

A Dynamic Compensating Method of Thermocouple in Measuring Exhausting Gas Temperature of Boiler in Power Plant

ZHU Xiaoliang ZHANG Xilin

(Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: The dynamic error of measuring data is always existing in exhausting gas temperature measuring system of boiler in power plant. Using the analysis of the dynamic model of sensor and its frequency characteristics, a compensating program and a mathematic model, which can be applicable for gas temperature measurement, are put forward to solve the problem. Through actual test, it is proved that the frequency characteristics of measuring system has changed, thus the problem of the measuring system for exhausting gas of boiler has been settled.

Key words: thermocouple; boiler; gas temperature; dynamic compensating

热电偶测量锅炉烟气温度的动态补偿方法^①

朱小良 张夕林

(东南大学动力系, 南京 210096)

摘要: 针对电站锅炉烟气温度测量中存在的显示数据动态误差问题, 通过分析测量系统的动态模型及其频率响应特性, 提出了烟温测量数值补偿方案和计算模型。经测试, 系统的整体响应特性得到加快, 解决了该系统的动态测量问题。

关键词: 热电偶; 锅炉; 烟气温度; 动态补偿

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2003)03-0359-04

温度是火电机组检测系统中常用的热工参数, 可作为显示、控制、报警或保护信号。目前感温元件主要有热电偶和热电阻, 这二种温度传感器的优点是稳定、可靠, 存在的问题是动态误差大。当被测对象温度变化时, 输出信号不能及时反映实际温度。如锅炉烟气测温系统中, 当烟温变化时, 测温元件不能及时响应, 显示数据与实际值之间存在差异, 为此, 对锅炉烟气测温系统传热机理和引起的误差进行了分析, 提出了对实时数据进行动态补偿的解决方案, 并进行了实施, 达到了减小测量系统的动态误差的目的。

1 烟气测温系统及测量误差

电站锅炉过热器后烟气温度测量系统如图 1 所示。

图中, t_g ——烟气温度; t ——热电偶热端温度; t_1 ——过热器管壁温度; t_2 ——省煤器管壁温度; t_3 ——热电偶冷端温度; Q_1 ——热电偶吸收的热量; Q_2 ——沿着热电偶套管传给周围环境的散热; Q_3 ——热电偶以辐射形式传给过热器及省煤器的热量。该系统中, 烟气温度 t_g 大于热电偶热端温度 t , 烟气以

① 收稿日期: 2003-03-17

作者简介: 朱小良(1965-), 博士研究生。主要从事热工测量研究工作, zx13794521@163.com。

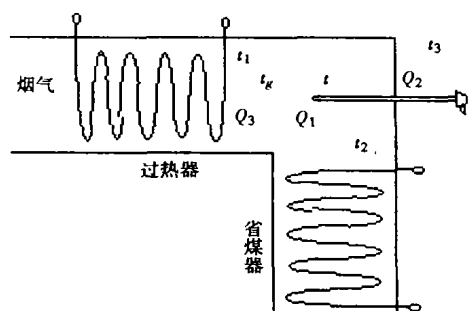


图1 测量锅炉过热器后的烟气温度

对流、辐射及传导方式将热量 Q_1 传给热电偶；热电偶热端温度 t 大于冷端温度 t_3 ，将热量 Q_2 传给周围环境； t 大于 t_1 和 t_2 ，同时热电偶以辐射形式将热量 Q_3 传给过热器及省煤器。在达到热平衡时 $Q_1 = Q_2 + Q_3$ ，即热电偶吸收热量等于散热量。系统存在二种误差，其一是静态误差，即被测介质温度不变，达到动态平衡时， Q_1 不为零， $\Delta t = t_g - t > 0$ ，静态误差为 Δt 。其二是动态误差，被测介质温度变化时，热电偶的热惯性对被测信号的高频分量起了限制作用，响应速度慢，造成显示数据与被测介质实际温度之间的不一致。解决静态误差的方法是，增强烟气对热电偶的传热，并减少热电偶对外的传导散热和辐射散热，即减小 Δt ，使感受元件的温度接近被测介质的温度，具体措施是安装辐射隔离罩等。本文讨论的是被测介质温度变化时的误差，即动态情况下，由于热电偶的热容量，热端温度跟不上被测介质温度变化所造成的误差。采用的方法是建立热电偶的数学模型，设计动态补偿器，改变测量系统特性，提高阶跃响应速度，解决温度测量热惯性和数据精度之间的矛盾，最终改善烟温测量系统的动态性能。

2 锅炉烟气温度检测模型

在锅炉水平烟道和尾部烟道中，测量烟气温度时，热量主要以对流和辐射两种方式进行热交换，其传热热阻为：

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_r + \alpha_c} = \frac{1}{\alpha} \quad (1)$$

式中： α_r 为辐射传热系数； α_c 为对流传热系数； α 为总传热系数。热电偶感受温度的过程如图2所示。图中， T_g 为烟气温度； T 为热电偶热端温度； T_c 为烟气温度与热电偶热端温度之间的温度差值； Q 为热

电偶与烟气及省煤器、过热器之间所交换热量。环节1表示锅炉烟气和测温热电偶之间的传热过程，

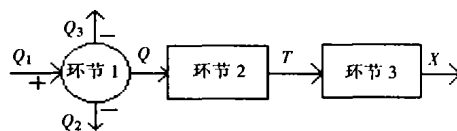


图2 烟温测量框图

环节2表示热量与热电偶热端温度之间的关系，环节3表示热电偶温度变化后，引起的热电势的变化。环节1中热电偶热端与介质之间存在温度差，形成热量交换，其中

$$Q = \frac{T_g - T}{R_c + R_r} = \frac{T_g}{R_r} \quad (2)$$

上式中， R_r 为烟气与热电偶之间的热阻，等于对流热阻和辐射热阻之和。

环节2中，热电偶吸收热量后，热端温度升高，其热量与温升之间的关系为

$$Q = C_T \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

上式中 C_T 为热电偶热端的热容量，其表达式为 $C_T = \rho c v$ ， ρ 和 c 为热端材料的密度和比热， v 为热端体积。

环节3中，当测温热电偶热端温度变化后，引起其输出热电势 X 也发生变化，该过程可用下式表示：

$$X = r \cdot T \quad (4)$$

式中 r 为热电偶的放大系数。

热电偶测温过程中总的传递函数为

$$H(S) = \frac{X(S)}{T_g(S)} = \frac{X(S)}{T(S) + T_c(S)} = \frac{X(S)}{T_n(S)} \cdot \frac{1}{1 + R_r C_T S}$$

令 $\tau = R_r C_T$ ，则

$$H(S) = \frac{X(S)}{T_n(S)} \cdot \frac{1}{1 + \tau S} = \frac{r}{1 + \tau S} \quad (5)$$

上式即为烟气温度测量系统的传递函数，其中 τ 为时间常数， τ 越大响应速度越慢； τ 越小响应速度越快。令 $S = \frac{2}{T_n} \cdot \frac{Z+1}{Z-1}$ （角注 n 为周期值）代入式(5)中得

$$H(Z) = \frac{r T_n (Z+1)}{(T_n + 2\tau) Z + T_n - 2\tau} \quad (6)$$

3 烟温测量数值补偿模型

为改变系统的响应特性，在测温传感器的输出

信号后附加一个数字滤波器,即补偿器,并且将数字滤波器的传递函数设成传感器模型分母的倒数,二者相乘后,测量系统的传递函数变为新的形式。以下通过建立校正函数论述解决烟气测温系统的动态响应问题。式(6)所表示的系统可以采用如下传递函数来校正

$$H_4(S) = \frac{(\tau S + 1)}{\frac{\tau}{k}S + 1} \quad (7)$$

上式中,将式(6)的分母部分作为校正函数的分子,

其中, $k > 1$ 。令 $S = \frac{2}{T_n} \cdot \frac{Z+1}{Z-1}$ 代入上式,得

$$H_4(Z) = \frac{[(2\tau + T_n)Z + T_n - 2\tau]}{\left(\frac{2\tau}{k} + T_n\right)Z + 1 - \frac{\tau}{k}} \quad (8)$$

加入校正环节后,测温系统的传递函数转换为:

$$H_5(Z) = H(Z) \cdot H_4(Z) = \frac{rT_n(Z+1)}{\left(\frac{2\tau}{k} + T_n\right)Z + 1 - \frac{\tau}{k}} \quad (9)$$

4 烟温测量系统动态补偿实施

在烟温测量系统中,热电偶输出是毫伏(mV)信号,经AMP放大后,输出信号是 $x(t)$ 。A/D 转换及采样后,得到时间序列数据 $x(T_n)$ 、 $x(2T_n)$ 、 $x(3T_n)$

$\cdots x(nT_n)$, 再经数字滤波 $H_4(S)$ 得到 $y(T_n)$ 、 $y(2T_n)$ 、 $y(3T_n)$ 、 $\cdots y(nT_n)$ 。经 Z 变换, $x(nT_n)$ 变为 $X(Z)$, $y(nt)$ 变为 $Y(Z)$ 。则

$$H(Z) = \frac{(k-1)(1-Z^{-1})}{1 - e^{-\frac{k}{\tau}T_n}Z^{-1}} + 1 \quad (10)$$

式(10)中, T_n 为采样周期; k 为校正系数; τ 为测温系统的时间常数。系统的差分方程为:

$$y(n) = x(n) + (k-1)[x(n) - x(n-1)] - e^{-\frac{k}{\tau}T_n}x(n-1) + e^{-\frac{k}{\tau}T_n}y(n-1) \quad (11)$$

某机组热工温度信号的采样周期为 $T_n = 2$ s, 烟气温度测量系统的热惯性时间常数 $\tau = 35$, 根据运行要求取 $k = 2.1$, 则 $c = e^{-\frac{k}{\tau}T_n} = e^{-\frac{2.1}{35} \times 2} = 0.8869$ 上式变为:

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) + 1.1[x(n) - x(n-1)] - \\ &\quad 0.8869[x(n-1) - y(n-1)] \\ &= 2.1x(n) - 1.9869x(n-1) + 0.8869y(n-1) \end{aligned} \quad (12)$$

用上式对某温度测量信号进行数字补偿,得到一序列数据,如表1所示。表中 $x(n)$ 是补偿前的数据, $y(n)$ 为补偿后的数据,从表中看出, $y(n)$ 与 $x(n)$ 相比,时间延迟变小,响应速度快,信号响应特性有了明显的改良。

表1 温度数据极其校正值

序号	$x(n)$	$y(n)$	序号	$x(n)$	$y(n)$	序号	$x(n)$	$y(n)$	序号	$x(n)$	$y(n)$	序号	$x(n)$	$y(n)$
0	550	550												
1	551.9	554	11	563.3	571	21	567.5	572.4	31	569.1	572.6	41	569.7	570.7
2	553.6	557.3	12	564	571.5	22	567.8	572.4	32	569.2	572.6	42	569.7	570.7
3	555.2	560.2	13	564.6	571.8	23	568	572.5	33	569.3	572.6	43	569.7	570.6
4	556.6	562.6	14	565	572.1	24	568.2	572.5	34	569.1	571.8	44	569.7	570.6
5	557.9	564.6	15	565.5	572.3	25	568.4	572.5	35	569.5	571.2	45	569.8	570.5
6	559	566.3	16	565.9	572.4	26	568.5	572.5	36	569.5	571.1	46	569.8	570.5
7	560.1	567.7	17	566.3	572.5	27	568.7	572.5	37	569.5	571	47	569.8	570.4
8	561	568.8	18	566.7	572.5	28	568.8	572.5	38	569.6	571	48	569.8	570.4
9	561.9	569.7	19	567	572.5	29	568.9	572.6	39	569.6	570.9	49	569.8	570.4
10	562.6	570.4	20	567.3	572.5	30	569	572.6	50	569.9	570.3	40	569.6	570.8

图3是补偿前后的温度变化曲线,图中,曲线1是补偿前的温度变化,曲线2是补偿后的温度变化。从图中看出补偿后响应曲线明显快于补偿前的情况。图中采样时间间隔为2 s,因此,响应速度每向

前推一个单位,便可加快2 s。由表1中具体数据可得, $y(n)$ 与 $x(n)$ 相比响应时间大约快了8个采样周期,效果明显。

另外,在式(11)中,如果 k 取比较大的数值,则

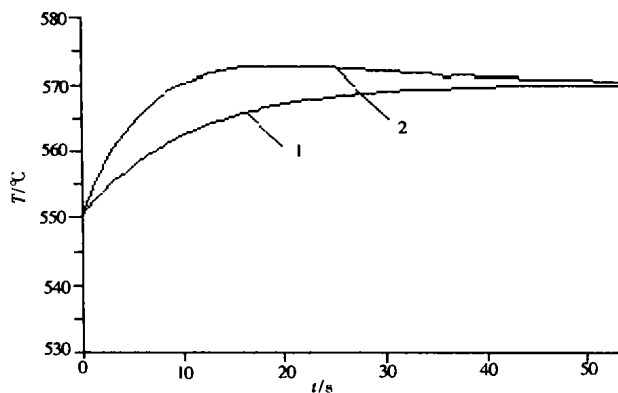


图3 补偿前后温度变化曲线

c 接近于零。但是从差分方程可得, k 并不能取过大, 如果 k 过大, 则容易引起过量补偿。实际应用中, 在 A/D 速度允许情况下, 应尽量缩短采样时间, 使 $x(n)$ 相邻两点间差值变小, 从而减小 k 的影响, k 的具体取值范围可以通过实验确定, 满足火电机组运行设备对测量系统的响应要求。

5 结 论

锅炉过热器烟气温度测量系统中存在动态和静态两种测量误差, 其中动态误差是由于测量系统存在的热惯性所引起。针对动态误差可采用烟温测量数值补偿模型, 对测量系统采集的时间序列温度数据进行补偿, 从而改进测温系统的动态性能, 提高烟温测量的动态精度。

参 考 文 献

- [1] Kümme R and Dixon M J. The Results of Comparisons Between Two Different Dynamic Force Measurement System[J]. Measurement, 1992, 10(3): 140 - 144.
- [2] 郭伟民, 王宗源. 温度传感器动态特性的试验研究[J]. 仪表技术与传感器, 1996(6): 41 - 43.
- [3] 徐科军. 传感器动态特性[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999.
- [4] 吴永生, 方可人. 热工测量及仪表[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995, 5.
- [5] 刘正士, 汪骏, 陈心昭. 一种基于优化的动态补偿滤波器的设计方法[J]. 信号处理, 1998, 1.

(上接第 358 页)

4 结 论

① 采用软测量方法, 选择变化缓慢的壁内温度为二次变量, 可以实现密闭腔内快速传热中壁面温度的测量;

② 给出了快速传热中壁面温度软测量的模型, 以及对模型的三种解法;

③ 对快速变化的温度过程进行测量, 可以采用非高性能的温度传感器与软测量的方法相结合进行, 以降低测试系统的成本。

参 考 文 献

- [1] 黄吕权, 李付国. 薄膜热电偶的技术特性研究[J]. 中国机械工程, 1996, 7(5): 34 - 37.
- [2] 钱兰, 陈宁. 薄膜热电偶动态响应特性的实验研究[J]. 内燃机学报, 1998, 16(2): 251 - 253.
- [3] 李付国, 黄吕权, 解亚军等. 薄膜热电偶动态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(3): 316 - 319.
- [4] 雷敏, 王志中, 马勤弟等. 薄膜热电偶的动态特性及动态补偿研究[J]. 计量学报, 1999, 20(3): 182 - 186.
- [5] 于静江, 周春晖. 过程控制中的软测量技术[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 137 - 144.
- [6] 胡瑜, 万学仁, 肖圣敏. 密闭爆发器容积弹性增量的计算及对测试结果的修正[J]. 火炸药学报, 2001, 4: 54 - 57.