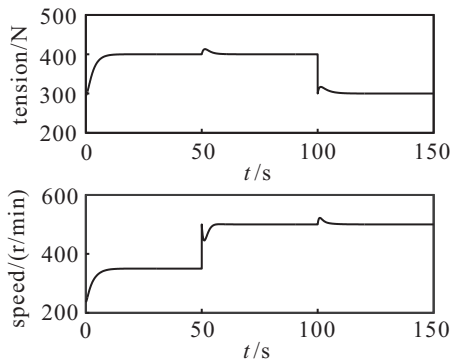


图 5 多模型 LSSVM 控制效果

5 结 论

本文以非线性系统多模型建模为研究对象, 提出基于二次仿射传播聚类的多模型 LSSVM 建模方法, 解决了聚类数目需事先给定和分类精度依赖数据分布的问题. 二次聚类有利于样本空间的进一步划分, 能更好地反映系统局部特征. 本文给出了建模方法的具体实现步骤, 将其应用于两电机变频调速系统的张力和速度模型辨识. 仿真结果表明, 所建模型具有较高的预测精度、良好的泛化能力, 能较好地拟合系统的非线性特征.

参考文献(References)

[1] Giuseppe Franzè. A nonlinear sum-of-squares model predictive control approach[J]. IEEE Trans on Automatic

Control, 2010, 55(6): 1466-1471.

- [2] 李卫, 杨煜普, 王娜. 基于核模糊聚类的多模型 LSSVM 回归建模[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 560-562.
(Li W, Yang Y P, Wang N. Multi-model LSSVM regression modeling based on kernel fuzzy clustering[J]. Control and Decision, 2008, 23(5): 560-562.)
- [3] 潘天红, 薛振框, 李少远. 基于减法聚类的多模型在线辨识算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(2): 220-224.
(Pan T H, Xue Z K, Li S Y. An online multi-model identification algorithm based on subtractive clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(2): 220-224.)
- [4] 徐海霞, 刘国海, 周大为, 等. 基于改进核模糊聚类算法的软测量建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 1621-1626.
(Xu H X, Liu G H, Zhou D W, et al. Soft sensor modeling based on modified kernel fuzzy clustering algorithm[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 1621-1626.)
- [5] Frey B J, Dueck D. Clustering by passing message between data points[J]. Science, 2007, 315(5814): 972-976.
- [6] 王开军, 张英军, 李丹, 等. 自适应仿射传播聚类[J]. 自动化学报, 2007, 33(12): 1242-1246.
(Wang K J, Zhang Y J, Li D, et al. Adaptive affinity propagation clustering[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(12): 1242-1246.)
- [7] Li Xia, Huang Zhiyao, Wang Baoliang, et al. A new method for the online voidage measurement of the gas-oil two-phase flow[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1571-1577.
- [8] 戴先中, 刘国海. 两变频调速电机系统的神经网络逆同步控制[J]. 自动化学报, 2005, 31(6): 890-900.
(Dai X Z, Liu G H. Neural network inverse synchronous control of two-motor variable frequency speed-regulating system[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6): 890-900.)
- [9] Valenzuela M A, Bentley J M, Aguilera P C, et al. Improved coordinated response and disturbance rejection in the critical sections of paper machines[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(3): 857-869.
- [10] 张今朝, 刘国海, 潘天红. 多电机变频调速同步系统的多模型预测控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1489-1494.
(Zhang J Z, Liu G H, Pan T H. Multi-model predictive control for multi-motor variable frequency speed-regulating synchronous system[J]. Control and Decision, 2009, 24(10): 1489-1494.)