

文章编号:0253-9993(2006)01-0067-05

煤自然发火实验温度监测系统

王 华¹, 王连华²

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 曲阜师范大学 计算机科学学院, 山东 日照 276826)

摘 要: 针对目前煤自然发火实验的特点, 提出了一种基于多传感器数据融合的煤自然发火实验温度监测系统; 在数据处理上, 首先应用分布图法剔除所监测温度数据的疏失误差, 再利用 Bayes 参数估计方法对多个温度监测数据进行数据融合, 在此基础上温控系统利用融合后的煤温数据控制水温自动跟踪煤温, 达到模拟井下煤自然发火的目的。

关键词: 自然发火; 温度监测; 数据融合; 疏失误差; Bayes 估计

中图分类号: TD752 **文献标识码:** A

Temperature measurement system for coal spontaneous combustion experiment

WANG Hua¹, WANG Lian-hua²

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Computer Science, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract: Aimed at characteristics of coal spontaneous combustion experiment at present, put forward a temperature measurement system for coal spontaneous combustion experiment on the basis of multi-sensor data fusion. In the aspect of data processing, it used the method of distributing chart to eliminate negligent errors, then adopted the Bayes parameter estimation to fuse the temperature testing data. On this basis, temperature controlling system controls water temperature to follow coal temperature automatically using the coal temperature data after fusion in order to simulate coal spontaneous combustion in coalmine.

Key words: spontaneous combustion; temperature measurement; data fusion; negligent error; Bayes estimation

我国煤矿中有 56% 的矿井存在煤层自然发火危险, 而特厚煤层开采自然发火尤为严重^[1], 严重威胁着矿井的安全生产, 并造成了巨大的经济损失和不良的社会影响。煤自燃的发生和发展是一个极其复杂的、动态变化的、自动加速的物理化学过程, 其实质是一个缓慢地自动氧化、放热、升温, 最后引起燃烧的自发过程^[2]。研究煤自燃机理及过程是认识煤自燃规律, 建立预测预报理论, 开发防治技术的基础。

煤自然发火实验台的建造解决了煤自然发火过程的实验模拟问题, 为煤自然发火预测理论的发展创造了条件。西安科技大学与兖州矿业集团联合研制的特大型煤自然发火实验台 (ZRM-15 型) 最大装煤量为 15 t, 是目前国内最大的煤自然发火实验台。实验装置模拟井下的起始温度、湿度和高温点的蓄散热条件; 用气体压缩机供入风量, 模拟实际漏风条件; 依靠松散煤体自身氧化放热量, 引起煤体升温, 达到模拟井下煤自然发火的目的。实验测试原理如图 1 所示。

收稿日期: 2005-07-01

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (50125414); 国家自然科学基金资助项目 (50474019)

作者简介: 王 华 (1977-), 女, 山东济南人, 博士研究生, 讲师。E-mail: yaya@qfnu.edu.cn

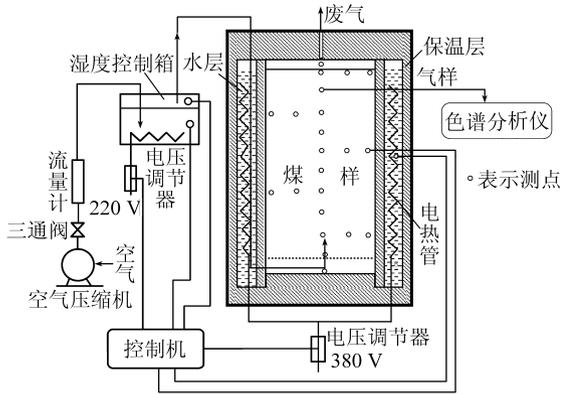


图1 煤自然发火实验测试原理

Fig. 1 The experimental principle of coal spontaneous combustion

在实验炉内不同位置和方向共布置了40路温度传感器,其中36路在煤样中,4路在水层中,分别用于监测炉内的煤体温度和水层温度数据, RM410模块将采集的温度值,经RM450通讯转换模块,送入工控机剔除疏失误差,获得一致性测量结果,再进行数据融合.一旦融合后的煤体温度与水层温度的差超过预先设定的温差值,工控机通过RM450通讯转换模块控制RM426模块的输出电压,再通过固态调压器控制布置在水层内的加热管的发热量,使煤温与水层的温差保持在预先给定的范围内,以保证煤体几乎不向外界散失热量,达到模拟井下煤体自然氧化升温的目的.

2 多传感器数据融合方法

运用分布图法对温度传感器监测数据的疏失误差进行剔除,以消除各传感器在测量中的不确定性,确保在某个甚至数个传感器失效的情况下,其它非失效传感器仍可独立地为分析煤体升温过程提供可用数据,同时对这些可用数据用Bayes参数估计的方法进行数据融合,提高测试结果的精度.

2.1 采用分布图法剔除疏失误差

在煤自然发火实验过程中,对温度数据的监测存在着各种干扰因素(操作失误,线路松动、脱落,硬件损坏,外界突发的冲击干扰等等),各种随机的偶然性误差的出现很难避免;但这些误差的存在会对测量结果的精度产生很大的影响,因此必须将这些误差予以剔除.对疏失误差的剔除,莱特准则是最简单易用的,但是在被测值很少($N \leq 10$)时,很难消除误差对测量结果所带来的影响,有时还会带来致命的错误.另外较常用的是格罗贝斯准则:一种基于被测值服从正态分布的递归算法.用格罗贝斯准则进行判据不受样本数据容量大小的限制,对单个或多个疏失误差的剔除都有较好的效果,在实际测试分析中得到了大量的应用.但格罗贝斯准则判据是一个递归算法,每次只能剔除一个可疑值,需重复进行判别,直到判定无可疑值为止,而且其判别还涉及到查表操作,在用计算机编程实现时,必须引入数据库或者大容量数组,影响了程序设计的结构优化,降低了软件的运行速度,在某些需要实时响应的场合受到一定的限制.

分布图法是一种新型的数据处理方法,大量的实践证明:利用分布图法可以很好地剔除疏失误差^[3,4],且软件编程也较容易实现,具体步骤如下:

(1) 将所测得的 N 个温度测量数据 T_i 按递增进行排序,得到一数据序列: $T_1, T_2, \dots, T_{N-1}, T_N$,其中 T_1 为下限值; T_N 为上限值.

1 煤自然发火实验温度监测系统的组成

图2是以工控机作为数据融合处理、数据库管理及温度监控中心,主机配有控制输出接口和通信接口;RM410为远端温度传感器采集模块,可采集14路E型温度传感器信号,并将其转换成相应的温度值;RM450为RS232/RS485光隔离型通讯转换模块,完成RM410与RM426与工控机的实时通讯;RM426为输出控制模块,可输出2路(0~5V)电压信号;EUV-II40A单相固态调压模块,具有输入端与输出端光隔离,以利于实现弱电对强电的控制,由输入端电压的高低实现对输出端加热管功率的控制.

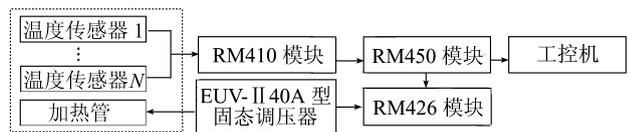


图2 煤自然发火实验温度监测系统

Fig. 2 The temperature measurement system for coal spontaneous combustion experiment

(2) 定义中位数: $T_M = T_{(N+1)/2}$ (N 为奇数), $T_M = (T_{N/2+1} + T_{N/2}) / 2$ (N 为偶数). 同理定义上四分位数 T_U 为 $[T_M, T_N]$ 的中位数, 下四分位数 T_L 为 $[T_1, T_M]$ 的中位数, 四分位数离散度 $dT = T_U - T_L$.

(3) 确定有效数据的判断区间为 $[T_L - \frac{K}{2}dT, T_U + \frac{K}{2}dT]$, 其中 K 为常数, K 的大小根据数据列大小和精度要求来确定 (通常取 K 为 1 或 2), 即认为 $|T_i - T_M| > KdT$ 的数据为无效数据, $|T_i - T_M| \leq KdT$ 的数据则认为有效的一致性数据.

从上面的分布图法可看出, T_M , T_U 和 T_L 的选取和数据列极值点的大小无关, 仅取决于测量数据的位置分布, 判断区间 $[T_L - \frac{K}{2}dT, T_U + \frac{K}{2}dT]$ 的选取也就与需要剔除的可疑数据没有太大的联系, 利用此方法可很好地剔除测量列中可能存在的疏忽误差, 增强了其后要进行的数据融合处理的鲁棒性.

2.2 基于 Bayes 估计的多传感器数据融合方法

煤自然发火实验中的温度数据融合是由 N 次温度数据采样得到的测量列 (I_1, I_2, \dots, I_N) , 按照某估计准则函数, 从 I_1, I_2, \dots, I_N 中估计出状态 (煤体温度 T) 的真实值. 温度检测信号是符合正态分布的随机信号, 建立随机化的数据融合模型比较适宜. 设经线性化处理已成为线性信号的温度监测信号为

$$I_i = A_i T + V_i \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

式中, T 的先验是均值为 U_T 、协方差为 C_T 的正态分布; V_i 符合均值为零、协方差为 C_{V_i} 的正态分布.

依据 Bayes 后验估计理论^[5], 可得到 N 个温度检测数据的状态最优估计为

$$\hat{T}_{\text{opt}}(I_1, I_2, \dots, I_N) = \max_{\hat{T}} P(T | I_1, I_2, \dots, I_N). \quad (2)$$

即温度检测的数据融合问题可以转化为如何得到状态 T 的后验概率 $P(T | I)$, 找到相应的最大后验估计值 $\hat{T}(I)$ 的问题.

根据 Bayes 定理有

$$P(T | I_1, I_2, \dots, I_N) = \frac{P(T)P(I_1, I_2, \dots, I_N | T)}{P(I_1, I_2, \dots, I_N)}. \quad (3)$$

可以认为 N 个独立的传感器的测量是统计上独立的, 即

$$P(I_1, I_2, \dots, I_N | T) = \prod_{i=1}^N P(I_i | T). \quad (4)$$

由式 (3), (4) 及 Bayes 定理有

$$P(T | I_1, I_2, \dots, I_N) = \frac{\prod_{i=1}^N P(T | I_i) \prod_{i=1}^N P(I_i)}{[P(T)]^{N-1} P(I_1, I_2, \dots, I_N)}, \quad (5)$$

其中 $P(I_1, I_2, \dots, I_N)$ 与 $\prod_{i=1}^N P(I_i)$ 均与 T 无关, 可视为归一化因子, 在求最大后验估计 $\hat{T}(I)$ 时不予考虑, 因而有

$$\hat{T}_{\text{opt}}(I) = \max_{\hat{T}} P(T | I_1, I_2, \dots, I_N) = \max_{\hat{T}} \frac{\prod_{i=1}^N P(T | I_i)}{[P(T)]^{N-1}}. \quad (6)$$

由此可得到 N 次温度采样的融合值为

$$\hat{T}(I) = \sum_{i=1}^N C_{V_i}^{-1} I_i / \sum_{i=1}^N C_{V_i}^{-1}, \quad (7)$$

式中, $\sum_{i=1}^N C_{V_i}^{-1} = C_T^{-1} I^{-1}$ 为两个随机变量 T_i 与 I_i 之间的相关程度, 称为协方差.

2.3 煤自然发火实验温度数据融合实验

为了验证上述方法在煤自然发火实验温度数据融合方面的优越性, 进行实际测试实验. 为了实验方

便, 在实验炉未装煤样前, 采集布置在实验炉不同方向和位置的 36 路温度传感器的数据, 与用温度计测得的炉内环境温度进行对比. 采集的温度传感器的数据见表 1, 温度计测得的炉内环境温度为 26 °C.

表 1 温度传感器观测数据

Table 1 The observed data of temperature sensors

传感器	测量温度/°C	传感器	测量温度/°C	传感器	测量温度/°C	传感器	测量温度/°C
S1	29.0	S10	24.7	S19	27.0	S28	21.9
S2	27.7	S11	22.6	S20	26.2	S29	28.5
S3	24.9	S12	25.5	S21	30.9	S30	24.7
S4	25.8	S13	27.3	S22	27.8	S31	31.9
S5	24.7	S14	24.6	S23	24.4	S32	27.7
S6	27.0	S15	25.1	S24	24.7	S33	28.3
S7	23.6	S16	27.4	S25	27.3	S34	27.5
S8	25.8	S17	23.8	S26	23.8	S35	28.6
S9	26.6	S18	29.0	S27	27.5	S36	25.0

对上述数据进行直接取平均值得 $T_{p36} = 26.4$ °C, 测量误差为 0.4 °C. 按分布图法 (取 $K = 1$) 可以得到对疏忽误差的判断区间为 $[23.2, 29.2]$, 可见传感器 S11, S21, S28, S31 测得的数据 22.6, 30.9, 21.9, 31.9 为失效数据, 予以剔除. 剩余的 32 路温度数据中已无疏失误差值存在, 是有效的一致性采样数据, 可参加数据融合. 32 路温度采样数据直接取算术平均值得 $T_{p32} = 26.3$ °C, 误差为 0.3 °C. 由式 (7) 计算出温度采样数据的融合值为 $\hat{T}(I) = 26.2$ °C, 融合值的近似误差 $\sigma' = 0.2$ °C. 由此可见, 对于有限次温度监测, 数据融合得到的测量结果比算术平均值结果更接近实际温度真值, 方差也小.

仿照以上温度数据融合的处理方法, 对兖州矿区南屯矿煤样在自然发火实验过程中 (2002-10-14-11-20) 所监测的温度数据进行了数据融合, 部分温度数据融合结果见表 2.

表 2 数据融合后的部分煤体温度数据及水层温度数据

Table 2 The partial temperature data of coal and water after data fusion

°C

监测温度数据时间	融合煤温数据	融合水温数据	监测温度数据时间	融合煤温数据	融合水温数据
2002-10-14-08: 16	27.7	26.7	2002-10-31-14: 21	62.5	61.7
2002-10-15-11: 28	29.7	28.9	2002-11-01-19: 51	64.8	63.9
2002-10-16-11: 28	30.7	30.1	2002-11-02-23: 21	67.0	66.5
2002-10-17-23: 18	35.2	34.6	2002-11-03-10: 21	68.3	67.7
2002-10-18-22: 18	36.7	36.3	2002-11-05-22: 08	73.1	72.8
2002-10-19-22: 18	38.3	37.3	2002-11-09-20: 21	82.6	81.8
2002-10-20-22: 18	40.0	39.6	2002-11-10-19: 51	85.8	84.3
2002-10-21-20: 48	41.6	40.8	2002-11-11-14: 21	88.4	87.5
2002-10-22-22: 48	43.6	42.9	2002-11-12-22: 51	91.1	89.8
2002-10-23-23: 41	46.4	45.9	2002-11-13-22: 51	94.1	92.4
2002-10-24-11: 11	47.2	46.1	2002-11-14-22: 51	97.4	95.9
2002-10-25-14: 28	49.4	48.0	2002-11-15-15: 21	99.9	97.8
2002-10-26-19: 28	52.0	51.6	2002-11-16-16: 51	104.3	98.1
2002-10-27-22: 51	54.4	53.8	2002-11-18-03: 20	113.1	98.5
2002-10-28-23: 51	56.7	55.7	2002-11-19-19: 50	128.2	97.2
2002-10-29-21: 51	58.6	57.8	2002-11-20-08: 20	145.0	96.8
2002-10-30-22: 21	61.0	59.9	2002-11-20-20: 10	185.7	98.6

由文献 [6] 知, 在煤温高于 100 °C 后, 水温与煤温的温差对散热率的影响可以忽略不计, 在煤温低于 100 °C 时, 煤温与水温的差值控制在 ± 1.0 °C 内时, 实验误差在允许范围内. 用 C++ Builder 编制的温控软件根据融合后的煤温与水温的比较, 会自动控制加热管的功率, 使水温自动跟踪煤温.

利用 C + + Builder 语言编制失效数据剔除及有效数据融合程序,借助于计算机强大的计算与图形处理能力,自动完成数据融合和各种曲线的绘制。

由融合后的温度数据绘制的南屯矿煤样自然发火过程煤温随时间的变化关系曲线及煤升温速度随煤温的变化关系曲线如图 3, 4 所示。

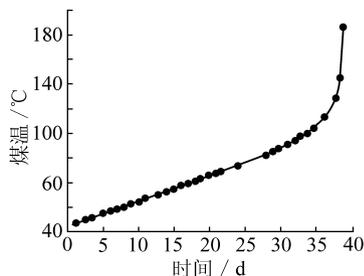


图 3 煤温随时间的变化关系

Fig. 3 The change curve of coal temperature

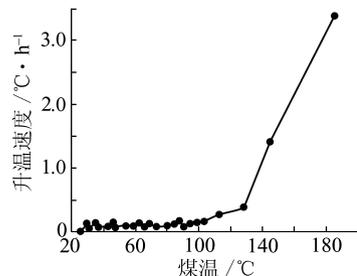


图 4 煤升温速度随煤温的变化关系

Fig. 4 The relation curve of speed of coal temperature increment with coal temperature

从图 3, 4 可以看出,煤在氧化初期,随着供风时间增加,煤样氧化升温较慢;煤温超过 62 ~ 72 °C (临界温度),煤样氧化升温开始加快;煤温超过 90 ~ 100 °C (干裂温度)升温曲线急剧变陡,升温速度急剧增加。基于上述煤温融合数据,结合实验过程中采集到的各种指标气体的浓度,可计算不同煤温时的放热强度、耗氧速度及各种气体的产生率等参数,为后期的煤自然发火数值模拟提供基础数据。

3 结 语

提出了基于多传感器参数估计数据融合的煤自然发火实验温度监测系统,借助于计算机智能信息处理与强大的计算处理能力,极大地提高了煤自然发火实验温度数据监测的精度与技术水平,降低了实验分析人员的工作强度,提高了工作效率,确保了监测结果的准确性与可靠性。该数据融合方法已成功应用于 ZRM - 15 型大型煤自然发火实验数据分析系统,取得了预期的效果。

参考文献:

- [1] 刘高文,徐精彩,李 莉.姚桥矿煤自然发火期和数值分析 [J].辽宁工程技术大学(自然科学版),2002,21(3):274~277.
- [2] 徐精彩,王 华.煤自燃极限参数的神经网络预测方法 [J].煤炭学报,2002,27(4):366~370.
- [3] 夏卓君.分布图法在疏失误差处理中的应用 [J].实用测试技术,2002,8(2):33~34.
- [4] 高 伟,姜水生.发动机测试中温度数据的融合方法 [J].南昌大学学报(工科版),2004,26(4):18~20.
- [5] 滕召胜,罗隆福,童调生.智能检测系统与数据融合 [M].北京:机械工业出版社,1999.
- [6] 邓 军,马 砺,张辛亥.圆柱型煤自然发火实验台的误差分析 [J].辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):721~723.