DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190217

输电线路主成分状态量风险信息熵的检修计划研究

齐山成[1]，史志鸿[2]，马临超[1]，宋祺鹏[3]

(1. 河南工学院，河南 新乡 453003；2. 许继集团有限公司，河南 许昌 461000；2. 中国电力科学研究院，北京 100192)

摘要：准确、高效的输电线路状态评估是开展智能化维护的关键。在大量收集输电线路多时段或全时段的检修数据的基础上，利用风险评估方法，建立风险信息熵评估模型，以准确评估线路状态和确定线路单元检修策略。通过分析状态量主成分，根据主成分占比求取分值并排序，建立具备差异化特征的输电线路主成分状态量评价体系，以提高检修效率。结合层次分析法、主成分分析法及风险信息熵，以最小偏差为最优权重目标函数，确定各状态量风险的优先级，优化检修目标。通过应用于中部省份某 500 kV 输电线路的状态检修，验证了该模型合理、可行。

关键词：输电线路；状态检修；检修策略；状态量；信息熵

Study of maintenance schedule for the risk information entropy of principle component state of transmission line

QI Shancheng[1], SHI Zhihong[2], MA Linchao[1], SONG Qipeng[3]

(1. Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The accurate and efficient assessment of the transmission lines state is the key to carry out the intelligent maintenance. In this paper, based on a large collection of multiple period or full-time maintenance data of transmission line, the model of risk information entropy is established by using the risk assessment method to assess the transmission line state accurately, and the maintenance strategy for line unit is determined. After the state of the principle component is analyzed, the scores are calculated according to the proportion of main component and sorted correspondingly, and then the evaluation system with differentiation characteristics for the principle component state of transmission line is established to improve the efficiency of maintenance. The analytic hierarchy process, principal component analysis and risk information entropy are combined and the objective function of optimal weight with minimum deviation is adopted to determine the priority of the risk of each state and optimize the maintenance target. Through the application in the state maintenance of a 500 kV transmission line in a central province, it shows that the model is reasonable and feasible.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800) and Scientific and Technological Projects of Henan Province (No. 182102210258).

Key words: transmission line; state maintenance; maintenance strategy; status; information entropy

0 引言

输电线路是电力系统的重要组成部分，承担着输电和联络的重任，对电力安全稳定有着重要影响[1-2]，但由于高压线路输送距离远、运行环境复杂，导致影响输电线路容易存在安全隐患[3-5]。能否准确、高效地评估输电线路运行状态，是合理制定状态检修策略的重要影响因素[6-7]，也是开展智能化维护的关键技术[8-9]。

为此，众多学者开展了相关研究工作，并取得了显著成效。文献[10]在分析故障风险差异的基础上，提出了输电线路的评价方法及指标，以实现风险管控。文献[11]将ε约束-花授粉算法应用于输电线路年检修计划，以解决高维、非线性的多目标优化问题。文献[12]分析了输电线路运行状态的内、外影响因素，采取马尔科夫链对运行状态进行预测，建立综合风险指标，实现线路运行的风险评估。文献[13-15]分析了各地输电线路所采取的状态检修新技术、新体系，为推动状态检修纵深发展积累了宝

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800)；河南省科技攻关项目资助(182102210258)

贵经验。

输电线路开展状态检修是智能电网的重要技术，随着越来越多的新技术、新设备应用于线路监测[16-17]，一方面可以实时、全方位地监测线路状态；另一方面，海量、多类别的线路数据为运行人员准确、高效的判断带来困扰。因此，准确、高效地评估输电线路状态是开展智能化维护的关键。本文在大量、广泛收集输电线路检修数据基础上，首先，结合风险评估方法，建立输电线路风险信息熵评估模型，通过计算线路单元的风险信息熵，准确评估输电线路风险情况，确定线路单元检修策略；其次，对各个状态量进行主成分分析，根据各个状态量综合得分情况，提取输电线路的状态量主成分，建立状态检修的主要状态量体系，降低计算维度，提高检修效率；然后，在计算主成分状态量风险信息熵的基础上，结合层次分析法、主成分分析法，以最小偏差为目标函数，求解各个风险的最优排序，为优化状态检修目标、制定合理检修计划提供理论依据。

1　检修计划优化流程

现行的导则将输电线路分为基础、杆塔、导地线、绝缘子串、金具、接地装置、附属设施和通道环境 8 个线路单元及若干状态量。输电线路的状态检修以运行、检修、试验等数据为输入量评价线路单元，结合资产的损失程度评价输电线路的风险，确定风险等级，安排设备状态检修顺序[18-20]。这种流程主要依据输电线路某一时刻的风险等级，但未计及输电线路在运行中的风险变化。因此，无法综合考虑风险变化量及风险现状对检修计划的影响。

随着状态检修技术的发展、实时监测设备的广泛应用，为准确、全面地评估线路风险状态提供了可能。因此，为制定合理的检修计划，需要广泛收集状态量信息，进行对线路单元和状态量风险变化进行量化计算，具体流程图如图 1 所示，具体步骤如下：

(1) 收集各种状态量信息，包含微气象、杆塔倾斜等实时数据，日常试验、检修数据，以及历史数据，建立多时段或全时段的状态量数据库。

(2) 在计算线路单元信息熵的基础上，判断风险信息熵是否高于阀值。若线路单元风险信息熵低于阀值，说明线路不存在异常或严重状态；若线路单元风险信息熵高于阀值，则说明线路存在异常或严重状态。

(3) 当线路处于异常或严重状态时，往往可能存在多个状态量风险较大，或者多个状态量风险上升较快，为了提高检修效率，采用主成分分析法对状态量的数据进行降维，在此基础上以综合评价分数排序为依据，设定置信区间，从高向低选择主成分状态量。

(4) 以数据库数据为依据，计算主成分状态量的风险信息熵，风险信息熵越大，风险或者潜在风险越大。因此，按照风险信息熵大小，同时，结合层次分析法、主成分分析法建立以最小偏差为目标的函数，从而确定状态量检修优先度，优化状态检修目标。

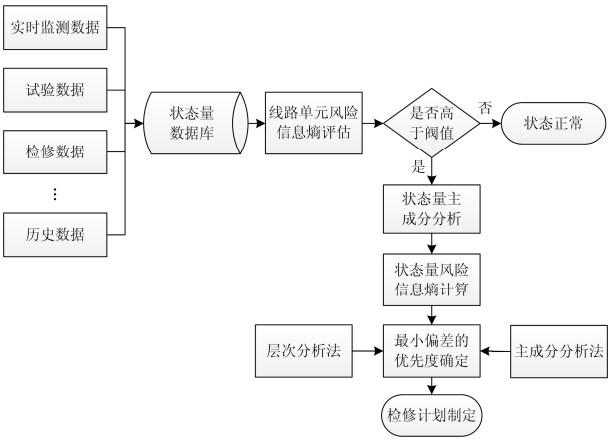

图 1　主成分状态量风险信息熵的检修计划优化流程

Fig. 1 Flow chart of maintenance schedule for the risk information entropy of principle component status

2　风险信息熵模型

2.1 风险信息熵原理

为了深度挖掘输电线路在运行过程中参数变化所包含的信息[21]，首先评估设备风险，若对线路单元或输电线路进行 n 次状态评估，第 i 次评估对应的时刻为 t_i，设备状态值为 ISE_i，则该时刻单一故障设备的风险为

$$R(t_i)=A(t_i)\times F(t_i)\times P(t_i)=A(t_i)\times F(t_i)\times K\times e^{-C\times ISE_i} \tag{1}$$

式中：K、C 分别为比例系数、曲率系数，需根据本地区的设备部件状态和故障发生概率进行统计；$A(t_i)$、$F(t_i)$、$P(t_i)$分别为 t_i 时刻对应的资产、某一故障的资产损失程度及故障发生概率。

考虑设备故障率随时间变化，令

$$p_i=\frac{R(t_i)}{\sum_{i=1}^{n}R(t_i)} \tag{2}$$

则风险信息熵计算公式为

$$E(S)=-\sum_{i=1}^{n}p_i\log_2 p_i=-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{R(t_i)}{\sum R(t_i)}\log_2\frac{R(t_i)}{\sum R(t_i)}\right) \tag{3}$$

2.2 风险信息熵阀值的确定

为了衡量风险重要程度，需要设定信息熵的变化阀值，以提醒运行维护人员。考虑设备不同时刻的状态评估，确定设备风险变化区间，可将设备风险变化临界值所对应的风险信息熵之差作为阀值。因此，设风险临界值为 R_1、R_2，则风险信息熵的阀值为

$$\Delta E(S)=\left|\frac{R_1}{R_1+R_2}\log_2\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)-\frac{R_2}{R_1+R_2}\log_2\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)\right| \tag{4}$$

基础、杆塔、导地线、绝缘子的 R_1 通常取值为 14~16，R_2 通常取值为 30，风险信息熵的阀值可取为 0.163~0.174。金具、附属设备的 R_1 通常取值为 24，R_2 通常取值为 30，风险信息熵的阀值可取为 0.116。

3　主成分状态量的评价体系构建

由于输电线路故障风险存在特征差异，特别是输送距离较远的超高压、特高压线路，由于受气象、地形等因素影响，故障风险类型、频率存在差异。同时，随着状态检修技术的进步、新设备新技术的应用，状态量的冗余度越来越高。因此，若在状态评价过程中采用冗余的状态量，会大大降低检修效率。针对此情况，可根据历年巡视情况，对输电线路状态量分值进行挖掘，提取状态量主成分，降低评价维度，并形成具备区域特征的输电线路状态量主成分体系。主成分状态量的评价体系构建步骤如下：

(1) 根据历年故障、缺陷统计，建立每个线路单元状态量的多维矩阵。

$$\boldsymbol{X}_n=[X_{ij.n}] \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{X}_n$ 为第 n 个线路单元；$X_{ij.n}$ 为第 n 个线路单元第 i 个状态量第 j 年的故障、缺陷评分情况。

(2) 对第 n 个线路单元的多维矩阵 $\boldsymbol{X}_n$ 进行标准化后，得到标准化矩阵。

$$\boldsymbol{Y}_n=[Y_{ij.n}] \tag{6}$$

式中，

$$Y_{ij.n}=\frac{X_{ij.n}-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}X_{j.n}}{\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{ij.n}-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}X_{j.n}\right)^2}} \tag{7}$$

(3) 计算第 n 个线路单元的相关系数矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{Y}_n^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{Y}_n \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{Y}_n^{\mathrm{T}}$ 为第 n 个线路单元的标准化矩阵 $\boldsymbol{Y}_n$ 的转置矩阵。

(4) 求相关系数矩阵的特征根 λ 及特征向量 α，若特征根的个数为 p，则线路单元综合因子为

$$\alpha_n=\sum_{i=1}^{p}\alpha_{i.n}Y_{i.n} \tag{9}$$

(5) 利用综合成分对线路单元的状态量进行排序，设置置信区间，选取状态量主成分。

4　基于最小偏差的组合权重的优先度排序

由于输电线路检修计划的制定为多属性决策问题，需采取主客观相结合的方法确定各个主成分状态量的权重，即主成分状态量的优先度。因此，一要结合运行人员的经验，二要考虑输电线路的客观数据所包含的信息。

设有 n 个线路单元，其中某个线路单元有 m 个主成分状态量，共采用 s 种方法对主成分状态量进行排序，则主成分状态量的优先度向量为

$$\mu_k=(\mu_{k1},\mu_{k2},\mu_{k3},\cdots,\mu_{km})^{\mathrm{T}},\ k=1,2,3,\cdots,s \tag{10}$$

其中，$\sum_{i=1}^{m}\mu_{ki}=1$。

若最优状态量优先度向量为 $\boldsymbol{w}=(w_1、w_2、w_3,\cdots,w_m)^{\mathrm{T}}$，应以最优优先度向量与各种权重排序方法的总偏差最小为目标。因此，检修计划的优化目标函数为

$$\begin{cases}\min F=\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{m}(\alpha_k\mu_{ki}-\alpha_j\mu_{ij})^2\\ \sum_{t=1}^{s}\alpha_t=1\end{cases} \tag{11}$$

构造拉格朗日函数 $L(\alpha,\lambda)$，求偏导得：

$$\begin{aligned}\frac{\partial L(\alpha,\lambda)}{\partial\alpha_k}=&\sum_{i=1}^{m}[(\alpha_k\mu_{ki}-\alpha_1\mu_{1i})+\cdots+(\alpha_s\mu_{si}-\alpha_s\mu_{si})]\mu_{ki}+\\ &\frac{\lambda}{2}=s\alpha_k\sum_{i=1}^{m}\mu_{ki}^2-\alpha_1\sum_{i=1}^{m}\mu_{1i}\mu_{ki}+\alpha_2\sum_{i=1}^{m}\mu_{2i}\mu_{ki}-\\ &\alpha_s\sum_{i=1}^{m}\mu_{si}\mu_{ki}+\frac{\lambda}{2}=0\end{aligned} \tag{12}$$

$$\frac{\partial L(\alpha,\lambda)}{\partial\lambda}=\sum_{t=1}^{s}\alpha_t-1=0 \tag{13}$$

为了降低计算复杂度，在求解优化检修计划目标时，主观采用层次分析法，权重采用导则要求值；客观采用风险信息熵、主成分分析法，主成分分析法的权重计算公式为

$$w_{j.zcf}=\frac{\alpha_j}{\sum_{i=1}^{m}\alpha_j} \tag{14}$$

风险信息熵法的权重计算公式为

$$w_{j.xxs}=\frac{1-E_j(s)}{m-\sum_{i=1}^{m}E_j(s)} \tag{15}$$

将式(14)、式(15)的求解结果代入式(11)，即可求解出检修计划的优化目标函数，从而得到检修计划的优先度。

5　应用实例

以中部省份 500 kV YX 线为例，该线路承载着西电东送的重要作用，也是西电打捆东送的主要走廊，对电网安全稳定性影响较大。该线路采用紧凑型同塔双回路输电技术，路径大部分为易舞动区。因此，在冬季受低温大风天气影响，易发生导线舞动现象，威胁电网安全运行。

为保证线路正常运行，及时发现安全隐患，2017 年第 1 季度进行了 5 次状态检修，限于篇幅，仅列举导地线和绝缘子两个线路单元的状态量，5 次检修状态量扣分情况如表 1 所示。

表 1　状态量检修情况表

Table 1 Maintenance status

线路单元	状态量	状态量检修扣分值				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
绝缘子	绝缘子铁帽、钢脚锈蚀情况	1.9	1	2.9	0.5	2.9
	复合绝缘子端部连接情况	3.8	0	0	0.5	2.4
	复合绝缘子芯棒护套和伞裙损伤情况	1.4	0	0	0.5	1
	锁紧销缺损情况	2.4	1	0	0.5	1.9
	绝缘子积污情况	0.5	0	3.3	1.4	0
	瓷绝缘子零值和玻璃绝缘子自爆情况	0	0	0	1	0.5
	复合绝缘子憎水性	2.4	0	0	1	2.9
	招弧角及均压环损坏情况	5.7	0	3.8	0.5	1.9
	绝缘子串倾斜情况	0	0.5	1.4	0	0
	瓷绝缘子釉面破损情况	0	1.4	0.5	1	0
导地线	腐蚀、断股、损伤和闪络烧伤情况	2.4	0.5	1.4	0.5	2.9
	异物悬挂情况	2.4	1	0	1	3.3
	异常振动、舞动、覆冰情况	2.9	0	0.5	0.5	1
	弧垂	0	1	0	0.5	0.5
	跳线情况	0	0	0	0.5	1
	OPGW 及其附件情况	0	0	1	0	0

第 4 次状态检修扣分分别为 6.9、3，第 5 次状态检修结果，则绝缘子和导地线的状态量扣分分别为 13.5、8.5。若单独评价这两次检修，属于正常状态；若综合考虑两次检修数据变化情况，存在状态量扣分变化幅度较大情况，应该引起运行人员注意。

资产评价 $A(t)$取 8.65，某一故障的资产损失程度 $F(t)$取 5.37，比例系数 K 取 13.9，曲率系数 C 取 0.043。若根据第 5 次检修结果，计算绝缘子、导地线检修前后的风险信息熵分别为 0.185、0.179。因此，绝缘子及导地线均高于风险信息熵阀值。为了优化检修目标，合理安排检修顺序，需要对各个状态量进行排序，根据表 1 建立状态量评分矩阵，进行标准化后，抽取特征值大于 1 的主成分，形成矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0.893 & 0.528 & 0.336\\
1.001 & -0.091 & -0.967\\
-0.320 & -0.451 & -0.600\\
0.179 & 1.107 & -0.683\\
-0.317 & -1.037 & 3.001\\
-0.910 & -0.183 & 0.610\\
0.785 & 0.477 & 0.106\\
2.080 & -1.513 & 0.470\\
-1.047 & -0.863 & -0.789\\
-1.284 & 1.458 & 1.042\\
0.888 & 0.312 & -0.317\\
0.792 & 1.922 & 0.155\\
0.219 & -0.656 & -0.510\\
-1.143 & -0.747 & -0.316\\
-0.777 & -0.396 & -0.502\\
-1.039 & -1.360 & -1.035
\end{bmatrix}$$

三个主成分分别为方差的 34.85%、23.37%、20.73%。根据方差占比，求得综合得分向量 F=[0.638 0.161 –0.432 0.227 0.341 –0.296 0.516 0.593 –0.925 0.139 0.401 0.959 –0.231 –0.366 –0.592 –1.133]。

将综合得分为负的状态量进行排除，利用层次分析法、主成分分析法、风险信息熵法计算优先度并排序，结果如表 2 所示。

以绝缘子铁帽、钢脚锈蚀情况和异物悬挂这两个状态量指标为例，虽然根据第 5 次检修结果，前者的扣分值比后者的少，但前者在 5 次检修中均有扣分情况，且第 5 次相较第 4 次扣了 2.5 分；后者的扣分情况波动幅度不如前者，所以采用主成分状

态量风险信息熵的排序结果更加合理。

表 2 主成分状态量综合排序表

Table 2 Sort table of the principle component status

状态量	权重			优先度	综合排序
	层次分析法	主成分法	风险信息熵		
绝缘子铁帽、钢脚锈蚀情况	0.125	0.161	0.158	0.187	1
复合绝缘子端部连接情况	0.125	0.041	0.086	0.092	8
锁紧销缺损情况	0.125	0.057	0.094	0.099	5
绝缘子积污情况	0.125	0.086	0.097	0.080	9
复合绝缘子憎水性	0.094	0.130	0.112	0.112	4
招弧角及均压环损坏情况	0.094	0.149	0.114	0.098	6
瓷绝缘子釉面破损情况	0.063	0.035	0.065	0.096	7
腐蚀、断股、损伤和闪络烧伤情况	0.125	0.101	0.011 4	0.116	3
异物悬挂情况	0.125	0.241	0.162	0.120	2

6 结论

随着输电线路状态检修的深入开展以及新技术的应用，状态量的种类及信息量越来越多，为开展输电线路智能化检修打下了基础，同时，对运行检修增加了难度。因此，高效、准确的评估线路状态尤为重要。本文以多阶段、多种类的状态量数据为基础，采用建立风险信息熵模型，对线路单元状态进行评估，从而制定整体检修策略；当线路存在异常或者严重状态时，采用主成分分析法提取主成分状态量，并分别计算主成分状态量风险信息熵，根据风险信息熵的大小，同时结合层次分析法、主成分分析法，以最小方差最小为目标，求解以得到主成分状态量的风险优先度，从而明确、优化检修计划目标。通过实证，为输电线路有效挖掘事故风险、合理制定检修计划提供理论依据。

参考文献

[1] XIONG X F, WENG S J, WANG J. An online early-warning method for wind swing discharge of the conductor toward the tangent tower and jumper toward the strain tower[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 114-121.

[2] 解超, 李凤婷, 王彦鹏, 等. 基于高频信号的输电线路主动式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 6-12.
XIE Chao, LI Fengting, WANG Yanpeng, et al. An active protection of transmission line based on high-frequency signal[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 6-12.

[3] 梁振峰, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用自由振荡频率识别的三相重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 124-130.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 124-130.

[4] 杜婉琳, 梁远升, 王钢. 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 59-66.
DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang. Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 59-66.

[5] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.

[6] 商立群, 梁文丽. 高压直流输电线路故障定位综述[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 1-6.
SHANG Liqun, LIANG Wenli. Review of high voltage DC transmission lines fault location[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 1-6.

[7] QUINTERO J, ZHANG H, CHAKHCHOUKH Y, et al. Next generation transmission expansion planning framework: models, tools, and educational opportunities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1911-1918.

[8] 邵文权, 章霄微, 宋江喜, 等. 特高压交流输电线路单相重合闸无故障识别电压电流组合判据[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 546-554.
SHAO Wenquan, ZHANG Xiaowei, SONG Jiangxi, et al. Non-fault identification voltage and current based integrated criterion for single-phase reclosure on UHVAC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 546-554.

[9] 杜婉琳, 梁远升, 王钢. 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 59-66.
DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang. Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 59-66.

[10] 王建, 熊小伏, 梁永, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016,

36(5): 1252-1259.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LIANG Yong, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment: method and indexes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1252-1259.

[11] 赵立进, 黄良, 吕黔苏, 等. 基于ε约束花授粉算法的输电线路年检修计划多目标优化算法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 162-168.
ZHAO Lijin, HUANG Liang, LÜ Qiansu, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment: method and indexes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 162-168.

[12] 蒋乐, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于马尔可夫链模型的输电线路运行状态及其风险评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 51-57.
JIANG Le, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Running state and its risk evaluation of transmission line based on Markov chain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 51-57.

[13] 谢传胜, 张蕾, 贾晓希. 基于层次分析法的塞北地区500 kV输电线路状态评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 189-192.
XIE Chuansheng, ZHANG Lei, JIA Xiaoxi. State evaluation of 500 kV transmission lines of Northern region based on analytic Hierarchy process[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 189-192.

[14] 赵亮, 安光辉, 张建军. 唐山电网输电线路状态检修研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(3): 16-19.
ZHAO Liang, AN Guanghui, ZHANG Jianjun. Research on state maintenance of transmission line of Tangshan power grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(3): 16-19.

[15] 王峰, 雷红才, 彭详, 等. 基于不停电检测的架空输电线路状态检修优化[J]. 中国电力, 2016, 49(10): 84-89.
WANG Feng, LEI Hongcai, PENG Xiang, et al. Evaluation on time-domain simulation software applied to mid-and-long term voltage stability study[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 84-89.

[16] 王少华, 胡文堂, 梅冰笑, 等. 浙江电网输变电设备智能化及状态检修体系[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 8-12.
WANG Shaohua, HU Wentang, MEI Bingxiao, et al. Intelligentization and condition-based maintenance system of transmission and distribution equips in Zhejiang Electric Power Network[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 8-12.

[17] 王振华, 黄宵宁, 梁焜, 等. 基于四旋翼无人机的输电线路巡检系统研究[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 59-62.
WANG Zhenhua, HUANG Xiaoning, LIANG Kun, et al. Study on the transmission line inspection system based on Quadrotor UAVs[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 84-89.

[18] 架空输电线路状态评价导则: Q/GDW 1173—2014[S].
Guide for evaluation of overhead transmission line: Q/GDW 1173—2014[S].

[19] 王少华, 叶自强, 梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 84-90.
WANG Shaohua, YE Ziqiang, MEI Bingxiao. Application status of online monitoring and live detection technologies of transmission and distribution equipment in electric network[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 84-90.

[20] 南方电网公司. 输变电设备状态评价标准: Q/CSG 10010—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
China Southern Power Grid. Standard for condition evaluation of power transmission equipment: Q/CSG 10010—2004[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[21] 李响, 胡天彤, 牛赛, 等. 一流配电网全寿命周期评价体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 80-85.
LI Xiang, HU Tiantong, NIU Sai, et al. Research of the assessment system for the life-cycle of first-class distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 80-85.

收稿日期：2019-03-01；　修回日期：2019-05-08

作者简介：

齐山成(1982—)，男，硕士，讲师，主要从事输变电设备状态检修工作；E-mail: qishancheng@163.com

史志鸿(1967—)，男，高工，主要从事电力系统智能电网研究工作；

马临超(1981—)，硕士，讲师，主要从事电力系统及智能电网、新能源技术方面的研究。

(编辑　张爱琴)