

2016 同济大学数学建模竞赛

垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析

(C 题)

队员 1

队员 2

队员 3

垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析

摘要 布袋式除尘系统在减少垃圾焚烧产生的污染排放量、降低大气环境污染和保护人体健康等方面发挥着重要的作用，研究布袋式除尘工艺设计参数的优化控制、除尘系统的运行维护及外来因素的扰动对提高除尘效率和系统运行稳定性具有重要意义。

本文从布袋式除尘器的基本原理出发，通过查阅资料获得关于布袋除尘器的构造和基本原理的信息，得出主要影响布袋除尘器稳定性的四个因素，并建立曲线拟合的最小二乘法模型，得到布袋式除尘器的理想排出浓度与四个因素之间的函数图象；通过分析表中数据及查阅资料，得到损坏数量随时间变化的函数图象；由损坏率图象对已得出的理想排出浓度进行修正，建立灰色理论模型，算出理想排出浓度和损坏率之间的权重，据此得出理论排出浓度和时间之间的实际函数图象。我们认为，题中所说的布袋式除尘系统的运行稳定性是对排出浓度和稳定作用时长的综合评测，因此评判稳定性的标准是一个较好的排出浓度值和其值维持在较小范围内浮动的时长。并在考虑除尘系统稳定性因素的前提下，进一步对上述模型进行修正。

针对问题一，本文研究布袋式除尘器稳定性能达到最佳时，即研究系统的理论排出浓度和稳定作用时长达到最佳时，一个单位的仓室的最佳理论排出浓度-时间曲线。通过改变模型中的参数值，得出不同炉号的理论排出浓度随时间变化的曲线。选取稳定性更佳的炉作为扩建参考炉。题中认为总源强的限额是一定的。若合理安排周期的更替时间，则 N 个仓室的总源强可以达到一个最合理的分布，从而使得总源强与时间的关系曲线更加平稳。根据分析结果，炉是否错峰运行、在错峰处及浓度-时间函数中拐点后是否作重要观测均为政府监测中需要注意的因素。

针对问题二，题中已知新工艺完全稳定运行、除尘效果好和排出浓度标准高。即在原有模型的基础上，拥有更低的排放浓度和更长的稳定作用时长，因此将利用已知的浓度-时间曲线，计算降低浓度带来的时间减少量来反映除尘模型的稳定性提高率。

关键词 排出浓度 稳定作用时长 函数拟合 灰色理论 错峰运行

一. 问题重述

1.1 问题背景

以焚烧方法处理生活垃圾是我国社会维持可持续发展的必由之路。然而，国标控制排放量与民众环保诉求之间依旧存在落差。而阻碍国标进一步提升的主要问题还是现行垃圾焚烧除尘工艺存在缺乏持续稳定性等重大缺陷。另外，在各地不得不建设大型焚烧厂集中处理垃圾的情况下，采用现行除尘工艺的大型焚烧厂即便其排出浓度不超标，却仍存在排放总量限额超标的问题，也会恶化当地的环境。

1.2 题目所给信息

附件 1 是某垃圾焚烧发电厂布袋式烟气处理系统的部分实际运行数据，从中可以看出，布袋除尘工艺环节对整个袋式烟气处理系统的运行稳定性有决定性影响；

附件 2 是新型超净除尘工艺主要技术特点介绍。

1.3 所要解决的问题

为控制排放总量，找出影响袋式除尘系统排放量的各项因素，构建数学模型分析袋式除尘系统的稳定性问题，并分析其运行稳定性对周边环境烟尘排放总量的影响。再基于模型回答问题：

- (1) 给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额，在考虑除尘系统稳定性因素的前提下，试分析在稳定性最佳时，焚烧厂扩建规模的上限是多少？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，除尘模型稳定性能提升多少？、

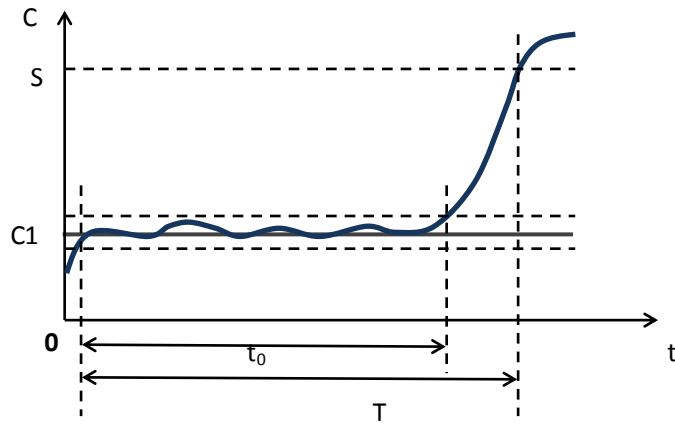
二. 问题分析

稳定性是由一个较好的排出浓度值及其维持在较小范围内浮动的时长所共同决定的。量化分析布袋除尘器运行的稳定性问题，首先通过查找相关资料和数据并结合题中所给条件，确定影响布袋稳定性的主要因素，然后通过构建数学模型并利用 matlab 进行数据处理和曲线分析，最终得到排出浓度关于时间的函数图象，利用图像解决其运行稳定性问题。

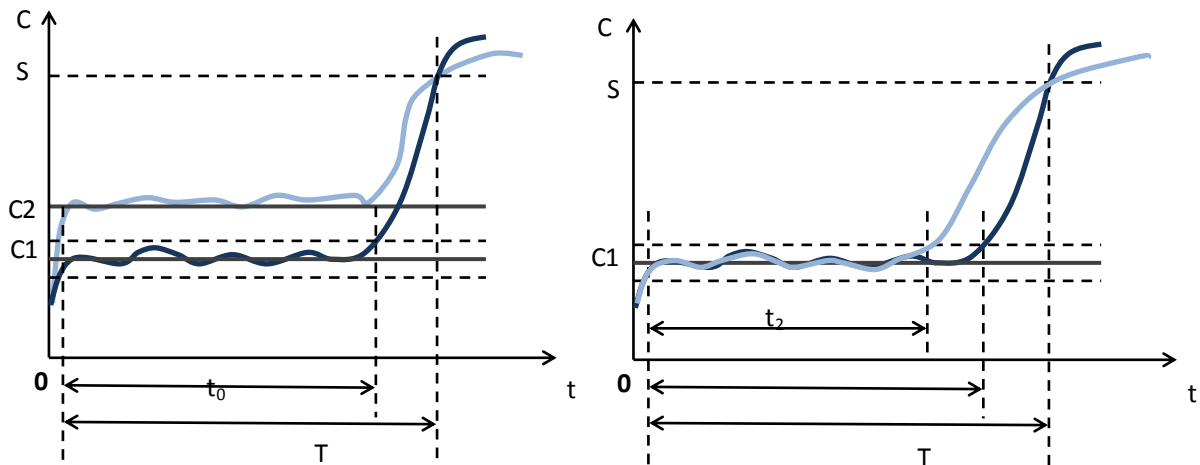
烟尘排放总量随排出浓度、时间、体积的变化而变化，这里仅考虑排出点排放总量，即周边环境的单位体积内的排放总量与袋式除尘系统运行稳定性的关系。排出浓度值越低，时长越长，则稳定性越好。我们定义稳定性的评判标准为：

$$W = \frac{t_0}{c'}$$

假设排出浓度随时间的变化如下图所示：



其中，较好的排出浓度值为 c_1 ，维持其较小范围内的时长为 t_1 。采用控制变量法分别研究两者对稳定性的影响，进而得出稳定性对环境的单位体积内的排放总量的影响。此处假设两根曲线浓度到达国标浓度的时间相同。



由图可知，稳定性越高，图线与 t 轴在 T 时刻内包围的面积越小，即稳定性越高，单位体积内的排放总量越少。因此，研究带式除尘系统的稳定性问题对研究周边环境烟尘排放总量至关重要。

针对问题一，本文研究布袋式除尘器稳定性能达到最佳时，即研究系统的理论排出浓度和稳定作用时长达到最佳时，一个单位的仓室的最佳理论排出浓度-时间曲线。首先我们通过改变模型中的参数值，将 1#炉和 2#炉的参数带入其中，分别得出 1#炉和 2#炉的理论排出浓度随时间变化的曲线。选取稳定性更佳的炉作为扩建参考炉，即得出选几号炉能使排出浓度更小。

就实际情况来说，当理论排出浓度超过国标排出浓度后，工厂应对该炉进行调整，使排出浓度重新满足 $t=0$ 时刻的浓度，设理论排出浓度达到国标排出浓度的时刻为 t_1 ，则一个炉可以正常使用的周期为 $T=t_1$ 。根据此浓度-时间曲线，得出一个单位的仓室源强随时间的变化。

出口负压与烟气从排放口排出的速度关系为：

$$P_y = \frac{\rho v_{\text{排}}^2}{2}$$

其中, $v_{\text{排}}$ 为烟气从排放口排出的速度, ρ 近似为空气密度, 约为 $1290\text{mg}/\text{m}^3$; P_y 为出口负压。

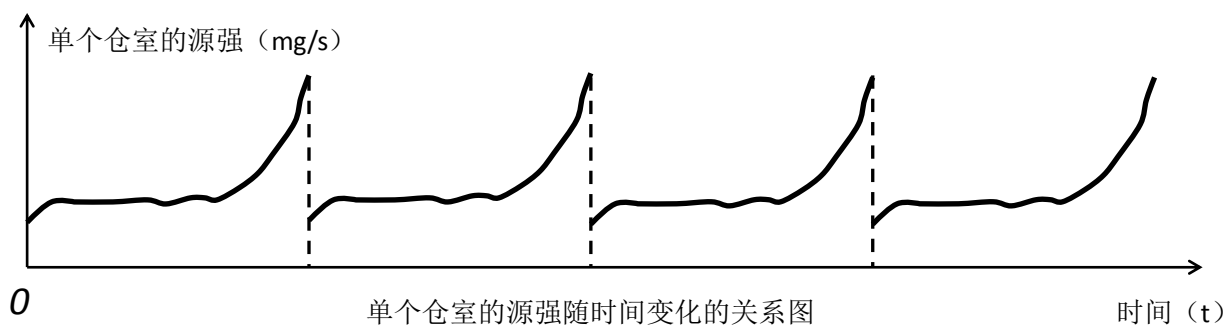
源强与理论排出浓度的关系为:

$$Q(t) = c(t) \cdot v_{\text{排}} \pi r^2$$

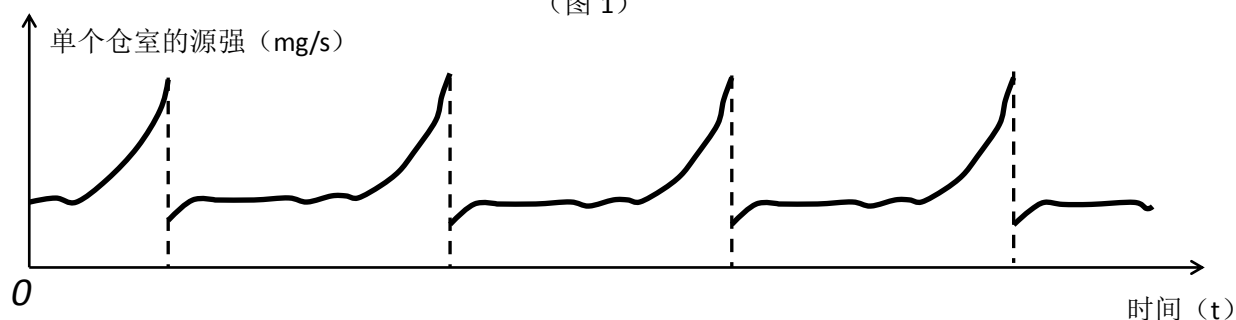
其中, $v_{\text{排}}$ 为烟气从排放口排出的速度, r 为排放口的半径, r 取 2m 。

题中给定周边范围单位面积排放总量限额, 即认为总源强的限额是一定的。若合理安排周期的更替时间, 则 N 个仓室的总源强可以达到一个最合理的分布, 从而使得总源强与时间的关系曲线更加平稳。

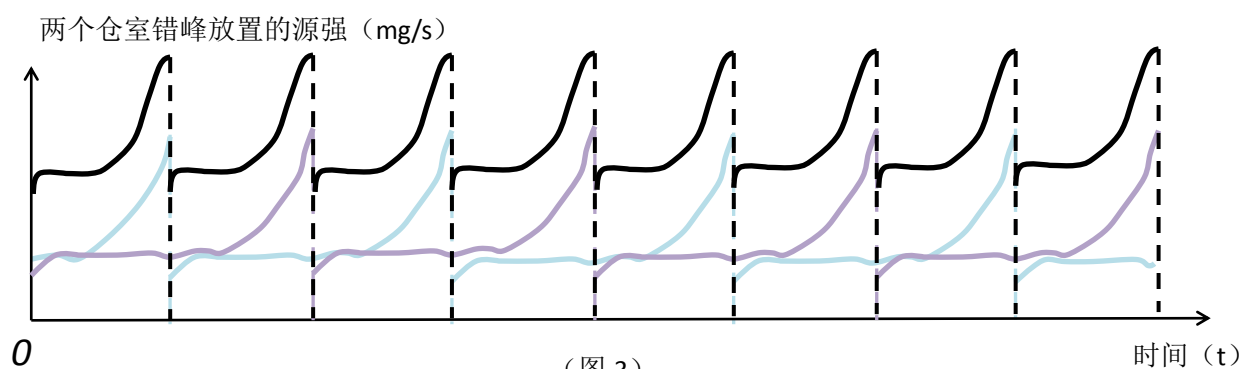
例如, 单个仓室的源强与时间的关系如图 1 所示, 将第二个仓室的周期与第一个仓室的周期错峰, 如图 2 所示, 图 3 表示这两个仓室的源强叠加后随时间变化的关系。其中, 图 3 的黑色曲线代表错峰叠加后的源强-时间函数, 蓝色和紫色曲线代表单类型仓室的源强-时间函数。



(图 1)

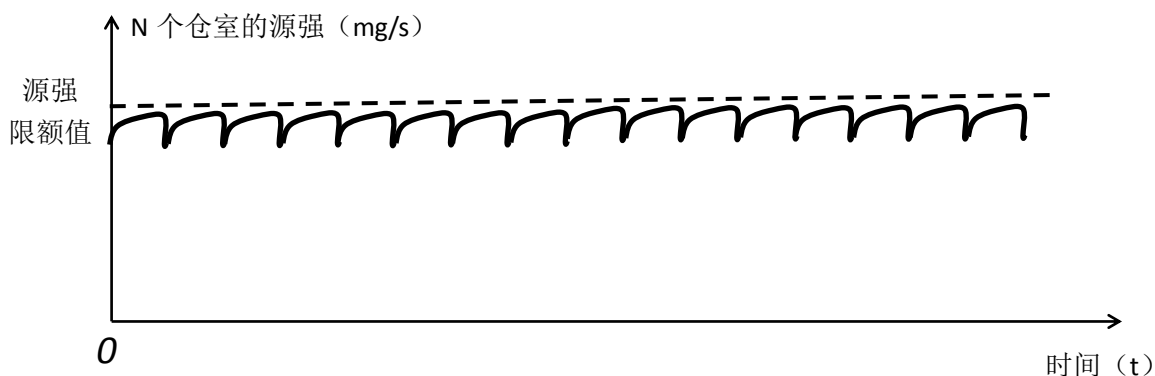


(图 2)



(图 3)

由图像易知，随着仓室数量 N 的增加，若将他们的最高峰分别分布在整个周期的 $\frac{k}{N}$ ($k=1,2,\dots, N$) 处，最终得到的 N 个仓室的总源强随时间变化会趋于平稳，如图 4 表示。



(图 4)

当 $N+1$ 个仓室得到的源强最大值超过给定的源强限额值，认为这 N 个仓室是环境允许下扩建规模的上限。

基于最稳定的情况下，调整影响理论排出浓度的参数运维条件，从而提出环境保护综合监测建议。

针对问题二，我们认为新工艺完全稳定运行、除尘效果好和排出浓度标准高的特性表现为在原有模型的基础上，拥有更低的排放浓度和更长的稳定作用时长，即利用已知的浓度-时间曲线，通过计算浓度降低带来的时间减少率来反映除尘模型的稳定性提升率。

三．基本假设

1. 假设在理论排出浓度等于国标排出浓度时，工厂对布袋进行更换，能使排出浓度重新回到 $t=0$ 时刻的理论排出浓度，开始新的一个周期。
2. 假设烟尘密度 ρ 近似为空气密度，约为 $1290\text{mg} / \text{m}^3$ 。
3. 假设烟尘的分布是均匀的且只受文中提到的因素的影响。

四．参数说明

参数符号	参数意义
P_f	滤袋的阻力
P_c	除尘器设备阻力
P_d	沉积粉尘层的阻力
P	总阻力
f	滤料的阻力系数

u	气体的粘性系数
v	过滤风速
η_1	理想排出浓度所占权重
η_2	破损数量所占权重
c'	理论排出浓度, mg / Nm^3
t_0	稳定工作时长
W	稳定性
A	单位面积排放总量限额
Q	源强, kg / s
T	温度, T
P_y	出口负压, Pa
ρ	烟气密度, g / m^3
$v_{排}$	烟气从排放口排出的速度
r	排放口的半径

五. 模型的构建

5.1 浓度曲线拟合的线性最小二乘法

5.1.1 模型的假设

假设只有研究的这四个因素影响其排出浓度, 其他因素带来的影响忽略不计;

5.1.2 模型的构建

影响布袋式除尘器除尘效率的因素很多, 大致可以分为三个方面: 烟尘特性、结构因素、运行因素等, 这些因素之间的相互联系如图 5.1 所示, 各种因素的影响直接关系到处理的烟尘含量和布袋的破损率, 进而影响除尘效率的高低, 最后结果表现为除尘系统运行的稳定性。

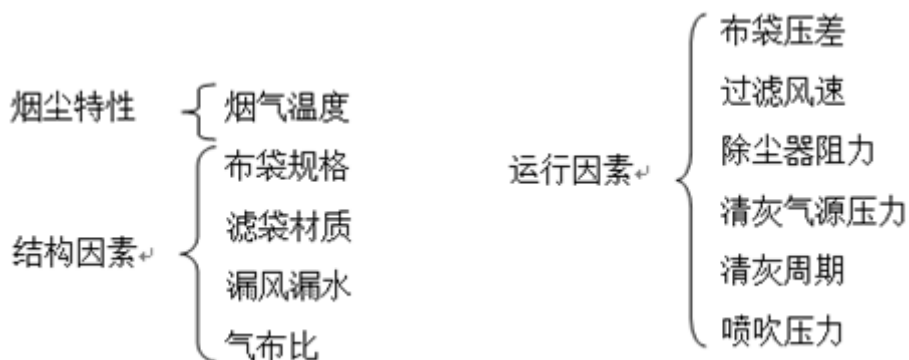


图 5.1

布袋式除尘设备的除尘效率不受粉尘比电阻等粉尘特性的影响，因此影响布袋式除尘系统除尘效率即稳定性的主要因素就在于布袋各项参数的设计和设备运行参数的调节。有关人员可以通过设计参数调整、运行优化和设备维护改造等加以改变。在此，本文对影响布袋式除尘系统稳定性的因素加以分析，从而得出烟尘排出浓度和布袋破损率，由此得出理想排出浓度。

要使布袋式除尘系统稳定运行，必须在充分考虑各种影响因素的基础上，选择合适的设计参数和运行策略，以保证布袋式除尘器的高效运行，满足烟气排放标准。以下对影响除尘器稳定性的因素做了详细的分析。

5.1.2.1 影响因素

（一）袋式除尘器滤袋的阻力

袋式除尘器滤袋的阻力即滤袋前后测点的差压，用 P_f 表示。它与烟气湿度、滤袋材质、过滤速度等因素有关。

袋式除尘器滤袋的阻力 P_f 的公式表示为：

$$P_f = fuv$$

P_f 单位为 Pa ，一般为 $50 \sim 100 Pa$ 。式中 f 为滤料的阻力系数， u 为气体的粘性系数， v 为过滤风速。

烟气湿度会影响到灰是否粘结在滤袋表面并堵袋；不同的滤料具有不同的滤料的阻力系数，阻力小意味着空隙大，粉尘易穿透，除尘效率也随之降低；随着过滤风速的增大，阻力呈上升趋势。

袋式除尘器滤袋的阻力 P_f 与除尘器设备阻力 P_c 、沉积粉尘层的阻力 P_d 相加得到通道出入口的总阻力 P 。即

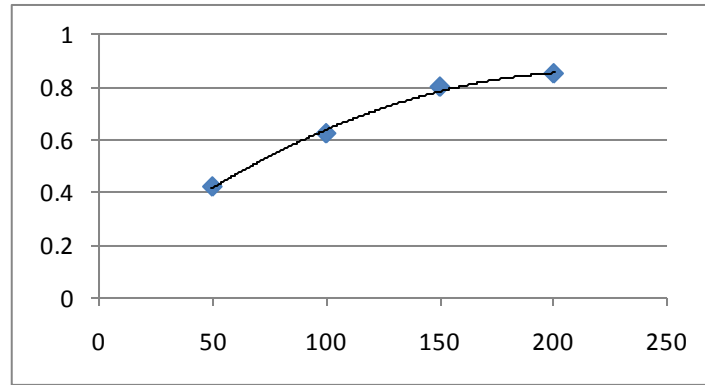
$$P = P_f + P_c + P_d$$

一般袋式除尘器运行规定的总阻力 P 在 $2000Pa$ 以内，符合国家标准(HJ/T 330-2006)，但在这种情况下除尘效果没有达到最佳，并造成引风机电耗增加，甚至可能引起引风机抢风失速，影响机组安全。另外，在袋式除尘器的运行过程中， P 过大时会造成理想排出浓度降低，进而影响理论排出浓度及袋式除尘器的工作稳定性，因此袋式除尘器的总阻力应控制在 $1000Pa$ 左右。特别的， P_f 过大时会导致布袋的损坏加剧。因除尘器设备

阻力 P_c 、沉积粉尘层的阻力 P_d 受除尘器进气烟尘中颗粒粒径大小、烟气温度、除尘器自身结构等方面的影响，此处只考虑袋式除尘器滤袋的阻力对理论排出浓度的影响，另两个阻力影响的根本原因将在下文叙述。

现可知焚烧厂 1 号炉和 2 号炉的化学处理方式均为 PTFE 覆膜处理，根据文献中的数据可知，此化学处理方式下，理想排出浓度(mg/m^3)与除尘器滤袋的阻力(Pa)的关系如

下图所示（假设进口排出浓度为 $50 mg/m^3$ ）：

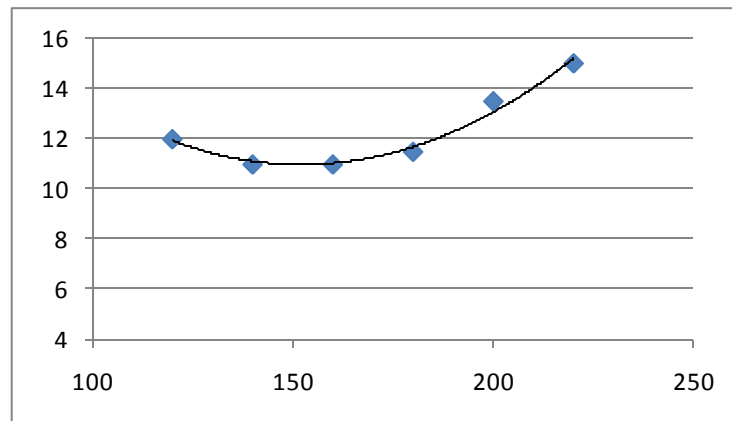


(理想排出浓度与除尘器滤袋的阻力关系曲线图)

(二) 烟气温度

适应烟气温度低，绝大部分滤袋不能耐高温，较好的滤袋材料可以耐受 180~200 摄氏度，有的滤料要求甚至低于 120 摄氏度。一般来说，进气的烟温严格控制在 130~220℃ 之间，温度低于 130 摄氏度容易造成烟气结露，粉尘吸附在布袋上不易脱落，造成糊袋，严重影响除尘效果；超过 220℃ 容易造成布袋损伤，大大减少布袋的使用寿命。综合整个生产工艺来看，一般烟气进口温度控制在 160~185℃ 之间，有利于布袋除尘器长期稳定运行。

根据文献，若不考虑温度对布袋的破损，仅考虑温度对理想排出浓度的影响，经数据处理，我们可以得到以下理想排出浓度(mg/m^3)与烟气温度(℃)的关系(假设进口排出浓度为 $50 mg/m^3$)：

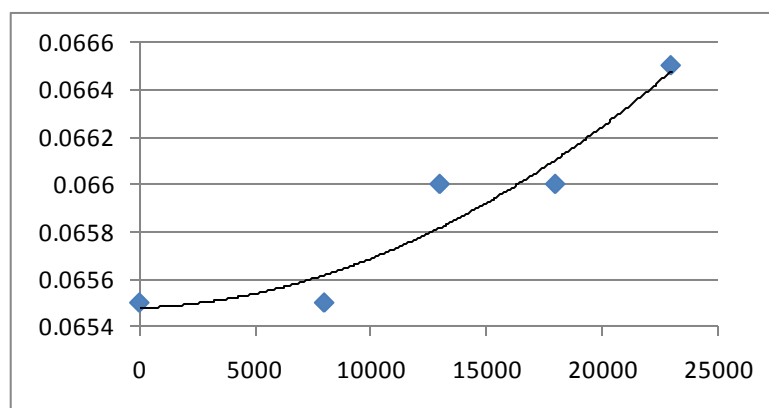


(理想排出浓度与烟气温度的关系曲线图)

(三) 烟道和本体漏风

漏风导致飞灰结块，造成布袋堵塞，且影响飞灰的输送效果。或导致烟气结露，冷析出酸性液体，加重布袋腐蚀。漏风导致排放气体中的氧含量增高，从而使得烟气污染物折算值变高，影响除尘效率。

根据文献中的数据，我们可以得到理想排出浓度(mg/m^3)与漏风量(m^3/h)的关系(假设进口排出浓度为 $50 mg/m^3$)：

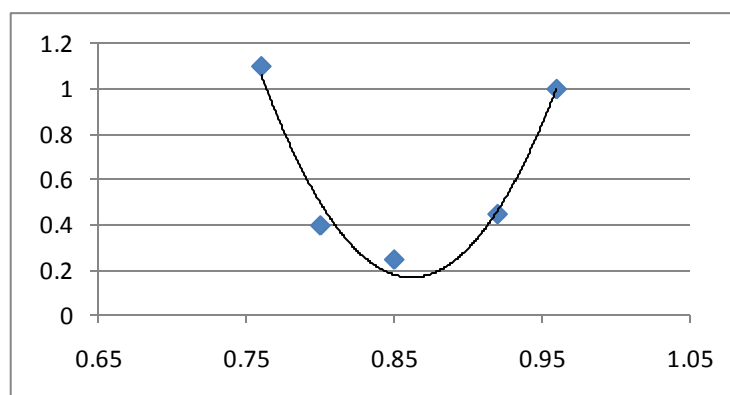


(理想排出浓度与漏风量的关系曲线图)

(四) 气布比

气布比是单位面积滤料处理的烟气量，气布比值选的太高，设计的布袋除尘器的体积小，造价低，运行阻力大，清灰频繁，粉尘颗粒容易嵌入滤料内部，大大地缩短了布袋的使用寿命，影响布袋除尘器的正常运行。相反，气布比值选的太低也不适合，设计的布袋除尘器造价明显增加，带来的经济效益不太大。另外，不同的清灰方式，因其清灰的特点不同而必须选用不同的气布比。

根据文献中的数据，我们可以得到理想排出浓度(mg/m^3)与气布比($(m^3/min)/m^2$)的关系（假设进口排出浓度为 $50 mg/m^3$ ）：



(五) 其他因素

- (1) 布袋间的距离过小造成布袋间碰撞磨损或是笼骨弯曲、笼骨与布袋底部间隙过小等造成的布袋与笼骨间的碰撞磨损；
- (2) 喷吹管喷嘴与布袋口的中心偏差，使喷吹管喷出气流直接冲刷布袋上段而产生磨损；
- (3) 布袋清洗太频繁或喷吹压力过高会加速布袋的磨损；
- (4) 运营中由于输灰系统故障的原因，刀子除尘器飞回清理不及时，导致实际排出浓度上升；
- (5) 烟尘中颗粒粒径大小亦会影响除尘效率。袋式除尘器对烟尘中颗粒的捕捉，主要是拦截和扩散效应的共同作用的结果。大粒径的颗粒主要受拦截效应的控制而被捕集下来，小粒径的颗粒则主要靠布朗随机扩散运动的作用而沉积下来。由实验

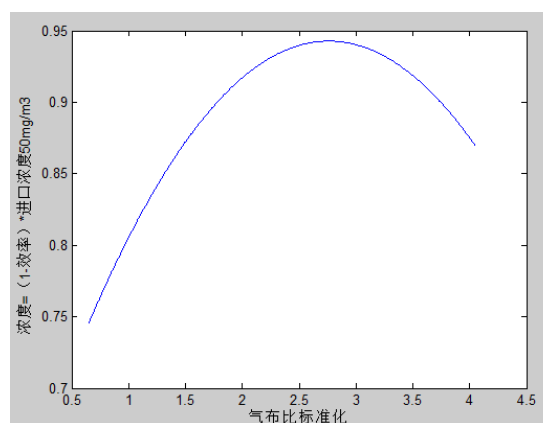
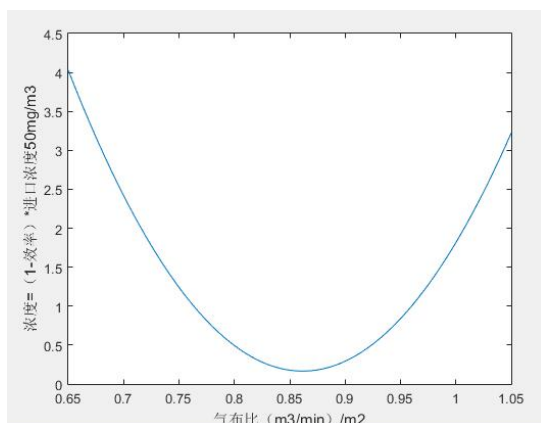
可知，粒径在 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 范围内的颗粒过滤效率最低，主要是由于该范围内的颗粒的扩散作用不够剧烈，又与气流的拖曳作用相互影响，从而影响了两种效应作用下的颗粒捕集效果。烟尘中颗粒粒径大小对滤袋捕集效率的影响进而造成了对除尘效率的影响。

5.1.2.2 浓度曲线的线性最小二乘法的建立

(一) 线性最小二乘法

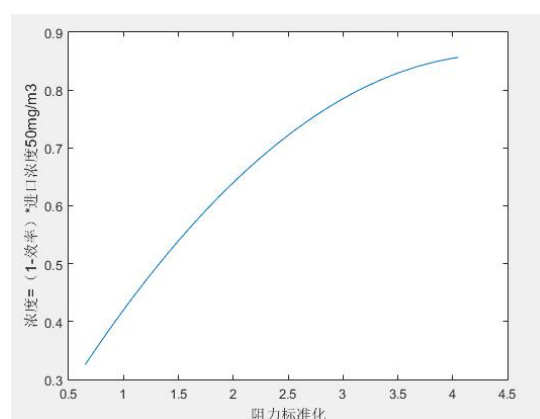
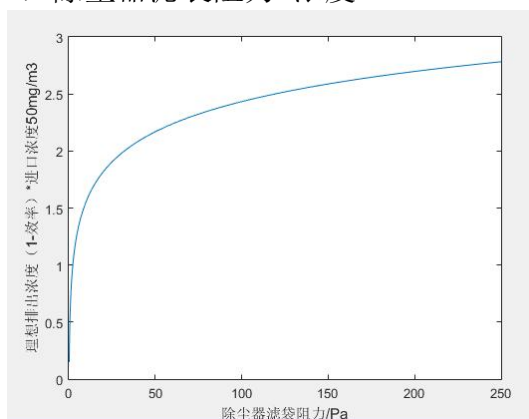
根据已知数据分别画出浓度-参数函数图象并将其标准化得到新的图象；

(1) 气布比-浓度



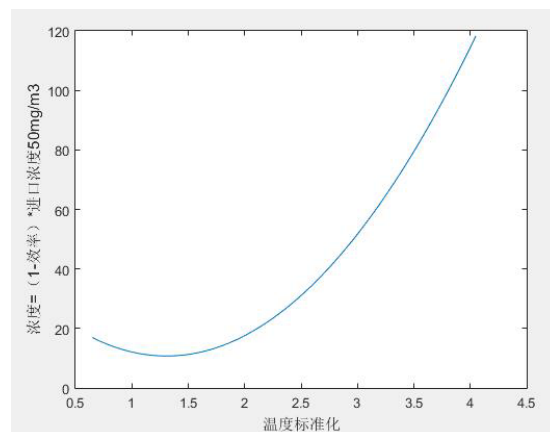
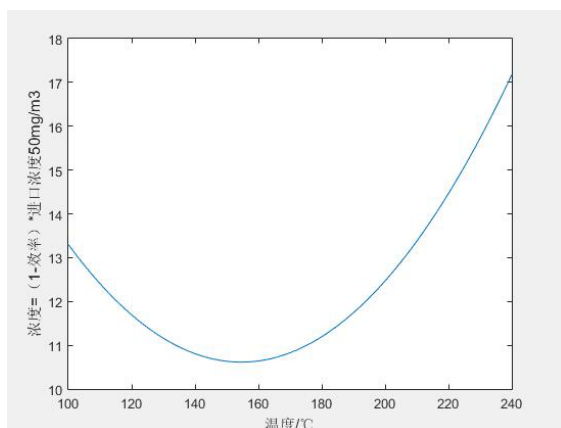
浓度	0.76	0.8	0.85	0.92	0.96
效率	97.8%	99.2%	99.5%	99.1%	98%
气布比	1.1	0.4	0.25	0.45	1
标准化	4.4	1.6	1	1.8	4

(2) 除尘器滤袋阻力-浓度



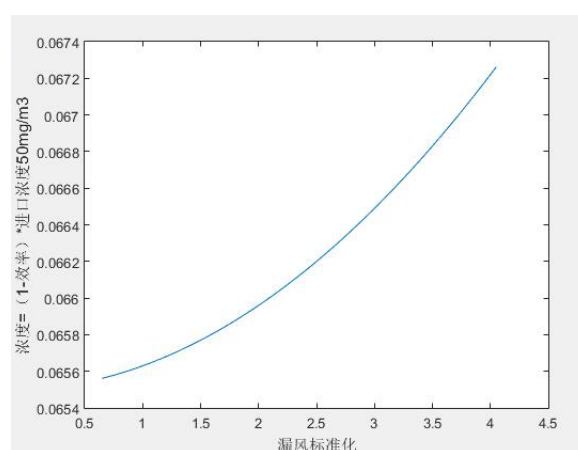
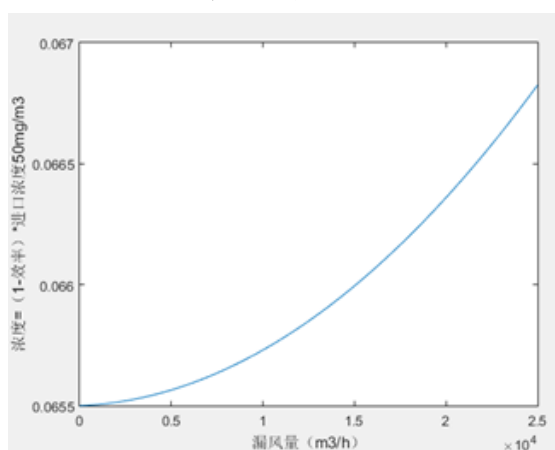
浓度	0.425	0.625	0.8	0.85
效率	99.15%	98.75%	98.4%	98.3%
阻力	50	100	150	200
标准化	1	2	3	4

(3) 烟气温度-浓度



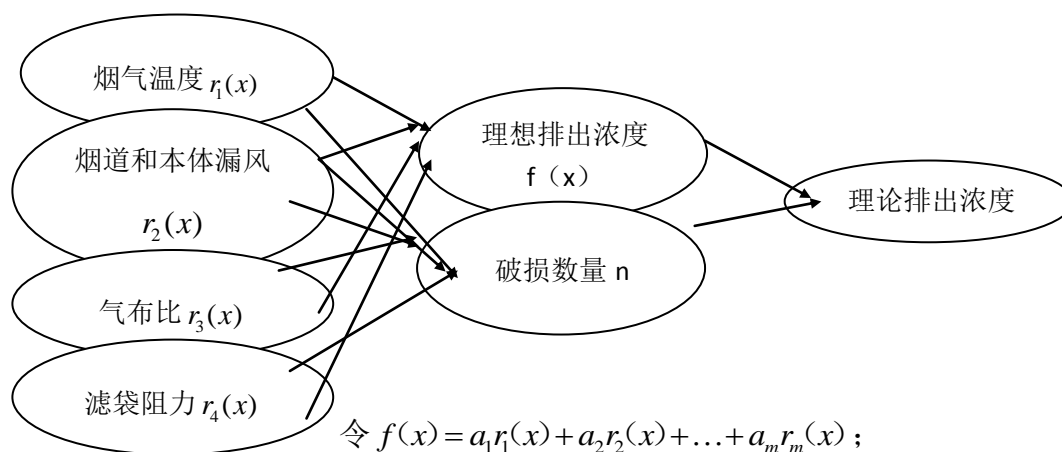
浓度	12	11	11	11.5	13.5	15
效率	76%	78%	78%	77%	73%	70%
温度	120	140	160	180	200	220
标准化	1	1.67	1.33	1.5	1.67	1.83

(4) 烟道和本体漏风



浓度	0.0655	0.0655	0.066	0.066	0.0665
效率	99.869%	99.869%	99.868%	99.868%	99.867%
漏风量	0	8000	13000	18000	23000
标准化	0	1	1.625	2.25	2.875

我们的目标是寻求一个函数（曲线） $y = f(x)$ ，使 $f(x)$ 在某种准则下与所有数据点最为接近，即曲线拟合的最好。



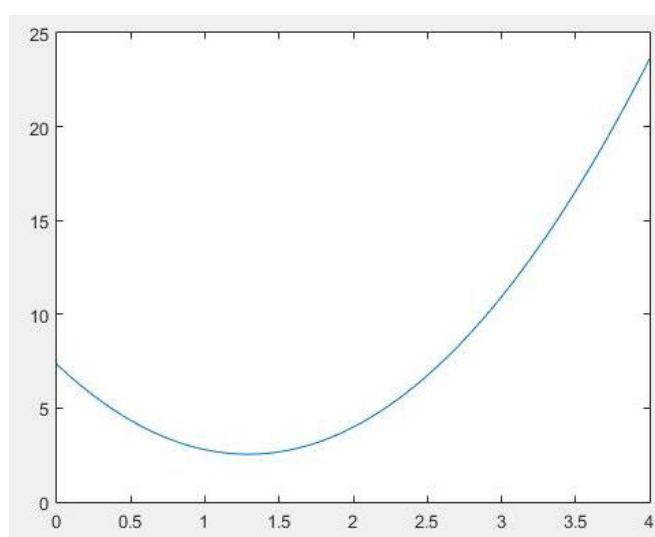
$r_k(x)$ 是事先选定的一组线性无关的函数， a_k 是待定系数（ $k=1, 2, \dots, m < n$ ）。

拟合准则是使 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与 $f(x_i)$ 的距离 δ_i 的平方和最小，称为最小二乘准则。

根据不同因素所占的效率，我们得出

a_1	26.4784%
a_2	26.4972%
a_3	20.2191%
a_4	26.8053%

由此，我们得出在四种因素综合影响下的浓度-因素图象。

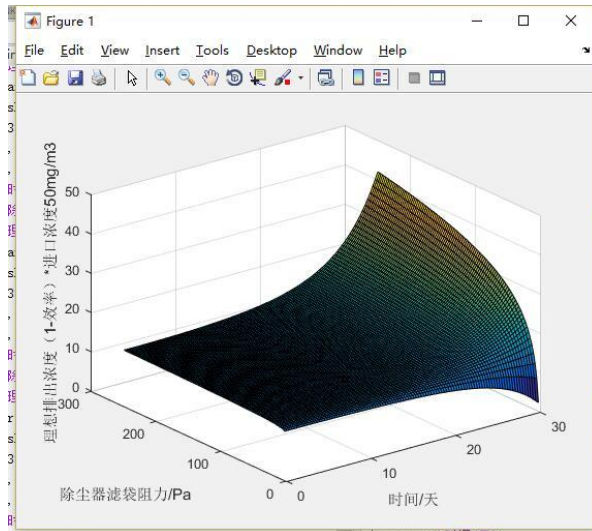


由图像可知，当标准值为 1.2911784 时，排出浓度最小，此时对应的最优参数分别是

阻力	64.5589205
气布比	0.3227946
温度	154.941409
漏风量	10329.4273

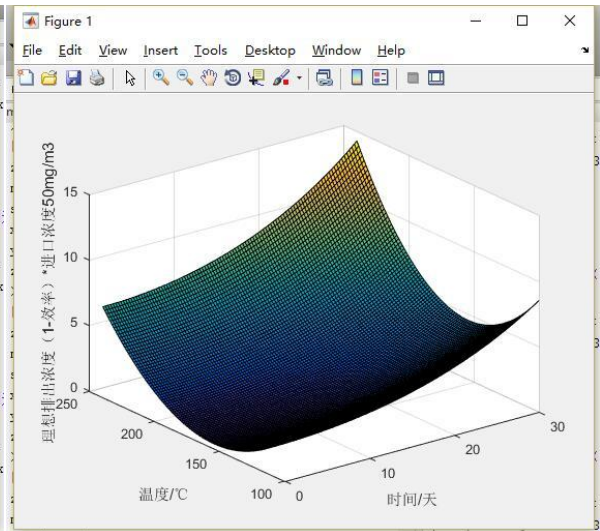
5.1.3 模型分析结果

(一) 袋式除尘器滤袋的阻力

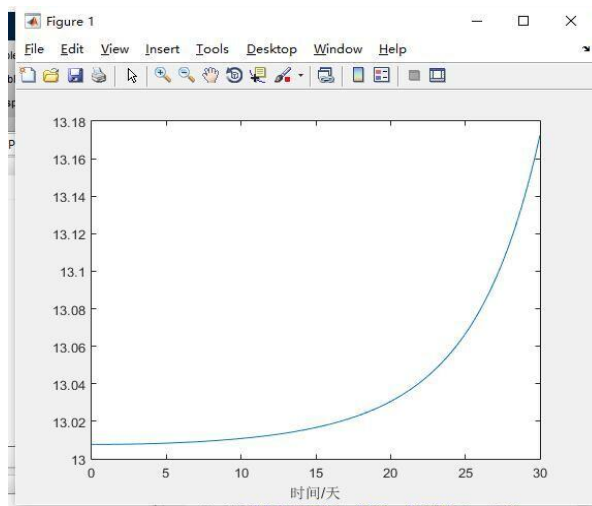


当阻力=64.5589205 Pa 时

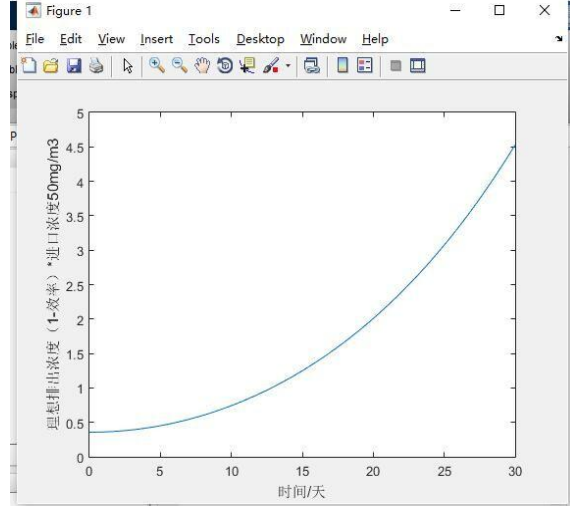
(二) 烟气温度



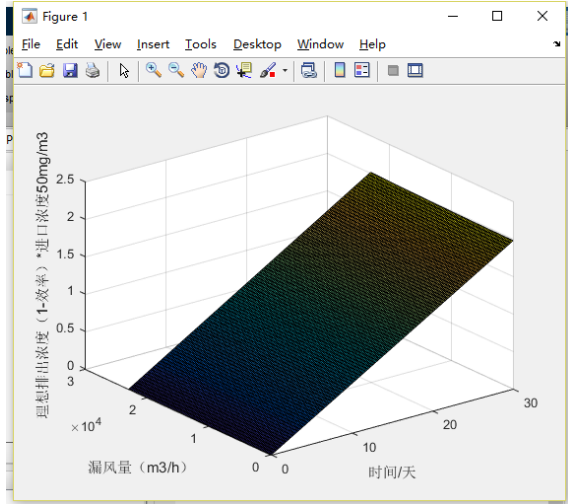
当烟气温度=154.941409 摄氏度时



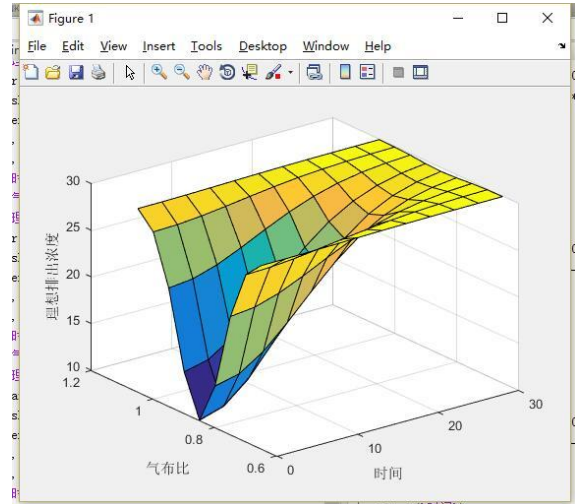
(三) 烟道和本体漏风



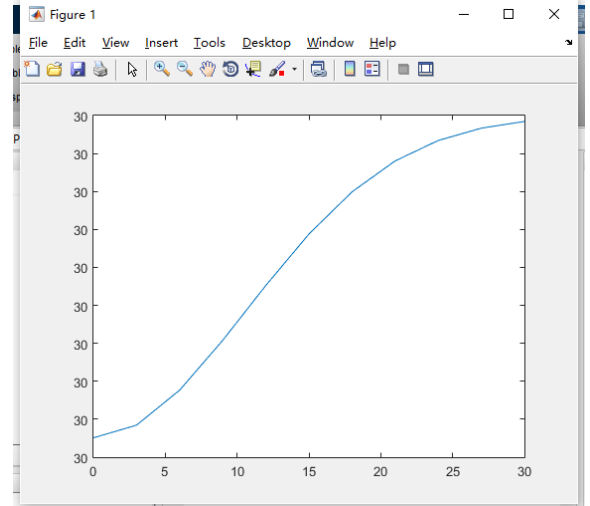
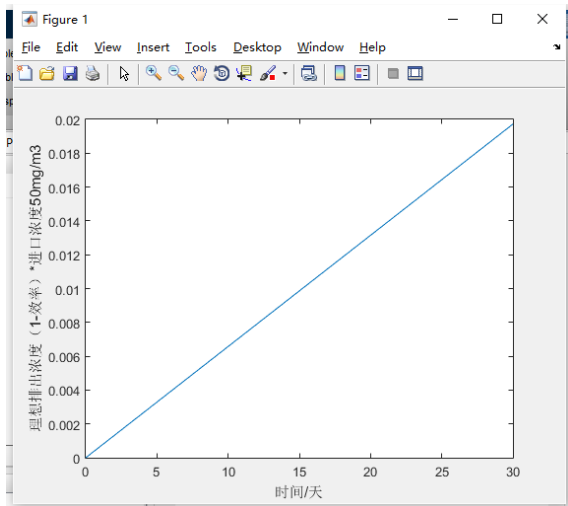
(四) 气布比



当漏风量为 10329.4273 时



当气布比为 0.3227946 时



(五) 综合分析—得到一张浓度-时间图

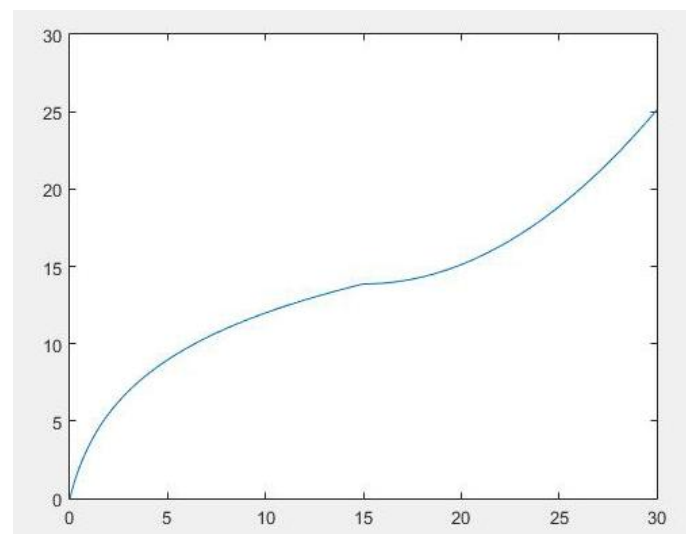
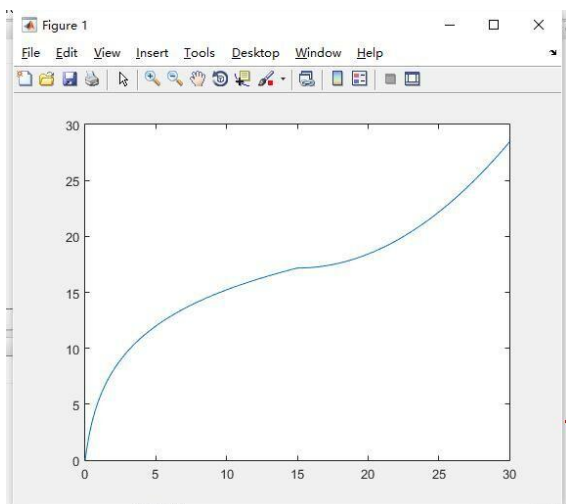
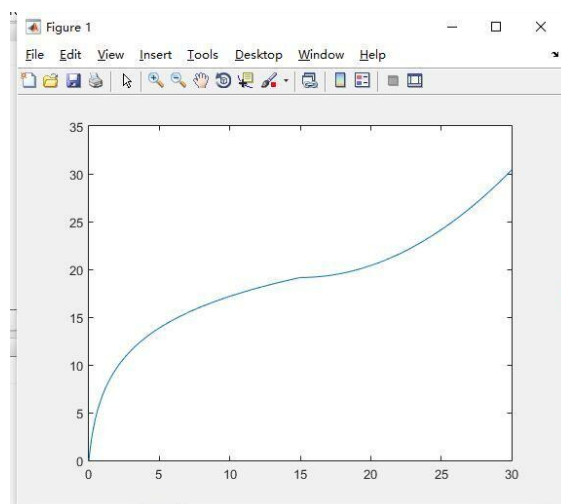


图 (5.3)

(六) 同理, 可得出 1#和 2#炉的浓度-时间图



1#理想排放浓度随时间变化的图像
图 (5.1)



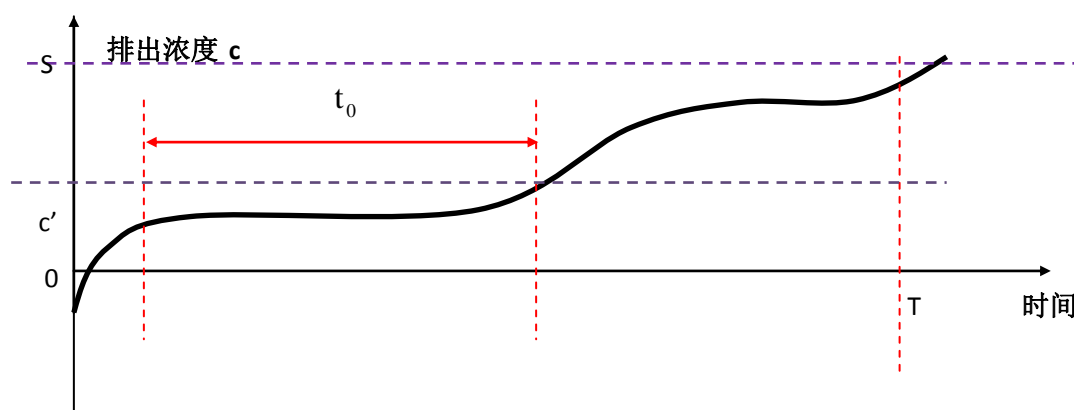
2#理想排放浓度随时间变化的图像
图 (5.2)

5.2 布袋式除尘器稳定性的灰色理论模型

5.2.1 模型的假设

1. 假设布袋从刚开始工作到达到国标限定排放量为一个周期 T
2. 假设炉的理论排出浓度为 c' ，炉的理想排出浓度为 Q_l ，国标排出浓度为 S ，排出浓度 c 满足 $\frac{|c - c'|}{c} < \varepsilon$ 的时间为 t_0 ，并定义为有效工作时长，其中 ε 取 5%。

度 c 满足 $\frac{|c - c'|}{c} < \varepsilon$ 的时间为 t_0 ，并定义为有效工作时长，其中 ε 取 5%。



5.2.2 模型的建立

灰色系统理论认为一切随机量都是在一定范围内、一定时段上变化的灰色量和灰过程，对于灰色量的处理不是寻求它的统计规律和概率分布，而是将杂乱无章的原始数据列通过一定的方法处理，变成比较有规律的时间序列数据，再建立灰色动态 GM 模型，利用灰色动态 GM 模型，对系统的时间序列进行数量大小的预测，即对系统的主行为特征量或某项指标发展变化到未来一定时刻出现的数值进行预测。影响布袋式除尘器稳定性的各因素之间的关系难以准确描述，因此适合采用灰色系统理论对其进行分析。

(一) 对总排出浓度的关联度进行分析：

- (1) 评价标准为一个周期内的有效工作时长，评价对象有 2 个，评价指标有 5 个。

(2) 选取参考数列为 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, 5\}$ ，其中 k 表示时刻；

比较数列为 $x_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, 5\}, i=1, 2$ ；

(3) 给定数列 $x = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ ，称 $\bar{x} = (1, \frac{x(2)}{x(1)}, \dots, \frac{x(5)}{x(1)})$ 为原始数列 x 的初始化数列。

$$(4) \quad \xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_o(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_o(k) - x_i(k)|}{|x_o(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_o(k) - x_i(k)|} \quad (2.1)$$

为比较数列 x_i 对参考数列 x_0 在 k 时刻上的关联系数，其中 $\rho \in [0, +\infty)$ 为分辨系数；

一般来讲， $\rho \in [0, 1]$ ，由式 (2.1) 易看出， ρ 越大，分辨率越大； ρ 越小，分辨率越小。

(5) 称 $\min_i \min_k |x_o(k) - x_i(k)|$ 、 $\max_i \max_k |x_o(k) - x_i(k)|$ 分别为两级最小差和两级最大差。

$$(6) \quad r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad \text{为数列 } x_i \text{ 对参考数列 } x_0 \text{ 的关联度} \quad (2.2)$$

通过对附件一种表三、表四的综合分析，获得 1#炉每隔 0、1、14、29 天情况下的理论排出浓度及理想排出浓度和更换数量的时间序列资料。

1#炉				
间隔天数	0	1	14	29
理论排出浓度 x_0	6.3	6.4	11.1	16.5
理想排出浓度 x_1	6.05	6.15	7	8.3
更换数量 x_2	1	2	2	4

表 (2.1)

在计算关联度之前，需要对表 (2.1) 的各个数据作初始化处理，使得表中数据无量纲且所有数列有公共交点。

表 (2.2) 是标准化处理后得到的数据：

间隔天数	0	1	14	29
理论排出浓度 x_0	1	0.984375	0.567568	0.381818

理想排出浓度 x_1	1	0.98374	0.864286	0.728916
更换数量 x_2	1	0.5	0.5	0.25

表 (2.2)

取 $\rho=0.5$ ，分别计算两个比较数列与参考数列的差值，可得表 (2.3)

表 (2.3)

间隔天数	0	1	14	29
$ x_1 - x_0 $	0	0.000635	0.296718	0.347097
$ x_2 - x_0 $	0	0.484375	0.067568	0.131818

表 (2.3)

则两级最小差为 0，两级最大差为 0.484375；

根据式 (2.2) 可计算出 x_1 、 x_2 的关联度，即表 (2.4)

间隔天数	0	1	14	29	关联度 r_i
理想排出浓度 x_1	1	0.997384	0.449406	0.410985	0.714444
更换数量 x_2	1	0.333333	0.781868	0.64755	0.690688

表 (2.4)

按照同样的计算方法可得 2# 炉的关联度。

通过对附件一种表三、表四的综合分析，获得 1# 炉每隔 0、3、4、14、29 天情况下的理论排出浓度及理想排出浓度和更换数量的时间序列资料。

2# 炉

间隔天数	0	3	4	14	29
理论排出浓度 x_0	11.07	15.36	15.47	17.21	19.32
理想排出浓度 x_1	8.2	8.8	9.11	10.2	11
更换数量 x_2	4	6	8	19	22

表 (2.5)

标准化后得到的数据：

间隔天数	0	3	4	14	29
理论排出浓度 x_0	1	0.720703	0.715579	0.643231	0.572981
理想排出浓度	1	0.931818	0.90011	0.803922	0.745455

x_1					
更换数量 x_2	1	0.666667	0.5	0.210526	0.181818

表 (2.6)

取 $\rho=0.5$ ，分别计算两个比较数列与参考数列的差值，可得表 (2.7)

间隔天数	0	3	4	14	29
$ x_1 - x_0 $	0	0.211115	0.184531	0.160691	0.172473
$ x_2 - x_0 $	0	0.054036	0.215579	0.432704	0.391163

表 (2.7)

则两级最小差为 0，两级最大差为 0.432704；

间隔天数	0	3	4	14	29	关联度 r_i
理想排出浓度 x_1	1	0.506126	0.539689	0.573813	0.556425	0.63521
更换数量 x_2	1	0.800153	0.500896	0.333333	0.356126	0.598102

表 (2.8)

5.2.3 模型分析结果

由此得出理想排出浓度和更换数量所占的权重为

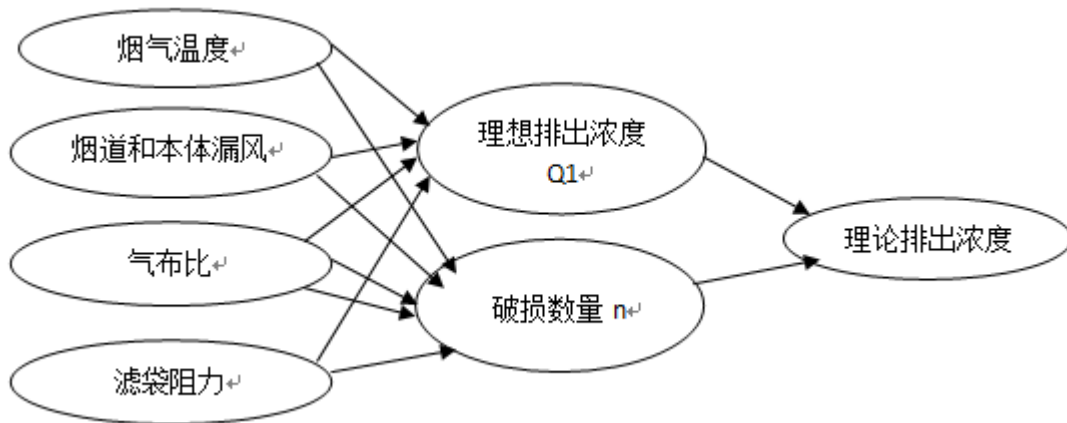
$$\eta_1 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \times 100\% = 51.504404\%$$

$$\eta_2 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \times 100\% = 48.495596\%$$

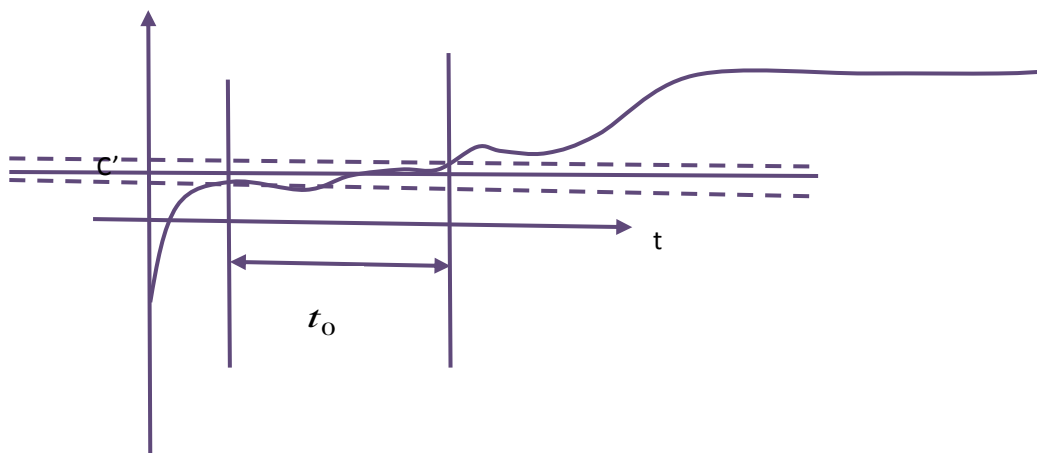
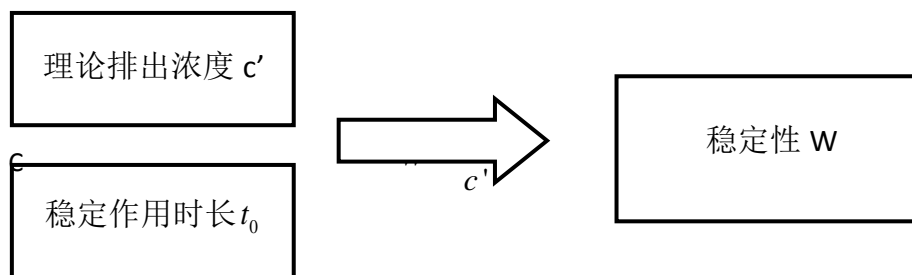
六. 问题的求解

1. 问题一的求解

(1) 理论排出浓度的影响因素



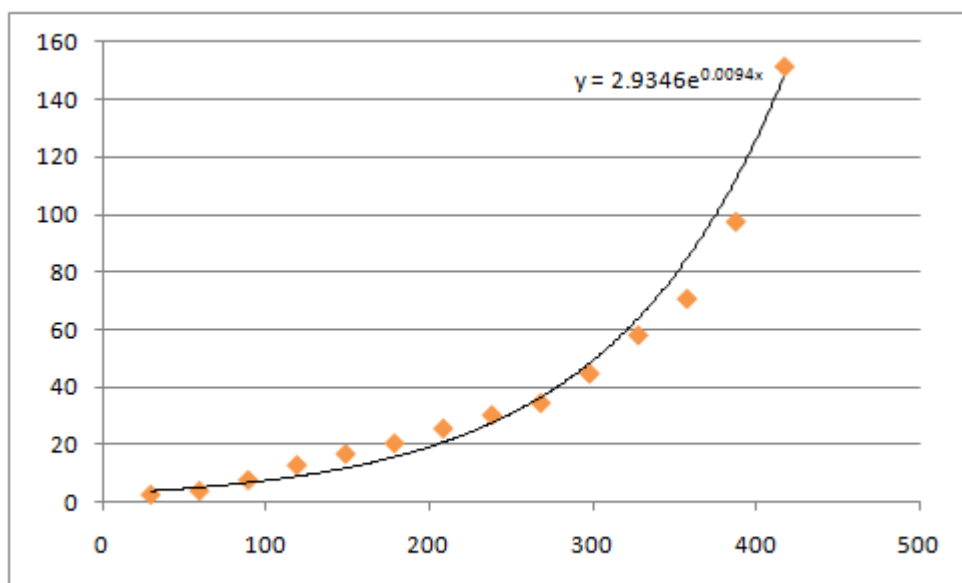
(2) 稳定性的评判标准



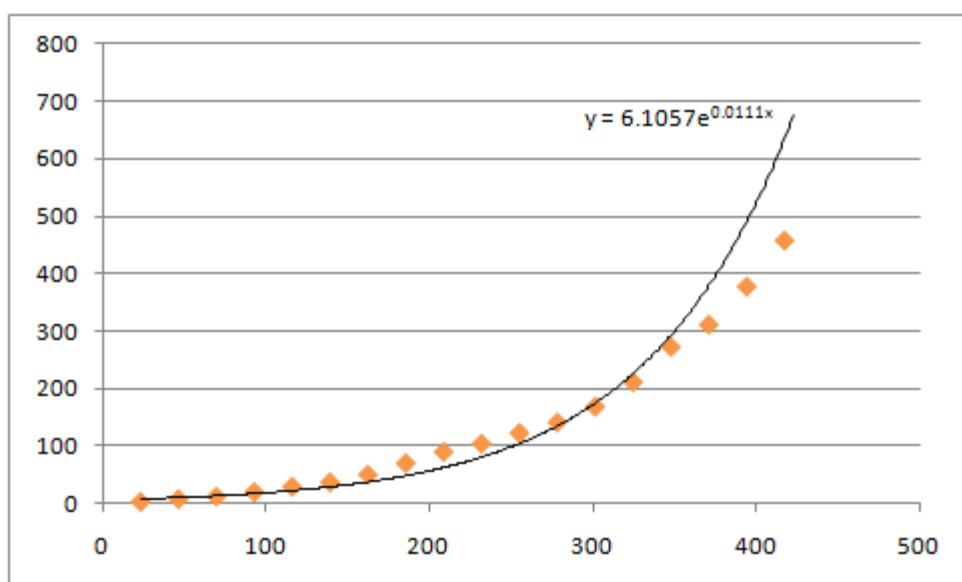
注：图中虚线表示允许上下浮动的范围

(2) 1#和 2#炉的稳定性分析

结合题中所给表三、表四数据分析可知 1#炉和 2#炉的破损数量导致的排出浓度的增加量与时间之间的函数图象及其表达式

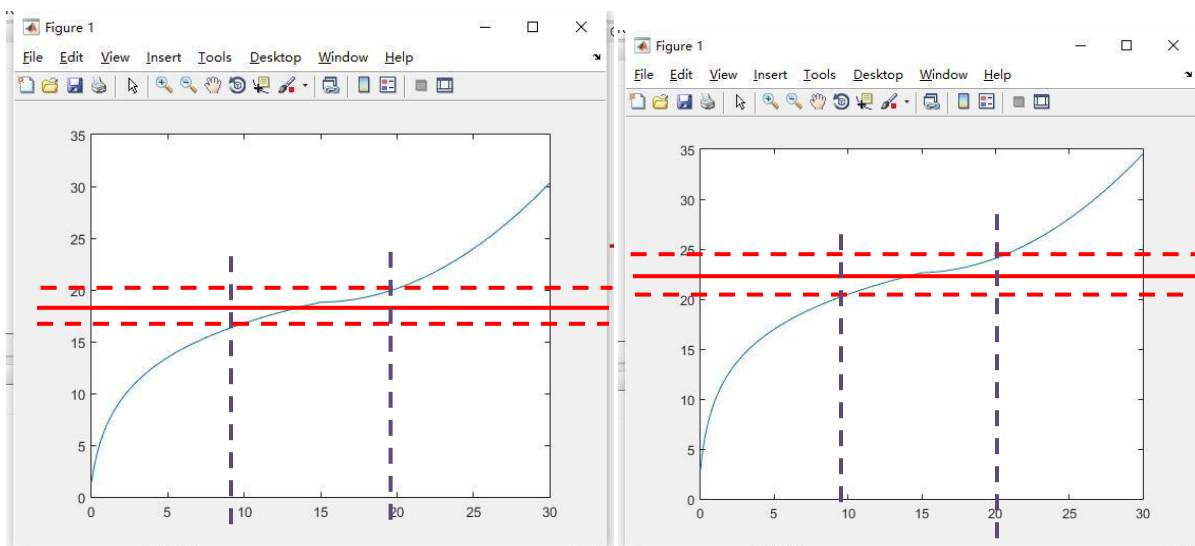


1#炉因布袋破损较理想排出浓度增加的浓度 (mg/m³) 与时间 (天) 的拟合曲线
图 (6.1)



2#炉因布袋破损较理想排出浓度增加的浓度 (mg/m³) 与时间 (天) 的拟合曲线
图 (6.2)

根据图 (5.1) 和图 (6.1) 得出 1#炉的理论排出浓度随时间变化的图像
根据图 (5.2) 和图 (6.2) 得出 2#炉的理论排出浓度随时间变化的图像



1#炉的理论排出浓度随时间变化的图象

2#炉的理论排出浓度随时间变化的图象

	理论排出浓度 c'	有效作用时长 t_0	稳定性 W
1#	18	11	0.61
2#	22.5	11	0.49

从表中数据可知，1#炉的稳定性比二号炉的稳定性好。

$$\text{由 } P_y = \frac{\rho v_{\text{排}}^2}{2}$$

代入 1#炉出口负压 2900Pa，可得烟气从排放口排出的速度为 2.12m/s。

$$\text{由 } Q(t) = c(t) \cdot v_{\text{排}} \pi r^2$$

$$\text{可得 } Q(t) = 26.63 c(t)$$

随仓室数量 N 的增加，将高峰平均分布在整個周期內得到的总源强最平稳，每个小峰值位于一个周期即 30 天的 $30k/N$ 处 (k 取 1, 2, 3, ..., N)

设題中給定的焚燒厂周边单位面积排放总量限额即源强限额值为 A ，当 N 满足：

$$26.63 \cdot \sum_k^N c\left(\frac{30k}{N}\right) \leq A \leq 26.63 \sum_i^{N+1} c\left(\frac{30k}{N+1}\right)$$

则 N 个仓室为环境允许下扩建规模的上限。

基于分析结果，我们向政府提出的环境保护综合监测建议方案如下：

- (1) 分析理论排出浓度随时间变化的曲线可知，排出浓度随时间的增加而增加且浓度对时间的导数值有一个先减小后增大的趋势，称导数值为 0 的点为拐点，经分析可知，在此拐点后的一段时间内，排出浓度值将快速达到国标浓度值，因此，应

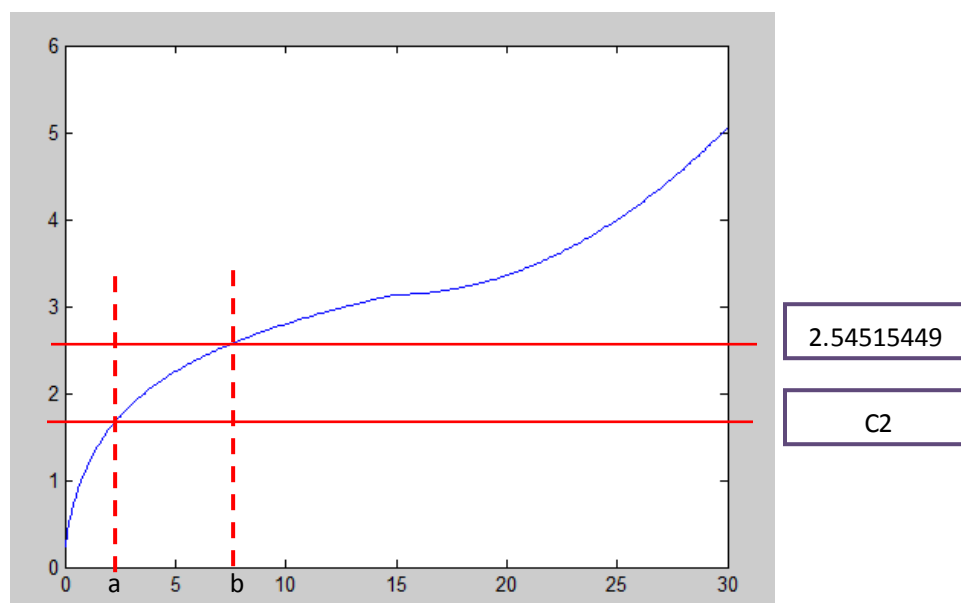
对每天的排出浓度值作监测，分析浓度随时间的变化趋势，尤其应注意拐点之后的排出浓度。

- (2) 在系统稳定的条件下，扩建规模的环境允许上限与不同仓室中的炉的周期错峰起始条件有关，只有在各个仓室平均错峰的情况下，我们得出的扩建的仓室数才是合理的。因此应在一个周期内，对所有仓室中炉的每个周期中的浓度峰值所对应的时间作纵向上的比较，保证它们的均匀分布。
- (3) 在(2)的条件下，理论上，在 $t=30k/N$ 处 (k 取 $1, 2, 3, \dots, N$)， N 个仓室的炉共同产生的浓度值、源强值均达到最大值。因此，应特别注意这些时刻的浓度值、源强值是否超标。

2. 问题二的求解

由题知，新工艺完全稳定运行、除尘效果好和排出浓度标准高。

其特性表现为在原有模型的基础上，拥有更低的排放浓度和更长的稳定作用时长，即利用已知的浓度-时间曲线，通过计算浓度降低带来的时间减少率来反映除尘模型的稳定性提升率。



根据模型 5.1 可求得最佳标准化为 1.2911784，则最佳排出浓度为 $2.54515449 \text{ mg/m}^3$ ，

其对应的时刻为 b ；假设新模型的最佳排出浓度为 c_2 ，其对应的时刻为 a ；

则稳定性的提高率为 $\frac{b-a}{b} \times 100\%$

七. 模型的评价

1. 灰色理论模型的优劣分析

题目中并没有给出大量的数据，关联度分析法可以避免无大量数据、计算量大及可能出现的反常情况等弊端。但对于给定的 ρ ，无量纲化处理不具备保序效应，所以实际

中显然不能根据 ρ 的某一特定的值或某种无量纲化处理所得到的关联度而作出定论，

因此一般关联度的数据处理方法存在缺陷。

2. 曲线拟合的最小二乘法

拟合曲线反映了实验点的变化趋势，但它并不要求它准确地通过全部实验点，这样对应于 x 的实验值 y 总有一定的误差存在。

八. 参考文献

- [1]白凤山, 么焕民, 李春玲, 沈继红, 施久玉. 数学建模[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [2]司守奎, 孙玺菁. 数学建模算法与应用[M], 国防工业出版社, 2015.
- [3]田莉. 静电除尘器运行参数优化控制方法的应用研究[D], 2005.
- [4]王学萌. 灰色系统分析及实用计算程序[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001:109-118
- [5] 袋式除尘器的性能指标—除尘效率、压力损失、过滤风速及滤料寿命, <http://www.btxlhb.net/NEWS/2093.html>, 2016.5
- [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[J]. 热力发电. 第 42 卷 第四期. 2013. 4
- [7]方鑫. 袋式除尘器过滤除尘的数值模拟研究[D]. 湖南大学. 2012. 5
- [8]娄可宾. 袋式除尘器脉冲清灰的数值模拟[D]. 2007. 1
- [9]杜柳柳. 袋式除尘器用 PTFE 复合滤料性能的试验研究[D]. 2008. 1

九. 附录

浓度-气布比-时间 三维图的建立:

```
[x,y]=meshgrid(0:3:30,0.65:0.05:1.05);  
z=30-20*exp(-(x/15).^2+(10*y-8.5).^2);  
mesh(x,y,z)  
surf(x,y,z);  
xlabel('时间');  
ylabel('气布比');  
zlabel('理想排出浓度')
```

浓度-气布比 二维图的建立:

```
x=0.65:0.005:1.05;  
y=86.223*x.^2-148.59*x+64.183;  
plot(x,y)  
xlabel('气布比 (m3/min) /m2');  
ylabel('浓度= (1-效率) *进口浓度 50mg/m3');
```

浓度-除尘器阻力-时间 三维图的建立:

```
[x,y]=meshgrid(0:0.3:30,0:2.5:250);  
z=13+(0.3815*log(y)-0.8238)*exp((x/17).^2)/100;  
mesh(x,y,z)  
surf(x,y,z);  
xlabel('时间/天');  
ylabel('除尘器滤袋阻力/Pa');
```

浓度-除尘器阻力 二维图的建立:

```
x=0:0.25:250;  
y=1.5+0.3815*log(x)-0.8238;  
plot(x,y);  
xlabel('除尘器滤袋阻力/Pa');  
ylabel('理想排出浓度 (1-效率) *进口浓度 50mg/m3')
```

浓度-温度-时间 三维图的建立:

```
[x,y]=meshgrid(0:0.3:30,100:1.4:240);  
z=(0.0009*y.^2-0.2783*y+30). *exp((x/15).^2/10)-8.129;  
mesh(x,y,z)  
surf(x,y,z);  
xlabel('时间/天');  
ylabel('温度/℃');  
zlabel('理想排出浓度 (1-效率) *进口浓度 50mg/m3')
```

浓度-温度 二维图的建立:

```
x=100:1:240;  
y=0.0009*x.^2-0.2783*x+32.129;  
plot(x,y);  
xlabel('温度/℃');  
ylabel('浓度= (1-效率) *进口浓度 50mg/m3');
```

```
plot(x,y);
```

浓度-漏风量-时间 三维图的建立:

```
[x,y]=meshgrid(0:0.3:30,0:230:23000);  
z=((2*10.^(-12)*y.^2+3*10.^(-9)*y+0.0655)*x)/100;  
mesh(x,y,z)  
surf(x,y,z);  
xlabel('时间/天');  
ylabel('漏风量 (m3/h) ');  
zlabel('理想排出浓度 (1-效率) *进口浓度 50mg/m3')
```

浓度-漏风量 二维图的建立:

```
x=0:10:25000;  
y=2*10.^(-12)*x.^2+3*10.^(-9)*x+0.0655;  
plot(x,y)  
>> xlabel('漏风量 (m3/h) ');  
>> ylabel('浓度= (1-效率) *进口浓度 50mg/m3');
```