文章编号:1001-5078(2016)12-1486-05

·红外技术及应用·

一种加热炉炉管表面红外检测温度的修正方法

付冬梅1,石雅楠1,杨 焘1,陈 锋2

(1. 北京科技大学,北京 100083;2. 独山子石化公司研究院,新疆 独山子 838600)

摘 要:加热炉炉管表面温度检测的准确性直接关系到加热炉的运行状态和生产安全,利用红 外热像仪测量炉管温度时易受到火焰和烟气、邻近炉管、炉墙辐射等因素的强烈干扰。为了实 时准确获取炉管表面的真实温度,以某炼油厂加热炉为例,首先给出了炉管表面热红外检测温 度的干扰分析,进而提出一种基于现场参数的实时温度校正模型,并结合该模型给出一套判别 某厂加热炉炉管状态的专家规则,最后将这套软件应用于实际工程检验。研究结果表明,该方 法有效实现了炉管表面的温度修正。

关键词:温度修正软件;红外热像仪;加热炉炉管;干扰分析

中图分类号:TQ05 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.010

Calibration method of infrared measurement of surface temperature for heating furnace tube

FU Dong-mei¹, SHI Ya-nan¹, YANG Tao¹, CHEN Feng²

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Dushanzi Petrochemical Company, Dushanzi 838600, China)

Abstract: The temperature measurement accuracy of heating furnace tube surface is directly related to the operating state and safety production of heating furnace tubes. Some factors will seriously influence temperature measurement when thermal infrared imager is used to measure the surface temperature of heating furnace tubes, such as flames, smoke, adjacent furnace tube and furnace wall radiation, etc. To accurately acquire real surface temperature measurement furnace tubes, taking heating furnace in a refinery as an example, interference factors of infrared temperature measurement for tube surface were firstly analyzed, and then a real – time temperature calibration model based on industrial data was presented. Combining with the model, a set of expert rules to determine furnace tubes states were given. Finally this software was applied to practical engineering. The research results show that this method can effectively achieve the temperature calibration of tube surface.

Key words:temperature calibration software; infrared heat picture instrument; heating furnace tubes; interference analysis

1 引 言

加热炉炉管在生产中长期承受自重、高温、高压 以及开停炉时引起的炉管开裂极易发生故障^[1],同 时由于炉膛内燃烧的是明火,炉管内流动的易燃易 爆流体一旦泄露会导致火灾,爆炸等严重后果。炉 管的运行状态不仅关系到产品的质量和产量等生产 指标,而且直接影响设备与生产的安全,因此对加热 炉炉管实时温度的检测十分重要。

作者简介:付冬梅(1963-),女,教授,博士生导师,长期从事红外图像采集,红外图像解码与编码,红外图像处理与特征 提取,故障诊断及其软件设计等工作。E-mail:fdm2003@163.com 收稿日期:2016-03-09;修订日期:2016-04-19

目前的测温技术可分为接触式和非接触式两 类。接触式测温法是指在被测温度介质或场中直接 放入测温元件,最常见的是热电偶温度传感器。这 种方法虽然测量精度高,但由于以点测量数据为基 础无法全方位监测炉管的运行状态,而且与被测物 体紧密接触影响了被测物体的温度场分布^[2]。非 接触式测温法常见的有红外热像法、多光谱测温法, 发射吸收光谱法等。目前工业上主要以红外热像法 为主,这种方法测温响应迅速并且测温范围广,无需 与被测物体接触不会破坏被测目标体的温度场^[3], 因此红外热像仪被广泛地应用于炼油厂加热炉炉管 表面温度检测中。

红外成像的原理^[4]是通过光学机械扫描系统, 将物体发出的红外线辐射汇聚在红外探测器上,形 成红外热图像,由此来分辨被测物体的表面温度。 近十几年来,利用红外热像法检测高温裂解炉管的 表面温度场已十分普遍^[5-7]。根据加热炉炉管的红 外热像监测的具体特点,可能影响其测量结果的主 要因素有:测试方向的影响、炉膛内火焰和烟气的影 响、炉管之间的相互干扰,炉墙辐射的干扰。试验表 明由烟气、邻近炉管、炉墙辐射干扰引起的测量结果 偏差不可忽略^[8],因此在需要精确结果测量时应当 进行相应的结果修正。

修正手段主要分为两种,一种是在红外热像 仪镜头前加装火焰过滤镜片^[8],另一种是融合加 热炉现有的参数采集数据并结合工艺参数指标进 行软件补偿。前者的优点是实现简单,但无法实 时适应现场工艺参数的变化,无法补偿墙体干扰; 后者则可以较全面地综合利用加热炉现有的各种 监测数据信息,具有相对更好的适应能力。本文 首先给出加热炉炉管表面热红外检测温度中的干 扰分析,然后给出一种炉管表面红外检测温度的 软件修正方法,为进一步分析判断炉管状态奠定 基础。

2 干扰因素分析及温度校正的一般模型

2.1 干扰因素分析

红外热像仪从看火口检测炉管表面温度的示意 图如图1所示,图2是炉管表面安装热电偶的示意 图。假设炉管测试区域距离入口和出口的距离已 知;*T_H*表示红外热像仪检测到的炉管表面的温度; *T_{Harg}*表示炉管表面的红外平均温度,取自需要测评 的炉管表面区域平均温度; T_a 表示热电偶测试温度; T_L 表示炉膛温度; T_Q 表示墙体温度; T_n 表示介质内温; T_H^* 表示校正后的温度。



图 1 炉管受温度辐射图 Fig. 1 Temperature radiation of tube



Fig. 2 Section of furnace tube

从图 1 可看出,烟气、邻近炉管、炉墙辐射引起的干扰导致测量结果偏高,即 $T_H > T_H^*$,由于炉膛为炉管加热,故 $T_L > T_H > T_H^*$;另一方面,墙体是火焰和炉膛的受热体,墙体又通过反射对炉管加热,也就是说明墙体是炉管的加热体,因此通常情况下有 $T_L > T_Q > T_H > T_H^*$ 成立。

从图 2 的剖面图上不难看出,炉管的表面温度 T_{H}^{*} 是炉膛,墙体与内部介质热交换平衡时的温度 值;同样热电偶检测的炉管表面温度 T_{o} 是炉膛和墙 体对热电偶保护罩的辐射,再传导到热电偶检测点 处,与内部介质热交换平衡时的温度值。图中 a 点 和 b 点处的介质温度几乎相同,即 $T_{na} = T_{nb}$,同时 热电偶保护罩和炉管外壁所处的炉膛环境相同,但 是保护罩有凸起,材料也与炉管不同,保护罩实测的 红外温度可能比炉管表面实测的红外温度高(已得 到某现场实测温度数据的印证)。从图 2 可见,热 电偶实际上处于保护罩之下,因此热电偶测出的炉 管表面温度会比临近位置炉管的实际温度略低,即 $T_{o} < T_{H}$ 。

2.2 温度校正的一般模型

本文对所拍摄的炉管红外图进行了沿着物料流 动方向的温度走向分析,图 3 为炉管表面温度校正 模型图。



图 3 温度校正模型图 Fig. 3 Temperature correction model

由图3可得 $T_H^* = T_H + f(T_o, T_{Havg}, T_n, T_L)$,其 中 $f(T_o, T_{Havg}, T_n, T_L)$ 表示校正模型。

3 基于数据分析的专家校正规则

3.1 数据采集及分析

根据某厂设备研究所提取的新区焦化装置-焦 化加热炉数组检测数据(部分数据如表1所示),经 提取的所有数据研究对比分析,发现具有如下几点 规律:

(1) $T_{H} = T_{n} + (115 ~ 155) ℃ (约占提供数据$ 量的 70%)

(2) $T_{H} = T_{o} + (20 ~ 40) ℃ (约占提供数据量的 65%)$

(3)沿介质流动方向, T_H 显上升趋势。

表1 加热炉数据分析表

Tab. 1 Data analysis of furnace

序号	炉膛温度 /℃	内温 /℃	热电偶 温度/℃	红外温度 /℃	红外 - 热电偶/℃	热电偶 – 内温/℃	红外 - 内温/℃	炉膛 - 红外/℃	炉膛 - 热电偶/℃	炉膛 – 内温/℃
A 组	733	493.8	575	612.7	37.7	81.2	118.9	120. 3	158	239. 2
	740. 6	495. 1	590. 7	611.5	20. 8	95.6	116.4	129. 1	149. 9	245.5
	738.5	495.4	607.8	624.9	17. 1	112.4	129.5	113.6	130. 7	243. 1
	734. 3	494. 8	591.7	628.6	36.9	96. 9	133. 8	105.7	142.6	239.5
	728.7	496	591.2	613.8	22.6	95.2	117.8	114. 9	137.5	232. 7
B 组	714	485.0	562	639. 1	77.1	77	154. 1	74. 9	152	229
	709. 9	486.2	606.7	645.4	38.7	120. 5	159.2	64. 5	103.2	223.7
	716. 2	490	578.4	657.4	79	88.4	167.4	58.8	137.8	226. 2
	711.4	490. 1	608.5	639.7	31.2	118.4	149.6	71.7	102. 9	221.3
	707	490. 2	609.5	658	48.5	119.3	167.8	49	97.5	216.8
C 组	760	475.7	578	645.7	67.7	102.3	170	114. 3	182	284.3
	740. 6	478.2	592. 1	615.3	23.2	113.9	137.1	125.3	148.5	262.4
	738.5	483.8	589.9	618. 1	28.2	106.1	134. 3	120.4	148.6	254.7
	734. 3	483.3	601.2	644. 1	42.9	117.9	160. 8	90. 2	133. 1	251
	728.7	485.3	598.9	609. 9	11	113.6	124.6	118.8	129.8	243.4
D 组	714	458.1	567	601.2	34.2	108.9	143. 1	112.8	147	255.9
	709. 9	461.3	560.9	588.8	27.9	99.6	127.5	121.1	149	248.6
	716.2	472.9	577.1	623.5	46.4	104.2	150.6	92. 7	139. 1	243.3
	711.4	472.5	564.9	580.6	15.7	92.4	108.1	130. 8	146. 5	238.9
	707	474.6	564.2	595.6	31.4	89.6	121	111.4	142. 8	232.4

3.2 炉管温度修正的框架性原则

(1) 炉管表面有热电偶装置的处理

由于炉管表面不够光滑(结灰或其他原因)会 使少部分炉管表面温度过高或过低(当然大部分炉 管表面温度会比热电偶检测的结果偏高)。根据某 厂提供的检测数据经反复测试和实验仿真验证,本 文最终设计了如下炉管表面温度校正一般原则:

(a) $T_H \leq T_o + 20 \coprod T_H \leq T_n + 115$

满足这一区域的数据只占所有数据的 16%,此时获得的一个共同特点是 T_H 值偏小。从 2.1 节中

可知 $T_{H} > T_{H}^{*}$ 或 T_{o} ,另外校正炉管温度的主要目的 是炉管寿命状态的评估,当获得的校正温度 T_H 略 高时,评估炉管状态时会更为保险,因此采用模型:

$$T_{H}^{*} = T_{H}$$
(1)
(b) $T_{o} + 20 < T_{H} \leq T_{o} + 40 \coprod T_{n} + 115 < T_{H} \leq T_{a} + 155$

同时满足上面两个条件的检测数据占总数的百 分比接近60%,说明这个范围内是炉的主要情况,从 数据统计结果分析,大致符合 $(T_{H} - T_{a})$ 高,则 $(T_{H} - T_{a})$ T_{n})高的一般规律,在这个范围内,取校正模型为:

 $T_{H}^{*} = T_{H} - (0.5 \times (T_{Havg} - T_{o}) + 0.5 \times (T_{Havg} - T_{o}))$ T_n)) × 0.45 (2)

(c) $T_{a} + 40 < T_{H} \coprod T_{H} > T_{n} + 155$

此时的两个温差均较大,满足此条件的检测数 据占总数据的15%~20%,而对应的炉膛温度并没 有较一致的规律,相对内温和热电偶红外温度均偏 高,经多方仿真验证采用的校正模型为:

 $T_{H}^{*} = T_{H} - (0.5 \times (T_{Havg} - T_{o}) + 0.5 \times (T_{Havg} - T_{o}))$ T_{r})) × 0.45 (3)

(d) $T_o + 20 < T_H \leq T_o + 40 \perp T_H > T_n + 155$

此时 T_{Have} - T_n 偏大,符合此范围的数据是总数 据量的小于 5%,说明此情况比较少见。如果炉膛 温度均匀,炉管表面状态一致,理论上 T_{H}^{*} - T_{s} 的数 值在整个炉管上应该大致是一致的,这里炉管表面 状态(主要是结灰情况、反射率等)难以测定,但从 实际采集的数据而言,当炉膛温度 T_L 高时, $T_H - T_n$ 的差值大,即 T_n 一定时, T_L 高则有 T_H 高,故此时 $T_{H} - T_{a}$ 差值大。另外,由于炉管内介质温度的可靠 性相对较高,因此,此时采用如下的校正模型:

 $T_{H}^{*} = \begin{cases} T_{H} - (0.4 \times (T_{Harg} - T_{o}) + 0.6 \times (T_{Harg} - T_{n})) \times 0.45 & T_{L} \ge 750 \\ T_{H} - (0.45 \times (T_{Harg} - T_{o}) + 0.55 \times (T_{Harg} - T_{n})) \times 0.45 & T_{L} < 750 \end{cases}$ (4)

(e) $T_H > T_o + 40 \coprod T_n + 115 < T_H \le T_n + 155$ 符合这一特点的实际数据占总数据的不足 5%,也是小概率事件,此时比较难以判定的是这种 情况的出现是由于红外温度偏高还是由于热点偶检 测的偏低造成的,但是从 T_n + 115 < $T_H \leq T_n$ + 155 这个特点来看,更倾向于热电偶检测偏低,考虑到 T_{H}^{*} 应有一点保守型,故采用如下校正模型:

 $T_{H}^{*} = T_{H} - (0.45 \times (T_{Have} - T_{o}) + 0.55 \times (T_{Have})$ $(-T_n) \times 0.45$ (5)

(2) 炉管表面无热电偶装置的处理

当炉管表面没有安装热电偶时,则无法采用上 面的一般原则,但是如果可以找得到能够近似代替 热电偶检测温度 T_a 的话,则可以采用前述方案。通 过某厂石化研究所提供的多组数据,进过仔细分析 研究发现有如下的关系:

$$T_{Havg} = T_o + (20 \sim 40) \,^{\circ}{\rm C}$$
 (6)

于是得到如下近似关系,用 Î。代替上面一般规 则中的*T*。进行炉管表面温度校正。

$$\hat{T}_{o} = \begin{cases} T_{Havg} - 25 & T_{L} < 650 \\ T_{Havg} - 30 & 650 \leqslant T_{L} \leqslant 800 \\ T_{Havg} - 35 & T_{L} > 800 \end{cases}$$
(7)

(a) 当设备中有热电偶温度 T。,但拍摄的红外 炉管上没有热电偶时,取:

$$T_{o}^{*} = 0.5 \times (T_{o} + \hat{T}_{o})$$
(8)

(b)当设备中没有热电偶温度 T_a ,取:

$$T_o^* = \hat{T}_o \tag{9}$$

然后分别用式(8)或式(9)中的 T_{*}^{*} 代替式 $(2) \sim 式(5)$ 计算式中的 T_a 即可。

4 数据检验

针对 2012 年 11 月现场采集的包含热电偶的炉 管红外图片,采用炉管评估软件对其进行温度修正 处理,将处理后的温度数据与热电偶测温仪表获得 的数据对比。图4是部分红外图片。



(a) 1号炉管(No.1)

(b) 2号炉管(No.2)







(e) 5号炉管(No.5) (f)6号炉管(No.6) 图4 现场炉管红外图片 Fig. 4 Infrared images of furnace tubes

表 2 为修正后的温度数据与热电偶测温仪对比 情况。

表2 修正的温度数据与热电偶测温仪对比

Tab. 2 Corrected temperature data comparing with thermocouple thermometer

			*			
图名	区域	原红外 温度 /℃	热电偶 温度 /℃	修正后红 外温度 /℃	修正前 误差 百分比	修正后 误差 百分比
图 4(a)	R1	578.74	547.7	546.13	5.67%	0.28%
	R2	561.56	547.7	559.74	2. 53%	2.19%
	R3	581.28	547.7	548.69	6.13%	0.18%
图4(b)	R1	635.72	551.9	587.62	15. 19%	6.47%
	R2	625.24	551.9	576. 52	13.29%	4.46%
	R3	631.25	551.9	581.99	14.38%	5.45%
	R1	634.97	554	588	14.62%	6.13%
图 4(c)	R2	629. 17	554	582.17	13.57%	5.08%
	R3	628.07	554	583.83	13.37%	5.38%
	R1	601.97	559.5	566.3	7. 59%	1.22%
图4(d)	R2	585.93	559.5	569.78	4.72%	1.84%
	R3	587.85	559.5	565.18	5.07%	1.02%
	R1	586.04	554.5	559.21	5.69%	0.85%
图 4(e)	R2	564.31	554. 5	564.31	1.77%	1.77%
	R3	598.47	554.5	566.7	7.93%	2.20%
图 4(f)	R1	584.13	547.9	555.21	6.61%	1.33%
	R2	587.54	547.9	558.62	7.23%	1.96%
	R3	587.6	547.9	558.68	7.25%	1.97%

结果表明,采用炉管评估软件对短波红外热像 仪现场温度的修正后其偏差都在6.5%以内,与修 正前误差百分比相比大大降低,满足工程实际的 要求。

5 结束语

为了检测加热炉炉管的运行状态,利用红外热 像仪非接触、快速、灵敏度高、安全的特点进行红外 测温。针对测温过程中可能出现的干扰,本文进行 了理论分析,提出了一种基于数据分析的校正模型, 并通过现场采集的工业数据和专家经验建立炉管温 度修正的专家规则以及具体情况下的方案分析。这 种软件补偿的方法不仅提高了加热炉炉管表面温度 检测的准确度,而且可以实时适应现场参数的变化。 在此基础上论证了该方法和软件解决工程实际问题 的实用性和可靠性,保证了工业生产的运行安全和 经济效益。

参考文献:

- [1] WU Haibin, KONG Lingli. Temperature safty monitoring of ethylene cracking furnace tube based on infrared imaging technology[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(1):46 - 50. (in Chinese) 吴海滨, 孔令立. 基于红外成像技术的乙烯裂解炉炉 管温度安全监测[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10 (1):46-50.
- [2] O Loesener, G Neuer. A new far-infrared pyrometer for radiation temperature measurement on semitransparent and absorbing materials in an arc-heated wind tunnel [J]. Measurement, 1994, 14(2):125-134.
- [3] SUN Xiaogang, LI Yunhong. Review of the development of temperature measurement technology with Infrared thermal imager[J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (2): 101 104. (in Chinese)

孙晓刚,李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外,2008,38(2):101-104.

- [4] MO Zhaoxia, CHEN Yuanjiang. Research and prospects of the domestic infrared thermography technology[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(12):1300 - 1305. (in Chinese) 莫朝霞,陈沅江. 我国红外热像检测技术的研究及发 展[J]. 激光与红外, 2014, 44(12):1300 - 1305.
- [5] FU Dongmei, LI Xiaogang, WANG Xin. A software for insulation evaluation with infrared image[J]. NDT, 2001, 23 (2):51-54. (in Chinese)
 付冬梅,李晓刚, 王欣. 用红外热象技术监测设备的保 温效果[J]. 无损检测, 2001, 23(2):51-54.
- [6] LI Xiaogang, FU Dongmei. Infrared thermal imaging inspection and diagnosis technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese) 李晓刚,付冬梅. 红外热像检测与诊断技术[M]. 北 京:中国电力出版社, 2006.
- [7] TANG Lei, CANG Yajun, WU Haibin, et al. Real-time online inspecting and analysis in temperature of furnace tubes[J]. Ethylene Industry, 2015, 27(2):42 - 46. (in Chinese)

唐磊,仓亚军,吴海斌,等.裂解炉炉管温度实时在监测与分析[J].乙烯工业,2015,27(2):42-46.

[8] ZHONG Jisheng, CHEN Daxi, ZHANG Lihua. The investigation of inspection and diagnosis method of infrared heat picture of heating furnace tubes [J]. Laser & Infrared, 2003,33(1):54-56. (in Chinese)

> 仲跻生,陈大禧,张立华.加热炉炉管的红外热像监测 方法研究[J].激光与红外,2003,33(1):54-56.