

基于垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性 分析的数学模型



天津大学： 杨昊宇 王雨桐 赵芸溪

2016 年 8 月

目 录

摘 要	1
一、问题重述	2
二、问题背景与问题分析	2
三、模型假设与符号约定	3
3.1. 模型的假设	3
3.2. 符号说明	4
四、模型建立与讨论	5
4.1 模型一（微分方程模型）：	6
4.1.1 模型的建立	6
4.1.2 结果分析	9
4.2 模型二（Logistic 模型）：	11
4.2.1 模型的建立	11
4.2.2 结果分析	13
4.3 模型三（数值模拟模型）：	14
4.3.1 模型的建立	14
4.3.2 结果分析	15
五、问题的回答	16
六、模型的优化	18
七、模型的评价与推广	22
7.1 模型二的评价与推广	22
7.2 优化模型的评价与推广	23
八、模型的优缺点	24
九、参考文献	24
十、附录	25
10.1 附录一	25
10.2 附录二	26

基于垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行稳定性分析的 数学模型

摘要

为了研究垃圾焚烧厂布袋式除尘系统运行的稳定性,以解决问题为出发点我们主要建立了三个模型以及最后对模型进行优化。根据我们所建立的模型,可以回答问题一中影响布袋除尘系统稳定性的因素,根据模型一得到的结果可以估计焚烧厂在可接受运营成本下扩建规模的环境允许上限。模型二和模型优化可以研究系统的稳定性。

为了解决现行垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定运行的问题,我们尝试量化分析布袋除尘器运行稳定性,主要采用微分方程的方法,建立了描述垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气处理过程的微分方程的数学模型来分析影响烟尘排放总量的各项因素(模型一);建立稳定状态模型(Logistic 模型)来分析袋式除尘系统运行稳定性问题(模型二),并找到在稳定状态下能进一步提高垃圾焚烧厂处理烟尘能力的条件。通过分析处理后续给出的垃圾焚烧厂实际的运行数据,我们发现布袋除尘系统的效率是影响稳定性的关键因素,而除尘效率主要受滤料性能和除尘器内部流场的影响。在此基础上我们建议工厂可以借助 FLUENT 软件对流场进行仿真模拟,研究除尘系统总体除尘效率与其内部的流场分布的关系。通过数值模拟来探究影响除尘系统除尘效率的因素(模型三)。最后我们对已有的模型进行优化处理,基于李雅普诺夫函数利用所学知识对系统稳定性进行进一步的分析,并进行相关模型的建立并综合考虑相关因素对烟尘排放总量以及系统稳定性的影响,应用模糊综合评价法对该模型进行初步的检验,得到了比较好的结果(模型的优化)。

通过对模型的分析,若在已知垃圾焚烧厂实际运行数据的前提下,考虑工厂实际经济、技术因素对除尘系统总体除尘效率的影响,我们就可以估计焚烧厂在可接受运营成本下扩建规模的环境允许上限。根据分析结果我们给出环境保护采用重点突出监测的建议方案。若能够采用完全稳定运行、且除尘效果超过布袋除尘工艺的新型超净除尘替代工艺,根据实际数据和我们所建立的模型可以得到布袋除尘系统稳定性提升的幅度。

关键词: 微分方程求解 Logistic 模型模拟烟尘处理动态过程数值模拟 李雅普诺夫函数模糊综合评价法

一、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，随着社会对垃圾焚烧技术了解的逐步深入，民众对垃圾焚烧排放污染问题的担忧与日俱增，甚至是最新版的污染排放国标都难以满足民众对二恶英等剧毒物质排放的控制要求（例如国标允许焚烧炉每年有 60 小时的故障排放时间，而对于焚烧厂附近的居民来说这是难以接受的）。事实上，许多垃圾焚烧厂都存在“虽然排放达标，但却仍然扰民”的现象。国标控制排放量与民众环保诉求之间的落差，已成为阻碍新建垃圾焚烧厂选址落地的重要因素。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放浓度不超标，却仍然存在排放总量限额超标的问题，也会给当地的环境带来重大的恶化影响。

总之，现行垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定运行的缺陷，是致使社会公众对垃圾焚烧产生危害疑虑的主要原因。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。

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。请收集资料，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。基于你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，试分析讨论焚烧厂扩建规模的环境允许上限是多少？并基于你的分析结果，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，你的除尘模型稳定性能提升多少？

二、问题背景与问题分析

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，但是现行垃圾焚烧除尘工艺不能持续稳定运行的缺陷，是致使社会公众对垃圾焚烧产生危害疑虑的主要原因。因此，我们尝试量化分析布袋除尘器运行稳定性，在解决问题的过程中主要采用微分方程的方法，建立描述垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气处理过程的动态模型来量化分析影响烟尘排放总量的各项因素以及他们所起到的作用；建立稳定状态模型（Logistic 模型）^[1]来分析袋式除尘系统运行稳定性问题，并找到在稳定状态下能进一步提高垃圾焚烧厂处理烟尘能力的条件。

根据后续得到的运行数据，我们发现影响除尘系统稳定性的关键因素包括布袋除尘效率，因此我们进一步分析了影响布袋除尘效率的因素，并建立模型给出工厂合理化的建议。通过模型的优化我们进一步研究了布袋除尘系统的稳定性，并对我们的优化模型进行了检验，得到了较好的效果。

三、模型假设与符号约定

3.1. 模型的假设

(1) 假设垃圾焚烧厂处理垃圾是按批次处理的，我们建立模型所考虑的同批次垃圾是指处理的垃圾从放入焚烧炉中一直到全部焚烧完没有新的垃圾进入，并且以投入垃圾的高度来衡量垃圾的多少。

(2) 垃圾焚烧所产生的烟尘中存在有害物质和一部分无害物质，布袋除尘系统主要是对烟尘中的有害物质进行处理，使其含量达到国家排放标准再进行排放。

(3) 在垃圾投入垃圾焚烧炉中我们假定垃圾是均匀分布在其中的，垃圾焚烧是在焚烧炉的底部进行，烟尘从底部产生向上做扩散运动经过剩余垃圾和垃圾焚烧炉的剩余空间进入布袋除尘器，由于焚烧垃圾产生的烟尘在剩余垃圾中的穿行时的阻力作用，其速度小于在垃圾焚烧炉剩余空间的穿行速度，因此我们忽略了烟尘在垃圾焚烧炉剩余空间穿行的时间。即假定烟尘在穿过剩余垃圾后就进入了布袋除尘器中。

(4) 在烟尘处理过程中不能避免排放的烟尘未经过处理进入空气，我们不忽略它的存在，但根据工厂实际的运行，我们假设这种情况所占比例很小。

(5) 假定烟尘在垃圾焚烧炉中穿行的速度小于垃圾的焚烧速度。

(6) 假定垃圾焚烧炉中所有垃圾焚烧完后产生的烟尘中的有害物质总量中不包含空气中已存在的有害物质。

(7) 假定垃圾中的有害物质均匀分布在垃圾中。

(8) 近似假设袋式除尘器的剩余使用寿命随时间连续地、可微地变化。

(9) 假设布袋除尘器存在于一个稳定的环境中，即其磨损率与时间无关。

(10) 类比高炉煤气的干法除尘，在袋式除尘器内利用滤袋本身的织孔和滤袋外表面的粉尘层对含尘煤气进行过滤。假设滤袋本身的织孔的除尘效率与时间无关[3]。

(11) 假定不同的垃圾焚烧厂在单位时间内处理垃圾的能力相同。

(12) 在解决布袋除尘器运行稳定性问题时，我们只考虑布袋使用的时间影响布袋除尘效率对整个系统稳定性的影响，一些其他因素如烟气温度和压强设定为能够使系统达到稳定的值^[2]。

3. 2. 符号说明

l_1	垃圾焚烧厂同一批垃圾量的高度
l_2	布袋除尘器的长度
l	烟尘从燃烧开始到排放到大气中经过的总长度
M	垃圾中的有害物质含量
ω_0	垃圾中的有害物质分布的密度
a'	排放的烟尘未经过处理进入空气的数量比例
a	排放的烟尘沿着剩余垃圾进入布袋中过滤的数量比例
b	垃圾焚烧炉中剩余垃圾对烟尘中有害物质的吸收率
β	布袋对烟尘中有害物质的吸收率（单位时间内有害物质的吸收比例）
v	烟尘在垃圾焚烧炉中穿行的速度
u	垃圾焚烧速度
Q	垃圾焚烧完后产生的烟尘中的有害物质总量
t	布袋投入使用的时间
r	布袋除尘器磨损率
T	布袋除尘器容许的最大使用寿命。
m	布袋除尘器的烟尘处理总量（同一批垃圾）
L	这一批垃圾的总量

$C_{1\varepsilon}$	经验常数，其值取 1.44
$C_{2\varepsilon}$	经验常数，其值取 1.92
$C_{3\varepsilon}$	经验常数，其值取 0.09
σ_k	湍动能 κ 对应的 Prandtl 数， $\sigma_k = 0.1$
σ_ε	耗散率 ε 对应的 Prandtl 数， $\sigma_\varepsilon = 1.3$
S_k 、 s_ε	分别是用户自定义的源项，可以根据不同情况而定
μ_t	湍流涡粘系数， $\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
G_b	由浮力所引起的湍动能 κ 的产生项
Y_M	可压缩湍流中的脉动扩张项
G_κ	速度梯度所引起的应力源项， $G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} (\partial u_j / \partial x_i)$ ，经过模化后，得： $G_k = \mu_t S^2$

	其中, $S = \sqrt{2S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$
ρ	流体密度
$u_i u_j$	速度矢量
$x_i x_j$	方向矢量, 下标 i、j 代表 2 个不同的坐标方向
K_{eff}	有效导热系数
K_L	空气的层流导热系数
K_t	空气的湍流导热系数
P_r	普朗特数, 取值为 0.9~1.0

四、模型建立与讨论

对于所给问题, 我们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, 主要构建三个数学模型。

在第一个模型中我们建立描述垃圾焚烧厂袋式除尘系统烟气处理过程的动态模型。通过分析烟气处理的动态过程, 确定垃圾焚烧完后产生的烟尘中的有害物质总量与哪些因素有关, 并建立对应的数学模型与函数表达式, 从而定量分析讨论降低垃圾焚烧完后产生的烟尘中的有害物质总量的可行方法。

根据上述函数关系式, 结合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的实际指标, 我们可以计算得到单位规模的垃圾焚烧厂的烟尘排放量。再结合给定的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), 即可分析讨论得到垃圾焚烧厂扩建规模的环境允许上限。

在第二个模型中我们主要通过分析布袋的使用时间对袋式除尘系统运行稳定性的影响。研究更换布袋除尘器的动态过程, 建立稳定性模型, 研究在烟尘排放过程中, 不同动态变化因素对除尘效果稳定性的影响。根据后续给出的数据进行进一步分析。

在第三个模型中我们分析了影响布袋除尘效率的关键因素。通过分析处理后给出的垃圾焚烧厂实际的运行数据, 我们发现布袋除尘系统的效率是影响稳定性的关键因素, 而除尘效率主要受滤料性能和除尘器内部流场的影响。在此基础上我们建议工厂可以借助 **FLUENT** 软件对流场进行仿真模拟, 研究除尘系统总体除尘效率与其内部的流场分布的关系。通过搜集数据对不同的滤料进行对比, 给出工厂合理化的建议。

在模型优化中, 我们基于李雅普诺夫函数利用所学知识对系统稳定性进行进一步的分析, 并进行相关模型的建立并综合考虑相关因素对烟尘排放总量以及系统稳定性的影响, 应用模糊综合评价法对该模型进行初步的检验, 得到了比较好的结果。

4.1 模型一（微分方程模型）：

垃圾焚烧炉中所有垃圾(同一批次进入垃圾焚烧炉中的)焚烧完后产生的烟尘中的有害物质总量（不考虑空气中已存在的有害物质）为 Q , 在建立模型以得到 Q 的数量表达式之前，先根据分析一下 Q 应与哪些因素有关，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，进而考虑采用什么办法可以降低 Q 。

首先，提高布袋对烟尘中有害物质的吸收率 β 、增加布袋长度 l_2 、减少垃圾中有害物质的初始含量 M ，显然可以降低排放到空气中的有害物质总量 Q 。

其次，当烟尘中有害物质随烟尘沿着剩余垃圾进入布袋中过滤的数量比例 a 和烟尘速度 v 减少时，我们猜测 Q 也会降低。至于在假设条件中涉及的其它因素，如垃圾焚烧炉中剩余垃圾对有害物质的吸收率 b ，垃圾焚烧炉中剩余垃圾的高度 l_1 、垃圾焚烧速度 u ，对 Q 的影响不易估计。

下面通过建模对这些定性分析和提出的问题做出定量的验证和回答。

4.1.1 模型的建立

以垃圾焚烧炉底端作为坐标原点，垂直垃圾焚烧炉底端向上作为 x 轴的正半轴，建立坐标系。设 $t=0$ 时，在 $x=0$ 处开始焚烧垃圾，烟尘中的有害物质总量 Q 由有害物质穿过剩余垃圾及布袋的流量确定，有害物质穿过剩余垃圾的流量与有害物质在垃圾中的密度有关，为研究这些关系，我们定义两个基本函数：

有害物质流量 $q(x, t)$ 表示时刻 t 单位时间内通过距离原点 x 处 ($0 \leq x \leq l$) 的有害物质量；烟尘中有害物质密度 $\omega(x, t)$ 表示时刻 t 截面处单位垃圾中的有害物质含量 ($0 \leq x \leq l_1$)。由假设①可知， $\omega(x, 0) = \omega_0$ 。

如果知道了流量函数 $q(x, t)$ ，排放的有害物质量 Q 就是 $x=l$ 处的流量，在处理同一批垃圾时间内的总和。根据 l 和 u 的假设

$$Q = \int_0^T q(l, t) dt, T = \frac{l}{u} \quad (1)$$

下面分四步计算 Q 。

①求 $t=0$ 瞬间由烟尘携带的有害物质单位时间通过 x 处的数量 $q(x, 0)$ 。由假设 (5) 中关于 $v \gg u$ 的假定，我们认为，垃圾焚烧处 $x=0$ 处静止不动。

为简单起见，记 $q(x, 0) = q(x)$ ，考察 $(x, x + \Delta x)$ 一段垃圾，有害物质通过

x 和 $x+\Delta x$ 处的流量分别是 $q(x)$ 和 $q(x+\Delta x)$ ，根据守恒定律，这流量之差应该等于这一段未焚烧的垃圾或布袋对烟尘中有害物质的吸收量，于是由假设 (4)、(5)，有

$$q(x)-q(x+\Delta)=\begin{cases} bq(x)\Delta\tau, 0\leq x\leq l_1, \\ \beta q(x)\Delta\tau, l_1\leq x\leq l, \end{cases} \Delta\tau=\frac{\Delta x}{v}.$$

式中： $\Delta\tau$ 是烟尘穿过 Δx 所需时间。

令 $\Delta\tau$ 趋近于 0，得到微分方程

$$\frac{dq}{dx}=\begin{cases} -\frac{b}{v}q(x), 0\leq x\leq l_1, \\ -\frac{\beta}{v}q(x), l_1\leq x\leq l. \end{cases} \quad (2)$$

在 $x=0$ 处，焚烧的垃圾单位时间内放出的有害物质量记作 H_0 ，根据假设 (3)、(5)，可以写出方程式 (2) 的初始条件为

$$q(0)=aH_0, H_0=u\omega_0. \quad (3)$$

求解式 (2) 和 (3) 时先解出 $q(0)$ ($0\leq x\leq l_1$), 再利用 $q(x)$ 在 $x=l_1$ 处的连续性确定 $q(x)$ ($l_1\leq x\leq l$)。其结果为

$$q(x)=\begin{cases} aH_0e^{-\frac{bx}{v}}, 0\leq x\leq l_1, \\ aH_0e^{-\frac{bl_1}{v}}e^{-\frac{\beta(x-l_1)}{v}}, l_1\leq x\leq l. \end{cases} \quad (4)$$

②在垃圾焚烧的任意时刻 t ，求有害物质单位时间内通过 $x=l$ 的数量为， $q(l,t)$ 。

因为在时刻 t ，垃圾焚烧至 $x=ut$ 处，记此时燃烧的垃圾单位时间放出的有害物质量为 $H(t)$ ，则

$$H(t)=u\omega(ut,t), \quad (5)$$

根据与第①步完全相同的分析与计算，得

$$q(x,t)=\begin{cases} aH(t)e^{-\frac{b(x-ut)}{v}}, & 0 \leq x \leq l_1, \\ aH(t)e^{-\frac{b(l_1-ut)}{v}}e^{-\frac{\beta(x-l_1)}{v}}, & l_1 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (6)$$

实际上在式 (4) 中将坐标原点平移至 $x=ut$ 处即可得到式(6)。由式(5)和(6)能够直接写出

$$q(l,t)=au\omega(ut,t)e^{-\frac{b(l_1-ut)}{v}}e^{-\frac{\beta l_2}{v}}. \quad (7)$$

③确定 $\omega(ut, t)$ 。因为在垃圾焚烧过程中, 未焚烧的垃圾不断地吸收烟尘中的有害物质, 所以有害物质在垃圾中的密度 $\omega(x, t)$ 由初始值 ω_0 逐渐增加。考察未焚烧垃圾截面 x 处, Δt 时间内有害物质密度的增量 $\omega(x, t+\Delta t)-\omega(x, t)$, 根据守恒定律, 它应该等于单位长度烟尘中的有害物质被吸收的部分, 按照我们对 b 的定义和假设、(5), 有

$$\omega(x, t+\Delta t)-\omega(x, t)=b\frac{q(x, t)}{v}\Delta t,$$

令 Δt 趋近于 0, 并将式(5)和式(6)代入, 得

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{abu}{v}\omega(ut, t)e^{-\frac{b(x-ut)}{v}}, \\ \omega(x, 0) = \omega_0. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)的解为

$$\begin{cases} \omega(x, t) = \omega_0 \left[1 + \frac{a}{a'} e^{-\frac{bx}{v}} \left(e^{\frac{but}{v}} - e^{\frac{abut}{v}} \right) \right], \\ \omega(ut, t) = \frac{\omega_0}{a'} \left(1 - ae^{-\frac{a'but}{v}} \right), \end{cases} \quad (9)$$

其中 $a'=1-a$ 。

④计算 Q 。将式(9)代入(7), 得

$$q(l,t)=\frac{au\omega_0}{a'}e^{-\frac{bl_1}{v}}e^{-\frac{\beta l_2}{v}}\left(e^{-\frac{but}{v}}-ae^{-\frac{abut}{v}}\right) \quad (10)$$

最后将式(10)代入式(1)作积分，得

$$Q = \int_0^{l_1} q(l, t) dt = \frac{av\omega_0}{a'b} e^{-\frac{\beta l_2}{v}} \left(1 - e^{-\frac{a'bl_1}{v}} \right) \quad (11)$$

为了便于下面的分析，将上式化为

$$Q = aMe^{-\frac{\beta l_2}{v}} \frac{1 - e^{-\frac{a'bl_1}{v}}}{\frac{a'bl_1}{v}}, \quad (12)$$

记

$$r = \frac{a'bl_1}{v}, \phi = \frac{1 - e^{-r}}{r}, \quad (13)$$

则(12)可写为

$$Q = aMe^{-\frac{\beta l_2}{v}} \phi(r) \quad (14)$$

式(13)和式(14)是得到的最终结果，表示了排放的烟尘中有害物质质量 Q 与 a 、 M 、 β 、 l_2 、 l_1 、 v 、 b 等诸多因素之间的量化关系。

4.1.2. 结果分析

① Q 与垃圾中有害物质质量 M 、有害物质随烟尘沿着未焚烧垃圾穿行比例 a 成正比(因为 $\phi(r)$ 起的作用较小，这里忽略 $\phi(r)$ 中的 $a' = 1 - a$)。设想将有害物质 M 集中在 $x = l$ 处，则烟尘排放量为 aM 。

② 因子 $e^{-\frac{\beta l_2}{v}}$ 体现了布袋有效地减少垃圾焚烧过程中有害物质排放到大气中的数量，我们发现提高布袋过滤的吸收率 β 和增加长度 l_2 ，能够对 Q 起到负指数衰减的效果，并且 β 和 l_2 在数量上增加一定比例时起的作用相同。降低烟尘穿行速度 v ，也可减少 Q 。设想如果将有害物质 M 集中在 $x = l_1$ 处与上述建模方法类似，按照相同的计算步骤我们可以证明，垃圾焚烧厂所排放的烟尘中有害物质的量为

$$aMe^{-\frac{\beta l_2}{v}}。$$

③式中的因子 $\phi(r)$ 表示的是由于未焚烧垃圾对有害物质的吸收而起到的减少 Q 的作用。虽然被吸收的有害物质还要被焚烧，随烟尘沿垃圾穿行而部分地进入到大气中，但是因为垃圾中的有害物质密度 $\omega(x, t)$ 越来越高，所以按照固定比例跑到大气中的有害物质增多，但是考虑到工厂的实际情况， a' 是趋近于 0 的（看作无穷小），根据数学分析中的相关知识，一个有界量乘以一个无穷小量最后的结果是 0，因此从总体上来说 Q 是减少的。

根据资料 $r = \frac{a'bl_1}{v} \ll 1$ ，式 (13) $\phi(r)$ 中的 e^{-r} 取泰勒展开的前三项，得

$\phi(r) \approx 1 - \frac{r}{2}$ ，于是式 (14) 为

$$Q \approx aMe^{-\frac{\beta l_2}{v}} \left(1 - \frac{a'bl_1}{2v} \right) \quad (15)$$

根据结果可知，提高布袋吸收率 b 和增加长度 l_1 （有害物质 M 不变）对减少 Q 的作用是线性的，与 β 和 l_2 的负指数衰减作用相比，效果要小得多。

④为了更清楚地了解布袋过滤的作用，不妨比较垃圾焚烧的两种模式，一个是上述模型讨论的，另一个长度为 1，烟尘排放不经过布袋过滤直接排放到大气中的，参数与第一个相同，当焚烧到 $x = l_1$ 时就排放到大气中。

两种处理模式排放到大气中的烟尘有害物质量分别为 Q_1 和 Q_2 ， Q_1 可由式 (11) 得到，经过计算，

$$Q_2 = \frac{av\omega_0}{a'b} e^{-\frac{\beta l_2}{v}} \left(1 - e^{-\frac{a'bl_1}{v}} \right)$$

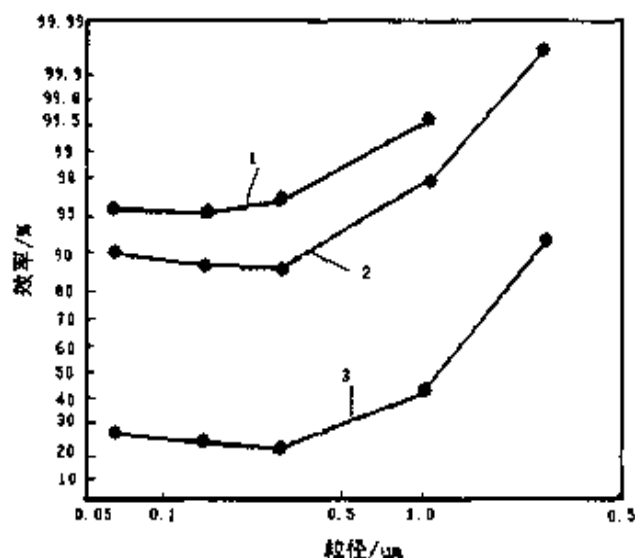
与 Q_1 相比，得到

$$\frac{Q_1}{Q_2} = e^{-\frac{(\beta-b)l_2}{v}}$$

所以显然我们得到只要 $\beta > b$ ，有 $Q_1 < Q_2$ 布袋过滤是起作用的。并且，从表达式中看出提高吸收率之差 $\beta - b$ 与加长布袋过滤长度 l_2 对于降低 $Q_1 \setminus Q_2$ 的效果大致相同。

4.2 模型二 (logistic 模型):

由下图知，袋式除尘中，粉尘层起着比滤料更重要的作用，使捕集尘的效率显著提高^[3]。随着滤料上捕集的粉尘不断增加，一部分粉尘嵌入到滤料内部，一部分附着在表面，在织孔和滤袋表面形成粉尘层。粉尘层又成为滤膜，煤气通过布袋和滤膜达到良好的净化除尘目的。当粉尘层增厚，阻力增大到一定程度时，再进行清



1—积灰的滤料；2—清灰后的滤料；3—清洁滤料

清灰强度与除尘效率的关系

灰，除掉大部分灰膜，使阻力减小到最小，再恢复。由于滤袋是纤维织造成的，过滤开始时新的滤袋上没有粉尘。假设到 t_1 时间后，粉尘层积累到一定厚度，对粉尘的捕集效率达到90%以上。

当粉尘层增厚到一定程度，阻力过大，捕集效率降低。不考虑更换布袋除尘器和清灰过程，假设到 t_2 时间后，粉尘层厚度大于 $1\mu\text{m}$ ，捕集效率下降。假设在 t_1 到 t_2 时间段内粉尘层的除尘效果与时间无关^[3]。

4.2.1 模型的建立

记时刻 t 布袋除尘器中布袋的剩余使用时间为 $x(t)$ ，我们可以得到 $x(t)$ 所满足的Logistic模型[1]：

$$\begin{cases} x'(t) = rx \left(1 - \frac{x}{T} \right) \\ x(0) = T_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 r 是布袋除尘器磨损率， T 是布袋除尘器容许的最大使用寿命。由分离变量法求得方程的解为

$$x(t) = \frac{T}{1 + e^{-rt}(T - T_0)/T_0}$$

式中有 2 个平衡点，即 $x_1 = 0, x_2 = T$

其中， x_1 是不稳定的， x_2 在正半轴内全局稳定。

我们尝试建立一个在更换布袋除尘器情况下布袋除尘器剩余使用时间遵从的方程，分析布袋式除尘器剩余使用时间稳定的条件，并且在其他影响布袋除尘系统的因素相对稳定的前提下，考虑影响布袋使用情况的因素，并进一步讨论如何更换布袋除尘器的布袋使其持续除尘效果稳定。

设单位时间内更换布袋除尘器的数量与 $(T - x(t))$ 成正比，比例系数 k 表示单位时间的更换率， k 可以进一步分解为 $k = qE$ ， E 称为更换强度，用可以控制的参数如更换布袋除尘器的设备数量来度量； q 称为更换系数，表示单位强度下的更换率。为方便取 $q = 1$ ，于是单位时间的更换量为 $h(x) = E(T - x(t))$ 。 $h(x)$ 为常数，表示一个特定的更换策略，即要求垃圾场每天只更换一定数量的布袋除尘器。这样，更换情况下布袋除尘器剩余使用时间满足方程

$$x'(t) = rx \left(1 - \frac{x}{T} \right) - E(T - x) \quad (2)$$

我们希望知道布袋除尘器的稳定使用时间和保持稳定的条件，即时间 t 足够长以后布袋除尘器 $x(t)$ 的趋向，并且由此确定最大稳定使用时间。在平衡点处有 $\frac{dx}{dt} = 0$ ，方程有三个平衡点， $x_1 = 0$ ， $x_2 = T$ ， $x_3 = \frac{E}{r}T$ 。显然，它们均是方程的解。

易知 x_3 是一正平衡点。(2) 式可改写为

$$x'(t) = rx \left[1 - \frac{1}{T}(x - x_3) \right] \quad (3)$$

由上述表达式易知，当 $0 < x < x_3$ 时， $x'(t) > 0$ ； $x > x_3$ 时， $x'(t) < 0$ ，即平衡解 x_1 是不稳定的， x_2 在正半轴内全局稳定，而 x_3 是稳定平衡解。即在更换强度 $E < r$ 的情况下，布袋除尘器的剩余使用时间将稳定在 x_3 的水平，因此单位时间内的更换量也将稳定在 Ex_3 的水平。

在考虑布袋除尘器稳定即在时间 $x_3 = \frac{E}{r}T$ 处更换布袋的条件下，我们将给出烟

尘处理总量和布袋所使用的时间以及布袋外表面的粉尘层之间的关系，有

$$m = \alpha a_1 \left(\frac{E}{r} T - t \right) + (1 - \alpha) a_2 (t - t_1)(t_2 - t) \quad (4)$$

其中， m 为烟尘处理总量， a_1 为滤袋本身的织孔（即滤料）的除尘效率， a_2 为滤袋外表面的粉尘层的除尘效率， α 为滤袋本身的织孔（即滤料）的除尘效率占布袋除尘器总除尘效率的权重。通常情况下， $t_1 < t_2 < \frac{E}{r} T$ 。

对（4）进行求解，找出使得 m 达到最大值的时间 t ，有

$$t = \frac{(1 - \alpha) a_2 (t_1 + t_2) - \alpha a_1}{2(1 - \alpha) a_2} \quad (5)$$

根据上述模型的建立与分析，我们找到了能使得袋式除尘系统运行稳定的布袋使用周期，以及布袋使用周期和烟尘处理量之间的关系。进一步我们发现，有

$$\beta = \frac{m}{L} \quad (6)$$

4.2.2 结果分析

通过上述分析稳定性的模型，我们发现在其他影响布袋除尘器系统运行的因素（如烟气进口温度、压强、布袋规格）相对稳定的情况下，垃圾焚烧厂在 $t = \frac{E}{r} T$ 时间点上更换布袋可以保证布袋除尘器系统运行的稳定性，且在

$t = \frac{(1 - \alpha) a_2 (t_1 + t_2) - \alpha a_1}{2(1 - \alpha) a_2}$ 时，布袋除尘器的除尘效率最高，根据前面我们对影响

烟尘排放量的因素模型的分析可以知道，布袋除尘器除尘效率的提高会使得在处理相同规模的垃圾时烟尘中有害物质质量降低，即处理烟尘的能力和稳定性都有了一定程度的提高。

4.3 模型三（数值模拟模型）：

根据模型一，通过分析我们发现，布袋的除尘效率是影响最后烟尘排放的关键因素，而布袋除尘器的除尘系统总体除尘效率波动对技术因素是敏感的，因此我们尝试从实际的技术条件出发，分析布袋除尘系统总体的除尘效率。由此我们

建立了模型三。

在第三个模型中，我们建立了除尘系统总体除尘效率与其内部的流场分布的关系。流场分布不均匀将会直接降低布袋的除尘过滤效率，甚至使得局部布袋过早地磨损破裂。我们列出可能存在的影响除尘系统总体除尘效率的技术因素，并借助 FLUENT 软件对流场进行仿真模拟，通过数值模拟来逐个探究除尘效率浮动对上述因素的敏感程度。

为了能够直观地模拟实际烟气的流动状态，暂时不考虑颗粒间的影响。布袋除尘器的内部流场通常特别复杂，一般假设流体具有等温不可压缩的性质，流体按定常流动，除尘滤袋没有变形来定义。

4.3.1 模型的建立

连续相求解通常采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型：

k 方程即湍流动能方程的控制方程为下面式 (1)：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\mu_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

耗散方程 (ε 方程) 为式 (2)：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\mu_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon (G_k + C_{3\varepsilon} G_b)}{K} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

湍动能耗散 ε 方程：

$$\rho \frac{\partial(\mu_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 G_\varepsilon - C_2 \rho \varepsilon^2}{K}$$

湍动能能量产生率：

$$G = \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

有效黏度：

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

能量方程：

$$\rho C_p \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$K_{eff} = K_L + K_t$$

$$\frac{K_t}{C_p} = \frac{\mu_t}{P_\gamma}$$

边界条件的设定

根据所给数据,除尘器模拟模型的边界条件设置为:系统处理总风量约为 $150000\text{m}^3/\text{h}$,布袋过滤面积约 3185m^2 ,气流过滤设计风速是 $0.78\text{m}/\text{min}$,含尘烟气温度不超过 120°C ,入口含尘浓度大于 $1\text{g}/\text{m}^3$,烟尘密度设为 $10.406\text{mg}/\text{m}^3$,气体黏度值定为 $2.36 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。模型边界使用速度入口边界条件,速度选为 $0.65\text{m}/\text{s}$;压力出口的边界条件设为静压 1500Pa ;滤袋与气流的接触边界条件采用多孔跳跃式边界,渗透率 K 为 $1.62 \times 10^{-11}\text{m}^2$,滤料厚度 Δm 的值取 2mm ,气体压强跃升系数 C_2 为 $3.44 \times 10^8\text{m}^{-1}$ 。压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,近壁区采用壁面函数法,残差精度为 10^{-4} 。

4.3.2 结果分析

根据已知信息,利用 FLUENT 软件可以对布袋除尘器内的流场进行数值模拟。该软件能够准确地模拟布袋除尘器的内部流场,从中我们可以发现,影响布袋除尘效率的一些技术因素。模拟结果将为布袋除尘器除尘效率的提高提供参考。

上述因素包括且不限于:气动阀组及控制系统的故障率;除尘器进风口位置;除尘器吸风罩结构;布袋数量;布袋间的距离;系统风量分配;烟道和本体漏风情况以及其他工况条件等。通过改变不同变量,进而分析相应的流场分布图,从而找到影响布袋除尘效率的技术因素。模拟结果将为布袋除尘器除尘效率的提高提供参考

滤料的选择

在布袋除尘系统中,滤料的选择是很重要的,它不但影响到布袋除尘器的效率和寿命,也与造价有关。决定滤料材料的因素主要有烟气的温度、湿度、含氧量、粉尘的粘附性、粉尘的化学成分等。决定使用何种滤料的非常重要的因素之一是布袋能否在除尘介质中长期(在一定的时间范围内)使用而不损坏(即布袋的使用寿命)。因此,影响滤袋寿命的因素除了滤袋的结构、制作工艺、固定方式、清灰方式运行情况等外,最主要的因素就是滤料的特性和质量。滤料特性的主要指标有透气性、密度、抗折叠性、耐磨性、断裂强度和断裂伸长、耐湿性、热收缩滤、水解稳定性等。滤料的特性决定于滤料的原材料(即原纤维)成分、编制工艺、滤料的各种处理等。

通过题目所给的数据及搜集的资料,我们整理出集中常用材料的性能,做成表格的形式给出直观的参考。

表一几种常用滤袋材料的性能比较

滤料种类	玻璃纤维	PPS (聚苯硫醚)	聚间苯二甲酰间苯二胺纤维	聚亚酰胺 (P84)	聚四氟乙烯
耐温性	长期使用 230℃ 短期耐温 280℃	长期使用 180℃ 短期耐温 200℃	长期使用 200℃ 短期耐温 220℃	长期使用 240℃ 短期耐温 260℃	长期使用 50℃ 短期耐温 300℃
抗水性	好	好	一般	良	好
抗氟性	差	一般	一般	良	好
抗酸性	良	好	良	良	好
抗氧化性	好	一般	好	好	好
价格	低	中	中	中上	高

五、问题的回答

对于问题一，如果给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额，不妨假设

限额为 G ，根据式 $Q = aMe^{-\frac{\beta l_2}{v}} \frac{1 - e^{-\frac{a'bl_1}{v}}}{\frac{a'bl_1}{v}}$ ，令 $Q=G$ ，如果能够得到工厂的实际

运行数据，利用 Matlab 可以解出 l_1 （在 $t=0$ 时， l_1 可以量化地表示垃圾焚烧厂处理同一批垃圾的数量），假设这一地区垃圾焚烧厂处理垃圾的能力相同，因此如果知道了单位时间内垃圾焚烧厂能处理垃圾的上限，就能计算出当限额为 G 时垃圾焚烧厂扩建规模的环境允许上限。

进一步根据模型三，在实际情况下，垃圾焚烧厂是有实际的运营成本的，因此垃圾焚烧厂的技术和经济条件也是有一定的限制的。在模型三中，我们可以根据垃圾焚烧厂实际的技术条件并综合影响除尘效果的关键因素，估计除尘系统除尘效率在可接受运营成本下的提升上限，从而根据排放标准给出焚烧厂扩建规模的环境允许上限的估计。

在环境保护综合监测过程中，基于我们模型的分析结果结合布袋除尘系统的稳定性，我们可以找到垃圾焚烧厂在稳定的条件下烟尘排放的最大值和相应的时间段。在这个时间段内我们实施重点监测，其主要是对垃圾焚烧厂的废气、废水的排放情况、环境安全参数（温度、压力、气体浓度、液位等）、环境污染参数（二噁英等大气排放物浓度）进行实时检测和监控，一旦发现所监控的污染源超标，能够采取一系列的报警联动机制，使得其周边环境状况得到最大程度的保障，而且采用先进的网络技术，使得垃圾焚烧厂与上级安监、环保部门间实现真正意义上的数字化集成监测和预警，从而有效地预防重大安全和环境污染事故的发生。

依据这个方案，在不影响正常工作的前提下，政府的相关部门在一定程度上不但可以缓解检测压力，还可以提高工作效率，节省一定的运营成本，实现利益均衡。

与此同时，对焚烧厂所产生的固体废物，应使用专用场所堆放，并采取有效措施防止二次环境污染及诱发次生地质灾害；应根据固体废弃物的性质、贮存场所的工程地质情况，采用完善的防渗、集排水措施，防止淋溶水污染地表水和地下水；对存放含有有毒、有害物质的废气、废液的淋浸池、贮存池、沉淀池必须制定防水、防渗漏、防流失等措施。当然，目前的污染主要在于大气污染这一重点方面。由于布袋除尘器在某种程度上无法根本性地避免对大气的污染，在工作过程中必然会排出一些有害污染气体，为此，工厂应在排放时尽量将其回收利用。在自身能力范围内尽最大程度减少污染。

环境保护与综合治理方案，目的在于大力开发利用资源，使资源优势变为经济优势的同时，推进周边环境保护与治理工作，最大限度地减少或避免因工厂运作引发的环境问题，并逐步治理之，从而保护和改善环境，促进社会经济的可持续发展。

对于问题二，在理想情况下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，那么现有布袋除尘器限制布袋除尘系统稳定性的一些因素在一定程度上就可以减弱或避免。

1、若采用固体滤料，完全克服老工艺布袋除尘器所存在的使用温度低、吸湿率高、不耐酸、除尘效率低等缺陷。根据我们的模型分析可知，滤料性能提升相应的能提高布袋对烟尘中有害物质的吸收率（单位时间内有害物质的吸收比例），从而在垃圾处理量不变的情况下排放烟尘中的有害物质会大大降低。滤料性能提升也能够增加布袋的使用寿命，从而根据 Logistic 模型，布袋除尘器的稳定性能得到提升。

2、如果新型工艺具有更高的排放标准，如二恶英 0.001 纳克，含尘量 0.1 毫克，硫化氢 0.5 毫克；目前欧洲的相关标准分别是：0.1 纳克，10 毫克，35 毫克。如果现行国标控制排放量不变，垃圾焚烧厂布袋除尘系统采用新型工艺就能更好的符合国家排放标准，降低排放超标的可能性，更好的满足民众环保诉求。根据我国实际情况可知，阻碍国标进一步提升的主要问题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，如果采用新型的工艺，在排放的有害物质浓度降低的同时国家相关部门可以考虑提高国家对大气污染物的排放标准，消除社会公众对垃圾焚烧产生危害的疑虑。

3、新型布袋除尘工艺具有低成本、新技术对老工艺的替代在原有工厂不作设计修改即可实现、投入的技改成本在短期内即可收回等特点，这可以使垃圾焚烧厂的运营成本降低，收益提高，从而新型工艺能够在更大的范围内得到推广，它的一些理化性质有助于提升布袋除尘系统的稳定性，逐渐杜绝垃圾焚烧厂存在的“虽然排放达标，但却仍然扰民”的现象。

六、模型的优化（针对布袋除尘系统的稳定性）

6.1 符号说明

X_1	堵塞因素
X_2	气流撕裂因素
X_3	腐蚀氧化因素
X_4	高温破坏因素
X_5	机械摩擦因素
$C(t)$	净化气流浓度
t	系统的不稳定时间
W	系统稳定性
$ C_1 - C_2 $	单位时间内浓度的差值
$f_{(n)X_n}$	表示影响因素 X_n 在单位时间内对 $ C_1 - C_2 $ 的影响
A_1	一个布袋对排放总量的影响
$A_{总}$	整个气体收到的影响

6.2 模型的建立

根据题目要求，我们综合各项因素，分析稳定性问题的模型建立如下：
首先定义Y的数学式子为：

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \text{ ①}$$

用+来表示逻辑函数的“或”， $X_1 \sim X_5$ 的取值为0或1，Y的取值为0或1
规定当 $Y = 0$ 的时候，系统正常工作；当 $Y = 1$ 的时候，系统遭到破坏，不能正常工作。

根据式子①可知，当 $X_1 \sim X_5$ 中存在一个为1的时候，系统遭到破坏。
具体条件为：

$X_1 = 1$ ② 浓度 $C(t)$ 在 t_1 后明显出现快速下降的情况

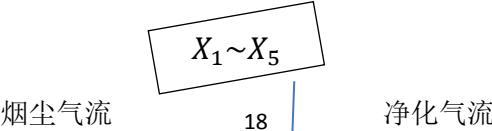
$X_1 \sim X_4 = 1$ ③ 浓度 $C(t)$ 在 t_1 后明显出现快速下降的情况

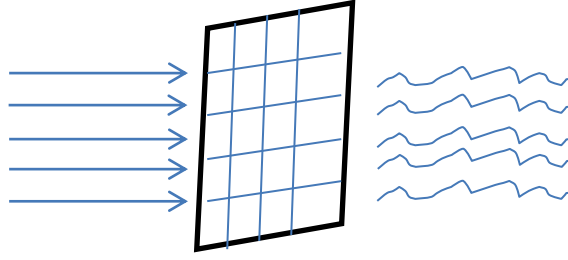
现在我们来分析系统的稳定性：

令 X_n 为系统输入， y 为系统输出，则 $y = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5$ ④

当 $X_1 \sim X_5$ 的影响使得 y 值足够大，即超出限定浓度范围，我们认为系统受到破坏。

那么，我们利用等效系统的思想，将原来系统等效为具有等效功能的简单系统，示意图如下：





图四

由上图可以明显地看出，所有的工艺问题最终可以简化成“烟尘气流”通过“布袋”，气流能否稳定产生“净化气流”的问题。

由此，我们间隔时间 t_3 ，取两次浓度 C_1 C_2 (当然，我们假设输入 $X_1 \sim X_5$ 的初始值一直没有太大变化，但却一直在对布袋造成影响)

此时， $y = X_1 t + X_2 t + X_3 t + X_4 t + X_5 t$ ⑤

当 $y \in [a, b]$ 时，认为系统处于稳定状态，由此可以看出，系统的稳定性取决于影响 $X_1 \sim X_5$ 的大小，作用的时间 t 。

在其他条件一定的情况下， C_1 与 C_2 之间的差值必定由 $y = \sum_{i=1}^5 X_i t$ 决定。可以认为，单位时间内的差值大小（ $|C_1 - C_2|$ 的值）越小，系统就越稳定。

$$y = k|C_1 - C_2| + C, C \in [a, b] \text{ ⑥}$$

取合适单位，使 k 值为1，则：

$$y = k|C_1 - C_2| + C = \sum_{i=1}^5 X_i t \text{ ⑦}$$

因此可以得出结论：

- 1) 单位时间内， $|C_1 - C_2|$ 值的大小表示系统的稳定性与否
- 2) $X_1 t \sim X_5 t$ 是影响稳定性的主要因素
- 3) 设系统的不稳定时间为 t ，则 $|C_1 - C_2|t$ 是向周边环境的多于烟尘排放量
又由 $|C_1 - C_2|t = \sum_{i=1}^5 X_i t^2$ ⑧ 可知，不稳定的系统将对环境排放更多的烟尘。

最后，我们对模型做进一步的细化具体研究（这里的简化分析首先从正常工作的情况下开始）：

$f_1(X_1)$ 表示：对系统Y，我们假定其他一切条件不变，增大布袋的堵塞性 X_1 （即逐步增加烟尘浓度）

得到， $|C_1 - C_2| - X_1$ 的函数关系： $|C_1 - C_2|_1 = f_1(X_1)$

$f_2(X_2)$ 表示：对系统Y，我们假定其他一切条件不变，增大气流流速 X_2

得到， $|C_1 - C_2| - X_2$ 的函数关系： $|C_1 - C_2|_2 = f_2(X_2)$

$f_3(X_3)$ 表示：对系统Y，我们假定其他一切条件不变，增大腐蚀氧气气流浓度 X_3

得到， $|C_1 - C_2| - X_3$ 的函数关系： $|C_1 - C_2|_3 = f_3(X_3)$

$f_4(X_4)$ 表示：对系统Y，我们假定其他一切条件不变，升高布袋所处环境温度 X_4

得到, $|C_1 - C_2| - X_4$ 的函数关系: $|C_1 - C_2|_4 = f_4(X_4)$

$f_5(X_5)$ 表示: 对系统Y, 我们假定其他一切条件不变, 增加摩擦次数(布袋破损)

X_5

得到, $|C_1 - C_2| - X_5$ 的函数关系: $|C_1 - C_2|_5 = f_5(X_5)$

现将整个除尘系统变换为五个输入与一个输出模型,

$$\text{即 } y = f(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5)$$

对这些信号, 为简化问题, 我们假定在一段时间内它们都是常数, 即对系统的输入信号不变的情况下, 研究系统输出的变化, 皆对单位面积单位时间而言。由分析计算结果得出:

对 X_1 (堵塞): 堵塞可能与露风、露水结块有关, 但总体来说, 为了拟出函数, 我们认为堵塞主要来自长期烟尘过滤, 逐渐使布袋堵塞到无法有效过滤的情况, 有 $f(X_1) = -C_1 e^{-\alpha c}$ 即烟尘堵塞在以指数形式递减, C_1 为第一次测量浓度, α 与为与烟尘初始浓度 C 相关的系数。

对 X_2 (气流对布袋的影响) $f(X_2) = C_1 + C \left(e^{\frac{1}{2} M V_{\text{气}}^2} - \frac{V}{KT} \right)$, V 为撕裂纤维所要

平均能量, K 为系数, T 为温度, C 为烟尘原始浓度, $V_{\text{气}}$ 为气流速度。

对 X_3 (腐蚀氧化) $f(X_3) = C_1 + Ca\%$ 为腐蚀气体浓度

对 X_4 (高温破坏) $f(X_4) = C_1 + \frac{T}{T_0}$ 为初始温度

对 X_5 (机械摩擦) $f(X_5) = C_1 + C(n, \mu V_{\text{气}}^2), C(n, \mu V_{\text{气}}^2)$ 为与机械摩擦相关的函数

对上述五个式子进行整理分析, 令系统稳定性为 W , $f_{(n)X_n}$ 表示影响因素 X_n 在单位时间内对 $|C_1 - C_2|$ 的影响

$$\text{定义 } W = 1 - |C_1 - C_2| / C_1 \quad (9)$$

$$|C_1 - C_2| = \sum_{i=1}^5 |C_1 - C_2|_i = \sum_{i=1}^n f_{(n)X_n} \quad (10)$$

则对于稳定性, 推理如下:

首先考虑到在微观条件下两类原理:

- 1) 大颗粒由于直接碰撞而被拦截
- 2) 小颗粒由于气体分子碰撞改变运动方向与纤维碰撞而被拦截

若要从 $X_1 \sim X_5$ 的微观层考虑, 可能很难清楚地分析可得, 但是我们只需要通过实验 $f_1(X_1) \sim f_5(X_5)$, 便可计算出结果, 或者由下述阐述也可得出。

考虑到布袋有损坏， t 的数值也将于毁坏数相关。

对于烧杯布袋，由于其占比比较大，且烧坏后若能及时更换，所以我们认为几乎每一个布袋都经历 W 由0~100%的过程。于是，在环境中的稳定性的影响，随着时间的推移，布袋过滤的能力逐步降低。

因为布袋过滤能力降低而引起 $|C_1 - C_2|$ ，乘以布袋总工作时间，便是向大气多排放的烟尘量，也就是对排放总量的影响。

则有：一个布袋对排放总量的影响（在一个周期内）为： $A_1 = \sum_{t=0}^T (C_{t/t_0} - C_0)$ 其中 C_0 为初始稳定性，即当系统在不受 $f_1(X_1) \sim f_2(X_2)$ 影响时的取值； T 为布袋一次周期内工作时间的长短； t 为布袋一次周期内的工作时间， t_0 为采样间隔，当 $t/t_0 \in Z^*$ 时取一次。

则对 n_1 个周期， n_2 个布袋而言， $A_{\text{总}} = \sum_{t=0}^T (C_{t/t_0} - C_0) (n_1 T) n_2$ 上式便是稳定性对排放总量的影响，当然只是针对单位体积而测出的浓度，再考虑整个气体： $A_{\text{总}} = \sum_{t=0}^T (C_{t/t_0} - C_0) (n_1 T) n_2 V_{t/t_0}$

综上所述，我们可得出结论：

- 1) 稳定性 在烟尘气流比较稳定的情况下，取适当的时长做时间间隔，取适当次数，取多组 $(C_i - C_0)$ 为样本。如取 i 组，则有 i 个 $(C_i - C_0)$ 的数据，则稳定性 $W = 1 - \sum_{i=1}^n (C_i - C_0) / n C_0$
- 2) 影响因素 利用 $f_1(X_1) \sim f_5(X_5)$ 这五个实验，我们可以准确得出烟尘排放量与系统因素之间的数学关系（当然与周期，喷嘴清理气流也有关系）得到如下式子：

$$\sum_{i=1}^n |C_1 - C_2|_1 = \sum_{i=1}^n f(X_1, t_n) t_0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n |C_1 - C_2|_2 = \sum_{i=1}^n f(X_2, t_n) t_0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n |C_1 - C_2|_3 = \sum_{i=1}^n f(X_3, t_n) t_0 \quad (13)$$

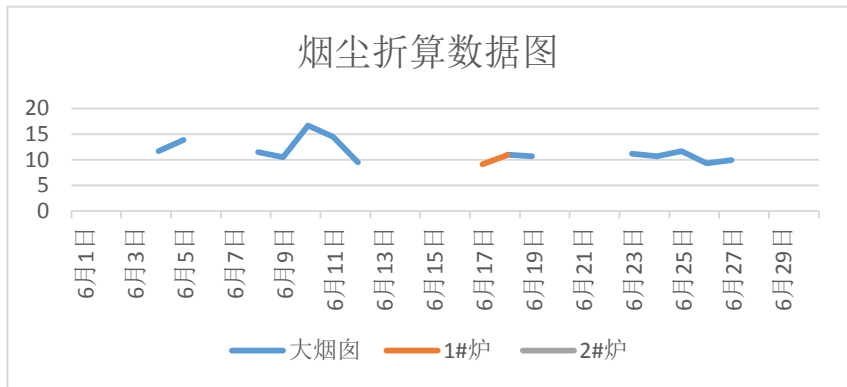
$$\sum_{i=1}^n |C_1 - C_2|_4 = \sum_{i=1}^n f(X_4, t_n) t_0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n |C_1 - C_2|_5 = \sum_{i=1}^n f(X_5, t_n) t_0 \quad (15)$$

- 3) 对总排放量的影响 利用 $A_{\text{总}} = \sum_{t=0}^T (C_{t/t_0} - C_0) (n_1 T) n_2 V_{t/t_0}$ 将其变为排放总量式 $A_{\text{总}} = \sum_{t=0}^T C_{t/t_0} (n_1 T) n_2 V_{t/t_0}$

七、模型的评价与推广

7.1 模型二的评价与推广



(具体数据见附录)

上图是2015年6月1日至2016年6月20日的崂应3012H型垃圾焚烧炉的烟尘浓度折算与时间的折线图。

由图我们可以得到，大烟囱在6月9日、11月19日有明显的峰值。一号炉在8月4日至9月25日之间出现多个峰值，10月29日至12月31日之间也出现了不大的波动，之后整体呈上升趋势，在4月26日出现最高值。二号炉在7月15日、8月24日、11月30日、12月11日、2016年4月18日、5月23日、5月26日、6月6日出现峰值，其中以5月26日的峰值最高。

而从题目所给的附件一中可以看到2015年6月1日、7月3日、7月17日二号炉进行了部分布袋的更换，8月27日、10月2日、10月9日、11月11日、11月18日、11月19日、2016年1月18日一号炉和二号炉进行了部分布袋的更换。

对比模型二中的折线图，现实的布袋除尘对应三个状态：第一是布袋初放上去时，布袋孔比较大，可通过的烟尘颗粒较多，故此时除尘效率最低（对应折线三），然后随着吸附的烟尘越来越多，布袋孔径变小，可穿过去过去的烟尘变少，除尘效率增高（对应折线一）；第二是布袋吸收烟尘饱和，利用工具把布袋的烟尘抖下部分后的状态（对应折线二）；第三是布袋损坏，需要更换时的状态。

由于已知一号炉和二号炉的合并为大烟囱的测量数据，现主要分析大烟囱的图像。由图可知，大烟囱的烟尘折合从6月1日始，先有微幅的波动，但整体呈缓慢下降趋势，之后在11月18日迅速上升达到峰值，从11月19日开始再次下降。这与已知即11月初焚烧厂连续更换几次布袋的时间相吻合。

另外，线性表中二号炉的折线波动剧烈，11月30日和12月11日的两次达到峰值与11月中二号炉的几次布袋更换时间相吻合，恰好满足布袋由刚更换上时的效率低到吸附一定烟尘后效率转高的变化。

由此可证实我们对模型二的分析的准确性。

7.2 优化模型的评价与推广

1、评价目的确定有限评价指标集合

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, m = 1.2 \dots 5$$

$u_m, m = 1.2 \dots 5$ 分别表示布袋的堵塞性 X_1 , 气流流速 X_2 , 腐蚀氧气气流浓度 X_3 , 布袋所处环境温度 X_4 , 摩擦次数 X_5

2、给出评价等级集合

$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 其中 V_n 分别表示{很好, 较好, 一般, 较差, 很差}

3、确定各评价指标的权重

$$A = (0.35, 0.25, 0.15, 0.1, 0.15)$$

4、单指标评价向量

$$R_1 = (0.2, 0.3, 0.1, 0.2, 0.2)$$

$$R_2 = (0.1, 0.3, 0.2, 0.2, 0.2)$$

$$R_3 = (0.0, 0.4, 0.3, 0.1, 0.2)$$

$$R_4 = (0.3, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1)$$

$$R_5 = (0.1, 0.2, 0.3, 0.2, 0.1)$$

5、模糊综合评价结果归一化得

$$C = (0.1818, 0.2727, 0.2306, 0.1459, 0.1690)$$

按最大隶属原则, 此系统稳定程度较好。

八、模型的优缺点

综合上述的分析，主要建立了三个数学模型解决题目所给的问题，我们所建立的模型很好地将一些定性的问题如影响垃圾焚烧厂烟尘排放的各项因素进行量化分析，将他们转化为数学公式，很好地研究了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，基本解决了题目所给的问题，达到了我们的目的。在构建数学模型分析袋式除尘系统运行稳定性问题的过程中，我们采用了微分方程中经典的 Logistic 模型，为了简单起见我们只考虑垃圾焚烧厂布袋除尘系统中布袋的使用时间对整个系统稳定性的影响，最终给出了能够使系统的稳定性最大的更换布袋的时间表达式，根据后续给出的数据我们对模型进行了初步的检验，证明了模型二的准确性。

在模型三中我们进一步分析了影响布袋除尘效率的因素，是对模型一的补充，通过分析处理后续给出的垃圾焚烧厂实际的运行数据，我们建议工厂可以借助 FLUENT 软件对流场进行仿真模拟，研究除尘系统总体除尘效率与其内部的流场分布的关系。通过数值模拟来探究影响除尘系统除尘效率的因素，对工厂有一定的参考价值。

在最后的模型优化中，我们利用李雅普诺夫函数综合考虑影响布袋除尘系统稳定性的各项因素，并对模型进行了分析与检验，得到了较好的效果。

当然，模型中的缺点也是很明显的。通过咨询相关专业人员，我们了解到题目给出的设定条件与工厂实际的运行状况存在一定的偏差，再加上我们所学的专业知识有限，因此在处理实际问题上的模型的可靠性没有达到我们最初预期的目标。但是从总体上来说我们的模型对垃圾焚烧厂的运行是有一定的参考价值的。

九、参考文献

- [1] 司守奎、孙玺菁，数学建模算法与应用，国防工业出版社，2011 年 8 月 1 日。
- [2] 王磊，火电厂布袋除尘器可靠性分析，华电技术，第 32 卷第 5 期，2010 年 5 月。
- [3] 韩明荣，袋式除尘技术在高炉煤气除尘中的应用研究，燕山大学，2006 年 9 月。
- [4] 徐升茂，调节阀的数学模型与稳定性分析，天津纺织工学院学报，1994 年 5 月。
- [5] 杨征，首秦炼铁厂布袋除尘系统优化改造研究，燕山大学，2015 年 12 月。
- [6] 毛锐，布袋除尘器结构改进的数值模拟研究，华中科技大学，2014 年 4 月。
- [7] 中国环境保护产业协会，袋式除尘行业 2014 年发展综述，中国环保产业，2015 年 11 月。
- [8] 隆重，布袋除尘器改造，四川电力技术，2001 年。
- [9] 刘驭，我袋式除尘器市场前景光明，国际商报，2004 年 1 月 22 日。

[10] 蔡伟龙、罗祥波，我国袋式除尘高温滤料的应用现状及发展趋势，中国环保产业，2011 年 10 月。

[11] 中国环境保护产业协会，我国袋式除尘技术的进步与发展，中国环保产业，2014 年 7 月。

[12] 康鹏，漳山电厂二期机组布袋除尘技术应用分析与改进，华北电力大学，2014 年 5 月。

[13] 刘琦，600MW 火电机组布袋除尘系统控制方案改进及应用，华北电力大学，2014 年 4 月

[14] 张刚，城市固体废物焚烧过程二噁英与重金属排放特征及控制技术研究，华南理工大学，2013 年 4 月。

[15] 曹伟、沈玉祥、吴善淦，袋式除尘技术在垃圾焚烧炉上的应用，中国环保产业，2003 年 12 月。

[16] 方鑫，袋式除尘器过滤除尘的数值模拟研究，湖南大学，2012 年 5 月。

[17] 张亮，垃圾焚烧炉烟气净化用袋式除尘滤料的试验研究，东华大学，2006 年 12 月。

[18] 陈隆枢，我国袋式除尘技术近十年的发展综述，中国环保产业，2011 年 11 月。

[19] 徐文龙、刘晶昊，我国垃圾焚烧技术现状及发展预测，中国环保产业，2007 年 11 月。

[20] 戎毅仁，简述布袋除尘器的原理及运用，内蒙古科技与经济，2008 年 11 月。

[21] 冀晨光，铝熔炼保温炉烟尘治理工艺中布袋除尘器滤料的分析选择，洛阳有色金属加工设计研究院，2009 年 8 月。

[22] 侯鲁健，济南市环境工程质量检监测管理信息系统的设计与实现，山东大学，2014 年 4 月。

[23] 邓青军、唐仲华，汉江平原水土地质环境综合监测与评价，中国地质大学（武汉）环境学院，2014 年 7 月。

十、附录

10.1 附录一

模型评价及优化程序如下

```
A=input('请输入权重:')
```

```
B=input('请输入模糊关系矩阵:')
```

```
[m,n]=size(A);      %矩阵 A 的行数和列数
```

```
[m1,n1]=size(B);    %矩阵 B 的行数和列数
```

```

if n~=m1
    error('矩阵 A 和列数与矩阵 B 的行数相同')
else
    for i=1:m
        for j=1:n1
            for t=1:m1
                if A(i,t)<B(t,j)
                    B(t,j)=A(i,t);
                end
            end
        end
        C(i,:)=max(B);
    end
end
disp('综合评判向量');
C
[p,q]=size(C);
sum=0;
for i=1:p
    for j=1:q
        sum=sum+C(i,j);
    end
end
for i=1:p
    for j=1:q
        C(i,j)=C(i,j)/sum;
    end
end
end

```

10.2 附录二

2015 年 6 月 1 日至 2016 年 6 月 20 日的崂应 3012H 型垃圾焚烧炉的烟尘浓度折算数据如下：

		6月2日	6月3日	6月4日	6月5日	6月6日	6月7日	6月8日	6月9日	6月10日	6月11日	6月12日	6月13日	6月14日	6月15日	6月16日	6月17日	6月18日	6月19日	6月20日	6月21日	6月22日	6月23日	6月24日
大烟囱			11.7	13.9			11.5	10.5	16.7	14.5	9.5			11.8			11	10.7					11.2	10.7
1#炉	12			11.8										8.6		9.1	10.9							
2																								
	7月1日	7月2日	7月3日	7月4日	7月5日	7月6日	7月7日	7月8日	7月9日	7月10日	7月11日	7月12日	7月13日	7月14日	7月15日	7月16日	7月17日	7月18日	7月19日	7月20日	7月21日	7月22日	7月23日	7月24日
大烟囱	11.7	12.5	13.4									12.1	10						12.3	10.8				
1#炉														9.1		11.1					11.9	11.6	11.1	
2			11			16.8									26.3	12.3	13					10.9	13.4	11.9
	8月1日	8月2日	8月3日	8月4日	8月5日	8月6日	8月7日	8月8日	8月9日	8月10日	8月11日	8月12日	8月13日	8月14日	8月15日	8月16日	8月17日	8月18日	8月19日	8月20日	8月21日	8月22日	8月23日	8月24日
大烟囱																								
1#炉				10.9	13	11.1	10.7			13.8	11.2	8.1	13.8	10			10.8	9.4	8.5	11.7	12.6			9.4
2					10.8	10.2	9.7			11.2	15.8	14.8							16.4					25.2
	9月1日	9月2日	9月3日	9月4日	9月5日	9月6日	9月7日	9月8日	9月9日	9月10日	9月11日	9月12日	9月13日	9月14日	9月15日	9月16日	9月17日	9月18日	9月19日	9月20日	9月21日	9月22日	9月23日	9月24日
大烟囱																								
1#炉	8	13.5						10						8.7	9.9	8.6	9	7.9				10.5	11.6	16
2						11.7	9	10.9		11.1					8.7	13.1		8			8.6	6.8	6.7	7.3
	10月1日	10月2日	10月3日	10月4日	10月5日	10月6日	10月7日	10月8日	10月9日	10月10日	10月11日	10月12日	10月13日	10月14日	10月15日	10月16日	10月17日	10月18日	10月19日	10月20日	10月21日	10月22日	10月23日	10月24日
大烟囱																								

1#炉							11.2																				
2							8.8																				
	11月1日	11月2日	11月3日	11月4日	11月5日	11月6日	11月7日	11月8日	11月9日	11月10日	11月11日	11月12日	11月13日	11月14日	11月15日	11月16日	11月17日	11月18日	11月19日	11月20日	11月21日	11月22日	11月23日	11月24日			
大烟窗																		6.8	22.3								
1#炉		11.1	6.8	8.2								5.1				7.3	7.6		6.4						5.7		
2		10.6	10.2	9.7	10.7				9.1	9.5						8.2	9.8		10.2						14.1		
	12月1日	12月2日	12月3日	12月4日	12月5日	12月6日	12月7日	12月8日	12月9日	12月10日	12月11日	12月12日	12月13日	12月14日	12月15日	12月16日	12月17日	12月18日	12月19日	12月20日	12月21日	12月22日	12月23日	12月24日			
大烟窗																											
1#炉	6.5	6.9					7.8	7.6		6	8.4			6.8		6.5	6.7				6.5	8.5	9.4	9.1			
2		15.6	15.1					17.1		48.7	64.6			52.5		8.8	7.6				12.5	9.5	11.8	10.5			
	1月1日	1月2日	1月3日	1月4日	1月5日	1月6日	1月7日	1月8日	1月9日	1月10日	1月11日	1月12日	1月13日	1月14日	1月15日	1月16日	1月17日	1月18日	1月19日	1月20日	1月21日	1月22日	1月23日	1月24日			
大烟窗																											
1#炉				8.3		8.8					9.2							10.7	8.3								
2											9							10.8	8.2								
	2月1日	2月2日	2月3日	2月4日	2月5日	2月6日	2月7日	2月8日	2月9日	2月10日	2月11日	2月12日	2月13日	2月14日	2月15日	2月16日	2月17日	2月18日	2月19日	2月20日	2月21日	2月22日	2月23日	2月24日			

		日																							
大烟窗																									
1#炉					9.5										9		9.4					11.1		11.3	
2					6.9										7.6	7.7		10.4				10.7	9.8	9.9	
	3月1日	3月2日	3月3日	3月4日	3月5日	3月6日	3月7日	3月8日	3月9日	3月10日	3月11日	3月12日	3月13日	3月14日	3月15日	3月16日	3月17日	3月18日	3月19日	3月20日	3月21日	3月22日	3月23日	3月24日	
大烟窗																									
1#炉	14.9	14.3		16.9			13.7	13.2	13.3							10.2		12.8							
2				14.1			12.3	15.1										17.7							
	4月1日	4月2日	4月3日	4月4日	4月5日	4月6日	4月7日	4月8日	4月9日	4月10日	4月11日	4月12日	4月13日	4月14日	4月15日	4月16日	4月17日	4月18日	4月19日	4月20日	4月21日	4月22日	4月23日	4月24日	
大烟窗																									
1#炉					12.5	13.8	16.5				15.1							13			12.1				
2					19.9		12.8				14.2							55.8		9.6					
	5月1日	5月2日	5月3日	5月4日	5月5日	5月6日	5月7日	5月8日	5月9日	5月10日	5月11日	5月12日	5月13日	5月14日	5月15日	5月16日	5月17日	5月18日	5月19日	5月20日	5月21日	5月22日	5月23日	5月24日	
大烟窗																									
1#炉			18.1		14.8			13.7		14.3	13.7	16.9			12.5	13.3	13.1							15.6	
2																		16.1				53.1	12.9		
	6月1日	6月2日	6月3日	6月4日	6月5日	6月6日	6月7日	6月8日	6月9日	6月10日	6月11日	6月12日	6月13日	6月14日	6月15日	6月16日	6月17日	6月18日	6月19日	6月20日	6月21日	6月22日	6月23日	6月24日	
大烟窗							10.5				12														
1#炉	15.6	15	12.7			14.5						7.2	5.8	8.7	7.3	6.7			8						

