

Simulated Annealing Algorithm Study on the Flow Distribution Characteristics of Pneumatic Conveying in Pipe Network System

Shaohui Xu¹, Xiaoning Wang^{1*}, Junfeng Cao¹, Shougen Hu²

1.School of Petrochemical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, China, 113001

2.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, P.R.China

xshui870615@163.com, wxning333@163.com, jcf20081027@126.com, husg@usst.edu.cn

Abstract: The pneumatic conveying experiments for the millet and hollow glass bead which had the same average particle diameter and different densities were carried out by using compressed air in horizontal Tee branch pipe. The paper used the simulated annealing algorithm of BP neural network to simulate and forecast solid phase flow distribution characteristics of the pipe network system. The results show : when the operation pressure was const, and two branch pipes had the same control valve opening, the solid-phase mass fraction of the two collection container were almost equal. When the opening value of the flow metering valves was different, with the control valve opening of the branch B decreases, the distributive solid mass fraction decreases in the collection container B. When the opening angles of the flow metering valves was the 0°-60°, the millet particle was earlier to get the critical point than the hollow glass bead, and the mass fraction of the collection container B for the millet is greater than for the glass bead. With the comparison between the simulation results of the simulated annealing algorithm of BP neural network and the experimental data, it is shown that the simulation values agree well with the experimental data. This illuminates that the simulated annealing algorithm had a better adjustability to the simulation and prediction of the flow distribution characteristics of solid phase for tee branch pipe.

Keywords: Pneumatic conveying; pipe network system; flow distribution; annealing algorithm;

气力管网输送流量分配特性模拟退火算法研究

徐少辉¹, 王晓宁^{1*}, 曹均丰¹, 胡寿根²

1. 辽宁石油化工大学,抚顺市,中国, 113001

2.上海理工大学, 上海市, 中国, 200093

xshui870615@163.com, wxning333@163.com, 3.jcf20081027@126.com, 4.husg@usst.edu.cn

摘 要: 在用压缩空气作为输送气体的水平 T 形分支管道中, 对相同平均粒径不同密度的玻璃珠和小米颗粒分别进行气力输送试验, 并用模拟退火算法对其支管流量分配特性进行模拟预测。结果表明, 在保持发送压力恒定条件下, 当两分支管的流量控制阀开度相同时, 分配到两收料仓中的固相质量分数较均匀。当两分支管控制阀开度不同时, 随着支管 B 的控制阀开度的减小, 分配到收料仓 B 的固相质量分配比整体下降。在 0°—60°角时, 密度较小的小米颗粒相比玻璃珠颗粒较早地出现了临界点, 且小米颗粒在收料仓 B 中的质量分配比大于玻璃珠颗粒。对比试验值和模拟退火算法预测值, 发现二者吻合较好, 说明采用模拟退火算法来模拟流量分配特性效果较好。

关键词: 气力输送; 管网系统; 流量分配; 退火算法

1. 前言

管道气力输送因具有成本低、污染少、布置灵活等优点, 已成为普遍适用的固相物料输送方法^[1]。当

基金项目: 辽宁省博士启动基金资助项目 (20071101)

前气力输送研究主要集中在单管内输送气固两相流动特性^[2]和数值模拟方法, 而对于管网内的流动特性研究则较少, 其系统的设计和使用主要依赖于实验室数据和实际工程经验。目前主要通过 T 形和 Y 型两种分

支管路实验装置对其相关特性进行研究。管网输送流量分配特性是管网分流过程的重要参数之一^[3]，对于管道的节能设计和优化具有重要的意义。

本文采用水平 T 形分支管路气力输送系统，对实际工艺中的气固两相流动时的流动状况和流量分配特性进行了模拟，在参考前期研究经验的基础上^[4]，对不同分支管道流量控制阀开度不同时，平均粒径相同但密度不同的小米和空心玻璃珠颗粒进行固相流量分配特性的分析。并采用模拟退火算法对其结果进行了预测，发现该方法较好地对分支管路中固相流量的分配特性进行预测，进而为更全面的分析管网气力输送提供了依据^[5]

2. 实验装置

本装置为水平 T 形分支管路，两分支管路分别采用球阀进行流量调节。输送的固相颗粒均为平均粒径 2mm 的空心玻璃珠和小米，用压缩空气作为输送气体，采用涡轮流量计进行在线流量测量。两分支管路 A、B 采用 T 形分支接头连接，两分支管和分支接头由 $\Phi 32\text{mm}$ 的无缝钢管和等径的有机玻璃管组成。两分支管路均装有压力变送器。分支管路 A 和 B 分别连接到收料仓 A 和 B。发送仓和收料仓称重值、分支管压差值和流量数据由计算机采集。

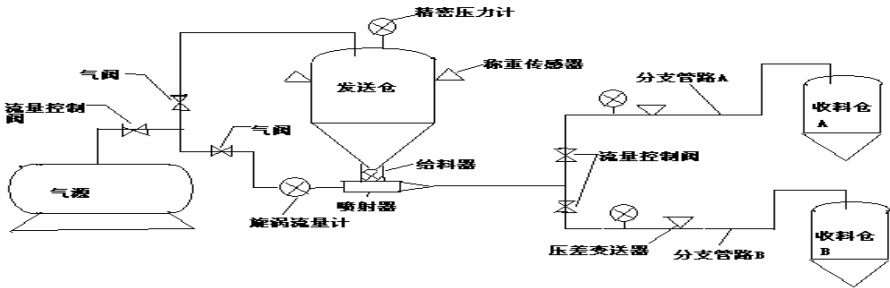


Figure 1: The sketch map of experiment equipment
图 1 实验装置图

3. 分支管路流量控制阀开度变化时两分支管的阻力特性分析

在保持发送压力恒定的情况下，改变压缩空气的流量，并通过调整两分支管上流量控制阀的开度，分别对两种不同密度的颗粒在分支管路气力输送时的固相分配情况进行了试验分析。图 2、图 3 分别给出了四种工艺条件（如表所示，前面角度为分支管路 A 流量控制阀的开度，后面角度为分支管路 B 流量控制阀的开度）时分配到收料仓 B 的固相质量分配比。

从图 2 和图 3 中可以看出，当两分支管的控制阀开度相同，如（ $0^\circ-0^\circ$ 角或 $30^\circ-30^\circ$ 角）时，随着表观风速的变化，对于颗粒大小相同密度不同的两种不同物料，分配到收料仓 B 中的固相质量分配比有所波动，且小米相对于玻璃珠变化幅度较大，但是总体变化幅度较平缓，一直都保持在 50%—55% 之间，这说明对于阻力相同的两分支管，固相物料分配基本是均匀的。

当支管 A 和支管 B 控制阀开度相差较大时，如图中所示 $0^\circ-45^\circ$ 角和 $0^\circ-60^\circ$ 角，从图中可以看出，对于两种不同密度的物料，分配到收料仓 B 中的固相颗粒质量分配比基本上都处于 45 % 以下。且随着支管 B 的

Table 1: the conditions of the Experimental used

表 1 实验采用的工艺条件

条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
$0^\circ-0^\circ$ 角	$30^\circ-30^\circ$ 角	$0^\circ-45^\circ$ 角	$0^\circ-60^\circ$ 角

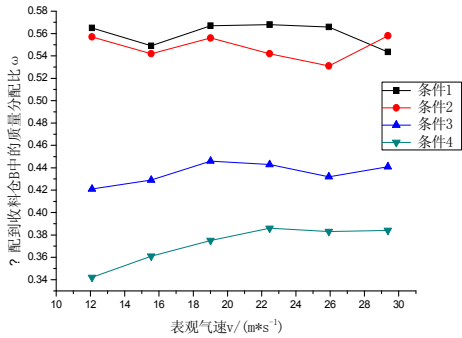


figure 2 :The mass distribution ratio of Millet assigned to Collection container B in four different conditions

图 2 小米在四种不同条件下分配到收料仓 B 的质量分配比

控制阀开度的减小，分配到收料仓 B 中的固相质量分配比整体下降，小米约从 43% 降到 37%，玻璃珠则约从 43% 降到 35%。这主要是由于支管 B 的局部阻

力大于支管 A 的局部阻力的缘故。

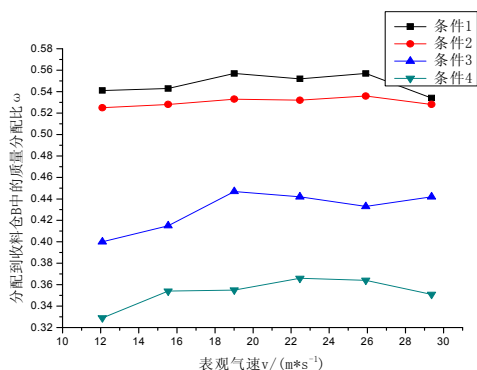


figure 3: The mass distribution ratio of Glass Beads assigned to Collection container B in four different conditions

图 3 玻璃珠在四种不同条件下分配到收料仓 B 的质量分配比

在气体高速区, 表观气速的变化对流量分配影响不大 (如表 2 所示), 控制阀开度是主要影响因素, 在控制阀开度相差较大 (如 0° — 60° 角) 时, 密度较小的小米颗粒在收料仓 B 中的质量分配比要明显大于密度较大的玻璃珠颗粒。

Table 2: changes of the distribution ratio in collection container B on high-speed zone

表 2: 高速区收料仓 B 的分配比变化

	小米	玻璃珠
0° — 45° 角	0.432 - 0.446	0.433 - 0.447
0° — 60° 角	0.383 - 0.386	0.351 - 0.365

当处于低速区时, 随着表观气速的减小, 小米和玻璃珠的质量分数都产生了较大变化。在 0° — 45° 角时小米和玻璃珠的质量分配比都从表观气速为 $19m/s$ 时出现了明显的减小, 玻璃珠的由 0.45 降到 0.4, 小米由 0.45 降到 0.42, 可看出玻璃珠的减小幅度要大于小米。在 0° — 60° 角时小米在表观气速为 $22.5m/s$ 时就出现了明显的下降, 而玻璃珠却在 $15.6m/s$ 时才出现了明显下降, 所以, 可看出小米颗粒较早地出现了临界点。且密度较小的小米颗粒在收料仓 B 中的质量分配比仍大于密度较大的玻璃珠颗粒。

由此可见在低速区, 随着阀门开度的改变, 两支路的两相流态发生了变化, 且不同步, 多种因素共同影响着流量的分配特性, 但总体上分配比都随着表观气速的下降而有所下降, 从实验结果可知, 阀门开度和气体流速的变化对密度较小的小米颗粒都影响较

大,

4. 用模拟退火算法改进型的 BP 网络的仿真预测

气固两相流分支输送过程受压力、流量、分支管路流量控制阀开度、两相物性等诸多因素的影响。由于两相流输送分支过程流量分配的复杂性, 采用传统的方法很难建立一个较精确的预测模型, 而 BP 神经网络具有对非线性复杂系统预测的良好特性, 是解决该问题的较好方法之一^[6]。

但 BP 算法也存在着训练时间长、收敛速度慢、易陷入局部最小点等缺陷。而模拟退火算法与初始值无关, 算法求得的解与初始解状态 (是算法迭代的起点) 无关; 且模拟退火算法具有渐近收敛性, 在理论上已得到严格证明, 当初温充分高, 降温足够慢, 每一温度下抽样足够长, 最终温度趋于零时, 算法最终以概率 1 收敛到全局最优解^[7]。于是将模拟退火算法加到前面的算法中去, 就可以很好地弥补上述算法的不足。

模拟退火的基本思想:

(1) 随机产生初始权直作为初始状态, 并设置初始高温为 T 。

(2) 利用 BP 算法求权值 W , 达到状态 a 。

(3) 在所有的权上加一个噪声, 获得新状态 a' (在状态 a 的领域内)。

(4) 计算 $\Delta E = E_{a'} - E_a$ 。

(5) $\Delta E \leq 0$ 时, 接受新状态, 转到步骤(6); $\Delta E > 0$ 时, 若 $\exp(-\Delta E / T) > \text{rand}(1)$, 接受新状态 (爬坡), 转到步骤(6); 否则转到步骤(3), 再随机改变状态。

(6) 从新状态起, 用 BP 算法继续进行权值修正, 直到稳定平衡状态 b 。

(7) 若 $E_b \geq E_a$, 搜索失败, 转到步骤(3); 若 $E_b < E_a$, 转到步骤(8)。

(8) 若 $E_b < \xi$, 停止; 否则 $k = k + 1$, $T = T / \log(1 + k)$, 转到步骤(3), 从状态 b 继续模拟退火^[8]。

本文采用模拟退火算法对气力输送过程中随着两支管流量控制阀开度的变化时, 两分支管中固相流量的分配特性进行了模拟预测。为使网络模型学习训练的收敛性较好、精度较高, 通过反复调试, 最终确定对空心玻璃珠预测隐层的神经元个数为 4, 其效果最好; 而对小米的预测隐层的神经元个数为 5, 其效果则最好。输出层代表分配到收料仓 B 的固相的质量分数, 神经元的个数都选为 1。

选用相关试验数据, 即两分支管流量控制阀开度分别为 $0^\circ-0^\circ$ 角, $0^\circ-45^\circ$ 角和 $30^\circ-30^\circ$ 角时的试验数据作为 BP 神经网络的学习样本, 共 18 组, 对神经网络进行训练, 通过调用函数 Trainlm 作为训练函数, 隐层神经元的变换函数均采用双曲正切型 Tansig 函数, 输出变换函数采用 Purelin 函数。输出层为一个线性输出。以 $0^\circ-30^\circ$ 角、 $45^\circ-45^\circ$ 角时的试验数据作为神经网络的检验样本。用训练成熟的神经网络预测检验样本的值, 两者进行比较, 结果如图 4~图 7 所示:

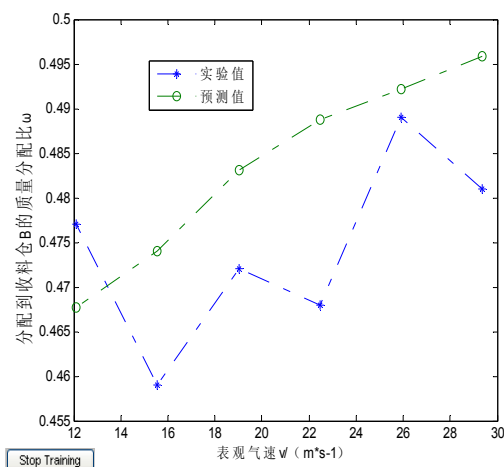


Figure 4: The comparison of the test value and the predictive value of the Glass beads in $0^\circ-30^\circ$ angle

图 4 玻璃珠在 $0^\circ-30^\circ$ 角时试验值与预测值的比较

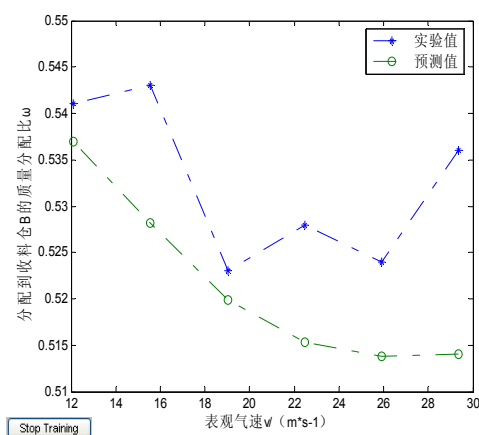


Figure 5: The comparison of the test value and the predictive value of the millet in $45^\circ-45^\circ$ angle

图 5 玻璃珠在 $45^\circ-45^\circ$ 角时试验值与预测值的比较

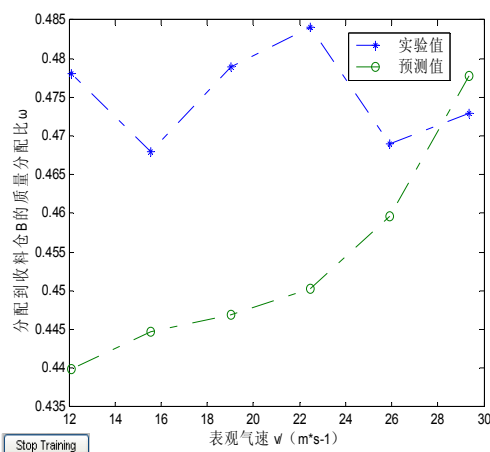


Figure 6: The comparison of the test value and the predictive value of the millet in $0^\circ-30^\circ$ angle

图 6 小米在 $0^\circ-30^\circ$ 角时试验值与预测值的比较

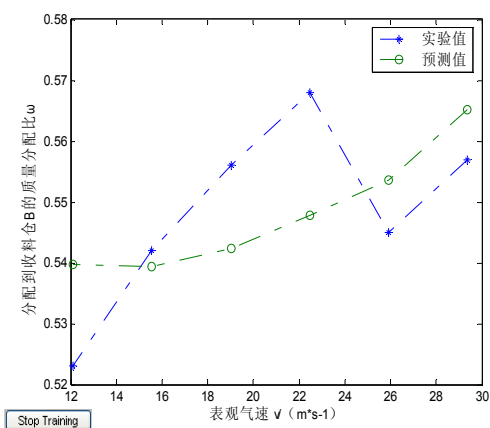


Figure 7: The comparison of the test value and the predictive value of the millet in $45^\circ-45^\circ$ angle

图 7 小米在 $45^\circ-45^\circ$ 角时试验值与预测值的比较

从图 4~图 7 中可以看出, 对于两种物料, 在气力输送分支管的流量控制阀开度不同时, 对固相分配百分比选用模拟退火算法能够较好地对其进行模拟和预测。对于玻璃珠的试验值与预测值最大相对误差约为 4.3%, 而对于小米的最大相对误差约为 6.9%, 从预测的效果来看对玻璃珠的预测较好一点。且在两分支管路中, 固相流量分配比的变化规律与前面几个培训样本所体现的规律基本相同。

5. 结论:

(1) 当两分支管的球阀开度相同时, 分配到两收料仓

中的固相质量分数有所波动，但是总体变化幅度较平缓，小米的变化幅度相对于玻璃珠颗粒更大。

(2) 当两分支球阀开度不同时，随着分支管 B 的球阀开度的减小，分配到收料仓 B 的固相质量分数整体下降。在 0°—60° 角时，密度较小的小米颗粒相比密度较大的玻璃珠颗粒较早地出现了临界点，且小米颗粒在收料仓 B 中的质量分配比大于玻璃珠颗粒。

(3) 模拟退火算法能够较好地模拟和预测气力输送过程中，平均粒径相同密度不同的颗粒在两分支管内固相的分配百分比变化。

References (参考文献)

- [1] BEHERA S, DAS S, JONES M G. Desirable conveying characteristics for pneumatic transportation of fly ash, sand, cement and crushed bath[J]. Powder Handling and Processing, 2000, 12(1): 23-25.
- [2] Mason DJ, Levy A. Model for Non-suspension Gas-solids Flow of Fine Powders in Pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow. 2001, 27 (3): 415-435.
- [3] TANAKA Masa-Aki, MURAMATSU Toshiharu. Numerical simulation of turbulence mixing characteristic in various secondary flow conditions at T-junction piping systems [A]. PVP Problems Involving Thermal-Hydraulics, Liquid Sloshing and Extreme Loads on Structures[C]. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication), 2004, 489: 391-393.
- [4] She P I. The effect of friction on flow distribution in dividing and combining flow manifolds [J]. ASME J. of Fluids Engineering 1992, 114: 121-123.
- [5] Wang Xiao-Ning , Hu Shou-gen, Zhao Jun . Flow distribution characteristics for branch pipe in pneumatic conveying[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2006, 17(2) :2110-2112
王晓宁 胡寿根 赵军等。气力输送分支管路流量分配特性的研究。中国机械工程，2006，17（2）：2110-2112
- [6] Zhao Jun, Hu Shou-gen, Wang Xiao-ning, Multi-branch pipe gas-solid flow control system [J]. Instrumentation Technology, 2005, 26 (8) :877-878.
赵军，胡寿根，王晓宁等。多分支管道中气固两相流量控制系统的研究[J]. 仪器仪表学报，2005，26(8): 877-878。
- [7] Zhu Kai, Wang Zheng-Lin. Proficient in MATLAB Neural Network [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010:
朱凯，王正林。精通 MATLAB 神经网络[M]。北京：电子工业出版社，2010:
- [8] Jia li-hui, Zhang Xiu-ru. BP algorithm analysis and improvement [J]. Computer Technology and Development, 2006, 16 (10) :101-103
贾丽会，张修如。BP 算法分析与改进[J]. 计算机技术与发展，2006，16（10）：101-103