

# 基于多层 BP 神经网络的回转窑内物料传输模型研究

楼 波, 罗玉和, 马晓茜

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 在回转窑实验台上对 5 种不同物性参数的固体废弃物和窑内风速、回转窑转速、回转窑倾角改变的情况下, 获得了物料 MRT (Mean Residual Time) 的变化规律: 随着回转窑转速的提高、倾角增大和窑内风速增加, MRT 减小; 物料的物性参数中, 休止角对 MRT 影响较大, 休止角大的 MRT 小, 而密度的变化影响相对较小。以上各影响因素对于 MRT 的敏感性差别较大: 回转窑转速对 MRT 比较敏感; 转窑倾角的敏感性则比较均匀; 窑内风速在小回转窑转速、低窑内风速时对 MRT 较为敏感。针对回转窑内物料传输过程中影响因素众多、非线性机理强烈的特性, 运用多层 BP 神经网络模拟了 MRT 与各因素之间的映射关系, 建立了非线性传输模型, 对模型中 40 组实验数据的验证结果显示, 该模型预测值与实验结果较好吻合, 平均相对误差为 4.1%, 能正确反应物料在回转窑内的传输过程。

**关 键 词:** 回转窑; BP 神经网络; 传输模型; 平均停留时间; 非线性

中图分类号: TQ051.2; TP183 文献标识码: A

## 1 前 言

回转窑因良好的进料适用性、物料混合性及灵活可调的物料输运特性, 在城市固体废弃物处理中得到愈来愈广泛的应用<sup>[1]</sup>。回转窑内物料的传输直接影响其在窑内的传热过程和炉内燃尽度, 直接决定了窑内物料化学反应。物料在回转窑内的平均停留时间 (Mean Residual Time, MRT) 是物料传输过程的重要参数, 也是回转窑设计的重要依据。

目前, 描述窑内固体传输过程的模型主要分两类: 一类是把物料视为流体分析的轴扩散模型 (Axial Diffusion Model, ADM); 另一类则是把物料视为散体考虑的颗粒轨道模型 (Particulate Trajectory Model, PIM)。1990 年以来, 固体物料传输过程的建模基本上集中在 PIM 模型方面<sup>[2~4]</sup>, 已有的模型多是在各种简化假设条件下得出 MRT 的简化公式。实际上, 物料的传输过程与物料特性、回转窑倾角、转速、窑

内风速和粗糙程度等因素有关, MRT 与上述因素之间存在复杂的非线性关系。

人工神经网络具有自组织、自适应性及自学习的特点, 理论上能够以任意精度逼近任意非线性函数, 能够较好模拟在各种不确定因素影响下因果变量之间的内在关系。因而, 为回转窑内物料传输过程的准确模拟提供了一种可行的解决方案。

## 2 回转窑内物料输运试验

### 2.1 实验装置

实验用回转窑如图 1 所示, 装置主要由进料口、筒体、变频电动机、可调支架和出料口等组成。筒体尺寸为  $\phi 0.19 \text{ m} \times 1.88 \text{ m}$ 。变频电动机通过链条与回转窑筒体上的齿轮连接, 用来调节回转窑的转速, 并由 PLC 控制实现自动调节。可调支架用来调整回转窑一端的高度, 以调节回转窑倾角。通过调节空气阀门, 可以控制窑内的风速, 由热球式风速仪在 c 点测得。

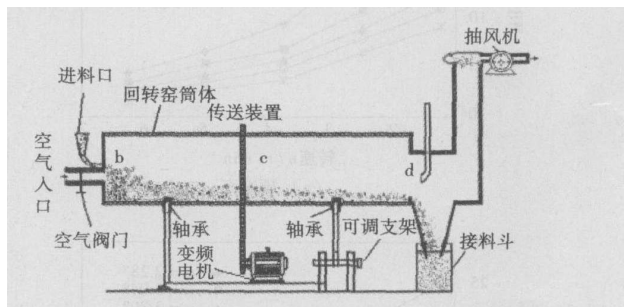


图 1 回转窑内物料传输实验台

### 2.2 实验物料

实验所用物料主要有: 树叶、硬纸壳、泡沫、稻壳和锯末, 表征其特性的参数主要有静休止角、堆积密度和实际密度 (见表 1)。

收稿日期: 2005-10-31; 修订日期: 2006-04-24

基金项目: 广东省自然科学基金团队基金资助项目 (003045)

作者简介: 楼 波 (1965-) 男, 浙江义乌人, 华南理工大学副教授。

表 1 实验所用物料特性

物料	形状	尺寸 /mm×mm×mm	静止角 /(°)	堆积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	实际密度 /kg·m <sup>-3</sup>
树叶	长方体	19.7×16.7×3.1	36.9	90.2	745
硬纸壳	长方体	17.9×8.7×1.6	31.5	87.3	37.4
泡沫	长方体	11.2×9.3×7.8	30.1	20.5	5.99
稻壳	近椭圆	均粒径约 3 mm	47.8	100	280
锯末	不规则	均粒径约 0.5 mm	40.6	144	279

2.3 实验方法

通过改变窑内风速、物料种类、回转窑转速和倾角,在不同稳定工况下,将一定数量的物料由进料口加入,直到物料由回转窑的出口端排出。由于物料颗粒

是非连续体,其沿窑轴作前进运动的同时也将产生轴向扩散,物料在回转窑内的停留时间呈近似正态分布<sup>5-6</sup>,记录第一颗物料排出时间  $t_1$ 、物料密集下落的起始时间  $t_2$ 、物料密集下落的结束时间  $t_3$  以及物料完全排出(通常当相隔 15 s 内无物料掉落即认为物料已完全排出)时间  $t_4$ 。其 MRT 可按下式计算:

$$t = \left( \frac{t_1 + t_4}{2} + \frac{t_2 + t_3}{2} \right) / b \quad (1)$$

2.4 实验结果及分析

实验结果如图 2 ~ 图 7 所示。

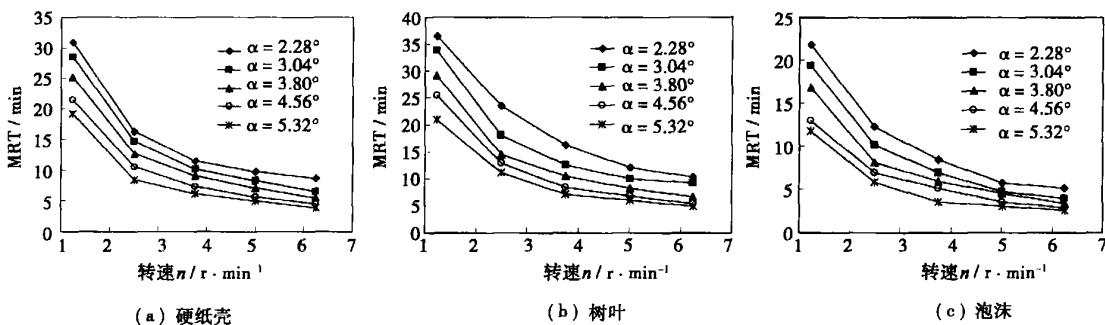


图 2 回转窑内不同物料 MRT 随转速  $n$  变化曲线(风速  $c=0$ )

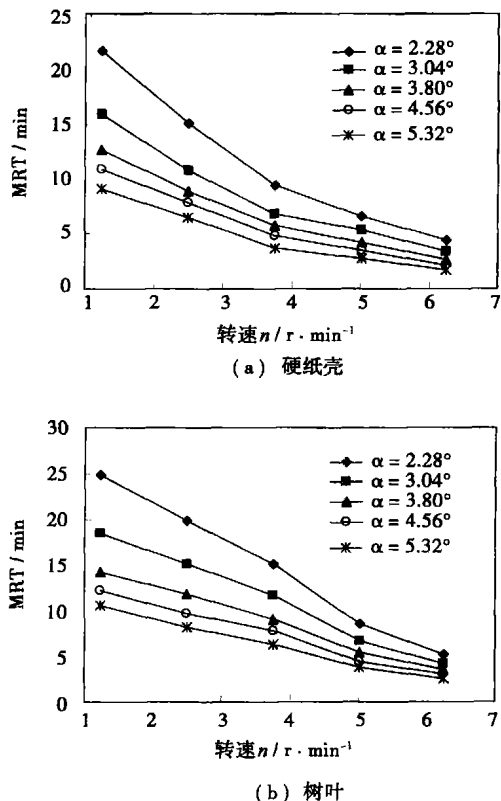


图 3 不同物料在窑内 MRT 随转速  $n$  变化曲线

(风速  $c=1.28$  m/s)

通过对固体废弃物硬纸壳、树叶、泡沫、稻壳、锯末的试验表明,回转窑内物料 MRT 与回转窑转速  $n$ 、回转窑的倾角  $\alpha$  和窑内风速  $c$  以及物料的特性都有较大的关系,在窑内风速  $0 \sim 1.28$  m/s、回转窑转速  $1.24 \sim 6.24$  r/min、回转窑的倾角  $2.28^\circ \sim 5.32^\circ$  时,几种固体废弃物的 MRT 在  $1 \sim 40$  min 范围。随着回转窑转速  $n$  的提高、倾角  $\alpha$  的增大和窑内风速  $c$  的增加, MRT 减小。物料的物性参数中,休止角对 MRT 影响较大,休止角大的物料锯末和稻壳比休止角小的泡沫和硬纸壳的 MRT 明显大;而密度的变化,像硬纸壳与泡沫之间虽然较大,但 MRT 的改变并不显著,相对影响较小。

MRT 对于以上各影响因素的敏感性差别也较大:回转窑转速较小 ( $< 3.76$  r/min) 时, MRT 相对比较敏感,只要增加回转窑转速, MRT 就有较大的减小;而在转速较大时,敏感程度则减弱。转窑倾角对 MRT 的敏感性则比较均匀,变化曲线近似随回转窑倾角增加直线下降。窑内风速对 MRT 的影响则较为复杂,在小回转窑转速 ( $< 2.50$  r/min)、低窑内风速 ( $< 0.25$  m/s) 时,窑内风速对 MRT 的影响较为敏感,风速增加, MRT 下降较快;而在大回转窑转速

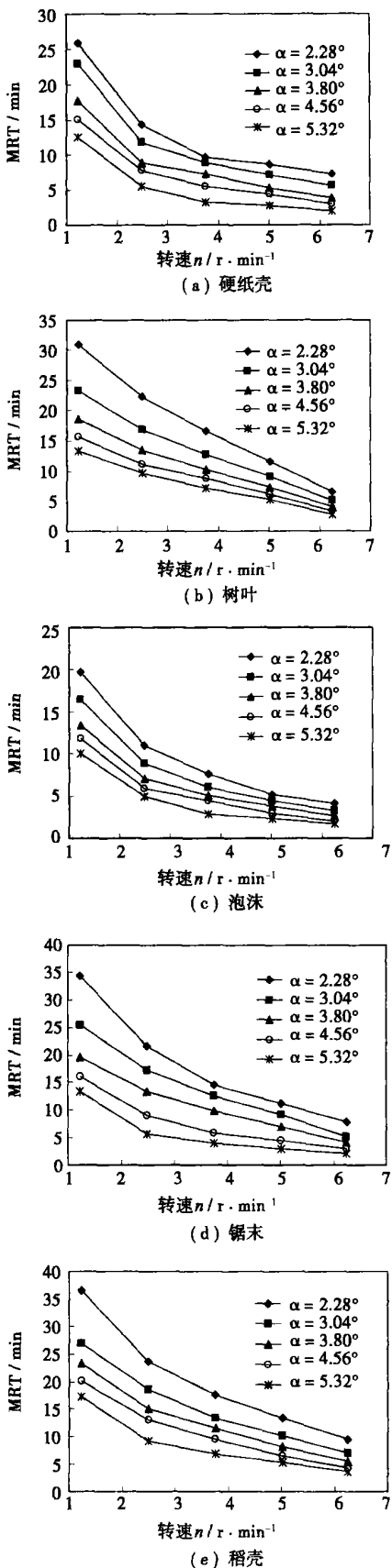


图 4 不同物料在窑内 MRT 随转速  $n$  变化曲线  
( $c=0.25 \text{ m/s}$ )

( $> 2.50 \text{ r/min}$ )、高窑内风速 ( $> 0.25 \text{ m/s}$ ) 范围, 风速对 MRT 的影响减弱, 较大的风速增加也只能使 MRT 稍微下降。同时, MRT 众多影响因素相互作用, 存在着较明显的非线性映射, 增加了其规律的复杂性。

### 3 神经网络模型的建立

人工神经网络理论上能够以任意精度逼近任意非线性函数, 基于样本并通过学习直接逼近样本的输入输出关系, 是处理这类难于建模的复杂动力学过程的最好方法之一。回转窑物料传输过程中影响因素众多, 非线性机理强烈, 常规的方法很难建立多因数的模型, 为此, 本文针对 MRT 和各因素之间非线性映射特性, 采用神经网络对回转窑内物料传输过程进行建模研究。

反向传播神经网络 (Back Propagation Neural Networks) 简称 BP 网络, 是目前应用最广泛的人工神经网络。它具有一个相互独立的许多神经元构成的输入层, 用于输入相关数据信息; 一个或者多个隐层, 用于分析、模拟过程中复杂的中间计算; 一个输出层, 输出运算、模拟结果。通常输入层节点激励函数为线性函数, 各隐层节点激励函数取为非线性函数, 输出层函数可根据问题的需要选取<sup>[9]</sup>。

将实验所得的 210 组数据构建训练样本, 其余的构建验证样本, 以验证网络模型的预测能力。选用的 BP 网络模型的输入有 6 个, 分别为回转窑转速、回转窑倾角、回转窑内风速、物料静休止角、物料堆积密度和物料实际密度, 其中物料静休止角、物料堆积密度和物料实际密度是表征物料特性的参数; 输出只有一个, 即物料平均停留时间 (MRT)。考虑到网络所要处理的数据较多, 且经过反复比较, 最终选择的网络模型为 6-16-10-1 四层网络, 第一隐含层有 16 个神经元, 第二隐含层有 10 个神经元, 其拓扑结构如图 5 所示。第一层隐层神经元的激励函数采用正切型 Sigmoid 函数, 第二隐层采用对数型 Sigmoid 函数, 输出层神经元采用线性函数。

标准 BP 算法容易使网络陷入局部极小值, 同时因采用了固定的学习率使得网络收敛速度很慢, 为了克服这些不足, 本文采用引进动量项的学习率自适应调整的 BP 算法。当误差曲面出现骤然起伏时, 动量项的引入可减小振荡趋势, 提高训练速度; 同时自适应学习速率系数, 使学习率随着误差曲面的梯度而变化, 能够有效越过局部极小值, 快速收敛。

动量项的加入是指在网络每次的权值改变量中

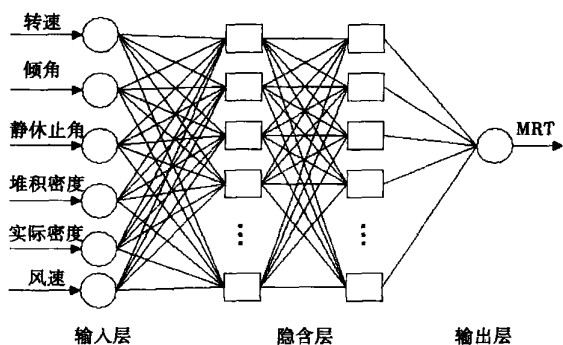


图 5 BP 网络拓扑结构

加入前一次的改变量,第  $n+1$  次循环中的权值可表示为:

$$W_{k, \bar{y}}(n+1) = W_{k, \bar{y}}(n) +$$

$$\alpha(n) [D(n) + \eta(D(n-1) - D(n))] \quad (2)$$

$$D(n) = \partial E / \partial W_{k, ij} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_p (d^p - y^p)^2 \quad (4)$$

$$\alpha(n) = 2^{-\lambda} \alpha(n-1) \quad (5)$$

$$\lambda = \text{sign}[D(n)D(n-1)] \quad (6)$$

式中:  $n$ —迭代次数;  $D$ —目标函数对连接权的梯度,用误差反向传播算法求解;  $E$ —目标函数,是神经网络输出  $y$  与期望输出  $d$  之差对所有样本的平方和;  $\alpha$ —修正步长;  $\eta$ —动量因子,取值介于(0, 1)之间。

在 Matlab 6.5 环节下建模和仿真,为避免输入值过大进入非线性函数的饱和区而影响训练,输入数据采用 prestd 函数进行归一化处理。隐层的初始权值和阈值采用神经网络工具箱中 init 函数初始化,初始学习率为 0.2,动量项为 0.4,当误差降低时,学习率乘以 1.05。反之,乘以 0.45,网络训练的均方误差目标为 0.01。网络训练的误差—训练次数曲线如图 6 所示,网络在经过 18 000 次以内的训练后,误差达到要求。

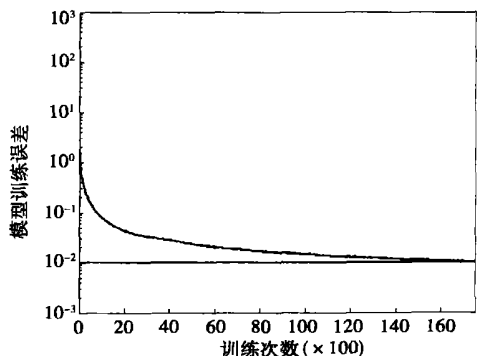


图 6 网络训练误差—训练次数变化曲线

### 3.1 模型的验证

把验证样本中的工况作为该网络模型的输入,预测其 MRT,并与实验的测量值相比较,得到网络模型的预测效果见图 7。结果表明:在回转窑转速较低同时回转窑倾角较小时,误差稍大;而其它条件下,此网络模型的预测效果与实验结果吻合较好,预测模型有较高的精度。在各组验证样本与预测值的误差结果中,最大相对误差为 9.1%,平均相对误差为 4.1%。

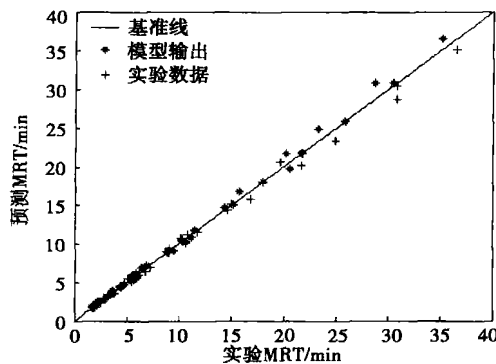


图 7 网络模型的预测效果图

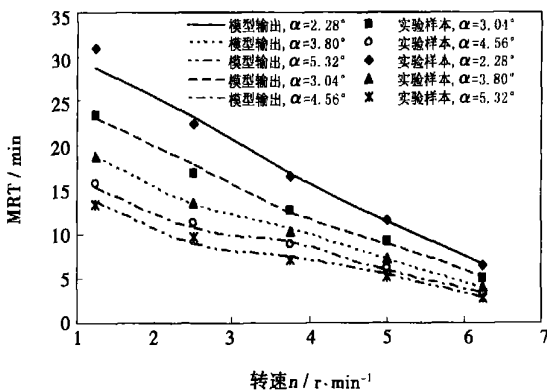
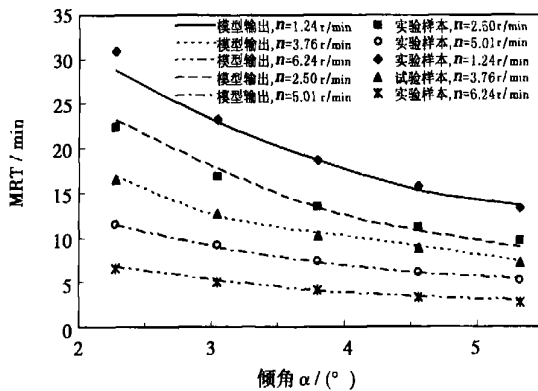


图 8 网络模型输出和实验样本的对比图

对实验中的一组典型工况(选取图4(b))作为样本输入,采用同样精度训练同一结构的BP神经网络,在回转窑转速和倾角变化时得到神经网络模型输出与实验样本的比较图(见图8)。由图可以看出,预测结果与实际结果较符合,本网络模型能正确反应物料在回转窑内的传输过程。

### 3.2 BP神经网络建模的讨论

(1) 由于物料在回转窑内的输送过程具有强烈的非线性特征,可以考虑采用BP人工神经网络模型,根据实验所得的数据来模拟物料在回转窑内的MRT。

(2) 在对不同物料及不同工况下实验获得的回转窑内MRT进行BP神经网络建模时,通过对输入数据预处理和调整网络训练参数可以加速网络学习,提高网络模型的预测精度。

(3) 测试表明,经过大量样本训练后,四层BP神经网络可以正确掌握输入—输出间的关联关系,表现出很强的非线性函数逼近能力。建立后的模型实现了对回转窑内物料传输过程的模拟,预测平均相对误差为4.1%,预测精度较高,网络模型能正确反应物料在回转窑内的传输过程。

## 4 结论

(1) MRT与各因素之间存在着较明显的非线性映射。随着回转窑转速的提高、倾角增大和窑内风速增加,MRT减小。物料的物性参数中,休止角对MRT影响较大,休止角大的MRT小;而密度的变化,MRT的改变不显著,影响相对较小。

(2) MRT对于以上各影响因素的敏感性差别也

较大:回转窑转速较小时,MRT相对比较敏感;转窑倾角对MRT的敏感性则比较均匀;窑内风速对MRT的影响则较为复杂,在小回转窑转速、低窑内风速时,窑内风速对MRT的影响较为敏感,而在大回转窑转速、高窑内风速范围,窑内风速对MRT的影响减弱。

(3) 采用BP人工神经网络模型可以描述物料在回转窑内输送的非线性过程,经过大量样本训练后得出:四层BP神经网络可以得到物料在回转窑内输入—输出间的关联关系,表现出很强的非线性函数逼近能力,预测平均相对误差为4.1%,预测精度较高。对实验中一组典型工况进行预测比较,预测结果与实验样本较为符合,该网络模型能正确反应物料在回转窑内的传输过程。

### 参考文献:

- [1] 彭思众,马晓茜,赵绪新. 回转窑内物料流动模型研究[J]. 工业炉, 2002, 24(11): 6—9.
- [2] SHERRITTA R G, CHAOUKIB J, MEHROTRA A K. Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor [J]. *Chemical Engineering Science* 2003, 58: 401—415.
- [3] BOATENG A A. Boundary layer modeling of granular flow in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder[J]. *Int J Multiphase Flow* 1998, 24(3): 499—521.
- [4] HEYDENRYCH M D, GREE P, HESINK A B M, et al. Mass transfer in rolling rotary kilns: a novel approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57: 3851—3859.
- [5] 李水清,池涌,李润东,等. 城市垃圾在回转窑内传输过程的模型和优化[J]. 化工学报, 2002, 53(10): 1015—1021.
- [6] 李爱民,李水清,严建华,等. 城市垃圾在回转窑内传输过程的冷态实验[J]. 化工学报, 2002, 53(9): 912—917.

(渠源 编辑)

理论研究

## 压气机机匣周向开槽防失速

据《ASME Journal of Turbomachinery》2005年10月号报道,NASA(美国国家航空和航天局)的专家最近完成了一项计算研究课题,以便了解由于机匣周向开槽导致轴流压气机转子失速裕度改善的物理机理。

计算流体力学模拟表明,在存在机匣开槽的情况下低速转子的运行范围将增加。完成了转子机匣处顶部间隙内轴向动量方程的预算,以便了解导致失速裕度改进的物理过程。

已经表明,对于光滑机匣,在转子机匣处顶部间隙内净的轴向压力被净的轴向剪切应力所抵消。但是对于开槽机匣,作用在机匣处的净的轴向剪切应力由于轴向动量径向传递造成的轴向力增加。这个附加的力加到净的轴向粘性剪切力上,从而导致转子失速裕度增加。

(吉桂明 供稿)

and a modularized design method. The software can operate at the rear platforms of DCS work stations and prepare operational interfaces with the help of DCS configuration tools. It can make full use of powerful functions of existing DCS and its operation methods are easy for operators to get acquainted with. Unified data pretreatment mechanism and monitoring of heart-beat signals can guarantee required safety. Multiple built-in communication mechanisms make it suitable for various on-site conditions. The algorithm module structure, which can be either independent or mutually cooperative, yields a flexible configuration with a good expandability. Two kinds of improved generalized prediction control algorithm and a kind of simplified self-adaptive on-line steady-state optimization algorithm have been realized. The use of this software for implementing the advanced-control of the flue gas oxygen-content of a utility boiler has markedly improved control effectiveness. It has been found that the software under discussion involved less investment outlays and has facilitated on-site applications, achieving good results in general. **Key words:** thermal power plant, advanced-control and optimization software, DCS, oxygen-content correction

基于多层 BP 神经网络的回转窑内物料传输模型研究 = A Study of the Transmission Model of Materials in Rotary Kilns Based on a Multi-layer BP Neural Network [刊, 汉] / LOU Bo, LUO Yu-he, MA Xiao-qian (Electric Power College under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 409 ~ 413

Through experiments conducted on a rotary-kiln test rig and under the circumstances of rotary kiln speed and inclination angle changes the following law governing the variation of MRT (mean residence time) of materials for five kinds of solid waste materials with different physical-property parameters has been revealed: with an increase in rotary-kiln rotating speed and inclination angle as well as an air speed increase inside the kiln, the MRT will decrease. Among the physical-property parameters of the materials, the repose angle has a relatively great impact on the MRT. A greater repose angle will lead to a shorter MRT. The change of density, however, has a relatively minor effect. The various influencing factors mentioned above will give rise to a relatively big difference in sensitivity to the MRT. The rotary kiln speed is comparatively sensitive to the MRT, while the sensitivity of the kiln inclination angle assumes a relatively uniform character. As regards air speed in the kiln, a combination of low kiln speed and low air speed in the kiln is rather sensitive to the MRT. Taking account of the characteristics that there exist numerous influencing factors in the transmission process of materials in the rotary kiln and an intense nonlinear mechanism, a multi-layer BP neural network has been used to simulate the mapping relationship between the MRT and the various factors, establishing a nonlinear transmission model. The results predicted for 40 groups of experimental data in the model show that the values predicted by the model are in relatively good agreement with experimental results with an average relative error being assessed at 4.1%. This indicates that the model can correctly reflect the material transmission process in the rotary kiln. **Key words:** rotary kiln, BP neural network, transmission model, mean residence time (MRT), nonlinear

水平管内两相流动网丝电容层析成像 = Wire-Mesh Capacitance Tomography of Two-Phase Flows in a Horizontal Tube [刊, 汉] / HUANG Shan-fang, ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, et al (State Key Laboratory on Power Engineering Multi-Phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 414 ~ 417

A wire-mesh capacitance tomography of two-phase flow distribution is presented. Thermocouple wires with an insulation film on their surface are used as capacitive transducers. The electrolyte of the capacitor is an insulation film with the two poles being respectively metal cores of thermocouple wires and electroconductive fluid film covering the surface of thermocouple wires. The capacitance is directly proportional to the length of the electroconductive fluid film and independent of the latter's distribution and shape. The wire-meshes are parallel and uniformly arranged on a pipeline section. The inner diameter of the test pipeline is 70 mm and the capacitance of each mm long mesh wire being used is 4.82 pF with the spacing of mesh wires being 4 mm. The measurement was performed by use of horizontal and vertical two-direction capacitive transducers. On the basis of knowledge about flow patterns, it is not necessary to reestablish algorithm and the phase distribution can be readily obtained. The steady-state tests show that with this method one can realize the reestablishment of flow patterns, and the section water content as calculated based on the foregoing has a maximal error of 3.9%. **Key words:** wire-mesh capacitance tomography, phase distribution, dual directional measurement, rate of water content

不同油膜力模型下转子椭圆轴承系统的动力学分析 = A Dynamic Analysis of a Rotor-Elliptic bearing System