

文章编号:1001-5078(2023)06-0881-06

· 红外技术及应用 ·

# 换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测

刘黎<sup>1</sup>, 王国平<sup>2,3</sup>, 俞恩科<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192;  
3. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 215200)

**摘要:**换流阀空冷器的应用十分广泛,若该元件运行状态是安全且稳定的,则高压直流输电就可稳定运行,为此提出基于多源异构数据融合的换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测方法。提前对红外传感器数据实施循环去噪,直到数据中无噪声数据为止,再融合多源异构数据,降低数据量以及空间维度,计算出红外图像的温度场分布,设定出对应阈值,与温度场阈值比较,判断电压状态是否处于平衡状态,实现换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测。实验结果表明,所提方法的红外监测精准以及监测图像去噪效果好。

**关键词:**多源异构数据;数据融合;数据去噪;平衡状态红外监测;温度场分布

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.011

## Infrared monitoring of minimum AC voltage balance state of converter valve air cooler

LIU Li<sup>1</sup>, WANG Guo-ping<sup>2,3</sup>, YU En-ke<sup>2</sup>

(1. Zhoushan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316000, China;  
2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China;  
3. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 215200, China)

**Abstract:** The converter valve air cooler is widely used. If the operation state of the element is safe and stable, the HVDC transmission can operate stably. Therefore, an infrared monitoring method for the minimum AC voltage balance state of the converter valve air cooler based on multi-source heterogeneous data fusion is proposed in this paper. The infrared sensor data is denoised in advance until there is no noise data in the data, and the infrared image of the temperature field distribution is calculated fusing with multi-source heterogeneous data from multiple sources, reducing the data volume and spatial dimension, setting the corresponding threshold, and comparing it with the temperature field threshold to judge whether the voltage state is in a balanced state, realizing infrared monitoring of the minimum AC voltage balance state of the converter valve air cooler. The experimental results show that the proposed method is accurate in infrared measurement as well as good in monitoring image denoising.

**Keywords:** multi-source heterogeneous; data fusion; denoising; infrared monitoring of balance state; temperature field

### 1 引言

我国东西部地区资源分化严重,东部平原人员分布密集、能源稀缺,为此提出西电东送思想,运输

期间电力平衡是系统安全稳定运行的关键,电力系统<sup>[1]</sup>包含电能生产、输送、分配以及用户使用,这四个环节中若某一个环节出现故障则整个配电网的运

**基金项目:**国家电网公司科技项目(No. 5500-202140505A-0-5-ZN)资助。

**作者简介:**刘黎(1987-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为柔性直流输电运维检修技术、高压直流断路器运维检修技术。E-mail: shaoyateng2c@163.com

**收稿日期:**2022-08-19; **修订日期:**2022-10-08

行就会出现异常<sup>[2]</sup>。当电能需求急剧增多时,电力设备的最小交流电压平衡性会迅速下降<sup>[3]</sup>,空冷器是换流阀系统中的主要元件,空冷器的自身状态直接影响换流阀的运行状态,换流阀引用在特高压换流站起到稳定运行的关键作用,在实际应用时,换流阀生成的热量需要被不断释放,以此保证系统内晶闸管无故障,所以换流阀的冷却系统是确保换流阀能够安全运行的保障,其中空冷器承担了换流阀的主要功能,为此需要实时监测该零件最小交流电压的平衡状态。

黄先进<sup>[4]</sup>等人首先构建绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)电路平稳运行模型,根据模型得出换流阀空冷器短路电流等参数产生的影响,以不同范围内 IGBT 模块工作情况定义平衡状态判断阈值,将目标对象实际情况与之比较,实现换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测。

郑文迪<sup>[5]</sup>等人首先详细计算平衡状态与电压之间的关系,构建出电压数学模型,通过卡尔曼滤波对红外数据进行去噪处理,最终在线性最小方差的帮助下得出电压运行状态数学模型,实现换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测。

以上两种方法在对换流阀空冷器最小交流电压平衡状态进行监测的过程中,没有对其中的红外数据进行融合处理,导致其中重复数据过多,所以数据的维度过高,存在红外测温结果不理想以及监测图像去噪效果差的问题。为了解决以上问题,本文提出基于多源异构数据融合的换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测方法。

## 2 多源异构数据融合

### 2.1 多源异构数据去噪

换流阀空冷器最小电压红外监测图像数据中通常含有大量噪声<sup>[6]</sup>,因小波变换自身带有冗余性等特点,因此选取小波变换方法对多源异构数据进行去噪<sup>[7]</sup>,这种方法的特性是可生成连续的近似结果。小波变换在对数据信号进行分解的过程中,需要在将零放置在高通滤波以及低通滤波之间以此扩展滤波器。

当多源异构数据信号的空间处于一维时,其信号函数为  $f(x)$ , 将函数投影到最小交流电压子集  $V_j(\dots \subset V_3 \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0)$  中,根据函数  $f(x)$  以及尺度函数  $\phi(x)$  内得出投影结果,其表达式为:

$$\begin{cases} C_{j,k} = \langle f(x), \phi_{j,k}(x) \rangle \\ \phi_{j,k}(x) = 2^{-j} \phi(2^{-j}x - k) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C_{j,k}$  代表尺度函数的尺度积;  $j$  代表子集的步长;  $k$  代表子集前进的步数数量。

将尺度函数  $\phi(x)$  转化为小波函数,则小波变换的小波系数表达式为:

$$w_{j,k} = \langle f(x), 2^{-j} \phi(2^{-j}x - k) \rangle \quad (2)$$

其中,  $w_{j,k}$  代表数据的离散细节信号。

因为尺度函数  $\phi(x)$  也是低通滤波器,因此该函数的又可描述为:

$$\frac{1}{2} \phi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_n h(n) \phi(x - n) \quad (3)$$

式中,  $h(n)$  代表水平高频信息函数;  $n$  代表多源异构信息数量。

进而得出尺度积  $C_{j+1,k}$  的计算公式为:

$$\begin{cases} C_{j+1,k} = \sum h(n - 2k) C_{j,n} \\ \frac{1}{2} \phi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_n g(n) \phi(x - n) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $g(n)$  表示低频信息函数。

则小波系数  $w_{j,k}$  的尺度积为:

$$w_{j+1,k} = \sum_n g(n - 2k) C_{j,n} \quad (5)$$

每经过一次尺度积计算即完成一次小波变换,此信号函数  $f(x)$  的长度就会缩短一半,长此以往,直到多源异构数据的长度结果为 1 后停止变换。

但这种变换需要在进行滤波卷积前进行,此时的尺度积以及离散小波系数的表达式分别为:

$$\begin{cases} C_{j+1,k} = \sum_l h(l) C_{j,k+2l} \\ w_{j+1,k} = \sum_l g(l) C_{j,k+2l} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $l$  代表小波变换的低频。

根据上述方法即可得出十分凸显多源异构信号的特征,加强去噪能力。在此基础上得到分解换流阀空冷器最小交流电压多源异构数据信号<sup>[8]</sup>,生成各个尺度内的噪声以及数据信号系数,根据小波变换的不变特性,可最详细的分离出数据信号中噪声。

为最大程度地避免数据细节丢失,文章提出引入变分偏微分方程进行平滑数据<sup>[9]</sup>,从而降低了数据细节丢失的发生率。根据变分偏微分方程获得小波分解的表达式为:

$$\begin{cases} I_t = I \nabla^2 \\ I|_{t=0} = I_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $I$  代表变分偏微分方程内的子带;  $I_i$  代表去噪后的电压数据;  $I_0$  表示原始变分偏微分方程子带。

根据能量模型原理得出全变差模型的计算公式为:

$$E_{TV} = \int (|\nabla I| + \frac{1}{2}\lambda(I_0 - I)) dx \quad (8)$$

式中,  $E_{TV}$  代表全变差模型;  $\nabla I$  代表原始子带与目前子带之间的差异;  $\lambda$  代表全变差模型参数;  $d$  代表能量模型系数。

多源异构数据去噪的过程需要保证能量方程的信号光谱为最小, 因此选取最陡下降法对最小交流电压数据进行去噪, 去噪后的数据信号表达式为:

$$I_i = \nabla \cdot \left( \frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right) + \lambda(I_0 - I) \quad (9)$$

### 2.2 多源异构去噪数据融合

对去噪数据进行数据融合, 可降低换流阀空冷器最小交流电压数据<sup>[10]</sup>, 从而加强电压平衡状态监测精度。

首先选取加权平均法对不同红外传感器对应的数据进行融合, 这种方法实质上就是得出每个红外传感器的对应数据, 并对所有数据进行加权平均计算。在监测过程中红外传感器共有  $N$  个, 则最小交流压的样本数据序列为:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_J, \dots, X_N\} \quad (10)$$

式中,  $X_J$  代表第  $J$  个红外传感器的位移。

若传感器  $X_j$  的权重值为  $w_j$ , 则数据加权平均融合模型  $T_1$  的表达式为:

$$T_1 = [w_1, w_2, \dots, w_N] [X_1, X_2, \dots, X_J, \dots, X_N]^T \quad (11)$$

式中,  $T$  代表传感器位移的时间序列。

根据式(11)可知, 当红外监测结果的信息越少、权重也越小, 则传感器  $H_j$  的熵表达式为:

$$H_j = -\frac{1}{\ln M} \sum_{i=1}^M f_{ij} \ln f_{ij} \quad (12)$$

式中,  $M$  代表红外监测数据时间序列的长;  $f_{ij}$  代表最小交流电压的状态监测总结果, 表达式为:

$$f_{ij} = \frac{1 + X_{ij}}{\sum_{i=1}^M (1 + X_{ij})} \quad (13)$$

式中,  $X_{ij}$  代表红外传感器的测试值。

则红外传感器熵权值  $w_j$  的表达式为:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j} \quad (14)$$

式中,  $m$  代表同种类红外传感器的个数。

则权重  $w_j$  的特征表达式为:

$$\begin{cases} w_j > 0 \\ \sum_{j=1}^m w_j = 1 \end{cases} \quad (15)$$

根据以上方法得出红外传感器对应数据状态的特征, 并利用主成分分析完成多源异构数据融合。主成分分析不仅能简化数据量, 同时可对数据进行降维处理, 其本质就是利用线性变换, 将数据转换成在正交状态下的不相关变量, 最后用极少数数据输出完整的信息。

若红外监测指标共有  $p$  个, 在熵权法的帮助下得出指标对应的则向量  $T'$  表达式为:

$$T' = (T_1, T_2, \dots, T_p) \quad (16)$$

已知向量  $T'$  内的分量是彼此相关的, 则对向量  $T'$  进行主成分分析处理就可完成多源异构数据融合。

首先标准化处理样本数据的时间序列, 以此排除数据维度对融合结果的影响, 若向量  $T'$  的样本数据为  $t_{ij}$ , 经过标准化处理后该数据的矩阵为:

$$\begin{cases} Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{M1} & z_{M2} & \dots & z_{Mp} \end{bmatrix} \\ z_{ij} = \frac{t_{ij} - \mu_j}{\sqrt{\sigma_j}} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $\mu_j$  代表向量的理想值;  $\sigma_j$  代表样本数据方差。

对矩阵  $Z$  的相关系数矩阵  $R$  进行计算, 其表达式为:

$$R = \frac{1}{M-1} ZZ^T \quad (18)$$

分别计算出矩阵  $R$  的非负特征以及特征向量, 得出特征的累计贡献率, 进而得出最小交流电压的主成分, 并将其中相同特征的数据进行融合, 完成多源异构数据融合, 其中累计贡献率  $a$  的计算公式为:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^L \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (19)$$

其中,  $\lambda_i$  代表第  $i$  个数据的特征值。

### 3 最小交流电压平衡状态红外监测

红外传感器对换流阀空冷器的最小交流电压进行实时监测的实质就是计算出监测图像的温度场分布实际情况<sup>[11]</sup>, 得出温度场是否在允许范围内, 若

不在,则采取措施,实现监测目的。

通常情况下红外传感器均是选用长波通型的滤光片,其透过率的拟合函数  $\gamma(\chi)$  计算公式为:

$$\gamma(\chi) = \sum_{i=0}^{n'} A_i \cdot \chi^i \quad (20)$$

式中,  $A$  代表红外传感器的常数项;  $n'$  代表拟合公式的阶数;  $\chi^i$  表示透过率样本数据。

在三次样条差值方法的基础上,将红外光谱图像进行分段,得出第  $i$  段的插值函数计算公式为:

$$\eta_i(\chi) = b_{i3}\lambda^3 + b_{i2}\lambda^2 + b_{i1}\lambda + b_{i0} \quad (21)$$

其中,  $b_{i3}$ 、 $b_{i2}$ 、 $b_{i1}$  和  $b_{i0}$  代表三次样条差值方法对应的系数。

则红外光响应函数  $\eta(\chi)$  的计算公式为:

$$\eta(\chi) = \sum_{i=1}^{n'} \eta_i(\chi) \quad (22)$$

因为测温函数属于慢变函数,将原始测温函数进行分段,生成最前端的测温积分  $N_i(T')$  以及对应测温函数  $N(T')$ , 其表达式分别为:

$$\begin{cases} N_i(T') = \left[ k_0 \cdot A \cdot \varepsilon \cdot C_1 \cdot (\chi_{i+0.5}) \cdot \exp\left(\frac{-C_2}{\chi_{i+0.5} T'}\right) \cdot \tau(\chi_{i+0.5}) \cdot \gamma(\chi_{i+0.5}) \cdot \eta(\chi_{i+0.5}) \cdot (\chi_{i+0.5} - \chi_i) \right] \\ N(T') = \sum_{i=1}^{n'} N_i(T') \end{cases} \quad (23)$$

其中,  $\varepsilon$  和  $\tau$  均表示测温函数所需参数;  $C_1$  和  $C_2$  表示不同时间段下空冷器的电容积。对式(23)进行求解即可生成温度场的分布<sup>[12]</sup>,判断获取的红外图像温度是否在可控范围内,完成电压监测。

#### 4 实验结果与分析

为了验证基于多源异构数据融合的换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测方法的整体有效性,现针对本文方法、电路 IGBT 状态监测方法以及电路 IGBT 状态参数在线监测方法,进行红外测温结果以及监测图像去噪效果的测试,测试结果如下所示。

##### 4.1 实验环境

选用经过优化的 IEEE50 机测试系统进行实验,主要监测换流阀空冷器最小交流电压的平衡状态,测试中共有 60 台发动机、母线共有 150 条、系统的电力线路共有 400 条,最小交流电压平衡节点是最后一根母线,其功率基准为 100 MVA。

##### 4.2 红外测温结果

因为红外线传感器的主要功能是感应目标辐射

的红外线,利用红外线的物理性质来进行测量,根据传感器结果得出电力线路的温度差,从而检测出电力线路的运行是否在正常范围内,实现换流阀空冷器最小交流电压的监测。

在上述实验环境中,分别对三种红外监测方法进行测试,即对三种红外传感器得出的线路测温精度进行比较,实验过程中将 WRCT01 型 K 分度的热电偶以及对应测温仪器放置在目标对象上,红外传感器放置在目标对象直线距离 200 mm 的位置,利用红外传感器自身系统中的单片机单元获取测量温度。使用本文方法获得的红外传感器数据的直方图如图 1 所示。

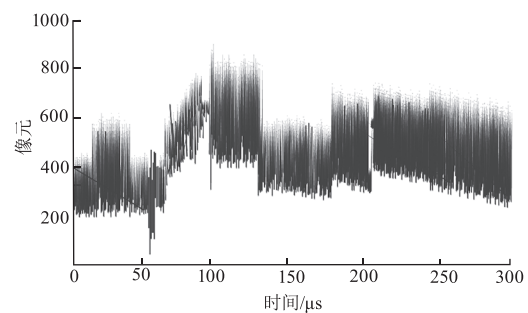


图 1 红外传感器数据直方图

Fig. 1 Infrared sensor data histogram

从图 1 可知,采用本文方法可以有效获取红外传感器数据,并实现数据处理,在此基础上,设置实验环境,进一步拟合数据获取温度结果。

实验途中外界的最低温度为 25 °C,最高温度为 30 °C,实际测量温度可允许的波动范围是 [0 °C - 2 °C],因不同时间段外界环境会发生变化,且每个时间段用电量大小均不相同,这些都是导致线路温度发生波动的主要原因,为了降低结果的偶然性,分别选取某一天中 1:00 ~ 15:00 之间 15 个不同时间段,对同一个换流器空冷器最小电压进行监测,实验结果如表 1 所示。

根据实验结果对三种红外监测方法进行分析,本文方法在每个时间段下,所监测的线路红外温度与真实温度基本无异,个别时间段出现差异,但其结果也全部在允许波动的范围内;电路 IGBT 状态监测方法的结果虽然大部分均在允许范围内波动,但较本文方法其测温结果还是不甚理想;而电路 IGBT 状态参数在线监测方法的测温结果误差不在允许范围内,证明该方法的监测结果十分不理想。综合以上分析结果得出,本文方法是三种方法中监测结果最理想的方法。

这是因为本文方法在对换流阀空冷器最小交流

电压平衡状态进行红外监测前,对红外监测数据进行融合预处理,将其中的重复数据排除,降低图像维度,降低监测所需计算量,加强监测精度。

表 1 三种方法的测温结果

Tab. 1 Temperature measurement Results of three methods

时间段	真实温度 /℃	本文方法 /℃	电路 IGBT 状态监测法/℃	状态参数在线监测法/℃
01:00	25.2	25.2	28.1	29.2
02:00	26.3	26.3	28.2	29.6
03:00	26.3	26.0	28.3	29.4
04:00	27.5	27.5	29.1	30.2
05:00	26.5	26.5	28.5	30.6
06:00	26.4	26.4	28.4	30.1
07:00	27.3	27.3	29.1	30.2
08:00	27.2	27.3	29.2	30.0
09:00	27.3	27.3	29.1	30.1
10:00	28.3	28.3	30.5	31.2
11:00	28.4	28.5	30.6	31.3
12:00	29.1	29.1	30.8	31.5
13:00	29.3	29.3	31.2	32.2
14:00	29.6	29.6	32.5	32.6
15:00	29.8	29.8	31.9	32.1

### 4.3 监测图像去噪效果

为了进一步验证本文方法的有效性,选取图像去噪效果作为实验指标,已知电压平衡性的红外监测实质是对图像红外温度进行辨别,图像的清晰程度直接决定最终的监测结果,所以每种方法在监测之前均需要对图像进行去噪处理,去噪结果的好坏也是评价监测方法优劣的有效指标。

在上述实验环境下随机选取一段电力线路进行测试,分别对原始图像进行去噪,已知理想去噪结果为图 2b,将三种方法得出的去噪图像与之比较,得出最相近的去噪图像就是最优监测方法,实验结果如图 2 所示。

根据实验结果可知,三种方法去噪后的图像与原始图像相比均有所改善,但与理想去噪结果最接近的方法就是本文方法,其次是电路 IGBT 状态监测方法。

对目标图像中加入噪声方差为 10、20、30 的高斯白噪声,对比不同方法去噪处理后的图像的峰值信噪比,得到结果如表 2 所示。

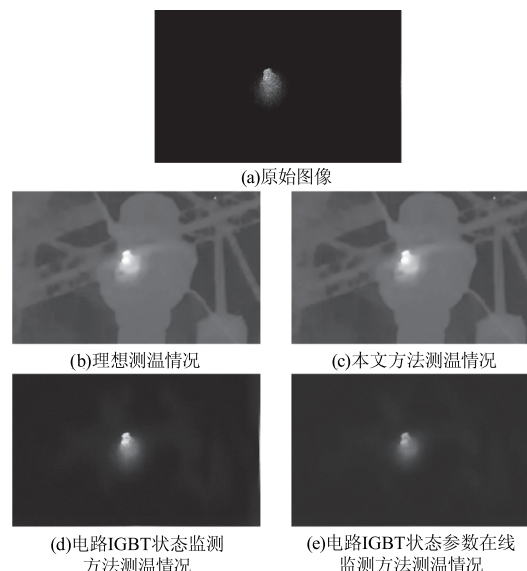


图 2 三种方法对图像的去噪效果

Fig. 2 Image denoising effect of three methods

表 2 去噪处理后图像的峰值信噪比结果

Tab. 2 Peak signal to noise ratio results of image after denoising

噪声方差	本文方法 /℃	电路 IGBT 状态监测法 /℃	状态参数在线监测法 /℃
10	35.87	25.36	31.24
20	32.23	24.18	30.67
30	30.41	21.69	28.46

从表 2 对比结果可知,在不同的噪声方差下,本文方法的去噪处理后的图像仍具有较高的峰值信噪比,而其他方法的峰值信噪比始终低于本文方法,这说明本文方法应用下,图像仍可保持较多的细节信息,图像更光滑,视觉效果更好。

本文方法与理想结果之间基本无差异,这是因为本文方法对图像进行去噪不仅仅是去噪一次,而是多次不断的进行去噪,直到图像中不再出现噪声为止,以此得出最干净的图像,降低因噪声带来不必要的影响,从而加强去噪能力和监测能力。

### 5 结束语

换流阀空冷器是多种大型设备的必要元件,但这种元件最大的问题是最小交流电压容易出现不平衡,为此提出基于多源异构数据融合的换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测方法,该方法提前对红外数据进行去噪以及数据融合的预处理,在此基础上计算出图像的温度分布,经过判断得出发生故障的位置,实现换流阀空冷器最小交流电压平衡状态红外监测,解决了红外测温结果不理想以及监测图像去噪效

果差的问题,保障电力设备的稳定运行。

### 参考文献:

- [1] Hu Hong, Wei Hua, Li Zhaoyu. Coordinated optimization model considering nuclear power participating in peak load regulation of power system with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 31 - 39. (in Chinese)  
胡弘, 韦化, 李昭昱. 风电接入下核电参与电力系统调峰的协调优化模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 31 - 39.
- [2] Fang Xiaolun, Yang Qiang, Liu Guofeng, et al. Power supply restoration strategy for offshore multi-platform interconnected power system with faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 53 - 61. (in Chinese)  
方晓伦, 杨强, 刘国锋, 等. 海上多平台互联电力系统故障后的供电恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 53 - 61.
- [3] Zhang Jianwei, Lin Hong. Reactive power optimization strategy of wind farm considering voltage balance of wind turbine[J]. Water Power, 2020, 46(9): 115 - 119. (in Chinese)  
张建委, 蔺红. 考虑风电机组电压均衡性的风电场无功优化策略[J]. 水力发电, 2020, 46(9): 115 - 119.
- [4] Huang Xianjin, Li Xin, Liu Yixin, et al. Condition monitoring and protection circuit for IGBTs based on parallel comparison methods of quantized voltages [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2535 - 2547. (in Chinese)  
黄先进, 李鑫, 刘宜鑫, 等. 基于量化电压并行比较的 IGBT 状态监测保护电路[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2535 - 2547.
- [5] Zheng Wendi, Zhou Tenglong, Shao Zhenguo, et al. An online monitoring method for IGBT state parameters of modular multilevel converter [J]. Electrical Measurement, 2020, 57(22): 120 - 125. (in Chinese)  
郑文迪, 周腾龙, 邵振国, 等. 模块化多电平换流器 IGBT 状态参数在线监测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 120 - 125.
- [6] Lou Bing, Chen Jianyou, Huang Jian, et al. Automatic estimation of harmonic noise energy in vibroseis slip-sweep seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(5): 768 - 776. (in Chinese)  
娄兵, 陈建友, 黄坚, 等. 可控震源地震数据中谐波噪声能量的快速估计方法[J]. 石油物探, 2020, 59(5): 768 - 776.
- [7] Duan Xiaoyi, Chen Dong, Gao Xianwei, et al. Research and implementation of correlation power analysis based on wavelet transform [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1119 - 1124. (in Chinese)  
段晓毅, 陈东, 高献伟, 等. 基于小波变换去噪的相关功耗分析攻击研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1119 - 1124.
- [8] Zhang Renshang, Qiu Jiurui. Multi-source heterogeneous data encryption algorithm for spread spectrum communication based on chaotic system[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(8): 162 - 166, 176. (in Chinese)  
张人上, 邱久睿. 基于混沌系统的扩频通信多源异构数据加密算法[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(8): 162 - 166, 176.
- [9] Zha Wenshu, Li Daolun, Shen Luhang, et al. Review of neural network-based methods for solving partial differential equations[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(3): 543 - 556. (in Chinese)  
查文舒, 李道伦, 沈路航, 等. 基于神经网络的偏微分方程求解方法研究综述[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 543 - 556.
- [10] Liu Zhelin, Wang Chengshan, Li Peng, et al. State estimation of distribution networks based on multi-source measurement data and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2605 - 2615. (in Chinese)  
刘喆林, 王成山, 李鹏, 等. 多源量测数据融合的配电网状态估计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2605 - 2615.
- [11] Zhang Yutong, Zhai Xuping, Nie Hong. Deep learning method for action recognition based on low resolution infrared sensors [J]. Infrared Technology, 2022, 44(3): 286 - 293. (in Chinese)  
张昱彤, 翟旭平, 聂宏. 基于低分辨率红外传感器的深度学习动作识别方法[J]. 红外技术, 2022, 44(3): 286 - 293.
- [12] Cao Lihua, Li Yu, Si Heyong. Research on temperature distribution characteristics in low pressure cylinder of large steam turbine under ultra-low load conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1018 - 1026. (in Chinese)  
曹丽华, 李禹, 司和勇. 超低负荷工况下大功率汽轮机低压缸内温度场分布特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1018 - 1026.