

文章编号 1000-5013(2001) 04-0406-06

工业炉煤粉旋风预燃器气相流场回归分析

肖美添 刘华信

(华侨大学材料科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 采用实验数据回归分析的方法, 建立多项式回归方程式及通式, 研究旋风预燃器断面和空间两种情况的气相流场各特性参数. 用复相关系数 R 和残余标准误差 S 检验回归方程和确定多项式的项数和幂次, 直到方程的最优化. 另以实例说明上述内容的运用, 并用图表显示建立的优化数学模型所能达到高度“显著”. 其与实验数据能很好拟合, 表明所建立的旋风预燃器流场模型具有计算程序通用性好、工作量小和精度高等特点, 有较高的工程实用价值.

关键词 旋风预燃器, 气相流场, 回归分析, 数学模型

中图分类号 TQ 052.7 : TQ 018 : TQ 013.2

文献标识码 A

工业炉煤粉旋风预燃器的气相三维流场是个特殊而复杂的流场. 流场中流体质点的切向速度(V_ψ)、径向速度(V_r)、轴向速度(V_z)和静压力(P)等特性参数, 随所处空间位置(r/D , z/D)变化而变化. 实验测量数据和散点分布图形, 已在文献[1, 2]作了详细介绍. 通过这些实验数据, 建立起流体各参数(目标函数)与空间位置(自变量)之间的数学模型. 它便于认识和掌握旋风预燃器内三维气相流场特点, 优化预燃器设计与操作, 也是进一步研究器内固体颗粒运动规律的基础和前提. 以往建立旋流式设备的气相流场数学模型, 采用的方法是先假定设备内的流体遵循纯环流和纯汇(源)流的理想流动模式, 推导出描述 V_ψ , V_r , V_z 和 P 的数学模型. 然后, 根据不同设备的边界条件, 用多个修正系数进行修正^[3, 4]. 但是, 这种建模方法难以用统一的函数形式描述不同特性参数, 而且不同研究者在不同场合下实验所得的修正系数值相差颇大, 工程应用既不方便又有较大误差. 近年来, 有不少采用对流场实验数据直接回归的方法, 得到描述流场各特性参数的数学模型. 不过该模型还较为粗糙, 未作检验和优化分析^[5]. 本文采用实验数据回归分析的方法, 建立数学模型, 研究工业炉煤粉旋风预燃器的断面和空间气相流场各特性参数.

1 流场特性参数的回归方程

1.1 回归方程的建立原理

设有一组观测 N 个实验点的观测数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N)$. 只要 y 与 x 是连续函数的

收稿日期 2001-05-19

作者简介 肖美添(1968-), 男, 助理研究员

基金项目 福建省自然科学基金资助项目

关系, 则可不问 $y = f(x)$ 的确切关系如何, 都可用 x 的多项式来逼近 y 值. 即

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_kx^k = \sum_{k=0}^x b_kx^k. \quad (1)$$

显然, 在观测点 x_i 上, 可由回归方程(1)求得的目标函数值为

$$y_i = \sum_{k=0}^x b_kx_i^k \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

它与实验观测值 y_i 存在着残余误差 ϵ . 对于 N 对实验数据, 其总残余误差平方和为

$$Q = \sum_{i=1}^N \epsilon^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1x_i - b_2x_i^2 - \dots - b_kx_i^k)^2. \quad (2)$$

我们希望 Q 值为最小. 为此, 应将式(2)分别对多项式各幂次项系数求偏导数, 并令其结果均为零. 于是, 可得一个包括 $K+1$ 个待求系数的正规方程组, 矩阵形式表示为

$$\begin{pmatrix} N & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^k \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{k+1} \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^k & \sum x_i^{k+1} & \sum x_i^{k+2} & \dots & \sum x_i^{2k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_i \\ \vdots \\ \sum y_i x_i^k \end{pmatrix}. \quad (3)$$

式(3)中被乘矩阵和积矩阵中的各元素, 均可从已知的实验数据计算得到. 解此方程, 就可得到自变量 x 各幂次项的系数 $b_k (k=0, 1, 2, \dots, K)$. 于是, 多项式回归方程(1)也就可以确定.

1.2 预燃器横断面上的回归方程

任取一个距预燃器端部为 z_0/D , 横断面为 j_0 的实验数据进行回归. 在此固定横断面上, 流体质点的各特性参数值只随其所处半径位置而变化^[1,2]. 现在回归方程式(1)中, 目标函数 y 代表的是 V_Ψ, V_r, V_z 或 P 中的任一个, 而自变量 x 代表的是无因次半径 r/D . 根据上述的建模原理, 在预燃器横断面 j_0 上, 可得流体流场各特性参数的多项式回归方程分别为

$$\left. \begin{aligned} V_\Psi &= \sum_{k=0}^k b_{\Psi k} (r/D)^k, \\ V_r &= \sum_{k=0}^k b_{rk} (r/D)^k, \\ V_z &= \sum_{k=0}^k b_{zk} (r/D)^k, \\ P &= \sum_{k=0}^k b_{pk} (r/D)^k. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

如果与式(1)统一, 概括各特性参数的回归方程, 可得

$$y = \sum_{k=0}^k b_k (r/D)^k. \quad (5)$$

把在 j_0 断面上测得的实验数据 $(V_{\Psi i}, r_i/D), (V_{ri}, r_i/D), (V_{zi}, r_i/D)$ 和 $(P_i, r_i/D) (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 分别代入式(3). 解得流场不同特性参数的回归系数 $b_k (k=0, 1, 2, 3, \dots, K)$ 后, 式(4)和式(5)就可确定.

1.3 预燃器整个空间的回归方程

预燃器空间是无数个横断面的叠合. 虽然不同断面 j 上的流场特性参数的回归方程, 都可用以 r/D 为自变量的多项式回归方程(4)描述. 但在不同断面上, 多项式各幂次项的回归系数 b_{jk} 却随着断面所处的轴向位置 z_j/D 的不同而不同. 此时, 若把式(1)目标函数 y 看作是代表不同特性参数的回归系数 $b_{\Psi k}, b_{rk}, b_{zk}$ 中的任何一个, 而把自变量 x 看作是代表不同断面 j 的无因

次轴向距离 z_j/D . 根据上述的建模原理, 可得不同断面上的各回归系数的多项式回归方程分别为

$$\left. \begin{aligned} b_{\Psi k} &= \sum_{m=0}^M a_{\Psi km} (z/D)^m, \\ b_{rk} &= \sum_{m=0}^M a_{rkm} (z/D)^m, \\ b_{zk} &= \sum_{m=0}^M a_{zkm} (z/D)^m, \\ b_{\theta k} &= \sum_{m=0}^M a_{\theta km} (z/D)^m. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

以式(6)代入式(4), 可得预燃器三维空间各流场特性参数的回归方程式. 即

$$y = \sum_{k=0}^K \sum_{m=0}^M a_{km} (r/D)^k (z/D)^m. \quad (7)$$

这样, 在通过对流场实验测得一批数据, 求得各特性参数的回归系数 a_{km} . 只要给出流体质点在预燃器空间所处的位置 $(r_i/D, z_j/D)$, 就可相应求出该点的流场特性参数 y_{ij} .

2 回归方程的检验与优化

2.1 回归方程的检验指标及其计算公式

从实验数据回归出的方程是否可信(用), 以及在什么水平上可信(用), 需进行所谓的“显著性”检验. 检验指标可以用复相关系数 R , 它与回归方程的总平方和 L_{yy} 、回归平方和 U 及残余误差平方和 Q 有关. 其计算公式⁶⁾为

$$R = \sqrt{U/L_{yy}} = \sqrt{1 - Q/L_{yy}}. \quad (8)$$

如令 $\bar{x}^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^k$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$, $L_{ky} = \sum (x_i^k - \bar{x}^k)(y_i - \bar{y})$, $L_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{1}{N} (\sum y_i)^2$. 它们都可从实验测定的数据中求得. 因此, U 与 Q 也可由下式求得, 进而可以计算出 R .

$$\begin{aligned} U &= \sum_{k=0}^K b_k L_{ky}, \\ Q &= \sum_{i=0}^N \epsilon_i^2 = L_{yy} - U. \end{aligned} \quad (9)$$

把由式(8)求得的 R 值与它们的临界值进行比较, 则可检验出上面求得的回归方程是否“显著”, 以及在什么水平上“显著”.

2.2 回归方程的优化处理

用自变量 x 的多项式, 以逼近目标函数 y 的回归方程. 如果多项式的项数越多, 会使回归方程的复相关系数 R 值越大, 方程的“显著性”水平越高. 但是, 项数的增加也使回归方程变得冗长复杂. 因此, 当方程有足够高水平“显著性”后, 应使多项式的项数(幂次)尽量减少(或降幂), 让回归方程优化. 确定多项式幂次(项数)可以用残余标准误差 S 作为指标, S 值小者为优. S 与残余误差平方和 Q 、实验数据对数 N (或 M) 和幂次(项数) k 的关系⁶⁾为

$$S = \sqrt{Q/(N - k - 1)}. \quad (10)$$

借助计算机软件进行回归计算, 能同时给出 R 和 S 值. 当回归方程的 R 值足够大, S 值足够小时, 就可以把多项式中的高幂次项去除, 从而达到检验和优化回归方程的目的.

3 应用实例

3.1 预燃器横断面流场的回归分析实例

表1是文献[2]在预燃器内距端部($z/D=0.7625$)的横截面上、流场工况3(2次风量与1次风量之比为1.0)时, V_{Ψ} , V_z 和 P 值随 r/D 变化的实测数据.

表1 流场特性参数的实验数据

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r/D	0.03	0.08	0.133	0.183	0.233	0.283	0.333	0.383	0.433	0.483
$V_{\Psi}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.62	8.38	11.73	14.29	15.39	15.57	14.86	14.42	14.43	13.80
$V_z/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-3.79	-2.99	-0.73	1.44	2.48	3.86	4.40	5.05	6.06	5.76
P/Pa	-42.70	-20.10	70.30	170.90	220.10	275.10	320.70	354.80	374.80	384.80

以切向速度为例, 在给定多项式的最高幂次数 K 后, 利用正规方程组(3), 在计算机上编程计算, 可求出多项式各幂次项的回归系数 $b_{\Psi k}(k=0, 1, 2, \dots, K)$. 进而可写出回归方程(4)中 $V_{\Psi}=\sum_{k=0}^K b_{\Psi k}(r/D)^k$ 的具体表达式. 同时, 也能计算出在不同 K 值下方程的 R 值和 S 值, 如表2所示. 在不同项数下, V_{Ψ} 的回归方程曲线及由实验数据直接绘制的散点曲线, 如图1所示.

表2 V_{Ψ} 的回归表达式及 R 和 S 值

幂次	$V_{\Psi}=b_0+b_1(r/D)+\dots+b_k(r/D)^k$	R	S
$k=2$	$V_{\Psi}=0.592+96.09(r/D)-147.81(r/D)^2$	0.965 70	1.285 6
$k=3$	$V_{\Psi}=-2.81+170.56(r/D)-505.57(r/D)^2+464.98(r/D)^3$	0.997 85	0.350 4
$k=4$	$V_{\Psi}=-3.457+192.17(r/D)-685.53(r/D)^2$ $+1005.8(r/D)^3-526.57(r/D)^4$	0.998 37	0.331 6
$k=5$	$V_{\Psi}=-3.487+193.49(r/D)-702.9(r/D)^2$ $+1087.6(r/D)^3-703.46(r/D)^4+137.85(r/D)^5$	0.998 38	0.370 7

由表2和图1可见, 当 $K<4$ 时, 随着 K 值(或项数)增加, 复相关系数 R 值增大和残余标准误差 S 值减小, 回归方程曲线与实验数据能拟合更好. 但是, 当 $K=4$ 时, 再增加 K 值(项数), R 值增加的幅度十分微小, 而 S 值反而变大. 这是因为, 对于煤粉旋风预燃器, 流场切向速度 V_{Ψ} 的回归方程以四项式($K=3$)为最优. 这一结论在流场其它特性参数(轴向速度 V_z 和静压 P)的多项式回归方程也得到证实(表3和图2).

表3 P 的回归表达式及 R 和 S 值

幂次	$P=b_0+b_1(r/D)+\dots+b_k(r/D)^k$	R	S
$k=2$	$P=-126.15+182.676(r/D)-1493.231(r/D)^2$	0.972 6	22.689
$k=3$	$P=-86.51+959.87(r/D)+2671.81(r/D)^2-5413.27(r/D)^3$	0.995 6	18.881
$k=4$	$P=-68.58+359.26(r/D)+7756.39(r/D)^2$ $-20618.55(r/D)^3+14812.02(r/D)^4$	0.995 9	19.956
$k=5$	$P=27.529-3915.72(r/D)+60638.61(r/D)^2$ $-284888.6(r/D)^3+586356.8(r/D)^4-445389.5(r/D)^5$	0.999 3	9.589

3.2 预燃器空间流场的回归分析实例

以流场工况3的切向速度 V_{Ψ} 为例. 在进行第1次回归求不同断面的 $V_{\Psi j}=\sum_{k=0}^K b_{\Psi kj}(r/D)^k$ 时, 均取最高幂次 $K=3$. 于是, 可取得16个被测断面上的多项式回归方程各幂次项的回归系数,

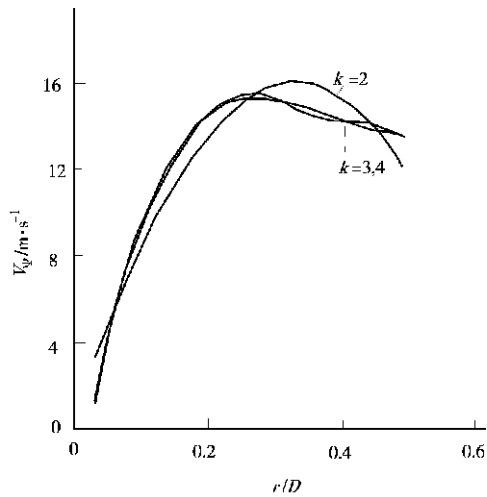


图1 V_{Ψ} 回归曲线与实验数据拟合情况

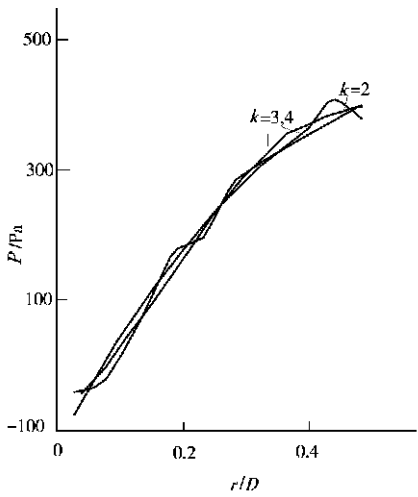


图2 P 回归曲线与实验数据拟合情况

以及其断面所处轴向位置的对应数据($b_{\Psi_{kj}}, z_j/D$) ($k=0, 1, 2, 3; j=0, 1, 2, \dots, 16$). 以它们作为第2次回归的原始数据, 再以 b_{Ψ_k} 作为目标函数, z/D 作为自变量. 在给定求 b_{Ψ_k} 的二次回归方程的最高幂次 M 后, 根据上述建模原理, 求出各幂次项的回归系数 $a_{\Psi_{km}} (m=0, 1, 2, \dots, M)$. 进而, 得出二次回归方程(6)的具体表达式及其 R 和 S 值. 因篇幅所限, 表4只列出 M 取值不同时, 求 b_{Ψ_k} 回归方程的复相关系数 R 值和残余标准误差 S 值.

表4 M 不同取值时回归方程的 R 和 S 值

项目	$M=3$		$M=4$		$M=5$		$M=6$	
	R	S	R	S	R	S	R	S
b_{Ψ_0}	0.595 6	1.461 8	0.688 5	1.445 8	0.688 5	1.445 8	0.747 4	1.396 1
b_{Ψ_1}	0.829 6	26.229 0	0.829 9	27.374 0	0.948 3	16.337 0	0.948 5	17.189 0
b_{Ψ_2}	0.770 5	137.64	0.773 8	142.93	0.951 1	73.065	0.952 9	75.601
b_{Ψ_3}	0.710 6	183.73	0.720 1	189.24	0.945 5	93.110	0.9509	93.290

由表4可见, “最优”二次回归多项式方程的最高幂次为 $M=5$. 小于此值时, 二次回归方程的 R 值偏小, 不可能在较高水平上“显著”. S 值偏大, 由方程求出的 b_{Ψ_k} 值会偏离原始观测值 (此处应是一次回归计算值) 太多, 拟合效果不佳. 但当 $M=6$ 时, R 和 S 值改善不明显, 却使方程变复杂了. 由式(4), (6) 及对 R, S 值讨论分析, 得到煤粉旋风预燃器空间流场中的切向速度最优方程为

$$V_{\Psi} = \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^5 a_{\Psi_{km}} (z/D)^m (r/D)^k. \tag{13}$$

对于流场中的 V_z 和 P 等其它特性参数的回归方程形式和幂次也相同, 只是由于实验数据不同, 方程的系数矩阵元素 a^{km} 的数值和量纲不同而已.

4 结束语

(1) 采用实验数据回归分析的方法, 建立旋流设备流场特性参数数学模型, 具有程序通用性好、计算工作量小和计算精度高等特点. 所建立的多项式回归方程形式简单, 且可用数值检

验判断方程的优劣, 确定多项式的幂次和项数较为客观可信。(2) 对于具有中心轴对称性气相流场的 HD 型工业炉煤粉旋风预燃器, V_{Ψ} , V_r , V_z 和 P 等流场特性参数在预燃器横断面和空间任意点的“最优”多项式回归方程通式分别为

$$y = \sum_{k=0}^3 b_k (r/D)^k$$

和

$$y = \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^5 a_{km} (z/D)^m (r/D)^k.$$

此两个优化方程的复相关系数 R 值分别为 0.99 和 0.94 左右, 皆可达到高度“显著”, 方程能与实验数据很好拟合。

参 考 文 献

- 1 刘华信, 肖美添, 朱 艳等. 工业炉煤粉旋风预燃器的气相流场特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 313 ~ 318
- 2 肖美添. 旋风气固两相流动特性的研究[D]. [学位论文]. 泉州: 华侨大学化工学院, 1999. 11 ~ 36
- 3 岑可法, 樊建人. 工程气固两相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 230 ~ 282
- 4 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988. 183 ~ 237
- 5 张永安, 李春生. 粉煤旋风燃烧器颗粒运动轴迹数学模型实验研究[J]. 冶金能源, 1993, 12(1): 47 ~ 52
- 6 江体乾. 化工数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 384 ~ 400

Regression Analysis on Gas Phase Flow Field of Pulverized Coal in Cyclone Precombuster of Industrial Furnace

Xiao Meitian Liu Huaxin

(College of Mater. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract By adopting regression analysis of experimental data, the multinomial regression equations of characteristic parameters of gasphase flow fields in cross section and space of cyclone precombuster as two situation and their general formula are set up. By using coefficient of multiple correlation R and residual standard errors, the regression equations are tested and the item and the power of multinomial are determined and optimized. The results of examples indicate that the optimized mathematical model will come up to high pronounced and well accord with experimental data. The flow field model of cyclone precombuster set up by the authors is characterized by good in generality of counting routine and small in work load and high in accuracy. It has also fairly high practical value in engineering.

Keywords cyclone precombuster, gasphase flow field, regression analysis, modeling