

# 环网柜电缆头电接触部位温升阈值数学模型研究及分析

陆德鹏<sup>1</sup>, 韩冬<sup>1</sup>, 吴希伟<sup>2</sup>, 黄靖<sup>1</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国家电网公司(常州)电气设备监测中心, 江苏 常州 213001)

**摘要:** 环网柜电缆头温升是反映其运行状况的一个重要指标, 通过温升阈值判断其是否存在电接触缺陷可提高产品安全运行水平。文中通过温升试验研究了环网柜电缆头电接触部位的稳定温升与负荷电流之间的关系, 并在此基础上建立了温升预警阈值数学模型。通过试验验证了温升预警阈值数学模型的正确性, 为环网柜电缆头温升在线监测和预警系统提供了可靠的判断依据。

**关键词:** 负荷电流; 温升阈值; 曲线拟合; 数学模型; 温升预警

## Research and Analysis on Mathematical Model of Temperature Rise Threshold at Electrical Contact Position of Ring Main Unit Cable Head

LU Depeng<sup>1</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, WU Xiwei<sup>2</sup>, HUANG Jing<sup>1</sup>

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China; State Grid (Changzhou)

Electric Power Equipment Quality Inspection and Testing Center, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** The temperature rise of the ring main unit cable head is an important index to reflect its operation condition. Judging whether there is electrical contact defect through the temperature rise threshold can improve the safe operation level of the product. This paper studies the relationship between the stable temperature rise and the load current at the electric contact part of the ring main unit through the temperature rise test, and establishes the mathematical model of the temperature rise warning threshold on this basis. The correctness of the mathematical model of temperature rise early warning threshold is verified by experiments, which provides a reliable basis for the on-line monitoring and early warning system of temperature rise of cable head of ring main unit.

**Key words:** load current; temperature rise threshold; curve fitting; mathematical model; temperature warning

## 0 引言

电力系统中, 高压开关柜占据着非常重要的地位, 如若发生故障, 将直接影响用户的正常供电。高压开关柜在运行中容易出现电接触部位过热故障, 造成绝缘层老化, 降低产品使用寿命, 影响配电网稳定安全运行<sup>[1-4]</sup>。文[5-9]基于电磁场、温度场基本原理运用有限元仿真计算高压开关柜温升情况; 文[10]引用热网络技术对高压开关设备热特性进行理论分析; 文[11]阐述利用支持向量机和线性加权法实现高压电器温度的预测方法; 文[12]采用最小二乘支持向量机建立适用于电缆接头的温度预测模型并给出了预测方法; 文[13]提出基于灰箱理论研究的配电房温度变化的预测模型; 文[14-16]运用神经网络模型智能预测高压电器设备温度数据; 文[17-23]运用在线测温系统实现开关柜触头温度的实时监测并提前预警。纵观目前的文献报道,

研究开关柜的过热问题主要是在产品的温度场仿真分析、温度预测和温度在线监测等方面, 有力支撑了开关柜的运行检修及分析诊断, 但都未见有关温升阈值方面的研究报道。

电力行业标准<sup>[24-25]</sup>规定了 1.1 倍额定电流下不同部位的温升限值, 各种在线测温装置的报警温度通常设置为固定值。在线运行的开关设备, 实际工作情况复杂多变, 通常情况下工作电流低于额定电流, 此时即使设备发生了接触故障, 其温升值并未超出标准规定限值, 因此需要开展不同负荷电流下温升阈值的研究。文中通过对环网柜电缆头温升试验研究及理论分析, 得到负荷电流与温升阈值关系数学模型, 最后通过接触故障下的温升试验验证了模型的正确性与可行性。

## 1 温升试验及试验数据分析

### 1.1 温升试验

基金项目: 国网电力科学研究院有限公司科技项目(12 kV 高性能环保型环网柜成套设备研制及应用)资助。

Project Supported by State Grid Electric Power Research Institute(Development and Application of 12 kV High-performance and Environmentally Friendly Ring Main Unit Equipment).

本次试验选取负荷开关与断路器共箱型 SF<sub>6</sub> 环网柜，额定电压 12 kV，额定电流为 630 A，电缆进出线。按标准<sup>[24-26]</sup>中相关要求，在负荷开关柜 A 相、B 相、C 相电缆头电接触部位安装测温装置进行连续电流条件下温升试验。产品外形及温升试验见图 1。本次试验电流为 1.1I<sub>r</sub>、I<sub>r</sub>、0.8I<sub>r</sub>、0.6I<sub>r</sub>，试验从室温开始，每次试验时间不少于 4 h。



图 1 环网柜温升试验图

Fig. 1 Ring main unit temperature rise test diagram

### 1.2 试验数据分析

相关研究表明，电器设备温升试验时温升与时间符合式(1)所示指数函数关系<sup>[27]</sup>。按式(1)所示规律对温升试验实测数据进行曲线拟合<sup>[28-30]</sup>，得到不同电流下不同部位的稳定温升值  $\tau_w$ 、拟合关系式、拟合优度  $R^2$  见表 1，拟合曲线见图 2。试验结果表明，温升试验数据完全符合式(1)所示指数函数规律，拟合优度  $R^2$  均大于 0.99，拟合求解的关系式可以准确表达环网柜电缆头温升与时间的关系。

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} + \tau_w (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

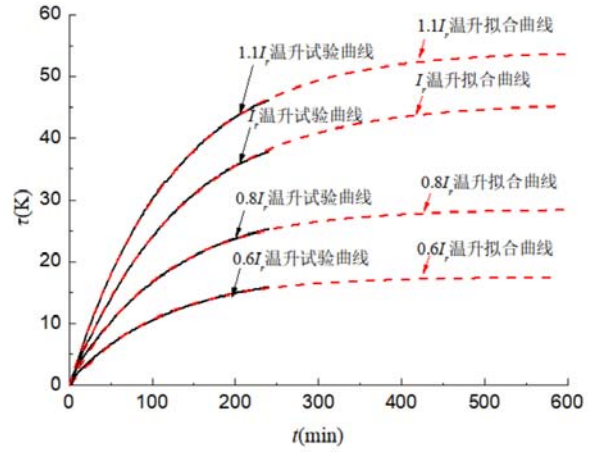
式(1)中： $\tau$  为发热体温升； $\tau_0$  为初始温升； $\tau_w$  为发热体稳定温升； $t$  为试验时间； $T$  为热时间常数。

表 1 环网柜电缆头温升试验数据汇总表

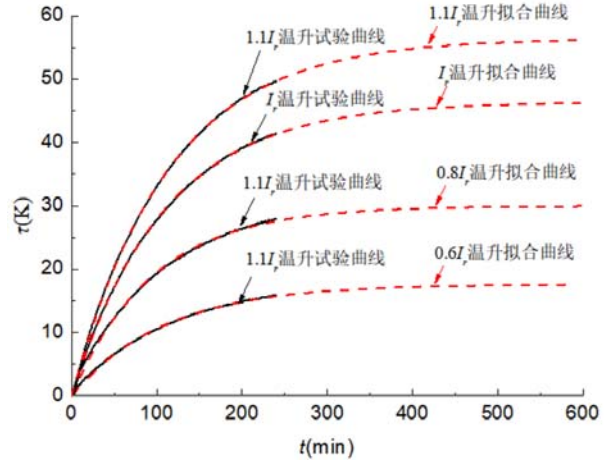
Table 1 Summary table of temperature rise test data of ring main unit cable head

I/kA	测温部位	$\tau_w/K$	拟合曲线关系式	$R^2$
0.6I <sub>r</sub>	A 相	17.6	$\tau = 17.6(1 - e^{-\frac{t}{107.3}})$	0.998 5
	B 相	17.6	$\tau = 17.6(1 - e^{-\frac{t}{108.3}})$	0.998 9
	C 相	17.4	$\tau = 17.4(1 - e^{-\frac{t}{105.3}})$	0.998 3
0.8I <sub>r</sub>	A 相	28.5	$\tau = 28.5(1 - e^{-\frac{t}{112.0}})$	0.998 7
	B 相	30.0	$\tau = 30.0(1 - e^{-\frac{t}{95.1}})$	0.998 2

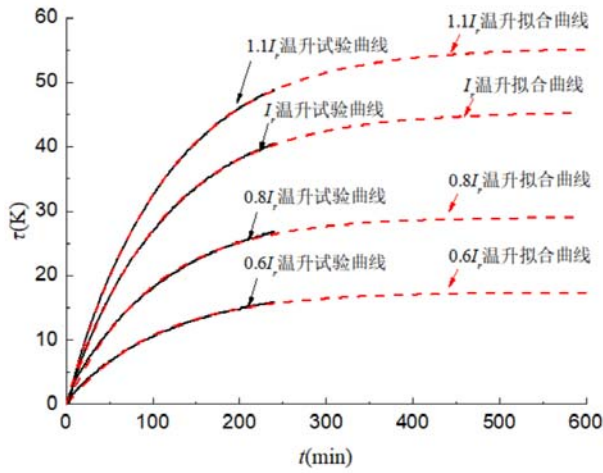
I <sub>r</sub>	C 相	29.1	$\tau = 29.1(1 - e^{-\frac{t}{100.4}})$	0.998 2
	A 相	45.7	$\tau = 45.7(1 - e^{-\frac{t}{135.1}})$	0.999 8
	B 相	46.4	$\tau = 46.4(1 - e^{-\frac{t}{108.6}})$	0.999 8
1.1I <sub>r</sub>	C 相	45.4	$\tau = 45.4(1 - e^{-\frac{t}{110.0}})$	0.999 7
	A 相	54.1	$\tau = 54.1(1 - e^{-\frac{t}{123.6}})$	0.999 8
	B 相	56.4	$\tau = 56.4(1 - e^{-\frac{t}{112.9}})$	0.999 8
	C 相	55.4	$\tau = 55.4(1 - e^{-\frac{t}{112.7}})$	0.999 8



(a) A 相



(b) B 相



(c) C 相

图 2 环网柜电缆头温升试验曲线及拟合曲线

**Fig. 2 Ring main unit cable head temperature rise test curve and fitting curve diagram**

## 2 温升阈值研究及分析

环网柜的实际工程中，其负荷电流通常不会超过其额定电流，而相关标准<sup>[24-25]</sup>规定的环网柜温升限值对应的试验电流为 1.1 倍额定电流，因而缺少环网柜在不同负荷电流下温升阈值。目前的环网柜电缆头温度在线监测也是以此做为判断依据，在设备发生故障温升超出标准规定的限值时进行故障报警检修。虽然在一定程度上减小了故障导致的损害程度，但仍属于故障事后检修，不能提前预判设备健康状况。相关研究<sup>[30]</sup>表明，电器设备导电部位的稳定温升  $\tau_w$  与负荷电流  $I$  存在式(2)所示幂函数关系。文中将表 1 中  $\tau_w$  和  $I$  数据分为两组，其中  $0.8I_r$ 、 $1.1I_r$  用于幂函数关系拟合求解， $0.6I_r$ 、 $I_r$  用于幂函数关系验证，结果详见表 2、3。幂函数的拟合曲线  $R^2$  都在 0.99 以上，拟合曲线计算的稳定温升值与试验值误差在 2 K 以内，证明稳定温升与负荷电流幂函数关系的正确性，且可以用于工程中不同负荷下温升预测。为方便表述，文中将上文所述幂函数曲线定义产品温升与电流关系的性能曲线。

$$\tau_w = aI^b \quad (2)$$

式(2)中： $a$ 、 $b$  为特征常数。

表 2 温升与电流拟合关系

**Table 2 Table of fitting relation between temperature rise and current**

测温部位	拟合曲线关系式	$R^2$
------	---------	-------

A 相	$\tau_w = 113.2 \times I^{2.01}$	0.999 9
B 相	$\tau_w = 116.7 \times I^{1.98}$	0.999 9
C 相	$\tau_w = 116.3 \times I^{2.02}$	0.999 9

表 3 温升试验值与温升计算值对比

**Table 3 Table of comparison of temperature rise test values and calculated values**

$I/kA$	测温部位	$\tau_{w\_test}/K$	$\tau_{w\_cal}/K$	$\Delta\tau/K$
$0.6I_r$	A 相	17.3	16.0	1.3
	B 相	17.6	17.0	0.6
	C 相	17.4	16.3	1.1
$I_r$	A 相	45.7	44.7	1.0
	B 相	46.4	46.7	-0.3
	C 相	45.4	45.7	-0.3

注： $\tau_{w\_test}$  为温升试验值； $\tau_{w\_cal}$  为基于表 2 幂函数的温升计算值。

上述分析表明，环网柜电缆头在线测温装置能够根据温升与负荷电流之间的性能曲线综合判断是否存在温升异常，相对直接采用有关标准规定的限值作为判断故障标准是一个很大的技术改进。产品热结构理论设计一般留有设计余量，1.1 倍额定电流时稳定温升值与标准规定限值之间的差值可认为是产品设计裕度。当环网柜电缆头在某负荷电流下温升值超过其性能曲线时，表明产品存在温升增大现象，但产品仍有可能满足 1.1 倍温升试验要求。因此本文选择式(3)作为温升预警曲线，标准规定的限值作为报警曲线，见图 3。当产品在某负荷电流下温升超过其预警曲线时，其对应的温升试验也一定不合格。根据式(3)可得环网柜电缆头温升预警曲线函数表达式见表 4。

$$\tau_w = aI^b + (N - \tau_w^*) \left( \frac{I}{1.1I_r} \right)^b \quad (3)$$

式(3)中： $N$  为标准规定温升阈值； $\tau_w^*$  为产品 1.1 倍额定电流下稳定温升值。

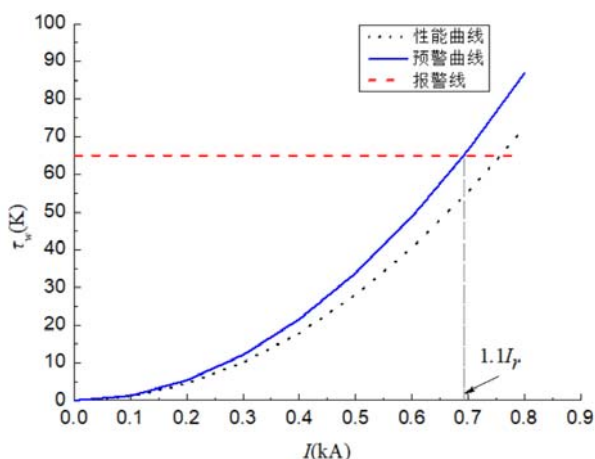


图 3 温升阈值线

Fig. 3 Temperature rise threshold diagram

表 4 温升预警曲线关系式汇总表

Table 4 Summary table of relational expressions of temperature rise warning curves

测温部位	预警曲线关系式
A 相	$\tau_w = 113.2 \times I^{2.01} + 10.9 \times \left(\frac{I}{1.1I_r}\right)^{2.01}$
B 相	$\tau_w = 116.7 \times I^{1.98} + 8.6 \times \left(\frac{I}{1.1I_r}\right)^{1.98}$
C 相	$\tau_w = 116.3 \times I^{2.02} + 9.6 \times \left(\frac{I}{1.1I_r}\right)^{2.02}$

### 3 试验验证

文中为验证式(3)和表4中温升预警曲线的正确性,人为制造A相、C相电缆头电接触故障,并按上文所述开展 $1.1I_r$ 、 $I_r$ 、 $0.8I_r$ 、 $0.6I_r$ 电流下温升试验,温升试验结果及预警阈值详见表5和图4。当环网柜电缆头在任一负荷电流下温升超过其对应预警阈值时,其1.1倍额定电流下温升试验必定不合格。通过温升预警曲线对温升故障的准确判断,提前预警并对设备的进行检修,实现设备从定期检修过渡到状态检修。

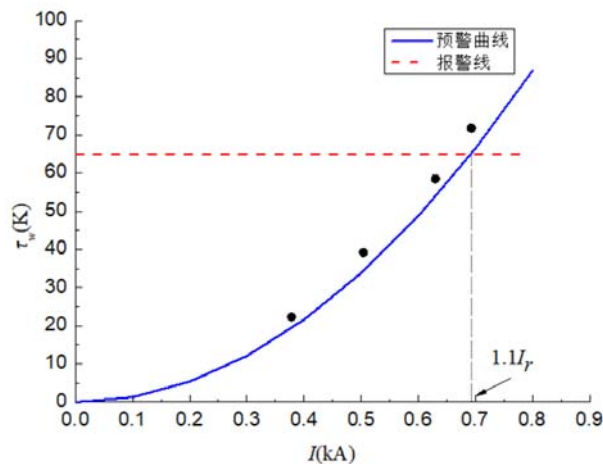
表 5 环网柜电缆头电接触故障下温升试验值与预警阈值对比表

Table 5 Comparison table of temperature rise test value and warning threshold under electrical contact fault of ring main unit cable head

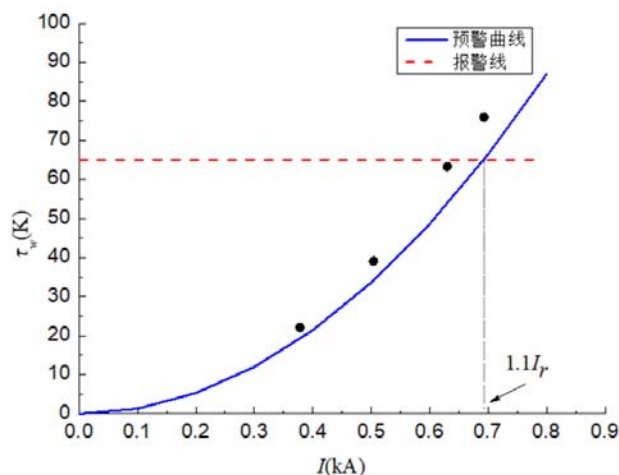
I/kA	测温部位	$\tau_{w\_test}/K$	$\tau_{w\_cal}^*/K$
$0.6I_r$	A 相	22.3	20.8
	C 相	22.1	20.2
$0.8I_r$	A 相	39.2	34.2
	C 相	39.1	34.1
$I_r$	A 相	58.5	54.7

$1.1I_r$	C 相	63.3	53.3
	A 相	71.8	65.0
	C 相	75.9	65.0

注:  $\tau_{w\_test}$  为温升试验值;  $\tau_{w\_cal}^*$  为基于表 4 预警关系式的温升计算值。



(a) A 相



(b) C 相

图 4 环网柜电缆头电接触故障下温升试验值分布图

Fig. 4 Temperature rise test value distribution diagram under electrical contact fault of ring main unit cable head

存在温升故障的设备工作在较小负荷电流,温升值虽已超过预警阈值,但仍未超过标准规定限值,由于实际情况设备还将继续工作一段时间。可以通过幂函数关系对故障下的温升数据进行拟合,反推得到故障状态下最大负荷电流允许值,结果详见表6。

表 6 环网柜电缆头电接触故障下温升拟合结果汇总表

Table 6 Summary table of fitting results of temperature rise under electrical contact fault of ring main unit cable head

测温部位	拟合曲线关系式	最大负荷电流/A
------	---------	----------

A 相	$\tau_w = 143.9 \times I^{1.91}$	660
C 相	$\tau_w = 162.0 \times I^{2.06}$	642

## 4 结论

1)文中建立了环网柜电缆头基于负荷电流的温升预警阈值数学模型。

2)通过人工模拟电接触故障下的温升试验,验证了用温升预警数学模型可以实现在任意负荷电流下的温升故障判断。

3)环网柜电缆头在线测温装置中集成文中温升预警阈值数学模型,可以实现故障提前预警。

4)对电器设备的导电部位,可以收集相关的历史温升数据,拟合得到设备相应的温升与负荷电流性能曲线、预警曲线,可为设备温升在线监测和预警系统提供可靠的判断依据。

## 参考文献:

- [1] 钱家骊. 高压开关柜: 结构 计算 运行 发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 74-76.  
Qian Jiali. High voltage switchgear-structure calculation operation development[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 74-76.
- [2] 艾新法, 汪 锋. 10~35 kV 高压开关柜隐患和故障分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 47-57.  
AI Xinfu, WANG Feng. Analysis and prevention of 10~35 kV high voltage switchgear hidden trouble and fault[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 47-57.
- [3] 彭 涛, 唐炳南, 赵莉华, 等. 中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4331-4340.  
PENG Tao, TANG Bingnan, ZHAO Lihua, et al. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear under typical con-tact failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4331-4340.
- [4] 武兴坛, 周 鹏, 刘少鹏, 等. 基于温升试验的中压开关柜温升控制探讨[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 93-97.  
WU Xingtang, ZHOU Peng, LIU Shaopeng, et al. Discussion on temperature rise control of medium-voltage switchgear based on temperature rise test[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 93-97.
- [5] 王 睿, 王立军, 马信友, 等. 大电流开关柜温升及其影响因素的建模仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 31-40.  
WANG Rui, WANG Lijun, MA Xinyou, et al. Modeling

and simulation study of temperature rise and related influence factors of high current Switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 31-40.

- [6] 杨永通, 彭彦卿, 袁传镇, 等. 基于有限元分析的开关柜温度场研究与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 81-86.  
YANG Yongtong, PENG Yanqing, YUAN Chuazhen, et al. Research and optimization of temperature rise of Switch cabinet based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 81-86.
- [7] 付鲁军, 陈雪飞, 辛昭昭, 等. 气体绝缘开关柜多物理耦合场仿真及分析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 38-45.  
FU Lujun, CHEN Xuefei, XIN Zhaozhao, et al. Coupling field simulation and analysis of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 38-45.
- [8] 王增彬, 王 睿, 姚聪伟, 等. 强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1064-1074.  
WANG Zengbin, WANG Rui, YAO Congwei, et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on temperature rise of switch-gear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1064-1074.
- [9] 张 凯, 陈丽安, 黄留留. 基于有限元法的固体绝缘开关柜温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 76-81.  
ZHANG Kai, CHEN Lian, HUANG Liuliu. Simulation study on temperature field of solid insulated switchgear based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 76-81.
- [10] 张敬菽, 王其恺, 孙会刚. 基于热网络法的高压开关设备热特性分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 34-38.  
ZHANG Jingshu, WANG Qikai, SUN Huigang. Thermal analysis of high voltage circuit breaker based on thermal network[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 34-38.
- [11] 谭风雷, 朱 超, 徐 刚, 等. 基于解耦分析和欧式距离的特高压变压器顶层油温预测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 298-306.  
TAN Fenglei, ZHU Chao, XU Gang, et al. Method of UHV transformer top oil temperature forecasting based on decoupling analysis and euclidean distance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 298-306.
- [12] 何邦乐, 黄 勇, 叶 颀, 等. 基于 PSO-LSSVM 的高压电力电缆接头温度预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 31-35.  
HE Bangle, HUANG Yong, YE Ting, et al. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM

- predict model[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2019, 38(1): 31-35.
- [13]郝方舟, 赵 慧, 赵洪山, 等. 基于灰箱理论的配电房温度变化预测模型研究[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(6): 187-192.  
HAO Fangzhou, ZHAO Hui, ZHAO Hongshan, et al. Temperature change prediction model of power distribution room based on grey box theory[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2019, 38(6): 187-192.
- [14]陈伟根, 奚红娟, 苏小平, 等. 广义回归神经网络在变压器绕组热点温度预测中的应用[J]. *高电压技术*, 2012, 38(1): 16-21.  
CHEN Weigen, XI Hongjuan, SU Xiaoping, et al. Application of generalized regression neural network to transformer winding hot spot temperature forecasting[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(1): 16-21.
- [15]郭文强, 董 瑶, 李清华, 等. PSO-BP 神经网络在开关柜设备温度预测中的应用[J]. *陕西科技大学学报*, 2020, 38(1): 149-153.  
GUO Wenqiang, DONG Yao, LI Qinghua, et al. Application of PSO-BP neural network in temperature prediction for switchgear equipment[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2020, 38(1): 149-153.
- [16]文昌斌, 石 强, 郑凯新, 等. 基于 EMD-BP 模型的 10 kV 开关柜温度预测[J]. *通信电源技术*, 2020, 37(1): 73-75.  
WEN Changbin, SHI Qiang, ZHENG Kaixin, et al. Temperature prediction of 10 kV switchgear based on EMD-BP model[J]. *Telecom Power Technologies*, 2020, 37(1): 73-75.
- [17]陈 强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 高压开关设备触头温度监测技术研究进展[J]. *高压电器*, 2015, 51(9): 146-153.  
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Advancement of temperature monitoring techniques for HV switchgear contacts[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(9): 146-153.
- [18]陈雪薇, 马国明, 李成榕, 等. 高压开关柜无线测温系统设计及可靠性研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(6): 152-160.  
CHEN Xuewei, MA Guoming, LI Chengrong, et al. Wireless temperature measuring system design for high voltage switchgear and its reliability research[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(6): 152-160.
- [19]周小艺, ANDLE J, 王啸峰, 等. 声表面波(SAW)传感器断路器触臂安装方式可行性研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(1): 72-79.  
ZHOU Xiaoyi, ANDLE J, WANG Xiaofeng, et al. Feasibility study on installation method of surface acoustic wave (SAW) sensor circuit breaker contact arm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(1): 72-79.
- [20]周文文, 聂一雄, 徐卫东, 等. 10 kV 智能化高压开关柜测温系统设计[J]. *广东电力*, 2017, 30(12): 130-135.  
ZHOU Wenwen, NIE Yixiong, XU Weidong, et al. Design on temperature measurement system of 10 kV intelligent high-voltage Switch cabinet[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(12): 130-135.
- [21]张青山, 段建东, 叶 兵, 等. 基于 ZigBee 的开关柜触头温度在线监测预警系统[J]. *高压电器*, 2015, 51(4): 29-35.  
ZHANG Qingshan, DUAN Jiandong, YE Bing, et al. Online temperature monitoring/warning system based on ZigBee for switchgear contacts[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(4): 29-35.
- [22]薛卜玮, 黄新波, 朱永灿. 10 kV 箱式变电站温度在线监测系统的研究[J]. *陕西电力*, 2016, 44(4): 22-27.  
XUE Buwei, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan. 10 kV combined substation temperature online monitoring system[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2016, 44(4): 22-27.
- [23]周文文. 外覆绝缘材料的高压开关柜接头温度监测技术[J]. *电器与能效管理技术*, 2021(4): 46-51.  
ZHOU Wenwen. Joint temperature monitoring technology of high voltage switchgear covered with insulation materials[J]. *Low Voltage Apparatus*, 2021(4): 46-51.
- [24] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020[S].2020.  
Common specification for high-voltage switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2020[S].2020.
- [25] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: DL/T 593—2016[S].2016.  
Common specification for high-voltage switchgear and controlgear standards: DL/T 593—2016[S].2016.
- [26] 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB/T 3906—2020[S].2020.  
Alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB/T 3906—2020[S].2020.
- [27]许志红. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 40-41.

XU Zhihong. Fundamentals of electrical theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 40-41.

[28]张慧源, 沈军达, 许力. 电力设备温升模型及其在载流故障预测的应用[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 81-86.

ZHANG Huiyuan, SHEN Junda, XU Li. Temperature model of electrical equipment and its application in trend forecast for current-carrying fault[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 81-86.

[29]李西园, 龚喆, 马昆, 等. 基于最小二乘法的热试验温度数据预测[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(2): 146-150.

LI Xiyuan, GONG Zhe, MA Kun, et al. Prediction of temperature in thermal test based on least square method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(2): 146-150.

[30]林其雄, 曾文斐, 区伟明, 等. 负荷电流对电接触点温升的影响[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 229-235.

LIN Qixiong, ZENG Wenfei, OU Weiming, et al. Influence of load current on temperature rise of electrical connector contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 229-235.

陆德鹏(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事中低压成套技术研发工作(E-mail: [ludpeng@sgepri.sgcc.com.cn](mailto:ludpeng@sgepri.sgcc.com.cn)).

韩冬(1978—), 男, 学士, 工程师, 从事高电压开关设备的研发与设计工作。

吴希伟(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事电气设备检测。

黄靖(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事中低压成套技术研发工作。