

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.037

一种电力设备红外诊断算法的研究与实现

李孟兴¹, 王海燕¹, 杨屹东¹, 侯锐锋¹, 赵连政², 侯力枫¹,
杨屹勋¹, 李凤海¹, 肖立¹, 杨波³

(1. 国网冀北电力有限公司承德供电公司, 河北 承德 067000; 2. 国网冀北电力有限公司管理培训中心, 北京 102401;
3. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 针对红外测温只能发现设备异常, 无法准确诊断设备故障的问题。设计了一套基于案例推理技术的电力设备红外诊断方法。将电力企业现有的红外图谱和设备故障内外部温度变化规律建成案例库, 依据空间向量的夹角余弦法求解同红外测温异常数据最相似的以往案例, 实现测温现场的设备故障诊断。

关键词: 电力设备; 故障诊断; 案例推理; 红外测温; 人工智能

Research and Implementation of a Power Equipment Infrared Diagnosis Algorithm

LI Mengxing¹, WANG Haiyan¹, YANG Yidong¹, HOU Ruifeng¹, ZHAO Lianzheng²,
HOU Lifeng¹, YANG Yixun¹, LI Fenghai¹, XIAO Li¹, YANG Bo³

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde Power Supply Company, Hebei Chengde 067000, China;
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Management Training Center, Beijing 102401, China;
3. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao Power Supply Company, Hebei Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Considering the infrared temperature measurement can only be found in abnormal equipment, cannot accurate diagnosis of equipment fault problem. A method of infrared diagnosis for power equipment based on case based reasoning is presented. Case base, which based on power enterprise existing infrared spectrum and equipment fault external temperature variation rule, is established. According to the space vector angle cosine method, the most similar to the infrared temperature measurement anomaly data in the previous cases is obtained, finally, the equipment fault diagnosis of temperature field is realized.

Key words: power equipment; fault diagnosis; case based reasoning; infrared temperature measurement; artificial intelligence

0 引言

电力行业的迅速发展, 对供电的安全、可靠性和经济性的要求越来越高。传统的周期性检修工作需要 1~3 年内集中对全部变电站设备进行停电的预防性电气试验, 以检查设备的健康状况^[1]。由于其中绝大部分设备运行正常, 既对电力企业造成了经济损失, 又给用户正常生产、生活用电带来了不便, 同时运行正常的设备停电预试后出现新缺陷还存在对电力设备重复停电的问题^[2]。基于上述原因电

力企业开展状态检修工作已成为必然趋势。状态检修是依据电力设备试验数据分析对电力设备进行状态评价, 针对评价结果对问题设备进行检修处理的工作模式^[3]。状态检修工作要求一台电力设备 5 年内进行一次预防性试验, 日常的情况下以在线监测方式评价设备状况, 一旦预防性试验或在线监测发现问题, 在对设备停电进行各项诊断性试验和设备检修^[4]。红外测温作为主要的在线监测手段, 在状态检修工作起着重要作用^[5], 以 2014 年为例, 承德供电公司 70% 的设备缺陷发现于红外测温。

随着红外测温工作的普及应用, 电力系统设备

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-04-29

基金项目: 河北省承德市科学技术项目(201422088)。

Project Supported by Science and Technology Project of Chengde, Hebei(201422088).

隐患的发现对红外测温的依赖程度越来越高^[6]。大量的红外测温结果虽然给设备健康评价积累了丰富的资料^[7],也给试验人员查询分析以往类似的评价结果带来了极大的不便,同时在实际工作中因专业技术水平的差异、人员细心程度和工作疲劳都会导致现场设备诊断工作出现偏差,导致同样的测温异常数据在分析中出现不同的设备隐患评价结果^[8]。通过红外测温工作的开展,电力企业获得了大量的红外图谱和设备故障内外部温度变化规律,并积累了丰富的解决上述问题的经验和知识^[9]。基于上述情况文中讨论一种以人工智能领域的案例推理技术为理论基础,以《带电设备红外诊断规范》(DL/T

664—2008)为判定规则^[10],依据以往红外测温发现的设备故障建案例库,客观分析红外测温异常数据,准确评价设备健康状况的方法^[11]。

1 电力设备红外诊断算法

电力设备红外诊断算法包括故障判定和故障原因诊断两部分^[12],故障判定环节主要通过特定规则对测温结果进行判断在此不在多加叙述,文中主要探讨基于案例推理的电力设备故障原因诊断算法,其算法分为:案例匹配,判定规则和逻辑验证,案例复用和适应性修改,案例学习等内容^[13],相关案例推理流程见图1。

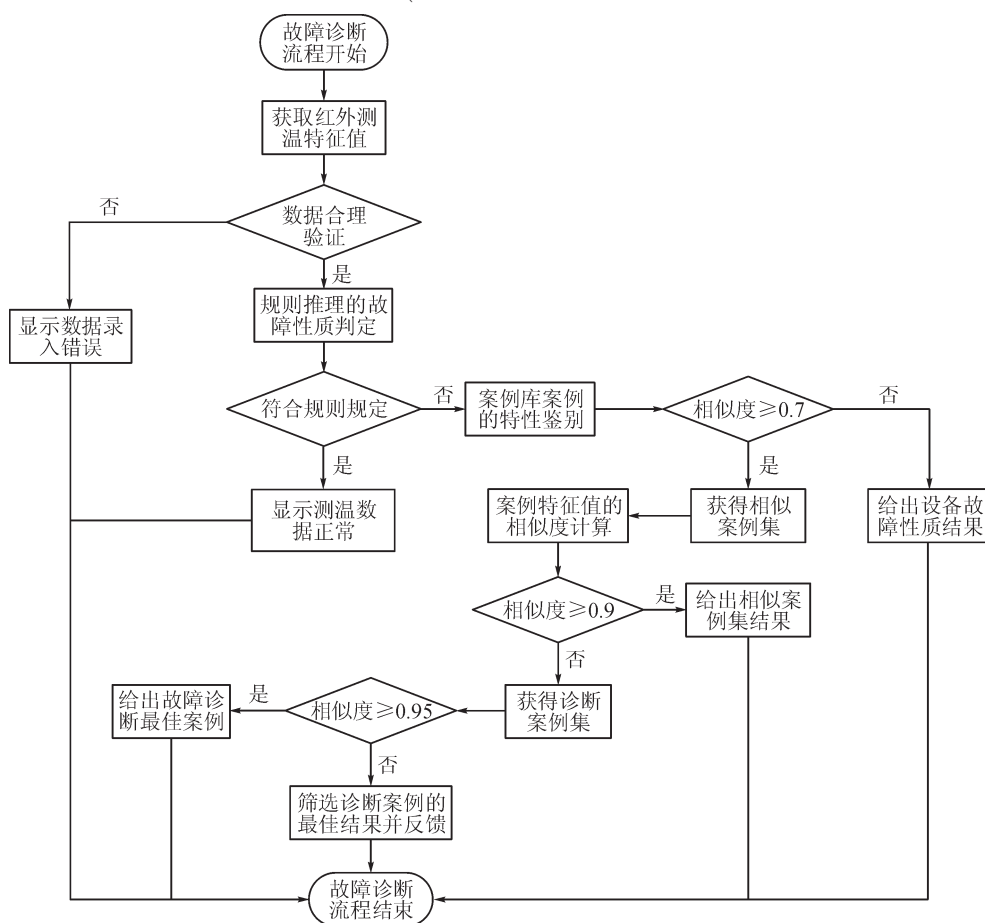


图1 设备故障诊断的案例推理流程

Fig. 1 Case reasoning process for equipment fault diagnosis

1.1 故障诊断的案例匹配

设计合理的案例匹配方法是案例推理技术的核心部分。为了保证最大程度的检索到与异常数据相符合的案例,在红外测温异常数据同以往案例进行检索匹配过程中,采用特性鉴别,初步匹配,最佳筛选3个环节进行^[14]。

特性鉴别指检索中首先检索异常数据与以往设备故障必然出现的特征值的相似情况,相似度达到70%以上,则将此案例列入相似案例集中;如果

检索不到满足相似度要求的案例,则认定为新的故障情况,并转入规则判定和数据逻辑验证环节。

对于相似案例集中的案例和红外测温异常进行相似度初步匹配,相似度达到90%以上则将案例列入诊断案例集;无满足相似度要求的案例则提供近似案例供专业人员参考,并进行规则判定和数据验证。

针对诊断案例进行进一步筛选选取相似度在95%以上的案例从而得到测温故障的最佳案例,并认定此类案例是该次红外测温异常情况的设备故

障案例,并将相应的案例解决方案提供给专业人员;如诊断案例中无上述案例,则向专业人员提供诊断案例的解决方案,并在故障处理结束将诊断案例进行适应性修改后添加至案例库。

1.2 逻辑验证和判定规则

逻辑验证是红外测温数据准确性确认的环节,通过逻辑验证可以防止因数据录入不准确而导致的诊断偏差,在该方法中逻辑验证主要对检索不到案例的异常数据的各项特征值进行相互间的逻辑正确性进行验证。

判定规则是指依据 DL/T 664—2008 确定设备故障诊断依据,同时根据实际情况合理的加入新的判定规则。判定规则用于检索不到相似案例时进行规则推理判断设备故障等级的依据,专业人员可根据相应故障等级的处理要求进行故障处理,并将处理情况和故障信息添加到案例库。

1.3 案例复用、适应性修改和案例学习

经过相似度检索得到的近似和重合案例可直接复用于新故障的处理。在故障处理完毕后,针对实际工作情况对案例进行适应性修改,并生成新的案例添加至案例库。

2 电力设备故障案例库的典型实例模型

红外诊断方法的案例主要通过对设备故障的特征信息、故障分析、处理方案等进行收集、整理、知识学习获得,并基于上述案例组建了典型设备故障案例库^[15]。通过对红外测温故障情况的分析,确定案例应包含故障特征,故障描述以及对故障问题的解和求解方法的描述。

$E=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ 表示案例库,其中 $C_i=[D_i, P_i, S_i]$ 表示案例库的第 i 个案例。

$D_i=[d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{in}]$ 表示案例 C_i 的特征集, d_{in} 表示案例 C_i 的第 n 个特征值。 P_i 表示案例 C_i 的问题描述,在红外故障诊断案例中用于说明设备故障信息。 S_i 表示案例的解或求解方法,在红外诊断案例中说明故障处理方案。

典型案例是以往设备故障发现、处理的经验累计,并不是普遍的规则,在案例库中每个案例代表一种电力设备故障状态,他们直接相互独立。因此案例特征值确定的客观性和案例相似度比较的合理性直接影响设备故障诊断结果的准确性和客观性。

3 电力设备红外诊断的相似度算法

3.1 特征权值的特性鉴别算法

为了提高案例推理精度,在相似度比较环节加

入关键特征的加权筛选机制。此机制将实例表现出的关键特征赋予一定的权值^[16],用向量 g_i 表示: $g_i=(g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im})^T, i=1, 2, 3, \dots, n$, 其中 m 值是向量的个数表示案例的特征值数,当 g_i 中任何特征值为 0 表示该项特征值不是此实例的关键特征值。关键特征

值满足: $\sum_{j=1}^m g_{ij}=1$ 。向量 $x_\beta=(x_{\beta 1}, x_{\beta 2}, \dots, x_{\beta m}), \beta=1, 2, 3, \dots, m$ 表示红外测温数据, $x_{\beta m}$ 为第 m 个红外测温结果异常值。向量 $j_i=(j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{im})^T, i=1, 2, 3, \dots, n$ 为 g_i 与 x_β 的逻辑与操作结果,其中不为 0 项取 g_i 的权值,当 $\sum_{j=1}^m j_{ij} \geq 0.7$ 则认为案例与红外结果关键特征值相似,并将此案例纳入诊断结果的相似案例集 E_X 。

3.2 基于广义距离的相似度算法

广义距离的相似度算法,是指将相似对象看作是 N 维坐标空间上的一个点,每个对象代表一个 N 维的属性值集,两个对象的空间夹角越小则说明相似度越大,反之相似度越小^[17]。基于上述理论,设 D 表示相似案例集 E_X 中各案例特征值的集合。 D 中的任意一个案例的特征值集合用一个数据向量 d 表示,设每个案例 $d_\alpha \in D, (\alpha=1, 2, \dots, n)$, 用向量则表示成 $d_\alpha=(d_{\alpha 1}, d_{\alpha 2}, \dots, d_{\alpha m}), \alpha=1, 2, 3, \dots, n$, 其中 m 值是向量的维数表示案例特征值个数, n 值表示向量的个数或案例空间 D 中的案例数。案例空间 D 的欧氏距离矩阵为

$$D=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

红外诊断方法的相似度采用夹角余弦法,设 $c_{\alpha\beta}$ 代表 d_α 和 x_β 两个向量的空间夹角余弦值,完全重合夹角为零。相似系数 $c_{\alpha\beta}$ 应满足:① $|c_{\alpha\beta}| \leq 1$ 且 $c_{\alpha\alpha}=c_{\beta\beta}=1$;② $c_{\alpha\beta}=\pm 1$ 当且仅当 $d_\alpha=c \cdot x_\beta (c \neq 0)$;③ $c_{\alpha\beta}=c_{\beta\alpha}$ 。

相似系数计算式为

$$\text{sim}(d_\alpha, x_\beta)=c_{\alpha\beta}=\cos(d_\alpha, x_\beta)=\frac{(d_\alpha, x_\beta)}{\|d_\alpha\| \cdot \|x_\beta\|}=\frac{\sum_{i=1}^m d_{i\alpha} x_{i\beta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m d_{i\alpha}^2 \cdot \sum_{i=1}^m x_{i\beta}^2}} \quad (2)$$

$c_{\alpha\beta}$ 的绝对值越接近于 1, 说明变量 d_α, x_β 之间的关联性越大。在红外诊断中 $c_{\alpha\beta} \geq 0.9$ 的案例设为诊断案例, $c_{\alpha\beta} \geq 0.9$ 的案例设为重合案例可以直接作为诊断结果。

3.3 诊断结果的最佳筛选算法

夹角余弦法求解的相似系数虽然可以客观地

反映两个向量的相似情况,但是当多个案例同新问题出现相似系数相近时,由于夹角余弦法没有考虑具体特征值的误差大小和特征值在故障中的权值,导致出现相似系数相近时不能选出最佳案例。为了得到新问题的误差最小的相似案例,使用带权值的最大相异系数法,对案例进行最佳筛选。

设向量 d_{α} 表示案例特征值集,向量 x_{β} 表示测温异常数据集,定义 $\lambda_i = \left| \frac{x_{\beta} - d_{\alpha i}}{d_{\alpha i}} \right|$ 为第 i 个特征向量的相对误差向量。设 $\xi = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_m\}$ 为特征向量的相对误差集。对其进行加权求平均值,得到最大相异

系数 $z = \frac{\sum_{i=1}^m (j_i \cdot \lambda_i)}{\sum_{i=1}^m j_i}$ 。当 d_{α} 和 x_{β} 的特征值完全一致时权

值之和等于 1,最大相异系数 $z = \frac{\sum_{i=1}^m (g_i \cdot \lambda_i)}{\sum_{i=1}^m g_i} = \sum_{i=1}^m (g_i \cdot \lambda_i)$ 。

最大相异系数是一个加权误差平均的过程,突出了相对误差大的元素对筛选结果的影响。最大相异系数 z 的取值范围为 $[0, \infty]$, z 越小说明两向量的误差越小,向量越相近,当 $z=0$ 时,向量完全相同。最大相异系数在相似度计算中有意加重向量间误差对筛选结果的影响,因此不满足常规的相似性函数性质,在该方法中只用于最佳案例筛选,不作为案例相似度检索的主要算法。

4 电力设备红外诊断算法的实现

4.1 电力设备红外诊断系统

依据电力设备红外诊断算法研制的诊断系统,主要通过对现场红外测温数据进行计算分析以判断电力设备是否存在故障隐患。当测温人员将现场红外测温结果录入系统后^[18],系统依据 DL/T 664—2008 判定规则,对测温结果进行计算分析,如发现测温数据不符合相关判定规则要求则给出判定结果“异常”的系统提示,相关系统界面见图 2。

测温点	单台/相最高(异常)温度(°C)	单台/相正常温度(°C)	B相最高(异常)温度(°C)	B相正常温度(°C)	C相最高(异常)温度(°C)	C相正常温度(°C)	环境温度(°C)
触头	6.2	6.2	6.8	6.8	3.8	3.8	15
一次母线板	9.9	9.9	8.8	8.8	6.4	6.4	15

图 2 系统的数据维护和故障性质判定界面

Fig. 2 System data maintenance and fault properties interface

当系统提示判定结果为异常时,测温人员可点击辅助判断结论的“异常”二字,系统则进入电力设备红外诊断系统的故障原因诊断界面,相关界面见图 3,此界面依据文中所描述电力设备红外诊断算法对异常测温数据与以往的故障案例进行计算分析,给出具体的电力设备故障原因结论或与此测温数据相类似的故障案例,并依据相关诊断结论给出

以往的最佳故障处理方案,以便相关专业人员依据系统给出的故障分析辅助诊断结论及时处理电力设备故障隐患。

4.2 系统故障诊断准确率测试

为了进一步验证电力设备红外故障诊断算法准确性,选取主变压器、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、电力电缆、绝缘子等设备各测温

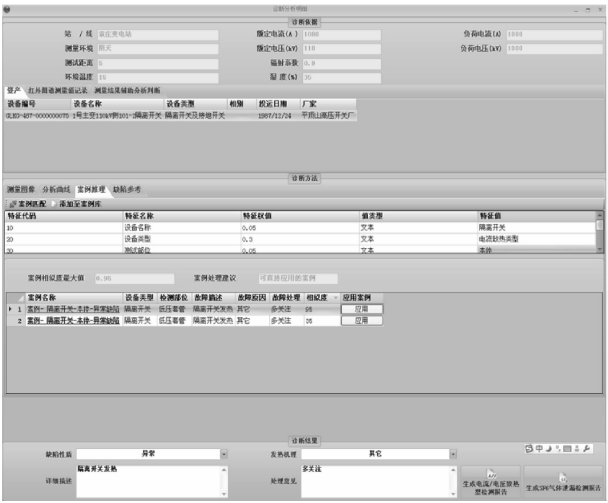


图 3 系统的故障原因诊断界面

Fig. 3 System fault diagnosis interface

部位的接头接触不良、设备老化、设备过负荷、受潮、断股等故障案例共计 517 项,其中套管和避雷器的故障案例未进行录入,而是作为故障诊断测试的新问题。

在确定案例库中案例以后,共选取 122 项测温数据作为电力设备红外诊断准确性测试数据,其中不合理数据 4 项、故障数据 84 项,其具体故障信息和测试结果详见表 1。

通过测试发现,系统对于故障设备判断的准确性达到 100%;在故障原因诊断方面给出重合案例准确率 88.09%,相似案例诊断准确率 98.63%,对于 11 项以往未发现故障的诊断中 7 项可以找到其他设备上的最佳诊断案例,3 项得到了相似案例,只有 1 项未能诊断出结果,诊断提示率达到 90.09%满足要求。

表 1 电力设备故障诊断情况测试和统计表

Table 1 Test and statistics of fault diagnosis for power equipment

设备类型 及合计	测试数据	实际故障	正确数据	不合理 数据	故障设备 判定	重合案例	最佳诊断 案例	相似案例	诊断错误	诊断成功
主变压器	15	12	15	0	12	7	5	0	0	12
断路器	21	18	20	1	18	13	3	2	0	16
隔离开关	19	11	19	0	11	9	1	1	0	10
电压互感器	9	5	9	0	5	4	0	0	1	4
电流互感器	23	16	21	2	16	11	3	2	0	14
电容器	17	11	17	0	11	7	4	0	0	11
套管	7	5	7	0	5	0	3	1	1	3
避雷器	11	6	10	1	6	0	4	2	0	5
合计	122	84	118	4	84	51	23	8	2	75

5 结语

电力设备故障诊断的关键技术在于如何通过以往的故障处理经验,准确的对新红外数据异常进行故障判断。在分析了大量设备故障内外部温度变化的红外图谱后,提出一种基于案例推理技术的电力设备红外诊断方法^[19],该方法依据《带电设备红外诊断规范》(DL/T 664—2008) 确定设备故障诊断依据,并以诊断依据的各项特征值建立设备故障案例库,同时引入空间向量理论将设备故障的各项特征模型化,通过夹角余弦法计算案例库故障实例的各特征值同异常红外数据的相似度,最终推理出同新故障最相似的一个或一组故障案例,在依据最大相异系数筛选出于新问题误差最小的最佳案例,从而获得比较合理的设备故障诊断结果^[20]。文中所属诊断方法不仅能应用于红外测温的故障诊断工作,还可以对其他与电力设备相关的电气试验、化学试验数据的分析和故障诊断工作有一定的参考。

参考文献:

[1] 杨晓峰,张 晗,邓 军,等. 超高压输变电设备发热缺陷的统计与分析处理[J]. 高压电器,2015,51(5):180-183.
YANG Xiaofeng,ZHANG Han,DENG Jun,et al. Statistics and treatment of overheating defect of EHV power transmission equipment[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(5): 180-183.

[2] 李新星,卢洪宝,何 亮,等. 红外诊断技术在配电网中的应用[J]. 中国电力,2015,48(2):94-97.
LI Xinxing,LU Hongbao,HE Liang,et al. Application of infrared diagnosing technology in distribution network[J]. Electric Power,2015,48(2):94-97.

[3] 杨 洋,孙朝斌,柏永斌,等. 船载电气设备红外故障诊断应用技术研究[J]. 红外技术,2015(2):166-170.
YANG Yang,SUN Chaobin,BAI Yongbin,et al. The research and application of infrared fault diagnosis for ship-board electrical equipment[J]. Infrared Technology,2015 (2):166-170.

- [4] 桂媛, 朱武, 马维亚, 等. 电力设备红外测温多点精确定位控制系统设计[J]. 电源技术, 2015, 39(2): 403-406.
GUI Yuan, ZHU Wu, MA Weiya, et al. Multipoint accurate location control system design of infrared temperature measurement for power equipment[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(2): 403-406.
- [5] 苏伟, 杨志龙, 顾佩颖, 等. 利用红外成像技术对两起电流互感器颈部发热故障的分析与诊断[J]. 湖北电力, 2015, 39(2): 4-6.
SU Wei, YANG Zhilong, GU Peiying, et al. Analysis of two heating failures in neck position of current transformer by infrared imaging technology[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(2): 4-6.
- [6] 陈化钢. 红外测温技术在带电设备故障诊断中的应用[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2015, 15(1): 39-41.
CHEN Huagang. Application of infrared detection technical in fault diagnosis for alive equipment[J]. Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, 2015, 15(1): 39-41.
- [7] 李唐兵, 陈国锋, 饶斌斌, 等. 一种改进的劣化盘形悬式瓷绝缘子红外热像诊断方法[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 8-13.
LI Tangbing, CHEN Guofeng, RAO Binbin, et al. A improved method of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6): 8-13.
- [8] 丁超. 电力系统红外诊断发展状况及红外测温仪器的选择[J]. 电子技术与软件工程, 2014(24): 115.
DING Chao. Infrared diagnosis and development of power system and the choice of infrared temperature measurement instrument[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014(24): 115.
- [9] 周为, 朱强, 徐敏捷, 等. 高压开关柜内接头的红外温度监测系统研制[J]. 电测与仪表, 2013(12): 96-99.
ZHOU Wei, ZHU Qiang, XU Minjie, et al. Development of infrared monitoring system for high voltage switch cabinet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013(12): 96-99.
- [10] 邵进, 胡武炎, 贾风鸣, 等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 126-129.
SHAO Jin, HU Wuyan, JIA Fengming, et al. Application of infrared thermal imaging technology to condition-based maintenance of power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 126-129.
- [11] 袁辉建, 阳明, 蒋燕, 等. 紫外红外双光谱电力设备在线监测系统[J]. 自动化仪表, 2012, 33(2): 58-61.
YUAN Huijian, YANG Ming, JIANG Yan, et al. On-line dual spectrum, ultraviolet and infrared, monitoring system for electric power equipment[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(2): 58-61.
- [12] 朱建新, 朱淙淙, 周国伟, 等. 干式电力变压器温升计算结果与其红外热成像温度的数值解析[J]. 变压器, 2012, 49(1): 45-49.
ZHU Jianxin, ZHU Congcong, ZHOU Guowei, et al. Temperature rise calculation results of dry-type power transformer and numerical analysis of its infrared imaging temperature[J]. Transformer, 2012, 49(1): 45-49.
- [13] 于重重, 孙秋峰, 谭励, 等. 基于案例推理的农村新能源利用决策系统[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(2): 749-752.
YU Chongchong, SUN Qiufeng, TAN Li, et al. Rural new energy utilization decision-making system based on case based reasoning[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(2): 749-752.
- [14] 韦强. 红外技术在电力设备状态检修故障诊断中的应用[J]. 机械研究与应用, 2011(1): 78-81.
WEI Qiang. Brief talk on the application of infrared technique in the fault diagnosis of power equipment condition-based maintenance[J]. Mechanical Research & Application, 2011(1): 78-81.
- [15] 江志农, 王慧, 魏中青. 基于案例与规则推理的故障诊断专家系统[J]. 计算机工程, 2011, 37(1): 238-240.
JIANG Zhinong, WANG Hui, WEI Zhongqing. Faults diagnosis expert system based on case reasoning and rule reasoning[J]. Computer Engineering, 2011, 37(1): 238-240.
- [16] 刘健, 解辰, 蔺丽华. 基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 964-970.
LIU Jian, XIE Chen, LIN Lihua. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 964-970.
- [17] 王津津, 田卫东. 案例推理中一种组合权重的方法[J]. 微计算机信息, 2010, 26(11): 254.
WANG Jinjin, TIAN Weidong. A method of combined weight in CBR[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(11): 254.
- [18] MAHAN J R, YEATER K M. Low-cost infrared thermometer[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2008 (64): 262-263.
- [19] SEO Y, SHEEN D, KIM T. Block assembly planning in shipbuilding using case-based reasoning[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 245-253.
- [20] AHN M, HAN Y H, MOON S. A novel infrared absorbing structure for uncooled infrared detector[J]. Current Applied Physics, 2007, 7(6): 617-621.

李孟兴(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力新技术科技研发与信息化、智能化研究与应用。