

# 电气线路红外热像检测和诊断\*

陈晓军 杨立中 邓志华 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽, 合肥, 230026)

**摘要** 建立了电气线路红外热像诊断热传导模型. 利用红外热像仪检测电气线路表面温度场的分布和热传导模型计算电线、电缆等的内芯温度, 及早发现故障隐患和火险隐患, 并建立了模拟线路运行条件变化时的推算模型, 扩大了检测的应用范围.

**关键词** 电气线路, 红外热像, 诊断, 模型.

## TEST AND DIAGNOSIS OF ELECTRIC CIRCUITRY BY IR THERMAL IMAGING\*

CHEN Xiao-Jun YANG Li-Zhong DENG Zhi-Hua FAN Wei-Cheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China,  
Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** A model of IR thermal diagnosis for electric circuitry was established. The temperature profile on the circuitry surface was measured by a thermal video system. And then the inner metallic conductor's temperature was calculated through the developed model to find hidden troubles of malfunction and fire in early stage. A model simulating the different running conditions of the circuitry was also developed to extend the application scope.

**Key words** electric circuitry, infrared thermal image, diagnosis, modeling.

### 引言

电气火灾是由于电气线路和电气设备产生火源引起的, 这种火源产生的热量, 使周围可燃物超过它的闪点、燃点, 当混合气体浓度达到一定的极限时, 引起燃烧或爆炸<sup>[1]</sup>. 在电气火灾中, 有很大的一部分是由于电气线路发生故障而引起的, 如何检测电气线路的运行状况, 及早发现火灾隐患对保护人民生命财产的安全有着重要的意义.

当电气线路发生运行故障时, 对外表现出来的主要特征是温度场分布的异常. 红外热像仪是非接触性的测温系统, 测得的是物体表面连续分布的温度场. 我们可以很好地利用红外热像系统的这些特点, 应用到电气线路故障隐患检测中. 另外由于红外热像系统测得的是物体表面的温度, 因此需要建立一些模型, 通过表面温度场的分布来反演到内部. 本文建立了一些热诊断数学物理模型, 并且建立了可以模拟电线电缆在不同环境温度 and 不同载流量下运

行状况的模拟推算模型, 为电气线路故障的诊断和预测提供了检测手段和诊断技术.

### 1 红外热像系统

系统采用红外热像仪进行电气线路的在线式测量, 跟踪扫描成像来采集温度场的分布状况, 并对温度场的分布进行均匀性和连续性分析, 依据环境温度、在线电流、导线有关热特性参数等对重点可疑点进行热传导数值计算, 同时编制相应的计算机专用程序进行分析, 并根据有关标准对可疑点进行危险性分类. 整个系统由三个部分组成(见图1): (1) 红外热像及可视图像采集部分; (2) 故障分析数据处理部分; (3) 档案数据库管理及结果输出部分.

### 2 红外热诊断模型的建立

#### 2.1 建立数学模型的基本假设

图2表示了一些电线电缆的模型示意.

为了建立数学模型, 我们进行了以下的假设:

\* 国家自然科学基金(编号: 59936140)资助项目

稿件收到日期 1999-10-21, 修改稿收到日期 2000-06-01

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59936140)

Received 1999-10-21, revised 2000-06-01

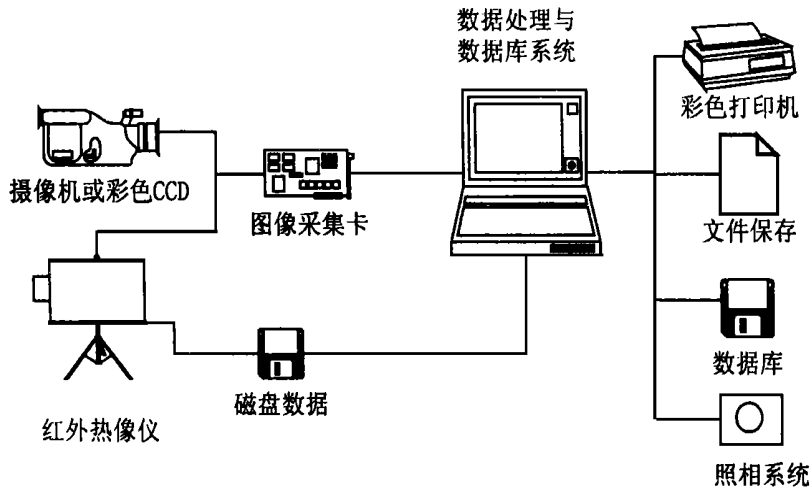


图1 红外热像系统结构图

Fig. 1 Diagram of the thermal video system

(1) 假设在检测过程中线路和环境处于稳定状态, 即周围环境条件恒定, 电流恒定;

(2) 常物性假设, 即构成电线电缆和各种材料的物理参数如热传导系数等视为常数;

(3) 假设电线电缆为长圆柱体形状, 并只考虑自然对流情况.

## 2.2 传热过程理论分析

线路内部热量来自于金属导体的发热(见图3), 对于铜导线, 单位长度的发热量为:

$$Q = I^2 R = I^2 \left( \frac{0.017}{S} \right), \quad (1)$$

式(1)中  $S$  为导线内芯面积( $\text{mm}^2$ ).

另外一方面, 这些热量通过热传导作用到达电气线路的外部, 根据热传导公式<sup>[2,3]</sup>

$$Q = q_r \times 2r_0 = \frac{2\pi k(T_0 - T_i)}{\ln(r_0/r_i)} \times 2r_0, \quad (2)$$

式(2)中  $k$  为绝缘层的热传导系数.

由能量守恒定理可以得到:

$$Q = Q, \quad (3)$$

根据式(1)~(3), 如果已知电线(电缆)的内芯面积、绝缘层材料的热传导特性参数  $k$  和通过线路的电流大小, 就可以计算电线(电缆)的内芯温度.

## 2.3 不同环境温度和载流量模拟推算模型

电气线路运行条件是要发生变化的, 因此要对

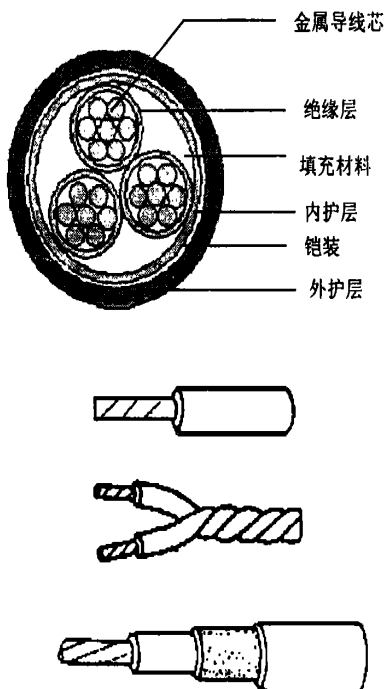


图2 电线、电缆模型示意

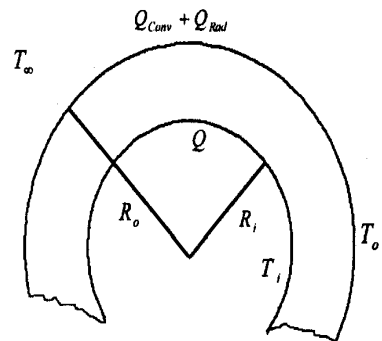


图3 电线电缆热交换和能量守恒模型

Fig. 3 Model of heat exchange and energy conservation in electrical

在一定条件下检测的数据进行外推。例如在冬天检测时由于环境温度低, 因而线路的运行状况还正常, 但到夏天, 由于环境温度变化显著, 因此线路就很难保证运行正常。

电气线路运行条件的变化大致可分以下三种情况: (1) 由周围环境温度的变化引起; (2) 由电气线路运行负荷和载流情况发生变化引起; (3) 综合以上两方向的因素, 即环境温度和负载情况同时发生变化引起。

在稳态条件下, 根据能量守恒定理, 内部热量最终通过热对流和热辐射的方式传递给环境中的空气:

$$Q = Q_{Conv} + Q_{Rad} = 2\pi r_0 h(t_0 - t) + 2\pi r_0 \cdot \sigma \epsilon [(t_0 + 273)^4 - (t + 273)^4], \quad (4)$$

式(4)中  $h$  为对流换热系数;  $\epsilon$  为辐射率;  $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数。

对于自然对流条件下的水平圆柱, 有以下关系式<sup>[2]</sup>:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387R_{ad}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 (10^{-5} < R_{ad} < 10^{12}), \quad (5)$$

式(5)中  $\overline{Nu}$  为努塞尔数,  $Pr$  为普朗特数。

对于常温常压下的圆柱型空气自然对流可以用以下简化公式计算<sup>[2]</sup>:

$$h = 1.32 \left( \frac{t_0 - t}{D} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)

$$Q = Q_{Conv} + Q_{Rad} = 2\pi r_0 \left\{ 1.32 \left( \frac{t_0 - t}{D} \right)^{1/4} (t_0 - t) + 5.669 \times 10^{-8} \epsilon [(t_0 + 273)^4 - (t + 273)^4] \right\} \quad (7)$$

由式(1)一式(3)和式(7), 就可以建立模拟电线电缆在不同环境温度和不同载流量下运行状况的模拟推算模型, 模拟推算的计算步骤如下:

(1) 环境温度发生变化: 此时内部热量发生变化, 可由式(7)通过迭代求解得到外表面温度  $T_0$ , 再由式(2)得到内芯温度  $T_i$ ;

(2) 载流量发生变化: 此时内部热量发生变化, 由式(1)得到内部发热量, 再由式(7)通过迭代解得到外表面温度  $T_0$ , 由式(2)得到的内芯温度  $T_i$ , 而环境温度  $T$  未发生变化;

(3) 环境温度和载流量同时发生变化: 步骤和式(2)一样, 只是环境温度  $T$  发生了变化。

根据上面的分析假设和建立的模型, 编制了计算机程序, 并根据有关标准可对故障隐患进行分类, 建立数据库管理系统。

表1和表2给出了实验测量温度与计算温度的比较。根据实际实验条件, 实验中采取了多种常用的

表1 YC3×6 橡皮绝缘电线线芯温度实测值与计算值的对比  
Table 1 Comparison between measured and calculated temperature of core line for YC 3×6 rubber wire

电流/A	10	20	30	40	50	60	70
环境温度/	24.5	24.5	24.5	25	25	25	25.5
表面温度/	26.0	27.8	33.6	29.6	46.0	57.4	70.5
线芯温度测量值/	25.8	29	36.8	47.1	57.6	73.1	90.4
线芯温度计算值/	26.4	29.6	37.6	46.9	57.4	73.8	92.8
电流变化时外推内芯温度计算值/	基准	31.6	38.8	49.6	61.4	76.2	93.5

表2 BV6 聚氯乙烯绝缘电线线芯温度实测值与计算值的对比  
Table 2 Comparison between measured and calculated temperature of core line for BV6 PVC wire

电流/A	10	20	30	40	50	60	70
环境温度/	25.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	26.0
表面温度/	27.8	28.5	33.7	41.1	49.3	63.4	74.5
线芯温度测量值/	28.0	30.8	38.0	49.1	61.2	79.5	97.3
线芯温度计算值/	28.3	30.3	37.8	48.4	60.7	79.8	96.8
电流变化时外推内芯温度计算值/	基准	31.7	40.9	50.6	63.4	79.2	95.9

民用电线. 由于模拟环境温度变化比较困难, 因此只给出了电流变化时的外推计算值. 实验中采用的电线符合有关国家标准. 由于受到实验条件的限制, 对于动力电缆只进行了一次试验, 其数值在表 3 中给出.

表 3 50mm<sup>2</sup> 聚氯乙烯动力电缆线芯  
温度实测值与计算值的对比

Table 3 Comparison between measured and  
calculated temperature of core line  
for 50mm<sup>2</sup> PVC power cable

电流/A	100	150
环境温度/	28.2	28.8
表面温度/	35.6	45.7
线芯温度测量值/	47.2	73.6
线芯温度计算值/	47.6	72.5
电流变化时外推内芯 温度计算值/	基准	67.4

从以上 3 个表中的数据可以看出, 通过模型计算得到的温度值和实验测量得到的温度值之间的符合程度是比较理想的, 完全符合工程实际应用的要求.

### 3 结语

红外热像系统对石化、烟草、电力、钢铁等企业的电气线路热安全检测具有直观、迅速、准确的特

点. 热诊断模型的建立, 为检测结果的判定提供了理论的依据. 经实践检测工作和实验模拟的检验, 所建立的模型对于一般民用线路和工业低压动力线路是非常有效的. 并先后为中央电视台、安庆石化总厂、北京卷烟厂、上海金山石化集团等多个单位进行了检测和诊断, 取得了良好的经济效益和巨大的社会效益. 对于结构较为复杂的线路, 只要对热阻加以修正, 上面的模型照样能够适用. 高压线路实际发热量小, 且其故障机制与低压线路有本质的区别, 因此诊断模型一般不适用于高压线路.

### REFERENCES

- [1] CHEN Xiao-Jun, YUAN Hong-Yong, XIE Hui. Application of thermal imaging to detecting hidden dangers of electric fire, *Infrared Technology* (陈晓军, 袁宏永, 谢辉. 红外热像技术在电气火灾隐患检测中的应用, 红外技术), 1999, 21(4): 40—43
- [2] Holman J P. *Heat Transfer. 4th edition.* New York: MacGraw-Hill Book Company, 1976 (Holman J P 著. 马庆芳, 王兴国译. 传热学. 第 4 版. 北京: 人民教育出版社), 1981, 25—49, 254—274
- [3] MA Qing-Fang, FANG Rong-Sheng, XIANG Li-Cheng, et al. *Thermal Physical Engineer's Handbook.* Beijing: Agricultural & Mechanical Publishing House (马庆芳, 方荣生, 项立成, 等. 实用热物理性质手册, 北京: 农业机械出版社), 1986, 638—649