

基于表面温度法的接触线磨耗红外诊断

阎玲玲, 金立军*, 张文豪, 杨政勃
(同济大学 电气工程系, 上海 201804)

摘要: 为解决接触网接触线磨耗检测问题, 将红外技术应用到接触线磨耗检测中。开展了接触线磨耗缺陷处温升分析, 建立了接触线的表面温度与其横截面积之间的关系, 提出了利用接触线缺陷处温度计算横截面积的方法, 在测量误差上对接触线磨耗的判断方法进行了评价, 在实验室模拟了接触线温升的试验。研究表明, 利用表面温度法对接触线磨耗的测量误差不超过 10%, 证明了该方法的可用性。

关键词: 接触线; 磨耗; 红外诊断; 温升

中图分类号: U226.5*4; TM726.3; TH741

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1426-04

Infrared diagnosis of contact wire abrasion based on surface temperature method

YAN Ling-ling, JIN Li-jun, ZHANG Wen-hao, YANG Zheng-bo

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to solve the problems of defect of contact wire abrasion, the infrared technique was investigated. After the analysis of the surface temperature of the defect, the relationship of the surface temperature and its cross-sectional area was established. A method was presented to calculate the cross-sectional area of contact wire abrasion with the temperature of the surface. The judgment of contact wire abrasion was evaluated by the index of measurement error, the temperature rises of contact wire were tested in the laboratory. The experimental results show that the maximum measurement error is less than 10%, so the method proposed is practicable.

Key words: contact wire; abrasion; infrared diagnosis; temperature rise

0 引言

接触网(供电电压 27.5 kV, 离地高度 6 m~7 m 纯铜导线)作为电气化铁路中主要的供电装置, 在运行过程中, 通过与受电弓滑板的滑动接触, 源源不断地供给机车负载电流。运行中的接触网要承受电力机车以一定的压力高速接触摩擦, 且有时通过接触网的电流高达 1 000 A 以上, 再加上昼夜不停地处在振动、摩擦、电弧、污染、伸缩的动态运行状态之中, 接触线将不断地被磨耗, 截面逐渐减小。当磨耗达到一定限度时, 接触线的强度及载流量都要下降, 甚至可能断线^[1]。特别是电气化铁道逐步提速, 接触网磨耗加快, 其发

生故障的可能性进一步增大。

基于表面温度法的接触线磨耗的红外诊断正是判断接触线磨耗程度、决策补强或更新的重要依据^[2]。基于此, 本研究开展了相关的研究, 并证明了该方法的可用性。

1 接触线磨耗检测方法研究

1.1 传统接触线磨耗检测

接触线制成上部带沟槽的圆柱状, 如图 1(a)所示。图 1(a)中, 沟槽是为了便于安装接触线的线夹, 接触线底面与受电弓接触的部分呈圆弧状。电力机车在运行过程中, 接触导线磨耗是由于受电弓滑板和接触

收稿日期: 2011-06-20

作者简介: 阎玲玲(1985-), 女, 山东威海人, 主要从事红外成像技术及接触网故障诊断方向的研究。E-mail: 00irisyan@tongji.edu.cn

通信联系人: 金立军, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

导线之间的机械磨损以及电气磨损产生的。接触导线磨耗引起导线下部截面变化,如图 1(b)中阴影部分所示。

接触线的磨耗会影响到接触线的强度安全系数,运营中,要求每年至少进行一次接触线磨耗测量,当接触线磨耗达到一定限度时应局部补强或更换^[3]。

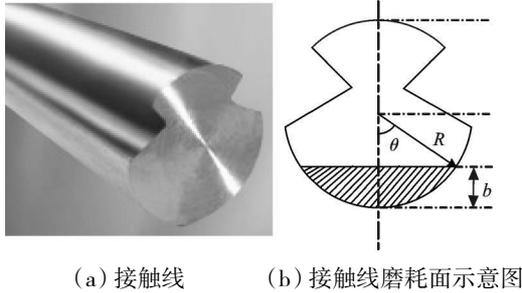


图 1 接触线及接触线磨耗面示意图

从 20 世纪 70 年代初开始,国外主要以电气化铁路为主的发达国家投入大量人力、物力进行接触线磨耗检测装置的开发,并试制出了实用的检测装置。按检测方式不同,各类型的检测装置的分类如表 1 所示^[4]。

表 1 检测装置及性能比较

检测方式	检测速度	精度	结构	成本	检测形式
超声波式	低	高	较简	较低	非接触
遮光式	低	高	较简	较低	接触
滚轮式	低	低	简	低	接触
报警式	—	—	简	高	—
ITV 方式	高	高	较繁	较高	非接触
激光式	高	高	复杂	高	非接触
图像处理式	高	高	较繁	较高	非接触

目前,国内一般采用接触式(游标卡尺)和非接触式两种方法(激光扫描测量、CCD 成像测量)对接触线几何参数进行测量。其中接触式测量磨耗要在断电的情况下利用游标卡尺,测量接触线的残存高度,然后对照该型号接触线磨耗换算表,查出磨耗面积(磨掉的截面积)。这种方式工人劳动强度增大,而且检测周期长,采集数据少,不能完全反映导线的磨耗情况;而非接触式测量如 CCD 成像测量,是通过对接导线合理照明,采用图像处理分析的方法得到接触线在 CCD 上的成像位置,从而计算出接触导线的磨耗。这种方式成本较高、计算复杂、受环境因素影响较大^[5-6]。

综上所述,上述这些方法都无法满足铁路提速对接触网运行状态检测的迫切需要,为此笔者提出了基于表面温度法的红外诊断方法来检测接触线磨耗情况。

1.2 接触线磨耗的红外检测

红外诊断的相对温差法,是通过分析相对温差与

接触电阻的变化关系,来确定电力设备的温升。该方法克服了环境因素及负荷波动等对测量结果的影响,对电力设备的红外诊断具有指导性^[7],但是对于接触线的红外检测,该方法存在忽略考虑太阳辐射引起的附加温升、小温升误差大、接触线磨耗定位难等不足^[8]。

表面温度法可利用发热点的表面温度来判断磨耗程度,这种方法简单、直观、实用性较强。通过拍摄接触线表面温度图像,可直观地反映出接触线温度场的分布情况。本研究根据接触线的表面温度、结构参数、物性参数和环境温度建立接触线温升的数学模型,对接触线的电阻进行反演计算,可得出接触线横截面积,并与其允许磨耗进行比较,最终实现接触线磨耗的非接触在线诊断^[9-10]。

2 接触线温升的数学模型

对于接触线来说,在交变电场作用下,热源主要是载流芯芯发热。在建立数学模型前,首先要进行一些假设:

(1) 稳态假设:接触线表面与空气自然对流传热,当发热与散热达到热平衡时,温度分布不随时间变化;

(2) 常物性假设:构成接触线的材料的物性参数为常数;

(3) 接触线通过电流后均匀发热,单位时间热源均布;

(4) 由于接触线无限长,且通过相同的电流,可忽略其轴向传热^[11];

(5) 将截面等效为相同面积的圆形。

在稳态条件下,接触线芯芯的发热速率等于接触线表面与环境交换热量的速率。导体稳态运行时可得到稳态电流^[12],其计算公式如下:

$$I^2 R_r = p_r + p_c - p_s \quad (1)$$

式中: R_r —工作温度下的接触线单位长度交流电阻, Ω/m ; p_r —单位时间单位长度的辐射热损耗, W/m ; p_c —单位时间单位长度的对流散热损耗, W/m ; p_s —单位时间单位长度的太阳辐射热, W/m 。

根据黑体辐射的基本定律(普朗克定律、斯忒藩—玻耳兹曼定律、兰贝特定律),接触线表面向周围空间辐射的热损耗可由下式计算:

$$p_r = \sigma \cdot \pi \cdot D \cdot k_e (T_e^4 - T_0^4) \quad (2)$$

式中: σ —斯忒芬—波尔兹曼常数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$; D —接触线直径, m ; k_e —黑体辐射系数(即黑度,与材料种类及其温度和表面状况有关); T_e —接触线稳态温度, K ; T_0 —环境温度, K 。

根据对流换热的基本定律(牛顿冷却定律),由于自然风的存在,强迫对流散热发出的热损耗可由下式计算:

$$p_c = \lambda \cdot N_u \cdot \pi (T_e - T_0) \quad (3)$$

式中: λ —与导体相接触的空气膜导热系数; N_u —欧拉数。

当无风无日照条件下,自然对流下导体的散热量为:

$$p_c = 4.585 \times (T_e - T_0) [D^3 \cdot (T_e - T_0)]^{0.27} \quad (4)$$

当存在日照时,导体吸收的太阳辐射热可由下式计算:

$$p_s = \gamma \cdot D \cdot S_i \quad (5)$$

式中: γ —导体的吸热系数; S_i —日照强度, W/m^2 。

工作温度下接触线单位长度的交流电阻为:

$$\begin{cases} R_T = R_d(1 + Y_s) \\ Y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \\ x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_d} \times 10^{-7} \\ R_d = R_{20} [1 + \alpha_{20} \cdot (T_e - 293)] \\ R_{20} = \rho_{20} \frac{1}{s} \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_T —工作温度下接触线的交流电阻, Ω/m ; R_d —工作温度下接触线的直流电阻, Ω/m ; Y_s —集肤效应因数; R_{20} —20 °C时导体的直流电阻, Ω/m ; ρ_{20} —20 °C时材料的电阻率, $\Omega \cdot m^2/m$; α_{20} —20 °C时材料的温度系数; s —接触线横截面积, m^2 。

根据上述数学计算式(1)~式(6),求解可得出温度与横截面积的关系为:

$$\begin{cases} I^2 \cdot R_d \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{8\pi f}{R_d} \times 10^{-7} \right)^2}{192 + 0.8 \left(\frac{8\pi f}{R_d} \times 10^{-7} \right)^2} \right] = \\ \sigma \cdot \pi \cdot D \cdot k_e (T_e^4 - T_0^4) + p_c - \gamma \cdot D \cdot S \\ R_d = \frac{\rho_{20}}{s} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T_e - 293)] \end{cases} \quad (7)$$

若外界无风,式中:

$$p_c = 4.585 \times (T_e - T_0) [D^3 \cdot (T_e - T_0)]^{0.27} \quad (8)$$

若外界有风,式中:

$$\begin{cases} p_c = \lambda \cdot N_u \cdot \pi (T_e - T_0) \\ N_u = 0.65 R_e^{0.2} + 0.23 R_e^{0.61} \\ R_e = 1.664 \times 10^9 \cdot v \cdot D \cdot [T_0 + 0.5 \cdot (T_e - T_0)]^{1.78} \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~式(9)中:常量 $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$, $\lambda=0.02585$; 而 $T_e, T_0, \gamma, s_i, v, D, \rho_{20}, \alpha_{20}, k_e, I$ 为与测量过程相关的环境参量。下面将通过红外实验,对环境参量进行测量。

3 实验研究

实验设备包括导线加载装置、FLIR A40 红外热像仪、数字式热电偶温度计、数字式室内温度计、调压器、调节变阻器和交流电流/电压表。

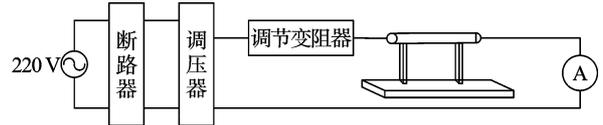


图 2 实验电路图

以纯铜裸导线(直径 $D=2\text{ mm}$)为例,本研究利用红外热像仪测量有无磨损时导线表面的温度分布,进而诊断导线的磨损程度。导线存在不同程度的局部磨损,磨损比例分别为 20%、30%、40%、50%、55%。

本研究在导线上加载不同的单相交流电,待导线处于热平衡状态(温度不随时间变化)时,分别用温度计测量环境温度,用红外热像仪扫描导线磨损部位,读取磨损部位的表面温度值。温度值数据如表 2 所示。该实验中环境参量值如表 3 所示。

表 2 不同电流和磨损下的导线表面温度

磨损比例/(%)	0	20	30	40	50	55	
剩余截面积/ mm^2	3.1	2.5	2.2	1.9	1.6	1.4	
表面 温度 / $^{\circ}C$	$I=6\text{ A}$	24.8	25.4	25.8	26.4	27.0	27.6
	$I=7\text{ A}$	25.7	26.4	27	27.5	28.5	29.2
	$I=8\text{ A}$	26.7	27.8	28.4	29.2	30.2	31.2
	$I=10\text{ A}$	28.7	30	31.2	32.2	33.8	35.4
	$I=12\text{ A}$	31.3	33.1	34.4	36.2	38.4	40.3

表 3 实验环境参量值

环境参量	数据
环境温度 $T_0/^{\circ}C$	22
导线直径 D/mm	2
20 °C时导线电阻率 ρ_{20}	1.724×10^{-8}
20 °C时导线温度系数 α_{20}	3.93×10^{-3}
黑体辐射系数 k_e	0.78
热像仪距离设置/ m	2

不同电流和不同磨损比例时磨损部位温升分布如图 3 所示。由图 3 可以看出,随着电流的增大以及磨损程度的增强,磨损部位的温度升高,并且图 3 中各种情况下的温差均高于热像仪的最小分辨温差 0.1 °C。由此可见,通过热像仪扫描检测接触线的磨损情况是可行的。实验记录导线磨损处的可见光图与热像仪的红

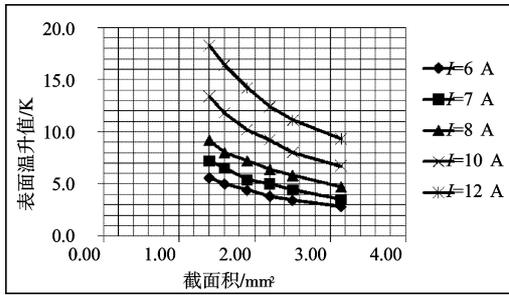


图 3 不同电流不同磨耗处的温升分布

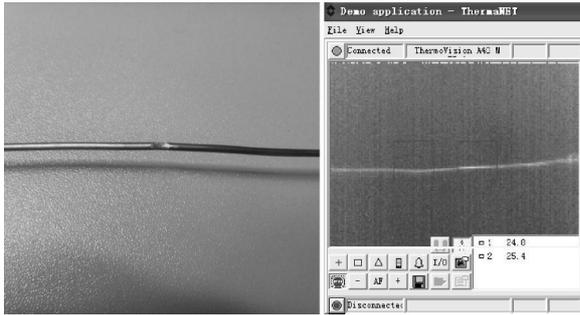


图 4 导线磨耗处可见光图与红外图像

外图如图 4 所示。

通过测量表面温度诊断出的导线磨耗程度与实际磨耗程度的比较结果如表 4 所示。从表 4 的结果中可以发现最大误差不超过 10%，证明了所建立的温升数学模型和诊断方法可满足工程设计的需要。

表 4 截面积的计算值与最大误差

磨耗比例/(%)	0	20	30	40	50	55	Max(ε)	
剩余截面积/mm ²	3.1	2.5	2.2	1.9	1.6	1.4	/(%)	
截面 积计 算值 /mm ²	I=6 A	3.30	2.64	2.32	1.96	1.69	1.48	6
	I=7 A	3.26	2.67	2.30	2.06	1.69	1.50	8.5
	I=8 A	3.23	2.53	2.26	1.97	1.70	1.49	6
	I=10 A	3.35	2.73	2.32	2.06	1.74	1.50	9.1
	I=12 A	3.30	2.69	2.37	2.02	1.72	1.51	8
Max(ε)/(%)	6.6	9.1	7.6	8.5	8.8	8	9.1	

在实际应用中,在列车运行过后,可利用红外热像仪扫描接触线,记录表面温度与环境温度,同时从牵引变电所调出测量当时的电流数据,再记录外界日照强度、风速,最后利用式(7)~式(9),求出接触线的横截面积,与无磨耗的接触线横截面积作比,即可得出磨耗比例,实现接触线磨耗的非接触在线诊断。

根据标准规定,全锚段接触线平均磨耗超过该型号接触线截面积的 20%时应全部更换,局部磨耗超过 30%时可进行补强,当局部磨耗达到 40%时应切换做接头。

4 结束语

(1) 红外诊断方法可实现利用表面温度检测接触线磨耗程度,实现了对接触线磨耗进行非接触式、实时的在线诊断,突破了传统的接触式检测技术的局限性,对及时发现接触线的烧伤磨耗隐患,具有非常重要的意义。

(2) 在实际的检测工作中,为了提高红外热像仪检测与诊断的可靠性,应根据不同的检测环境,首先分析热像仪的测量误差^[13],对温度分布值进行修正,再进行诊断工作。实验表明,诊断误差小于 10%,可满足工程检测需要。

参考文献(References):

- [1] [德] Kieβling, Puschmann, Schmieder. 电气化铁道接触网[M]. 中铁电气化局集团,译. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都:西南交通大学出版社,2003.
- [3] 谭秀炳,刘向阳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.
- [4] 张忠杰,于万聚. 接触线磨耗图像检测技术[J]. 西铁科技,1996(2):93-97.
- [5] DEOLIVEIRA J H E, LAGES W F. Robotized Inspection of Power Lines with Infrared Vision [C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montr é al:[s.n.],2010:1-6.
- [6] SALAMA M M. Thermal Performance of an overhead transmission line under the influence of dust accumulation[C]// Energy Conversion & Management. Cairo:[s.n.],1999: 1323-1334.
- [7] 胡世征. 电气设备红外诊断的相对温差判断法及判断标准[J]. 电网技术,1998,22(10):47-50.
- [8] 岳灵平. 高压输电线路红外检测探析[J]. 湖州师范学院学报,2006,28(S1):59-62.
- [9] ROGALSKI A. Infrared detectors:an overview[J]. Infrared Physics & Technology,2002(43):187-210.
- [10] FLETEHE G E. Automatic Measurement of the Position of the Overhead Contact Wire [D]. U.K:British Rail,2009: 119-123.
- [11] 赵建华,袁宏永,范维澄,等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(11): 52-54.
- [12] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [13] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999,21(4):20-24.

[编辑:罗向阳]