DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.12.006

# 基于模型参数聚类的分解炉温度建模

## 张进锋,杨 强,颜文俊

(浙江大学 系统科学与工程学系,浙江 杭州 310027)

摘 要:针对流程工业多工况、非线性特性所导致的建模困难问题,提出一种基于模型参数聚类的预测建模方法. 结合员工操作、环境变化以及数据特征等因素选择涵盖多种工况的典型历史数据;根据典型历史数据,利用受限最 小二乘法,分段建立多个脉冲响应模型;以各模型参数为特征,采用 K-均值方法对各分段模型进行子空间聚类,生 成 K 类聚类模型;在实际控制阶段,根据校正预测效果选择合适的聚类模型,并采用该模型进行实时控制.研究结 果表明:该聚类建模方法能反映分解炉的运行状态,预测效果好,鲁棒性强,能够适应多种工况;应用该模型对分解 炉温度进行实时控制可获得满意的效果.

关键词:工况识别;模型参数;子空间聚类;预测;模型校正 中图分类号:TP 279 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-973X(2014)12-2139-05

## Model parameter clustering based modeling approach for calciner temperature

## ZHANG Jin-feng, YANG Qiang, YAN Wen-jun

(Department of System Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A predictive modeling approach based on model parameter clustering was presented to solve the modeling problems brought out by the multi-point and nonlinear nature of the process industry. According to the operation on calciner, environment changes and data feature, typical historical measurement data that covers various operating modes are chosen. Based on the obtained typical historical measurement data, multiple piecewise impulse response models are established by the use of constraint least squares method. With the parameters of the piecewise models, K-means method is adopted to the process subspace clustering against each piecewise model, and K clustering models are achieved. In the practical control phase, the appropriate model is chosen to carry out the real-time control actions based on the correction prediction result. The proposed solution has been examined through a set of simulation experiments, and the numerical result demonstrates that the suggested modeling can perform well with satisfactory prediction, strong robustness, as well as adaptability to a range of operational scenarios. In addition, the modeling method is adopted for the calciner's real-time control, and the result demonstrates that the calciner temperature can be constrained within a very small range.

**Key words**: operating condition identification; model parameter; subspace clustering; prediction; model correction

非线性、多工况等是水泥、石灰以及钢铁等工业 控制带来困扰 过程的普遍特征.这些特征为工业过程的优化节能 控制方法[1-3],

控制带来困扰,同时催生了众多适应于工业过程的 控制方法<sup>[1-3]</sup>,包括预测控制、模糊控制、专家系统

收稿日期: 2013-12-04. 浙江大学学报(工学版)网址: www. journals. zju. edu. cn/eng

基金项目:国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2012AA051704).

作者简介:张进锋(1983—),男,博士生,从事工业控制与人工智能研究. E-mail: zhangjinfeng01@163.com

通信联系人:颜文俊,男,教授,博导. E-mail. yanwenjun@zju.edu.cn

等. 无论采用何种方法,建立合适模型是控制成功的 前提条件.

针对典型工业过程水泥烧成系统的关键能耗设 备分解炉,近年来,出现了许多针对分解炉或整个烧 成系统所建立的基于机理的数值模型[4-7],由于分解 炉运行时系统边界条件的不确定性以及数值模型较 高的计算复杂度,该类模型主要用于辅助系统结构 设计以及为系统控制与优化提供理论指导,未见用 于分解炉的实时控制.另一方面,随着数据挖掘技术 的不断进步,涌现出越来越多的基于数据的建模方 法,并且数据建模便于控制算法的应用,邹健等<sup>[8]</sup>建 立了分解炉温度模糊模型并实施了预测控制, Koumboulis 等<sup>[9]</sup>利用人工神经网络对分解炉进行 模型辨识.在此背景下,本文提出一种基于模型参数 聚类的分解炉温度预测建模方法.该方法基于典型 现场数据建立多个分段模型,以各分段模型参数为 特征对模型进行聚类,得到反映不同工况的多个聚 类模型,根据一定准则实时选择合适模型以匹配系 统工况变化,实现对分解炉温度的准确预测,为分解 炉优化控制提供良好基础.

## 1 系统介绍

分解炉是新型干法水泥生产中的重要环节,在 工业过程中具有代表性.图1是干法水泥生产烧成 系统示意图,主要包括预热器、分解炉、回转窑和冷 却机4个部分.其中分解炉是烧成系统的关键设备 和主要能耗设备,承担了90%的生料分解任务,煤 耗约占烧成过程总煤耗的60%<sup>[10]</sup>.

分解炉内,喷煤管提供的煤粉在少量一次风、来 自窑头罩的三次风以及来自窑尾烟室的二次风的环 境下燃烧,为生料分解提供足够的能量.分解炉温度



图 1 水泥生产烧成系统 Fig. 1 Firing system of cement production 高低对水泥熟料质量、能耗以及系统平稳安全运行 有着重要影响,所以对该温度的预测与控制一直是 水泥烧成系统优化控制的重要课题.由于该温度主 要受生料喂料量、喂煤量、风量以及风温影响,本研 究通过这些变量建立分解炉的温度预测模型.

## 2 算法实现

本文强调模型对工况的区分能力,对模型的具体形式不做要求.为了说明问题,本文采用较为普遍的脉冲响应模型.该模型透明简便,具有明显的物理 意义,便于各种控制算法的实现.

笔者曾采用基于受限最小二乘法的单一脉冲响 应模型对分解炉出口温度进行预测<sup>[11]</sup>,大部分情况 下可取得较好的预测与控制效果.但在某些时刻,预 测温度会有较大误差.数据分析表明,单一模型能够 反映系统一般工况下的运行状态,但无法匹配特殊 乃至极端工况.分解炉在实际运行中,窑皮的逐渐加 厚与脱落、煤粉在分解炉中的不完全燃烧(跑煤粉)、 生料易烧性波动以及煤粉热值波动,甚至季节变化 以及昼夜变化都会导致单一模型与工况的失配.此 外,系统固有的非线性也是模型失配的重要因素.鉴 于此,本文提出一种基于子空间聚类技术的多模型 预测建模方法,该算法整体思想如图 2 所示.

该建模方法步骤如下:1)选取大量且有代表性的工业运行数据;2)针对所选工业数据分段建立多



Fig. 2 Flow chart for multi-model predictive modeling

个模型,该方法对模型种类无严格要求,本文采用基 于受限最小二乘法的线性模型;3)采取基于子空间 聚类的 K 均值聚类方法对上述模型进行聚类,得到 K 个聚类模型;4)应用于实时系统时,根据各个模 型校正预测误差选择合适的聚类模型;5)在该模型 基础上建立控制算法.

#### 2.1 数据选取与分时段建模

选取合适建模数据是建模成功的基础.本文的聚 类算法本质是工况识别,为使建模数据覆盖多种工 况,本文结合员工操作、环境变化和运行数据三方面 因素识别并选取建模数据:员工操作包括磨机开停、 增减原料或煤粉、改变各阀门开度、改变原料成分等 各种影响系统运行状态的操作;环境变化包括昼夜、 温度高低、天气情况等;运行数据包括温度高低、压力 大小、各变量趋势变化等<sup>[12]</sup>. 典型数据的选取原则是 只要在上述3条因素中满足一条就可将该状态前后 较大范围的数据加入建模数据,宁可冗余,也不遗漏, 以尽量涵盖较多的工况,提高建模数据的完备性.

选取好数据后,经过滤波、奇异值处理以及归一 化等数据预处理过程,分段对数据进行建模.本文采 用基于受限最小二乘法的脉冲响应模型.由于分解 炉实际运行中风量变化慢,一般设定好后不再调节, 风量大小可视为工况变化;而喂煤量和喂料量则是 变化最频繁最直接的控制量.因此,本文以喂煤量和 喂料量为输入、分解炉出口温度为输出建立脉冲响 应模型,形式如下:

$$ilde{ heta}_{k+ au} = c_0 + \sum_{i=1}^{M} a_i u_{k-i+1} + \sum_{j=1}^{N} b_j d_{k-j+1}.$$
 (1)

式中: $\tilde{\theta}_{k+\tau}$ 为 $k+\tau$ 时刻分解炉温度预测值, $c_0$ 为模型偏置量, $u_{k-i+1}$ 、 $d_{k-j+1}$ 分别是喂煤量、喂料量, $a_i$ 、 $b_j$ 分别是喂煤量、喂料量的脉冲响应系数,M、N是喂煤量、喂料量的建模时域.

令  $h = [c_0 \quad a_1 \quad \cdots \quad a_M \quad b_1 \quad \cdots \quad b_N]^T$ ,求得 h 就获得了系统模型,若有分解炉出口温度、喂煤 量、喂料量的历史数据,各个采样时刻分解炉的真实 温度可表示如下:

$$\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \theta_{k+1} & \cdots & \theta_{k+L} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \qquad (2)$$
$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & u_k & \cdots & u_{k-M+1} & d_k & \cdots & d_{k-N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & u_{k+L} & \cdots & u_{k+L-M+1} & d_{k+L} & \cdots & d_{k+L-N+1} \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

通过求解式(4)、(5)组成的受限最小二乘问题 获得模型参数 *h*:

$$\min r = |Ah - \Theta|. \tag{4}$$

t 
$$\begin{cases} Ch \leqslant n, \\ Qh = m. \end{cases}$$
 (5)

式中:C、Q、n、m为限制条件参数,通过系统机理、经验以及数据统计等方法获得,不做赘述.

2.2 模型参数的子空间聚类

s

现有的多工况建模方法多是根据样本先聚类后 建模获得,而本文采用的是先建立分段模型,然后对 各模型参数聚类以得到聚类模型的方法.该方法的 有效性可通过图 3、4 简单说明:图 3、4 中的点和星 号代表 2 批采样数据,现将其分成 2 类(I类、II类), 如果先建模(线性模型)后对模型参数聚类,可获得 模型 1 和模型 2(如图 3),模型 1 和模型 2 能反映实 际数据的变化,误差也很小;若如图 4 所示,先聚类 后建模,根据数据间的距离测度数据会被分成类别 A、类别 B,然后分别建立线性模型,发现模型 3、模 型 4 并不能真正反映数据的趋势,具有较大的预测 误差.因此,采用本文对工业数据先建模后聚类的方 法,以获得良好的建模效果与最终控制效果.









现以各分段模型的参数向量 h 为聚类对象,以 欧氏距离为聚类测度,采用基于子空间聚类的 K-均 值方法对模型参数进行聚类,各聚类中心为 h<sub>j</sub>.如 表 1 所示,当建模时域 M、N 均为 5 时,加上偏置,h 是 11 维向量.由于本文预测算法采用自适应校正, 模型偏置对建模效果没有影响,剔除模型偏置,聚类 对象便降低了一维;然后采用 K-均值方法在 10 维 子空间上进行聚类.该方法的聚类结果与初始聚类 中心有关<sup>[13]</sup>,需要多次聚类并交叉验证以获取最好 的聚类结果.表1是当聚类类别数为6时的一种聚 类结果.表中 Z<sup>-i</sup>为延迟第i个采样时间所对应的喂 煤或喂生料时的系数.直观看,不同聚类中心的喂 煤、喂料系数区别较大,说明在不同工况下喂煤、喂 料对温度的影响有着较大的不同.总体看,喂料对温 度影响较为稳定,不同类别间系数相差不大,这表明 分解炉温度与喂料量基本呈线性关系.而喂煤量对 温度影响种类繁多:类 $1(h_1)$ 表现为延迟较多,可能 因煤质较差,灰分较多;类 $2(h_2)$ 和类 $3(h_2)$ 的喂煤 系数有前后 2 个峰值,可能存在煤粉的二次燃烧; 类 $4(h_4)$ 、类 $6(h_6)$ 则表现为较好的温度曲线,对应 燃烧状态良好的工况;类 $5(h_5)$ 系数均较小,说明该 状态下改变喂煤量对温度影响不大,对应通风不足 或喂煤量饱和等情况.综上所述,各类别在一定程度 上反映出分解炉内复杂的工况,但各类与具体工况 不存在——对应关系,因为聚类个数是根据建模效 果确定的,不是根据工况个数确定的,因此同类工况 可能细分为2类,相似工况也可能归为一类.

表1 模型参数聚类的聚类中心

Tab. 1	Clustering	centers	of	model	parameter	clustering
--------	------------	---------	----	-------	-----------	------------

$\pmb{h}_j$	偏置										
		$Z^{-1}$	$Z^{-2}$	$Z^{-3}$	$Z^{-4}$	$Z^{-5}$	$Z^{-1}$	$Z^{-2}$	$Z^{-3}$	$Z^{-4}$	$Z^{-5}$
$\pmb{h}_1$	0.409	0.076	0.008	0.000	0.000	0.716	-0.005	-0.051	-0.140	-0.041	-0.008
$\boldsymbol{h}_2$	-0.073	0.114	0.041	0.010	0.023	0.170	-0.053	-0.054	-0.064	-0.033	-0.109
$\boldsymbol{h}_3$	0.547	0.285	0.068	0.080	0.116	0.003	-0.056	-0.094	-0.112	-0.031	-0.019
$oldsymbol{h}_4$	-0.039	0.105	0.139	0.021	0.011	0.002	-0.055	-0.206	-0.082	-0.009	-0.035
$h_5$	0.267	0.046	0.024	0.006	0.004	0.028	-0.017	-0.152	-0.089	-0.004	-0.018
$oldsymbol{h}_6$	0.103	0.155	0.051	0.022	0.003	0.020	-0.008	-0.146	-0.128	-0.029	-0.071

### 2.3 模型选择

在实时预测与控制时,每个采样时刻都需要从 表1的K类模型中选取合适模型.本文比较了3种 不同的模型选取标准:

1)单模型预测温度(SMPT),在 K 类模型中选 用一个一定标准下最好的模型,在实时控制时只用 该模型.

2)多模型预测温度(MMPT),实时控制时,选 取对前 T 个采样时刻预测效果最好的模型.

3)校正多模型预测温度(CMMPT),选取前 *T* 个采样时刻,采用校正预测效果最好的模型.该方法 在实际预测时先要根据式(6)计算 *K* 个模型在前 *T* 个时刻的校正预测值 $\tilde{\theta}_{k}$ ;然后根据式(7)计算各个 模型的预测误差绝对值之和 *E*,取 *E* 最小的模型类 并根据式(6)对温度进行预测:

$$\widetilde{\widetilde{\theta}}_{k} = \widetilde{\theta}_{k} - (\widetilde{\theta}_{k-\tau} - \theta_{k-\tau}), \qquad (6)$$

$$E = \sum_{i=k-T}^{k} |\tilde{\tilde{\theta}}_{i} - \theta_{i}|.$$
<sup>(7)</sup>

3 实验与结果分析

采用前述建模方法,用现场数据(由于研究现场

分解炉的设计原因,这里用五级旋风筒出口温度代 替分解炉出口温度)对 2.3 节提出的 3 种模型选取 方法进行验证,结果如图 5、6 所示.图 5 是对部分建 模数据分别用单模型预测温度(SMPT)、多模型预 测温度(MMPT)、校正多模型预测温度(CMMPT) 和实际温度(RT)进行对比,可以看到 4 条曲线几乎 重合,对建模数据都获得了较好的预测效果.图 6 是 随机选取时域为 5 h 的现场数据,分别应用 SMPT、 MMPT、CMMPT 与 RT 进行比较,由图可以看出, SMPT 表现出对工况变化的不适应,在某些点预测 误差较大;MMPT 预测误差比较柔和,但易使预测



图 5 建模数据的温度预测效果





图 6 测试数据的温度预测效果

Fig. 6 Temperature predictive effect of testing data

温度整体偏大或者偏小; CMMPT 虽然在某些峰值 点也存在较大误差,但比 SMPT 要好很多,其误差 在实际控制中完全可以接受,并且该方法没有 MMPT 那种温度整体偏大或者偏小的情况.可见, 基于参数聚类的预测模型预测准确且对带有干扰 的、工况变化的现场数据有适应能力,体现了该模型 鲁棒性较强.

测试结果表明,采用 SMPT 温度预测误差均值 为 3.050 ℃,采用 MMPT 温度预测误差均值为 2.998 ℃,采用 CMMPT 温度预测误差均值为 1.908 ℃.可以看出基于校正多模型预测方法的预 测误差约为 1.9 ℃,明显优于其他方法.

图 7 是对某水泥厂分解炉应用 CMMPT 进行 预测控制的效果图,其中投切点前为人工控制,投切 点后采用基于本文建模方法的预测控制.由图可见, 该方法能够将温度稳定在分解炉所需温度的下限, 进而实现节能优化与平稳控制.



图 7 采用 CMMPT 的分解炉温度预测控制效果

- Fig. 7 Calciner temperature predictive control result by CMMPT
- 4 结 语

本文提出一种基于子空间聚类的模型参数聚类 方法,以建立识别不同工况的模型.实验结果表明: 该建模方法具有较好的适应能力与预测准确性.同 时,本文建模方法具有一般性,便于移植,适用于多种工业控制场合.

成功应用该方法的关键在于:具备多时段、有代 表性的大量历史数据;所选模型结构与分时段数据 特征匹配;采取合适的聚类算法;实时运行中能够选 择适当的聚类模型.针对这几个关键点,本研究还能 做很多改进,包括选择更合适的建模数据,选取更优 的高维数据聚类算法,不同工业流程选择最佳模型 结构以及采用模型加权取值等更好的模型选取方 法,这些将是下一步研究的重点.

### 参考文献(References):

- [1]MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, et al. Constrained modelpredictivecontrol: stability and optimality
   [J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [2] GANG F. A survey on analysis and design of modelbasedfuzzycontrolsystems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(5): 676-697.
- [3] YU H L, LIU W L, DONG H J. Research on recognition of working condition for calciner and grate cooler based onexpertsystem [C] // 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. [S. I.]: IEEE, 2012: 1733-1737.
- [4]FIDAROS D K, BAXEVANOU C A, DRITSELIS C D, et al. Numerical modeling of flow and transport processes in acalcinerfor cement production [J]. Powder Technology, 2007, 17(12): 81-95.
- [5] MUJUMDAR K S, GANESH K V, KULKARNI S B, et al. Rotary cement kiln simulator RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(9): 2590-2607.
- [6] 梅书霞.水泥分解炉结构参数优化与煤粉燃烧的数值模 拟[D].武汉:武汉理工大学,2008:86-112.
  MEI Shu-xia. Numerical simulations of gas-solid flow field and coal combustion in precalciners of cement industry for optimization [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008: 86-112.
- [7] SAIDUR R, HOSSAIN M S, ISLAM M R, et al. Areviewonkilnsystemmodeling [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2487-2500.
- [8] 邹健,诸静.模糊预测函数控制在水泥回转窑分解炉温 控系统中的应用研究[J].硅酸盐学报,2001,29(4): 318-321.

ZOU Jian, ZHU Jing. Fuzzy predictive functional control strategy for decomposing furnace temperature system of cement rotary kiln [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(4): 318-321.

(下转第 2222 页)

LI Yan-wen, HUANG Zhe, WANG Lu-min. Kinematics analysis of novel 4-DOF parallel manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (10): 66-71,76.

- [3] LEE D, KIM J, SEO T W. Optimal design of 6-DOF eclipse mechanism based on task-oriented workspace[J]. ROBOTICA, 2012, 30(7): 1041-1048.
- [4] 陈修龙,冯伟明,赵永生.五自由度并联机器人机构动力 学模型[J].农业机械学报,2013,44(1):236-243.
  CHEN Xiu-long, FENG Wei-ming, ZHAO Yongsheng. Dynamics model of 5-DOF parallel robot mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013,44(1):236-243.
- [5] GIOVANNI L, FEDERICO C, PAOLO R, et al. A homogeneous matrix approach to 3D kinematics and dynamics — I and II [J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(5): 573-605.
- [6] CHEN C, GAYRAL T, CARO S, et al. A six degree of freedom epicyclic-parallel manipulator[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME, 2012, 4(4): 041011.
- [7] QU Wen-tai, DONG Feng-lian, GUO Jing. Calculation of large rigid body pose and technology of synchronous coordinating control for multi-axis [C] // Applied Mechanics and Materials. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012, 220-223: 1190-1198.
- [8] SILVA O L, MENEGALDO L L. Inverse dynamics of a redundantly actuated four-bar mechanism using an optimal control formulation [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control-Transactions of the ASME, 2011, 133(6): 061009.
- [9] ZI B, CAO J, ZHU Z. Dynamic simulation of hybriddriven planar five-bar parallel mechanism based on sim-

#### (上接第 2143 页)

- [9] KOUMBOULIS F N, KOUVAKAS N D. Indirect adaptive neural control for precalcination in cement plants [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 60(3-5): 325-334.
- [10] 熊会思. 新型干法烧成水泥熟料设备设计、制造、安装 与使用[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004: 143.
- [11] ZHANG Jin-feng, PANG Bo, CAI Ning, et al. Predictive modeling of cement decomposing furnace temperature [C] // Intelligent Control and Automation. [S. l.]:IEEE, 2010: 1552-1556.

mechanics and tracking control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2011, 8(4): 28-33.

- [10] TAE W S, DEUK S K, HWA S K, et al. Dual servo control of a High-Tilt 3-DOF microparallel positioning platform [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2009, 14(5): 616-625.
- [11] 林光春,徐礼钜,隆飞.带闭链六自由度工业机器人动 力学解析模型[J]. 机械设计,2004,21(2):34-37.
  LIN Guang-chun, XU Li-ju, LONG Fei. Dynamics analytical model of 6-d of industrial robot containing closed chain[J]. Journal of Machine Design, 2004, 21 (2): 34-37.
- [12] LIN Y, TU X, XI F. Robust pose estimation with an outlier diagnosis based on a relaxation of rigid body constraints [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control-Transactions of the ASME, 2013, 135(1): 014502.
- [13] 房立金,党鹏飞.带有约束的 3-TPS 并联机床位姿误差 分析[J]. 机械工程学报,2013,49(1): 9-14.
  FANG Lin-jin, DANG Peng-fei. Pose error analysis of 3-TPS parallel kinematics machine with constraint mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 9-14.
- [14] MURA A. Six d. o. f. displacement measuring device based on a modified Stewart platform [J]. Mechatronics, 2011, 21(8): 1309–1316.
- [15] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2009: 35-52,73-74.
- [16] 严德昆. 二阶过阻尼系统传递函数辨识的新方法[J]. 控制理论与应用,2001,18(4):638-640.
  YAN De-kun. A new method for Identification of 2-order superdamping system transfer function [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(4):638-640.
- [12] 董会君.水泥生产过程预分解系统工况识别的研究
  [D].济南:济南大学, 2012: 24-29.
  DONG Hui-jun. Research of working recognition for cement production precalcining system [D]. Jinan: University of Jinan, 2012: 24-29.
- [13] FAYYAD U, REINA C, BRADLEY P S. Initialization of iterative refinement clustering algorithms[C]//
  Proc of the Fourth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. [S. l.]: AAAI, 1998: 194-198.