

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240891

# 继电保护装置失效的温度影响特性及其失效率预计方法

喇军<sup>1</sup>, 刘宇<sup>2</sup>, 李仲青<sup>3</sup>, 王雨茜<sup>1</sup>, 薛安成<sup>1</sup>, 舒治淮<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京 100031; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 继电保护装置是电力系统的第一道防线, 其可靠性至关重要。温度是导致继电保护装置失效、影响自身可靠性的主导因素。然而, 目前继电保护装置可靠性影响分析, 特别是其失效率预计, 鲜见考虑温度影响。针对上述问题, 详细分析了温度对继电保护装置的影响特性, 并给出了考虑温度的失效率预计方法。首先, 介绍了典型保护装置的架构, 分析了不同安装环境下的传热形式和温度特点, 并研究了装置内部的温度分布特性。其次, 从可靠性物理的角度定性分析了装置失效的温度影响特性, 并结合装置架构, 提出了考虑温度的继电保护装置失效率预计方法。最后, 结合不同环境下的装置内部实测温度和失效率预计结果, 结合工程数据和经验, 验证了方法的合理性。

**关键词:** 继电保护装置; 温度; 影响特性; 失效率预计

## Temperature influence characteristics of relay protection device failure and its failure rate prediction method

LA Jun<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>, LI Zhongqing<sup>3</sup>, WANG Yuqian<sup>1</sup>, XUE Ancheng<sup>1</sup>, SHU Zhihuai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. National Power Dispatch and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Relay protection devices are the first line of defense in power systems, and their reliability is crucial. Temperature is the primary factor that leads to the failure of relay protection devices, significantly affecting their reliability. However, current reliability impact analyses of relay protection devices, particularly their failure rate prediction, rarely consider the influence of temperature. In view of the above problems, the influence characteristics of temperature on relay protection devices are analyzed in detail, and a failure rate prediction method considering temperature is presented. First, the architecture of typical protection devices is introduced. The heat transfer forms and temperature characteristics in different installation environments are analyzed, and the temperature distribution characteristics of the device are studied. Next, reliability physics is used to quantitatively analyze the temperature influence characteristics of device failure. Combined with the device architecture, a failure rate prediction method for a relay protection device considering temperature is then proposed. Finally, from the measured temperature and failure rate prediction results in different environmental conditions, the rationality of the proposed method is verified by combining with the engineering data and experience.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

**Key words:** relay protection device; temperature; influence characteristic; failure rate prediction

## 0 引言

继电保护装置是电网安全稳定运行的第一道防

线<sup>[1-2]</sup>, 是电力系统不可缺少的重要组成部分, 保护装置失效将直接影响整个系统的安全稳定运行。随着继电保护装置安装环境的日益复杂以及核心元器件自主化进程的推进<sup>[3]</sup>, 温度已成为制约装置可靠性的主导因素<sup>[4]</sup>。然而关于继电保护装置的溫度影

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000)

响分析较少,同时,其失效率预计方法鲜有考虑温度影响。因此,有必要研究温度对继电保护装置失效的影响特性及其失效率预计方法,以便于合理安排检修计划<sup>[5]</sup>,确保电力系统安全稳定经济运行。

对于继电保护装置的可靠性评估,传统方法基于大量的运行数据来估计其失效率。例如,根据继电保护装置现场失效数据,文献[6]推导出了考虑数据检修、截尾特性的极大似然恒定失效率估计方法和最小二乘拟合方法。文献[7]在区分偶然失效和老化失效的基础上,利用 Weibull、正态等分布函数拟合,估算时变的老化失效率,并利用可决系数比较拟合的优劣。文献[8]分别用指数和 Weibull 分布拟合偶然失效率和老化失效率,综合得到装置时变失效特性;最后,结合算例,对不同批次和不同模块进行了失效特性分析。文献[9]利用三参数 Weibull 分布特性,提出了一种基于最小二乘法和迭代法的继电保护装置老化失效率估算方法。

然而,传统方法因保护装置的台账无法记录其安装环境的温度,导致无法评估不同温度环境下装置的失效率;另一方面,随着保护装置的可靠性越来越高,无法得到大量的运行失效数据,从而影响了可靠性评估的准确性,因此对保护装置采用可靠性预计的方法进行评估分析。具体地,通过保护装置的架构预计特定使用环境下的可靠性以及定量分析环境因素对装置可靠性的影响。目前,可靠性预计方法主要有<sup>[10]</sup>:基于失效物理的方法和基于可靠性预计手册的方法。

### 1) 基于失效物理的方法

失效物理是研究电子产品在各种应力下发生失效的内在原因及其机理的科学。例如文献[11]从可靠性物理角度建立了电路板级、封装级和元件级 3 类的电子产品失效物理预计模型。文献[12]基于电容器的腐蚀失效机理,建立了一种计及电容器老化速率和温度相关的失效物理模型。文献[13]首先介绍了半导体的电-热-力场耦合情况,其次从应力-应变的关系介绍了失效物理的基础理论,进一步介绍了功率器件的键合线和焊料层的物理失效,最后介绍了功率器件的疲劳失效综合过程。文献[14]针对微互连情况下金属间化合物层与互连凸点厚度/体积比不断增加而导致互连失效的问题,以铜柱凸点互连结构和焊料凸点混合互连结构为对象,在电-热-应力场耦合下进行了失效机理研究。文献[15]将多芯片组件的失效机制分为了过应力型和损耗型两大类,并建立了考虑过应力失效和损耗失效的多

芯片组件竞争失效的可靠性评估模型。

### 2) 基于可靠性预计手册的方法

基于手册的可靠性预计是采用预计手册提供的元器件失效率预计模型,根据装置中使用的元器件类型和数量、环境条件和可靠性逻辑关系等因素进行可靠性预计。例如文献[16]介绍了各种失效率预计标准,例如 SR-332、MIL-HDBK-217F、GJB/Z 299C 等,并分析了各标准的特点和局限性,得出 SR-332 是最适合智能电能表可靠性预计的标准。文献[17]采用预计手册 GJB/Z 299C-2006 中的应力分析法,计算得到了组合 DC-DC 电源在几种不同工作环境下的可靠性预计值。文献[18]介绍了美军标 MIL-HDBK-217E 和国军标 GJB-299C 可靠性预计标准,结合实例对进口和国内核心元器件进行了失效率预计,并对比分析了其可靠性差距。文献[19]基于高加速试验得到的芯片基本失效率,通过 SN29500 标准修正得到芯片实际失效率,并通过运行数据验证所提方法的合理性。

综上,基于失效物理的方法可以反映元器件的失效机理和性能衰退的发展规律,但保护装置内含众多元器件,失效机理复杂,只能定性分析保护装置失效的温度影响特性,难以进行定量分析;而基于预计手册的方法包括丰富的元器件失效率预计模型和主导影响因素表征数据,且有详细的步骤和指南,比较适合保护装置的失效率预计。

值得注意的是,保护装置的环境温度近似呈正态分布<sup>[20]</sup>。现有的主流继电保护装置失效率预计方法仅考虑了运维环境中平均温度应力的影响,而未考虑温度循环应力的影响。在电子设备缺陷原因分析中,温度是最主要的原因,占 55%<sup>[21]</sup>,其中温度循环应力比平均温度应力影响更大<sup>[22]</sup>,故忽略温度循环应力会影响继电保护装置失效率预计的准确性。

另一方面,温度循环应力对可靠性预计的影响,在电力设备方面,目前主要集中在电力电子器件的可靠性预计。例如,文献[23]考虑绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)是高频率开断器件,其在交变热应力下材料产生蠕变疲劳,为变流器的可靠性评估奠定了基础。文献[24]考虑 IGBT 器件在实际应用中遭到热循环冲击,采用了较为精确的 Bayerer 模型作为 IGBT 模块的寿命模型。文献[25]表明温度循环应力为金属氧化物半导体场效应管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET)黏结层疲劳失效的主要原因,所以采用了基于应变疲劳的 Coffin-Manson 模型进行黏结层寿命评价。文献[26]以变流器输出功率大小和波动强度分别对应热应力因子和温度循环因子,

建立了变流器的元器件故障率计算模型。文献[27]对保护设备的高热损元器件进行了温度仿真分析以及不同平均温度下的寿命评估。文献[28]针对继电保护装置内部主要功能模块，在考虑平均运行温度的条件下，建立了时变老化失效率模型，但是均缺乏考虑温度循环应力的影响。

鉴于此，本文介绍了保护装置的架构以及安装环境，研究了保护装置的传热形式和温度分布特性，进而从可靠性物理的角度定性分析了装置失效的温度影响特性；提出了考虑温度影响的装置失效率预计方法，且结合实例进行了验证和分析。

### 1 继电保护装置架构

继电保护装置采用模块化的架构，各模块的功能由软件和硬件功能对应配置实现，如图 1 所示。例如，交流模块将系统电压互感器 PT 和电流互感器 CT 的二次信号变换成保护装置所需的弱电信号，同时起隔离和抗干扰作用；开入模块接入各保护压板、各开入等开关量的输入信号；CPU 模块主要完成采样、A/D 变换计算、上送模拟量及开入量信息、保护动作原理判断、事故录波功能、软硬件自检等；管理模块承接保护装置与外界的通信，包括遥测、遥信、事件报文和录波信息等；开出模块主要输出跳闸和开出信号；电源模块为各个模块的运行可靠供电。

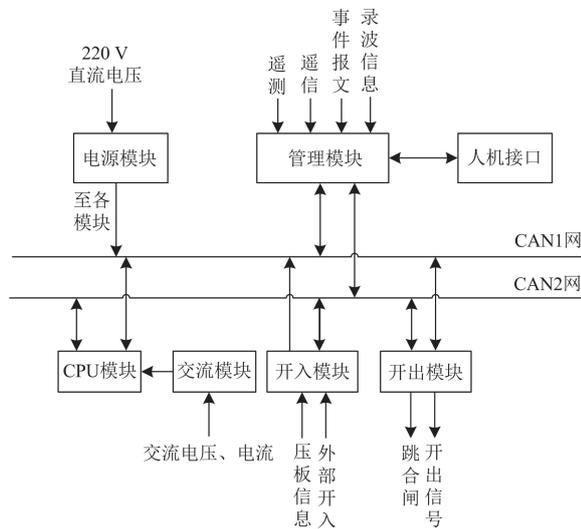


图 1 继电保护装置架构图

Fig. 1 Relay protection device architecture diagram

### 2 继电保护装置的传热形式以及温度特性

保护装置安装环境日趋复杂，加之核心元器件逐步实现自主化，导致其内部元器件的工作温度环境更加恶劣。其中安装在室外的保护装置遭受昼夜

温度循环应力的影响以及自主化核心元器件功耗较大带来的平均温度应力增大的影响，所以有必要对保护装置进行传热形式分析和温度特性分析。

#### 2.1 不同安装环境下的装置传热形式分析

##### 2.1.1 热量的传递方式

传热是因存在温差而发生热量的转移。依据热量转移过程的特点，热量的传递方式被划分为 3 类，即热传导、热对流和热辐射<sup>[29]</sup>。

##### 1) 热传导

热传导是热量通过介质从高温区域传递到低温区域，并且不引起任何形式的宏观相对运动。热传导在保护装置中广泛存在，例如芯片内部的热量传递到封装表面的过程、印制板内部的热量传递等。其计算公式为

$$q = -K \text{grad}t_c \tag{1}$$

式中： $q$  为热量； $K$  为热导率； $t_c$  为热传导温度； $\text{grad}t_c$  为温度  $t_c$  的梯度；负号表示热量的传播方向和温度梯度方向相反。

##### 2) 热对流

热对流指流体内部由于宏观运动导致冷热部分发生相互掺混而产生的热量转移。继电保护装置中主要为装置外壳与空气之间的热对流，其计算公式为

$$q = hS_1(T_w - T_f) \tag{2}$$

式中： $h$  为对流换热系数； $S_1$  为换热面积； $T_w$  为固体表面温度； $T_f$  为流体温度。

##### 3) 热辐射

热辐射是处于非绝对零度下物体辐射出的热量，其计算公式为

$$q = \varepsilon\sigma S_2(T_s^4 - T_{su}^4) \tag{3}$$

式中： $\varepsilon$  称为物体的辐射率； $\sigma$  为玻尔兹曼常数； $S_2$  为辐射表面积； $T_s$  和  $T_{su}$  分别为物体和周围环境的绝对温度。

##### 2.1.2 室内安装环境下的装置传热形式分析

室内安装(包括保护小室和室内汇控柜安装)的保护装置为强迫冷却散热，其装置内部的元器件会通过热传导的方式向装置外进行热量传递，并且室内安装环境均会配备空调系统。空调系统会加快室内空气的流动，同时保护装置内部的空气也会流动起来，使保护装置表面和装置内部的元器件与空气的对流换热能力加强，所以装置所处环境的温度循环幅值较小。由于对流换热的效率增大，辐射换热的贡献大幅度减小。所以，室内安装环境下保护装置的主要传热形式为热传导和热对流。

### 2.1.3 室外安装环境下的装置传热形式分析

室外安装(包括户外就地柜安装,未涉及就地化继电保护装置,因为就地化继电保护装置与其他保护装置结构差异较大)的保护装置为自然冷却散热,其装置内部元器件的温度易受环境温度影响,根据式(1),热量的传播方向和温度梯度方向相反。当白天温度较高时,外部热量通过热传导方式在装置内部传导,致使元器件温度上升;夜晚温度较低时,元器件的热量会通过热传导的方式向外进行热量传递,所以保护装置所处环境温度循环幅值较大。并且室外安装的继电保护装置会受到太阳辐射影响,辐射换热过程所占的比例就会增大;但室外安装环境下空气平均流速相对较慢,装置内部元器件和装置表面与空气的对流换热强度不高。所以,室外安装环境下保护装置的主要传热形式为热传导和热辐射。

综上,室内外安装类型的冷却模式、环境主要差异、主要传热形式以及温度特点总结如表 1 所示。

表 1 保护装置的传热形式和温度特性

Table 1 Heat transfer form and temperature characteristics of protection device

安装环境	冷却模式	环境主要差异	主要传热形式	温度特点
室内安装	强迫冷却	有空调系统	热传导	温度循环幅值小
		无太阳辐射	热对流	
室外安装	自然冷却	太阳辐射	热传导	温度循环幅值大
		空气流速慢	热辐射	

### 2.2 继电保护装置内部温度分布特性分析

保护装置内部元器件的可靠性主要与温度有关,而元器件的温度因安装环境类型的多样化和核心元器件的自主化而不同,所以需要研究装置内部元器件的温度分布特性。式(4)为热传导基本定律中的热阻公式,它描述了元器件结温的影响因素,并且揭示了在功耗不变的情况下元器件的结温和环境温度基本为线性关系。元器件的结温取决于两方面:一为装置的环境温度;二为功耗和热阻导致的温度变化量。其中热阻在整个元器件寿命周期中基本不变<sup>[30]</sup>,故得到元器件结温和环境温度为线性关系的结论,并且保护装置中的元器件温度试验结果<sup>[27]</sup>验证了其线性关系,故元器件的温度为环境温度和固定温升之和。其中,功耗越大的插件温度越高,在红外热成像图中越亮<sup>[31]</sup>,详情见图 2。

$$T_j = T_A + R_{jA} \cdot P \quad (4)$$

式中:  $T_j$  为元器件结温;  $T_A$  为环境温度;  $R_{jA}$  为  $T_j$  和  $T_A$  之间的热阻;  $P$  为元器件功耗。

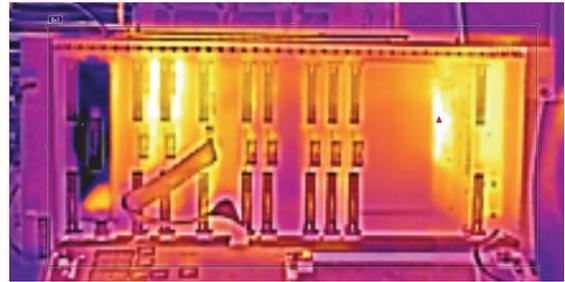


图 2 继电保护装置的温度分布情况

Fig. 2 Temperature distribution of relay protection device

## 3 继电保护装置失效的温度影响特性

温度对装置的影响主要体现在装置硬件部分,软件部分基本不受温度影响。继电保护装置为多插件的硬件结构,装置的失效就是插件的失效。从可靠性物理的角度<sup>[32]</sup>,装置失效可以分为两种:一种是插件上的元器件失效;另一种是互连失效。

### 3.1 温度影响的装置互连失效

装置互连失效是指元器件与电路板之间的组装焊点、键合引线以及封装的焊料因高温应力或者长期温度循环应力导致的失效。

#### 1) 焊点失效

焊点失效指焊点在低于屈服强度的高温应力作用下的蠕变变形,随着时间增加,形变量达到阈值而导致的失效,主要失效模式有焊点开路、裂纹、界面空洞等。

#### 2) 键合引线失效

在高温条件下,金属键合引线产生多种金属间化合物,其热膨胀系数均不同。在长时间高温下,键合引线的强度下降,以致开路。

#### 3) 焊料疲劳失效

导致焊料疲劳失效的主要原因为焊料与所连接焊接件的材料热膨胀系数不同,在小于产品结构强度的温度循环应力作用下,焊料内部萌生的微裂纹将不断扩展直至开裂导致失效。焊料疲劳失效的具体过程:塑性应变→微裂萌生→裂纹扩展→开裂。

### 3.2 温度影响的装置元器件失效

元器件失效是指保护装置内部的元器件因温度过高或者温度急剧变化而导致的损伤、破裂、内压高致爆炸和电参数超差失效。

#### 1) 过热损伤失效

当元器件的工作温度高于最高允许工作温度时,元器件会因电参漂移或热击穿而导致高温过应力失效。由 2.2 节可知,元器件的工作温度依赖于功耗、封装热阻、环境温度。

## 2) 破裂失效

元器件在制作过程中因工艺的原因无法避免产生微裂纹,微裂纹在温变应力作用下不断扩展,直至达到临界尺寸,最终导致芯片脆性断裂失效。

## 3) 内压高致爆炸失效

元器件内部如有液态介质,其温度的上升会导致极端的失效表现。例如电容因内部温度过高而导致爆浆现象。具体过程:当温度升高,器件气密性变差,水分进入器件,水分与化学物质反应生成气体,当气体逐渐增大到临界值时,器件就会爆炸导致失效。

## 4) 电参数超差失效

元器件在不适宜温度范围内长期运行,导致电参数超差失效。例如电容器电参数超差的主要特征为电容量下降、阻抗增加和漏电流增加。

# 4 考虑温度的保护装置失效率预计方法

## 4.1 装置失效率

装置硬件和软件在功能实现上相互配合,硬件和软件缺一不可。在可靠性逻辑关系中,保护装置的硬件和软件为串联结构,装置的失效率为硬件和软件失效率之和,其计算模型为

$$\lambda_{\text{装置}} = \lambda_{\text{硬件}} + \lambda_{\text{软件}} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_{\text{装置}}$  为保护装置的失效率;  $\lambda_{\text{硬件}}$  为装置的硬件失效率;  $\lambda_{\text{软件}}$  为装置的软件失效率。

## 4.2 硬件失效率

对于继电保护装置硬件失效率的预计,可以采用基于《电子设备可靠性预计模型及数据手册-2019》<sup>[33]</sup>的方法,该预计手册明确说明适用于国产电子元器件的失效率预计,标准中规定了继电保护装置所含常见元器件类型的预计模型、影响因子表征及相关数据,且为目前最新的可靠性预计手册。标准中所规定的预计模型主要从恒定温度描述元器件老化的阿伦尼茨模型、温度循环导致的互连失效模型以及过电应力失效模型3个方面建模,可以精确量化分析保护装置特有的插件器件高度集中特性和国产化器件特性导致的装置内部元器件温度升高问题,综合来看该标准适用于保护装置的硬件失效率预计。

标准采用常数类型的失效率作为可靠性预计的表征参数,具体硬件失效率计算过程为:1)明确装置所含插件的种类和数量;2)明确每个插件所含元器件的种类和数量以及连结关系;3)了解装置内每个板卡上各元器件的温度情况;4)结合元器件温度情况进行装置失效率预计。具体的计算模型如下。

## 1) 装置硬件失效率预计

根据装置所含插件的种类和数量,建立装置硬件的失效率预计模型,见式(6)。

$$\lambda_{\text{硬件}} = \sum_{i=1}^M \lambda_{\text{插件}i} \quad (6)$$

式中:  $M$  为装置所含插件的数量;  $\lambda_{\text{插件}i}$  为第  $i$  个插件的失效率。

## 2) 插件失效率预计

根据各插件所含元器件的种类和数量,参考可靠性预计手册第6节内容,建立第  $i$  个插件的失效率预计模型如式(7)所示。

$$\lambda_{\text{插件}i} = A + B \quad (7)$$

式中:  $A$  为插件所含的元器件及其互连失效率,其预计模型如式(8)所示;  $B$  为插件的基板失效率,其预计模型如式(9)所示。

$$A = \sum_{x=1}^X \lambda_{s,x} + [1 + 3 \times 10^{-3} \times \pi_n \times (\Delta T)^{0.68}] \times \sum_{x=1}^X \lambda_{d,x} \quad (8)$$

$$B = 5 \times 10^{-3} \times \pi_t \times \pi_c \times$$

$$\left[ N_t \sqrt{1 + \frac{N_t}{S_{\text{pcb}}}} + N_p \times \frac{1 + 0.1 \sqrt{S_{\text{pcb}}}}{3} \times \pi_L \right] \times [1 + 3 \times 10^{-3} \times \pi_n \times (\Delta T)^{0.68}] \quad (9)$$

式中:  $\lambda_{s,x}$  为插件所含第  $x$  个元器件的失效率,单位为 FIT;  $X$  为插件所含的元器件数量;  $\pi_n$  为年热循环次数相关的影响系数;  $\Delta T$  为温度循环幅值;  $\lambda_{d,x}$  为该插件所含第  $x$  个元器件的互连失效率;  $\pi_t$  为温度影响系数;  $\pi_c$  为层数系数;  $N_t$  为印制板金属化孔数;  $S_{\text{pcb}}$  为印制板的面积;  $N_p$  为印制板连接导线数;  $\pi_L$  为线宽系数。

## 3) 元器件失效率预计

保护装置含有多种类型的元器件,选取典型3类元器件展示,运行状态为连续运行,其元器件的失效率预计模型如下。

### (1) 集成电路失效率预计模型

集成电路模型涉及模拟电路、数字电路、存储、处理器和时钟电路。参考可靠性预计手册第7节内容,其失效率预计模型为

$$\lambda_{s,1} = (\lambda_1 N \times e^{-0.35 \times (a-1998)} + \lambda_2) \pi_t + [2.75 \times 10^{-3} \times \pi_a \pi_n (\Delta T)^{0.68} \lambda_3] + (\pi_A \lambda_{\text{EOS}}) \quad (10)$$

### (2) 固定、低功率表贴电阻器失效率预计模型

参考可靠性预计手册第11.1节内容,其失效率预计模型为

$$\lambda_{s,2} = 7 \times (\pi_t + 4 \times 10^{-6} \times \pi_n (\Delta T)^{0.68}) \quad (11)$$

### (3) 非固体铝电解电容失效率预计模型

参考可靠性预计手册第 10.5 节内容, 其失效率预计模型为

$$\lambda_{s,3} = 26 \times (\pi_t \pi_T + 7 \times 10^{-5} \times \pi_n (\Delta T)^{0.68}) \quad (12)$$

式中:  $\lambda_{s,1}$ 、 $\lambda_{s,2}$  和  $\lambda_{s,3}$  分别为集成电路、电阻器和电解电容的失效率;  $\lambda_1$  为集成电路的每个晶体管的失效率;  $\lambda_2$  为集成电路的技术控制失效率;  $N$  为集成电路的晶体管数;  $a$  为制造年份;  $\pi_a$  为衬底和封装材料热膨胀系数差异的影响系数;  $\lambda_3$  为集成电路封装的基本失效率;  $\pi_A$  为集成电路应用有关的影响系数;  $\lambda_{EOS}$  为过电应力失效率;  $\pi_T$  为非固体电解电容自加热影响系数。选取表征温度应力影响的 2 种参数进行介绍, 详情见表 2。

表 2 温度相关参数的计算

Table 2 Calculation of temperature-related parameters

温度影响系数	具体计算	表征类型
温度循环幅值 $\Delta T$	装置经历的昼夜平均温差	温度循环应力 相关参数
温度影响系数 $\pi_t$	$\pi_t = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{273+t}\right)\right)$	平均温度应力 相关参数

表 2 中:  $t$  为元器件平均温度;  $E_a$  为失效激活能, 范围为 0.15~0.4 eV, 元器件种类不同取值不同;  $k$  为玻尔兹曼常数, 值为  $6.62 \times 10^{-5}$ 。

### 4.3 软件失效率

软件的失效通常涉及到多种因素, 包括代码质量、运行硬件条件、设计缺陷、网络入侵等。由于软件不会像硬件一样受运维环境的影响, 而是在更新迭代后失效率逐步降低<sup>[25]</sup>, 最后趋于一个最佳状态, 且跟硬件相比失效次数很少, 因此软件失效率设定为常数类型, 且采用相近年份的历史统计数据预计软件失效率, 其预计公式为

$$\lambda_{\text{软件}} = Q / \sum_{y=1}^H t_y \quad (13)$$

式中:  $Q$  为总的软件失效次数;  $H$  为运行的装置数量;  $t_y$  为第  $y$  个装置的运行时间。

软件失效率根据 2021 年继电保护装置运行报告, 获得 220 kV 及以上电压等级的继电保护设备缺陷总次数为 1842 次, 缺陷率为 0.870 次/(百台·年), 其中在缺陷原因分析中, 软件缺陷占比为 10.8%, 计算得到软件失效率  $\lambda_{\text{软件}} = 106.92 \text{ FIT}$ 。

注: 220 kV 及以上电压等级属于高电压等级, 对电力系统至关重要; 且电压等级越高, 软件原理

越复杂, 失效率越大, 故 220 kV 及以上电压等级的软件失效率可以代表全电压等级的继电保护装置软件缺陷率。

### 4.4 预计方法的总体说明

本文提出的继电保护装置失效率预测方法综合考虑了温度的影响。该方法通过温度影响系数表征以下因素: 1) 安装环境差异引起的温度循环幅值变化; 2) 核心元器件自主化替代导致的平均温度上升; 3) 保护装置插件器件高度集中特性引发的元器件温升效应。因此, 该方法适用于当前恶劣温度环境下装置可靠性的基础评估。

## 5 实例

### 5.1 保护装置内的温度分布情况

为了进行装置的硬件失效率预计, 需要先了解装置内的温度分布情况。故对某厂家线路保护装置(典型的多插件背板总线结构)在开阔室内无风无其他热源且环境温度为 19.5 °C 的情况下进行上电试验, 待稳定运行且装置温度无较大变化时用红外热像仪记录各插件温度情况, 其记录得到的各插件温度情况见表 3。

表 3 保护装置插件各点温度情况(环境温度 19.5 °C)

Table 3 Temperature of each point of the protection device plug-in (ambient temperature is 19.5 °C)

板卡类型	最高/°C	最低/°C	平均温度/°C	平均温升/°C
交流插件	30.2	23.2	29.5	10
CPU 插件 1	38.1	22.7	31.4	11.9
CPU 插件 2	32.6	20.9	28.0	8.5
管理插件	32.6	21.8	30.0	10.5
开入插件 1	32.9	20.0	27.1	7.6
开入插件 2	30.0	19.4	26.9	7.4
开出插件 1	27.3	21.1	25.9	6.4
开出插件 2	31.4	21.5	26.5	7.0
开出插件 3	27.5	21.3	26.4	6.9
电源插件	47.0	21.0	32.9	13.4

为简化计算, 插件上各元器件的温度用插件平均温度表征, 插件的平均温度为环境温度+功耗导致的平均温升。

由表 3 可知, 温升较高的板卡为 CPU 插件、管理板和电源板, 平均温升超过了 10 °C。其中取管理板和电源板展示温度分布情况, 见图 3 和图 4。

结合图 3 和图 4, 在红外热成像图中越亮的地方表示温度越高。其中管理插件中处理器区域温度最高, 电源插件中电解电容附近的温度较高。

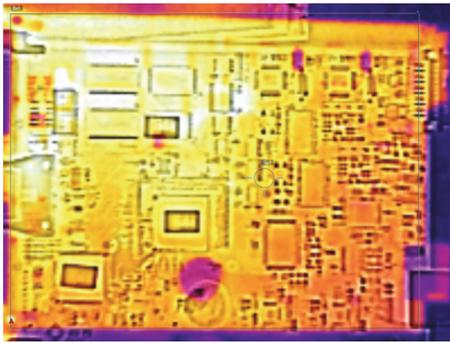


图 3 管理插件温度分布情况

Fig. 3 Management plug-in temperature distribution

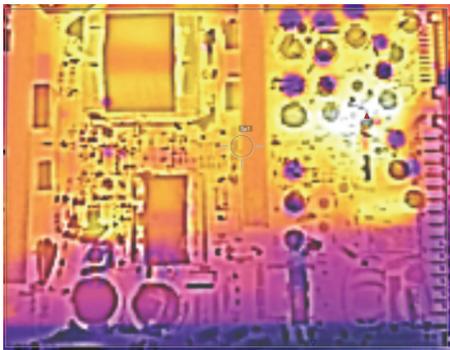


图 4 电源插件温度分布情况

Fig. 4 Power plug-in temperature distribution

## 5.2 装置失效率预计结果

### 5.2.1 室内安装类型-平均温度变化的影响

保护装置安装在室内环境下，考虑平均温度变化对装置失效率预计的影响。具体地，考虑室内安装环境下装置温度循环幅值小，取 0~3 °C，对 5.1 节选取的保护装置结合其温度情况采用第 4 节的预计模型计算得到随平均温度变化的装置失效率，见表 4；失效率变化曲线见图 5。

表 4 不同平均温度情况下的装置失效率

Table 4 Failure rate of the device under different average temperatures

温度循环幅值	失效率/FIT				
	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C
0 °C	7 883.26	8 182.54	8 497.25	8 828.29	9 176.57
1 °C	8 477.52	8 779.26	9 096.51	9 430.15	9 781.09
2 °C	8 835.34	9 138.57	9 457.35	9 792.55	10 145.10
3 °C	9 137.6	9 442.09	9 762.15	10 098.68	10 452.58
温度循环幅值	失效率/FIT				
	30 °C	32 °C	34 °C	36 °C	38 °C
0 °C	9 543.06	9 928.81	10 334.88	10 762.43	11 212.63
1 °C	10 150.32	10 538.87	10 947.82	11 378.30	11 831.52
2 °C	10 515.98	10 906.22	11 316.89	11 749.15	12 204.18
3 °C	10 824.85	11 216.52	11 628.66	12 062.41	12 518.97

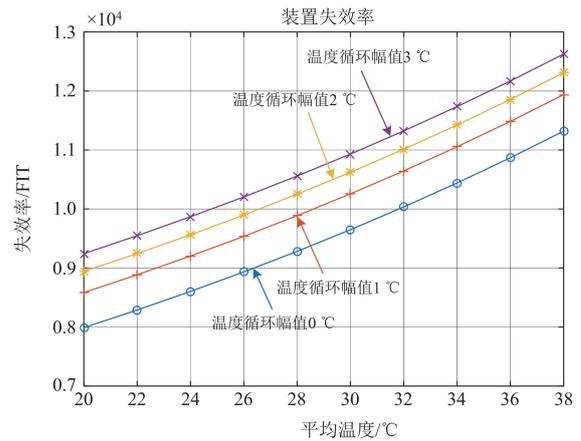


图 5 不同平均温度情况下的装置失效率

Fig. 5 Failure rate of the device under different average temperatures

图 5 表明，在室内安装环境下，当温度循环幅值一定时，平均温度的上升导致装置失效率增大。具体地，温度循环幅值不变时，平均温度从 20 °C 上升到 30 °C，装置失效率平均增加了 1675 FIT，平均增幅为 19.57%。

### 5.2.2 室外安装类型-温度循环幅值的影响

保护装置安装在室外环境下时，考虑温度循环幅值变化对装置失效率的影响。具体地，考虑室外安装环境下装置温度循环幅值较大，取 8~15 °C，对 5.1 节选取的保护装置结合其温度情况，采用第 4 节预计模型计算得到随温度循环幅值变化的装置失效率，见表 5；失效率变化曲线见图 6。

图 6 表明，在室外安装环境下，平均温度一定时，温度循环幅值的增大导致装置失效率增大。具体地，平均温度不变时，温度循环幅值从 8 °C 上升到 15 °C，装置失效率平均增加了 1311.69 FIT，平均增幅为 12.15%。

表 5 不同温度循环幅值情况下的装置失效率

Table 5 Failure rate of the device under different temperature cycle amplitudes

温度循环幅值	失效率/FIT			
	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C
8 °C	1 0327.10	10 636.53	10 961.67	11 303.40
9 °C	10 530.89	10 841.16	11 167.17	11 509.79
10 °C	10 727.54	11 038.63	11 365.48	11 708.96
11 °C	10 917.99	11 229.87	11 557.52	11 901.84
12 °C	11 102.96	11 415.61	11 744.06	12 089.18
13 °C	11 283.06	11 596.46	11 925.68	12 271.59
14 °C	11 458.78	11 772.91	12 102.87	12 449.55
15 °C	11 630.52	11 945.37	12 276.06	12 623.49

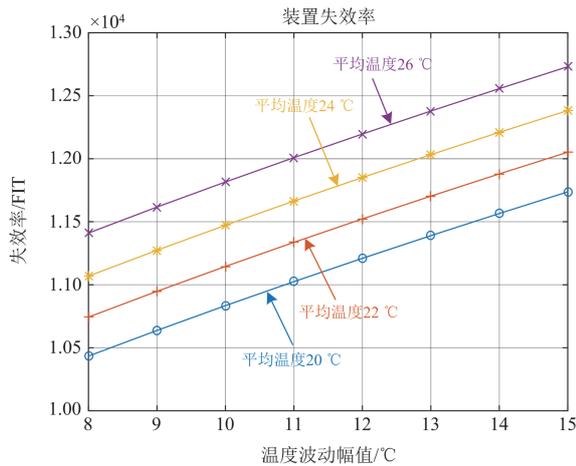


图 6 不同温度循环幅值情况下的装置失效率

Fig. 6 Failure rate of the device with different temperature cycle amplitudes

表 5 和表 6 为在不同温度环境下本文所提方法的某继电保护装置失效率预计结果, 文献[34]中的继电保护装置统计失效率为 9042 FIT, 鉴于目前的继电保护装置的运行台账和缺陷数据还不能详细记录装置所处环境的温度情况, 所以无法得到不同温度环境下的装置失效率数据, 故只能根据现有统计的平均失效率数据, 综合对比得到预计的装置失效率数据和统计失效率数据量级一致, 且相差不大。更进一步地, 室内外安装环境下的装置平均失效率预计数据见表 6, 表明室内安装环境下的装置失效率较室外低; 结合工程经验(继电保护装置室外安装类型的失效率大于室内), 验证了本文所提预计方法的有效性, 第一次实现了从量化的角度预计装置在不同温度环境下的失效率。

表 6 室内外安装环境下继电保护装置的平均失效率

Table 6 Average failure rate of relay protection device in indoor and outdoor installation environment

安装环境类型	20 °C	22 °C	24 °C	26 °C
室内安装失效率/FIT	8583.43	8886.62	9203.32	9537.42
室外安装失效率/FIT	10 997.36	11 309.57	11 637.56	11 982.23
增幅/%	28.12	27.27	26.45	25.63

### 5.3 灵敏度分析

为定量描述温度应力对继电保护装置失效率的影响, 采用保护装置失效率对平均温度和温度循环幅值的灵敏度<sup>[34]</sup>进行分析, 计算方法如式(14)和式(15)所示。

$$\text{绝对灵敏度} = \text{失效率变化量} / \text{温度变化量} \quad (14)$$

$$\text{相对灵敏度} = \frac{\text{绝对灵敏度}}{\text{失效率原始值}} \times \text{温度原始值} \quad (15)$$

根据 5.2.1 节和 5.2.2 节的失效率数据计算得不同安装环境下装置失效率对温度的灵敏度, 如表 7 所示, 表 7 表明在同一类安装环境下, 温度变化幅值的灵敏度略高于平均温度, 保护装置的失效率受温度变化幅值的影响较大, 因此在开展设备可靠性优化工作时, 可以考虑降低安装环境的温度循环幅值。

表 7 继电保护装置在不同安装环境下其失效率对温度的灵敏度

Table 7 Sensitivity of failure rate of relay protection device to temperature in different installation environments

安装类型	变化量	绝对灵敏度	相对灵敏度
室内安装	平均温度	184.97	0.469
	温度循环幅值	330.04	0.078
室外安装	平均温度	164.15	0.299
	温度循环幅值	187.38	0.139

## 6 结论

针对温度对继电保护装置失效的影响分析较少且缺乏失效率预计方法的问题, 本文研究了装置的元器件温度分布特性, 定性分析了装置失效的温度影响特性, 提出了考虑温度的装置失效率预计方法, 并结合实例进行了验证和分析。

分析结果表明:

1) 通过实例实现了装置失效率对温度的灵敏度分析, 说明了温度循环幅值对装置失效率的影响较平均温度大, 可以用于装置的可靠性优化和安全环境选择。

2) 结合装置的统计数据 and 工程经验, 验证了本文所提预计方法的有效性, 进而支撑继电保护装置可靠性基础理论的构建。

3) 考虑温度的继电保护装置失效率预计方法, 第一次实现了装置在不同温度环境下的失效率量化分析, 可以有效地支撑装置的全寿命周期管理。

值得注意的是, 本文主要考虑了温度, 未考虑湿度等其他因素的影响, 未来还需进一步研究湿度对装置可靠性的影响机理以及不同应力对装置可靠性的耦合影响。

### 参考文献

[1] 林一峰, 王增平, 王彤, 等. 构建更加坚强电网安全“第一道防线”的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 170-178.

LIN Yifeng, WANG Zengping, WANG Tong, et al. Discussion on building a stronger first line of defense for

- grid security[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 170-178.
- [2] 叶远波, 谢民, 陈晓东, 等. 高压继电保护装置的失效特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 121-125.  
YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. Research on failure characteristic of high-voltage relay protection device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 121-125.
- [3] 蔺立, 常乃超, 刘志远, 等. 基于国产芯片实现多功能测控的平台改进及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 179-187.  
LIN Li, CHANG Naichao, LIU Zhiyuan, et al. Platform improvement and key technologies of multi-functional measurement and control equipment based on domestic chips[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 179-187.
- [4] 易永辉. 继电保护装置寿命分析及寿命影响机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 79-83.  
YI Yonghui. Research on relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [5] 黄国平, 许家焰, 陈锦荣, 等. 继电保护远方不停电检验系统设计及工程化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 152-159.  
HUANG Guoping, XU Jiayan, CHEN Jinrong, et al. Design and engineering application of a remote intelligent test system for relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 152-159.
- [6] 薛安成, 王睿琛, 刘蔚, 等. 继电保护装置恒定失效率估算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 6-10.  
XUE Ancheng, WANG Ruichen, LIU Wei, et al. Estimation methods for constant failure rate of protection equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 6-10.
- [7] 王睿琛, 薛安成, 毕天姝, 等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 11-15, 23.  
WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15, 23.
- [8] 王宝, 薛安成, 王睿琛, 等. 直流保护装置时变失效特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 17-21.  
WANG Bao, XUE Ancheng, WANG Ruicheng, et al. Analysis of time-varying failure characteristics for HVDC protection devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 17-21.
- [9] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于三参数 Weibull 分布的继电保护装置老化失效率估算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 72-78.  
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on aging failure rate estimation of protective relay based on three-parameter Weibull distribution[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 72-78.
- [10] 骆明珠, 康锐, 刘法旺. 电子产品可靠性预计方法综述[J]. 电子科学技术, 2014, 1(2): 246-256.  
LUO Mingzhu, KANG Rui, LIU Fawang. A review of reliability prediction methods for electronic products[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 1(2): 246-256.
- [11] Physics of failure reliability predictions: ANSI/VITA 51.2—2016[S].
- [12] 郑媚媚. 金属化膜电容器失效物理建模及柔直换流阀组件可靠性评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [13] 王学梅, 张波, 吴海平. 基于失效物理的功率器件疲劳失效机理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 717-727.  
WANG Xuemei, ZHANG Bo, WU Haiping. A review of fatigue mechanism of power devices based on physics-of-failure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 717-727.
- [14] 周斌. 热应力下微凸点互连失效机理及可靠性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [15] 叶培莲. 基于失效物理的多芯片组件可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [16] 袁金灿, 马进, 王思彤, 等. 智能电能表可靠性预计技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 161-166.  
YUAN Jincan, MA Jin, WANG Sitong, et al. Reliability prediction of smart electrical energy meter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 161-166.
- [17] 彭杨. 基于 GJB/Z 299C 的组合 DC-DC 电源可靠性预计的工程研究[J]. 科学技术创新, 2022(31): 49-53.  
PENG Yang. Combined DC-DC power supply based on GJB/Z 299C engineering study on reliability prediction[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(31): 49-53.
- [18] 陈晓帆. 核心元器件国产化继电保护装置架构的可靠性设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [19] 舒治淮, 李仲青, 王雨茜, 等. 电网二次设备自主芯片失效率预计方法及其验证[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3844-3851.  
SHU Zhihuai, LI Zhongqing, WANG Yuqian, et al. Method and verification for predicting the failure rate of autonomous chips in secondary equipment of power grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3844-3851.
- [20] 龚杰, 徐习东, 杨剑友, 等. 考虑温度应力动态变化的继电保护装置可靠性研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(4): 105-112.  
GONG Jie, XU Xidong, YANG Jianyou, et al. A study on the reliability of relay protection devices considering

- dynamic changes in temperature stress[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 105-112.
- [21] AVIP U S. Air force avionics integrity program[J]. Notes, 1989.
- [22] 李树桢, 李晓阳, 姜同敏, 等. 基于温度循环的 ALT 技术在电子产品中的应用[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 73-77.
- LI Shuzhen, LI Xiaoyang, JIANG Tongmin, et al. Application of temperature cycle based ALT technology in electronic products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(6): 73-77.
- [23] 赖伟, 陈民铀, 冉立, 等. 老化试验条件下的 IGBT 失效机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5293-5300.
- LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, et al. Analysis of IGBT failure mechanism based on ageing experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5293-5300.
- [24] 陈泳安. 海上风电直驱风机换流器延寿策略与可靠性评估方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [25] 牛皓. 考虑工作剖面的开关电源可靠性评估及优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [26] 李辉, 季海婷, 秦星, 等. 考虑运行功率变化影响的风电变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 1-8.
- LI Hui, JI Haiting, QIN Xing, et al. Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 1-8.
- [27] 金龙, 周泽昕, 詹荣荣, 等. 继电保护设备元器件温度仿真分析与寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 159-168.
- JIN Long, ZHOU Zexin, ZHAN Rongrong, et al. Temperature simulation analysis and life evaluation for components of relay protection equipment[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 159-168.
- [28] 师元康, 姜振超, 赵书涛. 基于内部温度的继电保护装置时变失效率研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 123-128.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, ZHAO Shutao. Research on time-varying failure rate of protection devices based on internal temperature[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 123-128.
- [29] 陈继良. 从零开始学散热[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [30] 赖伟, 李涵锐, 李辉, 等. 基于失效演化模拟的电力机车用 IGBT 模块解析剩余寿命建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8189-8201.
- LAI Wei, LI Hanrui, LI Hui, et al. Analytical remaining lifetime modeling for electric locomotive IGBT modules based on failure evolution simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8189-8201.
- [31] 王艳, 连洪钵, 王寅初, 等. 基于改进边缘注意力生成对抗网络的电力设备热成像超分辨率重建[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 119-127.
- WANG Yan, LIAN Hongbo, WANG Yinchu, et al. Super-resolution reconstruction of thermal imaging of power equipment based on improved edge-attentive generative adversarial networks[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 119-127.
- [32] 恩云飞, 谢少锋, 何小琦. 可靠性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [33] 电子设备可靠性预计模型及数据手册: GB/T 37963—2019[S].
- [34] 薛安成, 章家欢, 李伟, 等. 计及核心元器件的继电保护装置 Markov 模型及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2380-2387.
- XUE Ancheng, ZHANG Jiahuan, LI Wei, et al. Markov model of relay protection device considering core components and analysis of its influencing factors[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2380-2387.

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-09-30

作者简介:

喇 军(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为二次设备评估; E-mail: lj6336332021@163.com

刘 宇(1979—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统继电保护专业管理工作; E-mail: liu-yu@sgcc.com.cn

薛安成(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新型电力系统稳定分析与控制、二次设备评估等。E-mail: acxue@ncepu.edu.cn

(编辑 许 威)