

DOI: 10.7667/PSPC150634

基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法

宋人杰, 陈禹名

(东北电力大学信息工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提高状态评价的精确性对继电保护状态检修工作有重要的意义。提出一种基于变权重系数的继电保护模糊状态评价方法。首先提取影响继电保护装置及二次回路状态的主要评价因素, 建立科学合理的状态评价指标体系。再根据因素空间理论的变权综合概念, 引入均衡函数调整各个因素的权重系数。最后采用模糊三角梯形隶属函数模型并选取合成算子, 建立一个较为客观、准确的继电保护装置及二次回路状态评价体系。运行实例表明, 该状态评价方法有利于准确地评判继电保护装置及二次回路的真实运行状态, 为状态检修提供合理依据。

关键词: 继电保护; 状态评价; 变权重; 模糊综合评价

Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value

SONG Renjie, CHEN Yuming

(School of Information Science and Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: To improve the accuracy of the state evaluation is the most important for the relay protection state maintenance. Therefore, a fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value is proposed. The major factor of the device and secondary circuit of relay protection is picked up to establish a reasonable index system of state evaluation. Then according to the variable weight comprehensive concept of factor space theory, the balance function is introduced to adjust the weight coefficient of each factor. Finally, the membership function in triangle trapezoid distribution is got to show the condition information, and synthetic operator is selected, then an objective and accurate evaluation system of relay protection equipment and secondary circuit is proposed. Running examples show that after dealing with the variable weight, some factors weight value become larger or smaller, so running state of evaluate factor may be changed, which makes it close to the real running state.

Key words: relay protection; state evaluation; variable weight; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

继电保护装置及二次回路状态评价是开展状态检修的基础, 是检修决策的重要依据, 评价的结果将直接影响装置及二次回路的检修效果和质量, 关系到电网的安全稳定运行^[1-2]。在状态评价中, 应充分考虑到各状态之间的关系以及每个状态量与评价结果的关系, 继电保护装置及二次回路状态评价涉及许多状态因素, 每个状态因素细微的变化都对状态评价结果有直接或者间接的影响^[3]。以往常常采用常权重系数对其进行模糊综合评价, 常权重系数无法客观的反映个别关键参数严重偏离正常时对继电保护装置运行状态带来的影响, 当某个权重系数较小的状态量发生变化, 整体评价结果可能处于正

常水平, 因此可能做出错误的检修计划, 带来不必要的损失。

本文在完善继电保护状态评价指标体系的基础上, 由熵值法确定常权重系数, 引入均衡函数调整各个因素的权重系数, 选取合成算子, 对继电保护装置及二次回路进行综合状态评价, 使得模糊综合评价模型运算结果可以反映设备的真实运行状态。

1 继电保护状态评价指标体系

影响继电保护装置及二次回路的状态量的因素指标是一个复杂庞大的数据集, 并且各个因素的影响程度不相同, 因此对状态量主要影响因素的选取有一定的难度。本文基于全面性、准确性和可操作性的原则采用历史运行数据与实时运行数据相结合

的指标体系, 综合数据对继电保护装置及二次回路的状态进行评判。特别的, 温度实时值反映的是当下设备的运行状况, 并不能反映装置的老化程度, 装置温度长期处于异常状态, 对装置的老化程度有着很大的影响, 因此引入温度历史平衡偏移量作为历史运行状态的评价因素。“如图 1 继电保护装置及二次回路指标体系”能够反映继电保护系统运行状态和总体状态特征量, 满足在线状态评价的要求。

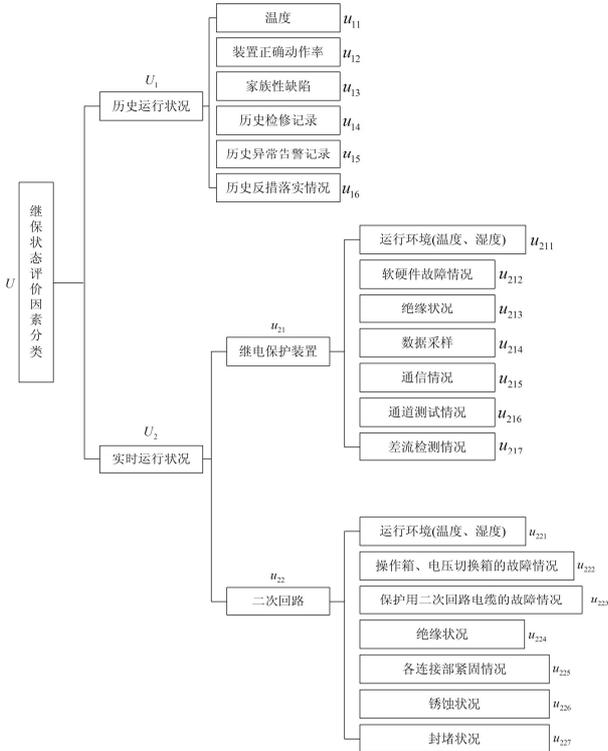


图 1 继电保护状态评价指标体系

Fig. 1 Index system of relay protection state evaluation

2 综合评价中变权重系数的确定

2.1 评价因素的常权重系数确定

目前, 常用的因素权重的确定方法层次分析法是多位专家按照要求给出各个因素之间的相对重要性赋予相应的权重。这种建立在专家咨询之上的赋权方法, 主观色彩较浓厚, 并且不同专家经验之间有着或多或少的差异, 导致判断结果差异性很大。为避免过于依赖专家经验的主观因素, 客观的反映各状态因素所占权重大小^[4-5], 本文采用熵值法确定各因素的权重。熵值法是根据各项指标值的变异水平来确定指标权数的, 这是一种客观赋权法, 有效地避免了人为因素带来的偏差。各个指标因素的权重由信息熵赋权方法计算得出, 即评价因素的权重集 A_j , 为模糊综合评价提供依据, 其一般步骤如下。

(1) 构建数据矩阵

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

式中 U_{ij} 为第 i 个状态量中第 j 个因素的数值。

(2) 数据的标准化处理

继电保护装置状态评价涉及到众多评价因素, 由于评价因素之间一般存在着不可公度量性。因此, 不能直接利用各状态量的初始因素进行模糊综合评价, 而是需要先消除各状态量的量纲、数量级和因素类型的影响后, 再进行模糊综合评价, 即标准化处理。

对于正向指标

$$u_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_j\}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (2)$$

对于负向指标

$$u_{ij}^* = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (3)$$

记标准化处理后的数据为 u_{ij}^* 。

(3) 计算第 j 综合状态量下第 i 因素占该指标的比重

$$X_{ij} = \frac{u_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^*} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

(4) 计算第 j 项指标的信息熵及熵冗余度
信息熵

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m X_{ij} \times \ln X_{ij} \quad (5)$$

熵的冗余度

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

(5) 因素权重权数

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \quad j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

熵值法估算各指标的权重, 其本质是利用该因素信息的价值系数来计算的, 其价值系数越高, 对评价的重要性就越大, 这是一种客观赋权法, 避免了人为因素带来的偏差。

2.2 评价因素变权重系数的确定

为了评估继电保护装置及二次回路的真实运行状况, 将继电保护装置及二次回路状态量分成若干个评价因素, 并分别进行状态评估获得各评价因素的评价结果, 经过模糊综合评价获得继电保护装置及二次回路的运行状态, 在运算过程中, 利用熵值

法虽然在一定程度上改善了过度依赖主观意识的情况，但是权重值小的评价指标严重偏离正常值时，评价指标权重较低的评价因素都不能通过模糊算子被突显出来，继保装置及二次回路整体评价可能还是正常水平，因此仅仅使用由熵值法确定的常权重系数不能够真实的反映继保装置及二次回路的真实运行状态，需要引入变权理论对权重系数进行适当的调整^[6-7]。

变权理论的引入实现了对各评价状态因素权重系数的实时调整，可以反映综合评价中各要素状态的均衡性，解决了权重较小状态评价因素变化导致的评价结果与真实运行状态有差异的问题。在继电保护状态评估中引入变权公式

$$w_i^v = \frac{w_i}{x_i} / \sum_{k=1}^n \frac{w_k}{x_k} \quad (8)$$

式中： w_i^v 为第*i*个综合状态量的变权重系数； x_i 为第*i*个综合状态量的评分值； n 为综合状态量的个数； w_i 为第*i*个综合状态量的常权重系数。

选取均衡函数 B_{Π_r}

$$B_{\Pi_r} = \prod_{i=1}^m x_i^T (T > 0) x \quad (9)$$

将均衡函数 B_{Π_r} 引入变权公式得

$$w_i^v = \frac{w_i}{x_i \sum_{k=1}^m w_k x_k^{-1}} \quad (10)$$

引入均衡函数后的变权公式反映综合评价中各要素状态的均衡性，较准确地反映继电保护装置及二次回路中各状态因素所占权重大小。

3 继保装置及二次回路状态评价步骤

3.1 建立模糊综合评价模型的因素集和评判集

根据图 1 所示，继电保护状态评价结果 U 由历史运行状况 U_1 和实际运行状况 U_2 模糊运算结果确定。其中，实际运行状况 U_2 又可以分别从继电保护装置 U_{21} 和继电保护二次回路 U_{22} 两方面进行评估，因此表示为因素集 $U = \{U_1, U_2\}$ 。其中， $U_1 = \{u_i, i = 1, \dots, 6\}$ ， $U_2 = \{u_{21}, u_{22}\}$ 。 u_{21} 、 u_{22} 分别与保护装置和二次回路的状态量相对应， $u_{21} = \{u_{21i}, i = 1, \dots, 7\}$ ， $u_{22} = \{u_{22j}, j = 1, \dots, 7\}$ 。

考虑到后续的继电保护检修策略和检修计划，在原有的基础上将继电保护装置运行状态划分为良好、正常、类正常、注意、类注意、异常、严重异常 7 种情况。类正常和类注意作为两个临界状态需要运行维护人员特殊注意。因此，表示为评语集 $v =$

$\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$ 分别与良好——严重异常一一对应。

3.2 确定隶属函数

正确地确定隶属函数，是运用模糊几何理论解决实际问题的基础。常用的确定隶属函数的方法有模糊统计法、例证法、专家经验法等，工程中常用的隶属函数分布形式有梯形分布、三角形分布、正态分布等^[8-12]。为了提高继电保护装置状态评价的合理性、准确性，考虑到继电保护状态分布不服从过于理想化的梯形分布，正态分布屏蔽掉了更多隶属度较低的信息，三角梯形分布的两端分布隶属度无差异性不现实，传统三角分布的两端分布没有梯形模糊集中心，采用改进的三角梯形分布更准确表达分布状态及隶属度。本文选用改进型的三角梯形状态分布模型，每个状态等级模糊集有中心，即为隶属度峰值最大点，为继电保护状态等级状态定义描述。图 2 为模糊三角梯形隶属分布。

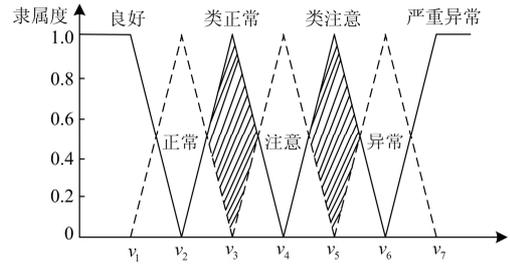


图 2 模糊三角梯形隶属分布

Fig. 2 Membership distribution of fuzzy trapezium and triangle distribution

三角梯形分布隶属函数的具体表达式为

$$\mu(v_i) = \begin{cases} 1 & v \leq v_1 \\ \frac{v - v_2}{v_2 - v_1} & v_1 < v \leq v_2 \\ 0 & v > v_2 \\ 0 & v \leq v_1 \\ \frac{v - v_{i-1}}{v_i - v_{i-1}} & v_{i-1} < v \leq v_i \\ \frac{v - v}{i + 1} & v_i < v \leq v_{i+1} \\ (-1)^i \left(\frac{v_{i+1} - v}{i} \right) & v_i < v \leq v_{i+1} \\ 0 & v > v_{i+1} \\ 0 & v \leq v_6 \\ \frac{v - v_6}{v_7 - v_6} & v_6 < v \leq v_7 \\ 1 & v > v_7 \end{cases} \quad (11)$$

由模糊关系矩阵 $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{i7}\}$ 得单因素评价矩阵 \tilde{R}

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{17} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{27} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{m7} \end{bmatrix} \quad (12)$$

利用上述引入均衡函数后的变权重公式调整的权重系数确定的评价因素的权重集 A 与单因素模糊评价矩阵 \tilde{R} 进行模糊综合评价求取评价模糊子集 B 。

3.3 合成模糊综合评判结果

本文采用模型 $M(\cdot, \vee)$ 进行合成, 该算子模型直接决定 b_j 的 \tilde{R} 阵中的数据不一定是每列中最大的因素, 它不仅要求 r_{ij} 大, 而且要求所对应的 a_i 也大, 把原指标中的 r_{ij} 修正为 $r_{ij}^{a_i}$, $r_{ij}^{a_i}$ 具有制约的功能, 因此可以较好地反映单因素评价结果的重要程度, 突出了信息中的次要因素而进行的评判, 该模型计算 b_j 为

$$b_j = \bigwedge_{i=1}^n (r_{ij}^{a_i}), \quad j=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

通过 $M(\cdot, \vee)$ 合成算子对继电保护装置及二次回路进行综合评价, 其结果可以很直观的反映继电保护装置及二次回路的真实运行状态。

4 实例分析

利用构建的继电保护装置及二次回路的指标体系和基于变权重系数的继电保护装置及二次回路的模糊综合评价方法, 以某变电站的一个运行中的线路继电保护装置为例进行综合评价, 分析该继电保护装置运行状态。

4.1 确定状态量的模糊关系矩阵

根据监测的继电保护装置评价状态量的实际参数, 使用公式(11)计算各状态的隶属函数, 可以求得各因素的隶属度, 如表1所示, 得到装置运行状况的模糊关系矩阵 \tilde{R} 。

由表1可得装置运行状况的模糊关系矩阵 \tilde{R}

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.4 \\ 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表1 继电保护装置评价状态量

Table 1 Evaluation state variables of protection relays

状态量	评价内容	因素集	隶属度						
			v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
装置运行环境	运行的环境温度、湿度	u_{211}	0.7	0.1	0.2	0	0	0	0
软硬件故障情况	设备的软件和硬件发生故障的情况	u_{212}	0.5	0.3	0.1	0.1	0	0	0
绝缘状况	包括屏内接线的保护装置箱体和各插件的绝缘数据	u_{213}	0.6	0.1	0.1	0.2	0	0	0
数据采样	模拟量采样和开关量采样	u_{214}	0.5	0.2	0.1	0.2	0	0	0
通信情况	GPS对时,与监控后台、保护信息子站的通讯情况	u_{215}	0.6	0.2	0.1	0.1	0	0	0
通道测试情况	高频通道测试和光纤通道测试数据	u_{216}	0.7	0.1	0.1	0.1	0	0	0
差流检查情况	主变差流、母线差流和光纤纵差差流数据	u_{217}	0.4	0.4	0.1	0.1	0	0	0

4.2 常权重与变权重的确定

首先应用熵值法即式(7)可得因素常权重系数 A_1 , 应用式(10)可得调整后的变权重系数 A_2 , 如表2所示。

表2 常权重系数与变权重系数

Table 2 Constant weight and variable weight coefficient

因素集	u_{211}	u_{212}	u_{213}	u_{214}	u_{215}	u_{216}	u_{217}
常权重	0.315	0.39	0.15	0.09	0.013	0.032	0.01
变权重	0.318	0.221	0.21	0.068	0.083	0.042	0.058

由表2可得评价因素的常权重集和变权重集分别为

$$A_1 = [0.315 \quad 0.39 \quad 0.15 \quad 0.09 \quad 0.013 \quad 0.032 \quad 0.01]^T$$

$$A_2 = [0.318 \quad 0.221 \quad 0.21 \quad 0.068 \quad 0.083 \quad 0.042 \quad 0.058]^T$$

4.3 模糊综合评价

使用合成算子式(13)可分别得出在常权重和变权重下的继电保护装置的综合评价结果为

$$b_1 = \tilde{R} \circ A_1 = [0.4966 \quad 0.2635 \quad 0.1419 \quad 0.088 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$b_2 = \tilde{R} \circ A_2 = [0.5679 \quad 0.1667 \quad 0.1667 \quad 0.1056 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

由常权重系数得到的继电保护装置的运行状态隶属于良好的隶属度为49.66%, 由变权重系数得到的继电保护装置的运行状态隶属于良好的隶属度为56.79%。变权后继电保护装置的运行良好状态隶属度最大, 与变权前继电保护装置的运行状态一致, 说明变权处理能够保证最终评价结果的准确性。变权之后处于正常状态隶属度下降, 类正常状态、注意状态隶属度增高, 说明装置虽然整体运行处于良好状态, 但是某状态量的因素运行指标健康状况有所下降, 在进行模糊综合评价时, 上述指标由于常权重系数较小, 使得继电保护装置可能处于良好状态, 但是经过变权处理后增大了其权重系数, 使得继电保护可能处于非良好状态, 增大了检修工作的效率。实

例分析证明, 由上述结果可知当采用本文所述方法可以较为准确的反映继电保护装置及二次回路的真实运行状态。

5 结语

(1) 在继电保护装置及二次回路众多影响因素中提取重要因素建立状态评价指标体系, 本文提出了历史运行状况和实际运行状况相结合的指标体系, 监测实时运行数据的同时参考历史运行数据对继电保护装置的实际运行状况准确的判断有很大的帮助。

(2) 在常权重的基础上提出利用均衡函数构建变权重调整因素的权重系数, 均衡函数作为变权综合理论重要建模原理之一, 它反映了综合决策中诸要素状态的均衡性, 改善了采用常权重系数时当继电保护装置的某一方面性能下降时, 整体评价可能还是正常水平的问题, 提高了评价结果的准确性。

(3) 本文采用模糊三角梯形隶属函数构建状态的模糊评价矩阵, 考虑到实际运行时继电保护状态分布不服从过于理想化的梯形分布, 结合三角分布和梯形分布的特点, 采用改进的三角梯形分布更准确表达分布状态及隶属度。

(4) 在模糊综合运算时, 采用 $M(\cdot, \vee)$ 合成算子, 可以较好地反映单因素评价结果的重要性。

本文提出的一种基于变权重系数的继电保护状态模糊评价方法, 在一定程度上可以提高继电保护装置及二次回路状态评价的准确性, 对继电保护状态检修提供可靠的参考依据。

参考文献

[1] 高翔. 继电保护状态检修应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 33-121.

[2] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58. XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.

[3] 吕文超, 吕飞鹏, 张新峰. 模糊聚类法在电力系统状态检修中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 93-97. LÜ Wenchao, LÜ Feipeng, ZHANG Xinfeng. Application of fuzzy clustering method in the condition-based maintenance (CBM) of relay protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 93-97.

[4] 李黎, 张登, 谢龙君. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 152-159. LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.

[5] 彭志锋, 杨明玉. 基于变权理论的继电保护状态评价方法[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 92-95. PENG Zhifeng, YANG Mingyu. Status evaluation method of relay protection based on the variable weight theory[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 92-95.

[6] 张锦春, 裘杭萍, 权冀川. 变权评估中均衡函数的构造[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(7): 107-110. ZHANG Jinchun, QIU Hangping, QUAN Jichuan. The construction of balance function in variable weight evaluation[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(7): 107-110.

[7] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64. LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. System Engineering Theory and Practice, 1997, 17(4): 58-64.

[8] 李世勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 96-107.

[9] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-7. WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-7.

[10] 刘永欣, 师峰, 姜帅. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41. LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.

[11] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52. WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.

[12] 李磊, 熊小伏, 沈智健. 基于变权重的变压器状态模糊综合评价方法[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 100-105. LI Lei, XIONG Xiaofu, SHEN Zhijian. Fuzzy synthetic evaluation of transformer condition with variable weight value[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 100-105.

收稿日期: 2015-04-16

作者简介:

宋人杰(1963-), 女, 硕士, 教授, 研究方向为计算机在电力系统中的应用; E-mail: srj1963331@sina.com

陈禹名(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用。E-mail: chenyming0216@163.com

(编辑 张爱琴)