

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210915

# 基于动态优化马尔可夫链的线路继电保护装置状态预测方法

李铁成<sup>1</sup>, 刘清泉<sup>1</sup>, 任江波<sup>2</sup>, 曾四鸣<sup>1</sup>, 周达明<sup>3</sup>, 王志华<sup>3</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021; 3. 武汉凯默电气有限公司, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 目前继电保护状态监测模型均利用静态故障概率进行装置失效率预测, 未能计及设备老化与检修对失效率的动态影响, 预测结果不可靠。对此, 提出一种基于三参数威布尔分布动态优化的马尔可夫链状态预测方法。首先利用灰色-粒子群支持向量机算法求解更为精确的继电保护装置失效率函数, 随后将其用于动态修正保护状态马尔可夫链中各运行状态之间的转移概率, 最终实现对线路保护未来运行状态的推演。仿真结果证明, 所求解的失效率函数相比传统方法求解的函数具有更高的计算精度, 而动态优化马尔可夫链模型实现了设备老化与检修的动态量化处理。研究状态转移概率计算结果符合设备运行工况, 可以有效预测设备规定投运年限内各时间点的运行状态。该方法对于保护检修策略的优化具有一定的指导意义。

**关键词:** 线路继电保护; 支持向量机; 威布尔分布; 马尔可夫链; 状态预测

## State prediction method of line relay protection device based on the Markov chain with dynamic optimization

LI Tiecheng<sup>1</sup>, LIU Qingquan<sup>1</sup>, REN Jiangbo<sup>2</sup>, ZENG Siming<sup>1</sup>, ZHOU Daming<sup>3</sup>, WANG Zhihua<sup>3</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 3. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

**Abstract:** At present, the relay protection states monitoring models use the static fault probability value to predict the equipment failure rate, which fails to consider the dynamic impact of equipment aging and maintenance, and the prediction results are unreliable. Therefore, a Markov chain state prediction method based on three parameters Weibull distribution dynamic optimization is proposed in this paper. First, the grey model-particle swarm support vector machine algorithm is used to calculate the more accurate failure rate function of relay protection equipment, and then it is used to dynamically modify the transition probability between each operation state in the Markov chain, and finally deduce the future operation state of the line protection. The simulation result shows that, the failure rate function solved in this paper has higher calculation accuracy than the function solved by the traditional method, and the dynamic optimization Markov chain model realizes the dynamic quantitative treatment of equipment aging and maintenance. The calculation results of states transition probabilities accord with the equipment operation conditions, and can effectively predict the operation state at any time within the specified operation life of the equipment. It has certain guiding significance for the optimization of protection maintenance strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

**Key words:** line relay protection; support vector machine; Weibull distribution; Markov chain; state prediction

## 0 引言

随着国家电网“自主可控新一代智能变电站二

次系统”的建设, 线路微机继电保护设备将以“自主可控, 安全可靠, 先进适用, 集约高效”为目标逐步优化其动作状态在线管控能力, 以提高集控站对保护状态的远程集中监控强度与管理细度。当前, 继电保护装置智能化程度正不断提升, 其运行数据呈现海量、高速更新与多源异构的特点<sup>[1-4]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(TSS2020-07)

这为及时准确地感知、预测继电保护运行状态，从而优化装置检修策略提出了难题。据某省公司统计，在某十年期间由线路保护装置电源、CPU、光模块运行状态不良引起的装置失效次数高达 5 000 起<sup>[5]</sup>。在超过 75% 的连锁事故中，继电保护的拒动或误动成为事故扩散的关键原因<sup>[6]</sup>。而传统运维巡检方法工作量大、时效性差，因此提高继电保护状态监测的实时性、加强设备状态预测的可靠性势在必行。

目前，已有诸多学者对继电保护状态的在线监控与智能预测开展了相关研究。文献[7]基于继保全景状态信息逻辑与一致性分析构建了保护在线运检框架。该方法对状态指标的融合分析过于简单。文献[8]基于相邻元件故障概率关联统计分析设计了继保隐藏故障监测算法，文献[9]基于故障树理论实现了对继保故障动作概率的实时预测与缺陷零件的在线诊断，文献[10]利用静态马尔可夫风险转移网络对智能变电站中的继电保护设备进行风险评估。然而上述方法过于依赖对原始数据的经验性总结，方法中的设备故障概率均不具备动态演变的特性。文献[11]利用 RTDS 设计了一套继电保护性能监测平台以检验保护整定值的正确性；文献[12]引入卷积神经网络设计了继保状态信号的可视化平台；文献[13]基于 PSCAD 仿真软件针对大段长电缆护层保护建立了暂态特性监测平台。然而上述平台仅基于保护逻辑分析误动故障，无法监测因软硬件老化引起的设备失效。文献[14]采用组合赋权法，针对智能变电站继电保护进行状态可靠性综合评估，方法中的权重赋值主观性太强，所选隶属度函数评估模式固定，不利于模型在线优化；文献[15]基于图像深度卷积神经网络，从计算机视觉的角度进行继保设备的状态监测，监测角度太过片面；文献[16]利用马尔可夫矩阵设计了继保状态的预测模型，方法未能计及计划性设备检修对装置拒动与误动的动态影响；文献[17]基于状态检修转移矩阵实现对继保装置可靠性的评估，装置的状态划分过于粗糙，且文中对关键状态参数与可靠性的关联分析深度不够，无法指导状态预测；文献[18]为了准确计算继电保护系统状态检修的具体检修周期，方便运维人员安排检修计划，提出了一种基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略；文献[19]基于继电保护功耗特征分析，结合机器学习模型评估设备运行状态，模型参数利用小样本故障数据完成拟合，泛化性能不足，不利于推广应用。继电保护设备的计划性检修将有效提高设备的服役年龄，并且不同程度地降低了保护误动与拒动概率，目前有关继电保护状态预测的模型未能考虑检修的重要作用，仅从历

史统计的角度求解设备误动与拒动概率并保持固定不变<sup>[20]</sup>。

本文在 220 kV 线路继电保护运行状态预测中首次考虑检修对装置误动或拒动概率的影响。首先基于灰色-粒子群优化支持向量机算法构造三参数威布尔分布模型，设计装置失效率函数；随后基于计划检修计算设备虚拟役龄，并用此修正失效率函数；最后在马尔可夫链中与装置失效相关的转移概率内引入时变优化参数，从而构造可以动态优化的马尔可夫状态转移模型。仿真实验显示了可优化马尔可夫模型所求概率的时间演变趋势与设备运行趋势吻合，符合设备工况变化的客观规律，证明了本文所提方法可以有效地应用于线路继电保护的状态预测。

### 1 线路保护状态转移空间设计

220 kV 线路继电保护在正常运行时，受线路故障影响，设备将在动作与不动作状态之间转移，随着运行役龄增加，设备将出现拒动、误动状态与故障自检状态，同时计划检修将更新元件状态，并在一定程度上减少下次拒动或误动概率。线路保护可以根据动作、检修、拒动、误动失效、故障是否可自检将状态划分为 13 类<sup>[16]</sup>，本文进一步将检修划分为紧急检修与计划性检修，计划性检修满足检修周期时会重置保护状态，并在检修后引入时变修正因子优化拒动或误动率，整体结构如图 1 所示。

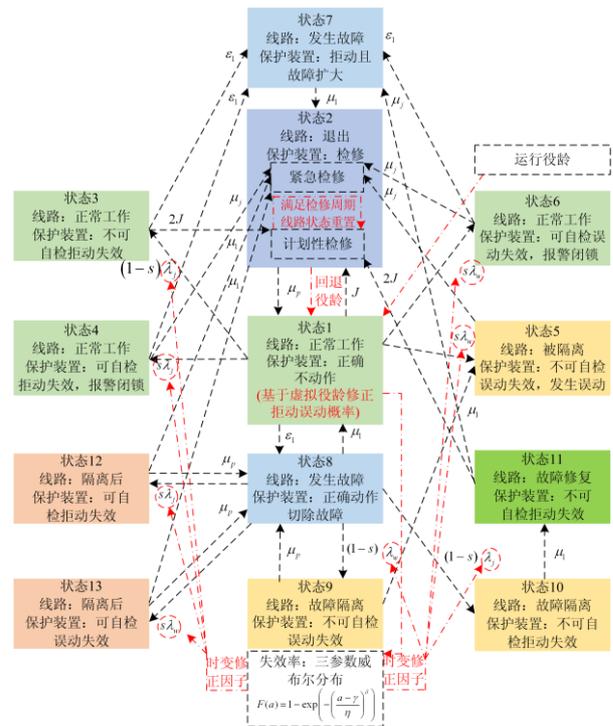


图 1 220 kV 线路保护动作状态空间图

Fig. 1 220 kV line protection states diagram

图中:  $\varepsilon_l$  是线路故障率;  $\mu_p$  是线路保护修复率;  $\mu_j$  是维修人员抵达现场平均时间的倒数;  $\mu_i$  是线路故障修复率;  $\lambda_j$  是保护拒动率;  $\lambda_w$  是保护误动率;  $s$  为保护自检成功率;  $J$  为检修间隔时间的倒数。

在运行过程中, 计划性检修与紧急检修对设备失效率影响不同, 本文引入修复因子, 结合虚拟役龄, 表征二类不同检修对下次故障拒动与误动的影响。

## 2 基于威布尔分布的保护失效率函数设计

### 2.1 三参数威布尔分布函数

继电保护设备在磨合、稳定运行与损耗期间, 其失效率分布函数呈现类似浴盆形状的曲线, 威布尔分布便是一种基于上述浴盆曲线所设计的评估设备可靠度的函数, 而三参数威布尔分布函数相比双参数函数, 其位置参数的设定与投运初期不会失效的实际情况更加匹配<sup>[21]</sup>。三参数威布尔分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\delta\right), & t \geq \gamma \\ 0, & t < \gamma \end{cases} \quad (1)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\delta(t-\gamma)^{\delta-1}}{\eta^\delta} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\delta\right), & t \geq \gamma \\ 0, & t < \gamma \end{cases} \quad (2)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\delta\right), \quad t \geq \gamma \quad (3)$$

式中:  $t$  为设备当前役龄;  $\delta$  为形状参数;  $\eta$  为尺度参数;  $\gamma$  为位置参数。  $\delta$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$  三者均大于零。目前三参数威布尔分布的参数拟合方法包括图估计法、矩估计法与极大似然估计法, 上述方法均需要大量的拟合样本, 而且模型精度欠佳。文献[21]所述纯粹灰色模型法由文献[22]中的对比分析可知, 其对样本数目敏感性较强, 参数值波动较大。回归型支持向量机(Support Vector Regression, SVR)作为机器学习理论中最适用于小样本训练且具备优秀的泛化性能的算法, 常用于求解可线性化处理函数的未知参量<sup>[23]</sup>, 因此, 本文基于灰色模型(Gray Model, GM)首先估计位置参数  $\gamma$ , 将三参数威布尔分布转化为双参数威布尔分布, 进一步做线性化处理, 随后结合粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)优化支持向量机进行形状与尺度参数的求解。

### 2.2 基于灰色模型的保护威布尔分布位置参数求解

威布尔分布函数可根据对数变换转化为式(4)。

$$t = \eta \exp\left(\frac{\ln(-\ln(R(t)))}{\delta}\right) + \gamma \quad (4)$$

进一步, 令  $a = \ln(-\ln(R(t)))$ 、 $l = -1/\delta$ 、 $m = \gamma$ 、 $n = \eta$ , 则有

$$t = ne^{-la} + m \quad (5)$$

式(5)正好与灰色模型 GM(1,1)时间方程<sup>[21]</sup>具有相似的形式, 因此可基于灰色模型对威布尔三参数进行估值, 此外由于样本数目过小, 可采取近似中位秩公式<sup>[24]</sup>估算样品的经验分布函数。灰色模型处理后可以基本固定位置参数  $\gamma$ , 此时令  $s = t - \gamma$ , 即可将三参数威布尔分布函数转化为双参数威布尔分布函数, 如式(6)所示。

$$F(s) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{s}{\eta}\right)^\delta\right), & s \geq 0 \\ 0, & s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 基于粒子群优化支持向量机的保护威布尔分布形状、尺度参数求解

设待求解双参数威布尔分布函数的样本数据的集合为  $s$  并代入式(6), 进一步进行对数变换得到式(7)。

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(s)}\right)\right) = \delta \ln(s) - \delta \ln(\eta) \quad (7)$$

将式(7)进行线性化处理, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} f(s) = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(s)}\right)\right) \\ \phi(s) = \ln(s) \\ w = \delta \\ b = -\delta \ln(\eta) \end{cases} \quad (8)$$

则原方程式转化为具备支持向量机优化函数的结构  $f(s) = w\phi(s) + b$ ,  $f(s)$  为待求解函数,  $\phi(s)$  为对样本数据集进行高维特征映射处理的核函数,  $w$  与  $b$  表示核函数权重与偏置。基于支持向量机的结构性优化原则, 最终构建支持向量机回归函数如式(9)所示<sup>[23]</sup>。

$$f(s) = w\phi(s) + b = \sum_{u=1}^N (\alpha_u - \alpha_u^*) K(s, s_u) + b \quad (9)$$

式中:  $N$  为样本总数;  $\alpha_u$ 、 $\alpha_u^*$  均为拉格朗日乘子;  $s_u$  为样本集合  $s$  中单个双参数威布尔分布函数的样本数据;  $K(s, s_u)$  为核函数, 本文采取径向基函数。而支持向量机中所包含的不敏感损失系数、惩罚系数与宽度系数将极大地影响模型的拟合精度<sup>[23-24]</sup>, 为保证最终模型预测结果准确, 运算过程稳定迅速, 本文引入基于粒子群的全局搜索算法, 从而在支持向量机更新过程中进行上述支持向量机模型参数的寻优。

假设在  $D$  维搜索空间有  $N$  个粒子, 各粒子表示各参数的潜在最优解, 粒子包括位置、速度与适应度三项特征值。单次迭代时, 各粒子通过个体与群体搜索的最优位置更新各自的位置与速度。其更新迭代公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_i^{l+1} = \sigma \mathbf{V}_i^l + c_1 r_1 (\mathbf{P}_i^l - \mathbf{X}_i^l) + c_2 r_2 (\mathbf{Q}_i^l - \mathbf{X}_i^l) \\ \mathbf{X}_i^{l+1} = \mathbf{X}_i^l + \mathbf{V}_i^{l+1} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $l$  为迭代次数;  $\mathbf{V}_i^l$  与  $\mathbf{X}_i^l$  分别为  $D$  维空间中第  $i$  个粒子在第  $l$  次迭代计算后各维度上的移动速度与空间位置;  $\mathbf{P}_i^l$  与  $\mathbf{Q}_i^l$  分别为第  $i$  个粒子在第  $l$  次迭代计算后各维度上的个体与全局最优解;  $\sigma$  为移动速度权重因数;  $c_1, c_2$  为学习因数;  $r_1, r_2$  为随机数, 适应度函数选取均方差函数。

#### 2.4 计及老化与检修的保护威布尔分布失效率函数修正

在状态空间中, 检修分为计划性检修与故障时的紧急检修, 紧急检修后设备状态仅恢复至故障前, 因此不针对状态转移概率进行修正; 而计划性检修根据其检修的完成度, 可利用虚拟役龄  $\tau$  与修复因子  $q$  进行修复情况表征<sup>[25]</sup>, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} \tau_0 = t, 0 < t < T \\ \tau_1 = t - q_1 T, T < t < 2T \\ \vdots \\ \tau_k = t - \sum_{i=1}^k q_i T, kT < t < (k+1)T \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $T$  为计划性检修的周期;  $t$  为保护当前役龄, 每次计划检修等效于将当前役龄回退至虚拟役龄;  $k$  为检修次数。

根据设备的劣化性质, 修复因子  $q$  表现为与检修次数呈负相关的减函数, 紧急检修时  $q$  为 0, 而为了体现修复因子的负相关性, 根据运维经验, 本文设其取值函数如式(12)所示。通过计算虚拟役龄, 结合第 2 节所述的三参数威布尔分布函数, 便可求解设备当前的失效率  $G(t)$ , 如式(13)所示, 并作为时变修正因子动态更改图 1 所示的误动与拒动概率。

$$q_i = q_1 \frac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4} = 0.8 \frac{5k + 3}{6k + 3} \quad (12)$$

$$G(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\delta \left( t - \sum_{i=1}^k q_i T - \gamma \right)^{\delta-1}}{\eta^\delta}, \quad kT < t < (k+1)T \quad (13)$$

### 3 保护动态马尔可夫状态预测模型设计

本文继电保护状态转移过程符合连续时间马尔

可夫链<sup>[16]</sup>, 各状态间转移概率所构成的矩阵如式(14)所示。

$$\mathbf{P}(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & \cdots & p_{1n}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & \cdots & p_{2n}(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & p_{ij}(\Delta t) & \vdots \\ p_{n1}(\Delta t) & p_{n2}(\Delta t) & \cdots & p_{nn}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $p_{ij}(\Delta t)$  指从状态  $i$  的任意时刻经过  $\Delta t$  转移至状态  $j$  的转移概率,  $p_{ij}(\Delta t)$  满足式(15)和式(16)。

$$p_{ij}(\Delta t) \geq 0 \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(\Delta t) = 1 \quad (16)$$

马尔可夫链定义转移速率矩阵  $\mathbf{A}$  为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & q_{ij} & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & -q_{nn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中,  $q_{ij}$  表示从状态  $i$  转移到状态  $j$  的转移速率, 而连续时间马尔可夫链满足柯尔莫哥洛夫向后方程, 如式(18)和式(19)所示, 转移概率矩阵初值为单位矩阵<sup>[16]</sup>, 进一步可求解转移概率矩阵, 如式(20)所示。本文结合威布尔失效率分布函数, 将失效率  $G(t)$  引入  $\mathbf{A}$ , 从而达到动态优化状态转移概率的目的。

$$p'_{ij}(\Delta t) = \sum_{k \neq i} q_{ik} p_{kj}(\Delta t) - q_{ii} p_{ij}(\Delta t) \quad (18)$$

$$\mathbf{P}'(\Delta t) = \mathbf{A} \mathbf{P}(\Delta t) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}(\Delta t) = \exp(\mathbf{A}(\Delta t - \Delta t_0)) \mathbf{P}(\Delta t_0) \quad (20)$$

根据设备状态监测与检修业务, 本文将继电保护设备运行年限上的关键节点分为检修点与监测点(包含检修点), 检修周期为  $T$ , 设检修点间共有  $n$  个监测点, 设  $t_{k,i}$  是第  $k$  与第  $k+1$  个检修点之间的第  $i$  个监测点所处时刻, 则有式(21)所示的计算关系。

$$t_{k,i} = kT + \frac{iT}{n+1}, \quad k=1, 2, \dots, n; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (21)$$

根据式(13)可求解  $t_{k,i}$  时刻设备失效率  $G(t_{k,i})$ , 进一步可利用式(20)求解第  $i$  与第  $i+1$  个监测点之间不同时刻  $t$  的状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}_{t_{k,i}}(t)$ , 如式(22)所示。

$$\mathbf{P}_{t_{k,i}}(t) = \exp(\mathbf{A}_{k,i}(t - t_{k,i})) \mathbf{T}_{t_{k,i}} \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{A}_{k,i}$  为  $G(t_{k,i})$  优化后的转移速率矩阵;  $\mathbf{T}_{t_{k,i}}$  为  $t_{k,i}$  时刻的转移概率初始值矩阵。

由于线路保护经过检修并投运后将恢复到正常状态, 因此设备经第  $k$  个检修点(时间设为  $t_{k,0}$ )后状态 1 的概率为 1, 各状态概率  $\mathbf{S}_{t_{k,0}} = [1, 0, \dots, 0]_{1 \times 13}$ , 则第  $k$  与第  $k+1$  个检修点之间各点状态概率向量如

式(23)和式(24)所示,即每个监测点将更新初始状态概率向量,而监测点*i*与*i+1*之间某时刻 $t_{k,i,j}$ 的状态概率则以其最近的监测点*i*的状态概率为初始值进行计算。最终设备所处状态将基于概率的最大值完成预测,应用时将以各监测点的状态监测值象征监测周期内的设备状态。上述流程如图2所示,其中

$I$ 表示 $13 \times 13$ 单位矩阵,即确定检修与监测点状态后,柯尔莫哥洛夫向后方程以此为起始重新计算,此时转移概率初始值矩阵重新置成单位矩阵。

$$S_{t_{k,i}} = S_{t_{k,j-1}} P_{t_{k,j-1}}(t_{k,i}) \quad (23)$$

$$S_{t_{k,i,j}} = S_{t_{k,i}} P_{t_{k,i}}(t_{k,i,j}) \quad (24)$$

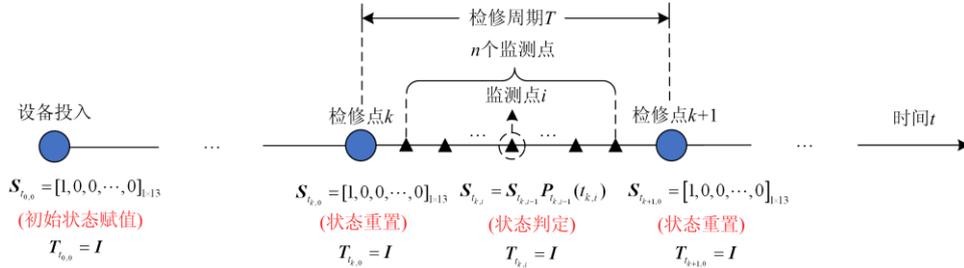


图2 线路保护马尔可夫链状态计算时序图

Fig. 2 Time sequence diagram of Markov chain states calculation for line protection

## 4 算例分析

### 4.1 算例数据与计算参数简况

为验证上文所述基于灰色-粒子群优化支持向量机算法设计的三参数威布尔函数准确性,以及动态优化继保状态马尔可夫链的可行性,本文引用文献[21,26]的统计数据,并结合文献[21]所提出的模型验证本文模型的精确性。数据源自30台某型号线路保护设备的运行数据,运行总耗时为70128h,其中正常运行退出设备21台,故障失效设备9台,由于设备的失效数据稀缺,本文采用基于样条插值的样本扩充算法扩充样本数目至240项。部分失效设备结合平均秩次法所计算的可靠性指标样本数据如表1所示。后文计算的概率值均采用无量纲表示形式,取值为[0,1]。

### 4.2 保护失效率函数求解精度分析

在表1所示的样本数据中,80%的数据基于式(8)线性化处理后用于训练粒子群优化支持向量机模型,20%作为验证威布尔函数精度的测试集。本文所用算法相关参数如表2所示。

基于灰色模型所计算位置参数 $\lambda$ 为17085.6824,基于粒子群优化支持向量机所计算形状参数 $\delta$ 为1.6138,尺度参数 $\eta$ 为86746.0244,为验证求解威布尔函数的精度,分别引入函数曲线图、样本验证图、残差分布图、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE),后两者越小则模型精度越高。指标计算见式(25)、式(26), $y_i$ 与 $\hat{y}_i$ 分别表示样本实际数据与模型预测数据。本文同时引

入灰色模型法、极大似然法、双线性回归法进行对比分析<sup>[21]</sup>,概率权重矩法的参数过于不合理,不再考虑。各对比模型求解的威布尔函数三参数见表3。

表1 继电保护运行数据

Table 1 Relay protection device operation records

| 失效时间/h | 威布尔函数值 $F(t)$ | 可靠度 $R(t)$ | $\ln[-\ln(1-F(t))]$ |
|--------|---------------|------------|---------------------|
| 25 560 | 0.023 0       | 0.977      | -3.760 6            |
| 27 660 | 0.029 9       | 0.970 1    | -3.494 7            |
| 29 760 | 0.041 5       | 0.958 5    | -3.160 9            |
| 31 848 | 0.055 9       | 0.944 1    | -2.855 5            |
| 33 510 | 0.068 1       | 0.931 9    | -2.651 7            |
| 35 010 | 0.078 6       | 0.921 4    | -2.502 7            |
| 36 648 | 0.088 8       | 0.911 2    | -2.375 2            |
| 38 760 | 0.099 3       | 0.900 7    | -2.257 7            |
| 40 860 | 0.108 9       | 0.891 1    | -2.160 2            |
| 43 104 | 0.121 7       | 0.878 3    | -2.042 0            |
| 44 310 | 0.130 8       | 0.869 2    | -1.964 8            |
| 45 660 | 0.142 7       | 0.857 3    | -1.871 0            |
| 46 872 | 0.154 6       | 0.845 4    | -1.784 1            |
| 47 760 | 0.163 9       | 0.836 1    | -1.720 3            |
| 48 810 | 0.176 2       | 0.823 8    | -1.640 7            |
| 49 656 | 0.185 7       | 0.814 3    | -1.582 6            |
| 50 310 | 0.197 3       | 0.802 7    | -1.515 1            |
| 51 210 | 0.211 1       | 0.788 9    | -1.439 2            |
| 51 864 | 0.220 4       | 0.779 6    | -1.390 4            |
| 53 160 | 0.235 2       | 0.764 8    | -1.316 2            |
| 54 360 | 0.245 3       | 0.754 7    | -1.267 8            |
| 55 608 | 0.253 3       | 0.746 7    | -1.230 6            |
| 57 360 | 0.262 7       | 0.737 3    | -1.188 2            |
| 59 010 | 0.272 6       | 0.727 4    | -1.144 8            |
| 60 624 | 0.286 2       | 0.713 8    | -1.087 22           |

表 2 粒子群优化支持向量机算法参数

| 参数     | 值  | 参数            | 值     |
|--------|----|---------------|-------|
| 迭代次数   | 50 | 粒子速度下限        | -5    |
| 粒子数目   | 20 | 粒子加速常数 1、2    | 1.5   |
| 粒子速度上限 | 5  | SVR 损失函数计算门限值 | 0.001 |

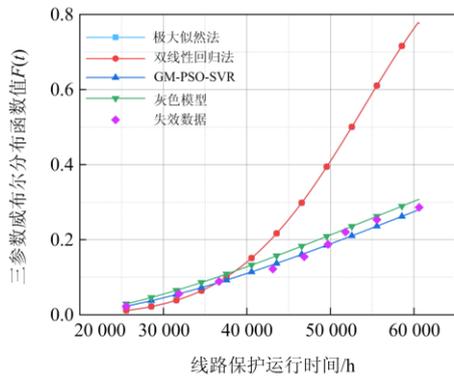
表 3 不同方法求解的威布尔函数参数

| 算法         | 形状参数    | 尺度参数         | 位置参数         |
|------------|---------|--------------|--------------|
| GM-PSO-SVR | 1.613 8 | 86 746.024 4 | 17 085.682 4 |
| 灰色模型法      | 1.542 1 | 83 224.210 0 | 17 087.844 0 |
| 极大似然法      | 5.230 1 | 53 315.400 0 | 2 842.613 0  |
| 双线性回归法     | 5.224 9 | 53 316.74    | 2 842.506 0  |

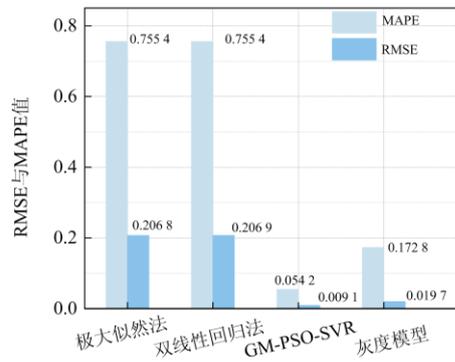
$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (25)$$

$$E_{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{x=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (26)$$

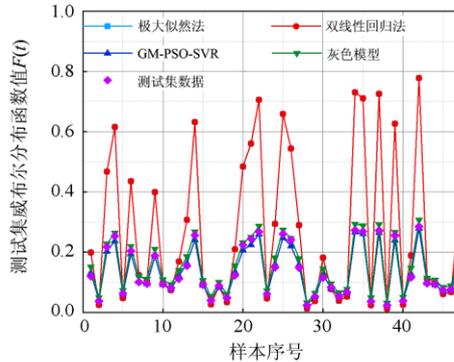
基于上述参数构造的模型其函数曲线如图 3(a)所示, 可见在随运行时间的增加后, 传统的极大似然法与双线性回归法偏差增大, 而灰色模型法与本文所述 GM-PSO-SVR 法更符合实测失效数据, 结合图 3(b)的测试集 RMSE 与 MAPE 对比柱状图以及图 3(c)和图 3(d)的测试集实际预测结果图与残差分布图, 可知相比灰色模型法, 本文方法所求解威布尔函数预测精度更高, 残差分布更小, 性能更优异。



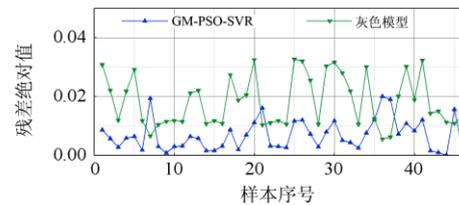
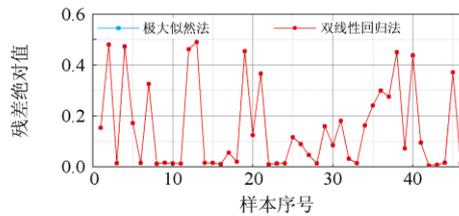
(a) 威布尔分布函数对比图



(b) RMSE与MAPE值对比图



(c) 测试集预测结果对比图



(d) 测试集预测结果残差分布对比图

图 3 不同方法威布尔分布函数计算精度比较

Fig. 3 Comparison of calculation accuracy of Weibull distribution function by different methods

### 4.3 基于动态优化马尔可夫链的保护状态预测分析

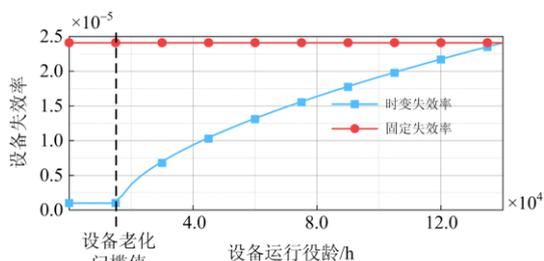
#### 4.3.1 保护失效率函数分析

在连续时间马尔可夫链中, 通常状态转移概率矩阵  $A$  固定不变, 文献[16]基于历史统计数据计算出设备的固定失效率, 即误动与拒动概率, 但固定

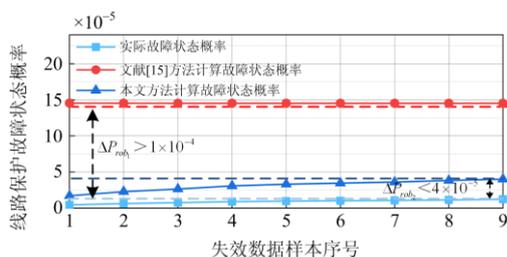
失效率不符合设备老化的失效特性, 未达到老化年限即威布尔函数中的位置参数时, 设备失效率极低, 本文设定为  $1 \times 10^{-6}$ , 经过老化年限后失效率逐步上升, 固定与时变的失效率曲线如图 4(a)所示, 本文将拒动与误动概率分别定为  $G(t)/2$ , 根据图 1 构造

状态转移概率矩阵如式(27)所示, 相关参数定义见 本文第 1 节, 参数取值如表 4 所示。

$$A = \begin{bmatrix} -(J+2G(t)) & J & \frac{(1-s)G(t)}{2} & \frac{sG(t)}{2} & \frac{(1-s)G(t)}{2} & \frac{sG(t)}{2} & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_p & -\mu_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2J & -(2J+\varepsilon_1) & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_j & 0 & -(\mu_j+\varepsilon_1) & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_j & 0 & 0 & -\mu_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_j & 0 & 0 & 0 & -(\mu_j+\varepsilon_1) & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(G(t)+\mu_1) & \frac{(1-s)G(t)}{2} & \frac{(1-s)G(t)}{2} & 0 & \frac{sG(t)}{2} & \frac{sG(t)}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & \mu_p & -(\mu_1+\mu_p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2J & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & -(\varepsilon_1+2J) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_p & 0 & 0 & 0 & -(\mu_1+\mu_p) & 0 \\ 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_p & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_1+\mu_p) \end{bmatrix} \quad (27)$$



(a) 线路保护固定与时变失效率曲线图



(b) 线路保护故障状态概率对比图

图 4 保护失效率对比图

Fig. 4 Comparison chart of protection failure rate

表 4 线路保护状态转移概率矩阵参数

Table 4 Parameters of state transition probability matrix for line protection

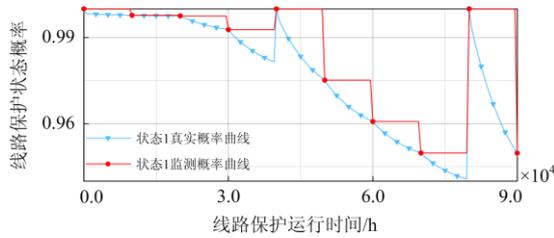
| 参数                      | 值       | 参数                       | 值       |
|-------------------------|---------|--------------------------|---------|
| 线路故障率/h <sup>-1</sup>   | 1/17088 | 保护拒动率/h <sup>-1</sup>    | G(t)/2  |
| 线路保护修复率/h <sup>-1</sup> | 1/24    | 保护误动率/h <sup>-1</sup>    | G(t)/2  |
| 线路故障修复率/h <sup>-1</sup> | 1/8     | 保护自检成功率/%                | 80%     |
| 维修时间倒数/h <sup>-1</sup>  | 1/3.5   | 检修间隔时间倒数/h <sup>-1</sup> | 1/40000 |

由于统计的实际失效数据未考虑检修的修复作用, 因此本文在不考虑检修的情况下, 计算上述模型从投运开始至表 1 失效数据时间点时设备处于故障状态的概率, 失效数据的实际故障状态概率利用式(13)计算, 而由于投运时设备处于状态 1, 状态

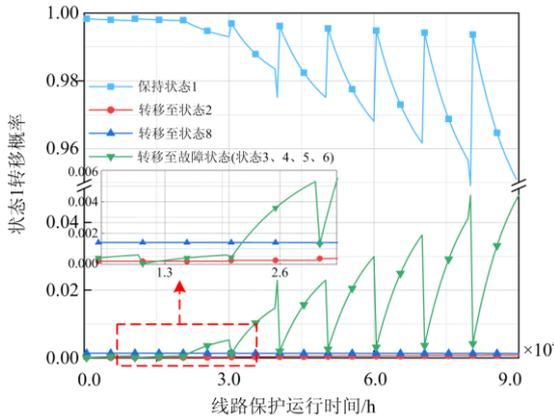
1 可转移故障状态包括状态 3-6, 然而状态 3 不可观测, 因此两种模型的故障状态概率分别由状态 4-6 概率求和所得, 两种模型求解概率对比图如图 4(b) 所示, 可见本文所述模型与文献[14]的方法相比, 实际故障状态概率差值更小。因此, 拒动与误动概率随浴盆曲线失效特性而实时演变为更加复合设备老化的实际情况。

#### 4.3.2 保护状态预测仿真分析

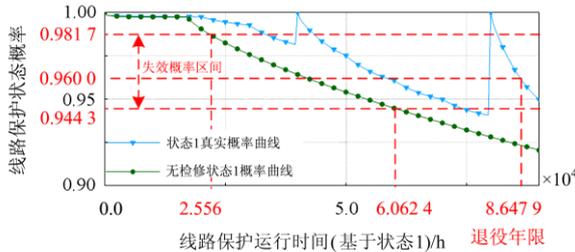
本文设检修周期为  $4 \times 10^4$  h, 监测点间隔为  $10^4$  h, 则设备运行  $9 \times 10^4$  h 后, 仍然保持在状态 1 的概率, 如图 5(a) 所示, 可见各观测点处由于转移速率矩阵的重新计算, 拒动与误动率进一步提高, 致使设备处于正常状态的概率出现明显的下降趋势, 而检修经过检修点时虽然将设备重置为状态 1, 但由于检修程度的不完全性以及随运行年限不断升高的失效率, 设备保持在状态 1 的概率下降速度将明显提升, 最终在  $9 \times 10^4$  h 时设备处于正常不动作的概率下降至 0.949 7, 此外若增加监测点则监测概率可进一步逼近真实概率。图 5(b) 表现了状态 1 维持自身与转移至状态 2、8 以及故障状态的转移概率变化, 由于各监测点将确定设备状态, 而设备维持在状态 1 的概率最高, 因此监测点设备状态计算为状态 1, 转移概率初值将重新置为单位矩阵并用于计算后续时间点的转移概率, 此时保持状态 1 的转移概率曲线出现突增, 相应地转移至故障状态的概率曲线出现突减, 在设备老化之前, 若保护动作, 且动作正常, 无需转移至紧急检修状态 2, 则设备转移至正常切除故障的状态 8 概率最高, 在此段时间内概率变化符合文献[16]所述, 然而随着设备逐步老化, 保护转移至故障状态的概率逐步超过转移至状态 8 与 2 的概率。如图 5(b) 所示。



(a) 线路保护状态1保持概率曲线图



(b) 线路保护状态1转移概率曲线图



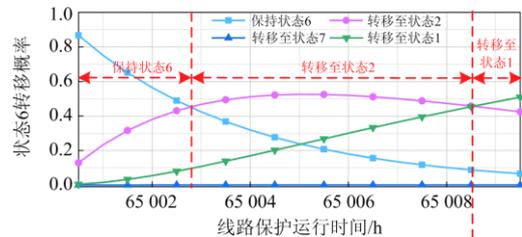
(c) 线路保护状态1退役年限计算图

图5 保护状态1概率与转移概率曲线图  
Fig. 5 Curves of protection state 1 probability and transition probability

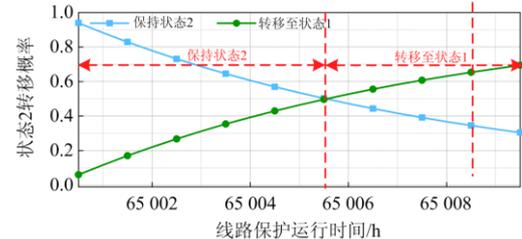
当不考虑检修时，根据表1中起始与最后的失效数据，可计算失效时状态1的维持概率区间为[0.9817, 0.9443]，据此范围可以设定状态1概率的警戒阈值，并可在概率抵达该值时安排突击检修，如图5(c)所示。但由上述描述可知检修只能更新保护至状态1，无法彻底解决因老化带来的失效率提高，因此可据此设计概率退出阈值(如0.96)，即若状态1概率低于某一门限，且已历经2次检修，保护退役，此时设备运行年限约为8.6479年，这时即便安排检修，状态1的概率也会急剧下降至低于退出阈值，符合实际设备运行8~10年的年限要求。

此外，随着失效率的提升，设备从状态1转移至故障状态的概率同样有所提高，假设运行 $6.5 \times 10^4$  h时发生可自检误动失效故障，即设备处于状态6，则保护转移概率仿真计算如图6(a)所示，

由于紧急检修及时，设备在2.7 h内将迅速转移至检修状态，并在8.5 h内转移至正常状态1，此时状态2转移至状态1的概率同样高于保持在状态2的概率，如图6(b)所示，同时由于线路保护故障率 $\varepsilon_1$ 较紧急检修概率 $\mu_1$ 小，因此故障进一步扩大的可能性偏低，即设备由状态6转移至状态2、状态1以及保持状态6的概率远大于转移至状态7的概率。



(a) 线路保护状态6转移概率曲线图



(b) 线路保护状态2转移概率曲线图

图6 保护状态2和状态6转移概率曲线

Fig. 6 Curves of transition probability of protection state 2 and 6

### 5 结论

由于目前220 kV线路继电保护的运行状态预测建模研究中，未能计及设备老化与检修对状态转移概率的影响，本文提出了基于三参数威布尔分布动态优化的保护状态马尔可夫链预测模型。首先利用灰色-粒子群优化支持向量机算法求解了更为准确的三参数威布尔分布函数，并针对不同时间节点进行了保护状态转移概率的修正，使模型可用于预测线路保护未来某时刻处于不同运行状态的概率。仿真结果证明该动态优化马尔可夫链模型的概率计算结果与设备运行趋势吻合，符合设备运行工况演变的客观规律。该方法对保护状态仿真推演以及检修策略的优化具备一定的参考价值。

在下一步的研究工作中，一方面将基于外部220 kV系统的运行工况，不断扩充与细化状态转移矩阵，另一方面将结合不断积累的设备运维数据，优化状态转移概率的修正流程。

### 参考文献

[1] 朱建斌, 李宝伟, 倪传坤, 等. 一种应用于第三代智能变电站主设备就地模块的研究及开发[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 226-234.

- ZHU Jianbin, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Research and development of a local module applied to the main equipment of the third generation intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 226-234.
- [2] 杨胡萍, 黄煌, 何志勤, 等. 基于数据拟合的继电设备失效率调整因子模型[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 96-101.
- YANG Huping, HUANG Huang, HE Zhiqin, et al. Adjustment factor model of relay protection equipment failure rate based on data fitting[J]. Electric Power, 2021, 54(9): 96-101.
- [3] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
- JIANG Yuan, LI Qing, FENG Xi, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [4] LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [5] 薛士敏, 孙文鹏, 高峰, 等. 基于精确隐性故障模型的输电系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1012-1017.
- XUE Shimin, SUN Wenpeng, GAO Feng, et al. Risk assessment of transmission system cascading failure based on accurate hidden failure model[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1012-1017.
- [6] 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.
- [7] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站继电保护在线运检方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 58-65.
- LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 58-65.
- [8] NING Liaoyi. Relay protection hidden fault monitoring and risk analysis based on the power system[C]// Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics, 2020, Cham, Switzerland: 991-997.
- [9] CHEN Qian, ZHANG Lie, GUO Peng, et al. Modeling and analysis of incorrect actions of relay protection systems based on fault trees[J]. IEEE Access, 2020, 8: 114571-114579.
- [10] NAN Dongliang, WANG Weiqing, MAHFOUD R, et al. Risk assessment of smart substation relay protection system based on Markov model and risk transfer network[J]. Energies, 2020, 13(7): 1777-1793.
- [11] CHEN Qian, ZHANG Lie, GUO Peng, et al. Relay protection simulation and testing of online setting value modification based on RTDS[J]. IEEE Access, 2020, 8: 4693-4699.
- [12] 孔祥平, 李鹏, 高磊, 等. 基于深度学习的特高压直流控制保护系统可视化技术[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 29-37.
- KONG Xiangping, LI Peng, GAO Lei, et al. The visualization technology of the UHVDC control and protection system based on deep learning[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 29-37.
- [13] 付松林, 何光华, 徐骏, 等. 大段长高压电缆护层保护器暂态特性分析与参数优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 32-41.
- FU Songlin, HE Guanghua, XU Jun, et al. Transient characteristic analysis and parameter optimization of sheath protector for large-length high voltage cable[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 32-41.
- [14] 孙辉, 张国庆, 高博, 等. 采用组合赋权法的智能变电站继电保护装置状态模糊综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 23-28, 34.
- SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment status in intelligent substations based on combination weighting method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 23-28, 34.
- [15] 吴迪, 汤小兵, 李鹏, 等. 基于深度神经网络的变电站继电保护装置状态监测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 81-85.
- WU Di, TANG Xiaobing, LI Peng, et al. State monitoring technology of substation relay protection device based on deep neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 81-85.
- [16] 李浩, 林湘宁, 喻锟, 等. 基于连续时间马尔可夫链的继电保护装置动作行为预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 121-128.
- LI Hao, LIN Xiangning, YU Kun, et al. Based on continuous time Markov chain prediction model of action

behavior of relay protection device[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 121-128.

[17] 叶远波, 刘宏君, 黄太贵, 等. 变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 170-177.

YE Yuanbo, LIU Hongjun, HUANG Taigui, et al. Research on the reliability analysis method of condition-based maintenance of relay protection equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 170-177.

[18] 叶远波, 谢民, 陈晓东, 等. 基于故障率分析的继电保护系统状态检修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 167-173.

YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. A condition-based maintenance strategy for a relay protection system based on failure probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 167-173.

[19] DAI Hua, SUN Xin, LI Jiyuan, et al. Power consumption-based anomaly detection for relay protection[C] // 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, June 12-14, 2020, Chongqing, China: 1139-1143.

[20] 郑涛, 王方, 金乃正. 双重化继电保护系统确定最佳检修周期新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 67-70, 75.

ZHENG Tao, WANG Fang, JIN Naizheng. A novel algorithm of determining the optimal routine test interval of the dual-redundant relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 67-70, 75.

[21] 王嘉琦, 徐岩, 彭雅楠, 等. 基于灰色-三参数威布尔分布模型的继电保护装置可靠性参数估计[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1354-1360.

WANG Jiaqi, XU Yan, PENG Yanan, et al. Estimation of reliability parameters of protective relays based on grey-three-parameter Weibull distribution model[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1354-1360.

[22] 郝晓乐, 雷晓波, 雷蒂远, 等. 三参数威布尔分布参数估算方法对比研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(2): 1-4.

HAO Xiaole, LEI Xiaobo, LEI Diyuan, et al. Comparative study on parameter estimation of three parameter Weibull distribution[J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(2): 1-4.

[23] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

[24] 李梦涵, 赵学文, 李建琦, 等. 基于VMD-SVM的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 1-8.

LI Menghan, ZHAO Xuewen, LI Jianqi, et al. Fault line selection method for small current grounding system based on VMD-SVM[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 1-8.

[25] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉, 等. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.

DEN Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu, et al. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74.

[26] 徐岩, 白静, 戴志辉. 一种基于威布尔分布的继电保护装置可靠性分析的新方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 15-19.

XU Yan, BAI Jing, DAI Zhihui. A new method for protective relay reliability analysis based on Weibull distribution[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2012, 39(4): 15-19.

收稿日期: 2021-07-17; 修回日期: 2021-10-15

作者简介:

李铁成(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划研究与管理; E-mail: my8611@163.com

周达明(1997—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为继电保护控制技术。E-mail: m201971533@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)