



# 电网发展诊断的改进模糊评价模型与评级

艾欣<sup>1</sup>, 胡寰宇<sup>1</sup>, 任大鹏<sup>1</sup>, 彭冬<sup>2</sup>, 刘汇川<sup>3</sup>, 薛雅玮<sup>2</sup>, 张天琪<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;  
3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 随着“电网新基建”方针的确立及加速推进, 现代电网已日趋复杂化, 影响电网规划及发展的指标及内外部因素众多, 准确评估和评级电网的发展状态将有助于把握其发展规律。因此, 结合现有的指标, 综合内外部影响因素, 提出了电网发展诊断的改进模糊评价模型并开展电网评级研究。首先分析并归纳电网发展各方面的重要指标参数, 然后构建动态评价指标体系, 并应用隶属度函数法及聚类分析法挖掘其关于各状态的趋势特征, 最后应用隐马尔可夫模型进行综合评级。应用电网实际数据进行了算例分析, 表明评级结果符合实际, 有助于把握电网发展的动态规律。

**关键词:** 电网新基建; 电网发展诊断; 动态评级; 模糊综合评价; 隐马尔可夫模型; 主成分分析

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202004115

## 0 引言

随着建立坚强智能电网、打造全球能源互联网, 推进电网新型基础设施建设等宏观发展方针的提出<sup>[1]</sup>, 电网在中国创新发展的历程中定位日趋重要。随着人工智能等新兴技术的成熟、各类型新能源渗透率的提高, 电网内部特性变得愈发复杂, 局部特征难以捕捉, 整体状态难以定论, 通过评价手段合理衡量电网发展状态以指导未来发展愈发关键。评价电网发展同经济、社会发展息息相关, 利用丰富的相关数据<sup>[2]</sup>完成对电网发展状态的科学评价, 不仅能掌握电网的宏观发展规律, 寻找电网未来发展的内在驱动力, 而且能针对发展的局部薄弱环节, 提出针对性建议。因此, 研究适应当前发展节奏下的综合评价方法十分必要。

电网发展诊断正逐步受到电网公司及科研单位的重视, 已开展相关研究, 但仍比较少。目前, 面向小范围电网或局部特征的综合评价应用已较广泛, 但尚未形成一套完整的电网发展诊断

评价体系。文献 [3] 由技术和经营层面构建了地区电网发展水平诊断指标体系, 并运用比较分析法进行诊断评判。文献 [4-5] 分别由宏观的电网内外部及微观的经济、社会、环境等方面, 构建了早期地市级电网的发展水平评价体系。文献 [6] 建立了更加细致的内部指标划分, 包含协调调度、发电水平、用电水平, 甚至从公司经营视角提出电力发展潜力, 构建了电网发展水平三级评价体系。构造全方位且兼顾点面的评价指标体系对电网发展诊断问题十分关键<sup>[7-8]</sup>。关于评价方法在电力系统中的研究, 已经具有充足的工作<sup>[9]</sup>, 文献 [10-11] 分别采用了 Delphi、改进 G1、均衡主成分等方法针对不同的电网评价场景处理指标的主、客观权重。与上述方法相似的还有利用层次分析法<sup>[12]</sup>评估新能源接入省级电网效率效益, 灰色关联度法<sup>[13]</sup>对项目安全后评价, 或组合其他算法以在评价过程中考虑不确定因素的影响<sup>[14]</sup>, 上述工作都属于静态综合评价, 研究重点在于指标权重的确定。而对电网发展的研究需体现时间性, 属动态评价范畴。动态评价在静态评价的基础上发展而来, 时间权重的确立也是另一重点<sup>[15]</sup>。文献 [16-17] 完成了对各时间截面下的评价分析, 但未综合考虑全时序下的整体分析结果, 其中, 文献 [16] 从低碳角度构建电网建设规划模型, 文

**收稿日期:** 2020-04-15; **修回日期:** 2021-06-08。

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目 (基于数据驱动的电网发展智能诊断分析与综合决策技术研究, 5102-201956310A-0-0-00)。



献[17]由多算子层次模型优化评价结果。关于时间权重确立,文献[5]在前述评价基础上研究了基于信息熵的时间权重,完善了考虑发展动态的评价环节。文献[6]对省级电力发展水平进行了横向和纵向截面的量化比较,但在指标确定及体系构建上仅考虑不同对象的“求同”,未考虑到“存异”,结果具有局限性。

总结发现,电网发展诊断的指标体系建立将与评价方法相互影响。关于评价体系,现有研究已经考虑其多角度、全面性的特性,但指标动态增减对评价体系的影响总被忽略。电网新基建发展方针的推进将促使电网数字化形态升级,反映电网发展状态的指标应不断增加,故其未能考虑各年指标增减的影响。在综合评价方法上,静态评价问题的权重计算已有诸多研究,大量文献研究尝试对主、客观权重的合理确定,并提出创新的结合方法,以极大削减不确定因素对评价结果造成的影响。实际上,在静态评价比较各地市综合评价的过程中,通过优化权重的手段仅能修正评价目标的分值排序,并未获得直观的优劣结果。如评价结果中 $A=91$ 分高于 $B=89$ 分,仅能获得排序,无法获知其实际优劣状态。

鉴于此,本文延续传统综合评价的框架,对电网发展诊断的问题进行了研究。首先建立比较完备的动态评价指标体系,构建三层级体系结构以克服电网成长过程中造成的指标增减影响。其次,利用主成分法融合三级指标;然后通过分析二级指标集合,构建合适的隶属度函数,表达其关于各状态的趋势程度,并利用聚类分析方法获取其趋近类型;进而通过隐马尔可夫模型挖掘不同时刻下趋势类型背后的实际电网发展等级,对省级电网的发展进行动态综合评价。最后利用所提的改进模糊评价模型对电网实际时序数据进行计算和分析。

## 1 电网发展诊断动态评价指标体系构建

指标评价体系属综合评价研究的基础,结构是否合理对评价结果的参考意义有决定性影响。其构建过程受指标选取与排列方式影响。故在构建前需对电网发展等相关因素展开分析。

电网新基建的加速推进将伴随着各项新技

术、新设备的完善与普及,如分布式能源、可再生能源类指标的引入,电力改革和电价核算类指标的变化,及其在时间、空间上的发展变化。因此,构建电网发展诊断的指标评价体系应全面考虑涵盖行业本身的内在情况与经济、能源、社会环境等外在状况。同时,考虑电网发展,调整指标结构,提高评价体系的适用性,以满足未来评价的需要。

鉴于上述分析,本文拟采用经典的三级指标体系(目标层-控制层-指标层)对电网发展状态进行描述[6,16]。利用目标层-控制层的关系表现电网整体发展状态与各方面状态的关系。在控制层-指标层,拟打破其传统的固定结构,以动态的指标层反映基础评价指标随评价时间截面变化而调整的动态特性。

### 1.1 指标的选取

在国网经研院最新发布的《电网发展诊断分析指标体系(2018年版)》《电网发展诊断分析大纲》中,以电网发展协调、安全、质量、效率、经营与政策6个方面,共计百余项基础指标描述电网发展状态。该体系经过逐年完善,已具备详尽的指标构建模型且辐射面广泛,明确了电网发展与经济发展、环境影响间紧密的耦合关系,可适用于电网发展诊断的指标构建。

本文聚焦于电网发展的诊断,拟对电网发展进行目标时序下的动态综合评价研究。而传统动态综合评价以静态评价方式为基础,其固定的评价体系往往忽略了电网成长不同时刻下存在的差异。

因此,基于上述资料与分析,本文通过研究各省市电网发展的时空特性,并结合现有文献对电网发展诊断评价指标体系的研究成果[4-13,18-20],同时采纳专家评价意见与数据获取情况,综合考虑上述内容以构建三级指标体系,如图1所示。其中,三级指标的筛选[4]遵循一致性原则、独立性原则、可比性原则。由图1可知,指标层表现了三级指标数量随电网发展而产生的增长变化,反映了电网发展的时空差异性,包括最大数额等三级指标88项,在图1中以矩形的面积变化表示。关于电网评价的基础指标研究已较为充足,逐步规范了指标算式,为本文面向电网发展整体视角下的指标广泛选取提供了支持,现列举其中



部分指标定义：以电网发展安全为例，“ $N-1$ 通过率”为某一电压等级电网主要输变电元件（不考虑母线）满足  $N-1$  标准的比例；“同塔双回线  $N-2$  通过率”为某一电压等级同塔双回线中满足  $N-2$  的线路比例；“安全隐患”是指电网在  $N-2$ 、 $N-1-1$  等特殊故障方式下可能发生特别重大事故、重大事故、较大事故、一般事故的隐患的数量。以电网发展质量为例，“变压器/线路停运统计比例”为反映各电压等级变压器/线路的强迫停运统计比例；“自动化率”反映综合自动化变电站配置比例。控制层由电网发展的速度与规模、电网发展的安全与质量、电网发展的效率与效益、企业经营与政策 4 类二级指标构成，涵盖发电、输电、负荷的基本环节，同时考虑了经济、政策、环境的交互影响，表现了电网本身的发展潜力与多方协调性。目标层由预警、亚健康、健康 3 种诊断状态构成，各状态为考虑电网全时序下各二级指标在某评价时刻的综合发展水平体现，也是对综合评价结果的直观表示形式。预警状态表明电网明显处于较差的发展水平，电网各方面发展出现显著的不协调情况导致短板效应的出现。亚健康状态代表电网处于中庸的发展水平，各项二级指标值将集中于评价分数的中位数周围，值得引起调控规划人员的注意，以把握电网未来朝健康发展的趋势。健康状态反映了电网综合发展呈最优状态，电网各方面及整体协调性都处在最优水平。

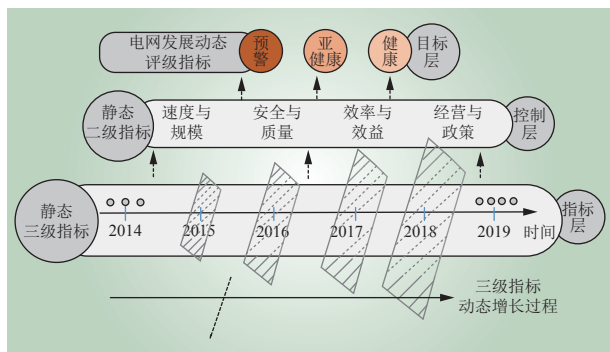


图 1 三层动态指标体系结构  
Fig. 1 Architecture of three-level dynamic index system

### 1.2 三级指标标准化处理

电网发展诊断的综合评价所涉及的指标数量庞大，为消除多类型指标量纲不同造成的影响，需首先对三级指标集进行标准化处理<sup>[21]</sup>。随着电

网各项技术的发展，其各静态时刻下三级指标数量不尽相同，应参与电网评级诊断工作的指标数将动态增长。进行标准化之前需对指标类型进行分析，采用适配的标准化公式处理。

对于极大型指标，如发输配环节的电源装机增长率、售用电增长率及经营环节的人均输电线路长度等，都属于指标值越大反映发展效应越好的指标，即

$$x_{ij}^1 = \frac{x_{ij}^0 - \min_i x_{ij}^0}{\max_i x_{ij}^0 - \min_i x_{ij}^0} \quad (1)$$

式中： $x_{ij}^0$ 为标准化前的指标元素； $x_{ij}^1$ 为标准化后的指标元素； $\min_i x_{ij}^0$ 表示同类指标值中的最小值； $\max_i x_{ij}^0$ 表示同类指标值中的最大值。

对于综合线损率，环境类的碳排放、硫排放量及经营环节的单位输配电成本、资产运维费用等，都属于极小型指标，其物理意义同极大型恰好相反，即

$$x_{ij}^1 = \frac{\max_i x_{ij}^0 - x_{ij}^0}{\max_i x_{ij}^0 - \min_i x_{ij}^0} \quad (2)$$

而对于合格型指标，如重大事故、较大事故等安全隐患类指标，根据是否超出规定限额将其标准化更加合理。故本文引入 0-1 型处理，即

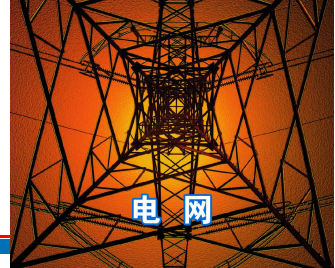
$$x_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & x_{ij}^0 > \xi \\ 0, & x_{ij}^0 \leq \xi \end{cases} \quad (3)$$

因为指标在各评价时间截面取值不同，所以利用  $x_{ij}^1(t)$  来进行表示，其中  $\xi$  表示安全阈值。指标集合将在空间呈现为逐时变化的时序立体数据表<sup>[22]</sup>。

### 1.3 基于 PCA 的指标融合

动态综合评价旨在量化评价目标的动态成长，但目前的研究实质为多次静态综合评价结果的加权集结，其任意时刻下评价体系不变。而本文研究的电网发展问题，将考虑电网发展造成的基础指标增减影响，这须打破传统评价体系的固定结构，相应影响静态指标的权重确定问题。

目前权重计算的方式可分为主观法、客观法、主客观结合法三大类，已有较成熟的研究基础。但动态指标体系的三级指标在不同时刻下的指标数量不一定相同，再通过对不同时刻分别进



行权重计算的方式将出现评价计算时指标维度不同的问题，同时导致对整体评价方向的影响。因此，引入主成分分析法（principal component analysis, PCA）将不同时间截面上数量不同的三级指标进行分步融合，使其转换为数量统一的二级指标，以将不同时刻的三级指标集结问题置于同维度解决，同时尽可能考虑到电网发展带来的指标变化。

PCA 是多元统计分析中经典方法之一<sup>[23]</sup>。该方式能在保留基础指标所反映关键信息的同时规避各时刻下指标集结对整体评价结果的影响。各主成分融合所取权重直接为对应主成分的方差贡献率。

## 2 改进模糊综合评价模型

### 2.1 模糊综合评价模型

模糊综合评价方法<sup>[24]</sup>是本文开展电网发展诊断研究工作的重要手段，其关键是通过模糊数学的隶属度理论来描述评价目标的多种受限因素。根据本文所建立的三级指标体系，融合后的电网发展二级指标将参与本节的模型计算。其具体数学思路简述如下。

(1) 利用某种模糊函数映射将含有  $Q$  个二级指标的评价目标  $P = \{x_j^2 | j = 1, 2, \dots, Q\}$  映射到对指标具有  $x_j^2$  种评级的状态集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ，其中  $x_j^2$  表示经过融合处理的二级指标；

(2) 采取某种主观法或客观法赋权评价目标在该场景下的模糊权重向量  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ；

(3) 采用某种合理的算子方式集结  $S \circ A$ ，以获取最终隶属度向量  $\hat{M}_n = (m_1, m_2, \dots, m_k)$ ；

(4) 依据最大隶属度原则，综合评分等方式排序各评价目标以获得最终评价结果。

不难看出，模糊综合评价方法的核心由选择合适的模糊映射方式  $\hat{f}$  及确定合理的模糊权重向量  $A$  2 方面构成。在确定合适的模糊映射方式  $\hat{M}_n = (m_{n1}, m_{n2}, \dots, m_{nk}), n = 1, 2, \dots, J$  环节，通过对电网的特性进行分析，并结合电网发展诊断二级指标的统计特征来选择相应的隶属度函数，可以使评价更具合理性；关于模糊权重  $A$  的确定，针对电网发展诊断需具有的全面性、动态性要求，本文引入马尔可夫理论，采用概率模型替换传统的权重集结方式，依据隶属度矩阵的特征对电网发展等级进行概率性判定。

### 2.2 隶属度矩阵特征分析

隶属度函数兼并了模糊概念的特性及不确定性的量化，可作为电网评价指标与评级计算间实现相应数学运算和处理的桥梁。其函数的选择、建立与评价目标模糊度的描述准确性息息相关。本文针对电网发展动态进行诊断评级，希望各指标值在不同等级间隶属程度明显，故选用岭型函数作为各等级间隶属度函数，如图 2 所示。

由图 2 可看到偏小、偏大、偏中间型 3 组岭型隶属度函数大致分布情况。由其构成的隶属度分段函数，不仅可以体现各偏好类型下具有的较强趋势情况，还能将各偏好类型隶属度区间化，因而适用于划定电网发展等级。通过上述研究分析，可以确定隶属度函数参数，进而得到电网发展诊断二级指标隶属度向量  $\hat{M}_n = (m_{n1}, m_{n2}, \dots, m_{nk}), n = 1, 2, \dots, J$ ，其中  $m_{nk}$  表示该指标隶属于各状态的程度值， $J$  表示该评价时间截面下二级指标的数量。此时电网实际发展状态与二级指标之间的

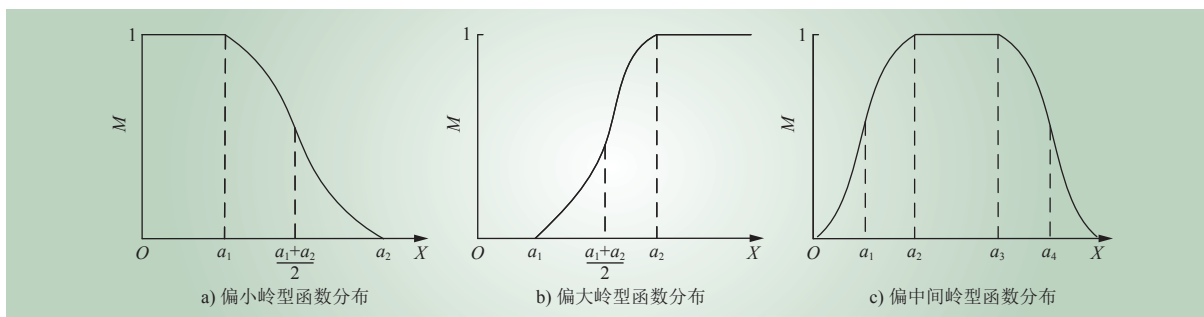


图 2 岭型隶属度函数模糊分布  
Fig. 2 The fuzzy distribution of ridge function



不确定性描述可由隶属度矩阵完成。利用聚类分析思想对隶属度矩阵分析,可以进一步挖掘电网发展动态规律。同时,聚类结果进一步表征了二级指标与综合评级结果的相关性。通过对电网发展二级指标类型的分析,其具有独立性、相似性,因此可以沿子空间聚类的思想,采用隶属度向量范数式进行聚类分析,使其组内平方和最小,即

$$\min E = \sum_{i=1}^c \sum_{m \in C_i} \left\| \hat{M}_n - \frac{1}{|C_i|} \sum_{m \in C_i} m \right\|_2^2 \quad (4)$$

式中:  $C_i$  为各观测值类型中心。依据上述工作将获得电网发展在任时刻下的隶属度矩阵特征,可由隐马尔可夫模型进一步挖掘各时刻下不同指标所反映的整体状态。

### 2.3 基于隐马尔可夫的评价模型

隐马尔可夫模型可以推导出非平稳时间序列中存在的关系,并利用概率统计方式进行预测<sup>[25]</sup>,目前已经广泛应用于电网如故障检测,电力系统预测<sup>[26-27]</sup>等问题中。隐马尔可夫问题可分为学习、评估、预测3类<sup>[28]</sup>,在模型构建环节常采用前向、后向, Baum-Welch 等算法计算模型参数。其中, Baum-Welch 算法属于期望最大化算法,其目标是在已知观测序列情况下求得模型参数,以使得观测序列的条件概率最大<sup>[29]</sup>。隐马尔可夫理论能深入挖掘指标背后反映的评价目标整体状态,其模型结构也同综合评价结构类似。因此,若利用概率模型推演指标评价的过程,取代依靠权重集结的数理统计方式,能更好保留传统评价过程中忽略的不确定性,使评价结果更符合实际。

首先简要回顾一下隐马尔可夫模型基础参数及概念,搭建电网发展诊断评级模型为

$$\lambda = (\mathbf{A}_{N \times N}, \mathbf{B}_{N \times v}, \boldsymbol{\pi}_{N \times 1}) \quad (5)$$

式中:  $N$  表示电网发展等级种类;在模型中一般由  $\theta_t$  表示各等级,研究电网发展等级全时序列可表示为  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_T)$ ,其中  $T$  代表时序评级长度,时刻  $t$  依据时序数据的时间单位决定。隐马尔可夫计算过程的每一步骤被称为状态,由于本文对电网发展动态进行评价,故马尔可夫过程的每一

步骤同时刻相对应,由  $S_t$  表示当前时刻  $t$  的马尔可夫状态。隐马尔可夫模型观测值由观测序列  $\{O_1, O_2, \dots, O_T\}$  表示,代表每时刻电网处于某发展等级下的观测结果。其中,  $\mathbf{A}$  为状态转移概率矩阵,各元素分别代表  $P(S_{t+\Delta t} = \theta_j | S_t = \theta_i), 1 \leq i, j \leq N$ ,对应电网不同时刻的等级变化趋势。 $\mathbf{B}$  为观测概率矩阵,各元素分别对应电网处在不同等级下输出各类型观测值的概率。 $\boldsymbol{\pi}_{N \times 1} = \{\pi_i\}$  代表初始状态矩阵,各元素分别代表  $\pi_i = P(S_1 = \theta_i), 1 \leq i \leq N$ ,表示电网发展综合评价起始时刻电网所处各等级的估计概率。本文利用 Baum-Welch 算法迭代计算估计模型基础参数,其计算过程由式(6)和式(7)表示,以构建  $\lambda(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$  隐马尔可夫模型。基于隐马尔可夫模型的综合评级过程如下。

(1) 初始化模型各参数  $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \boldsymbol{\pi}_0 \rightarrow \lambda_0$ 。

(2) 利用式(6)(7)迭代计算并更新隐马尔可夫模型参数。其中  $\alpha_t(i)$  是总观测序列  $O_t$  中的前向序列部分  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_t\}$  时刻,  $\beta_t(i)$  是余下的后向序列部分  $O = \{O_{t+1}, O_{t+2}, \dots, O_T\}$ , 状态  $\theta_t$  处在  $t$  时刻。

(3) 迭代计算  $P(O|S)$ , 当满足停止条件时输出  $\mathbf{A}_{iter}, \mathbf{B}_{iter}, \boldsymbol{\pi}_{iter}$ , 完成隐马尔可夫模型构建。

(4) 利用动态规划法求取二级指标隶属度矩阵所反映的电网发展诊断等级序列。

$$\begin{cases} a_{ij} = \sum_{t=1}^{T-1} \zeta_t(i, j) \Big/ \sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i) \\ b_j(k) = \sum_{t=1, O_t=v_k}^T \gamma_t(j) \Big/ \sum_{t=1}^T \gamma_t(j) \\ \pi_i = \gamma_1(i) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \gamma_t(i) = \frac{\alpha_t(i)\beta_t(i)}{\sum_{j=1}^N \alpha_t(j)\beta_t(j)} \\ \zeta_t(i, j) = \frac{\alpha_t(i)a_{ij}b_j(O_{t+1})\beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_t(i)a_{ij}b_j(O_{t+1})\beta_{t+1}(j)} \end{cases} \quad (7)$$

基于上述思路,本文提出基于电网发展诊断的改进模糊评价模型,其诊断工作的流程如图3所示。

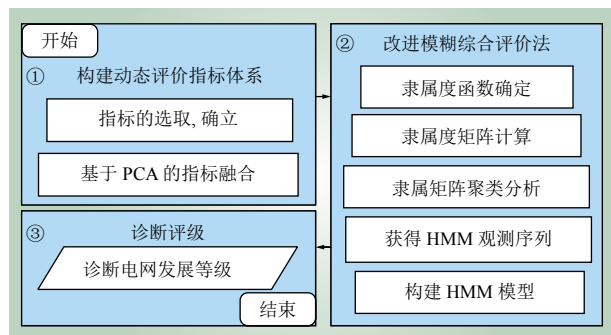


图 3 电网发展诊断整体框架  
Fig. 3 The overall framework for power grid development diagnosis

### 3 算例分析

本文以沿海省份的实际历史数据为研究对象，数据时间为 2010—2017 年。采用所提改进模糊评价模型对其中某省的电网发展进行动态综合评价分析。

#### 3.1 指标整理

原始数据主要来源于国网经研院。参考本文提出的指标体系进行计算，三级指标分别隶属于电网发展速度与规模（SS）、电网发展安全与质量（SQ）、电网发展效率与效益（EB）、企业经营与政策（MP）4 个二级指标下。实际参与算例的指标情况由表 1 统计，由各年的总指标统计值可见其逐年增长态势。通过前述分析，首先对原始指标标准化处理，以消除指标间量纲的不同，且将多元指标进行类型上的统一；再利用多次主成分法将三级指标融为对应各时刻下的二级指标值。通过三级指标间融合，可将数据包含的评价

表 1 指标数量  
Table 1 The value of each index

年份	SS	SQ	EB	MP	总指标
2010	8	15	17	22	62
2011	8	15	18	23	64
2012	8	15	18	23	64
2013	8	15	19	23	65
2014	8	15	23	23	69
2015	12	15	23	23	73
2016	17	19	23	23	84
2017	18	19	26	24	87

信息最大化折射至二级指标中。同时使评价体系由动态转为静态。

图 4 描述了该省电网各二级指标值的时序变化，由任一曲线特征可以得到对应方面的时序发展特性，获得单时间截面下的静态评价结果。如该省电网除安全与质量方面，其余二级指标都于 2016 年达到全年发展的最大值，反映了该省于 2015—2016 年发展优异。而电网整体发展的状态由这 4 个方面耦合体现，需进一步分析二级指标集与评价目标间的映射关系。

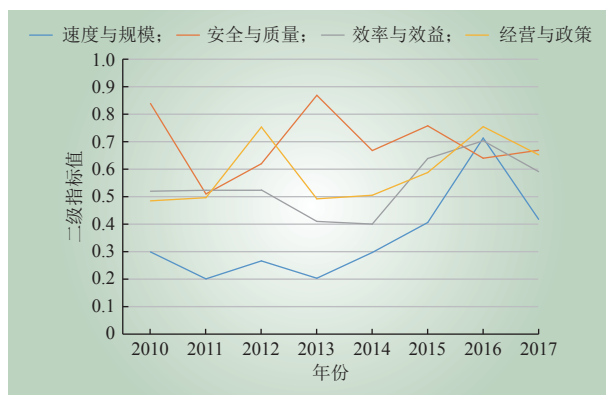


图 4 该省电网二级指标时序图  
Fig. 4 Sequence diagram of the provincial secondary indexes

#### 3.2 隶属度特征计算

通过前文讨论及指标分析研究，确定岭型分布隶属度函数来描述二级指标与各等级的模糊关系。本文预设电网实际状态数量为  $N=3$ ，分别代表电网发展等级处于“健康”“亚健康”“预警”。表 2 以该省 2015 年为例展示了电网发展二级指标隶属度计算结果。不难看出，不同二级指标隶属度向量表示对各状态不同的趋近程度，包含了状态间转移的趋势影响。其中，利用最大隶属度准则判断<sup>[29]</sup>，可知效率与效益比速度与规模、经营与政策两方面趋近于更好状态。针对电

表 2 2015 年该省电网发展二级指标隶属度  
Table 2 The secondary index membership of the provincial power grid development in 2015

类型	速度与规模	安全与质量	效率与效益	经营与政策
预警	0.6537	0	0	0.3115
亚健康	0.3463	0.8624	0	0.6885
健康	0	0.1376	1	0



网发展的整体状态，当前时间截面的实际状态由 4 个二级指标构成的隶属度矩阵耦合体现，故无法直接判别比较。

考虑电网发展本身具有规律的特性，故利用聚类分析法挖掘全时序下电网处在每时刻截面的隶属度矩阵特性，以获得电网整体的实际状态趋势，将聚类结果以观测值 I、观测值 II、观测值 III、观测值 IV 表示。各观测值类型代表与实际状态的趋近类别。其中，属于观测值 IV 的二级指标隶属度矩阵具有趋近更好状态等级的最大概率，趋近于最差等级的最小概率，观测值 III、观测值 II 在趋近程度上依次减小，观测值 I 则具有趋近于最差状态的最大概率，同观测值 IV 相反。算例结果如表 3 所示。

表 3 该省电网二级指标隶属度特征模式  
Table 3 The membership characteristics of the provincial power grid secondary indexes

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
矩阵特征观测值	I	II	I	I	II	III	IV	III

通过上述聚类分析，已将二级指标对各状态等级的趋近程度完成最大程度挖掘并表现，实现由传统的评价分值排序至评级划分的转变。各观测值类型包含了与不同状态等级的映射关系，也具有序列特性，可构成隐马尔可夫模型的观测序列。

### 3.3 隐马尔可夫模型计算

通过前述小节的隶属度矩阵特征划分，一定程度上揭示了隐藏在指标后的实际电网发展状态与二级指标集之间的关系，最后利用隐马尔可夫模型挖掘全时序下二级指标集所处的发展等级。将马尔可夫模型隐藏状态确定为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ ，代表电网发展所处的预警、亚健康、健康等级。利用 Baum-Welch 算法，获得隐马尔可夫模型参数，如图 5 所示。经过分析可以确定隐马尔可夫模型的隐藏层所代表状态的实际含义。

构建隐马尔可夫模型的状态转移概率和观测概率如图 5 所示。图 5a) 状态之间的变化具有以下特点。(1) 该省电网发展状态由预警转移至亚健康有较高的转移概率，达到 46.65%。(2) 当该省电网处于亚健康时，未来维持该状态的概率为 40.81%；而未来跌回至预警状态的概率略大于转移至健康的概率。(3) 当该省电网实际处于

健康时，具有较高的概率维持当前状态；未来转移至亚健康的概率是转移至预警等级的 2 倍。

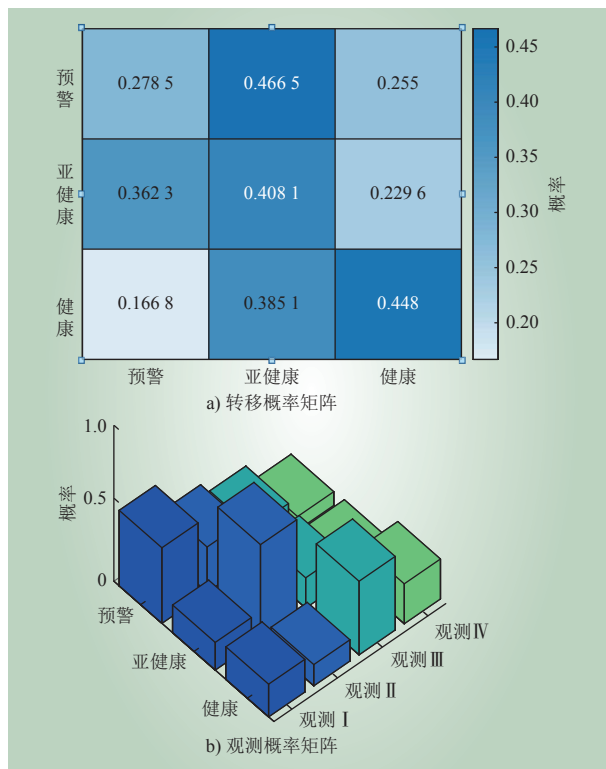
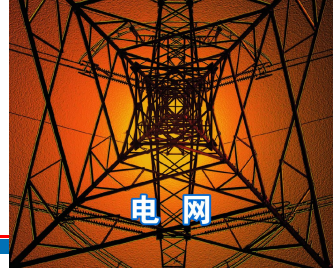


图 5 转移概率矩阵与观测概率矩阵  
Fig. 5 The hidden state transition probabilities and observation probabilities

各状态之间的转移概率符合实际意义：(1) 由亚健康状态往高或低转移的概率均衡，且由预警状态易恢复到亚健康状态，当处于健康状态时易保持当前状态，且下滑至亚健康状态的概率略低于维持当前状态概率。各状态变化转移明显具有平滑性、连贯性、合理性。(2) 预警往亚健康及健康状态的高转移概率体现了电网公司每年对电网规划诊断的合理把控。(3) 各状态间跨等级转移的概率较低，维持当前状态的概率较高，体现了电网发展的惯性特征。以上的分析表明，该参数有效地描述了电网发展特性，可以用来开展电网发展诊断评级工作。

图 5b) 直观地展示了各状态与观测值之间的关系：(1) 当电网处于预警状态时，输出观测值 IV 的概率接近于零。这表明电网处于预警发展状态时的特征明显易辨识。(2) 当电网处于亚健康时易输出观测值 II，其概率为 56.45%；而电网处于健康状态时，输出观测值 IV 与观测值 III 的



概率分别为 12.67% 与 43.96%。不难看出观测值 II、观测值 III 处于隶属度矩阵特征的中间类型，同电网各级状态都具有一定的映射关系，可随状态的转移而反映在输出观测值概率的变化上。随着电网状态由亚健康向健康状态的好转，可见输出相同类型观测值 II、观测值 III 的概率发生了翻转，符合实际。（3）当电网处于健康状态时具有输出观测值 IV 较高的概率 23.86%，同时该值为输出矩阵内各状态下输出观测值 IV 的最高概率，具有唯一性。观测概率矩阵值符合实际意义：当电网发展状态处于预警或健康的两极时分别具有与之相对应的高概率出现的观测值结果，且当电网发展处于中间状态时，概率分布反映了观测结果与状态转移间的相关性。输出概率矩阵有效地揭示了评价指标结果与电网实际状态划分之间的概率分布情况。

通过上述分析研究，构建的隐马尔可夫模型可以反映电网发展的实际情况、变化特征，可以利用其对电网发展进行诊断评级。根据上述隐马尔可夫模型，利用动态规划算法 Baum-Welch 可以求取电网发展最大概率状态序列，对电网实际发展进行诊断评级。同时，在本文动态评价体系的基础上采用 G1-熵权法<sup>[30]</sup>的综合评价方法进行最后的评价计算，其结果如表 4 所示。不难看出，常规的综合评价优劣排序结果同本文判定的电网发展等级相似。但在 2010 年与 2014 年的结果出现了差异，综合评价分数较高的年份却处于预警等级，通过分析可知 2014 年的效率与效益指标处于往年最低值。综上所述，本文所提模型对电网

发展诊断提供了更直观、可视化的评级结果，且能够兼顾指标优缺点对总体结果造成的影响，使评价结果更科学。

该省电网逐年发展趋于平稳。根据二级指标变化趋势对等级的动态变化展开分析，前 5 年电网发展各方面不均衡，指标差异性大；尤其体现在 2011 年电网发展速度与规模、安全与质量环节处于最低值，短板效应导致电网发展处于预警期。而近 3 年的健康发展等级明显体现在二级指标集体较好发展，得益于公司的优化管理，同时近年以来的电网诊断评估工作也起到了改善性作用。

## 4 结论

加速推进电网新基建发展的背景下，为了实现电网发展诊断涵盖全面、全时序，并能够合理评价发展状态，改进评价体系及方法，提出发展等级指标是本文的主要研究目标。本文的主要结论有：（1）电网的飞速发展使其结构、运行方式等都产生变化，同时也影响电网综合评价指标的确立和选取。在电网发展诊断工作中，电网发展的时空差异性反映在评价指标的增减上，利用动态评价指标体系可考虑指标增减对评价结果的影响，相比于固定指标结构考虑到更多信息，使评价结果更切合实际情况。本文构建的动态指标体系仍可适应未来评价研究。（2）目前综合评价方法的研究聚焦于指标间的权重赋值问题，优化结果局限于评价对象的评分排序。利用隐马尔可夫模型对综合评价结果进行判定，用概率计算的取代传统综合评价中依据权重以线性集结各指标的方式，为综合评价提供新的思路。同时，相比于传统评价下分值高低排序的方式也使电网状态层次反映更加直观。（3）本文的算例分析以某省历史数据为例，所得出的 8 年来实际发展诊断的等级结果符合实际，有助于探寻其发展态势变化规律并预测其未来变化趋势。所提的电网发展分级指标有利于直观表示评价结果，同时可用作新的指标参数辅助相关电网数字化技术的顺利实现。

本文所提出的方法同样可以适用于时间步长更小的分析，随着电网新基建发展进程中建设新兴数字智能产业，未来将产生庞大数据、信息

表 4 该省电网发展诊断动态评级结果

Table 4 The dynamic rating results of the provincial grid development diagnosis

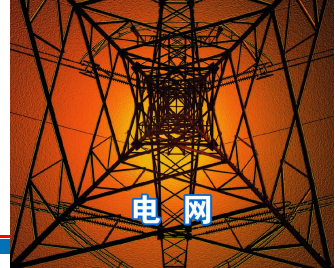
年份	等级	分数	排序
2010	亚健康	0.418 338	7
2011	预警	0.418 316	8
2012	亚健康	0.527 509	4
2013	亚健康	0.476 916	5
2014	预警	0.452 437	6
2015	健康	0.584 019	3
2016	健康	0.701 269	1
2017	健康	0.568 638	2



流, 可以实现对电网发展状态更加精确的评估和评级, 实现对电网发展的态势感知。

### 参考文献:

- [1] 刘纪鹏, 邓晓. "新基建" 电网企业大有可为 [J]. *国家电网*, 2020(4): 66-69.
- [2] 王圆圆, 白宏坤, 李文峰, 等. 能源大数据应用中心功能体系及应用场景设计 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 15-21.  
WANG Yuanyuan, BAI Hongkun, LI Wenfeng, *et al.* Function system and application scenario design of energy big data application center[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 15-21.
- [3] 边二朝. 地区电网发展水平诊断体系及应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
BIAN Erchao. The application study and diagnosis system of the level of regional power grid development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [4] 王正阳. 电网发展综合性诊断模型研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
WANG Zhengyang. Research on comprehensive diagnostic model of power grid development[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [5] 马凯强. 区域电网发展综合评估指标体系与方法研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
MA Kaiqiang. Research on comprehensive evaluation index system and method of regional power grid development[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [6] 周一凡, 胡伟, 闵勇, 等. 基于省级数据的电力发展水平动态综合评价方法 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(18): 76-83.  
ZHOU Yifan, HU Wei, MIN Yong, *et al.* Dynamic comprehensive evaluation method of power industry development level based on provincial data[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(18): 76-83.
- [7] 李佳莲. 基于粗糙集和差异集成赋权的地市级电网诊断评价体系 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2016.  
LI Jialian. The diagnosis and evaluation system of municipal power grid based on the rough set and integrated weighting method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [8] 邵子豪. 多种指标综合评估的电网发展诊断系统开发应用 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
TAI Zihao. Development and application of power grid development diagnosis system for comprehensive evaluation of various indicators[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [9] 原凯, 李敬如, 宋毅, 等. 区域能源互联网综合评价技术综述与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 41-52,64.  
YUAN Kai, LI Jingru, SONG Yi, *et al.* Review and prospect of comprehensive evaluation technology of regional energy Internet[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 41-52,64.
- [10] 赵凤展, 王佳慧, 卫泽晨, 等. 利用改进 G1-TOPSIS 法的智能配电网层次化评价 [J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 3169-3175.  
ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, WEI Zechen, *et al.* Hierarchical evaluation of smart distribution grid based on improved G1-TOPSIS method[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3169-3175.
- [11] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法 [J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2245-2252.  
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, *et al.* An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2245-2252.
- [12] 曾博, 李英姿, 刘宗歧, 等. 基于均衡主成分分析的智能配电网环境效益综合评价方法 [J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 396-404.  
ZENG Bo, LI Yingzi, LIU Zongqi, *et al.* Comprehensive evaluation method for environmental benefits of smart distribution network based on TO-PCA[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 396-404.
- [13] 孙彦龙, 康重庆, 陈宋宋, 等. 低碳电网评价指标体系与方法 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 157-162.  
SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, *et al.* Low-carbon power grid index system and evaluation method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 157-162.
- [14] 方宇娟, 王秀丽, 师婧, 等. 计及新能源接入的省级电网效率效益评估 [J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2138-2145.  
FANG Yujuan, WANG Xiuli, SHI Jing, *et al.* Research on operation and economic efficiency evaluation of provincial power grid with integrated renewable energy[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2138-2145.
- [15] 崔明建, 孙元章, 杨军, 等. 一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型 [J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3453-3460.  
CUI Mingjian, SUN Yuanzhang, YANG Jun, *et al.* Power grid security comprehensive assessment based on multi-level grey area relational analysis[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3453-3460.
- [16] 田松峰, 郁建雄, 刘佳星, 等. 基于 G1-反熵权法的分布式能源系统多指标综合评价 [J/OL]. *电网技术*, 2019: 1-12[2020-02-12]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0659>.



- comprehensive evaluation of distributed energy system based on G1-anti-entropy weight method[J]. *Power System Technology*, 2019, 1–12[2020-02-12]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0659>.
- [17] 吴鸿亮, 李东伟, 王玲. 配网投资成效动态评价体系 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13(6): 44–49.  
WU Hongliang, LI Dongwei, WANG Ling. Dynamic evaluation system of distribution network investment effect[J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(6): 44–49.
- [18] WANG H Y, LI W, DU X W, *et al.* Preliminary study on indexes and assessment method for power grid development diagnosis[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013: 2217–2221.
- [19] 文杰, 刘继春, 温正楠, 等. 计入负荷时空转移特性的风-光-水-蓄互补系统容量配置方法 [J]. *中国电力*, 2021, 54(2): 66–77, 97.  
WEN Jie, LIU Jichun, WEN Zhengnan, *et al.* Capacity allocation method for wind-solar-hydro-storage complementary system considering time and spatial transfer characteristics of load[J]. *Electric Power*, 2021, 54(2): 66–77, 97.
- [20] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价 [J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 73–78.  
HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 73–78.
- [21] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系 [J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 23–28.  
MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, *et al.* A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 23–28.
- [22] 易平涛, 周义, 郭亚军, 等. 一种体现发展趋势的动态综合评价方法 [J]. *运筹与管理*, 2016, 25(6): 175–180.  
YI Pingtao, ZHOU Yi, GUO Yajun, *et al.* A dynamic comprehensive evaluation method embodying development tendency[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(6): 175–180.
- [23] 齐敏芳, 付忠广, 景源, 等. 基于信息熵与主成分分析的火电机组综合评价方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(2): 58–64.  
QI Minfang, FU Zhongguang, JING Yuan, *et al.* A comprehensive evaluation method of power plant units based on information entropy and principal component analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(2): 58–64.
- [24] 李晨懿, 杨家莉, 徐永海, 等. 模糊综合评价在电压暂降源识别中的应用 [J]. *电网技术*, 2017, 41(3): 1022–1028.  
LI Chenyi, YANG Jiali, XU Yonghai, *et al.* Application of comprehensive fuzzy evaluation method on recognition of voltage sag disturbance sources[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(3): 1022–1028.
- [25] XIAO F, AI Q. Data-driven multi-hidden Markov model-based power quality disturbance prediction that incorporates weather conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 402–412.
- [26] HUANG Q Q, SHAO L L, LI N. Dynamic detection of transmission line outages using hidden Markov models[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 2026–2033.
- [27] 李湃, 刘纯, 黄越辉, 等. 基于隐马尔科夫模型的多风电场相关性出力时间序列建模方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(19): 5683–5691, 5896.  
LI Pai, LIU Chun, HUANG Yuehui, *et al.* Modeling correlated power time series of multiple wind farms based on hidden Markov model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(19): 5683–5691, 5896.
- [28] 杜世平. 隐马尔可夫模型的原理及其在应用 [D]. 成都: 四川大学, 2004.  
DU Shiping. Theory of hidden Markov models and its applications [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
- [29] 李滨, 王亚龙. 基于多级可拓评价法的变电站建设项目功能效果后评价 [J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1146–1152.  
LI Bin, WANG Yalong. A multi-level extension assessment based post-evaluation on function and effect of substation construction project[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1146–1152.
- [30] 栗国鸿. 某社区能源系统的构建及多指标综合评价分析研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
LI Guohong. Construction of a community energy system and analysis of multi-index comprehensive evaluation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

#### 作者简介:

艾欣 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事新能源电力系统及微网研究, E-mail: aixin@ncepu.edu.cn;

胡寰宇 (1995—), 男, 通信作者, 博士研究生, 从事电力系统分析与控制研究, E-mail: huanyuncepu@163.com;

任大鹏 (1987—), 男, 博士研究生, 从事电力系统分析与控制研究, E-mail: rocperson@126.com.

(责任编辑 张重实)

(下转第 165 页)



## Information Entropy Based Multi-Source Power IoT Terminal Equipment Trust Degree Evaluation Method

ZHAI Feng<sup>1</sup>, FENG Yun<sup>1</sup>, CHENG Kai<sup>2</sup>, CAI Shaotang<sup>3</sup>, YU Liying<sup>3</sup>, YANG Ting<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Power Internet of things terminal (IoT) equipment is vulnerable to identity camouflage, information theft, data tampering and other security threats. Traditional security methods can not resist the network internal attacks from damaged terminals. Trust evaluation system is an effective mechanism to protect power IoT terminals from internal attacks. A trust evaluation method is proposed based on information entropy for power wireless private network communication terminals. Firstly, the direct trust value is estimated by the credibility model based on exponential distribution, and then the sliding window and forgetting factor are used to update the direct trust value. According to the entropy theory, the uncertainty of direct trust value is measured, and the indirect trust value is introduced to make up for the inaccuracy of direct trust judgment, and the judgment accuracy is improved through comprehensive evaluation of both. Simulation results show that the proposed method can effectively resist switch attacks and collusion attacks, and compared to the binomial trust management method and beta distribution based trust evaluation method, it can better evaluate malicious terminals and normal terminals.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC(End-to-End Security Threat Analysis and Accurate Protection Technology of Ubiquitous Power Internet of Things, No.5700-201958466A-0-0-00).

**Keywords:** power internet of things; exponential distribution; information entropy; cyber attack; trust evaluation

(上接第 75 页)

## Improved Fuzzy Evaluation Model and Assessment of Power Grid Development Diagnosis

AI Xin<sup>1</sup>, HU Huanyu<sup>1</sup>, REN Dapeng<sup>1</sup>, PENG Dong<sup>2</sup>, LIU Huichuan<sup>3</sup>, XUE Yawei<sup>2</sup>, ZHANG Tianqi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. Economic and Technology Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

**Abstract:** With the establishment and acceleration of power grid new infrastructure construction, the power grid is becoming increasingly complicated. It is very important to correctly understand the development state of power grid. Therefore, an improved dynamic fuzzy evaluation model is proposed for power grid development diagnosis, and corresponding rating assessment on power grid development is carried out. Firstly, a dynamic evaluation index system is established based on an analysis of the important indexes in all aspects of power grid development. Then, the trend characteristics of each state are analyzed by the methods of membership function and cluster analysis. Finally, the hidden Markov model is used for the comprehensive rating of power grid development. A case study is carried out with actual data of a provincial power grid, which shows that the rating results conform with the actual status, and are helpful to understand the dynamic features of power grid development.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC ( Research on Intelligent Diagnosis Analysis and Comprehensive Decision Technology of Power Grid Development Based on Data Drive, No.5102-201956310A-0-0-00 ) .

**Keywords:** power grid new infrastructure construction; power grid development diagnosis; dynamic assessment; fuzzy comprehensive evaluation; hidden Markov model; principal component analysis