

基于电接触元件暂态热路建模的接触电阻测量研究

张青山, 段建东, 叶兵, 樊华, 张宏光

(西安理工大学电气系, 陕西 西安 710048)

摘要: 目前, 接触电阻的检测主要是电压电流法或电桥法, 其不足是仅适于离线应用。提出了一种在线式的接触电阻间接测量新方法。首先在建立电接触元件的理论物理模型和径向暂态热路分析模型的基础上, 推导出热路响应方程; 然后再在建立元件轴向热传导数值分析模型的基础上, 最终推导出计及温度和电流的接触电阻曲线关系, 提出通过曲线的时间常数计算电接触元件的接触电阻。大量的理论分析、计算与有限元分析ANSYS仿真表明, 所研究的测量方法可以准确求取接触电阻的值, 为电气设备的在线监测和热缺陷分析提供了理论依据。

关键词: 电接触; 热路建模; 温度传导; 接触电阻

Research of measuring contact resistance based on the electrical contact transient thermal circuit model

ZHANG Qing-shan, DUAN Jian-dong, YE Bing, FAN Hua, ZHANG Hong-guang
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: At present the main method of measuring contact resistance is bridge method or detecting voltage/current, the shortage is only suitable for offline applications. A new method of online measuring contact resistance based on the transient thermal circuit model is raised. Firstly the theoretical physical model and the radial transient thermal circuit model of electric contact components are established, the thermal circuit response equation is concluded based on theory analysis. Then the axial heat transfer numerical analysis model is established. Finally the contact resistance model considering temperature and current is derived from the theory analysis, a method of measuring contact resistance by using the curve of thermal time constant is raised. A lot of theoretical analysis/calculation and finite element analysis of ANSYS simulation results show that the method can accurately obtain the value of the contact resistance, which provides theoretical support for on-line monitoring of contact resistance and thermal defect analysis of electric power equipment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50707026).

Key words: electrical contact; transient thermal circuit model; temperature conduction; contact resistance

中图分类号: TM13; TM751 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0027-07

0 引言

在电力系统中, 各类电接头被大量使用, 如开关接头、接线端子、母线接头等。由于这些接头的动静触头存在机械磨损或材料氧化, 接触面间普遍存在着接触电阻。随着使用年限的增加, 特别是电化学腐蚀、机械磨损、接触压力下降等各种因素的影响, 接触面间的接触电阻会逐步增大^[1]。近年来, 许多重大电气故障的发生, 是由于部分元件的接触

电阻过大引起元件过热引发的^[2]。在小电流接地电力系统中, 发生单相短路时, 由于继电保护的要求需要持续运行两个小时, 如果接触电阻过大, 将会致使设备温度过高, 寿命缩短。因此, 检测电接触元件的接触电阻值及其变化, 有利于电气设备的安全运行。

国外的研究中, 文献[3]提出了利用三次谐波法测量接触电阻; 文献[4]研究了基于超导量子器件的接触电阻检测仪器; 日本学者 H.Aichi 提出了应用电解槽法测量接触电阻^[5]。这些方法在工业中并未得到广泛应用, 都只能在特定的实验室条件下进行, 主要用于电接触理论分析与相关研究。

在国内, 实际工程应用中, 接触电阻的主要检

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707026); 陕西省教育厅服务地方专项计划(2013JC24); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(00X901)

测方法是电压电流法或电桥法^[6],属于离线式或实验室检测方法,即在实验室条件下,使用电桥法或者其他精密装置,对电接触元件的接触电阻进行测量,但只能用于元件出厂前或设备定期维修时,不能用于在线的连续测量,并且国标要求测试电流需大于 100 A^[7]。实践表明,要进行在线监测通常是十分困难的,元件往往运行在复杂的工作环境中,无法直接获取各种电气参数^[8]。所幸的是,现有的状态监测装置测得的一些数据,如元件的表面温度、周围环境的温度以及负荷电流的大小等,能够间接反映接触电阻。

目前关于电接触模型的研究并不多,一些可参考的研究有:文献[9]讨论了考虑温度情况下架空线路的物理模型和暂态热路模型;文献[10]研究了导线接触电阻计算模型;文献[11-12]研究了电缆和架空线路的集中参数热路模型。本文以这些理论为基础,进行电接触元件物理模型、径向暂态热路模型、轴向导体温度传导模型的研究,重点分析温度响应曲线和导体温度分布曲线。根据导体温度曲线和电流曲线,结合元件的热路模型,数值分析计算出接触电阻。最后,通过有限元分析 ANSYS 软件仿真实验,测试该接触电阻的求法。

1 电接触元件的物理模型

电接触元件一般可以等效为如图 1 所示的结构,接触区域不可避免地存在一定值的接触电阻 r 。当电流流过电接触元件的接触区域时,接触电阻就将一部分电能转化成热能,其大小如式 (1)。

$$P_r = i_r^2 r \quad (1)$$

温度是热能的体现形式,描述了物体内分子间平均动能。部分电能被接触电阻转换成分子间的动能,从而使得接触区域的温度升高。因此,接触区域的温度与接触电阻值存在必然的联系。

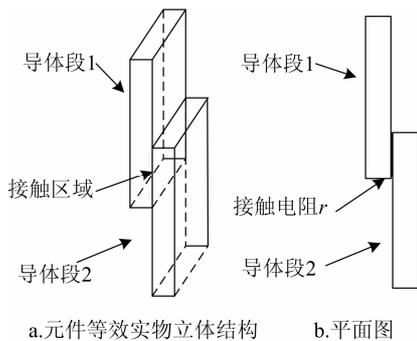


图 1 电接触元件的等效结构

Fig. 1 Equivalent model of electrical contact element

将图 1 电接触元件的等效结构进一步等效为如图 2 所示的理想物理模型,其中接触电阻 r 等效成厚度为 $2\Delta x$ 的均匀分布导体段。设定接触电阻产生的热量是沿着导体的轴向(X 轴)正负双向传播,考虑导体段 1 和导体段 2 的材料和截面积可能有不同,热源区产生的能量会以不同的比例向 X 轴正反方向传播。

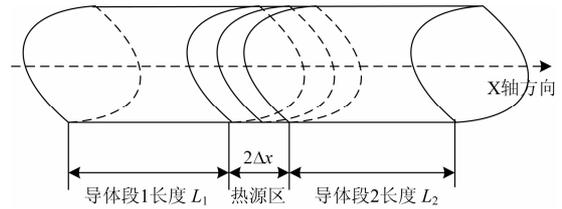


图 2 电接触元件的理想物理模型

Fig. 2 Ideal model of electrical contact element

热源区温度变化正是接触电阻的体现,因此要对热源区的温度变化过程进行研究,建立以热源区为研究对象、监测热源区温度为 θ_x 并考虑周围环境温度为 θ_0 的理想物理模型^[9],如图 3 所示。

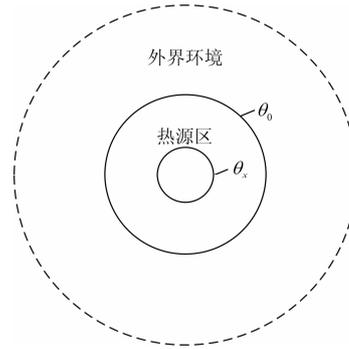


图 3 电接触元件热源区的理想物理模型

Fig. 3 Physical model of heat source area

2 热源区径向热路暂态分析

2.1 径向热路暂态模型

由热源区的理想物理模型,不难得到以热源区为中心的径向热路分析模型,如图 4 所示。其中, Q_c 为导线自身发热量,其值为 $I^2 R_c$, R_c 为热源区导体电阻和接触电阻之和; θ_x 和 θ_0 分别为热源区温度和导线所在的周围环境温度,在实际应用中可设环境温度不变,即 θ_0 为常量; R_c 为热源区的热阻,忽略了空气热阻,因为空气的热阻相对足够小; C_x 为导体的热容; R_n 和 C_n 分别为环境监测点 θ_0 以外的热阻和热容。

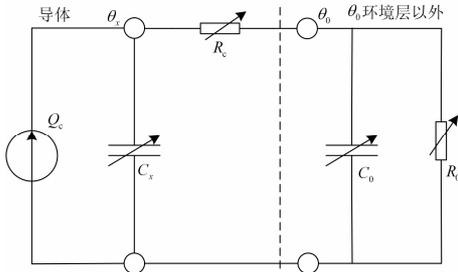


图4 热源区径向热路分析模型

Fig. 4 Radial thermal model of heat source area

考虑到热流场、热路中的物理量与电流场、电路中的物理量有相似的对应关系，因此可以利用熟知的电路知识来分析热路。参照节点电流法，在热路分析模型中可得节点热流方程为

$$Q_c = C_x \frac{d\theta_x}{dt} + \frac{\theta_x - \theta_0}{R_c} \quad (2)$$

由图4可知，该线路暂态热路模型为一阶热路模型，如果已知响应的初始状态量为 $f(0_+)$ 、时间常数 τ 以及最终状态 $f(\infty)$ ，通过与电路中一阶电路全响应对应可知，任何时刻的响应量如下

$$f(t) = f(\infty) + (f(0_+) - f(\infty))e^{-t/\tau} \quad (3)$$

从而，由热源区初始温度 θ_0 以及最终温度 θ_∞ 可以求解出暂态过程中任意时刻温度，如式(4)所示。

$$\theta_{xt} = \theta_\infty + (\theta_0 - \theta_\infty)e^{-t/R_c C_x} \quad (4)$$

其中， $R_c C_x$ 具有时间量纲，称为热时间常数，用 τ 表示，其物理意义是：对导体中通阶跃电流后，导体温升的变化量由零达到总温升量的63.2%所用的时间^[13]。它反映了导体温升的变化速度，是电接触元件的特性参数之一，环境温度不变的情况下，其大小只与材料的热阻和比热容有关。

2.2 响应曲线分析

一般地，考虑电接触元件的导体电阻相对于接触电阻而言相当小，可忽略不计。因此，当温度上升时，其吸收的热量主要来自等效接触电阻的发热^[14]。那么，对于图2所示的理想物理模型，若只考虑初始和最终的稳态过程，可得

$$Q = mc\Delta T = I^2 r \quad (5)$$

进一步可推得

$$\Delta T = \frac{I^2 r}{\rho \cdot 2\Delta x \cdot s \cdot c} \quad (6)$$

式中： I 为通过导体的电流； r 为接触电阻； ρ 为导体密度； c 为导体比热容； s 为导体横截面积。

为清晰表述起见，以铜排母线为例，相关材料参数及运行条件如表1所示，并假定环境温度为 8°C 、热源区接触电阻的热源能量传播比例系数为 $p=0.5$ 。那么，可推出铜排母线的稳定温度是 $\theta_\infty = 59.9^\circ\text{C}$ ，时间常数 $\tau = 8.23 \text{ min}$ ，则式(4)的热路响应方程可表示为式(7)，对应计算出的温度响应曲线如图5中的实线所示。

$$\theta_{xt} = 59.9 - 51.9e^{-t/8.23} \quad (7)$$

表1 铜排母线的相关参数

Table 1 Relevant parameter

铜的密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	铜的导热系数 $\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	铜比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	铜的电阻率 $\rho_1/(\Omega\cdot\text{m})$
8.9×10^3	380	390	1.75×10^{-8}
母排额定电流 I_N/A	流过母排电流 I/A	母排截面积 $s/(\text{mm}\cdot\text{mm})$	热源区等效电阻 率 $\nu_2/(\Omega\cdot\text{m})$
585	300	5·50	1.25×10^{-4}

同时，根据母排接触元件的实物等效模型，采用国际上权威的有限元软件 ANSYS 建立了三维仿真模型如图6所示，使用具有三维导热能力的有限单元 SOLID70 进行热分析^[15]，绘制热源区仿真温度响应曲线如图5中虚线所示。

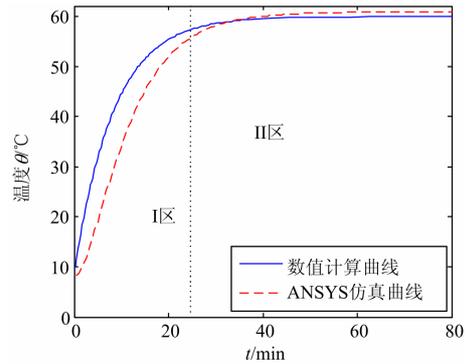


图5 热源区温度响应曲线

Fig. 5 Temperature response curve of heat source area

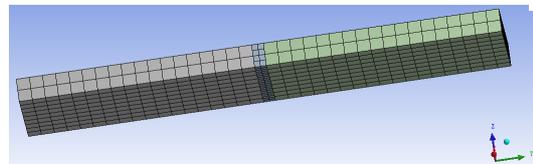


图6 铜排有限元接触模型

Fig. 6 Finite element contact model of copper busbar

从图 5 可以看出, 理论数值计算的结果与有限元软件 ANSYS 的仿真结果之间的误差很小。并且, 温度响应过程可以分成两个区域, 在虚线左边的区域 I, 温度变化迅速, 它主要体现非稳态传热过程, 热时间常数主要体现在该区; 在虚线右边的区域 II, 温度变化缓慢, 该段体现导体温度的稳定状态。

3 导体轴向温度传导分析

3.1 温度传导的数值计算模型

热源区因接触电阻存在而发出的热量一部分被导体吸收掉, 用于提高其内能(温度上升), 另外一部分通过导体外表面散热耗散到周围空间。因此, 对于导体中温度的传导模型就可采用集中参数表示, 如图 7 所示。

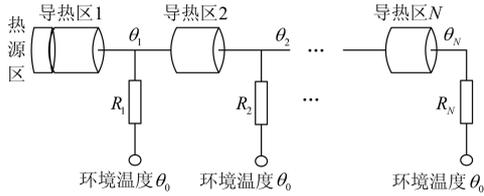


图 7 温度传导的集中参数模型

Fig. 7 Lumped parameter temperature conduction model

热源区发出的热量首先经过导热区 1, R_1 为导热区 1 及周围部分的对流散热及其他热耗散的综合热阻。同理, 对导热区 2 至导热区 N 均采用集中参数法进行处理。各导热区长度可根据实际工程中温度分布情况进行选取, 不一定相等。

将各导热区按一定厚度进行分割, 形成 n 块厚度为 dx 、面积为 s 的微元, 如图 8 所示。根据传热学^[16]和电接触相关理论^[17]进行分析和研究。

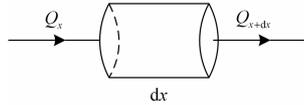


图 8 导体温度传导微元

Fig. 8 Conduction infinitesimal of temperature

根据傅立叶定律, 导入一微元体的热量为

$$Q_x = -\lambda s \frac{\partial \theta}{\partial x} dt \quad (8)$$

式中: λ 是导体的导热系数, 单位是 $W/(m \cdot ^\circ C)$; s 表示导体截面积, 单位 m^2 ; θ 表示温度, 单位为 $^\circ C$; t 表示时间, 单位 s 。

导出微元的热量为

$$Q_{x+dx} = -\lambda s \frac{\partial \theta}{\partial x} dt + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda s \frac{\partial \theta}{\partial x} dt \right) dx \quad (9)$$

微元内的热源产生的热量为

$$Q_{i^r} = q_v s dx dt \quad (10)$$

微元的内能变化量为

$$Q_{i^c} = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} s dx dt \quad (11)$$

式中: ρ 为导体密度, 单位 kg/m^3 ; c 为导体比热容, 单位 $J/(kg \cdot ^\circ C)$; q_v 为单位体积、单位时间产生的热量, W/m^3 。根据能量守恒原理有, 微元内能的变化量等于导入导出微元体的热量差与微元体内热源产生的热量之和, 如式(12)所示。

$$Q_{i^c} = Q_x - Q_{x+dx} + Q_{i^r} \quad (12)$$

即

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} s dx dt = \lambda s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dt dx + q_v s dx dt \quad (13)$$

整理可得

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho c} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho c} \quad (14)$$

按照上述分析过程, 则各导热区的温度传导模型用通式表示为(其中 $j=1 \sim N$)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda_j}{\rho_j c_j} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q_{vj}}{\rho_j c_j} = a_j \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q_{vj}}{\rho_j c_j} \quad (15)$$

利用有限差分法对偏导数进行离散化, 一阶偏导数用一阶前差商代替, 二阶偏导数用二阶中心差商代替, 均忽略截断误差, 可得

$$\frac{\theta_i^{k+1} - \theta_i^k}{\Delta t} = a_j \frac{\theta_{i+1}^k - 2\theta_i^k + \theta_{i-1}^k}{\Delta x^2} + \frac{q_{vj}^k}{\rho_j c_j} \quad (16)$$

其中 $0 < i < nj$, i 表示第 i 个微元, k 表示时刻, j

表示导热区编号。整理可得导体温度传导方程为

$$\theta_i^{k+1} = \frac{a_j \Delta t}{\Delta x^2} (\theta_{i+1}^k + \theta_{i-1}^k) + \left(1 - \frac{2a_j \Delta t}{\Delta x^2} \right) \theta_i^k + \frac{\Delta t q_{vj}^k}{\rho_j c_j} \quad (17)$$

$$\text{令 } f_{j0} = \frac{a_j \Delta t}{\Delta x^2}, \quad f_{j1} = (1 - 2f_{j0}), \quad f_{j2} = \frac{\Delta t}{\rho_j c_j s \Delta x_j},$$

可得传导方程为

$$\theta_{ij}^{k+1} = f_{j0} (\theta_{i+1j}^k + \theta_{i-1j}^k) + f_{j1} \theta_{ij}^k + f_{j2} q_{vinj}^k \quad (18)$$

式中, q_{vinj}^k 表示一个微元单位时间内产生的热量。

3.2 温度传导的数值计算分析

与 2.2 小节同样, 以表 1 参数的铜排母线为例, 将母排沿轴向正方向分为四个导热区, 每个区分成 n 个微元, 采用表 2 中的数值计算参数。

表 2 数值计算递推参数取值

Table 2 Value of numerical recursive parameter				
参数名	接触电阻 r/Ω	电流平方 i^2/A^2	截面积 s/m^2	时间间隔 $\Delta t/\text{s}$
参数值	0.001	90 000	0.000 25	0.004
参数名	$\Delta x_1/\text{m}$	$\Delta x_2/\text{m}$	$\Delta x_3/\text{m}$	$\Delta x_4/\text{m}$
参数值	0.001	0.002	0.01	0.05
参数名	f_{10}	f_{11}	f_{12}	n_1
参数值	0.44	0.12	0.004 6	50
参数名	f_{20}	f_{21}	f_{22}	n_2
参数值	0.11	0.78	0.002 3	50
参数名	f_{30}	f_{31}	f_{32}	n_3
参数值	0.004 4	0.991 2	0.000 46	50
参数名	f_{40}	f_{41}	f_{42}	n_4
参数值	0.000 017 6	0.999 648	0.000 23	7

以热源区的温度响应曲线为初始条件, 按照式(16)的迭代计算, 绘制出导体温度传导曲线。同时, 通过有限元分析软件ANSYS仿真获得温度传导仿真数据。如图9所示, 距离热源区1 cm处的温度响应曲线。由图可见, 1 cm处数值计算曲线能够正确跟踪仿真曲线的趋势, 温度变化过程与热源区几乎相同, 只有最终的稳态温度值有微小差别。

若以导热区为零位置, 当热源区通300 A阶跃电流200 min后达到稳态温度时, 导体沿 x 轴正方向的温度分布曲线如图10所示。因为普通计算机的计算能力有限, 将铜母排分成了有限段(4段), 所以温度分布数值计算曲线有明显的转折点, 与ANSYS仿真曲线不能接近完全吻合, 但数值计算曲线基本能够正确跟踪仿真曲线的趋势。如果使用超级计算机, 可将母排分成近似无穷多个导热区, 数值计算温度分布曲线将会非常平滑, 并且和仿真曲线的吻合度会非常高。

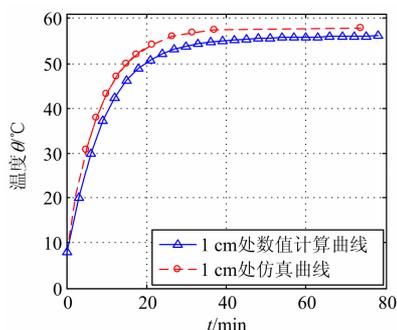


图 9 导体温度响应曲线

Fig. 9 Temperature response curve of conductor

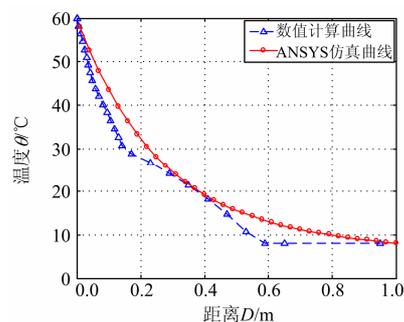


图 10 导体的温度分布曲线

Fig. 10 Temperature distribution curve of conductor

4 电接触元件接触电阻的获取与实验

4.1 接触电阻的检测与求取方法

基于以上模型分析, 结合式(5)与式(6)可以通过导体的温度、电流检测来求取接触电阻, 如式(19)。

$$r = \frac{1}{1 - e^{-l/R_c C_x}} \cdot \frac{\rho \cdot 2\Delta x \cdot s \cdot C(\theta_{xt} - \theta_0)}{I^2} \quad (19)$$

式(19)另外可表述为如图 11 所示三维曲线(以铜排母线的参数为例)。由图中曲线可知, 当电流很小时, 接触电阻的变化对温度没有明显影响; 当接触电阻很小时, 电流的变化对温度的变化没有明显影响。因此, 在设备运行中可以控制电流或接触电阻很小, 导体的温度会在热安全区域内。

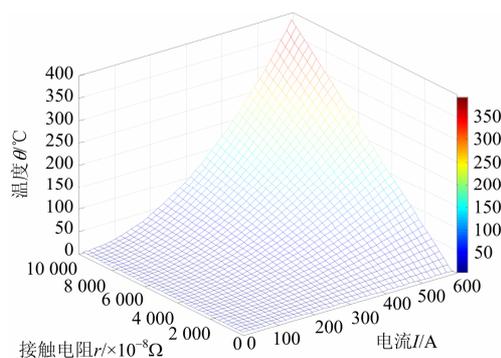


图 11 考虑电流和温度的元件接触电阻曲线

Fig. 11 Element model of contact resistance considering current and temperature

因此, 电接触元件的接触电阻可以按照如下步骤来检测与求取:

(1) 利用在线测温系统测量热接触点或其附近某一点的某一时间段的温度值, 并绘制成曲线。

(2) 针对温度响应曲线数据, 如果所测的温度为离热源区有一定长度点的数据, 可通过温度传导模型推导出热源区的温度响应曲线, 针对 I 区的数

据, 使用 Origin 软件拟合出一阶响应曲线, 提取时间常数 τ , 根据 $\tau = R_c C_x$ 和 $R_c = \frac{2 \cdot \Delta x}{\lambda s}$ 可计算出热源区热阻等效的长度 Δx 。

(3) 根据电阻的定义 $r = l \cdot \frac{\rho}{s}$ 即可求出接触电阻 r , ρ 为热源区等效电阻率。此时忽略了导体自身的电阻, 因为导体自身的电阻相对于接触电阻足够小。

4.2 接触电阻的获取实验

为篇幅所限, 依然以表 1 参数的铜排母线为例, 接触电阻为 0.001Ω 。通过有限元分析软件 ANSYS 得到图 12 所示的仿真曲线簇。按照上述步骤进行参数提取与接触电阻的计算, 结果如表 3 所示。

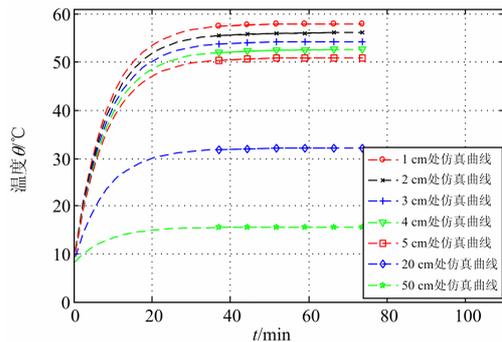


图 12 温度响应仿真曲线簇

Fig. 12 Temperature response curves of conductor

表 3 接触电阻计算结果

Table 3 Calculation results of contact resistance

与热源区 距离 d/cm	时间 常数 τ/min	热源区等效 长度 $2\Delta x/m$	接触电阻 r/Ω	接触电阻 相对误差/%
1	8.367 72	0.002 038	0.001 019	1.9
2	8.381 41	0.002 042	0.001 021	2.1
3	8.393 92	0.002 044 6	0.001 022 3	2.23
4	8.371 55	0.002 039	0.001 019 5	1.95
5	8.383 40	0.002 042	0.001 021	2.1
20	8.419 48	0.002 051	0.001 025 5	2.55
50	8.501 46	0.002 071	0.001 035 5	3.55

从表 3 可以看出, 距离导热区 5 cm 以内的温度曲线获得的接触电阻相对误差较小 (在 3% 以内), 距离导热区 50 cm 处的温度曲线获得的接触电阻相对误差最大, 为 3.55%。上述方法能够准确地获取电接触元件的接触电阻值。

5 结论

本文重点分析了电接触元件的物理模型、热路

暂态模型、导体热传导模型, 检测热接触点或其附近的温度响应曲线, 从而提出通过此曲线的时间常数计算接触电阻的新方法。大量的有限元分析软件 ANSYS 仿真实验验证了这些分析模型和接触电阻的求取方法是有效、准确的, 这为电力设备的状态监测和热缺陷分析提供一定的理论支持。

参考文献

- [1] 王召斌, 翟国富, 黄晓毅, 等. 电磁继电器贮存期接触电阻增长的动力模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 205-211.
WANG Zhao-bin, ZHAI Guo-fu, HUANG Xiao-yi, et al. Kinetic model of contact resistance increment of electromagnetic relay in storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 205-211.
- [2] 杨明发, 张培铭. 基于电流与最高温度检测的异步电动机保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 81-90.
YANG Ming-fa, ZHANG Pei-ming. Induction motor protection research based on current and maximum temperature detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 81-90.
- [3] KACZMAREK J. Constriction resistance measurements based on the method of third harmonic[C] // The 19th Holm Conference on Electrical Contact, 1973.
- [4] ISAO M. Measurement of contact resistance and non-linearity of electric by squid detector[C] // The 30th Holm Conference on Electrical Contacts, 1984.
- [5] AICHI H, TAHARA N. Analysis on the constriction resistance of the electric contact by the contact model using the electrolyte bath [C] // Proceedings of 2nd International Conference on Electrical Contacts, 1994.
- [6] 赵维超. 电连接器接触电阻监测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [7] GB/T 15078-2008 贵金属电触点材料接触电阻的测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 苏秀苹, 陆俭国, 刘帼巾, 等. 小型直流电磁继电器温度场仿真分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 185-189.
SU Xiu-ping, LU Jian-guo, LIU Guo-jin, et al. Thermal field simulation analysis of miniature DC electromagnetic relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 185-189.
- [9] 刘刚, 阮班义, 张鸣. 架空导线动态增容的热路法暂态模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 58-62, 123.

- LIU Gang, RUAN Ban-yi, ZHANG Ming. A transient model for overhead transmission line dynamic rating based on thermal circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 58-62, 123.
- [10] 陈忠华, 石英龙, 时光, 等. 受电弓滑板与接触网导线接触电阻计算模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 188-195.
- CHEN Zhong-hua, SHI Ying-long, SHI Guang, et al. Calculation model of the contact resistance between pantograph slide and contact wire[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 188-195.
- [11] 刘刚, 雷成华, 刘毅刚. 根据电缆表面温度推算导体温度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 212-217.
- LIU Gang, LEI Cheng-hua, LIU Yi-gang. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 212-217.
- [12] 董晓明, 梁军, 韩学山, 等. 计及输电线路温度变化的连续潮流模型与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 36-41.
- DONG Xiao-ming, LIANG Jun, HAN Xue-shan, et al. Model and calculation of continuation power flow considering change of transmission line temperature[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 36-41.
- [13] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2801-2806.
- ZHANG Yao, ZHOU Xin, NIU Hai-qing, et al. Theoretical calculation and experimental research on thermal time constant of single-core cables[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2801-2806.
- [14] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等. 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 86-91.
- MA Xiao-ming, FAN Chun-ju, HU Tian-qiang, et al. Calculation of current carrying capacity of overhead transmission line based on thermal stability constraint[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 86-91.
- [15] 谢龙汉, 耿煜, 邱婉. ANSYS 电磁场分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [16] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [17] 布朗诺维克, 康奇兹, 米西金. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军, 芦娜, 林雪燕, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
-
- 收稿日期: 2013-10-26; 修回日期: 2013-12-08
- 作者简介:
- 张青山(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: xautzqs@126.com
- 段建东(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气设备在线监测、电力系统继电保护;
- 叶兵(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。