

## 高炉布料设定值优化控制

李晓理<sup>1†</sup>, 刘德馨<sup>2</sup>, 周翔<sup>2</sup>, 陈先中<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124;

2. 北京科技大学 自动化学院; 北京科技大学 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 高炉炼铁是钢铁生产中的重要能耗因素. 为了实现生产的节能降耗, 布料策略显得极为重要. 本文针对某钢铁厂高炉的无料钟布料系统, 基于现场采集的数据, 建立了以铁水质量和经济效益为变量的指标效益评价函数, 给出了最优设定料面的推理机制. 针对不同运行环境, 建立不同的料面优化设定值, 构成多模型集合. 当工况环境发生大的变化时, 采用切换机制, 对比多模型集合, 选择最优料面设定值, 并在此基础上对布料进行自适应控制, 计算布料矩阵, 提高布料过程的快速性和准确性. 最后对整个高炉动态优化控制系统做了总体分析, 基于现场数据, 对高炉布料模型进行了仿真和验证.

**关键词:** 布料; 优化设定值; 多模型; 自适应控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Setting value optimal control for blast furnace burden distribution

LI Xiao-li<sup>1†</sup>, LIU De-xin<sup>2</sup>, ZHOU Xiang<sup>2</sup>, CHEN Xian-zhong<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing;

Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education),

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Iron-making in blast furnace plays an important role in the energy consumption of steel production. To realize the energy-saving and consumption-reducing, the strategy for load-distribution is of key importance. According to the collected field data, we propose a performance-evaluation function with molten iron quality and economic efficiency as variables; develop the principle for designing the optimal burden surface; buildup optimal setting-values for various burden surfaces to constitute the multi-model set in different operation environments. When a large change in the operation environment is occurred, a switching device is operated to select the setting value of the optimal burden surface from the multi-model set. By this time, an adaptive controller will be put into operation to control the process of burden distribution, to adaptively calculate the burden distribution matrix and to enhance the accuracies and rapidity of process of burden distribution. Finally, a complete analysis is carried out for the dynamic control system with the furnace as a whole. Simulation based on the field data has been carried out; the results validate the effectiveness of the proposed strategy.

**Key words:** burden distribution; optimal setting value; multiple models; adaptive control

### 1 引言(Introduction)

钢铁行业是一个国家的国民经济命脉, 2013年我国的钢铁产量占全世界的50.84%, 但是我国生产高品质钢铁以及在冶炼过程中的吨钢能耗相对于先进国家仍比较落后. 因此, 提高设备水平, 实现高产低耗的目标, 是我国钢铁工业首要解决的问题. 对提高我国整个钢铁工业的技术水平和促进可持续发展具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>. 钢铁生产过程包括炼铁、炼钢、金属加工和成型等工艺, 其中高炉炼铁是首要环节, 占总能耗的70%, 是节能降耗的关键因素, 也是技术进步与

创新的重要领域. 研究结果表明, 合理的炉料分布可以形成理想的气流条件, 充分利用煤气获得最低燃料消耗, 进而大大的提高焦炭的利用率<sup>[4]</sup>. 因此, 根据布料规律来调整装料的顺序和质量, 获得合理快速的布料方式<sup>[5]</sup>, 可以达到稳定生产、顺行炉况、提高能源利用率和工业产出的效果.

近些年来, 国内外专家学者对于合理的布料分布越来越重视, 这方面的研究结果也越来越多, 在布料仿真模型方面的研究尤为突出. Hinnela等<sup>[6]</sup>用神经网络建立了高炉混合模型, 解决了边界条件影响下的料

收稿日期: 2014-09-12; 录用日期: 2015-05-25.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: lixiaoli@hotmail.com; Tel.: +86 10-62332926.

国家自然科学基金项目(61473034), 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20130006110008)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61074055) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20130006110008).

面变化; Zhang等<sup>[7]</sup>建立了高炉数值模型, 主要对煤气流和料面坍塌进行分析; Nogami等<sup>[8]</sup>从流体力学角度对高炉软熔带模型进行了研究; 毕学工在著作[9]中详细论述了无钟高炉的布料过程及计算机的控制实现; 陈令坤等<sup>[10]</sup>采用摄像设备摄取料流轨迹和料面图像建立了高炉布料控制模型. 目前大部分高炉已采用了无料钟炉顶, 相应的高炉布料设备也在逐渐的改善, 但由于高炉内部复杂的物理、化学反应和高温、高压环境, 高炉炼铁过程中料面的实时变化很难监测和估计, 造成冶金行业已有的布料理论和实际情况具有一定的差距, 很难达到理想料面.

近些年来, 智能控制理论发展迅速. 其主要面向工程技术领域, 研究开发大规模复杂控制与管理系统的建模、分析和设计, 是控制论向复杂大系统广度发展的新分支, 为复杂系统建模、优化和控制提供了理论基础<sup>[11-12]</sup>. 高炉布料系统外部环境多变, 系统模型复杂, 控制目标不确定. 因此, 可采用智能控制理论中的自寻优控制方案来解决问题. 而多模型自适应控制<sup>[13]</sup>针对复杂工况“分而治之”的思想, 更是为工程师提供了一种简单可行的控制方法. 为解决此类问题, 本文研究工作在“863”项目的支持下进行大胆的尝试, 将合理的布料分布归纳为控制问题. 基于实时获得的多雷达料面数据<sup>[14]</sup>, 采用控制工程界的热点多模型自适应控制的思想, 针对不同工作环境建立多模型集合, 通过环境参数对比快速设置料面设定值, 在设定值附近, 根据优化生产指标获得最优的布料矩阵, 对高炉料面进行自适应控制, 保证高炉的顺产和优产.

本文结构如下, 首先建立高炉布料的数学模型, 然后在模型的基础上提出布料多模型自适应控制系统, 最后列举了实例图片, 给出了仿真研究结果.

## 2 高炉布料模型(Blast furnace burden distribution model)

目前我国高炉采用的多数为无料钟炉顶布料. 根据布料溜槽旋转倾角的不同, 可实现多环、定点、螺旋及扇形等多种布料方式, 有效地保证了煤气流的合理分布和炉料的顺行, 是重要上部调节手段.

### 2.1 炉料轨迹模型(Burden trajectory model)

布料溜槽末端下缘到料面之间的区域, 叫做高炉空区. 炉料离开溜槽在空区的运动轨迹, 叫做料流轨迹. 设高炉料面是中心对称的, 通过对料流轨迹的分析, 可以得到炉料落点与高炉中心的距离<sup>[15]</sup>.

炉料在空区中的运动如图1所示. 在空区中建立  $Oxyz$  直角坐标系. 设溜槽长度为  $l_0$ , 倾动轴中心线到溜槽底部的距离为  $b$ , 倾角为  $\alpha$ , 摩擦系数为  $\mu$ , 旋转速度为  $\omega$ , 炉料质量为  $m$ , 下落高度为  $h_0$ . 令炉料在溜槽上运动的初速度为  $v_0$ , 末速度为  $v$ , 末端切线方向的速度为  $v_1$ , 轴线方向的速度为  $v_2$ . 实际落点与料面中心

的距离为  $r$ .

可看出炉料离开溜槽的实际速度  $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ , 其中:  $v_1$  为  $\omega$ ,  $l_0$  和  $\alpha$  的函数,  $v_2$  为溜槽摩擦系数  $\mu$ ,  $v_0$ ,  $l_0$  和  $\alpha$  的函数<sup>[16]</sup>.

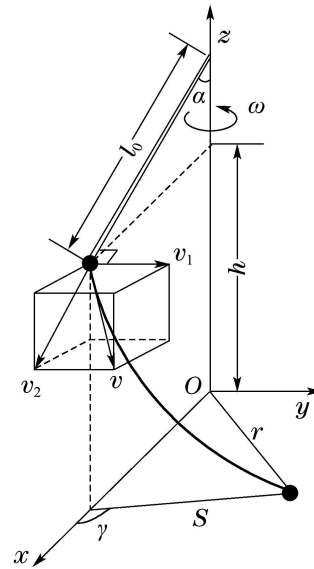


图 1 炉料运动过程

Fig. 1 Burden moving process

炉料在空区的运动过程中, 除了受到重力的作用, 还有煤气阻力. 通过分析炉料运动方程中煤气阻力对运动方程的影响, 推导出炉料堆尖离高炉中心距离, 并根据运动模型对布料进行优化, 减少布料控制误差. 在求解过程中, 设煤气阻力  $P$  的方向与炉料离开溜槽末端时的速度  $v$  方向相反, 且方向不变. 炉料在空区所受到的力如图2所示.

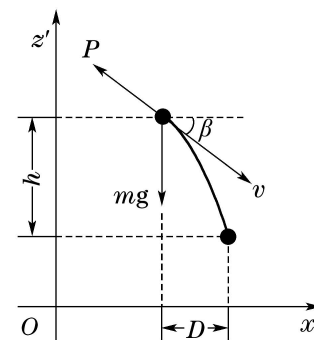


图 2 炉料在空区受力情况

Fig. 2 Load on burden in gas

可看出, 在水平方向上, 只受到煤气阻力在  $Ox'z'$  平面内分力  $P \cos \beta$  的作用, 则加速度  $a_{x'}$  为

$$a_{x'} = \frac{P \cos \beta}{m} \quad (1)$$

炉料在  $z'$  方向受重力  $mg$  和煤气阻力  $P$  的分力  $P \sin \beta$  的作用, 根据力学关系, 可得到加速度  $a_{z'}$ :

$$a_{z'} = g - \frac{P \sin \beta}{m} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \beta = \arctan \frac{v_2 \cos \alpha}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 \sin^2 \alpha}}$$

根据式(1)–(2), 炉料的运动方程为

$$D = v \cos \beta \cdot t - \frac{P \cos \beta}{2m} \cdot t^2, \quad (3)$$

$$h = v \sin \beta \cdot t + \frac{1}{2} \left( g - \frac{P \sin \beta}{m} \right) \cdot t^2, \quad (4)$$

式中:  $D$ 为炉料运动轨迹在 $Ox'z'$ 平面上的投影,  $h$ 为炉料在空区下落高度,  $t$ 为炉料离开溜槽到料面的时间(即炉料在空区的下落时间).

联立式(3)–(4)可得

$$D = v \cos \beta \Psi - \frac{P \cos \beta}{2m} \Psi^2, \quad (5)$$

式中

$$\Psi = \frac{-v \sin \beta + \sqrt{v^2 \sin^2 \beta + 2h \left( g - \frac{P \sin \beta}{m} \right)}}{g - \frac{P \sin \beta}{m}},$$

因此由溜槽旋转中心 $O$ 至炉料堆尖的距离 $r$ 为

$$r^2 = D^2 + \left( l_0 - \frac{b}{\tan \alpha} \right)^2 \sin^2 \alpha - 2D \left( l_0 - \frac{b}{\tan \alpha} \right) \sin \alpha \cos(\pi - \gamma), \quad (6)$$

$$\text{式中 } \gamma = \arctan \frac{v_1}{v_2 \sin \alpha}.$$

式(6)确定了炉料的落点位置, 它包括了溜槽倾角 $\alpha$ , 溜槽长度 $l_0$ , 旋转速度 $\omega$ , 炉料下落高度 $h_0$ , 炉料初速度 $v_0$ , 溜槽摩擦系数 $\mu$ 和煤气阻力 $P$ 等对炉料落点的影响.

### 2.2 炉料堆角模型(Stack angle model)

散装物料从一个高度不太高的空间落到没有阻挡的平面上会形成一个自然的圆锥, 锥面与水平面之间的夹角叫做“自然堆角”. 不同物质的自然堆角不同, 由颗粒、形状和密度等因素决定. 在高炉内, 炉料经溜槽和空区, 由于炉壁和煤气流的阻挡, 其堆角与自然堆角不同. 近似形成以落点为堆尖、靠近高炉中心为内堆角 $\varphi$ 和以靠近炉墙为外堆角 $\theta$ 的料面形状, 如图3所示.

本文中堆角采用文献[16]中给出的公式求解:

1) 内堆角 $\varphi$ (高炉中心侧): 认为它受炉料种类(焦炭和铁矿石)和炉内料线深度 $h$ 的影响, 与堆尖位置无关. 在炉料种类一定的情况下, 其在炉内的堆角主要与料线有关.

$$\tan \varphi = \tan \varphi_0 - k \frac{h}{R}, \quad (7)$$

式中:  $R$ 为炉喉半径,  $k$ 为系数,  $\varphi_0$ 为炉料的自然堆角.

2) 料面外堆角 $\theta$ (高炉炉墙侧), 由于其影响因素较复杂, 难以找出其变化规律. 当料线在碰撞点以下时, 炉料碰撞炉墙后垂直下落, 炉料的外堆角等于零; 当料线在碰撞点以上时, 可以采用经验公式计算.

$$\text{焦炭: } \theta = 73.12 - 1.97\alpha, \quad (8)$$

$$\text{铁矿石: } \theta = 79.77 - 2.04\alpha, \quad (9)$$

式中 $\alpha$ 为溜槽的倾角.

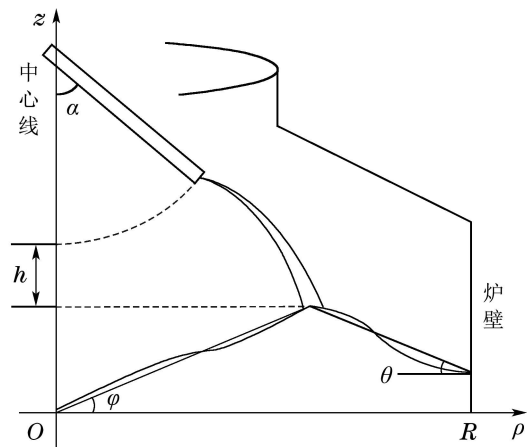


图3 高炉内外堆角

Fig. 3 Inner & outer stack angles of blast furnace

由于焦炭和矿石的批重、密度和粒度不同, 下落形成的堆角也是不同的. 一般情况下, 焦炭在炉内的堆角小于矿石在炉内的堆角, 因而焦炭比矿石易分布到高炉的中心.

### 2.3 基于雷达数据的料面模型 (Burden surface model based on radar data)

高炉内部是一个高温、高压、多粉尘环境, 料面数据的获取难度很大. 目前已有一些检测系统能够对高炉料面进行单点检测, 但效果不佳. 如果再此基础上, 在尽可能的环境下增加测量点, 获得更多的检测数据, 并对数据进行融合处理, 将获得更好的效果.

本文采用已在国内某大型钢铁厂投入使用的多雷达设备监控料面, 获得料面数据. 该厂在炉喉斜面的水平投影位置, 等间隔的方法, 垂直安装4台雷达, 另外2台在内环靠近炉中心位置倾斜安装, 实现料面的全覆盖<sup>[17]</sup>. 将6个雷达测量得到的距离数据进行处理, 得到6个点, 如图4中“\*”所示. 根据高炉料面的中心对称性, 建立料面模型.

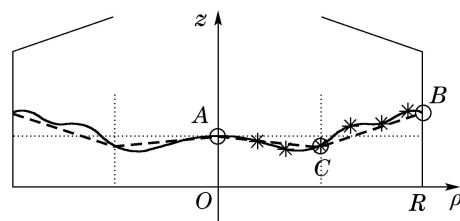


图4 高炉料面模型

Fig. 4 Blast furnace burden surface model

图4是半径为 $R$ 的高炉料面剖面图. 将6个雷达测量点用平滑曲线连接, 得到料面的近似曲线, 用实线表示.

在高炉布料中, 堆尖位置、内外堆角和炉料中心点的高度是料面的几个主要的特征. 因此可以将料面曲线进一步化简, 近似为包含这几个特征的折线.

固定料面中心点 $A$ 和炉壁点 $B$ , 在料面曲线上再找出新的一点 $C$ , 使得三点连线生成的折线与原料面曲线的偏离方差最小, 如图4中的虚线所示.

### 3 高炉布料设定值优化控制系统 (Setting value optimal control system of blast furnace burden distribution)

高炉布料控制系统有着环境复杂性, 模型模糊性和控制目标不确定性. 基于以上因素, 本文采用自寻优控制方法<sup>[11]</sup>动态优化设计料面设定值, 并进而设计多模型自适应控制器.

#### 3.1 高炉料面设定值优化 (Setting value optimal of blast furnace burden distribution)

自寻优控制是在某环境条件的约束或限制下, 自行寻求最优的或满意的工作状态和运行方式, 实现预期的最优或满意的控制目标. 自寻优控制系统运行过程中能不断搜寻被控对象的最优运行状态, 并自行控制对象趋向最优运行状态. 当环境和对象特性发生变化, 最优点漂移时, 自寻优控制系统不断搜寻最优点并制定最优控制决策, 不断调控系统状态趋向于最新的最优点附近.

自寻优控制有如下特点:

1) 自寻优控制只需要知道被控对象具有非线性, 不需要被控对象的精确数学模型;

2) 事先不需要控制量的给定值, 而要求系统去自动搜索最优工作点;

3) 自寻优控制系统的最优指标(即被控量)不是固定值, 也不是预先给定值, 它决定于实际生产过程的状态, 在控制过程中不断自动搜索获得;

4) 自寻优过程是一个自动搜索过程, 因为对于被控对象特性变化具有自适应能力.

正因为高炉布料控制系统具有的复杂性, 适合采用自寻优控制策略解决问题. 高炉布料系统的控制方案, 首先应结合生产过程和环境因素得出最优的期望料面设定值. 而设定值的好坏通常要通过生产的铁水质量和经济效益评估.

高炉流出铁水主要评价指标是温度和含硅量, 温度一般在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 假设温度最佳值为 $T_0$ 当前温度为 $T$ , 则可以将温度的偏差量作为衡量铁水质量的第一个因素 $Q_1$ :

$$Q_1 = g_1(|T - T_0|). \quad (10)$$

式(10)说明, 温度的变化量与质量指标之间存在着对应函数关系 $g_1$ 使得 $T$ 越接近 $T_0$ , 质量指标 $Q_1$ 越高.

同样地, 铁水的含硅量 $\mu$ 也影响着高炉的利用率. 因为高炉原料的铁矿石具有差异性, 有些钢厂需要 $\mu$ 越小越好, 有些钢厂则需要其稳定性, 但 $\mu$ 一般在 $0.26\% \sim 0.33\%$ 之间. 所以 $\mu$ 可以作为另一个质量指标, 其对应函数关系为 $g_2$ :

$$Q_2 = g_2(\mu). \quad (11)$$

由于其他因素对高炉成产质量的影响相对较小, 这里只考虑铁水温度指标 $Q_1$ 和硅含量指标 $Q_2$ . 给每个质量指标相应权重, 得到铁水的质量评价指标总函数为

$$Q = a_1 Q_1 + a_2 Q_2 = a_1 \cdot g_1(|T - T_0|) + a_2 \cdot g_2(\mu), \quad (12)$$

式中 $a_1$ 和 $a_2$ 为相应权重. 式(12)说明铁水的质量指标要求合理的温度和硅含量使得 $Q$ 越小越好.

高炉炼铁主要技术经济指标为焦比、有效容积利用系数和冶煤气煤粉单耗量.

焦比是冶炼每吨生铁 $m_0$ 所需的焦炭质量 $m_a$ , 一般在 $290\sim 350\text{ kg/t}$ 之间. 焦比 $\frac{m_a}{m_0}$ 越小, 经济效益越高.

$$P_1 = g_3\left(\frac{m_a}{m_0}\right), \quad (13)$$

式中 $g_3$ 为焦比与经济指标之间的对应函数关系.

有效容积利用系数为生铁产量 $m_b$ 与高炉内有效容积 $V_e$ 的比, 范围一般在 $1.9 \sim 2.8\text{ t/m}^3$ 之间, 有效容积利用系数 $\frac{m_b}{V_e}$ 越大经济效益越高.

$$P_2 = g_4\left(\frac{m_b}{V_3}\right), \quad (14)$$

式中 $g_4$ 为有效容积利用系数与经济指标之间的对应函数关系.

煤气煤粉单耗量是高炉每冶炼一吨生铁所喷吹的煤气和煤粉使用量 $m_c$ , 一般在 $580 \sim 650\text{ m}^3/\text{t}$ 之间. 单耗量 $\frac{m_c}{m_0}$ 越低经济效益越高.

$$P_3 = g_5\left(\frac{m_c}{m_0}\right), \quad (15)$$

式中 $g_5$ 为煤气煤粉单耗量与经济指标之间的对应函数关系.

综合式(13)–(15), 经济指标函数可以写成如下形式, 使得经济效益越大越好:

$$P = -a_3 P_1 + a_4 P_2 - a_5 P_3 = -a_3 \cdot g_3\left(\frac{m_a}{m_0}\right) + a_4 \cdot g_4\left(\frac{m_b}{V_3}\right) - a_5 \cdot g_5\left(\frac{m_c}{m_0}\right), \quad (16)$$

式中 $a_3$ ,  $a_4$ 和 $a_5$ 为相应权重.

结合式(12)和式(16), 总的评价指标函数 $S$ 由质量指标 $Q$ 和经济指标 $P$ 共同决定:

$$S = -Q + P = -a_1 Q_1 - a_2 Q_2 - a_3 P_1 + a_4 P_2 - a_5 P_3, \quad (17)$$

式中:  $\sum_{i=1}^5 a_i = 1$ , 具体的 $a_i$ 值可根据现场工况的变化和实际需求进行调整, 如在一段时间内, 对铁水温度的性能指标要求较高, 则可适当增加 $a_1$ 的权值来满足需求. 在实际操作过程中, 对每一个计算量 $Q_1, Q_2, P_1, P_2$ 和 $P_3$ 可以通过除以其取值范围对其归一化, 这样既保证了量纲的统一, 又保证了各个分量的取值的范围的一致.

高炉出铁水一般满足如下规律, 考虑本文研究的2500 m<sup>3</sup>高炉, 一般设有两个出铁口交叉出铁, 间隔时间约为20 min左右, 每次出铁持续时间大约为150 min, 因此一般情况下, 一个小时之内, 只有20 min左右无铁水流出, 有时间隔可以更短, 甚至10 min左右, 现在甚至可以实现0间隔出铁, 为铁水质量的实时检测提供了便利.

式(17)中的 $S$ 一般每隔几个小时计算一次, 是一个时间序列的值. 因此定义时间序列 $n$ :

$$E_n = S_n - S_{n-1} = -a_1 \Delta Q_1 - a_2 \Delta Q_2 - a_3 \Delta P_1 + a_4 \Delta P_2 - a_5 \Delta P_3, \quad (18)$$

式中 $E_n$ 即为评价指标的当前变化.

由式(18)可知, 指标值的当前变化与高炉温度、硅含量以及当前焦炭、煤粉、冶炼生铁质量有关. 而这些都是可测量获得. 在生产实际中, 只要钢厂给定 $g_1, \dots, g_5$ 的函数关系,  $E_n$ 是可求的.

当 $E_n > 0$ 时, 由于 $g_1, \dots, g_5$ 这5个函数皆为增函数, 也就意味着 $S_n$ 较前一时刻 $S_{n-1}$ 的值有所增加, 如果这种增加是由于每一个分量的正贡献导致, 就说明温度误差减小, 铁水硅含量降低, 焦比减小, 有效容积利用系数增加, 煤气煤粉单耗量降低. 当然也存在某几个分量大幅增加, 某几个分量减小的情况. 当 $E_n = 0$ 时, 说明指标没有发生变化.  $E_n < 0$ 时与 $E_n > 0$ 的情况正好相反.

根据 $E_n$ 和已有设定料面 $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$ 就可以在预测 $n+1$ 时刻最优料面 $H_{n+1}$ . 首先给定一个微小的料面变化步长增量 $\Delta H$ , 大小由工厂高炉实际生产情况而定. 在给定高炉环境稳定条件下, 料面最优设定值的预测方式如下:

1) 当 $n = 0$ 时:

给出初始料面 $H_0$ , 令 $H_1 = H_0 + \Delta H$ ;

2) 当 $n = 1$ 时:

计算 $S_1$ , 利用式(18)求得 $E_1$ .

If  $E_1 > 0$ , Then  $H_2 = H_1 + \Delta H$ ;

If  $E_1 \leq 0$ , Then  $\Delta H$ 取反, 即 $\Delta H = -\Delta H$ , 令 $S_1 = S_0, H_2 = H_0 + \Delta H$ .

3) 当 $n = 2$ 时:

计算 $S_2$ , 利用式(18)求得 $E_2$ .

If  $E_2 > 0$ , Then  $H_3 = H_2 + \Delta H$ ;

If  $E_2 = 0$ , Then  $H_3 = H_2$ , 预测停止, 认为 $H_3$ 为最优;

If  $E_2 < 0$ , Then  $H_3 = H_1$  ( $E_1 > 0$ ) or  $H_3 = H_0$  ( $E_1 \leq 0$ ), 预测停止, 认为 $H_3$ 为最优.

4) 当 $n \geq 3$ 时:

计算 $S_n$ , 利用式(18)求得 $E_n$ .

If  $E_n > 0$ , Then  $H_{n+1} = H_n + \Delta H$ ;

If  $E_n = 0$ , Then  $H_{n+1} = H_n$ , 预测停止, 认为 $H_{n+1}$ 为最优;

If  $E_n < 0$ , Then  $H_{n+1} = H_{n-1}$ , 预测停止, 认为 $H_{n+1}$ 为最优.

步骤1)–4)确定了一个能使 $S_n$ 增长的 $\Delta H$ 使得预测的料面变化是沿着指标函数增长的方向进行的.

注意到以上的预测方式是定步长逐步式调整设定料面以达到最优, 而不是变步长调整, 原因是高炉的内部料面调整不能做太大变动, 否则会影响到高炉内部的温度和煤气流变化, 从而使高炉的内部环境改变, 使得前提假设不成立, 所以是局部最优.

### 3.2 布料矩阵控制(Burden distribution matrix control)

多环布料是在上料的同时改变溜槽倾角进行旋转布料. 其优点是布料形成的料面平坦且改善了粒度偏析问题.

如下矩阵被称为布料矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_{11} \\ N_1 & N_2 & \cdots & N_{11} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

矩阵第1行代表所选择的角位, 共11个, 由11个等面积圆环对应. 第2行代表对应角位的下料圈数.

高炉的布料模型可以描述成

$$H = f(\Omega, H_0, W), \quad (20)$$

其中:  $\Omega$ 表示高炉内部的环境状态, 主要包括温度、铁水成分、焦比、有效容积利用系数和煤气流利用率等因素;  $f(\cdot)$ 表示布料函数, 主要由第2.1节的料流轨迹和第2.2节的堆角形状决定. 具体算法请参考文献[16].

式(20)表示在 $\Omega$ 一定的情况下, 已知原始料面 $H_0$ 和布料矩阵 $W$ 就能得到新的料面 $H$ , 另一方面, 已知初始料面 $H_0$ 和设定的期望料面 $H$ , 可以逆向求出对应的布料矩阵 $W$ . 在高炉布料控制中, 布料矩阵 $W$ 一直是高炉研究的重点, 溜槽倾角 $\alpha$ 和布料圈数 $N$ 很大程度上影响着料面的形状, 从而影响高炉生产.

首先, 分析布料矩阵 $W$ 中布料溜槽倾角 $\alpha$ 把半径为 $R$ 的高炉沿半径方向划分成11个等面积圆环, 则每

个圆环的半径 $r_i$ :

$$r_i = \sqrt{\frac{R^2 \times i}{11}}, i = 1, 2, \dots, 11. \quad (21)$$

取每个圆环的中心线为堆尖横坐标位置, 可以求得每个圆环所对应的炉料落点距中心的向心距 $r'_i$ :

$$r'_1 = 0, r'_i = \frac{r_i + r_{i-1}}{2}, i = 2, 3, \dots, 11. \quad (22)$$

考虑在一定的温度、压力、煤气流和布料装置尺寸参数等条件下, 根据式(6), 溜槽倾角 $\alpha$ 与炉料落点 $r$ 存在一一对应关系. 关于 $\alpha$ 的解析解相当复杂, 因此求解对应 $r'$ 的 $\alpha$ 必须用计算机反复迭代搜索. 方法是使其 $\alpha$ 从0度以分为步长增长到90度, 求解出最贴近 $r'_i$  ( $i = 2, 3, \dots, 11$ )的11个对应角度 $\alpha_i$  ( $i = 2, 3, \dots, 11$ ).

先给出两个假设:

**假设 1** 假设布料模式由外环向内环布料.

**假设 2** 假设单圈投入炉料质量, 即批重给定. 焦炭和烧结矿的特性不同, 批重也不同.

根据假设1, 求布料矩阵的最外环布料圈数 $N_{11}$ , 解法如下:

设在第 $n$ 时刻,  $N_{11} = 1$ , 并使其按式 $N_{11} = N_{11} + 1$ 依次增大, 寻找一个最大的整数 $N_{11}$ , 与 $\alpha_{11}$ 形成单环布料矩阵(此时布料矩阵的其他10环 $N_1, N_2, \dots, N_{10}$ 布料圈数皆为0). 代入式(20)求得布料后的料面 $H$ , 比较此时的 $H$ 和此时的期望料面 $H_n$ , 在第11环 $r'_{11}$ 对应的点 $z$ 轴方向上的高度. 若达到期望料面高度, 则第11环布料完毕, 将布料后的料面 $H$ 作为新初始料面赋给 $H_0$ .

依据以上方法依次从外环向内环求解 $N_{10}, N_9, \dots, N_1$ , 直至所有 $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 11$ )求解完.

### 3.3 高炉布料设定值优化控制系统(Setting value optimal control system of blast furnace burden distribution)

高炉的生产过程是将焦炭和铁矿石按照一定的比例和分布方式混合, 并加以其他催化剂, 在高炉内充分燃烧, 生成铁水的过程, 整个过程非常复杂. 高炉生产控制系统是由料面预测过程和布料矩阵控制相结合的动态优化控制系统.

考虑当前环境状态为 $\Omega_a$ , 对应的料面设定值初值和布料矩阵为 $\{H_a, W_a\}$ . 保持环境状态 $\Omega_a$ 不变, 经过动态优化过程 $\Gamma_a$ , 逐渐达到最优控制量 $\{H_a^*, W_a^*\}$ , 记为

$$\Gamma_a = \{H_a, W_a\} \rightarrow \{H_a^*, W_a^*\}, \quad (23)$$

其中:  $H_a^*$ 表示状态 $\Omega_a$ 下的最优设定料面,  $W_a^*$ 表示最优布料矩阵.

由于高炉的生产时延, 评价指标的计算需要有一定的时间间隔, 一般情况下在1小时以上, 而高炉布料

器在几分钟之内就会操作一次, 所以会在一小时之内多次由同一料面设定值和雷达实测料面值逐步调整布料矩阵 $W_a$ , 直至下一次评价指标计算出来. 然后通过高炉料面的设定值预测步骤每间隔一小时调整料面设定值, 重复以上步骤即形成动态优化过程 $\Gamma_a$ , 直至得到最优的 $\{H_a^*, W_a^*\}$ 结束.

高炉生产的工况非常复杂, 环境状态常常发生变化, 如天气变化会导致炉料含水量不同、生产计划改变、甚至是设备故障、悬料、崩料产生的煤气流分布的破坏, 都会导致高炉从环境状态 $\Omega_a$ 变到下一环境状态 $\Omega_b$ . 工作环境的改变很大程度体现在这5个参数的变化上.

定义状态 $\Omega_a$ 过渡到状态 $\Omega_b$ 的动态优化过程为 $\Gamma_{ab}$ :

$$\Gamma_{ab} = \{H_a^*, W_a^*\} \rightarrow \{H_b^*, W_b^*\}, \quad (24)$$

其中:  $H_b^*$ 表示状态 $\Omega_b$ 下的最优设定料面,  $W_b^*$ 表示最优布料矩阵. 显然 $\Gamma_a$ 和 $\Gamma_{ab}$ 的动态优化过程是类似的, 差别在于初始状态不一样, 但这并不影响动态优化结果.

值得注意的是, 整个最优动态控制的每次指标计算周期较长, 而布料矩阵的调整周期较短, 因此在每次指标计算之前, 布料矩阵会根据同一料面设定值进行多次调整, 使得布料矩阵的布料精度在每一次指标计算出之前能满足料面设定值的要求.

根据多次生产获得的数据, 每一种工作环境状态 $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )都会表现在温度、铁水硅含量、焦比、有效容积和煤气煤粉单耗量这5个参数上, 配合相应的边界参数(如煤气流的分布状况参数), 不同的环境状态会构成多固定模型集合 $\Omega = \{\Omega_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ . 在每一种环境下, 采用设定值优化的方法, 获得每一种环境状态 $\Omega_i$ 对应的期望料面设定值 $H_i^*$ , 并在最优设定值的指引下, 求出此期望料面设定值对应的稳态运行布料矩阵 $W_i^*$ . 实际生产过程中, 在线的分析当前工况环境的5个评价指标, 可采用模糊贴进度的方法, 把当前环境与模型库 $\Omega$ 相匹配, 进而切换相应的布料矩阵.

具体的基于优化设定值的多模型自适应控制器构成如下:

1) 对于某一环境工况 $\Omega$ , 通过环境参数对比, 在模型集合 $H$ 中选择合适的期望料面设定值 $H_0^*$ .

2) 根据此初始料面设定值 $H_0^*$ , 按照第3.1节中设定值优化步骤, 以及第3.2节求解布料矩阵, 自适应调整料面设定值和布料矩阵.

3) 对最终获得的料面设定值和运行的布料矩阵, 与模型集合和与集合中对应的稳态运行布料矩阵相对比, 判断结果的准确性.

4) 通过故障检测或参数检测系统, 判断高炉运行工况环境是否发生大的跳变, 若有, 则对比模型集合

$\Omega$ 和 $H$ ,重新改变料面设定值初值.再回到步骤1).

整个控制过程具有生产制造全流程优化控制的特点<sup>[18-19]</sup>.其控制系统结构如图5所示,图中当边界环

境无大的变化时,  $\Delta\tilde{H}^* = 0$ , 对此多模型集合 $\Omega$ 和 $H$ ,选择合适的料面设定值 $H^*$ ,并通过容错控制器在 $\tilde{H}^*$ 的基础上给出大的调整量 $\Delta\tilde{H}^* = H^* - \tilde{H}^*$ .

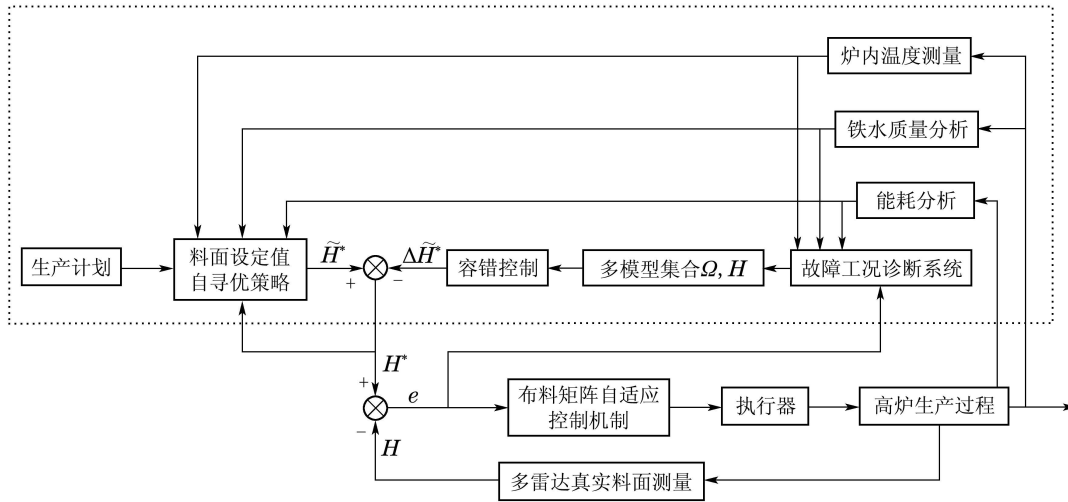


图5 高炉布料设定值优化的控制系统结构

Fig. 5 The structure diagram of setting value optimal control system of blast furnace burden distribution

整个过程采用多固定模型及变换初值的自适应模型构成的多模型自适应控制机制<sup>[20-22]</sup>。多个固定模型及料面设定值的存在,使得高炉工作环境发生大的跳变时,高炉料面设定值能够迅速的切换到多模型集合当中对应工况环境参数附近的料面设定值处,并在此处进一步进行自适应调整,保证了高炉布料控制的快速准确运行。

#### 4 实例仿真(Case simulation)

图6是现场的6个雷达在某高炉上实际探测后显示的数据信息和模拟料面信息的一个软件界面,该图可以实时显示雷达的原始数据和处理后得到的料面数据并进行二维和三维模拟。

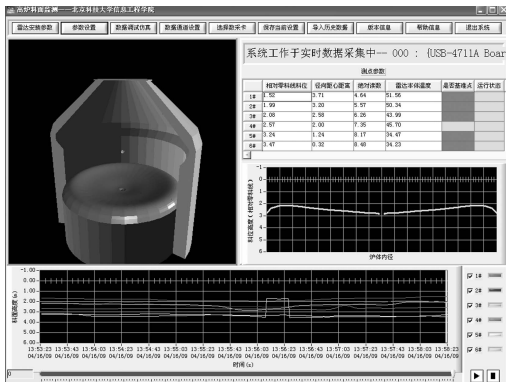


图6 多雷达数据显示界面

Fig. 6 Multiple radar data display interface

图7是研究中,基于高炉机理和料面数据建立的布料仿真模型,该模型能直观的显示布料矩阵和料面的关系,并给出相关的料面信息。

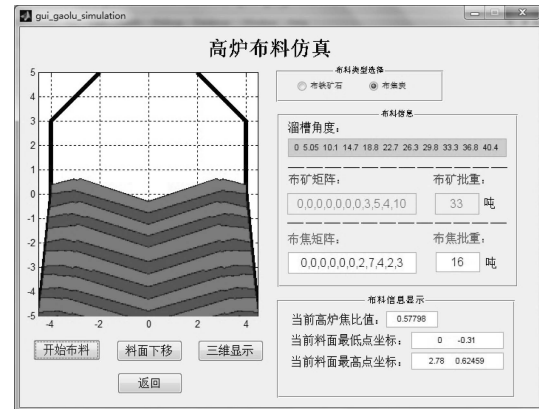


图7 布料系统仿真

Fig. 7 Burden distribution system simulation

基于研究项目中的多雷达数据,本论文在研究中将多雷达数据进行了料面的建模和特征提取。

以下给出仿真实例,对于一个半径 $R = 4$ 的高炉,多雷达原始的6维数据:

$$[4.3994, 5.2881, 5.4468, 6.8262, 7.0557, 7.2168].$$

经过数据处理,得到6个料面点坐标:

$$\{(0.554, -0.834), (1.328, -0.457), (2.000, -0.151), (2.584, 0.466), (3.201, 0.370), (3.713, 0.544)\}.$$

将6点连成的曲线折线化,提取料面特征,得到 $A, B$ 和 $C$ 3点的坐标,用 $H_0$ 表示:

$$H_0 = \{(0, 0.952), (2.971, 0.376), (4, 0.374)\}.$$

根据高炉相关数据和第3.1节的算法,经过料面

预测求出此时刻的期望料面 $H^*$ :

$$H^* = \{(0, 0.268), (2.804, 0.850), (4, 0.707)\},$$

因此, 在已知初始料面 $H_0$ 和设定料面 $H^*$ 的情况下, 通过第3.2节可以得到如下布料矩阵 $W$ :

$$\begin{bmatrix} 0 & 5.1 & 9.8 & 14.5 & 18.7 & 22.3 & 26.1 & 29.5 & 33.0 & 36.4 & 40.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 5 \end{bmatrix},$$

其中第1行溜槽倾角 $\alpha$ 根据实际情况精确到0.1度。

图8为料面设定值优化系统验证结果, 点划线代表初始料面 $H_0$ , 虚线代表设定料面 $H^*$ , 把初始料面 $H_0$ 和前面得到的布料矩阵 $W$ , 代入式(20)可得布料后的料面曲线 $H$ , 用实线表示。

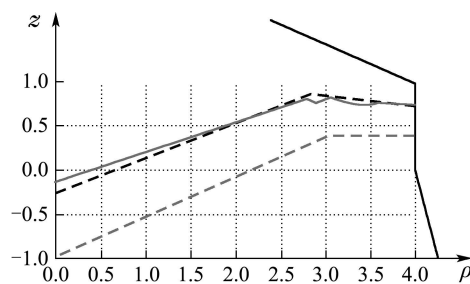


图 8 料面设定值优化系统验证

Fig. 8 Verification of burden surface setting value optimal system

可以看出, 曲线 $H$ 和设定的料面的曲线 $H^*$ 也存在一定的误差. 计算得, 两条曲线的偏差程度 $E = 0.0116$ , 相对于高炉内部的误差来说, 已经相当小, 完全满足要求。

在某钢厂 $2500 \text{ m}^3$ 高炉上安装了多雷达检测系统, 并通过大量现场数据, 构成多模型自适应控制系统, 从而为高炉操控人员及时掌握料面高程、形状提供了更直观的信息, 便于操控人员及时发现、处理低料位、坍塌以及料面不合理等情况, 为高炉炉况的稳定创造了一定条件, 同时也为高炉提高煤气利用率、提煤降焦创造了条件。

项目实施后,  $2500 \text{ m}^3$ 高炉经济指标得到了大幅度提升. 其中煤气利用率由实施前的48.07%提高到49.57%, 提高了1.504%, 达到了项目目标要求(0.5%). 煤气利用率的提高, 为高炉降低燃料比创造了良好条件, 燃料比平均下降了16.8 kg/t.

## 5 结论(Conclusions)

本论文首先根据多雷达数据建立了高炉料面模型并提出了特征提取方法. 通过智能控制论中的自寻优控制方案, 建立生产指标评价函数给出了最优设定料面的推理机制, 并在此基础上根据工况环境不同, 构成多模型集合, 结合布料过程自适应机制,

建立了整个高炉布料系统的多模型控制方案, 并在布料矩阵的计算上进行了仿真。

在当前高炉布料开环的现状下, 本论文首次提出了基于多雷达数据和指标函数形成的闭环控制系统, 能够对高炉上下部炉料调剂给出控制方案. 并在某钢厂高炉上进行了实例测试, 在钢厂的节能降耗和经济效益方面取得了一定的成果。

## 参考文献(References):

- [1] ZHOU X, LI X L, LIU D X, et al. Analysis and pattern recognition of blast furnace burden surface based on multi-radar data [C] // *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Dalian: IEEE Computer Society, 2010: 286 – 291.
- [2] 杨天钧, 左海滨. 中国高炉炼铁技术科学发展的途径 [J]. *钢铁*, 2008, 43(1): 1 – 6.  
(YANG Tianjun, ZUO Haibing. Compound behaviors in pheromone robotics [J]. *Iron & Steel*, 2008, 43(1): 1 – 6.)
- [3] 张寿荣. 21世纪前期钢铁工业的发展趋势及我国面临的挑战 [C] // *2007中国钢铁年会论文集*. 成都: 冶金工业出版社, 2007: 107 – 117.  
(ZHANG Shourong. The tendency of world steel industry in the first 2 decades of 21st century and the challenges facing Chinese steel industry [C] // *Proceedings of CSM 2007 Annual Meeting*. Chengdu: Metallurgical Industry Press, 2007: 107 – 117.)
- [4] 卢燕. 高炉无料钟布料控制系统研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2007.  
(LU Yan. Study on bell-less burden distribution control system of blast furnace [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2007.)
- [5] RADHAKRISHNAN V R, RAM K M. Mathematical model for predictive control of the bell-less top charging system of a blast furnace [J]. *Journal of Process Control*, 2001, 1(11): 565 – 586.
- [6] HINNELA J, SAXEN H, PETERSSON F. Modeling of the blast furnace burden distribution by evolving neural networks [J]. *Process Design and Control*, 2003, 42(11): 2314 – 2323.
- [7] ZHANG S J, YU A B, ZULLI P, et al. Numerical simulation of solids flow in a blast furnace [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26(2): 141 – 154.
- [8] NOGAMI H, CHU M, YAGI J I. Multi-dimensional transient mathematical simulator of blast furnace process based on multi-fluid and kinetic theories [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29(11/12): 2438 – 2448.
- [9] 毕学工. 高炉过程数学模型及计算机控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.  
(Bi Xuegong. *Mathematical Model of Blast Furnace Process and Computer Control* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.)
- [10] 陈令坤, 于仲洁, 周曼丽. 高炉布料数学模型的开发及应用 [J]. *钢铁*, 2006, 41(11): 13 – 16.  
(CHEN Lingkun, YU Zhongjie, ZHOU Manli. Development and application of blast furnace burden distribution model [J]. *Iron & Steel*, 2006, 4(11): 13 – 16.)
- [11] 涂序彦, 王枞, 郭燕慧. 大系统控制论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.  
(TU Xuyan, WANG Zong, GUO Yanhui. *Modelling of Large System Cybernetics* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005.)
- [12] 涂序彦, 王枞, 刘建毅. 智能控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
(TU Xuyan, WANG Zong, LIU Jianyi. *Intelligent Cybernetics* [M]. Beijing: Science Press, 2010.)



- [13] 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
(WANG Wei, LI Xiaoli. *Multiple Model Adaptive Control* [M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [14] 陈先中, 丁爱华, 吴昀. 高炉雷达料面成像系统的设计与实现 [J]. 冶金自动化, 2009, 33(2): 52 – 56.  
(CHEN Xianzhong, DING Aihua, WU Jun. Design and implementation of radar burden imaging system in the blast furnace [J]. *Metalurgical Industry Automation*, 2009, 33(2): 52 – 56.)
- [15] 任廷志, 盛义平. 高炉溜槽布料器的布料规律 [J]. 钢铁, 1995, 30(5): 5 – 8.  
(REN Tingzhi, SHENG Yiping. Burden distribution by chute of bell-less top BF [J]. *Iron & Steel*, 1995, 30(5): 5 – 8.)
- [16] 刘云彩. 高炉布料规律 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.  
(LIU Yuncai. *The Law of Blast Furnace* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.)
- [17] 刘德馨, 李晓理, 丁大伟, 等. 基于雷达观测数据的高炉料面多模型控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1277 – 1283.  
(LIU Dexin, LI Xiaoli, DING Dawei, et al. Multi-Model Control of blast furnace burden surface based on observed data of radars [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1277 – 1283.)
- [18] 柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法 [J]. 自动化学报, 2008, 34(5): 505 – 515.  
(CHAI Tianyou, DING Jinliang, WANG Hong, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(5): 505 – 515.)
- [19] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 641 – 649.  
(CHAI Tianyou. Challenges of optimal control for plant-wide production Processes in terms of control and Optimization theories [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 641 – 649.)
- [20] NARENDRA K S, XIANG C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1669 – 1686.
- [21] 李晓理, 石龙辉, 丁大伟. 水箱液位系统多模型控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 370 – 374.  
(LI Xiaoli, SHI Longhui, DING Dawei. Multi-model control for water level system [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 370 – 374.)
- [22] LI X L, ZHANG W. Multiple model iterative learning control [J]. *Neurocomputing*, 2010, 73(15): 2439 – 2445.

### 作者简介:

**李晓理** (1971–), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制和智能控制等研究, E-mail: lixiaoli@hotmail.com;

**刘德馨** (1987–), 女, 博士研究生, 从事神经网络和智能控制等研究, E-mail: bjldxin@126.com;

**周翔** (1986–), 男, 硕士研究生, 从事神经网络和智能控制等研究, E-mail: zhouxian1108@163.com;

**陈先中** (1966–), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业雷达及成像系统和先进传感器等研究, E-mail: cxz@ustb.edu.cn.