

工业锅炉燃煤量的关联确定

新力 刘玉洁

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

[提要] 为解决我国目前大中容量工业锅炉燃煤量准确计量问题,作者尝试用多元回归分析的数学方法,对燃煤量与其它热工参数进行了关联,并对所得关联式进行了实测检验和精度分析。

主题词 锅炉 测试

一、前言

工业锅炉燃煤量的准确确定是我国锅炉用户的一大难题,它的解决对能源计量,能源的科学管理,锅炉热效率鉴定,锅炉运行的自动控制都具有重要意义。

目前,我国只有少数大容量工业锅炉配备了自动测煤设备,且由于制造水平的限制,测量精度还不能令人满意。

锅炉热工试验精度是由正反平衡热效率之差小于允许值来校核的。但由于正反平衡的热效率计算都与燃煤量有关,燃煤量本身的测量误差不可避免地会影响到包括反平衡在内的整个试验的精度,有时使用效率差校核法难以正确判定试验的实际精度。

本文从锅炉热工试验实测数据出发,运用多元回归分析的数学方法,借助电子计算机,建立了燃煤量与其他热工参数的关联式。所得关联式可用于热工试验的精度校核、锅炉燃烧过程控制中燃煤量的数学模型,以至必要时代替直接测试,确定燃煤量。

二、多元回归分析原理与方法

回归分析是定量地表示随机因变量与自变量之间内在制约关系的数学方法。因为非线性问题都可以用变量代换的手段转化为线性问题来求解,所以线性回归分析的理论和方法得到了广泛的应用。

如果随机因变量 Y 与 N 个自变量 X_1, X_2, \dots, X_N 之间存在线性相关关系, Y 的 M 次实验数据(集合为样本)则构成下列方程组:

$$Y = X\beta + e$$

本文收到日:1987年7月24日

式中

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{pmatrix} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{N1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{N2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & X_{1M} & X_{2M} & \cdots & X_{NM} \end{pmatrix}$$

矩阵中的 ε 是 m 个互相独立且服从同一正态分布的随机偏差。 β 是 $N+1$ 个待估计参数。若 β 的估计值为 b_0, b_1, \dots, b_N , 则 Y 的回归方程为:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + \cdots + b_N X_N \quad (2-1)$$

根据最小二乘法原理, β_i 的估计值应使全部观测值 Y_i 与回归值 \hat{Y}_i 的偏差平方和达到最小。即应有

$$Q = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2 = \sum_{j=1}^m (Y_j - \hat{Y}_j)^2 = \text{minimum}$$

由于 Q 是 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_N$ 的非负二次式, 所以它的最小值一定存在。根据多元函数的极值原理和一系列的数学处理, b_1, b_2, \dots, b_N 应是以下正规方程组的解:

$$\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \cdots L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} \cdots L_{2N} \\ \vdots & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} \cdots L_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{10} \\ L_{20} \\ \vdots \\ L_{N0} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 - \cdots - b_N \bar{x}_N \quad (2-3)$$

式中

$$L_{ik} = \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)$$

$$L_{i0} = \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_j - \bar{y})$$

$$i, k = 1, 2, \dots, N$$

$$\bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m z_j \quad z \text{ 分别为 } x_i, x_k, y$$

b_0 由 (2-3) 式确定。

三、工业锅炉燃煤量关联模型

用多元回归分析方法确定锅炉燃煤量与其他热工参数的关联式，首先要提出关联模型。关联模型的优劣将影响最后关联结果的精度。我们可以从理论分析和经验出发，提出关联模型。

影响燃煤量 B 的因素主要有锅炉负荷，燃料质量，燃烧水平，其相应的热工参数是：

1. 出力 D ，即锅炉做的有效功。这是表征锅炉负荷的参数，显然 B 是 D 的单调增函数。
2. 煤的低位发热值 Q_{DW} 。这是表征燃料质量的参数。固定其他热工参数， B 应是 Q_{DW} 的单调减函数，即投入燃烧煤的低发值愈高，需煤量愈少。
3. 排烟处含氧量 O_2 ，炉渣含碳量 C_{LZ} ，排烟温度 T_{PY} 、炉膛温度、炉渣量等。这些都是表征燃烧水平的参数。炉型的差异对 B 的影响，最终也归结为不同的燃烧水平的影响。

由于在锅炉热平衡测试中，炉膛温度仅是监测参数，且要求专用热电偶高温温度计等仪表，很多试验没有测它。炉渣量的测定本身就存在类似于燃煤量的测定问题，工作量较大，不易测准。故这两个量不宜选为关联参数。其余三个参数 O_2 ， C_{LZ} ， T_{PY} 可做为关联参数选用。

综上所述，我们预测锅炉燃煤量的关联模型为：

$$\hat{B} = b_0' x_1'^{b_1} x_2'^{b_2} \dots x_N'^{b_N} \tag{3-1}$$

式中 x_i' 为上述关联参数之一。

转化为线性表达式为：

$$\ln \hat{B} = \ln b_0' + \sum_{i=1}^N b_i \ln x_i' \tag{3-2}$$

(3-2)式与(2-1)式相对应。

四、回归分析结果的检验

用回归分析方法得到的关联式，能不能在一定的精度范围内反映出关联参数之间客观存在的相关关系，这需要用有关的方法来检验。根据问题的实际需要，本文采用了下列检验。

1. 相关系数R检验

样本数据 Y 的随机波动情况可以用总离差平方和 L_{YY} 来表示。

$$L_{YY} = \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_i [(Y_i - \hat{Y}_i) + (\hat{Y}_i - \bar{Y})]^2$$

注意到极值条件 $\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0$ ，并令 $v = \sum_i (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$

则 $L_{YY} = v + Q$

即因变量Y的随机波动是由于自变量变化引起的和误差及其它因素带来的。如果前者在量上比后者明显占优,即若 $v \gg Q$, 则回归方程是显著的。

令 $R = v/L_{YY}$, 由R的定义知, $0 < R \leq 1$, 当 $R \rightarrow 1$ 时, 回归方程是高度显著的。

R检验应对原始关联模型(3-1)的估计式进行。

2. 实测数据检验

测量对象的客观存在值称作真值。现实中人们很难获得真值, 真值一般是未知的。但是我们可以用精度较高的测量值作为相对真值, 对回归结果进行检验。若回归值与真值的误差小到允许范围内, 即认为回归结果是可靠的。

3. 回归方程的精度分析

回归方程的相对误差可以表示其精度, 即

$$\hat{B}_r = \frac{\Delta \hat{B}}{\hat{B}} \simeq \frac{\Delta \hat{B}}{\hat{B}}$$

由(3-2)式得

$$\hat{B}_r = d(\ln \hat{B}) \simeq \sum_{i=1}^N b_i \frac{\Delta x'_i}{x'_i} = \sum_{i=1}^N b_i x'_i$$

从最不利的情况出发, 通常取

$$\hat{B}_r = \sum_{i=1}^n |b_i x'_i|$$

当 \hat{B}_r 小于允许值时, 则回归方程可用。

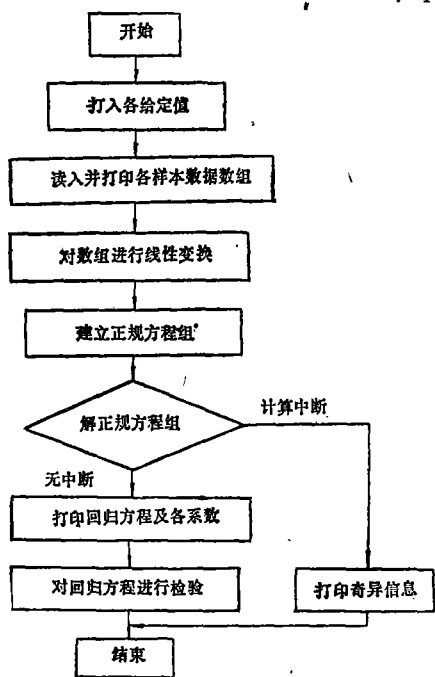


图1 计算程序框图

五、关联模型各系数的计算机求解

关联模型建立后, 即可按照前述的多元回归分析的方法, 确定(3-2)式中各项的系数, 进而得到(3-1)式。借助计算机可高效率地完成这项工作, 本文采用 Gauss-Jordan 法求解(2-2)方程组。整个计算程序框图如左。

六、求解结果及其分析

1. 样本数据说明

本文采用的样本数据列于表1。具体说明如下:

表 1

1	B (kg/h)	D (×41868kJ/h)	C _{LZ}	Q _{DW} (×4,1868kJ/kg)	O ₂	T _{py} (℃)
1	198	60.09	.1535	4140	.1164	161.6 *
2	199.5	60.04	.1635	4140	.1162	165.3 *
3	265	66.1	.142	3700	.1148	167.8 •
4	142	40.06	.1561	3940	.127	136.2 *
5	312.2	115.72	.1783	5280	.1395	172
6	336.8	115.78	.2147	5179	.139	169
7	1011	304.06	.122	4303	.1371	150.66
8	1322.3	415.21	.979	4303	.118	187
9	798.2	268.95	.2012	5052	.127	156
10	82.85	32.9	.035	5820	.118	303.8 *
11	81.67	31.1	.0364	5820	.121	282 *
12	87.81	34	.0385	5820	.114	324.4 *
13	78	30	.1087	5531.7	.1	250
14	85	32.1	.1085	5531.7	.09	255.3
15	225.6	91.6	.1641	5480	.098	197 *
16	228.4	92.1	.1673	5480	.097	212 *
17	258.18	103	.1692	5480	.094	220 *
18	140.2	61	.1475	5930	.102	213 *
19	149.4	64.38	.1493	5930	.103	225 *
20	167.5	71.03	.1531	5930	.094	227 *
21	27	10.3	.059	5630.9	.1072	214 *
22	26.3	10.4	.057	5630.9	.1135	201 *
23	32.4	12.4	.063	5630.9	.1026	226 *
24	1494.84	457.059	.1511	4491	.1295	118.6
25	1471.73	423.85	.1259	4106	.1149	134.5
26	1465.5	505.54	.1231	4989	.1197	119
27	440.38	143.875	.1784	5120	.1518	206.4
28	551.8	250.016	.242	5900	.0903	143
29	557.9	251.807	.2475	5900	.0912	146
30	625.8	279.571	.2513	5900	.0893	151
31	183.5	78.3272	.4341	6297.4	.1281	195.9
32	209.3	85.3595	.4233	6302.4	.1307	200.8
33	211.64	66.2508	.1255	4526.24	.1015	214
34	197.29	62.6131	.1192	4516.38	.1023	202
35	214.4	60.2889	.1003	3810	.1015	241.3
36	206.8	58.7534	.0978	3810	.1025	233.2
37	234.3	74.8965	.1523	4490	.097	238.2
38	83.47	32.0432	.038	5790	.119	330.5 •
39	85.12	32.479	.0413	5790	.115	337.3 •
40	93.29	35.216	.0446	5790	.109	348.7 •

(1) 漏煤量已经从煤耗中扣除。

(2) 样本中锅炉效率分布为57%~77%，基本反映了我国工业锅炉效率水平。

(3) 锅炉最大容量为10t/h，最小的为0.2t/h，容量在4t/h以上的有10例。选入较多的小容量锅炉数据是基于这样的考虑：小锅炉以手烧炉居多、测量精度相对较高，会对关联结果产生积极的影响。另外10t/h以上锅炉的精度合格的试验数据收集较困难。

(4) 表中加注*号的为锅炉鉴定试验数据。

(5) 表中含热水锅炉数据，无煤粉炉数据。

2. 结果分析

结果一列于表2。

$$B = 11437.8D^{1.00152}C_{LZ}^{-0.0127314}Q_{DW}^{-0.948383}O_2^{0.25634}t_{PY}^{0.0587552} \quad (6-1)$$

这是40例煤耗的五元关联式。其相关系数 $R = 0.999467$ ，方程高度显著。

结果二列于表3。

$$B = 12763.1D^{0.994381}C_{LZ}^{-0.0194468}Q_{DW}^{-0.924673}O_2^{0.248886} \quad (6-2)$$

表2

THE REGRESSION FOR COAL CONSUMPTION

$$B=11437.8 \cdot D \cdot 1.00152 \cdot C_{ZL} \cdot 0.0127314 \cdot Q_{DW} \cdot 0.948383 \cdot 0.02 \cdot 0.25634 \cdot T_{PY} \cdot 0.0587$$

558

	CALCULATED VALUE	MEASURED DATA	RELATIVE DISCREPANCE	
1	204.284	198	.0317366	1
2	204.131	199.5	.0232139	2
3	249.935	265	-.0568502	3
4	144.383	142	.0187802	4
5	328.102	312.2	.0509347	5
6	332.9	336.8	-.0115795	6
7	1040.54	1011	.02922	7
8	1349.18	1322.3	.0203303	8
9	771.613	798.2	-.033309	9
10	85.8508	82.85	.0362193	10
11	81.2737	81.67	-4.85247E-03	11
12	88.1773	87.81	4.183E-03	12
13	76.713	78	-0.0164995	13
14	80.0043	85	-.0587728	14
15	231.016	225.6	.0240059	15
16	232.612	228.4	.0184433	16
17	258.624	258.18	1.7215E-03	17
18	144.99	140.2	.0341658	18
19	153.891	149.4	.0300582	19
20	165.911	167.5	-9.48459E-03	20
21	27.0519	27	1.92162E-03	21
22	26.8449	26.3	.0207171	22
23	31.3736	32.4	-.0316805	23
24	1456.43	1484.84	-.025692	24
25	1439.79	1471.73	-.0217046	25
26	1433.13	1465.5	-.0220874	26
27	433.97	440.38	-.0145567	27
28	563.026	551.8	.0203439	28
29	569.038	557.9	.0199848	29
30	629.602	625.8	6.07504E-03	30
31	193.057	183.5	-2.41197E-03	31
32	200.754	209.3	-.0408333	32
33	203.695	211.64	-.0375379	33
34	192.754	197.29	-.0229937	34
35	220.404	214.4	.0280026	35
36	214.96	206.8	.0394584	36
37	230.281	234.3	-.017153	37
38	34.5330	83.47	.0127427	38
39	84.949	85.12	-2.00953E-03	39
40	90.9201	93.29	-.0254039	40

THE EXAMINATION IN SIGNIFICANCE

$$U=6.67739E+06 \quad Q=7125.32 \quad L_{YY}=6.68452E+06 \quad BA=364.559 \quad S=14.4765$$

$$F=6372.52$$

$$FO=3.61$$

$$R=.999467$$

$$RO=.588882$$

这是四元关联式，在测取的排烟温度不可靠时，宜采用(6-2)式。 $R=0.999663$ ，方程高度显著。

结果三列于表4。

$$B=11834.4D^{0.997685}Q_{DW}^{-0.953312}O_2^{0.261281}t_{PY}^{0.0704331} \quad (6-3)$$

这是四元关联式，在测取的炉渣含碳量不可靠时，或要用于计算机检测的数学模型时，宜采用(6-3)式。 $R=0.999029$ ，方程高度显著。

由表2至表4的样本数据检验结果知，上述各关联式的计算值的全部相对偏差小于

表 3

THE REGRESSION FOR COAL CONSUMPTION

$$B=12763.1 \cdot D \cdot \cdot .994381 \cdot C_{LZ} \cdot \cdot - .0194468 \cdot Q_{DW} \cdot \cdot - .924673 \cdot O_2 \cdot \cdot .248696$$

	CALCULATED VALUE	MEASURED DATA	RELATIVE DISCREPANCE	
1	205.946	198	.0401326	1
2	205.435	199.5	.0297517	2
3	250.73	265	-.0538498	3
4	147.166	142	.0363805	4
5	329.134	312.2	.0542393	5
6	333.73	336.8	-9.11423E-03	6
7	1042.47	1011	.0311324	7
8	1314.68	1322.3	-5.75917E-03	8
9	772.937	798.2	-.03165	9
10	85.2702	82.85	.0292114	10
11	81.0736	81.67	-7.30271E-03	11
12	87.1907	87.81	-7.05317E-3	12
13	76.5426	78	-.0186853	13
14	79.7549	85	-.061707	14
15	231.24	225.6	.0250005	15
16	231.816	228.4	.0149556	16
17	257.016	258.18	-4.51014E-03	17
18	145.217	140.2	.035788	18
19	153.554	149.4	.0278012	19
20	165.433	167.5	-.0123384	20
21	27.5523	27	.0204568	21
22	27.4405	26.3	.0433633	22
23	31.8127	32.4	-.0181271	23
24	1475.52	1494.84	-.0129259	24
25	1448.71	1471.73	-.0156407	25
26	1457.08	1465.5	-5.74643E-03	26
27	429.433	440.38	-.0248572	27
28	570.048	551.8	.0330692	28
29	576.273	557.9	.0311399	29
30	634.805	625.8	.0143899	30
31	182.533	183.5	-5.26723E-03	31
32	199.773	209.3	-.0455185	32
33	202.765	211.64	-.0419359	33
34	192.647	197.29	-.023533	34
35	217.44	214.4	.0141779	35
36	212.554	206.8	.0278246	36
37	227.331	234.3	-.0297442	37
38	83.5014	83.47	3.75666E-04	38
39	83.7783	85.12	-.015763	39
40	89.4612	93.29	-.0410424	40

THE EXAMINATION IN SIGNIFICANCE

$$U=6.73873E+06 \quad Q=4550.72 \quad LYY=6.74328E+06 \quad BA=364.559 \quad S=11.4027$$

$$F=12^{0.57} \quad FO=3.91 \quad R=.9.9663 \quad RO=.55574$$

表 4

THE REGRESSION FOR COAL CONSUMPTION

$$B=11834.4 \cdot D \cdot \cdot .997635 \cdot Q_{DW} \cdot \cdot - .953312 \cdot O_2 \cdot \cdot .261281 \cdot T_{PY} \cdot \cdot .0704331$$

THE EXAMINATION IN SIGNIFICANCE

$$U=6.61468E+06 \quad Q=12867.7 \quad LYY=6.62754E+06 \quad BA=364.559 \quad S=19.1742$$

$$F=4497.97 \quad FO=3.91 \quad R=.999029 \quad RO=.55574$$

由于篇幅所限, 具体检验结果从略。

6%，8例小于1%，仅有两例大于5%。

对全部结果的非样本数据检验见表5。

表5

非样本实测数据						检验对象	计算值	相对偏差	数据说明
D ×41868kJ/h	C _{LZ}	Q _{DW} ×4.1868kJ/kg	O ₂	t _{py} °C	B kg/h				
245.1466	0.2866	5383.11	0.0807	162	614.4	6-1	588.13	4%	教材例题 4t/h炉 过热蒸汽
						6-2	589.75	4%	
						6-3	589.97	4%	
307.27	0.1019	4726	0.1027	155.6	893.1	6-1	897.1	0.4%	教材例题 6t/h炉 饱和蒸汽
						6-2	902.1	1%	
						6-3	887.1	0.7%	
279.182	0.2252	5707	0.0865	175	648.6	6-1	650.1	0.2%	同上
						6-2	649.9	0.2%	
						6-3	649.3	0.1%	
288.482	0.12	5715	0.1004	190	710.5	6-1	706	0.6%	同上
						6-2	704.5	0.8%	
						6-3	700.7	1.3%	
527.052	0.1231	4989	0.1135	121	1451.9	6-1	1475.42	1.6%	10t/h炉 饱和蒸汽
						6-2	1498.78	3.2%	
						6-3	1455.42	0.2%	
1062.911	0.1445	4648.1	0.16	201.6	3692.5	6-1	3577.18	3%	20t/h炉 饱和蒸汽
1416.28	0.1441	4923	0.1332	156.6	4428.7	6-1	4245	4%	过热蒸汽

检验结果表明，计算值与没有参加回归分析的实测值的相对偏差全部小于5%，其中包括20t/h锅炉的实测数据。

在测点布置，取样和分析正确的前提下，通常各测量量的极限误差为：

$$D_r = 2\%, Q_{DW_r} = 2\%, O_{2_r} = 5\%, t_{py_r} = 0.5\%, C_{LZ_r} = 0.1\%$$

则各回归方程的精度均为 $B_r = 5\%$ 。根据误差传递原理，由方程精度引起的锅炉热效率相对偏差也为5%。在热效率60%~80%范围内。其绝对偏差为3%~4%。

七 结 束 语

本文给出的三个锅炉燃煤量的关联公式,适用于容量在10t/h以下的不同炉型的工业锅炉的热工试验精度校核和燃煤量的自动检测,亦可用于我国多数企业配备的4t/h至10t/h(试用于20t/h)工业锅炉燃煤量的间接测定。全部公式的精度为5%,可满足锅炉热工试验的精度要求。使用这些公式可减轻大中型工业锅炉燃煤量的计量和测试工作量,节省设备投资,避免测煤设备故障带来的干扰,保证热工试验的精度,提高计量工作的效率。

吴天成、范仲华、朱尔海、刘长河、刘锡奇、任阿宝等同志为本文提供了实测数据;许敦诚、范仲华同志审阅了本文,在此谨致谢意。

参 考 文 献

1. 白新桂:数据分析与试验优化设计,清华大学出版社,1986,10
2. 西安交大,张永照等:工业锅炉,机械工业出版社,1982,8.
3. 赵特伟:试验数据的整理与分析,中国铁道出版社,1981,4.
4. 西安冶金建筑学院,同济大学:热工测量与自动调节,中国建筑工业出版社,1983,7.

Determining Industrial Boiler Coal Consumption by Correlation

Xin Li, Liu Yujie

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

In order to solve the precise dosing problem of coal consumption in large and medium industrial boilers being used in our country, the authors have tried a mathematical method using multivariate regression analysis to correlate coal consumption with the other thermal parameters. A test verification and accuracy analysis for the correlation formula have been carried out.

Key words: boiler, measurement.