

2016 年“深圳杯”数学建模挑战赛

B 题论文

垃圾焚烧厂布袋除尘系统运行稳定性分析

所属高校：暨南大学

参赛队员：何铸辉、詹秋韵、廖鸿燕、陈智峰

指导老师：张元标

2016 年 9 月 6 日

摘要

本文针对布袋除尘系统运行稳定性问题，以函数构造、模糊数学理论为基础，借助流体力学以及回归统计的相关知识，分别建立了布袋性能评价模型、布袋除尘器特性模型、日布袋损坏数模型和除尘效率模型，求解得到垃圾焚烧厂扩建规模的环境允许上限，并提出环境保护综合监测建议方案，最后通过比较分析，得到新型超净除尘替代工艺相对原工艺除尘模型稳定性能的提升程度。

影响除尘效率的因素主要是布袋的性能和除尘器的运行环境两个方面。首先，对布袋损坏的原因进行分析。本文先建立了基于模糊数学的布袋性能评价模型，量化布袋的耐折性、耐化学性，再选取漏风率、过滤风速等除尘器工况指标建立布袋除尘器特性模型，然后构建了基于 GRNN 神经网络的日布袋损坏数分析模型，以除尘器的漏风率、过滤风速、压力损失、出/入口温度与额定温度的差值以及布袋的耐化学性能、耐折性为输入层，日布袋损坏数为输出层，通过多次训练和交叉验证确定各输入层指标与日布袋损坏数的关系。

接着，利用统计回归的方法建立了除尘效率模型。本文利用统计回归的方法分析日布袋损坏数和过滤风速与出口烟尘浓度的关系，进而得到日布袋损坏数，过滤风速与除尘效率的关系，再结合通过积分的方法得到的运行时间与除尘效率的关系，得到除尘效率与日布袋损坏率、过滤风速和运行时间的关系式

对于问题（1），本文首先采用单一变量分析法，逐项分析漏风率等 7 个因素对除尘效率的影响，确定各因素的最佳取值，求得除尘效率最高可达 99.74%；然后结合烟尘排放标准，计算出除尘效率最高时的日均烟尘处理量，即垃圾焚烧厂的可扩建规模上限，为 $7960.96\text{mg} / \text{Nm}^3$ 。同时，基于除尘效率对各因素敏感程度的排序结果，建议有关部门应重点监测布袋除尘器的烟气入口温度、过滤风速和漏风率。

对于问题（2），由于新型超净除尘替代工艺具有可完全稳定运行的特点，并且采用固体滤料，所以不再考虑日布袋损坏数对除尘效率的影响。本文取相同的过滤风速和相同运行时间，计算得到两种工艺的除尘效率的稳定程度，得出新型超净除尘工艺的稳定性较原工艺提升了 57.8 倍。

最后，本文就模型的优缺点进行了评价，并提出了可以进一步优化的方向。

关键词：布袋除尘器；模糊数学；GRNN 神经网络；多元回归；敏感性分析

1. 问题重述

今天,以焚烧方法处理生活垃圾已是我国社会维持可持续发展的必由之路。然而,现行垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定运行的缺陷致使社会公众对垃圾焚烧产生危害的疑虑。因此,量化分析布袋除尘器运行稳定性问题,不仅能深入揭示现行垃圾焚烧烟气处理技术缺陷以期促进除尘技术进步,同时也能对优化焚烧工况控制及运行维护规程有所帮助。

本文综合研究现行垃圾焚烧发电厂袋式除尘系统影响烟尘排放量的各项因素,构建数学模型分析袋式除尘系统运行稳定性问题,并分析其运行稳定性对周边环境烟尘排放总量的影响。基于所建立的模型回答下述问题:

1. 如果给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额(地区总量/地区面积),在考虑除尘系统稳定性因素的前提下,分析讨论焚烧厂扩建规模的环境允许上限,并基于分析结果向政府提出环境保护综合监测建议方案;

2. 如果采用一种能够完全稳定运行、且除尘效果超过布袋除尘工艺的新型超净除尘替代工艺,求解除尘模型稳定性能的提升程度。

2. 问题分析

2.1 问题(1)的分析

问题(1)要求在给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额的情况下,考虑除尘系统稳定性因素,分析讨论焚烧厂扩建规模的环境允许上限,并基于分析结果向政府提出环境保护综合监测建议方案。

在焚烧厂周边地区面积一定的情况下,根据给定的单位面积排放总量限额,可以得出除尘器处理后的烟尘排放总量限额。通过提高布袋性能,调整漏风率等措施使除尘效率达到最高,从而使焚烧厂可处理的烟尘总量达到最大,根据此时的烟尘总量可以按比例求出焚烧厂扩建规模的环境允许上限。

使布袋除尘系统除尘效率产生变化,从而影响系统运行稳定性的原因有两个,一个是布袋发生损坏,另一个是除尘器的运行工况不稳定。理想状态下,布袋的理化性质始终保持最佳状态,故不会发生损坏。此状态下,除尘效率只跟除尘系统中布袋以外的因素有关,主要是过滤风速和随着运行时间增加而累积的织物荷尘量。但在实际中,也就是非理想状态下,布袋的损坏会对除尘效率造成很大的影响,所以实际情况下除尘效率受布袋和除尘系统中布袋以外的因素(主要是过滤风速和织物荷尘量)的影响。

造成布袋破损的原因主要是布袋本身的性能和除尘器的运行环境两个方面。其中,布袋的性能包括耐化学性能和耐折性。这两个指标都是用“优”、“劣”、“好”、“坏”

等模糊词汇来描述的,难以用经典数学或者统计数学进行量化,可以使用模糊数学理论对这些指标进行处理。除尘器运行情况对布袋造成影响的主要因素有过滤风速、漏风率、压力损失、出入口温度与额定温度的差值^[6]。

布袋并非每天都会发生损坏,而是在使用过程中被慢慢地磨损、腐蚀,在使用了一段时间后无法达到除尘效果才会更换。因此,可以用日布袋损坏数来表示布袋的损坏。由于题目所给的附件内容中可用于分析的样本量较少,本文决定采用在小样本预测中具有优势的 GRNN 神经网络。以布袋的耐化学性能、耐折性以及过滤风速、漏风率、压力损失、出入口温度与额定温度差值为输入层,日布袋损坏数为输出层,构建 GRNN 神经网络,选取合适的训练集,通过多次训练和交叉验证,确定这 7 个因素与日布袋损坏数的关系。

当除尘系统的入口烟尘浓度取定值时,出口烟尘浓度与除尘效率存在负相关的关系,所以可以利用统计回归的方法分析日布袋损坏数和过滤风速与出口烟尘浓度的关系,从而反映日布袋损坏数和过滤风速与除尘效率的关系。另外,由于布袋的荷尘量是随着时间的增加而累积的,通过积分的方法可以得到运行时间与除尘效率的关系。

结合日布袋损坏率、过滤风速和织物荷尘量对出口烟尘浓度的影响,可以得到出口烟尘浓度与日布袋损坏率、过滤风速和运行时间的关系式,其中的未知参数可以通过利用除尘系统的工况数据对多元回归方程进行拟合来确定。然后根据出口烟尘浓度与除尘效率存在的负相关关系,得到除尘效率与日布袋损坏率、过滤风速和运行时间的关系式。

本文对除尘效率关于这 7 个影响日布袋损坏数的因素的敏感度进行分析。使用单一变量的方法,对 7 个影响因素进行逐个分析,确定各个影响因素的最佳取值,从而得到除尘系统所能达到的最高除尘效率。结合烟尘排放限额,可以计算出除尘效率最高时系统的日均处理烟尘量,即垃圾焚烧厂的可扩建规模。同时,将各影响因素对除尘效率的影响程度的大小进行排序,基于排序结果可以确定需要重点监测的对象,向政府提出环境保护综合监测建议方案。

2.2 问题 (2) 的分析

问题 (2) 要求比较新型超净除尘替代工艺相对于原工艺除尘模型稳定性能的提升程度。由附件 2 可知新型超净除尘替代工艺完全克服老工艺布袋除尘器的缺点,除尘器各方面特性以及滤料的性能都超越原来的工艺,而且新型超净除尘代替工艺使用的是固体滤料,所以将其视为理想状态,不需要考虑布袋损坏对除尘效率造成的影响。因此,新型超净除尘替代工艺下的除尘效率只与过滤风速和运行时间有关。

基于新型超净除尘替代工艺的特点,将过滤风速取定值,计算同一段时间内原除尘工艺和新型超净除尘代替工艺的除尘效率变化数据,求原工艺和新型超净除尘代替工艺的除尘效率的方差,就可以知道新型超净除尘替代工艺相对于原工艺除尘模型稳定性能的提升程度。

3. 模型的假设及符号说明

3.1 模型的假设

- (1) 问题中所给出的数据能客观地反映现实情况，值得相信；
- (2) 布袋除尘系统中的 2 个布袋除尘器对大烟囱的排烟量影响具有同等意义；
- (3) 假设所给烟气处理系统中某个固定时刻的数据可代表当天的平均数据；
- (4) 假设垃圾焚烧厂焚烧处理垃圾后产生的烟尘的浓度是固定的；
- (5) 假设所有布袋的理化性质一致，不考虑布袋性能差异对除尘效率的影响；
- (6) 理想状态下布袋始终保持最佳的理化性质，无布袋损坏情况出现。

3.2 符号说明

符号	说明
T	烟尘排放总量
G	处理烟尘总量
η	除尘效率
η_0	正常情况下的除尘效率
n	布袋数量
ξ	漏风率
P_1	进口压差
P_2	出口压差
T_1	入口的烟气温度
T_2	出口的烟气温度
t	时间
V_f	过滤风速
Q	烟气量
A	过滤面积
V_s	平均流速
S	烟道截面
T	脉冲周期
g	布袋容尘量
C_1	入口处的烟尘浓度
C_2	出口烟尘浓度
Δp	除尘器的总阻力

Δp_c	除尘器的设备阻力
Δp_f	滤料阻力
Δp_d	沉积粉尘层的阻力
W	织物荷尘量
W_R	清灰完成后布袋表面残留粉尘量
$f(\varepsilon)$	布袋损坏率为 ε 时对除尘效率带来的影响

4. 模型准备

4.1 GRNN 神经网络

4.1.1 广义回归神经网络结构^[1]

考虑到收敛速度和全局逼近能力等因素，本文选用广义神经网络（GRNN）神经网络模型拟合除尘效率与各影响因素的关系。GRNN 是径向基神经网络的一种变化形式，具有收敛速度快、能够进行全局逼近、计算精度高、容错性能好等特点。GRNN 只要给出足够的数据就可以实现比较精确的拟合，即使在取样数目很少且为多维的情况下仍非常有效。

GRNN 由输入层、模式层、求和层和输出层四层构成，其网络结构图如图 4-1 所示，对应网络输入 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，其输出为 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。

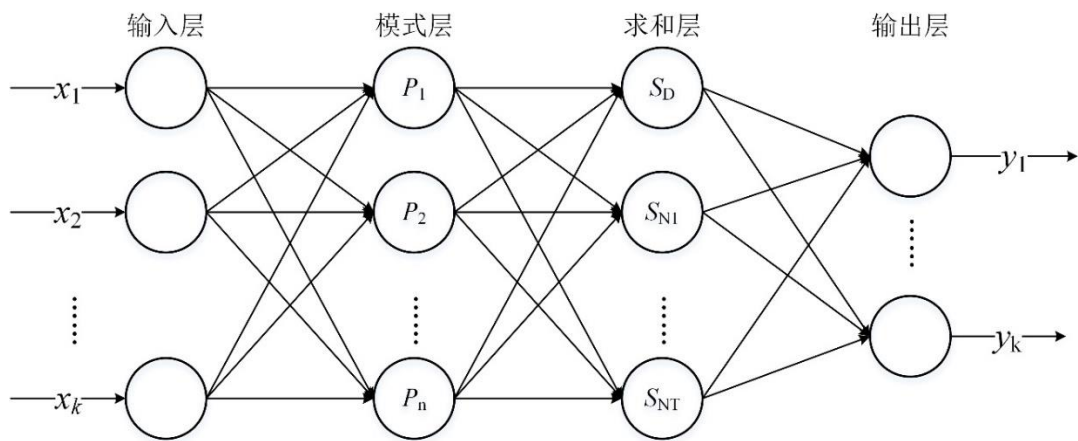


图 4-1 广义回归网络结构图

(1) 输入层

本文的输入层神经元的数目共 6 个，包括滤料热性能、耐化学性能、耐折性以及漏风率、过滤风速、压力损失。各神经元是简单的分布单元，直接将输入变量传递给模式层。

(2) 模式层

模式层神经元数目等于学习样本的数目 n ，各神经元对应不同的样本，模式层神经元传递函数为

$$p_i = \exp \left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2} \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-1)$$

其中， X 为网络输入变量， X_i 为第 i 个神经元对应的学习样本。神经元 i 的输入变量与其对应的样本 X 之间 Euclid 距离平方的指数平方 $(X - X_i)^T (X - X_i)$ 的指数形式。

(3) 求和层

求和层中使用两种类型的神经元进行求和。

一类的计算公式为 $\sum_{i=1}^n \exp \left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2} \right]$ ，它对所有模式层神经元的输出进行算术求和，其模式层与各神经元的连接权值为 1，传递函数为

$$S_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4-2)$$

另一类计算公式为 $\sum_{i=1}^n Y_i \exp \left[-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma^2} \right]$ ，它对所有模式层神经元的输出进行加权求和，模式层中第 i 个神经元与求和层中第 j 个分子求和，神经元之间的连接权值为第 i 个输出样本 Y_i 中的第 j 个元素，传递函数为

$$S_{NJ} = \sum_{i=1}^n y_{ij} P_i \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (4-3)$$

(4) 输出层

本文的输入层神经元为日布袋损坏率，即 $k = 1$ 。各神经元将求和层的输出相除，神经元的输出为

$$y = \frac{S_{N1}}{S_D} \quad (4-4)$$

4.1.2 交叉验证^[2]

GRNN 神经网络需要调整的参数只有径向基神经网络的扩展系数 (SPREAD)，很大程度上减少了主观因素对预测结果的影响。本文采用交叉验证法确定 SPREAD 的最优值，以使径向基神经元能够对输入的经济、技术因素所覆盖的区间都产生响应。

交叉验证又称循环估计，是一种通过不同途径确认信息的正确性的信息验证方法，其基本思想是在将原始数据随机分为 K 个部分，选择其中一个部分作为训练集，剩余部分作为验证集，首先利用训练集对分类器进行训练，再利用验证集来测试训练得到的模型，以此作为评价分类器的性能指标，把实验重复做 K 次，最后取这 K 个结果的平均值。

交叉验证通过交换网络的训练集和检验集，可以解决所给数据有限、可用训练集小的问题，通过多次训练尝试，便能确定出合理的 SPREAD 值。

4.2 模糊数学理论^[3]

模糊数学是研究和处理模糊现象的一种数学方法，在社会实践中，模糊概念（或现象）无处不在。例如：在日常生活中的好与坏，大与小，快与慢，轻与重，高与低，早与晚等都包含着一定的模糊概念。随着科学技术的发展，各学科领域对这些模糊概念有关的实际问题往往需要给出定量的分析，模糊数学应运而生。

4.2.1 模糊集与隶属函数

如果将所讨论的对象限制在一定范围内，并记所讨论的对象全体构成的集合为 U ，称之为论域，在此，总是假设问题的论域是非空的。

如果 U 是论域，则 U 的所有自己组成的集合成为 U 的幂集，记作 $F(U)$ 。例如： $U=\{a, b, c\}$ ， $F(U)=\{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a,b\}, \{a,c\}, \{b,c\}, \{a,b,c\}\}$ 。为了与模糊集相区别，在这里称普通的集合为普通集。对于论域 U 的每一个元素 $x \in U$ 和某一个子集 $A \subset U$ ，有 $x \in A$ ，或 $x \notin A$ ，二者有且仅有一个成立。于是，对于子集 A 定义映射 $\mu_A: U \rightarrow \{0,1\}$ ，即

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (4-5)$$

则称之为集合 A 的特征函数，集合 A 可以由特征函数唯一确定。

所谓论域 U 上的模糊集 A 是指：对于任意 $x \in U$ 总以某个程度 μ_A ($\mu_A \in [0,1]$) 属于 A ，而非 $x \in A$ 或 $x \notin A$ 。也可以将普通集的特征函数的概念推广到模糊集，即模糊集的隶属函数。

设 U 是一个论域，如果给定了一个映射

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1], x \mapsto \mu_A(x) \in [0,1] \quad (4-6)$$

则就确定了一个模糊集 A ，其映射 μ_A 称为模糊集 A 的隶属函数， $\mu_A(x)$ 称为 x 对模糊集 A 的隶属度。

4.2.2 指派方法

如果模糊集定于在实数域 \mathbf{R} 上，则模糊集的隶属函数称为模糊分布。所谓指派方法就是根据问题性质主观地选用某些形式的模糊分布，再依据实际测量数据确定其中所包含的参数。常用的模糊分布集有矩形分布、梯形分布、正态分布、 k 次抛物型分布、 Γ 型分布和柯西分布。滤料的断裂伸长率、断裂强力、热性能和耐化学性能属于偏大型指标，服从指数分布，故本文选用偏大型的 Γ 型分布来衡量这 4 个指标，即

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ 1 - e^{-k(x-a)}, & x \geq a, \end{cases} \quad k > 0. \quad (4-7)$$

5. 模型的建立与求解

5.1 烟尘排放量的影响因素

由附件 1 可知，正常情况下的布袋除尘器除尘效率 η_0 可到 99.9%。布袋除尘器在运行初期一般都能保持较高的除尘效率，但随着使用时间的增长，除尘器的除尘效率会逐步下降。所以烟尘排放量的公式可表示为

$$T = G(1 - \eta) \quad (5-1)$$

其中 T 为烟尘排放总量， G 为烟尘处理总量， η 为除尘效率。

5.2 布袋除尘系统运行稳定性分析模型

本文首先建立了基于模糊数学的布袋性能评价模型，分析不同布袋的耐折性、耐化学性随着使用时间的弱化程度；然后以除尘器的过滤风速、漏风率、压力损失、出入口温度与额定温度的差值和布袋的耐折性、耐化学性为输入层，日布袋损坏数为输出层，构建 GRNN 神经网络，分析各因素对布袋损坏的影响；接着结合烟尘除尘效率的物理定义，通过统计回归的分析，得到除尘效率关于过滤风速、时间和日均布袋损坏数的函数关系；最后，计算除尘效率对各因素的敏感程度，从而达到分析除尘系统除尘效率波动对经济、技术等因素的敏感程度。

5.2.1 布袋损坏分析

本文分别从布袋性能以及除尘器运行工况两个角度来分析布袋损坏的原因，首先基于模糊数学建立了布袋性能的评价模型，然后结合除尘器运行的不稳定性对布袋造成的损坏，建立了 GRNN 神经网络模型。

1) 基于模糊数学的布袋性能评价模型

常见的造成除尘布袋破损失效的原因主要有磨损、烧损和腐蚀，所以分析布袋损坏率时应选取布袋的耐折性，耐化学性能作为影响指标。由于滤袋材料的耐化学性能，耐折性等指标都是用“优”、“劣”、“好”、“坏”等模糊词汇来描述的，难以用经典数学或者统计数学进行量化，于是本文运用模糊数学理论对这些指标进行量化，从而建立布袋性能评价模型。

根据布袋的各方面性能随时间的变化特性，指标都选作偏大型，所以本文选取偏大型 Γ 型分布作为隶属函数。

$$u_A(t) = \begin{cases} 1, & t \leq a. \\ e^{-k(t-a)}, & t > a. \end{cases} \quad (5-2)$$

其中 k 、 a 为常数， t 为时间， u_A 是评分值

当 $t=0$ 时，布袋性能损坏程度最小，隶属度为1，所以常数 $a=0$ 。当 $t>0$ 时，常数 k 将决定函数的下降速度， k 越大，下降得越快。这说明 k 越大，随时间的推移，对应的指标越容易造成布袋的损坏

根据相关文献^[4]，结合实际中布袋因磨损、烧毁、腐蚀而损坏的三种情况的比率，通过标准化处理后得到耐折性，耐化学性能对应的 k 值分别为0.23，0.47。

2) 布袋除尘器特性模型^[5]

(1) 参数设置

1#炉布袋的规格设计值为165mm*6000mm，布袋数量 $n=1056$ ，进口烟温为220°C，出口烟温为195°C，布袋压差为1350kPa，出口负压2900Pa，布袋气源压力为320kPa；2#炉布袋的规格设计值为168mm*6000mm，布袋数量 $n=1056$ ，进口烟温为220°C，出口烟温为195°C，布袋压差为1650kPa，出口负压3000Pa，布袋气源压力为310kPa。除尘器的过滤面积为3185m²，两个布袋的中心间距 $d \approx 100mm$ 。

(2) 漏风率的计算

漏风率的计算公式为

$$\xi = \frac{1}{t} \left(1 - \frac{P_2 \times T_1}{P_1 \times T_2} \right) \times 100\% \quad (5-3)$$

其中 ξ 为漏风率， P_1 ， P_2 分别为进出口的压差， T_1 ， T_2 分别为进出口的烟气温度， t 为时间。

(3) 过滤风速的计算

过滤风速与过滤面积和烟气量有关，具体模型公式为

$$V_f = \frac{Q}{60 \times A}, \quad Q = 3600 V_s S \quad (5-4)$$

其中 V_f 为过滤风速， Q 为烟气量， A 为过滤面积， V_s 为平均流速， S 为烟道截面。

(4) 压力损失的计算

袋式除尘器的压力损失具有重要的技术经济意义，它不仅决定着能量消耗，而且

决定着除尘器的除尘效率及清灰周期。它由三个部分构成，公式表示为

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_f + \Delta p_d \quad (5-5)$$

其中， Δp 为除尘器的总阻力， Δp_c 为除尘器的设备阻力， Δp_f 为滤料阻力， Δp_d 为沉积粉尘层的阻力。

3) 基于 GRNN 神经网络的日布袋损坏分析模型

由附件 1 可知，造成布袋破损的原因主要是布袋本身的性能和除尘器的运行环境两个方面。其中，布袋的性能包括耐化学性能和耐折性；除尘器对布袋造成影响的主要因素有过滤风速、漏风率、压力损失、出入口温度与额定温度的差值^[6]。

考虑到造成布袋的损坏原因主要为烧毁、磨损和腐蚀，以及除尘器运行时各影响因素对布袋的损坏存在相互交错关系，为了确定各影响因素与日布袋损坏数之间的非线性映射关系，本文通过查阅与整理相关文献，确定以漏风率、过滤风速、压力损失、出/入口温度与额定温度差值以及布袋的耐化学性能、耐折性这 7 个指标作为影响布袋损坏率的影响指标，并作为神经网络的输入层，布袋损坏率作为神经网络的输出层，构建 GRNN 神经网络模型，网络的结构如图 5-1 所示，

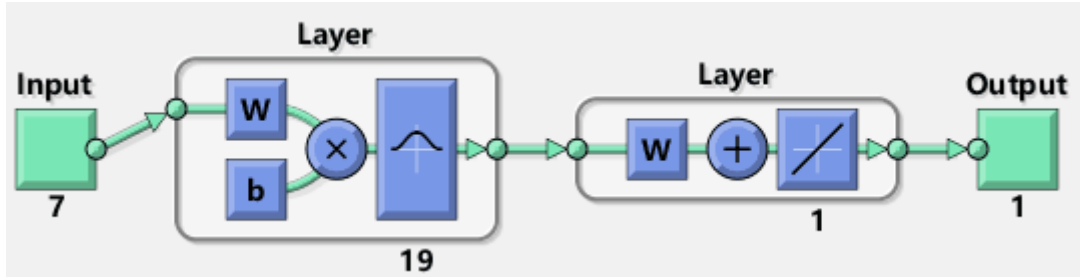


图 5-1 布袋损坏分析模型结构图

其中，输入层有 7 个神经元，对应的输入向量为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_7) \in R^n$ ；隐含层有 19 个神经元，隐含向量为 $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_{19}) \in R^l$ ，传递函数为高斯函数；输出层有 1 个神经元，输出值为 Y ；输入层神经元 i 与隐含层神经元 j 之间的连接权值为 W_{ij} ，阈值为 $\theta_j (j=1, 2, \dots, l)$ ；隐含层神经元 j 与输出值 Y 的连接权值为 W_{jy} 。

(1) 样本数据的获取与预处理

本文以布袋更换周期为时间间隔，计算#1、#2 炉每个时间段内每天平均的布袋损坏数，平均过滤速度，出口温度与额定温度差值，入口温度与额定温度差值，总压差，结果见附表一。将计算结果代入漏风率模型、过滤风速模型和压力损失模型，计算出 1 炉和 2 炉各时间段内每天平均的漏风率、过滤风速和压力损失，结果如附表二所示。

根据附件 1 所给“2014 年底至 2016 年初某某厂布袋更换统计”，本文选取了在

如表 5-1 所示的 12 个时间段内，2015 年 5 月 29 日至 2015 年 6 月 1 日的#1、#2 两炉以及 2016 年 3 月 15 日至 2016 年 4 月 5 日#1 炉，共 23 组漏风率、过滤风速等数据作为 GRNN 神经网络的训练集，通过神经网络的学习，对 2016 年 4 月 6 日至 2016 年 6 月 5 日期间布袋除尘系统的漏风率、过滤风速、压力损失等指标取值进行预测。

表 5-2 训练集取值时间段

编号	时间段
A	2015 年 5 月 29 日-2015 年 6 月 1 日
B	2015 年 6 月 2 日-2015 年 7 月 17 日
C	2015 年 7 月 18 日-2015 年 7 月 23 日
D	2015 年 8 月 28 日-2015 年 10 月 9 日
E	2015 年 10 月 23 日-2015 年 11 月 11 日
F	2015 年 11 月 12 日-2015 年 11 月 18 日
G	2015 年 11 月 19 日
H	2015 年 11 月 20 日-2016 年 1 月 18 日
I	2016 年 1 月 19 日-2016 年 3 月 11 日
J	2016 年 3 月 12 日-2016 年 3 月 14 日
K	2016 年 3 月 15 日-2016 年 4 月 5 日
L	2016 年 4 月 6 日-2016 年 6 月 5 日

在训练神经网络前一般需要对数据进行预处理，一种重要的预处理手段是归一化处理^[7]。所以我们对样本数据进行归一化处理，公式如下：

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5-6)$$

其中 X_i 、 X_i^* 分别表示数据归一化前后的值， X_{\min} 、 X_{\max} 分别表示样本数据中的最小值和最大值。

(2) 神经网络的学习过程

本文选用高斯函数作为隐含层的传递函数。各神经元的输出层激活函数我们均取线性函数。利用归一化处理后的数据对网络进行有监督的学习，该学习过程由正向传播和反向传播组成，具体步骤如下：

Step 1: 正向传播

正向传播开始时所有连接权系数随机地设置较小初值，选取样本集中任一样本的输入作输入层，转向处理隐含层单元，并在输出层得到该模式对应的输出值，此时输出值与期望值一般存在较大误差；

Step 2: 反向传播

通过反向传播过程计算各层神经元权值和阈值的变化量 ΔW_{ji} 。修正网络中各神经元的权值和阈值后，网络重新按照前向传递方式得到输出，实际输出值与期望值的误差又产生新一轮的权值和阈值的修正。

Step 3: 正向传递过程和反向传递过程循环反复，直到系统评价误差 E_p 收敛，此时得到了对应样本模式集的网络系数，完成学习过程。

(3) 交叉验证

GRNN 神经网络需要调整的参数只有 SPREAD 一个，因此，只需选取出合理的 SPREAD 值，就能保证神经网络的准确性及稳定性。本文采用交叉验证的方法，将 SPREAD 值从 0.1 变化到 2，步长为 0.1，共进行 20 次预测。为减少误差，本文将预测得到的 20 组数据进行 6 次交叉验证，求每个 SPREAD 对应的神经网络的预测集与实际值的平均误差，平均误差最小对应的 SPREAD 值即是最优值。

交叉验证算法的步骤如下：

Step 1: 输入数据集 $A(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 和 $D(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ ，分别作为训练数据集和测试数据集；

Step 2: 将训练数据集 $A(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 随机划分为两个大小相等的数据集 $B(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 和 $C(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ ；

Step 3: 分别以 $B(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 和 $C(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 作为训练数据集训练神经网络，得到网络模型 net_1 和 net_2 ；

Step 4: 对测试数据集 $D(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 中的 X_1, X_2, \dots, X_7 分别输入网络模型 net_1 和 net_2 ，得到对应的两个输出矩阵 Y_1 和 Y_2 ；

Step 5: 分别计算 Y_1 、 Y_2 同 $D(X_1, X_2, \dots, X_7, Y)$ 中 Y 的误差平方和，判断是否达到精度要求（精度为 10）。若达到精度要求，则计算 Y_1 、 Y_2 的相似度，从而计算出该模型的一次稳定性度量值，然后结束本次验证；若不符合精度要求，则直接结束本次验证。

本文的预测集是 2016 年 4 月 6 日至 2016 年 6 月 5 日这一时间段的漏风率、过滤风速、压力损失、出入口温度与额定温度差值以及布袋的耐化学性能、耐折性。根据上述算法，本文对构建的 GRNN 神经网络模型进行了 6 次交叉验证，验证的结果如图 5-2 所示，最终确定了 SPREAD 的最佳取值为 0.5。经过检验，该神经网络的预测误差为 0.016393，是可靠的。至此，可以确定漏风率、过滤风速、压力损失、出入口温度与额定温度差值以及布袋的耐化学性能、耐折性这 7 个影响因素与日布袋损坏数的关系。

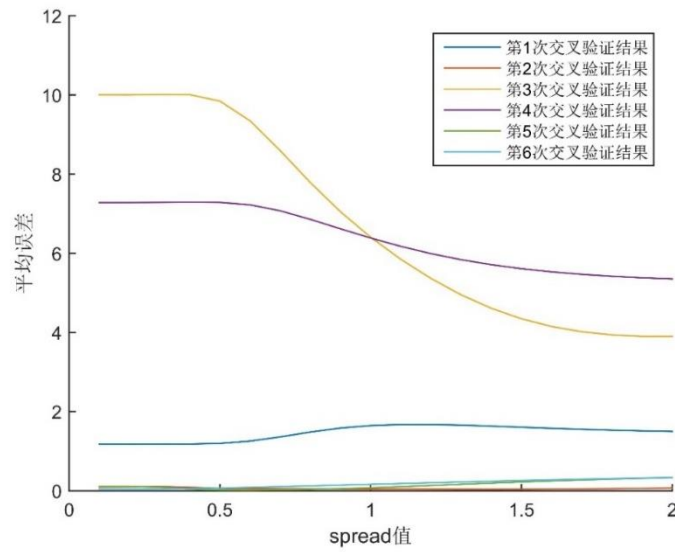


图 5-2 交叉验证结果

5.2.2 基于统计回归的除尘效率模型

在除尘器实际运作中，布袋吸附烟尘使烟尘浓度降低的幅度是衡量除尘效率的关键因素。根据相关文献^[8]，反映烟尘浓度变化的除尘效率算法为

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (5-7)$$

变形得到

$$C_2 = C_1(1 - \eta) \quad (5-8)$$

其中， C_1 为入口处烟尘浓度， C_2 为出口处烟尘浓度。

假设垃圾焚烧厂每个时刻的燃烧状态稳定，且垃圾种类均匀，燃烧环境相似，则入口烟尘浓度 C_1 可视为定值。由式 5-8 可知，由于 C_1 是一个定值，不是变量，所以可以用出口烟尘浓度 C_2 来衡量除尘效率的高低。对于相同的入口烟尘浓度 C_1 ，出口烟尘浓度 C_2 越低，说明除尘效率越高；反之，出口烟尘浓度 C_2 越高，除尘效率越低。

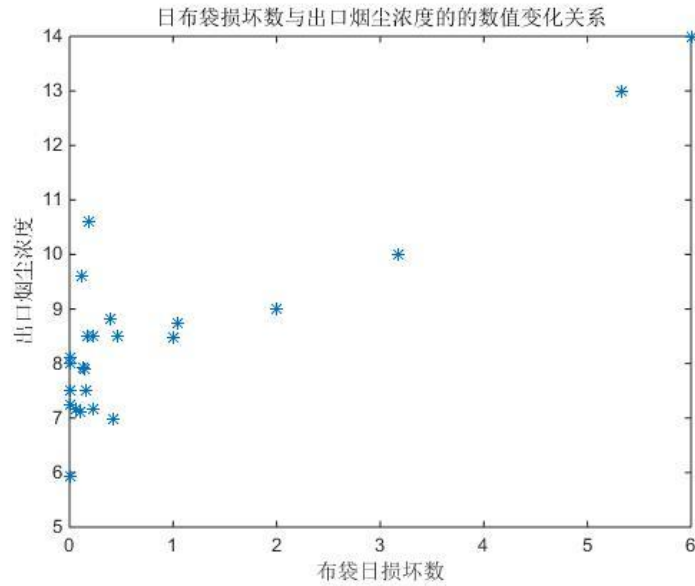
理想状态下，布袋的理化性质始终保持最佳状态，不发生损坏。此时除尘系统的总体除尘效率只跟除尘系统中布袋以外的因素有关，主要是过滤风速和随着运行时间增加而累积的织物荷尘量。但在实际中，也就是非理想状态下，布袋的损坏会对除尘效率造成很大的影响，所以实际情况下除尘效率受布袋和除尘系统中布袋以外的因素（主要是过滤风速和织物荷尘量）的影响。

本文选取了如表 5-1 所示的 12 个时间段内#1、#2 两炉的 24 组数据，以布袋更换周期为时间间隔，计算每个时间段内#1、#2 日均烟尘浓度、日布袋损坏数和过滤风速，计算结果见附表三。

出口烟尘浓度跟除尘效率具有的线性关系。下面，本文利用统计回归的方法分析日布袋损坏数与出口烟尘浓度、过滤风速与出口烟尘浓度的关系，从而可以得到日布袋损坏数与除尘效率、过滤风速与除尘效率的关系。另外，通过积分的方法可以得到织物荷尘量与除尘效率的关系。

1) 日布袋损坏数与出口烟尘浓度的关系

根据以上数据，绘制日布袋损坏率与除尘系统出口烟尘浓度的散点图，如图 5-3 所示，其中各散点较为集中地分布在一条直线上，在误差允许范围内可以认为日布袋损坏数与出口烟尘浓度的关系是线性的。



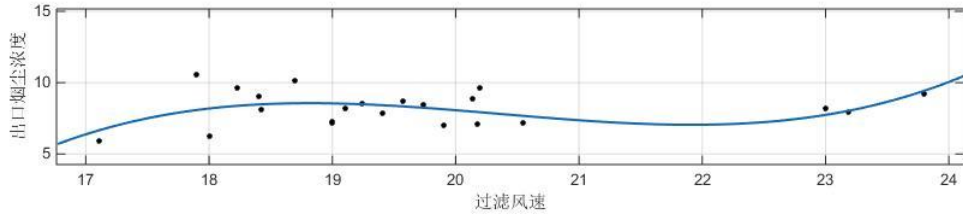


图 5-4 出口烟尘浓度与过滤风速关系函数拟合效果图

3) 织物荷尘量与除尘效率的关系

对于织物荷尘量，文献[10]中给出的积灰量 W 随时间变化规律为

$$W = W_R + \int_0^t C_1 \cdot V_f dt \quad (5-10)$$

其中 W_R 为清灰后布袋表面残留粉尘量（一般取 75 g/m^2 ）， C_1 为入口烟尘浓度， V_f 为过滤风速。

由式 5-4 可知， V_f 为过滤风速不是关于时间的变量，又因为 W_R 、 C_1 为定值，所以式 5-10 可变形为：

$$W = 75 + C_1 V_f t \quad (5-11)$$

4) 除尘效率模型

结合日布袋损坏率、过滤风速和织物荷尘量对出口烟尘浓度的影响，可以得到：

$$C_2 = C_1 - C(V_f^{N_3} (75 + C_1 V_f t)^{N_4} + N_5 \varepsilon t) + N_6 \quad (5-12)$$

其中 C_2 为出口烟尘浓度， C_1 为入口烟尘浓度， V_f 为过滤风速， t 为过滤时间， ε 为日布袋损坏数， C_1 、 C 、 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 为方程的待定参数。

利用 MATLAB 的 CFTOOL 工具箱，对表 5-1 时间段中#1、#2 炉的日布袋损坏数、过滤风速、日布袋损坏数、出口烟尘浓度以及时间等数据进行多元回归分析，得到拟合的关系方程式，确定了待定参数的取值，最终得到出口烟尘浓度关于日布袋损坏数、过滤风速和过滤时间的关系式如下：

$$C_2 = 2252 - 2246(V_f^{-0.000981} (78 + 2252V_f t)^{0.00008605} - 0.0003933\varepsilon t) - 0.512 \quad (5-13)$$

其中 C_2 为出口烟尘浓度， t 为过滤时间， V_f 为过滤风速， ε 为日布袋损坏数。

5) 误差分析

将表 5-1 中过滤风速，时间，日布袋损坏数代入式 5-13 中得到拟合后的出口烟尘浓度，与原始出口烟尘浓度比较，结果如图 5-5 所示，该回归方程的拟合度为 0.681，平均误差为 1.54。

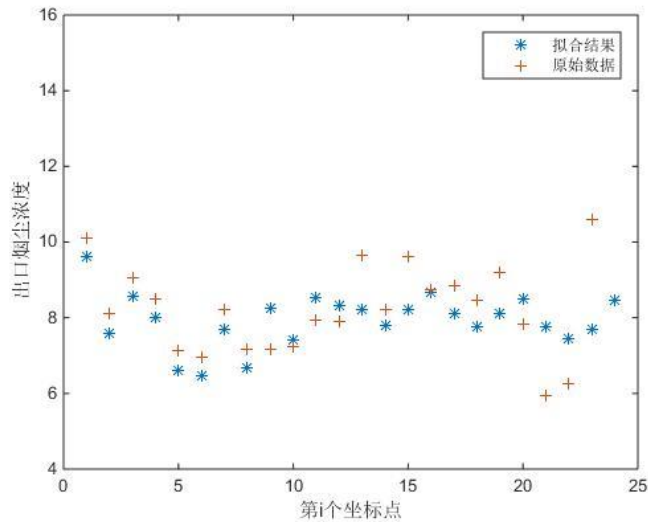


图 5-5 多元回归拟合效果图

5.2.3 除尘效率对影响因素的敏感程度^[11]

由式 5-13 可知，日布袋损坏数、过滤风速和过滤时间的变化会影响出口烟尘浓度，而出口烟尘浓度与除尘效率具有线性关系，所以日布袋损坏数、过滤风速和过滤时间的变化会影响除尘效率。由日布袋损坏数分析模型可知，影响日布袋损坏数的因素有 7 个，包括漏风率、过滤风速、压力损失、出入口温度与额定温度差值以及布袋的耐化学性能、耐折性。所以更具体地说，除尘效率与这 7 个影响日布袋损坏数的因素还有过滤时间有关。

本文对这 7 个影响日布袋损坏数的因素进行敏感性分析。基本思路是给网络的输入变量添加扰动，观察加入扰动前后输出变量结果的变化。通常每次只给一个输入变量添加干扰，而其他变量保持不变，得出输出变量。

具体做法如下：每次只改变其中一个变量的值，其他变量保持不变。将改变后的变量和其他不变的变量的值归一化后，输入 GRNN 神经网络中得出输出结果。对神经网络的输出结果进行反归一化得到该条件下的日布袋损坏数。再把得到的日布袋损坏数，过滤风速和运行天数代入多元回归方程，求得出口的烟尘浓度，然后根据入口烟尘浓度得出除尘效率。为了描述除尘效率对各干扰变量的敏感程度，本文使用除尘效率的方差来表示敏感系数。

本文选取了 2016 年 4 月 6 日至 2016 年 6 月 5 日这一时间段的数据作为敏感性分析初值，其中漏风率为 0.344%，过滤风速为 0.74m/min，入口温度与额定温度差值为 0℃，入口温度与额定温度差值为 0℃，耐折性的评价值为 0.87，耐化学性的评价值为 0.832，总压差为 2222Pa，运行天数为 61 天。在此基础上进行多次因素取值变动调整，通过不同的从而进行各指标的敏感性分析。

1) 除尘效率对漏风率的敏感程度分析

本文选定漏风率从 0 变化到 0.62，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-6 所示的除尘效率随漏风率变化图像。

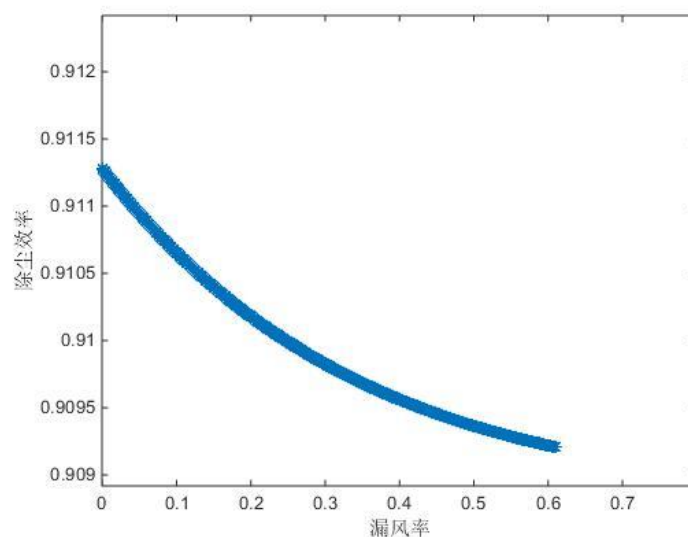


图 5-6 除尘效率对漏风率的敏感程度

由上图可知，除尘效率与漏风率呈负相关关系，当漏风率无限接近于 0 的时候，除尘效率可取得最大值，出于运行实际考虑，本文取最优工况下的漏风率为 0.001%。

2) 除尘效率对过滤风速的敏感程度分析

本文选定过滤风速从 0.85 m/min 变化到 1.7 m/min，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-7 所示的除尘效率随过滤风速变化图像。

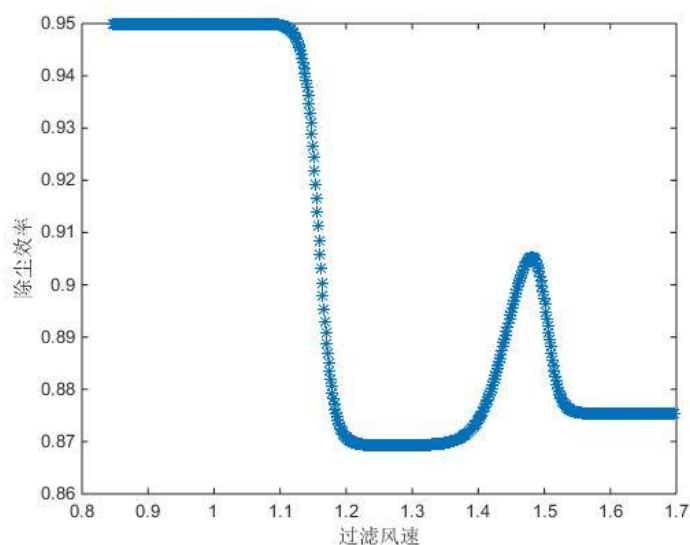


图 5-7 除尘效率对过滤风速的敏感程度

由上图可知，当过滤风速在 0.85 m/min 到 1.1 m/min 之间时能得到较高的除尘效率，为了保证除尘系统在运行中能维持较高的除尘效率，本文取最优工况下的过滤风速为 $[0.85, 1.1]$ 区间的中值 0.975 m/min。

3) 除尘效率对入口温度的敏感程度分析

本文选定入口温度与额定温度差值从 5℃变化到 75℃，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-8 所示的除尘效率随入口温度与额定温度差值变化的图像。

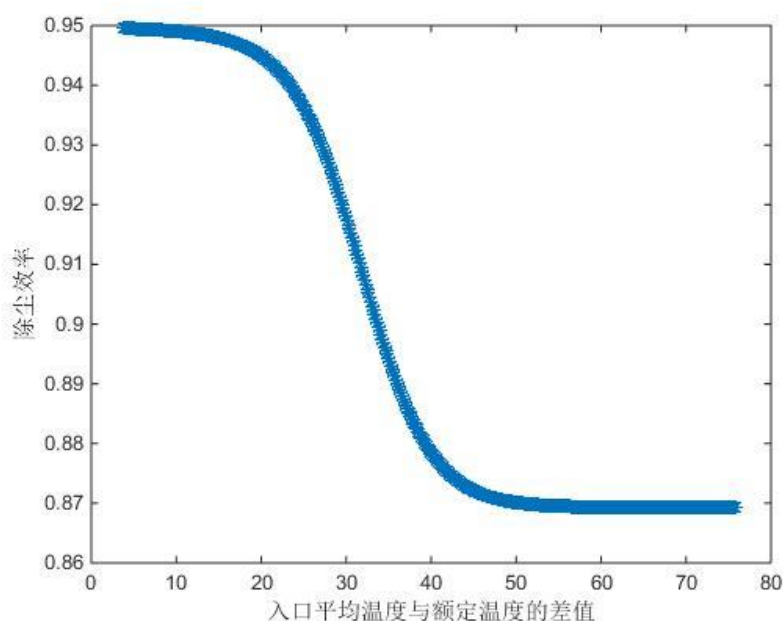


图 5-8 除尘效率对入口温度的敏感程度

上图显示，除尘效率与温度差呈负相关关系，而当入口温度与额定温度差值小于 20℃时，除尘效率可稳定在 90%~95%范围内。附件 1 所给除尘器运行状况规定入口温度的额定值为 220℃，温度可在 200℃至 225℃之间波动，极限在 230℃以下。因此，实际的入口温差波动范围为-20℃到 10℃，大于 10℃布袋可能造成严重损坏，而最优的取值应在 0℃附近。

4) 除尘效率对出口温度的敏感程度分析

本文选定入口温度与额定温度差值从-42℃变化到 75℃，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-9 所示的除尘效率随出口温度与额定温度差值变化的图像。

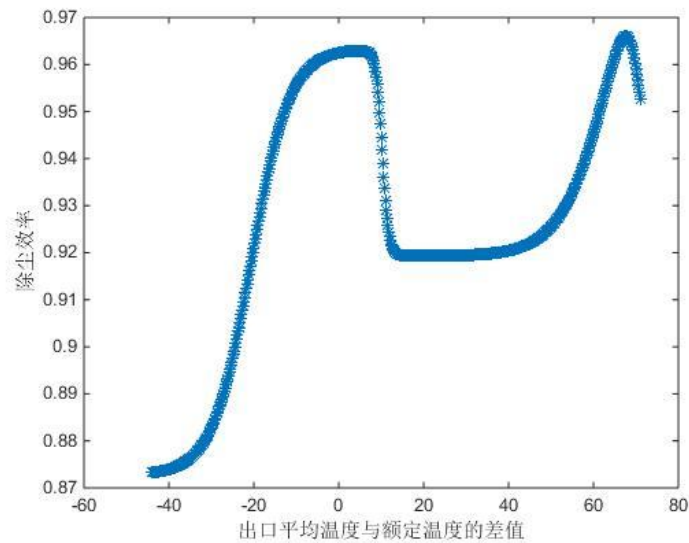


图 5-9 除尘效率对出口温度的敏感度

附件 1 规定出口温度的额定值为 195°C ，可在 180°C 至 200°C 范围内波动，即实际出口温度与额定值的差值可以取 -15°C 到 5°C ，在实际运行中出口温度与额定值差值的最优取值应为 0。

5) 除尘效率对布袋耐折性的敏感程度分析

本文选定布袋耐折性评分从 0 变化到 1.8，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-10 所示的除尘效率随布袋耐折性变化的图像。

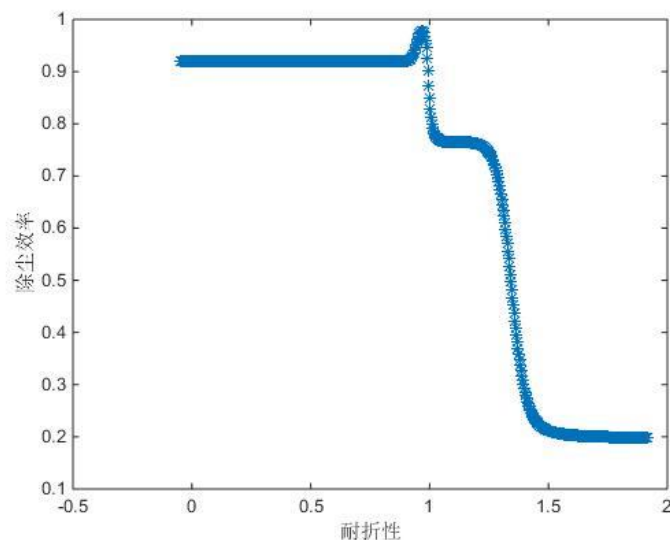


图 5-10 除尘效率对布袋耐折性的敏感程度

上图显示，当耐折性的评分大于 0.9，小于 1 时，除尘效率上升得很快；当评分小于 0.9 时除尘效率比较低，稳定性比较好。考虑到在实际应用中的布袋耐折性总是小于或等于 1，则所选布袋耐折性取值应略大于 0.9，以保证较为稳定的高除尘效率。

6) 除尘效率对布袋耐化学性的敏感程度分析

本文选定布袋耐化学性评分从 0 变化到 1，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-11 所示的除尘效率随布袋耐化学性变化的图像。

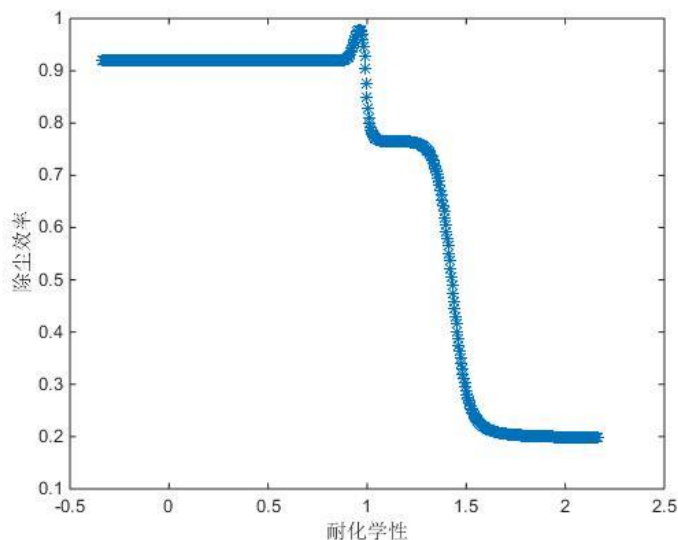


图 5-11 除尘效率对布袋耐化学性的敏感程度

上图显示，当布袋耐化学性评分大于 0.9 且小于 1 时，除尘效率上升得很快；当评分小于 0.9 时除尘效率较低，但可稳定维持。考虑到在实际应用中的布袋耐化学性总是小于或等于 1，则所选布袋耐化学性取值应略大于 0.9，以保证较为稳定的高除尘效率。

7) 除尘效率对压力损失的敏感程度分析

本文选定压力损失从 750Pa 变化到 3400Pa，保持另外 6 项因素的取值不变，得到如图 5-12 所示的除尘效率随压力损失变化的图像。

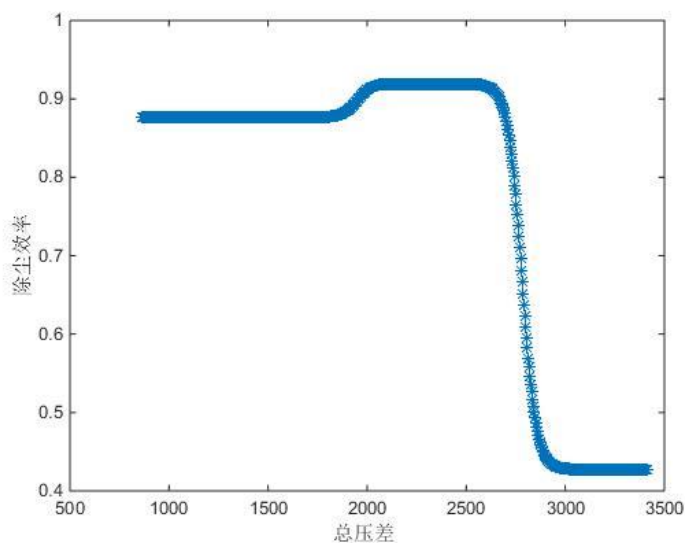


图 5-12 除尘效率对压力损失的敏感程度

上图显示，当总压差在 2500Pa~2756Pa 范围内变动时，除尘效率最高；当总压差大于 2756Pa 时，除尘效率急剧下降，这主要是由于压差增大时布袋损坏加剧引起的。综上，本文选定最优工况下的总压差为[2500,2756]的中值 2648Pa。

5.3 问题（1）的求解

问题（1）中的除尘系统为布袋除尘系统。在实际运行中，布袋除尘系统的除尘效率受布袋和除尘系统中布袋以外的因素的影响，可视为除尘系统稳定性分析模型中的非理想状态。根据除尘系统稳定性分析模型，将 7 个影响日布袋损坏数的因素取最优值，得到最优工况下除尘效率随时间的变化关系，如下图 5-13 所示。观察下图可知，随着时间的推进，最佳工况下的除尘效率的下降值比较小，说明该工况下除尘效率稳定性最好。

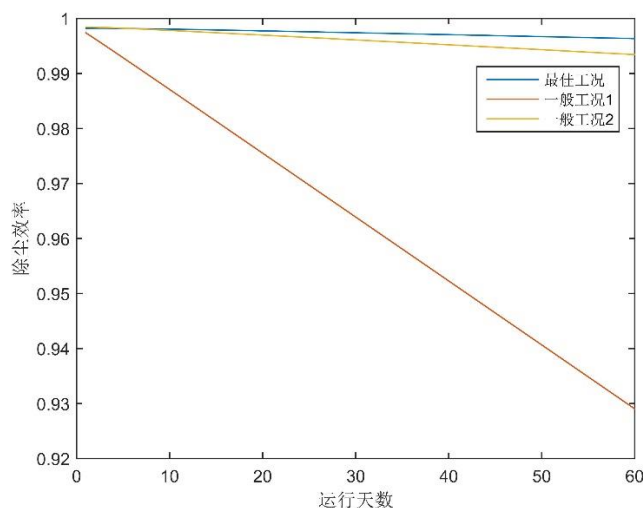


图 5-13 不同工况下的除尘效率变化示意图

每次更换布袋的时间间隔取决于出口烟尘浓度是否超标，这需要根据除尘系统实际运行情况决定。为了充分保证排放量的达标，本文在安全范围内选取固定换布袋间隔天数。根据附件 1 的数据，得知更换布袋天数最长为 61 天，所以更换布袋的天数选取为 61 天。图 5-1 显示 3，当除尘系统运行天数为 61 天时，系统的日均除尘效率 η 可达到 99.74%。

火电厂大气污染物排放标准^[12]规定，非重点地区现有煤电机组执行烟尘 $30\text{mg} / \text{Nm}^3$ ，重点地区 $20\text{mg} / \text{Nm}^3$ 的污染物排放限值。本文取 $C_2 = 30\text{mg} / \text{Nm}^3$ ，结合式 5-8，可以计算得到此工况下系统的日均处理烟尘量 C_1 为 $7960.96\text{mg} / \text{Nm}^3$ ，所以垃圾焚烧厂的可扩建规模达到 $7960.96\text{mg} / \text{Nm}^3$ 。

计算各输出变化量的方差，结果如表 5-2 所示

表 5-2 敏感性系数

影响因素	输出变化量方差	敏感程度排序
漏风率	9.1167	3
过滤风速	59.6	2
入口温差	105.4807	1
出口温差	0.00079233	7
布袋耐折性	0.25217	4
布袋耐化学性	0.21253	5
压力损失	0.0040986	6

即除尘效率对各指标的敏感程度排序为：

入口温差>过滤风速>漏风率>耐折性能>耐化学性能>总压差>出口温差

从表 5-2 中可以看到，当某一影响因素的敏感性程度排序低于 3 时，其输出变化量的方差很小，可以忽略不计。

综上，本文认为，按照效益原理中的投入产出原则，相关部门应定期监测并调整垃圾焚烧厂布袋除尘器的运行情况使其在在过滤风速、温度等方面符合标准，尤其重点关注布袋除尘系统的烟气入口温度、过滤风速以及漏风率，保证烟气入口温度维持在 220℃左右，过滤风速维持在 0.975m/min 间，漏风率尽量为 0。

5.4 问题（2）的求解

附件 2 指出新型超净除尘替代工艺可以完全稳定运行，加上其采用固体滤料，因此可以忽略日布袋损坏数对除尘效率的影响，只需考虑过滤风速以及过滤时间的影响。

把采用替代工艺的除尘系统视为最理想情况下的布袋除尘系统，忽略式 5-13 中影响布袋损坏的因素，整理得到采用替代工艺时的除尘效率公式为

$$C_2 = 2252 - 2246(V_f^{-0.000981}(78 + 2252V_f t)^{0.00008605}) - 0.512 \quad (5-14)$$

取过滤风速为 0.975m/min，比较两种工艺下除尘效率随时间变化的规律，结果如图 5-14 所示。

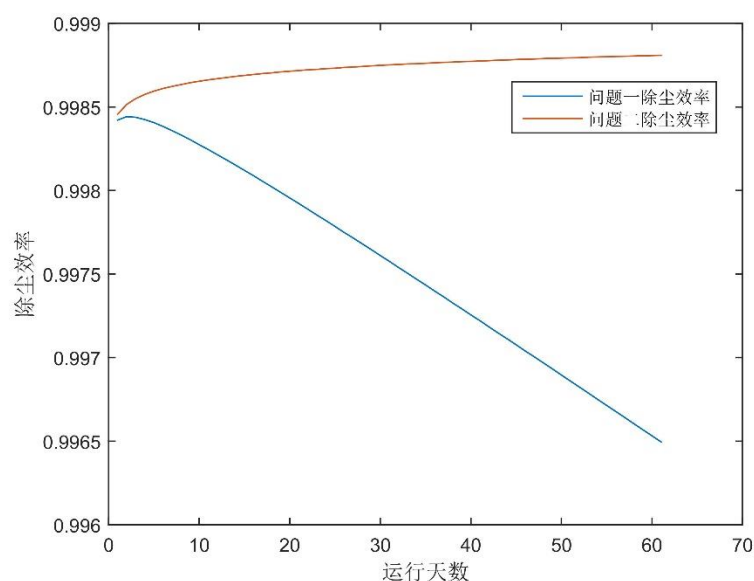


图 5-14 不同工况下除尘效率随时间的变化走势图

本文利用实际运行前 60 天除尘效率的方差来衡量除尘效率的波动程度，经过计算得到布袋工艺下的除尘效率的差为 3.52×10^{-7} ，采用替代工艺后除尘效率的方差降至 5.99×10^{-9} ，说明此时除尘模型的稳定性能提升了 57.8 倍。

6. 模型的评价与改进

6.1 模型的优点

- (1) 巧妙利用模糊数学来量化布袋的耐折性、耐化学性等随着时间而弱化的程度。
- (2) 使用只有一个待定参数且能实现全局函数逼近的 GRNN 神经网络进行布袋损坏分析，可以最大限度地避免人为主观假定对结果的影响，并且在本文样本数据较少的情况下仍能获得很好的拟合效果。
- (3) 根据布袋理化性质的状态将除尘系统的运行状态分为理想与非理想两种情况，只有非理性状态下才会出现布袋损坏，从而可以深入讨论影响除尘效率的各因素，较好地解决了这个实践性比较强的问题。
- (4) 充分利用 GRNN 神经网络原理，使用单一变量法分析除尘效率对漏风率等影响因素的敏感程度，得到各因素对除尘效率影响程度的大小排序，从而可以针对性的提出环保监测方案。
- (5) 本文对问题论述详实准确，有理有据，结果可靠，可操作性强。

6.2 模型的缺点

(1) 模型中的部分参数参考了前人的研究成果,在实际应用中需要根据特定情况作出适当调整。

(2) 因为模型的求解精度以及数据来源单一的影响,可能会给稳定性因素的分析带来一定的误差。

6.3 模型的改进方向

(1) 附件所给的数据存在代表性弱、部分缺失等情况,导致在求解过程中实际可用数据较少,为此可以有目的地对垃圾焚烧厂布袋除尘系统的运行工况进行详细的监测与记录,通过更为全面的数据分析,优化神经网络,从而深层次研究布袋除尘系统运行稳定性问题。

(2) 可以对布袋除尘器运行工况进行数值模拟或实验模拟,加深对 GRNN 神经网络的运行机理的理解。

(3) 在后续研究中应收集民众诉求,充分考虑民意并结合布袋除尘等方面的实际情况,制定垃圾焚烧厂在选址、运营、扩建等方面的方案,将具有更为实际的意义,有利于垃圾焚烧处理的推广。

参考文献

- [1] 袁颖,周爱红,李治广. 基于广义回归神经网络的结构损伤识别方法研究[A]. Proceedings of 2011 International Conference on Biomedicine and Engineering (ISBE 2011 V1)[C]. 2011.
- [2] 李宏寨,郭平. 基于 GRNN 神经网络的交叉检验图像降噪方法[J]. 计算机科学, 2004, 31(12): 151-153.
- [3] 韩中庚. 数学建模方法及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2005. 322-325.
- [4] 丁炜. 燃煤电厂袋式除尘器滤料性能失效过程研究[D]. 南京:丁炜, 2011. 45-56.
- [5] 胡满银,张瑞英. 电-袋除尘器运行仿真数学模型[J]. 环境工程, 2008, 26(5): 54-57.
- [6] 李东梅,田娱嘉,郭阳,李伟,李媛,吴文龙. 布袋除尘器 滤袋使用寿命的影响因素分析[J]. 热力发电, 2013, 42(4): 104-106.
- [7] 王剑. 关于网络数据归一化处理探讨[J]. 信息系统工程, 2015, (12): 60.
- [8] 张鹏峰. 袋式除尘器过滤性能的研究[D]. 上海:东华大学, 2004.
- [9] 胡满银,雷应奇,尹琦,高香林. 电除尘器提效节能除尘效率公式的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(3): 90-113.
- [10] 龚进军. 煤飞灰布袋过滤数学模型[J]. 现代节能, 1997, (1): 22-24.
- [11] 蔡毅,邢岩,胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.
- [12] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].

附录

- 附录 1 求神经网络的各输入输出层取值的函数
- 附录 2 求解最佳 SPREAD 值并训练 GRNN 神经网络
- 附录 3 日布袋损坏数与出口烟尘浓度的数值变化分析
- 附录 4 除尘效率与穿透率以及布袋损坏率的多元回归
- 附录 5 多元回归原始方程函数
- 附录 6 敏感性分析，以及最优工况的求解
- 附录 7 布袋除尘器最佳与一般工况除尘效率随时间的变化比较、最大处理烟尘量
- 附录 8 求解稳定性能较布袋除尘器的提升程度
- 附录 9 附表一
- 附录 10 附表二
- 附录 11 附表三

附录1. 求神经网络的各输入输出层取值的函数

```
clear;
close all;
load('S1.mat');
load('S2.mat');%处理好的值，见附表一
```

%p: 1 漏风率 2 过滤风速 3 入口平均温度与额定温度的绝对差值 4 出口平均温度与额定温度的绝对差值

% 5 耐折 6 耐化学 7 总压差

%8 时间 9 布袋日损坏数

%t: 日布袋损坏数

K_ch=0.0030;%耐化学性的模糊数学系数

K_fo=0.0023;%耐折性的模糊数学系数

%计算#1 各个时间段的漏风率

for i=1:12

L_F1(i)=(1/S1(7,i))*(1-(2900*S1(5,i)/((S1(1,i)+2900)*S1(6,i))));%L_F1 是炉 1 的漏风率

p(i,1)=L_F1(i);

p(i,7)=S1(2,i);

p(i,8)=S1(7,i);%时间

end

%计算#2 各个时间段的漏风率

for i=1:12

L_F2(i)=(1/S2(7,i))*(1-(2900*S2(5,i)/((S2(1,i)+2900)*S2(6,i))));%L_F1 是炉 1 的漏风率

```

        p(i+12,1)=L_F2(i);
        p(i+12,7)=S2(2,i);
        p(i+12,8)=S2(7,i);%时间
    end

%计算#1 各个时间段的平均过滤风速
for i=1:12
    fi_ve1(i)=(150*S1(3,i)*S1(4,i))/3185;%fi_ve1 是炉 1 的过滤风速
    p(i,2)=fi_ve1(i);
    t(i,1)=S1(8,i)/S1(7,i);
end

%计算#2 各个时间段的平均过滤风速
for i=1:12
    fi_ve2(i)=(150*S2(3,i)*S2(4,i))/3185;%fi_ve1 是炉 1 的过滤风速
    p(i+12,2)=fi_ve2(i);
    t(i+12,1)=S2(8,i)/S2(7,i);
end

%计算#1 各个时间段的平均温度与额定温度的绝对差值
for i=1:12
    diffi1(i)=abs(S1(5,i)-220);%diffi1(i)是炉 1 的入口烟温与额定烟温差值
    diffol1(i)=abs(S1(6,i)-195);%diffol1(i)是炉 1 的入口烟温与额定烟温差值
    p(i,3)=diffi1(i);
    p(i,4)=diffol1(i);
end

%计算#2 各个时间段的平均温度与额定温度的绝对差值
for i=1:12
    diffi2(i)=abs(S2(5,i)-220);%diffi2(i)是炉 2 的入口烟温与额定烟温差值
    diffol2(i)=abs(S2(6,i)-195);%diffol2(i)是炉 2 的入口烟温与额定烟温差值
    p(i+12,3)=diffi2(i);
    p(i+12,4)=diffol2(i);
end

%%
%计算#1 的耐折性
for i=1:12
    fold_end1(i)=exp(-K_fo*S1(7,i));
    p(i,5)=fold_end1(i);
end

%计算#2 的耐折性
for i=1:12
    fold_end2(i)=exp(-K_fo*S2(7,i));
    p(i+12,5)=fold_end2(i);
end

%%

```

```

%计算#1 的耐化学性
for i=1:12
    che_end1(i)=exp(-K_ch*S1(7,i));
    p(i,6)=che_end1(i);
end

```

```

%计算#2 的耐化学性
for i=1:12
    che_end2(i)=exp(-K_ch*S2(7,i));
    p(i+12,6)=che_end2(i);
end
p(:,9)=t;
clearvars -except p t;

```

附录2. 求解最佳 SPREAD 值并训练 GRNN 神经网络

```

%运行该代码前，要先运行 index
% 清空环境变量
clc;
% clear all
close all
nntwarn off;
%% 载入数据
p_train=p(1:23,1:7);
t_train=t(1:23,:);
p_test=p(24,1:7);
t_test=t(24,:);
%% 交叉验证
desired_spread=[];
mse_max=10;
desired_input=[];
desired_output=[];
result_perfp=[];
indices = crossvalind('Kfold',length(p_train),6);
h=waitbar(0,'正在寻找最优化参数....')
k=1;
for i = 1:6
    perfp=[];
    disp(['以下为第',num2str(i),'次交叉验证结果'])
    test = (indices == i); train = ~test;
    p_cv_train=p_train(train,:);
    t_cv_train=t_train(train,:);
    p_cv_test=p_train(test,:);
    t_cv_test=t_train(test,:);
    %转置
    p_cv_train=p_cv_train';
    t_cv_train=t_cv_train';
    p_cv_test= p_cv_test';
    t_cv_test= t_cv_test';

```

```

[p_cv_train,minp,maxp,t_cv_train,mint,maxt]=premnmx(p_cv_train,t_cv_train);% 归一化
p_cv_test=tramnmx(p_cv_test,minp,maxp);

for spread=0.1:0.1:2;
    net=newgrnn(p_cv_train,t_cv_train,spread);
    waitbar(k/80,h);
    disp(['当前 spread 值为', num2str(spread)]);
    test_Out=sim(net,p_cv_test);
    test_Out=postmnmx(test_Out,mint,maxt);
    error=t_cv_test-test_Out;
    er(k)=mse(error);
    erx(k)=spread;
    disp(['当前网络的 mse 为',num2str(mse(error))])
    perfp=[perfp mse(error)];
    if mse(error)<mse_max
        mse_max=mse(error);
        desired_spread=spread;
        desired_input=p_cv_train;
        desired_output=t_cv_train;
    end
    k=k+1;
end

result_perfp(i,:)=perfp;
end;

hold on;
plot(erx(1:20),er(1:20));
plot(erx(21:40),er(21:40));
plot(erx(41:60),er(41:60));
plot(erx(61:80),er(61:80));
plot(erx(81:100),er(81:100));
plot(erx(101:120),er(101:120));
hold off;
legend('第 1 次交叉验证结果','第 2 次交叉验证结果','第 3 次交叉验证结果','第 4 次交叉验证结果','第 5 次交叉验证结果','第 6 次交叉验证结果');
xlabel('spread 值');ylabel('平均误差');
close(h)
disp(['最佳 spread 值为',num2str(desired_spread)])
disp(['此时最佳输入值为'])
desired_input
% plot(desired_input);
disp(['此时最佳输出值为'])
desired_output
%% 采用最佳方法建立 GRNN 网络
net=newgrnn(desired_input,desired_output,desired_spread);
p_test=p_test';

```

```

p_test=tramnmx(p_test,minp,maxp);%归一化
grnn_prediction_result=sim(net,p_test);
grnn_prediction_result=postmnmx(grnn_prediction_result,mint,maxt);%反归一化
grnn_error=t_test-grnn_prediction_result';

```

```

disp(['GRNN 神经网络预测的误差为',num2str(abs(grnn_error))]);

```

附录3. 日布袋损坏数与出口烟尘浓度的数值变化分析

```

close all
clear;
load map;
y=y';
figure;
plot(t_1(3,:),y,'*');
ylabel('出口烟尘浓度');
xlabel('布袋日损坏数');
title('日布袋损坏数与出口烟尘浓度的数值变化关系');

```

附录4. 除尘效率与穿透率以及布袋损坏率的多元回归

```

clear
close all
index;
load net1
load t1;
y=t1;
X=[p(:,2),p(:,8),p(:,9)];
beta0=[785,75,0.705,0.2002,-0.1];%设置初始值
[beta,r,J]=lsqcurvefit('myfun',beta0,X,y);%myfun 是原始拟合函数文件
beta
r

for i=1:24
    y_1(i)=beta(1)-
    beta(2).*((X(i,1).^beta(3)).*(80+beta(1).*X(i,1).*X(i,2)).^beta(4)+beta(5).*X(i,3).*X(i,2))
    -0.5;
end
%绘制函数图像
plot(y_1,'*');
hold on
plot(t1,'+');
legend('拟合结果','原始数据');
xlabel('第 i 个坐标点');
ylabel('出口烟尘浓度');
hold off
error=mean(abs(y_1-t1));
disp(['平均误差为',num2str(error)]);
save b beta;

```

附录5. 多元回归原始方程函数

```
function y=myfun(beta,X)
%回归的原始函数
y=beta(1)-
beta(2).*((X(:,1).^beta(3)).*(75+beta(1).*X(:,1).*X(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X(:,3).*X(:,2)));
end
```

附录6. 敏感性分析，以及最优工况的求解

```
clc
clear
close all
load net1;
load b;
origin=p_test;
%%
%漏风率变化，求输出变化值的均值为敏感系数
for j=1:7;

    p_test=origin;%数值初始化
    p_tes1=p_test(j,1);
    k=1;
    for i=-5:0.1:15
        p_test(j,1)=p_tes1*i;
        p_tek=postmnmx(p_test,minp,maxp);
        p_test(j,1)=p_tes1*i;
        p_te(k)=p_tek(j,1);
        grnn_prediction_result=sim(net,p_test);
        grnn_prediction_result=postmnmx(grnn_prediction_result,mint,maxt);%反归一
        化;
        X=[p_tek(2,1),61,grnn_prediction_result];
        c_2=beta(1)-
        beta(2).*((X(:,1).^beta(3)).*(50+beta(1).*X(:,1).*X(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X(:,3).*X(:,2))
        -0.5;

        dust_collection=(beta(1)-c_2)/beta(1);
        grnn_err(k)=dust_collection';
        k=k+1;
    end

    %求最大除尘效率对应的各个最优指标
    value=max(max(grnn_err));
    [row,col]=find(value==grnn_err);
    disp(['理论最大除尘效率为', num2str(value)]);
    disp(['理论对应指标的最优值为', num2str(p_te(col))]);

    if j==1
```

```

        figure(1);
        plot(p_te+0.5,grnn_err,'*');
        xlabel('漏风率');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['漏风率输出变化量的方差为', num2str(var(grnn_err))]);
    end
    if j==2
        figure(2);
        plot(p_te,grnn_err-0.05,'*');
        xlabel('过滤风速');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['过滤风速输出变化量的方差为', num2str(var(grnn_err))]);
    end

    if j==3
        figure(3);
        plot(p_te,grnn_err,'*');
        xlabel('入口平均温度与额定温度的差值');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['入口平均温度与额定温度的绝对差值输出变化量的方差为',
num2str(var(grnn_err))]);
    end

    if j==4
        figure(4);
        plot(p_te,grnn_err,'*');
        xlabel('出口平均温度与额定温度的差值');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['出口平均温度与额定温度的绝对差值输出变化量的方差为',
num2str(var(grnn_err))]);
    end

    if j==5
        figure(5);
        plot(p_te,grnn_err,'*');
        xlabel('耐折性');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['耐折性输出变化量的方差为', num2str(var(grnn_err))]);
    end

    if j==6
        figure(6);
        plot(p_te,grnn_err,'*');
        xlabel('耐化学性');
        ylabel('除尘效率');
        disp(['耐化学性输出变化量的方差为', num2str(var(grnn_err))]);
    end
end

```



```

        if j==7
            figure(7);
            plot(p_te,grnn_err,'*');
            xlabel('总压差 ');
            ylabel('除尘效率');
            disp(['总压差 输出变化量的方差为', num2str(var(grnn_err))]);
        end
    end
end

hold off;

```

附录7. 布袋除尘器最佳与一般工况除尘效率随时间的变化比较、最大处理烟尘量

```

close all;
clear;
load net1;
load b;
k=1;
for i=1:60
    p_best=[0.0001,0.975,0,0,0.9,0.9,2179.5];
    p_best=p_best';
    p_best=tramnmx(p_best,minp,maxp);%归一化
    grnn_prediction_result=sim(net,p_best);
    grnn_prediction_result=postmnmx(grnn_prediction_result,mint,maxt);%反归一化
    h_1(k)=grnn_prediction_result;
    X=[0.96839,i,grnn_prediction_result];
    p_best1=[0.0534,0.702,17,26,0.99,0.99,1788];
    beta(1)=2252;beta(2)=2246;beta(3)=-0.000981;beta(4)=0.00008605;beta(5)=-
0.0003933;
    p_best1=p_best1';
    p_best1=tramnmx(p_best1,minp,maxp);%归一化
    grnn_prediction_result1=sim(net,p_best1);
    grnn_prediction_result1=postmnmx(grnn_prediction_result1,mint,maxt);%反归一化
    h_1(k)=grnn_prediction_result1;
    X1=[0.691,i,grnn_prediction_result1];

    p_best2=[0.00527,0.712,5.11,1.71,0.91,0.88,2101];

    p_best2=p_best2';
    p_best2=tramnmx(p_best2,minp,maxp);%归一化
    grnn_prediction_result2=sim(net,p_best2);
    grnn_prediction_result2=postmnmx(grnn_prediction_result2,mint,maxt);%反归一化
    h_1(k)=grnn_prediction_result2;
    X2=[0.691,i,grnn_prediction_result2];

    c_2=beta(1)-
beta(2).*((X(:,1).^beta(3)).*(75+beta(1).*X(:,1).*X(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X(:,3).*X(:,2))
-0.5;
    c_1=beta(1)-

```

```

beta(2).*((X1(:,1).^beta(3)).*(75+beta(1).*X1(:,1).*X1(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X1(:,3).*X
1(:,2))-0.5;
    c_3=beta(1)-
beta(2).*((X2(:,1).^beta(3)).*(75+beta(1).*X2(:,1).*X2(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X2(:,3).*X
2(:,2))-0.5;
    %%
    dust_collection=(beta(1)-c_2)/beta(1);
    dust_collection1=(beta(1)-c_1)/beta(1);
    dust_collection2=(beta(1)-c_3)/beta(1);
    grnn_er(k)=dust_collection';
    grnn_er1(k)=dust_collection1';
    grnn_er2(k)=dust_collection2';
    k=k+1;
end
plot(grnn_er);
hold on;
plot(grnn_er1);
plot(grnn_er2);
xlabel('运行天数');ylabel('除尘效率');
legend('最佳工况','一般工况 1','一般工况 2');
save b beta;

```

附录8. 求解稳定性能较布袋除尘器的提升程度

```

clear
close all;
load net1;
load b;
k=1;
for i=1:61
    p_best=[0.0001,0.96839,0,0,0.9,0.9,2179.5];
    p_best=p_best';
    p_best=tramnmx(p_best,minp,maxp);%归一化
    grnn_prediction_result=sim(net,p_best);%神经网络求日布袋损坏数
    grnn_prediction_result=postmnmx(grnn_prediction_result,mint,maxt);%反归一化
    X=[0.76839,i,grnn_prediction_result];
    %%
    c_2=beta(1)-beta(2).*((X(:,1).^beta(3)).*(beta(1).*X(:,1).*X(:,2)).^beta(4))-0.5;% 问
题二公式
    c_1=beta(1)-
beta(2).*((X(:,1).^beta(3)).*(75+beta(1).*X(:,1).*X(:,2)).^beta(4)+beta(5).*X(:,3).*X(:,2))
-0.5;%问题一公式
    dust_collection2=(beta(1)-c_2)/beta(1);
    dust_collection1=(beta(1)-c_1)/beta(1);%计算除尘效率
    grnn_er1(k)=dust_collection1';
    grnn_er2(k)=dust_collection2';
    k=k+1;
end
plot(grnn_er1);hold on;

```

```

plot(grnn_er2);
var(grnn_er1)%问题一除尘效率方差
var(grnn_er2)%问题二除尘效率方差
f_c=var(grnn_er1)/var(grnn_er2);
disp(['问题二除尘效率稳定性能使问题一的',num2str(f_c),'倍'])
xlabel('运行天数');ylabel('除尘效率');
legend('问题一除尘效率','问题二除尘效率');

```

附录9. 附表一

炉号	时间段编号	日布袋损坏数	平均过滤风速 m/min	出口温差℃	入口温差℃	平均总 差压 Pa
#1	A	0	0.69169	8.00	6.00	1951
	B	0	0.68134	17.50	2.50	2006
	C	0	0.68060	4.50	22.50	1921
	D	0.23256	0.71167	1.71	5.12	2101
	E	0.10000	0.74644	5.80	4.20	1930
	F	0.42857	0.73608	14.00	8.67	2272
	G	2.00000	0.85075	8.00	2.00	2052
	H	0.06667	0.75999	4.70	4.96	2154
	I	0.22642	0.70254	20.33	7.53	1859
	J	0	0.70279	26.00	17.00	1788
	K	0.13636	0.85762	33.29	18.57	2174
	L	0.14754	0.71772	23.18	13.86	2180
#2	A	0.45833	0.67412	5.67	54.00	2390
	B	3.16667	0.70649	0.00	6.00	2500
	C	0.11429	0.74684	4.64	7.09	2337
	D	1.04651	0.72406	6.63	4.75	2488
	E	0.40000	0.74471	15.33	3.50	2546
	F	1.00000	0.72992	2.33	8.33	2228
	G	6.00000	0.88034	1.00	7.00	1728
	H	0.16667	0.75438	7.89	0.79	2279
	I	0	0.63276	25.53	8.87	2000
	J	5.33333	0.66580	26.00	17.00	1798
	K	0.18182	0.66210	19.00	9.00	2253
	L	0.74286	0.74286	0.74	0.74	2222

附录10. 附表二

炉号	时间段编号	漏风率	平均过滤风速 m/min	平均总差压 Pa
	A	0.059662963	0.691694505	1951

#1	B	0.006944903	0.681337582	2006
	C	0.025945793	0.680597802	1921
	D	0.005285679	0.711668571	2101
	E	0.021393736	0.746438242	1930
	F	0.032457779	0.736081319	2272
	G	0.226904033	0.850747253	2052
	H	0.003524903	0.759992072	2154
	I	0.003391625	0.702544615	1859
	J	0.053472166	0.702791209	1788
	K	0.008318178	0.857616641	2174
	L	0.003164329	0.717718917	2180
#2	A	0.008832665	0.674124725	2390
	B	0.047763427	0.70649011	2500
	C	0.00802785	0.746841758	2337
	D	0.006413376	0.72405989	2488
	E	0.011298063	0.744712088	2546
	F	0.031851322	0.729916484	2228
	G	0.241149239	0.880338462	1728
	H	0.003836984	0.754381145	2279
	I	0.002751019	0.632758681	2000
	J	0.051159826	0.665802198	1798
	K	0.008847637	0.662103297	2253
	L	0.003442326	0.742862637	2222

附录11. 附表三

炉号	时间段编号	日布袋损坏数	平均过滤风速 m/min	平均烟尘浓度 g/Nm ³
#1	A	0	0.691694505	10.1
	B	0	0.681337582	8.1
	C	0	0.680597802	9.05
	D	0.23255814	0.711668571	8.49
	E	0.1	0.746438242	7.12
	F	0.428571429	0.736081319	6.97
	G	2	0.850747253	8.2
	H	0.066666667	0.759992072	7.16
	I	0.226415094	0.702544615	7.17
	J	0	0.702791209	7.2
	K	0.136363636	0.857616641	7.93
	L	0.147540984	0.717718917	7.89
	A	0.458333333	0.674124725	9.66
	B	3.166666667	0.70649011	8.2

#2	C	0.114285714	0.746841758	9.6
	D	1.046511628	0.72405989	8.73
	E	0.4	0.744712088	8.83
	F	1	0.729916484	8.47
	G	6	0.880338462	9.2
	H	0.166666667	0.754381145	15.86
	I	0	0.632758681	5.94
	J	5.333333333	0.665802198	6.25
	K	0.181818182	0.662103297	10.6
	L	0.742862637	0.742862637	15.34