

# 输入/损失技术

弗雷德·兰 (E系统公司, 圣拉菲尔, 加利福尼亚 94901)

Fred D. Lang, P.E. (Energetic Systems, Inc., San Rafael, California 94901)

Lang@Energetic Systems.com

**摘要** 输入/损失技术, 是一项独一无二的技术, 它通过对燃料及其渗漏的流动、燃料化学性质、燃料热值和热效率的分析, 为全面理解电厂热力过程创造了条件。低位(净)发热量与高位(总)发热量和热效率可以确定, 而直接的燃料流量或排放物流量的测量没有给定。鉴于打算将其用于燃煤电厂, 输入/损失技术是根据透平循环的能量流动和锅炉运行特性, 通过迭代技术与发散测量方法来确定煤的流动与燃烧热值的。发散测量方法, 是以多维最小化技术来校正的。多维最小化技术对于给定的煤种可以校正燃料的特性参数在小于±2%的标准误差范围内, 校正后的结果可以证明是基本稳定的。典型的热值可以在0.5%的精确度下进行预测。它是在线监测器而设计的。这种方法已经被1200次元素分析和10年的指导性测试结果所广泛验证。

**关键词:** 煤化学 燃料流量 排放流量 效率改善

**ABSTRACT** The Input/Loss Method is a unique process which allows for complete thermal understanding a power plant through explicit determinations of fuel and effluent flows, fuel chemistry, fuel heating (calorific) value and thermal efficiency. Lower (net) or higher (gross) heating values and efficiencies are determined. Direct measurements of fuel or effluent flows are not made. As it is intended for coal-fired power plants, the Input/Loss Method determines coal flow and as-fired heating value based on turbine cycle energy flows, boiler performance through iterative techniques and emission measurements. Emission measurements are corrected using Multi-Dimension Minimization techniques which corrects against a fuel characterization parameter, proven by this work to be essentially constant for a given coal Rank with standard deviations less than  $\pm 0.2\%$ . Typical heating values can be predicted within 0.5% accuracy. It is designed for on-line monitoring. The Method has been extensively verified through 1200 ultimate analyses and 10 years of directed testing efforts.

**Keyword** coal chemistry fuel flow emission flow efficiency improvement

## 输入/损失技术

### 前言

对于一个给定的电力生产过程, 燃料的能量是不能被贮存的, 除非它可以连续精确地被测量。目前对于燃煤电厂, 为保证机组连续运行所需的对燃料流量以小时为单位的精确检测还没有被采用, 更不用说对燃料热值变化的检测。

这种由 Energetic Systems (简称 ES) 公司开发出来并命名为输入/损失的技术<sup>(1-4)</sup> (以下简称为 I/LM), 是基于透平循环的能流和锅炉运行特性, 通过迭代技术对 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的排放进行测量来确定煤的流量及燃烧热值的。对非常规燃料, H<sub>2</sub>O 的排放有时也需要测量。热值的误差已经被证明小于±0.5%。这个误差再加上由给水流量控制的工作流体能量吸收过程中的误差, 一起决定了热转化率的误差。因此, 如果给水流量的测量误差小于±1.0%, 则热转化率的误差可以在±1.5%的范围内进行监测。从而, 这些技术就可以与计算机燃料消耗指数 (FCI) 相结合<sup>(5)</sup>, 来确定整个系统过程中的损失, 并指明从何处着手提高热转化率。

确切地, 这是一项整体化的技术: 正如忽略了给水流量或总能测量一样, 如果忽略掉了基本排放浓度, 也不能全面合理地理解整个系统。它的结果显示了整个机组瞬间的热转化率, 并指明在系统中哪里产生了异常的热力损失。本文讨论了自 1988 年以来开发 I/LM 过程中, 直接研究与安装测试过程中的结果。

总之, 应用于常规电厂与排放测量时, I/LM 涉及到如下的相关技术:

热力学方面: 燃料燃烧化学性质 (含收到基), 热值与燃料流量, 锅炉效率, 透平循环热效率, 机组热效率, 主要部件的燃料消耗指数 (指明实际的系统损失以及它们的超标燃料成本)。

排放方面：废气排放率（单位： $\text{kg}_{\text{effluent}}/\text{hr}, \text{gm}_{\text{effluent}}/\text{million-J}_{\text{Fuel}}$ ），总的排放质量及体积流率，排放设备和系统空气参数的误差分析。

## 技术概述

I/LM 是基于电厂中与系统有关的观点提出的。对锅炉热力性能的基本认识是通过采用内部先进燃料化学技术的计算机模拟及  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  的排放和流入工质的能量而得到的。同时也需要给出设定的空气预热器的泄漏率，当地环境大气中的  $\text{O}_2$  百分含量，和给定的空气/燃料比。数据的稳定性，是对特定“燃料因子”应用多维最小化技术所必须的。这可导出锅炉在燃料，燃烧所需空气，渗漏与排放方面的质量平衡，而不用重复地直接测量燃料或废气的排放量。

I/LM 在确定锅炉效率  $\eta_B$  时，将其分成两部分，燃烧效率和锅炉吸收效率，同时定义了高热值 (HHV) 和低温值 (LHV) 两种形式：

$$\eta_{B-HHV} = \eta_{C-HHV} \eta_A \quad (1)$$

$$\eta_{B-LHV} = \eta_{C-LHV} \eta_A \quad (2)$$

燃烧效率是通过生成物焓  $\text{HPR}_{\text{Act}}$  和反应物焓  $\text{HRX}_{\text{Act}}$  及燃烧修正项  $\text{HBC}$  来定义的。它们都可以进行高精度的计算（讨论见后）。锅炉吸收效率与特定的“非化学及显热损失”， $\text{HNSL}$  有关， $\text{HNSL}$  是用 ASME PTC4.1 热损失算法中一小部分来确定的<sup>(6)</sup>。 $\eta_A$  一般大于 95%，这样在分项中有大误差而不对  $\eta_B$  产生严重影响。

计算出总的锅炉效率后，燃烧燃料的流率， $m_{\text{AF}}$ ，可以由更传统的效率定义（输出/输入）计算出：

$$m_{\text{AF}} = \text{BBTC} / [\eta_{B-HHV} (\text{HHVP} + \text{HBC})] = \text{BBTC} / [\eta_{B-LHV} (\text{LHVP} + \text{HBC})] \quad (3)$$

注意由  $\eta_C$  和  $\eta_A$  组成的锅炉总效率的定义与传统的输出/输入形式是一致的<sup>(7)</sup>。

一旦燃料流量被确定下来，化学计算方法就可以用来解决锅炉质量流量的问题。稳定机组的热转化率（高热值）如下：

$$\text{HR}_{\text{HHV}} = m_{\text{AF}} (\text{HHV} + \text{HBC}) / W_{\text{output}} \quad (4)$$

$$\text{HR}_{\text{HHV}} = \text{BBTC} / (\eta_{B-HHV} W_{\text{output}}) \quad (5)$$

或以 LHV 形式表示： $\text{HR}_{\text{LHV}} = \text{BBTC} / (\eta_{B-LHV} W_{\text{output}})$ 。注意，例如当燃料流动中误差达 20% 时，尽管这在测量排放流量时，对于某些管理部门来说是可以接受的，但是这会导致一约  $2110 \Delta \text{kJ}/\text{kWh}$  的热转化率误差！这个明显的偏差说明独立且精确测量燃料流量的必要性。美国环保局认为在可接受的废气排放量范围内，对质流和能流进行封闭计算的条件相互对立。的确，如果社会目标旨在释放最少的  $\text{CO}_2$  和其它排放物而同时产生足够的能量，并且因此降低燃料能流，那么对系统进行深入的热动力学研究是很有必要的。

## 燃烧方程

下面所给出的燃烧方程是用来说明渗漏和“系统参数”等术语的。注意方程 (6) 中方括号的使用是为了表达上的清楚：例如表达式“ $\alpha_2 [\text{H}_2\text{O}]$ ”是指燃料中水分的摩尔数为  $\alpha_2$ 。燃烧方程所包含的参数是以 100 摩尔干气态产物为基准的。

$$\begin{aligned} & x\{\alpha_0 [C_{\text{YR}} H_{\text{ZR}}] + \alpha_1 [N_2] + \alpha_2 [H_2O] + \alpha_3 [O_2] + \alpha_4 [C] + \alpha_5 [H_2] + \alpha_6 [S] + \alpha_7 [CO_2] + \alpha_8 [CO] \\ & + \alpha_9 [H_2S] + \alpha_{10} [ash]\}_{\text{As-Fired Fuel}} + \{(1 + \beta)(a[O_2] + a\phi_{\text{Act}} [N_2] + b_A [H_2O])\}_{\text{Air}} \\ & + b_z [H_2O]_{\text{In-Leakage}} + \{(1 + \gamma)b_{\text{PLS}} [CaCO_3]\}_{\text{As-Fired PLS}} \\ & = d_{\text{Act}} [CO_2] + g_{\text{Act}} [O_2] + h[N_2] + j_{\text{Act}} [H_2O] + k_{\text{Act}} [SO_2] + \{e_{\text{Act}} [CO] + f[H_2] + l[SO_3] + m[NO] + P[n_2o] \\ & + q[NO_2] + t[C_{\text{YP1}} H_{\text{ZP1}}] + u[C_{\text{YP2}} H_{\text{ZP2}}]\}_{\text{Minor Components}} + \sigma b_{\text{PLS}} [CaSO_4 \cdot zH_2O] + v[C_{\text{Re fuse}}] \\ & + \{(1 - \sigma + \gamma)b_{\text{PLS}} [CaO]\}_{\text{Excess PLS}} + x\alpha_{10} [ash] + \{\beta a [O_2] + \beta a \phi_{\text{Act}} [N_2] + \beta b_A [H_2O]\}_{\text{Air Leakage}} \end{aligned} \quad (6)$$

方程 (6) 所包含的术语允许对任何排放数据的组合进行稳定性研究，尤其是基本渗流量  $d_{\text{Act}}$ ， $g_{\text{Act}}$ ， $j_{\text{Act}}$  和系统参数  $\beta$ ， $\phi_{\text{Act}}$  和  $R_{\text{Act}}$ ，这一点很明显，例如下面的公式可直接由这些项得到：

在空气预热器出口，或“烟囱”侧

$$CO_2 \text{ 泄漏量} \equiv d_{Act}$$

$$\text{氧泄漏量} \equiv G_{Act} = g_{Act} + \beta a$$

$$\text{水分泄漏量} \equiv J_{Act} = j_{Act} + \beta b_A$$

$$\text{总泄漏量} = \sum n_i + \sum n_{ii} + \beta(a + a\phi_{Act} + b_A)$$

在空气预热器入口，或“锅炉”侧：

$$CO_2 \text{ 泄漏量} \equiv R_{Act} d_{Act}$$

$$\text{氧泄漏量} \equiv R_{Act} g_{Act}$$

$$\text{水分泄漏量} \equiv R_{Act} j_{Act}$$

$$\text{总泄漏量} = R_{Act} (\sum n_i + \sum n_{ii})$$

当然，没有泄漏的干燃烧空气为  $(a + a\phi_{Act})$ ，而泄漏的干态空气表示为  $\beta(a + a\phi_{Act})$ 。

系统参数  $\beta$ ,  $\phi_{Act}$  和  $R_{Act}$  的重要性在于这些参数使空气预热器任一侧数据都可以在 I/LM 中得以体现，随意组合，保证整体的稳定性。这使得以 100 摩尔干态气体为基准的化学计量方程 (6)，在空气预热器的两边守恒：干态烟囱侧气体=干态锅炉侧气体=100 摩尔。

注意空气预热器稀释系数  $\beta$  取决于  $\phi_{Act}$  和  $R_{Act}$ 。从 ES 公司所进行的大量的监测试验中发现参数  $\phi_{Act}$  是可以变化<sup>[8]</sup>，这可以归因于烟气向燃烧空气流的内渗，或由于气压的变化引起的电厂燃烧所需氧气的稀释。根据 NASA 的数据，在理想条件下  $\phi_{Act}$  的值为 3.7737 而不是基础热力学课本中的 3.76。

## 燃料化学性质的确定

矿物燃烧最主要的气体释放物是  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  和  $SO_2$ 。燃料碳和氢的相对浓度分别为  $\alpha_4$  和  $\alpha_5$ ，它们与废气中  $CO_2$  和  $H_2O$  的相对浓度密切相关。另外，这些废气将受以下因素的影响：燃烧空气中的  $O_2$ （如空气/燃料比）；燃料的内在水分，内渗及燃烧的空气量，相对于给定的燃料和系统参数而言，废气中  $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_2$  和  $SO_2$  的摩尔份数一定。

以下元素的分子平衡可以由方程 (6) 得出。注意， $\Gamma_k$  是一种简单方便的数量组的表达方式，主要包括测得的废气量（已知值），这对于单个燃料元素产生很大的影响。假设燃料的初始摩尔数为  $x$ ，则用  $\Gamma_k$  表达的燃料的小项是复杂的。注意当  $x$  递减时，这些小项表达式可以忽略掉。方程 (7) ~ (16) 的  $\Gamma_k$  表达形式可以认为是已知的或可求解的量。湿煤中的基本成分认为是未知数，同样燃料的摩尔数  $\alpha_{kk}$  和  $x$  未知。许多燃煤或燃生物质的电厂用气态燃料助燃；其它燃用混煤的电厂，要经常调整其硫分的含量，所有这些都都在本方法所涉及的范围之内。

$$x\alpha_1 = \Gamma_{N_2} - a\phi_{Act} \quad (7)$$

$$x(\alpha_2 + \alpha_5) = \Gamma_{H_2O} \quad (8)$$

$$x(2\alpha_3 + \alpha_2) = \Gamma_{O_2} \quad (9)$$

$$x\alpha_4 = \Gamma_{CO_2} \quad (10)$$

$$x\alpha_6 = \Gamma_{SO_2} \quad (11)$$

这里：

$$\Gamma_{N_2} = 1.0 - (d_{Act} + e_{Act} + f + G_{act} + k_{Act} + l + m/2 + q/2 + t + u) - \phi_{Act} (R_{Act} - 1.0) / [R_{Act} (\phi_{Act} + 1.0)] \quad (12)$$

$$\Gamma_{H_2O} = (J_{Act} - b_A \beta) + f + ZP_A t / 2 + ZP_A u / 2 + \sigma b_{PLS} z - b_Z - b_A - x(ZR\alpha_0 / 2 + \alpha_9) \quad (13)$$

$$\Gamma_{O_2} = d_{Act} + e_{Act} / 2 + (G_{Act} - a\beta) + (J_{act} - b_A \beta) / 2 + k_{Act} + 3l/2 + m/2 + p/2 + q + (3\sigma - 2 - 2\gamma + \sigma z) b_{PLS} / 2 - a - b_A / 2 - b_Z / 2 - x(\alpha_7 + \alpha_8 / 2) \quad (14)$$

$$\Gamma_{CO_2} = d_{Act} + e_{Act} + YP_A t + YP_B u + v - (1.0 + \gamma) b_{PLS} - x(YR\alpha_0 + \alpha_7 + \alpha_8) \quad (15)$$

$$\Gamma_{SO_2} = k_{Act} + l + \gamma \phi_{PLS} - x \alpha_9 \quad (16)$$

这些方程中下标“Act”表示对排放气体测量的实际值。方程(13)和(14)中的  $J_{Act}$  和  $H_2O$  排放的摩尔数有关，它可作为一个常数或通过误差修正后的测量数值输入，下面将讨论。[参考文献(2)中给出了用于不同煤种及其它燃料时建议使用的仪器]。其它数据或者根据所输入的初始数据内在模型进行精解计算，或者由于其并不重要而在计算时认为是常数。

若给定准确的燃料流量，通过求解燃料的化学性质可得到热值，那么如方程(7)~(16)的化学计量关系式一定可以求解出。方程组中的每一个方程都不是孤立的。实际上不管如何进行代数运算，都必须注意以下两个基本问题：1) 当燃料量  $\alpha_{kk}$  未知时，即使不考虑灰的影响，那么至少还有一个未知数，燃料的摩尔数  $x$  (或废气摩尔数)。2) 对于一种不确定的固体物质，灰分无法通过测量气态排放物求出，而且更不可能测量灰的连续排放流量。

第一个问题的解决是要将  $\alpha_{kk}$  简化成以 1 摩尔干燥无灰基 (MAF) 基准量，消除自身水分和灰分两种组分的影响，然后代入燃料氢、氮和氧的 MAF 摩尔份数，作为炭的函数，进行代数求解  $\alpha_{MAF-kk}$ 。这样将一个由 5 个方程组成的含有 5 个以上未知数的系统简化成含有未知数  $\alpha_{MAF}$ ， $\alpha_{MAF-4}$  和  $\alpha_{MAF-2}$  的 3 个方程式。

$$\alpha_{MAF-4} = -\Gamma_{CO_2} (A_5 - 2A_3) / [\Gamma_{CO_2} (B_5 - 2B_3) - \Gamma_{H_2O} + \Gamma_{O_2}] \quad (17)$$

$$\alpha_{MAF-2} = (\alpha_{MAF-3} \Gamma_{H_2O} - \alpha_{MAF-5} \Gamma_{O_2}) / (\Gamma_{O_2} - \Gamma_{H_2O} / 2) \quad (18)$$

$$X_{MAF} = \Gamma_{CO_2} / \alpha_{MAF-4} \quad (19)$$

$A_i$  和  $B_i$  由相关的燃料数据得到，如氢可由下式给出：

$$\alpha_{MAF-5} = A_5 + B_5 \alpha_{MAF-4} \quad (20)$$

实际中还涉及到了二次方项 (如  $C_5 \alpha_{MAF-4}^2$ )，但很少应用。这些公式构成了一个已被证实了的函数关系  $\alpha_{MAF-5} = f(\alpha_{MAF-4})$ ，对于给定的煤种，都可以建立这种关系。更一进步，为了与以后的论述相一致，I/LM 要求所有可测量的废气通过  $\Gamma_k$  表达式与煤中的主要成分结合起来。经验表明，方程(20)的函数关系很容易得到，因为 H:C 化学键仅次于 C:C 键而起主要作用。实际上煤的典型的多变性不在于它的 MAF 化学性质，而在于它所含的水分和灰分。次要项如燃料硫的计算，是根据实际测取的排放数据进行的，这些数据均基于燃料的 MAF 基准。为了提高系统的收敛性，将方程(8)中的  $x$  代入方程(9)中求得燃料水分，再由方程(9)可求得燃料氧。

第二个问题，对灰分的处理要对整个系统进行检查。影响灰分的单一系统同样会对燃料热值产生影响。因此，在化石燃料燃烧系统中，满足这种灵敏度的理想的系统参数是空气/燃料比，当然，这种信号指示的使用需要规范化，湿基燃烧空气/燃料比 AF 定义为：

$$AF = (m_{Air} + m_{Moisture}) / m_{AF} \quad (21)$$

$$AF = (1.0 + \beta) [(a + a\phi_{Act}) N_{Air} + b_A N_{H_2O}] / (x N_{AF}) \quad (22)$$

将方程(22)中的  $x N_{AF}$  项展开，应用 MAF 燃料摩尔数的定义可得到。

$$x_{MAF} \equiv x / (1.0 + \alpha_{MAF-2} + \alpha_{MAF-10}) \quad (23)$$

$$\alpha_{MAF-kk} \equiv \alpha_{kk} (1.0 + \alpha_{MAF-2} + \alpha_{MAF-10}) \quad (24)$$

将上述方程代入方程(22)，消去  $(1.0 + \alpha_{MAF-2} + \alpha_{MAF-10})$  项，产生下面形式的方程，从而可以求出燃料灰分：

$$x N_{AF} = x_{MAF} \left( \sum_{kk=0-9} N_{kk} \alpha_{MAF-kk} + N_{10} \alpha_{MAF-10} \right) \quad (25)$$

$$AF = (1.0 + \beta) [(a + a\phi_{Act}) N_{Air} + b_A N_{H_2O}] / \left[ x_{MAF} \left( \sum_{kk=0-9} N_{kk} \alpha_{MAF-kk} + N_{10} \alpha_{MAF-10} \right) \right] \quad (26)$$

简化方程(26)求得 MAF 燃料灰分  $\alpha_{MAF-10}$ ，产生下面的结果。在方程(27)中使用了方程(29)中定义的标准燃料/空气比； $N_{10}$  作为一个常数输入。

$$\alpha_{MAF-10} = \Gamma_{Ash} \alpha_{MAF-4} / (\Gamma_{CO_2} N_{10}) - \sum_{kk=0-9} N_{kk} \alpha_{MAF-kk} / N_{10} \quad (27)$$

这里：

$$\Gamma_{Ash} \equiv (1.0 + \beta) \left[ (a + a\phi_{Act}) N_{Air} + b_A N_{H_2O} \right] / AF_{Act} \quad (28)$$

$$AF_{Act} \equiv AF_{input} \left( AF_{Ref1} / AF_{Ref2} \right) \quad (29)$$

$$a = (\Gamma_{N_2} - x_{MAF} \alpha_{MAF-1}) / \phi_{Act} \quad (30)$$

变量  $AF_{Act}$  的规范化涉及到信号输入  $AF_{input}$ ，基准信号  $AF_{Ref1}$  和  $AF_{Ref2}$ 。

值得注意的是确定燃料灰分的方法可以使得燃料水分  $\alpha_{MAF-2}$  的误差与燃料灰分  $\alpha_{MAF-10}$  的误差相抵消。任何给定的量  $x\alpha_{kk}$ （湿基）必须与  $x_{MAF}\alpha_{MAF-kk}$  相平衡；否则根据方程（6）在计算空气/燃料比时，湿基与 MAF 的转换将导致计算结果的离散。

## 热值的确定

在联机计算时，MAF 燃料成分的改变可以引起热值  $\Delta HHV_{MAF-Ref}$  的变化，方程（31）的建立用到一个参考的 MAF 基准热值，涉及到了燃料浓度的平均值，实际燃烧的热值如下：

$$\begin{aligned} HHV_{MAF-delta} = & HHV_{MAF-Ref} - 2.3260(-178387.18\alpha_{MAF-3} + 183591.92\alpha_{MAF-4} \\ & + 78143.68\alpha_{MAF-5} + 127692.00\alpha_{MAF-6})_{Ref} / N_{MAF-Ref} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} HHV_{MAF-uncorr} = & 2.3260(-178387.18\alpha_{MAF-3} + 183591.92\alpha_{MAF-4} \\ & + 78143.68\alpha_{MAF-5} + 127692.00\alpha_{MAF-6})_{Actual} / N_{MAF-Actual} \end{aligned} \quad (32)$$

$$HHV_{MAF} = HHV_{MAF-uncorr} + \Delta HHV_{MAF-delta} \quad (33)$$

$$HHV_{AF} = HHV_{MAF} (1.0 - WF_{dry-10}) (1.0 - WF_2) \quad (34)$$

不管确定热值的方法是多么精细，误差总是避免不了的。然而，由热值 HHV 引起的误差总会反面影响计算的燃料流量  $m_{AF}$ 。对锅炉能流  $m_{AF}HHV$  的净影响会逐渐减小，误差将会相互抵消，这种影响导致了对热值差的影响淡化了 5 倍。例如，计算时 HHV 变化+0.52%将引起燃料流量-0.61%的变化，而锅炉效率和整体机组热转化率变化+0.12%  $\Delta HR$ 。在定义锅炉效率时，用 HHV 来表达反应物的生成焓  $HRX_{Act}$ ，而 HHV 总会出现在分母中。这并不是要降低燃料流在确定排放流过程中的重要性，以及它在整个过程控制中精确应用的必要性。

## 误差分析

上述计算是在计算机程序 Ex-Foss, FUEL & HEATRATE 上执行的<sup>(7)</sup>。通过对化学配比和燃料质量流量的收敛分析后，I/LM 将初步测量值  $d_{Act}$ ， $J_{Act}$  和  $AF_{Act}$  与计算值  $d_{Cal}$ ， $J_{Cal}$  和  $AF_{Cal}$  相比较来考虑测量过程中不合理的地方，这些计算值通过系统模拟程序 Ex-FOSS 计算得到。然而，这种比较只能说明整体的矛盾，而不能与不合理的系统参数，如空气预热器泄漏量 ( $R_{Act}$ ) 或燃烧空气中的  $O_2$  量 ( $A_{act}$ ) 相联系，从而失去了其联机应用的价值。应用多维最小化技术可以提高误差分析的完整性和实用性。

为了利用程序分析测量误差，I/LM 采用多维最小化技术来协调测量值和假设的排放数据 ( $d_{Act}$  和  $J_{Act}$ )，以及测量的和假设的系统参数（如  $AF_{Act}$ ， $R_{Act}$ ， $\phi_{Act}$ ），从而修正了燃料的构成。因为普遍采用氧化锆技术，工业氧气测量装置相对便宜了，所以假设的已知的氧气量可以在实践中验证，电厂工作人员可以在空气预热器的上游和下游放置较多的测氧装置以获得没有明显误差的结果。而且燃烧方程中的重要参数  $R_{Act}$  和  $\phi_{Act}$  也可以通过测氧仪确定。

为了减小空气预热器泄漏系数  $R_{Act}$  的误差，应首先测量锅炉本体和空气预热器之间管道内（和任何出灰设备下游）的  $CO_2$  以及烟囱中的  $CO_2$ 。如果没有足够的  $O_2$  探测器，那么测量  $O_2$  将有可能带来很大的误差。

对于给定的氧量，进行收敛分析后，此方法可以利用给定的参数来确定排放量以及系统参数误差（由程序 ERR-CALC 来完成）。这些参数包括 MAF 热值，和特定的“燃料因子”参数  $L_m$ ，它是 Roughton 在 1980 年出色的研究工作中提出来的<sup>(9)</sup>。Roughton 的研究说明对于同一地理区域的煤来说， $L_{Fuel}$  和 MAF

热值是基本不变的。例如，宾西法尼亚州烟煤的  $HHV_{MAF}$  偏差在 2.0%（而它的湿态  $HHV$  偏差为 20%），Roughton 发现对于宽范围的电站煤种，参数  $L_{Fuel}$  的误差范围为  $\pm 1.0\%$  时的可信度为 95%。对于从同一区域开采出的同级别的煤来说，这一点已经得以证明。Roughton 基于 MAF 定义  $L_{Fuel}$  为理论燃烧得到的干气态产物的质量被干燃料总能量相除得到的。 $L_{Fuel}$  和  $L'_{Fuel}$  用来表示  $d_{Act}$ ， $R_{Act}$  和  $\phi_{Act}$ ， $L_{Water}$  用来表示  $J_{Act}$ （排出水或其假设值）信号， $L_{Ash}$  用来指示  $AF_{Act}$  信号， $L_m$  以下列方式确定：

$$L'_{Fuel} = [x_{Dry-theor} N_{Dry-Fuel} + a_{Dry-theor} (1.0 + \phi_{Act}) N_{Dry-Air} - J_{theor} N_{H_2O} - x_{MAF-theo} \alpha_{MAF-10} N_{Ash}] / (x_{Dry-theor} N_{Dry-Fuel} HHV_{Dry}) \quad (35)$$

注意： $x_{Dry-theor} N_{Dry-Fuel} HHV_{Dry} = x_{MAF-theor} N_{MAF-Fuel} HHV_{MAF}$ 。

$$L_{Water} = J_{theor} N_{H_2O} / (x_{Dry-theor} N_{Dry-Fuel} HHV_{Dry}) \quad (36)$$

$$L_{Ash} = x_{MAF-theor} \alpha_{MAF-10} N_{Ash} / (x_{Dry-theor} N_{Dry-Fuel} HHV_{Dry}) \quad (37)$$

注意，若没有空气预热器泄漏则认为理论燃烧： $R=1.0$ ， $\beta=0.0$ ；从而  $J_{theor}=J_{theor}$  以及  $A_{theor}=0.209480$ 。应用 ERR-CALC 程序进行计算后可建立  $L_m$  作为实际输入的排放量或系统参数的函数关系。例如，下面建立了燃料因子的计算值  $L'_{Fuel}$  和  $CO_2$  排放量的关系式：

$$L'_{Fuel} = K_{11} + K_{12} d_{Act} + K_{13} d_{Act}^2 \quad (38)$$

方程（38）的建立是通过三种不同情况下改变  $CO_2$  ( $d_{Act}$ ) 和计算的  $L'_{Fuel}$ ，同时保持其它的排放气体或系统参数不变得到的。 $K_{11}$ ， $K_{12}$  和  $K_{13}$  是回归常数，同样，可得到其它的关系式。

$(L_{Water} + L_{Ash})$  作为  $J_{Act}$  的函数

$(L_{Water} + L_{Ash})$  作为  $AF_{Act}$  的函数

$L_{Fuel}$  作为空气预热器泄漏系数  $R_{Act}$  的函数。

$L_{Fuel}$  作为燃烧空气  $A_{Act}$  中  $O_2$  浓度的函数，这里  $A_{Act} = 1.0 / (1.0 + \phi_{Act})$ 。

I/LM 要自动解决包括参数范围在内的所有的这些关系式。计算发现  $L'_{Fuel}$  对  $CO_2$  排放量具有较高的灵敏度，这与 Roughton 对同一参数  $L_{Fuel}$  的计算结果相矛盾。Roughton 认为  $L_{Fuel}$  对  $R_{Act}$  和  $A_{Act}$  的灵敏度较高。他以干态燃料为基准，定义  $L_{Fuel}$  为理论燃烧产生的干态气体的质量  $x_{Dry-theor} N_{Dry-Gas}$  被干燃料的总能量  $x_{Dry-theor} D_{Dry-Fuel} HHV_{Dry}$  相除得到的。综合参数  $(L_{Water} + L_{Ash})$  作为  $J_{Act}$  和  $AF_{Act}$  的函数可以较好地敏化燃料水分和燃料灰分，其函数关系分别为  $L_{Water} = f(J_{Act})$  和  $L_{Ash} = f(AF_{Act})$ ，这种累加关系对于给定的燃料来说基本上是稳定的。

除了涉及到  $L_m$  等各参数外，本方法还涉及到燃料的热值（MAF，干基或湿基）。对于给定的煤种，有必要认为它的 MAF 热值具有稳定的特性，但是，如果煤样是专门用于进行试验以校正装置信号的话，则应用干基或燃烧（湿基）热值比较合适。所有这些构成了独立的误差函数  $F_m$ ，它们的集合的最小值便构成了目标函数。

$$F_m = [(L_m - L_{ref-m}) / L_{ref-m}]^2 \cdot [1.0 - \prod_{n=1,2,3} (HHV_n - HHV_{Ref-n})^2 / HHV_{Ref-n}^2] \quad (39)$$

$$\text{目标函数} = \sum F_m \quad (40)$$

这里  $L_m$  是根据实际数据计算得到的， $L_{Ref-m}$  是根据燃料样品得到的相应的参考数值； $HHV_n$  是计算的热值， $HHV_{Ref-n}$  是 MAF、干态或湿态基准相应的参考数值（如  $n=1, 2, 3$ ）。根据这个公式，电厂工程师有了一定的目标来选择五种排放气体中一种或所有及系统参数。而且，其它相关的废气或系统测量参数也应该涉及到，如  $O_2$  排放量  $[L_{Fuel} = f(g_{Act})]$ ， $SO_2$  排放量  $[L_{SO_2} = f(k_{Act})]$ ，以及指示的燃料质量流量  $[L_{Ash} = f(m_{AF-signal})]$ ，应注意的是这种误差分析必须根据所输入的燃料化学性质及系统参数利用 EX-FOSS 程序来执行。测量的排放气体并不输入 EX-FOSS（除  $O_2$ ），而仅影响计算的燃料化学性质。最后得到的是稳定的燃料流量，排放量，排放速率，锅炉效率及热转化率。本程序同样适用于低热值的情况。

确定了给定煤的燃料特性之后，需要进一步研究燃烧工况下燃料水分和燃料灰分的变化。对于任何给定的燃料，燃料水分可以保持不变，燃料灰分可以保持不变，参数之间应建立准确的函数关系，[如

$X_{MAF-10} = f(HHV_{MAF})$ ]; 或者将燃料水分或灰分作为未知数, 这取决于本方法所采用的程序。所有这些可能的变化都是方法中所涉及到的。

方程 (40) 中目标函数最小化的最佳处理方法是 Conjugate Gradient 方法<sup>(10)</sup>。它可以产生一系列表明最小误差的废气及系统参数, 从而修正系数可以定义为: 对  $CO_2$  为  $d_{Corr}/d_{Act}$ ; 指示的空气/燃料比为  $AF_{input} = AF_{corr}/AF_{Act}$  等。这种方法需要对方程 (39) 进行微分,  $\partial F_1/\partial d_{Act}$ ,  $\partial F_2/\partial J_{Act}$ ,  $\partial F_3/\partial AF_{Act}$ ,  $\partial F_4/\partial R_{Act}$  和  $\partial F_5/\partial A_{Act}$  均与方程 (39) 相吻合。当然也可以采用其它方法处理, 但许多研究发现, Conjugate 方法在输入/损失 (I/L) 燃烧独立方程上的应用具有极大的可靠性。

## 分析方法

### 锅炉效率

下面的讨论过程与 I/LM 密切相关。注意燃烧修正的定义非常严格, 并且只与反应物焓的修正值,  $HRX_{Act}$  有关系。HNSL 损失用于修正生成物焓  $HPR_{Act}$ 。

**吸收效率**,  $\eta_A$ , 是基于非化学能及显热 (平衡) 损失 HNSL 定义的, HNSL 是用了 PTC4.1 的几个程序估算出来的, HNSL 的定义如下:

$$HNSL \equiv L_\beta + L_p + L_{d/Fly} + L_{d/Prec} + L_{d/Ca} + L_r + W_{ID}/m_{AF} \quad (41)$$

无论对高位或低位热值进行计算, HNSL 与  $\eta_A$  一样都会有相同的数值结果。PTC4.1 中要注意的是:  $L_\beta$  参考的是总的 (修正过的) 高位热值输入 (HHVP+HBC), 而不是 HHV; PCT4.1 中,  $L_w$  与  $L_p$  是联在一起的;  $L_{d/fly}$  是飞灰的显热;  $L_{d/prec}$  是静电除尘器中的烟道飞灰显热,  $L_{d/Ca}$  是由喷入的石灰石产生的  $CaSO_4 \cdot zH_2O$  与  $CaO$  的显热。注意方程 (41) 中的所有项都是以单位燃烧燃料为基准计算的。对所有飞灰流量的数值检测, 是与燃料矿物组成检测相对的过程 (可以任意地重新校正燃料)。

对流与辐射因子  $\beta_{R\&C}$  可以用美国锅炉制造曲线 (PTC4.1) 确定, 也可以由 Gerhart 的研究<sup>(11)</sup> 或者直接由测量或判断获得。  $L_\beta$  的结果总是由高位热值确定。

$$L_\beta \equiv \beta_{R\&C} (HHVP + HBC) \quad (42)$$

然后  $L_\beta$  就可以通过 HNSL 用于计算高位或低位热值效率。

磨煤机的磨后粗料损失,  $L_r$ , 参考了排出燃料的总的 (修正值) 高位热值 ( $HHVP_{Rej} + HBC$ ), 排出的废料中包括凝结水。再进一步来看, 假设细磨过程会导致一定浓度的矿物质 (灰) 也进入磨后粗料, 这样燃料的化学性质就需要基于修正的燃料灰份摩尔数  $\alpha_{10-corr} = f(WF'_{Ash-AF})$  进行重新校正。这需要基于磨煤机下游灰的重量份额  $WF'_{Ash-AF}$ ; 而其自身依赖于废料与燃料的比值  $WF_{Rej}$ , 可用燃料中的灰  $WF_{Ash-Sup}$  及修正的热值:

$$WF'_{Ash-AF} = WF_{Ash-Sup} \cdot \left[ (1.0 - WF_{Rej} HHVP_{Rej} / HHVP_{Sup}) - (WF_{Rej} / WF_{Ash-Sup}) (1.0 - HHVP_{Rej} / HHVP_{Sup}) \right] / (1.0 - WF_{Rej}) \quad (43)$$

基于高位热值对废料损失进行的假设尽管对 HNSL 来说是方便的, 但它意味着由于燃料中水的潜热的差异必须对  $HRX_{Act-LHV}$  进行修正。应用于 LHVP 的修正在下文给出。注意,  $\alpha_{kk}$  与磨煤机下游的燃烧化学性质有关 (从高位热值到低位热值进行修正);  $\xi \equiv (1 - WF'_{Ash-AF}) / (1 - WF_{Ash-Sup})$ 。这些相同的过程都可应用于除去燃料灰分的洗煤过程。

$$\Delta H_{corr-LHV} = \Delta H_{fg-Cal/H_2O} (\alpha_0 ZR/2 + \alpha_2 + \alpha_5 + \alpha_9) N_{H_2O} (\xi - 1.0) / (\xi N_{AF}) \quad (44)$$

汽/气换热器的能量流动项,  $Q_{SAH}$ , 应该分配到 HBC 项, HBC 项是为包含该换热器的系统提供的。BBTC 还是以经典方式进行定义的。

引风机能量流动项  $W_{ID}$  分配给 HNSL, 在 HNSL 中热量传递给了外流的气流 (如引风机或再循环风机);  $HPR_{Act}$  必须通过 HNSL 进行修正。这样, 经过  $[-HPR_{Act-HHV} + HRX_{Act-HHV}]$  的处理, 燃料中的能量就可以适当地保留下来。

磨煤机能量流动项不予考虑，因为其间没有热量送给燃料。碾磨煤时只增加其表面的能量。在确定热值的过程中，增加的表面能量与任何内能的变化都已完全考虑在内了。如果使用 ASTM D2013 标准，样品须磨到 a#60 筛孔径（250 μ m）。事实上，如果用弹式量热计样品做模拟实际燃烧条件，就不会出现相冲突的情况。

估算完 HNSL 后，锅炉吸收效率就可以以高位或低位热值的基准参数确定。很容易证明：

$$[-HPR_{Act-HHV} + HRX_{Act-HHV}] = [-HPR_{Act-LHV} + HRX_{Act-LHV}]$$

$$\eta_A = 1.0 - HNSL / [-HPR_{Act-HHV} + HRX_{Act-HHV}] = 1.0 - HNSL / [-HPR_{Act-LHV} + HRX_{Act-LHV}] \quad (45)$$

**燃烧效率**可以以高位或低位热值为基准按如下方式确定。 $\eta_C$  涉及到燃烧过程中下游所有未燃尽的燃料（例如，由灰包裹着的碳粒）， $\eta_C$  还包括所有的空气，泄漏及燃烧水分等。

$$\eta_{C-HHV} = [-HPR_{ACT-HHV} + HRX_{ACT-HHV}] / (HHVP + HBC) \quad (46)$$

$$\eta_{C-LHV} = [-HPR_{ACT-LHV} + HRX_{ACT-LHV}] / (LHVP + HBC) \quad (47)$$

**锅炉效率**也可以以高位或低位热值为基准的形式确定。注意，锅炉效率的定义给出了燃烧修正与 HNSL 的定义，包括了热值的热力学意义。

$$\eta_{B-HHV} = \eta_{C-HHV} \eta_A \quad (48)$$

$$\eta_{B-LHV} = \eta_{C-LHV} \eta_A \quad (49)$$

燃料流量的计算必须区别对待两个效率：

$$m_{AF} = BBTC / [\eta_{B-HHV} (HHVP + HBC)] = BBTC / [\eta_{B-LHV} (LHVP + HBC)] \quad (50)$$

给定了所用模型的特性后，这样包含两种效率的计算就是一个纯数值的过程。

从上面可以看出，得出 HNSL 后，只剩下  $HPR_{Act}$ ， $HRX_{Act}$  及 HBC 三个基本量来完成锅炉效率的计算。这三个基本量将在下面的内容里介绍。在方程（51）~（56）中使用了最精确的热力学参数<sup>(12-14)</sup>。注意，方程（53）中的  $\Delta H_{f-Cal}^0$  要从标准状况 25°C 开始修正<sup>(15)</sup>。要完全理解包含  $HPR_{Act}$ ， $HRX_{Act}$  和 HBC 的那些公式，就要注意与各种物质有关的下标。例如，当考虑方程（51）中由燃烧产生的生成物水的数量  $n_{Comb-H_2O}$  时，水在  $T_{Cal}$  温度下的生成热必须根据边界条件（烟道）进行修正，即  $[h_{stack} - h_{f-Cal}]$ 。方程（54）和（55）中的反应物焓由  $T_{Cal}$  温度下的理想产物确定，然后进行燃烧修正。HHV 和 LHV 的差别也应注意。

### 生成物焓（ $HPR_{Act}$ ）

按高位热值计算：

$$HPR_{Act-HHV} \equiv \sum HPR_i + [n_{Comb-H_2O} (\Delta H_{f-Cal/liq}^0 + h_{Stack} - h_{f-Cal}) + n_{Fuel-H_2O} (h_{Stack} - h_{f-Cal}) + n_{Lime-H_2O} (h_{f-Stack} - h_{f-Cal}) + n_{CAir-H_2O} (h_{Stack} - h_{g-Cal}) + n_{Leak-H_2O} (h_{Stack} - h_{f-Cal})]_{H_2O} N_{H_2O} / (XN_{AF}) \quad (51)$$

按低位热值计算：

$$HPR_{ACT-LHV} \equiv \sum HPR_i + [n_{Comb-H_2O} (\Delta H_{f-Cal/vap}^0 + h_{Stack} - h_{g-Cal}) + n_{Fuel-H_2O} (h_{Stack} - h_{g-Cal}) + n_{Lime-H_2O} (h_{f-Stack} - h_{g-Cal}) + n_{CAir-H_2O} (h_{Stack} - h_{g-Cal}) + n_{Leak-H_2O} (h_{Stack} - h_{f-Cal})]_{H_2O} N_{H_2O} / (XN_{AF}) \quad (52)$$

其中： $HPR_i$ =烟道中实际的无水生成物 i 的焓值。

$$\equiv \left[ \Delta H_{f-Cal/i}^0 + \int_{T_{Cal}}^{T_{Stack}} dh_i \right] n_i N_i / (xN_{AF}) \quad (53)$$

$n_{Comb-H_2O}$  = 燃烧产生的烟道中（边界）的水的摩尔数。

$$\equiv x(\alpha_0 ZR/2 + \alpha_5 + \alpha_9) - f$$

$n_{Fuel-H_2O}$  = 由燃烧用燃料带进炉膛的内部和表面水分的摩尔数

$$\equiv j_{Act} - [b_A + b_Z + \sigma b_{PLS} z + x(\alpha_0 ZR/2 + \alpha_5 + \alpha_9) - f]$$

$n_{Lime-H_2O}$  = 排出的  $CaSO_4$  携带的水的摩尔数。

$$\equiv \sigma b_{PLS} z$$

$n_{CAir-H_2O}$  = 由送风及漏风进入炉膛的水的摩尔数。



$$\equiv b_A(1.0 + \beta)$$

$n_{Leak-H_2O}$  = 泄漏进炉膛的水的摩尔数

$$\equiv b_Z$$

$(h_{Amb} - h_{Cal})_{Air}$  = 相对于  $T_{Cal}$  温度下燃烧用空气的焓差。

$h_{f-Amb}, h_{g-Amb}$  = 在干球温度环境下的饱和水焓。

$h_{Stack-H_2O} = f(P_{stack-H_2O}, T_{Stack})$ , 其中  $P_{stack-H_2O}$  为单位摩尔温度下的水的分压力:

$$P_{Amb} (j_{Act} + \beta b_A) / (1.0 + j_{Act} + \beta b_A)$$

### 反应物的焓 (HPX<sub>Act</sub>)

以高位热值进行计算:

$$HRX_{Act-HHV} \equiv HHVP + HBC + HPR_{CO_2-ideal} + HPR_{SO_2-ideal} + (\alpha_0 ZR / 2 + \alpha_5 + \alpha_9)(\Delta H_{f-Cal/liq}^0 N)_{H_2O} / N_{AF} + HRX_{CaCO_3} \quad (54)$$

以低位热值进行计算:

$$HRX_{Act-LHV} \equiv (LHVP - \Delta H_{Corr-LHV}) + HBC + HPR_{CO_2-ideal} + HPR_{SO_2-ideal} + (\alpha_0 ZR / 2 + \alpha_5 + \alpha_9)(\Delta H_{f-Cal/vap}^0 N)_{H_2O} / N_{AF} + HRX_{CaCO_3} \quad (55)$$

其中:

$HPR_{CO_2-ideal}$  = 在  $T_{Cal}$  温度下完全燃烧生成的理想产物  $CO_2$  的能量。

$$\equiv \Delta H_{f-Cal/CO_2}^0 (\alpha_0 YR + \alpha_4 + \alpha_8) N_{CO_2} / N_{AF}$$

$HPR_{SO_2-ideal}$  = 在  $T_{Cal}$  温度下完全燃烧生成的理想产物  $SO_2$  的能量。

$$\equiv \Delta H_{f-Cal/SO_2}^0 (\alpha_6 + \alpha_9) N_{SO_2} / N_{AF}$$

$HRX_{CaCO_3}$  = 标准温度下喷入的纯石灰石  $CaCO_3$  的能量; 借助于方程 (53), 采用预处理后的石灰石产物的生成热  $\Delta H_{f-Cal/CaCO_3}^0$

$$\equiv \Delta H_{f-Cal/CaCO_3}^0 b_{PLS} (1.0 + \gamma) N_{CaCO_3} / (x N_{AF})$$

### 焓值的燃烧修正 (热力修正 HBC)

$$HBC \equiv C_P (T_{AF} - T_{Cal})_{Fuel} + (Q_{SAH} + W_{FD}) / m_{AF} + [(h_{Amb} - h_{Cal})_{Air} a(1.0 + \beta)(1.0 + \phi_{Act}) N_{Air} + (h_{g-Amb} - h_{g-Cal})_{H_2O} b_A (1.0 + \beta) N_{H_2O} + (h_{Steam} - h_{f-Cal})_{H_2O} b_Z N_{H_2O} + C_P (T_{Amb} - T_{Cal})_{PLS} b_{PLS} (1.0 + \gamma) N_{CaCO_3}] / (x N_{AF}) \quad (56)$$

## 第二定律分析

I/LM 对于电厂运行人员的重要意义在于它可以确定燃料的化学性质, 热值及燃料流量。同样这些数据为完成整个系统的质量和能量平衡提供了方便条件。给出这些结果, 就可计算出燃烧消耗指数 (FCI) 及相关的差值  $\Delta FCI$  (5, 16), 使用燃料消耗指数差值数据可使运行工程师立即判断出系统中哪一部分或过程消耗的燃料是多还是少, 在给定的功率水平下, 燃料是否达到平衡 (目标) 消耗。自 1991 年以来, FCI 已经在美国及其它地区的 16 个电厂中得到应用。

输入系统的总㉔及总能量, 只有不可逆项与输出功两种结果。这可由方程 (58) 表示, 总㉔值与输入能量定义为  $G_{in}$ 。

$$G_{in} \equiv m_{AF} g_{Fuel} + m_{Air} g_{Air} + \sum G_{misc} + \sum W_{Pump} + W_{FD} + W_{ID} \quad (57)$$

$$G_{in} = \sum I_i + W_{output} \quad (58)$$

方程 (58) 是热力学第二定律在电厂中应用的一个清楚表述。从这个概念来说, 燃料消耗指数可以通过  $G_{in}$  简单地分为几个独立的部分或过程以及功率产出。当使用这些表述时, 区分说明输入功率项与发电机

输出电功是非常重要的。

燃料消耗指数是一个无量纲数值。它给出了各个部分及过程中相应于总㊟值与输入系统的能量的㊟值及功消耗。其中，燃料的总㊟值  $m_{AF} G_{Fuel}$  占了大部分比例。基于方程 (58)，FCI 也定义许多无功部分，(例如：燃烧过程，再热器，过热器等)：

$$FCI_j \equiv 1000 \frac{I_j}{G_{in}} \quad (59)$$

对发电过程：

$$FCI_{Power} \equiv 1000 \frac{W_{output}}{G_{in}} \quad (60)$$

$\Delta FCI$  与热转化率偏差对每个独立部分与过程都分别有定义：

$$\Delta FCI_j = [FCI_j]_{Bogey} - [FCI_j]_{Actual}, @ W_{output}; \text{ 为电厂运行人员提供在线监测} \quad (61)$$

每个实际的非目标性过程。

递增的热转化率  $hr_j$  由  $FCI_j$  推得；对高位热值计算如下：

$$3.60 FCI_j m_{AF} (HHVP + HBC) / W_{output} \text{ 详见参考文献 (5),}$$

$$\Delta hr_j = [hr_j]_{Actual} - [hr_j]_{Bogey}, @ W_{output}, \text{ 为电厂运行人员提供在线监测} \quad (62)$$

每个实际的非目标性过程。

$$\Delta HR = \sum \Delta hr_j \quad (63)$$

$$\Delta HR \equiv HR_{Actual} - HR_{Bogey}, @ W_{output}; \text{ 实际的非目标性导热效率偏差的经典定义。} \quad (64)$$

注意增量 ( $\Delta HR < 0$ ) 是与  $\Delta I_j$  成比例的。

作为重要的数值处理应用： $\sum FCI_j = 1000$ ，则  $\sum \Delta FCI_j = 0$ 。进一步讲，这些技术处理，保证了联机计算得到的系统热转化率  $[hr_j]_{Actual}$  的总和必须与经典定义  $HR_{Actual}$  的值相同。而且，这些技术也可用于确定平衡数据是否与  $\Delta FCI_j$  有关，这样， $\Delta hr_j$  就确实可以应用于监测系统了。

## 验 证

### 热值校验

为了定性检验 I/LM，也为了证实燃料因子  $L_{Fuel}$ ， $L_{Water}$  和  $L_{Ash}$  能否视为常数，我们做了 1200 次元素分析。数据来自宾夕法尼亚州大学的煤与有机岩石学实验室。从无烟煤到 B 类褐煤的全部煤种都考虑在内了。数据按照 ASTM D388 标准进行分析评级，而不考虑它的矿产地。事实上，I/LM 经过了数百种煤种的验证。例如，代表 658 个样本的 hvAb, hvBb 与 hvCb 样品是从 384 种不同矿种中得到的。

其中还包括了四个特殊煤种。有 22 个 B 类褐煤的样例来自希腊公共能源部门 (外加 3 种 B 类褐煤来自宾州大学)。来自怀俄明州坎贝尔的煤种也包括在内，因为它们不同于通常将其划分的  $m_{vb}$  与  $l_{vb}$  的其它煤种，现在根据最新的 ASTM D388 标准，称之为次烟煤。有 61 个煤样来自宾州的科尔沃，也叫做“glob”，它们代表了以前采矿中的废弃物，是一种在宽范围内 MAF 化学性质，灰分含量与湿态热值发生变化的煤种 (不包括来自宾州的)。hvBb 样例中的伊利诺斯州#5 煤，是做为一组重复验证 I/LM 数据潜在稳定性的煤种来分析的。

为方便解释，MAF 燃料氢与 MAF 燃料碳之间必须建立起对应关系。下面是一个相互关系的很好例证：

$$\alpha_{MAF-5} = -0.9296\alpha_{MAF-4} + 0.9248; R^2=0.9905, \text{ 对于无烟煤。}$$

$$\alpha_{MAF-5} = -0.8713\alpha_{MAF-4} + 0.8498; R^2=0.9052, \text{ 对于 A 类次烟煤。}$$

$$\alpha_{MAF-5} = -3.6599\alpha_{MAF-4}^2 + 3.5636\alpha_{MAF-4} - 0.5431; R^2=0.8973, \text{ 对于 B 类褐煤。}$$

利用给定范围内得到的参考数据，验证过程首先要根据单个元素分析形成稳定的燃烧排放，然后返回

到平均的燃料化学性质并计算出排放量，I/LM 就可推算出燃料的化学性质与热值。这些计算是在给定 O<sub>2</sub> 量并且系统参数由未修改的标准 I/LM 程序得出的情况下进行的。然后，这些计算在设定排放量或/和系统参数偏差（设备偏差）的情况下重复一遍，然后使用多维最小化技术进行修正。结果表明在 20%的偏差内，没有明显的误差。（此后，EX-FOSS 有时会出错而出现不现实的配比系数）。结果列出在图 1 和表 1 中。如表 1 所示，在多数区段内，燃烧（湿）热值变化的范围很大。基本燃料因子 L<sub>Fuel</sub> 的变化却很小。对于 hvAb 煤类（含 317 个煤样），L<sub>Fuel</sub> 的变化只有 0.13%，最大的变化发生在 hvbC 煤类中，为 0.39%。15 个区段与样例群中，L<sub>Fuel</sub> 的平均变化量为 0.15%。15 个区段与煤样组中，估算的燃烧热值的标准偏差平均值为 1.87%，绝对误差平均值为 1.42%。

这些定性分档的研究，其目的并不是要证明热值自身的准确性，而是要：1) 验证如果计算准确，燃料因子 L<sub>Fuel</sub> 将是一个常数。2) 验证 I/LM 并使之有效。精确性是通过独特的煤样试验分析验证的，例如，科尔沃、伊利诺斯的煤样。

表 1 煤的基本数据与分析结果汇总  
(标准偏差以  $\pm \Delta kJ/kg$  或  $\pm \Delta gm/10^6 J$  计)

煤种	有效分析次数	燃烧时高位热值范围 (kJ/kg)	MAF 高位热值平均值 (kJ/kg)	燃料因子 L <sub>Fuel</sub> (gm/10 <sup>6</sup> J)	燃料因子 L <sub>Water</sub> +L <sub>ash</sub> (gm/10 <sup>6</sup> J)	预测燃烧高位热值标准偏差 (%)
无烟煤 (an)	29	27693~32443	34379.49 ±610.92	355.78 ±0.70	9.119 ±1.61	1.39
半无烟煤 (sa)	16	24149~33162	35339.36 ±528.96	345.70 ±0.08	14.974 ±2.98	2.61
低挥发份烟煤 (lvb)	89	20043~34653	35807.81 ±1013.66	340.85 ±0.17	15.671 ±4.36	2.07
中挥发份烟煤 (mvb)	84	24697~35325	35843.57 ±1142.55	338.18 ±0.18	16.470 ±2.21	2.06
高挥发份 A 类烟煤 (hvAb)	317	25235~34369	34941.61 ±682.33	336.17 ±0.42	18.052 ±2.38	1.91
高挥发份 B 类烟煤 (hvBb)	152	23034~31780	33393.31 ±708.62	336.67 ±0.68	18.048 ±2.56	1.74
高挥发份 C 类烟煤 (hvCb)	189	22011~29337	32051.21 ±1018.02	337.31 ±0.67	19.440 ±2.39	1.93
A 类次烟煤 (subA)	35	17987~26654	30521.38 ±827.01	338.89 ±0.46	18.306 ±4.30	1.84
B 类次烟煤 (subB)	56	17929~25956	29681.23 ±1461.33	338.38 ±0.49	20.052 ±3.69	1.98
C 类次烟煤 (subC)	53	15903~25530	28990.89 ±1461.33	339.07 ±1.32	22.085 ±4.60	2.81
A 类褐煤 (ligA)	76	14756~19569	28033.72 ±964.80	342.44 ±0.66	21.217 ±3.51	2.01
B 类褐煤 (ligB)	25	6498~7078	23457.75 ±418.89	329.31 ±0.91	30.718 ±2.45	3.11
怀俄明坎贝尔煤 (1/mvb->subA)	13	14214~19329	27366.65 ±1067.23	356.78 ±0.41	22.627 ±4.09	0.92
宾州科尔沃煤 (glob)	61	15612~20515	32520.85 ±642.77	348.03 ±0.37	36.552 ±2.67	1.25
伊利诺斯#5 煤 (hvBb)	7	23811~28098	33357.17 ±172.10	337.73 ±0.12	20.675 ±2.67	0.38

**I/LM 技术:  
热值分析-对所有煤种**

**实验报告, kJ/kg (湿基)**

**I/LM 计算值, kJ/kg (干燥基)**

图 1 (P16)

作者认为宾州的数据具有良好的稳定性。这就是说，这些数据的分析显示了“外围”热值点的惊人数值（不含扩散偏差）。在 1321 个可用的最终分析中，1216 个来自宾州，119 个作为不合理数据而废弃掉了（其中 111 个来自宾州，5 个来自科尔沃，3 个来自希腊），废弃率为 9%。当计算值与汇总来的数据间误差超过 5% 时，就将之废弃。尽管这个标准看起来似乎是不守恒的，但实际上并非如此。在 119 个废弃的分析中，82 个属于中高挥发份烟煤，一半是属于 hvCb 的范围。值得注意的是，典型的方法可以对样本数据的标识示踪并可以分析有较高燃料水分的样例。废弃的分析可以编成组，如同下面所打印出的分析结果一样（HHVSTUDY.EXE, Btu units）。这就可以解释这些分析被废弃的原因在于怎么能对这些样例加热以去除燃料水分（基本分析水分），这样会严重影响高挥发份燃料。所有废弃样例的热值相对于计算值偏低，与腐蚀性加热量相一致。

Case No.	Date Stamp	Reported HHV(wet) (Btu/lb)	Input/Loss HHV(wet) (Btu/lb)	Error %	Fuel Factor (lb/m-Btu)	WAX Factor (lb/m-Btu)
88	11/15/76	11475.	11491.	-0.14	786.70	46.00
89	11/15/76	11042.	1.960.	0.74	786.19	44.76
90	11/15/76	10557.	10783.	-2.14	786.19	53.25
91	11/15/76	10506.	10597.	-0.87	786.48	49.52
92	11/15/76	9641.	10645.	-10.42*	786.27	53.74
93	11/15/76	9304.	10774.	-15.81*	784.63	54.59
94	11/15/76	9010.	10719.	-18.97*	785.76	55.78
95	11/15/76	9753.	10643.	-9.13*	784.71	55.08

\*废弃样品

当我们研究这些分析时，相对于如何确定热值并应用于效率计算中，又有了额外的发现。因为在计算效率的方程中优先使用了热值，热量产生的温度  $T_{Cal}$  被忽略掉也就不足为奇了。苯甲酸用于校准现代的弹筒量热器，它对燃烧热的乘法修正作用是非常小的<sup>(17)</sup>。

$$1.0 + 45.0 \times 10^{-6} (T_{Cal} - 25^{\circ}C); \text{ 苯甲酸。}$$

虽然是 20 世纪 20 年代建立起来的，但作者还是证实了这种修正方法 ( $48.5 \times 10^{-6}$ )。然而，我们不能设想对于给定的燃料热值，会对温度同样的不敏感。为了判断这样的影响，针对高位热值对温度的敏感性问题，我们对与高挥发份 A 类烟煤和 C 类次烟煤有关的燃料的平均化学性质进行了分析。这个分析的一部分应用了下面的热容修正公式<sup>(18)</sup>：

$$C_{P/coal} = 0.7913WF_C + 3.659WF_H + 0.9002WF_S + 1.507WF_O + 1.754WF_N + C_{P-H_2O}WF_{H_2O} + 0.7536WF_{Ash}, \text{ kJ / kg} \cdot ^{\circ}C$$

除了热量修正形式，（以  $(\partial U / \partial T)_v$  修正）典型的乘法修正式如下：

$$1.0 + 97.3 \times 10^{-6} (T_{Cal} - 25^{\circ}C); \text{ hvAb 煤(水分含量 2.40\%)}$$

$$1.0 + 270.6 \times 10^{-6} (T_{Cal} - 25^{\circ}C); \text{ subC 煤(水分含量 24\%)}。$$

量热温度  $T_{Cal}$  的影响及可能对它的误用，可以用 EX-FOSS 确定。注意在方程 (53) 中， $\Delta H_{f-Cal}^0$  是在  $T_{Cal}$  温度下进行精确计算的（不是  $25^{\circ}C$  也不是 PTC4.1 中建议的  $T_{RA}$  温度）。在 EX-FOSS 情况中的唯一变化就是  $T_{Cal}$ （热值是不可变的）。其结果对燃煤机组来说一般有 -0.2% 到 -0.3% 的锅炉效率误差  $\Delta \eta_B$ （ $25^{\circ}C$  到  $20^{\circ}C$ ），对燃天然气的锅炉来说有 -0.4% 的锅炉效率误差  $\Delta \eta_B$ （ $25^{\circ}C$  或  $15.56^{\circ}C$ ）。注意，对于任何给定的，由 PTC4.1 提供的参考空气温度造成的影响，由 PTC4.1 程序和 EX-FOSS 方法计算得到的各自的灵敏度都不能超过 0.07% 的锅炉效率误差  $\Delta \eta_B$ 。然而，如果允许温度变化的话，则每  $20^{\circ}C$  温差就会对  $T_{RA}$  产生 -1.080%  $\Delta(\eta_{B-4.1} - \eta_{B-EXF})$  的影响。这将是一个很重要的影响因素，所以  $T_{RA}$  温度不允许改变[讨论见参考文献 (4)]。

## 燃料流量验证

我们花费了 11 年的时间来开发与验证 I/LM。它是以开发封闭计算技术开始的。封闭计算技术与测试计划有关，是为提高热转化率措施提供证据证明其有效而开发的<sup>(18)</sup>，在这样的提高热转化率的目标工程中，测试变成了对确定燃料与排放流量的特殊验证。燃气电厂对于燃料可以被精确独立地测量并能与 I/LM 的结果进行比较，更为感兴趣。

在 20 多个电厂的测试中对气态燃料进行了比较。1994 年在南加州奥蒙德海滩 2#机组进行了一个最细致的测试，包括在宽负荷范围内进行的一系列的稳态试验。表 2 中给出了除最低燃料流量的所有测试结果。这些结果表明平均误差为 0.19%。再者，对于整个系统：锅炉、透平循环和发电机的数据都是由测试设备输入的。在这些测试中，H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 量是基于已知的燃料组成进行计算的。

表 2 稳态燃料流量比较

试验序号	机组总容量 (MW)	I/L 技术 测试燃料流量 (10 <sup>3</sup> 标 ft <sup>3</sup> /hr)	电厂实际燃料流量 (10 <sup>3</sup> 标 ft <sup>3</sup> /hr)	偏差 (%)
1	770.18	6867.64	6856.12	0.25
10	731.38	6487.78	6476.12	0.18
4	703.12	6219.68	6212.23	0.12
17	700.24	6176.23	6175.56	0.01
9	517.46	4600.72	4610.86	-0.22
3	427.55	3809.23	3824.53	-0.40
15N	310.58	2874.96	2879.57	-0.16
12N	248.69	2374.61	2359.04	0.66

1993 年在另外一个燃气电厂（圣地亚哥气电公司，恩斯那电厂 5#机组）对 I/LM 进行了验证。测试是在 ES 公司的计算设备上进行的。它是一台独立的个人电脑，其中安装了 I/L 程序、支持与交换软件，以便与电厂连机系统交换信息。其结果与实际工况进行了瞬态比较。图 3 给出了电厂负荷在一天中典型的波动及 I/LM 的结果与电厂气流量测量值的比较。

图 3 一天中瞬态结果

图 4 流量测量值

表 3 列出了用高位和低位热值计算的燃料流量结果 (kg/hr)，见方程 (3)。这些模拟量是基于实际的电厂数据的复杂性，从 I/LM 结果中挑选出来的。这些模拟量的唯一差别是输入高位热值还是低位热值以及标识的选择（低位热值或高位热值是由 EX-FOSS 程序计算得到的）。

表 3 EX-FOSS 计算结果  
(效率和燃料流量, kg/hr)

机组	HHV 效率和流量	LHV 效率和流量
300MW 褐煤	59.104% 627, 436.18	78.426% 627, 436.22
800MW 煤浆	81.097% 500, 915.42	88.761% 500, 915.56

I/LM 已安装在宾西法尼亚州科尔沃的一个 110MW 的循环流化床 (CFB) 电厂。作为 CFB 机组, 科尔沃电厂的设计煤种为矿物预处理过程中废弃的烟煤废渣, 煤矸石。炉内喷入石灰石以控制硫的排放, 这种燃料具有高的且不定量的灰分, 但是值得注意的是其湿态热值在 14000~21000kJ/kg<sub>AF</sub> 之间变化。当在线误差分析程序安装后, 人工取样结果是那些产生 1.3% 的标准误差的典型无偏差模拟量。

### 排放流量验证

1992 年在 780MW 的燃煤电厂上以水煤浆为燃料进行了大型的试验工程, 并使用已被证实的 EPA 方法中的 1, 2 和 17 以及 Anderson 阶跃脉冲方法进行测试。在 4 个功率 (400, 520, 640 和 730MW) 下, 每隔 4 小时进行数据采集。在高功率试验中不能很好地保持稳态工况。图 4 表示直接排放流量测量值与 I/LM 的比较。类似的结果也可由其它方法得出, 即直接排放流量测量值与有效热平衡相比至少高 7%<sup>(19, 20)</sup>, 当然, 这将直接影响 CO<sub>2</sub> 排放量的确定。

## 结 论

### 输入/损失技术

- 本文工作证明了输入/损失技术完全可以准确地监测燃煤电厂中的燃料化学性质, 热值及燃料在线流量。
- 输入/损失技术中所使用的多维最小化技术使修正的和真实的流量信号以及系统参数之间没有明显差别。
- 为了证明 I/L 方法的有效性并使其完善化, 本文对约 1200 个煤样进行了成功地分析; 煤样取自无烟煤到 B 类褐煤的全部煤种范围:
  - 高位热值范围为 6500~33300KJ/kg;
  - 水分含量从 1% 到高达 50%;
  - 矿物质 (灰分) 含量从 2% 到高达 45%。
- 热值误差与燃料特性有关, 电厂中安装输入/损失系统后, 对于性能好的燃料误差可以小于 0.5%, 而对于水分和灰分含量变化很大的燃料, 误差可高达 1.25%。
- 理想情况下, 若不是在专门区域开采的话, 输入/损失所要求的燃料特性至少应限制在同一类别的范围内。
- 本文利用  $HPR_{Act}$  和  $HRX_{Act}$  建立了一种通用的求解锅炉效率的方法, 这需要将锅炉效率与排放流量相结合, 用输入/损失技术使其保持稳定。
- I/L 方法涉及到  $HPR_{Act}$  和  $HRX_{Act}$  概念, 为求解烟道损失提供了系统的方法, 这直接影响到排放流量的精确确定。排放速率应由计算得到, 而不是测量到的。

### 热值和量热

- 煤的热值应根据燃料化学性质进行仔细地校核, 见方程 (34), 绘出 MAF 氢与炭的关系图, 以证明所

求热值的可靠性。

- 实验求解热值需要从电厂工程师那里得到反馈信息。
- 由弹筒量热器确定热值时需要记录量热计温度  $T_{Cal}$  并进行合理的校正试验。
- 弹筒量热器所需的煤样应尽量模拟燃烧工况下的尺寸，而且试样中的水分蒸发所需的热量应看作煤中挥发份的蒸发。
- 量热装置销售商应保证如果可重复性校准测量误差在  $\pm 0.1\%$  内（使用苯甲酸），其它所有可能导致误差增大的影响因素都应考虑在内，例如：
  - 水的  $C_p$  和  $\Delta h_{fg}$  是温度的函数；
  - 校正量热弹自动升温至  $35^\circ\text{C}$ ；
  - 尽管苯甲酸的燃烧热对温度并不很敏感，而有些煤却对温度很敏感（当增加燃料或产生水分时）。
- 建议使用国际实验室为典型煤种确定的对其燃烧热的高精度温度修正。

## 小结及备注

自 1988 年以来，ES 公司一直致力于开发有实用价值的方法以用于监测燃料的消耗，提高燃煤火电厂的运行性能。ES 认为电力工业不能再将热力生产与环境保护分离开来，并且将继续致力于对整个系统的监测与认识。我们将继续寻求输入/损失技术的示范厂家。

作者一直对现实感到困惑，尽管近来发生在能源工业的巨大变化都有其较差的运行工况下产生的原因，但是传统的电力工业，至少在北美洲国家里，从不采用学院派的改进来提高热力生产的运行性能。很明显燃料的成本是高电价的一个主要部分，但是很少有政府权威设立有效的刺激性措施以奖励对提高热效率做出贡献的人。事实上，燃料的成本消耗已经变成了一般性的定式，并且，当今这些相同的政府权威正在将传统的应用从电力生产中分离出来。

## 术语汇总

### 化学计量摩尔术语

$x$  = 产生 100 摩尔干气态产物所消耗燃料的摩尔数。

$a$  = 燃烧所需  $\text{O}_2$  的摩尔份数 moles/base。

$A_{Act}$  = 系统燃烧空气中  $\text{O}_2$  的当地摩尔份数，--

$b_A$  = 燃烧空气中的水蒸汽，moles/base。

$\beta b_A$  = 随空气泄漏的水蒸汽，moles/base。

$b_z$  = 由工质泄漏的水或汽，moles/base。

$b_{PLS}$  = 所需纯石灰石 ( $\text{CaCO}_3$ ) 的摩尔份数，moles/base。

$n_i$  = 物质  $i$  的摩尔数，moles/base。

$n_i$  = 系统边界干气态产物中各混合物成分的摩尔数， $d, e, f, g, h, k, l, m, p, q, t$  和  $u$ 。  $\beta a$  和  $\beta a \phi_{Act}$  单独考虑。

$n_{ii}$  = 系统边界非气态产物中混合物成分的摩尔数； $j, \sigma b_{PLS}, (1 - \sigma + \gamma) b_{PLS}, X\alpha_{10}, w$  和  $v, \beta b_A$  单独考虑。

$N_k$  = 化合物  $K$  的分子量。

$R_{Act}$  = 进入空气预热器前的燃烧过程产生的干气体总摩尔数与泄漏气体的比率，定义为空气预热器的漏风系数，一般可测量得到  $R_{Act} = \text{CO}_{2-\text{入口}} / \text{CO}_{2-\text{出口}}$ 。

注意：如果被测气体为  $\text{O}_2$ ，则  $R'_{Act} = \text{O}_{2-\text{入口}} / \text{O}_{2-\text{出口}}$ ；从而有

$$R_{Act} = [1.0 - \text{O}_{2-\text{出口}} R'_{Act} (1.0 + \phi_{Act})] / [1.0 - \text{O}_{2-\text{出口}} (1.0 + \phi_{Act})];$$

或  $R_{Act} = [R'_{Act} - \text{O}_{2-\text{入口}} R'_{Act} (1.0 + \phi_{Act})] / [R'_{Act} - \text{O}_{2-\text{入口}} (1.0 + \phi_{Act})]$

$z$  = 每摩尔产物  $\text{CaSO}_4$  中  $\text{H}_2\text{O}$  的摩尔数，在输入部分说明。



$\alpha_{kk}$ =每摩尔燃料中燃烧燃料（湿基）成分份额， $\sum \alpha_{kk} = 1.0, k = 1, 2, \dots, 10$ 。

$\beta$ =空气预热器稀释系数，即泄漏空气与实际燃烧空气的摩尔比。

$$\beta = (R_{Act} - 1.0) / [aR_{Act} (1.0 + \phi_{Act})]$$

$\gamma$ =过量  $\text{CaCO}_3$  与化学计量  $\text{CaCO}_3$  的摩尔比。

$\sigma$ =Kronecker 函数：若  $(\alpha_6 + \alpha_9) > 0.0$  为 1，若燃料中不存在硫，则为 0。

$\phi_{Act}$ =燃烧空气中非氧气体（氮和氩）与氧气的比率。

$$\phi_{Act} = (1.0 - A_{Act}) / A_{act}。$$

## 系统术语

BBTC=燃烧过程产生的/释放的有用能的流量，kJ/hr。

$\text{FCI}_j$ =j 过程中燃料消耗指数，--

$g$ =比 $\text{\textcircled{e}}$ （物理、化学和热），kJ/kg。

$\sum G_{misc}$ =各项 $\text{\textcircled{e}}$ 流的总和，kJ/hr。

$\Delta H^0_{f-25}$ =25°C 下的生成热，kJ/kg 或 kJ/mole。

$\Delta H^0_{f-cal}$ =在温度为  $T_{cal}$  下的生成热，kJ/kg 或 kJ/mole。

HBC=特殊的燃烧修正（能量修正），kJ/kg $_{AF}$ 。

HHVP=定压过程中燃烧（湿基）高位热值修正值，kJ/kg $_{AF}$ 。

HNSL=非化学或显热损失，kJ/kg $_{AF}$ 。

HPR=生成物焓值，（HHV-或 LHV 基），kJ/kg $_{AF}$ 。

HRX=反应物焓值，（HHV-或 LHV 基），kJ/kg $_{AF}$ 。

HR=系统热转化率，kJ/kWh。

$hr_j$ =j 过程热转化率的增加量， $\Delta kJ / kWh$ 。

L=系统能级损失的比能流，kJ/kg。

$L_m$ =燃料因子，干基渗漏量  $m$ （理论燃烧）/干燃料能量，gm/million-J。

LHVP=定压过程燃烧的（湿基）低位热值修正值 kJ/kg $_{AF}$ 。

$m_{AF}$ =燃烧中燃料的质量流率（含收到基），kg $_{AF}$ /hr。

$Q_{SAH}$ =输送到蒸汽/空气加热器的能流，kJ/hr。

$T_{cal}$ =测量热值时的量热温度，°C。

$W_{output}$ =透平循环产生的总功，kJ/hr。

$W_{pump}$ =输入系统工质的轴功，kJ/hr。

$W_{FD}$ =系统边界内流入空气流风机（送风机）的制动能，kJ/hr。

$W_{ID}$ =气体外流风机（如引风机）的制动能，kJ/hr。

$WF_k$ =组分  $k$  的重量份额，--。

$\eta_B$ =锅炉效率（HHV 或 LHV 基），--。

$\eta_C$ =燃烧效率（HHV 或 LHV 基），--。

$\eta_A$ =锅炉吸收率，--。

## 参考文献

- 1.Lang, F.D.,US Patents 5367470, 5790420,and US patents & Patent Cooperation Treaty applications pending, 1994-99.
- 2.Lang, F.D., "Monitoring and Improving Coal-Fired Power Plants Using the Input/Loss Method, [Part I]", ASME,1999-IJPGC-Pwr-33,p789-797.

3. Lang, F.D., and Lang, A.F., "Monitoring and Improving Coal-Fired Power Plants Using the Input/Loss Method, Part II" , ASME,1999-IJPGC-Pwr-34,p373-382.
4. Lang, F.D., "Monitoring and Improving Coal-Fired Power Plants Using the Input/Loss Method, PartIII" , to be published. Presents detailed boiler efficiency computational methods and comparisons...reviewers invited.
5. Lang, F.D., and Horn, K.F., "Practical Experience with Second Law Power Plant Monitoring" ,Advances in Power Engineering, Edited by Cen Kefa and David Y.S. Lou, International Academic Publishers, Beijing 100044,China, 1992, p68-76. See Revision 10, October 6, 1998, available from Exergetic Systems for further development.
6. Power Test code 4.1 Steam Generator Units (reaffirmed 1991), American Society of Mechanical Engineers, New York; also the new PTC4 to be issued September 1999.
7. Lang, F.D., EX-FOSS: A Program for Monitoring & Analysis of Fossil-Fired Boilers, Exergetic Systems, Inc., San Rafael, CA.(August 1999, ver.2.7, mod.48B, first published 1983).
8. Lang, F.D., "Methodology for Testing and Evaluating Power Plants Using Computer Simulators", Proceedings of the 1990 Performance Software (PEPSE) User's Group Meeting. Sponsored by EI International, Inc., May 1-4, 1990, St. Louis, Missouri.
9. Roughton, J.E., "A Proposed On-Line Efficiency Method for Pulverized Coal-Fired Boilers" ,Journal of the Institute of Energy, March 1980.
10. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., & Flannery, B.P., Numerical Recipes in FORTRAN 77, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York, 1992.
11. Gerhart, P.M., Heil, T.C., and Philips, J.T., "Steam Generator Performance Calculation Strategies for ASME PTC4" ,ASME,1991-JPGC-Ptc-1.
12. Passert, C.A., and Danner, R.P., "Correlation of Ideal Gas Enthalpy, Heat Capacity, and Entropy" ,Industrial Engineer Chemistry, Process Design and Dev., Vol 11, No.4, 1972.
13. Danner, R.P., and Daubert, T.E., Manual for Predicting Chemical Process Design Data, Chapter 5, AIChE, NY, 1983, rev. 1986.
14. CoX, J.D., Wagman, D.D., and Medvedev, V.A., CODATA Key Values for Thermodynamic, Hemisphere Publishing, New York, 1989.
15. Reid, R.C., and Sherwood, T.K., The Properties of Gases and Liquids, Their Estimation and Correlation, McGraw-Hill, NY, 1978.
16. Deihl, B., and Lang, F.D., "Practical Experience with the Input/Loss Method as Applied to a CFB Power Plant" ,ASME,1999-IJPGC-Pwr-34,p75-86.
17. "Certificate of Analysis, Standard Reference Material 39j, Benzoic Acid" ,US National Institute of Standards, 1999.
18. Gomez, M., Gayle, J.B., and Taylor, A.R., "Heat Capacity and Specific Heat of Coal and Related Products" ,Report of Investigations 6507, US Bureau of Mines, 1965.
19. McRanie, R.D., Norfleet, S.K., and Dene, C.E., "The Electric Power Research Institute Continuous Emissions Monitoring Heat Rate Discrepancy Project, An Update Report December 1996" ,EPRI, Palo Alto, California.
20. Lang, F.D., and Bushey, M.A., "The Role of Valid Emission Rate Methods in Enforcement of the Clean Air Act" ,FLOWERS '94, Proceedings of the Florence World Energy Research Symposium, Edited by E. Carnevale, Servizi Grafici Editoriali, Padova, Italy, 1994, p545-556.