

# Relay Protection State Evaluation Based on Weighted Rank Sum Ratio in Smart Substation

Xiaozhong Wu<sup>1</sup>, Weijun Zhu<sup>2</sup>, Yi Shi<sup>3</sup>, Yake Xi<sup>3</sup>, Guangyuan Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Electric Power Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha Hunan

<sup>3</sup>XJ Group Corporation, Xuchang Henan

Email: yyangchen@126.com, zhuweijun1999@163.com

Received: Jul. 19<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 9<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In view of the tendency of increasing operation information about smart substation relay protection, in order to obtain accurate evaluation of relay protection state, an evaluation method based on comprehensive weight and rank sum ratio is raised. Firstly, to analyze the relay protection status assessment process and establish the evaluation index system, and then use the multiplicative method to combine the subjective weight determined by the analytic hierarchy process and the objective weight determined by the coefficient of variation to obtain the final comprehensive weight. Secondly, relay protection state is comprehensively evaluated and graded by combining rank sum ratio method and comprehensive weight to make up weighted rank sum ratio. Finally, taking different interval relay protections of some 220 kV substations for instance, the rationality and the feasibility of proposed method were verified through the consistency assessment of the results of the optimal grading test.

## Keywords

Smart Substation, Relay Protection, State Evaluation, Variation Coefficient Method, Weighted Rank Sum Ratio, Analytic Hierarchy Process, Comprehensive Weigh

---

# 基于加权秩和比的智能变电站继电保护状态评估

吴小忠<sup>1</sup>, 朱维钧<sup>2</sup>, 时 谊<sup>3</sup>, 席亚克<sup>3</sup>, 汪广远<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国网湖南省电力公司, 湖南 长沙

<sup>2</sup>国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙

<sup>3</sup>许继集团有限公司, 河南 许昌

Email: yyangchen@126.com, zhuweijun1999@163.com

收稿日期: 2017年7月19日; 录用日期: 2017年8月6日; 发布日期: 2017年8月9日

## 摘要

针对智能变电站继电保护运行信息日益增多的趋势, 为了对其状态做出准确的评估, 提出一种基于综合权重与秩和比法的状态评估方法。首先分析继电保护状态评估流程和建立评估指标体系, 利用乘法组合法将层次分析法确定的主观权重和变异系数法确定的客观权重相结合, 得到最终的综合权重。其次通过引入秩和比法与综合权重相结合, 构成加权秩和比, 对继电保护装置状态进行综合评估分档。最后以某220 kV变电站各典型间隔的继电保护为例, 通过对评估结果进行最佳分档一致性检验, 验证了所提方法的合理性和可行性。

## 关键词

智能变电站, 继电保护, 状态评估, 变异系数法, 加权秩和比, 层次分析法, 综合权重

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着智能变电站在我国投运数量的日益增多, 作为变电站二次系统核心设备的继电保护, 其运行维护量急剧上升。为了解决检修不足或检修过度带来的设备受损等问题, 继电保护状态检修的研究已越来越重视, 而状态评估是设备状态检修的重要基础。

目前继电保护状态评估的方法有故障树分析法、马尔可夫法、模糊综合评判法等[1] [2] [3] [4] [5]。文献[6]运用模糊数学对在线和离线检测数据进行处理, 再据此对设备状态进行评估, 但由专家界定保护状态区间的量值, 人为影响因素过高, 客观性不足。文献[7]基于模糊综合评判对继电保护状态做出量化评估, 但评估指标权重纯粹基于主观自定义, 评估结果离散度较高, 且模糊隶属函数的选取较为简单, 影响了评估结果的准确性。文献[8] [9]基于马尔可夫法对继电保护做可靠性分析, 考虑了装置的各种运行状态, 但没有实现对装置自检信息的全面、综合利用, 部分参数在实际应用中较难获得, 其实用性受到限制。

变异系数法(variation coefficient method, VCM)是一种利用被评价对象指标的变异程度确定指标权重的客观方法, 可实现被评价对象各指标的动态赋权, 更能反映被评价对象的差距[10]。秩和比法(rank sum ratio, RSR)是融合了参数分析的一种方法, 对指标的选择无特殊要求, 计算用的数值是秩次, 能够消除异常值的干扰, 计算结果既可以直接排序也可以分档排序, 已在多指标综合评估、统计预测等方面得到广泛的应用。目前, 引入 VCM 确定综合权重与基于 RSR 法结合在继电保护状态评估方面的研究还未见报道。

综上所述, 本文通过分析继电保护状态评估流程, 根据选取指标遵循的原则, 将评估指标分为内部指标和外部指标两大类; 为了使主客观确定权重的优势互补, 得到更加合理的指标权重, 将层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定的主观权重与 VCM 确定的客观权重相结合, 用乘法组合法得到综合权重; 鉴于 RSR 法在多指标综合评估方面的优点, 本文尝试将其与综合权重相结合, 形成加权 RSR, 用

于继电保护状态评估中；最后，通过算例对本文所提方法进行了验证。

## 2. 继电保护状态评估流程和指标体系

### 2.1. 继电保护状态评估流程

继电保护状态评估对象是以智能变电站各间隔的保护装置，其自带的智能诊断和通信等功能，为评估所需信息的获取提供了技术支持[6]。本文通过选取装置的典型指标，获取其在线监测或离线信息，对其状态做出评估，整个流程如图1所示。

### 2.2. 继电保护状态评估指标的确立

为使评估指标具有客观性和可操作性，本文将对保护状态有重要影响的指标分内部指标和外部指标。内部指标考虑装置自身行为，着重反映装置内在品质，由文献[7]中的方法和统计得到；外部指标反映外界因素对装置的影响，由统计得到，且检修成本主要由检修付出的人力、设备和停电对用户造成的影响所组成。整体评估指标体系如图2所示。

## 3. 状态评估指标权重的确定

目前确定指标权重的方法主要有主观赋权和客观赋权，前者由专业领域中的专家根据经验主观判断得到，适合定性的模糊指标，但该方法易受决策者知识结构和个人经验的影响；后者是根据指标数据差异程度提供的信息确定，能有效避免主观因素的影响，但结果可能与专家的认识相悖[11]。为了更准确地得到各个指标的权重，本文将AHP和VCM相结合得到各指标的综合权重。

### 3.1. AHP 确定主观权重

AHP是一种利用定性分析与定量分析相结合的多目标决策方法，具有简洁性和系统性等方面的优点[12]。在求解各指标权重时，AHP利用判断矩阵通过两两比较的方式确定各指标的相对权重，并检验判断矩阵的一致性指标来保证数据的可信度。AHP求解指标权重的详细过程可参考文献[13]。

### 3.2. VCM 确定客观权重

VCM基本原理是指标的变异程度越大，说明其在评价对象中的重要程度越高，应赋予较大的权重，反之应赋予较小的权重。本文利用VCM确定指标客观权重的方法可参考文献[10]。

### 3.3. 综合权重的确定

参考已有的多种主客观权重确定方法，本文采用乘法合成法得到各指标的综合权重[14]。

令AHP得到的权重向量为 $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m]$ ，VCM得到的权重向量为 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m]$ ，则乘法合成法得到的第 $j$ 个指标权重的计算公式为：

$$\alpha_j = \frac{\gamma_j \cdot \beta_j}{\sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot \beta_j} \quad (1)$$

则各个指标的综合权重向量为 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]$ 。

## 4. 基于加权秩和比法的状态评估

### 4.1. RSR 法基本原理

RSR法是统计学家田凤调教授提出的一种综合评价方法。该法利用RSR进行统计分析，其原理是在

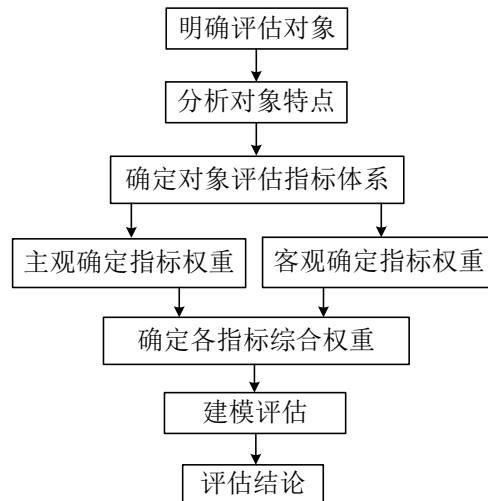


Figure 1. State evaluation process of relay protection  
图 1. 继电保护状态评估流程

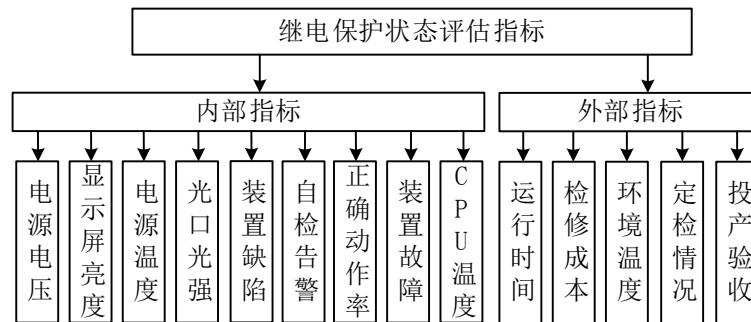


Figure 2. State evaluation index system of relay protection  
图 2. 继电保护状态评估指标体系

一个  $n$  行  $m$  列矩阵中，通过秩转换，获得  $RSR$ ，运用参数统计分析  $RSR$  的分布，对  $RSR$  值直接排序或分档，得到各对象的评估状态。

#### 4.2. 状态评估过程

基于加权秩和比的评估过程如下[15]：

- 1) 编秩：将  $n$  个评价对象的  $m$  个指标列成  $n$  行  $m$  列的原始数据表，编出每个指标各评价对象的秩；高优指标从小到大编秩，低优指标从大到小编秩，同一指标数据相同者编平均秩。
- 2) 计算加权  $RSR$ ：当各指标的权重不同时，第  $i$  个评价对象的加权  $RSR$  计算公式为：

$$\alpha RSR_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \alpha_j R_{ij} \quad (2)$$

式中： $R_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列元素的秩。

- 3) 计算概率单位：将  $\alpha RSR$  值由小到大排成一列，相同值作为一组，编制  $\alpha RSR$  频率分布表，列出各组频数  $f$ ，计算各组累积频数  $\sum f$ ；确定各组  $\alpha RSR$  的秩次  $R$  和平均秩次  $\bar{R}$ ，则累积频率  $p = \frac{\bar{R}}{n}$ ；用标准正态离差  $\mu + 5$  得  $p$  对应的概率单位 Probit。

- 4) 计算直线回归方程：以  $\sum f$  对应的 Probit 为自变量， $\alpha RSR$  值为因变量，计算直线回归方程

$$\widehat{\alpha RSR} = a + b \times \text{Probit}。$$

5) 分档排序: 根据  $\alpha RSR$  值对各对象进行分档, 即得到各对象的评估状态, 最佳分档应是各档方差一致、相差具有显著性, 一般分 3~5 档。

## 5. 算例分析

本文以某投运的 220 kV 智能变电站为例, 所选评估对象和指标数据如表 1 所示。

### 5.1. 评估指标权重计算

1) 层次分析法确定主观权重

根据文献[13]层次分析法 1~9 标度的判断尺度量化规则, 构建各指标的比较结果如表 2 所示。

将表 2 形成比较矩阵, 由文献[13]计算一致性比率  $R_c = 0.091 < 0.1$ , 通过一致性检验, 则矩阵合理, 对其最大特征值的特征向量进行归一化得指标权重为: (0.13, 0.03, 0.03, 0.12, 0.06, 0.08, 0.33, 0.11, 0.04, 0.02, 0.01, 0.02, 0.01, 0.01)。

2) VCM 确定客观权重

由 VCM 将表 1 中的数据转化成正向指标并去量纲化, 所得结果如表 3 所示。

利用表 3 数据计算各指标均值、标准差和变异系数, 得到其权重向量为(0.0042, 0.0316, 0.0091, 0.5591, 0.0484, 0.0342, 0.0314, 0.057, 0.0049, 0.0441, 0.0806, 0.0066, 0.0573, 0.0315)。

3) 综合权重的确定

采用乘法合成法将 1)、2)中的权重进行综合, 得到各指标的综合权重向量为: (电源电压, 显示屏亮度, 电源温度, 光口光强, 装置缺陷, 自检告警, 正确动作率, 装置故障, CPU 温度, 运行时间, 检修成本, 环境温度, 定检情况, 投产验收) = (0.006, 0.01, 0.003, 0.71, 0.031, 0.03, 0.11, 0.067, 0.002, 0.009, 0.009, 0.001, 0.006, 0.006)。由综合权重计算结果可知, 主要通过光信号传输信息的智能变电站, 光口光强对装

**Table 1.** Objects and index data of state evaluation about relay protection

**表 1.** 继电保护状态评估对象和指标数据

指标名称	保护装置名称						
	220 kV 线路 1 A 套	220 kV 线路 1 B 套	主变 A 套	主变 B 套	110 kV 母线	110 kV 线路 1	110 kV 线路 2
电源电压(V)	4.9	5	5.05	4.95	4.92	5.03	4.97
显示屏亮度(cd/m <sup>2</sup> )	185	200	210	235	215	198	189
电源温度(°C)	48	46	52	50	49	45	47
光口光强(dBm)	-28	-23	-27	-28	-24	-26	-25
装置缺陷(次/年)	2	1	1	2	1	1	1
自检告警(次/年)	4	5	3	3	4	5	4
正确动作率(%)	85.7	85.7	100	83.3	100	90	100
装置故障(次/年)	3	2	1	1	2	2	1
CPU 温度(°C)	65.4	66	70.2	69.3	66.7	66.4	66.8
运行时间(年)	2	2	2	2	2	2	1
检修成本(万元/次)	2.5	2.5	22.5	22.5	46.5	15.5	15.5
环境温度(°C)	28	28	28.7	28.7	27.2	26.5	26.3
定检情况(次/年)	2	2	2	2	1	1	1
投产验收(类)	3	2	3	3	4	3	3

**Table 2.** Comparative result of state evaluation indexes  
**表 2.** 状态评估指标比较结果

指标名称	电源电压	显示屏亮度	电源温度	光口光强	装置缺陷	自检告警	正确动作率	装置故障	CPU 温度	运行时间	检修成本	环境温度	定检情况	投产验收
电源电压	1	7	5	1	5	7	1/8	1/3	5	7	7	7	8	8
显示屏亮度	1/7	1	5	1/7	1/5	1/7	1/9	1/7	1/6	3	5	1	3	5
电源温度	1/5	1/5	1	1/7	1/7	1/7	1/9	1/7	1	5	6	4	6	6
光口光强	1	7	7	1	1	6	1/8	1	6	7	7	6	7	7
装置缺陷	1/5	5	7	1	1	1/2	1/8	1/2	1	5	5	4	5	5
自检告警	1/7	7	7	1/6	2	1	1/8	1	5	6	7	7	7	7
正确动作率	8	9	9	8	8	8	1	8	8	9	9	9	9	9
装置故障	3	7	7	1	2	1	1/8	1	6	8	9	6	8	9
CPU 温度	1/5	6	1	1/6	1	1/5	1/8	1/6	1	5	5	3	5	5
运行时间	1/7	1/3	1/5	1/7	1/5	1/6	1/9	1/8	1/5	1	5	1/4	5	6
检修成本	1/7	1/5	1/6	1/7	1/5	1/7	1/9	1/9	1/5	1/5	1	1/5	1/3	1/3
环境温度	1/7	1	1/4	1/6	1/4	1/7	1/9	1/6	1/3	4	5	1	5	5
定检情况	1/8	1/3	1/6	1/7	1/5	1/7	1/9	1/8	1/5	1/5	3	1/5	1	1/3
投产验收	1/8	1/5	1/6	1/7	1/5	1/7	1/9	1/9	1/5	1/6	3	1/5	3	1

**Table 3.** Dimensionless of forward indexes based on VCM  
**表 3.** 基于 VCM 的正向指标无量纲化

指标名称	保护装置名称						
	220 kV 线路 1 A 套	220 kV 线路 1 B 套	主变 A 套	主变 B 套	110 kV 母线	110 kV 线路 1	110 kV 线路 2
电源电压	0.3723	0.3799	0.3837	0.3761	0.37382	0.38218	0.37762
显示屏亮度	0.34079	0.36842	0.38684	0.43289	0.39605	0.36473	0.34815
电源温度	0.37819	0.38614	0.36381	0.37062	0.37441	0.38989	0.38202
光口光强	0.7049	0.01382	0.06408	0.7049	0.01719	0.03357	0.02274
装置缺陷	0.30505	0.40346	0.40346	0.30505	0.40346	0.40346	0.40346
自检告警	0.37403	0.337	0.42022	0.42022	0.37403	0.337	0.37403
正确动作率	0.35066	0.35066	0.40918	0.34084	0.40918	0.36826	0.40918
装置故障	0.28949	0.34626	0.43071	0.43071	0.34626	0.34626	0.43071
CPU 温度	0.38306	0.3815	0.37006	0.37214	0.37942	0.38046	0.3789
运行时间	0.35923	0.35923	0.35923	0.35923	0.35923	0.35923	0.47511
检修成本	0.46946	0.46946	0.33349	0.33349	0.24752	0.37105	0.37105
环境温度	0.3754	0.3754	0.37071	0.37071	0.38073	0.38542	0.38691
定检情况	0.32884	0.32884	0.32884	0.43492	0.43492	0.43492	0.43492
投产验收	0.37469	0.43609	0.37469	0.37469	0.32843	0.37469	0.37469

置的可靠运行起着十分重要的作用。

**Table 4.** Weighted rank sum ratio distribution  
**表 4.** 加权秩和比分布

计算项目	保护装置名称						
	220 kV 线路 1 B 套	110 kV 母线	110 kV 线路 2	110 kV 线路 1	主变 A 套	220 kV 线路 1 A 套	主变 B 套
$\alpha RSR$	0.2338	0.3904	0.5289	0.5594	0.7362	0.7569	0.7899
$f$	1	1	1	1	1	1	1
$\sum f$	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{R}$	1	2	3	4	5	6	7
$(\bar{R}/n) \times 100\%$	14.3	28.6	42.9	57.1	71.4	85.7	96.4
Probit	3.9331	4.4319	4.8211	5.1789	5.5651	6.0669	6.7991

**Table 5.** Grading results of state evaluation based on weighted rank sum ratio  
**表 5.** 基于加权秩和比的状态评估分档结果

等级	Probit	$\widehat{\alpha RSR}$	分档
严重	3.5 以下	<0.0339	
异常	3.5~	0.0339~	220 kV 线路 1 B 套保护、110 kV 母线保护、
注意	5~	0.4885~	110 kV 线路 2 保护、110 kV 线路 1 保护、主变 A 套保护、220 kV 线路 1 A 套保护、主变 B 套保护
良好	6.5~	0.9432~	

### 5.2. 基于加权秩和比的状态评估

对表 1 数据采用前述加权秩和比法进行计算, 所得结果如表 4 所示, 其中数据 96.4 由  $(1 - \frac{1}{4n}) \times 100\%$  得到。

运用相关和回归分析得到线性回归方程为  $\widehat{\alpha RSR} = -1.0270 + 0.3031 \times \text{Probit}$  ( $r^2 = 0.9777$ ), 方差分析结果显示  $F = 218.8944$  很大、 $P = 0.000 < 0.01$ , 因此  $\alpha RSR$  和 Probit 线性相关性较高, 所求线性回归方程非常显著。

参考文献[15] [16], 将所选保护状态分为良好、注意、异常、严重 4 档, 其结果如表 5 所示。

### 5.3. 状态评估结果的验证

根据文献[15], 对表 5 中的各档数据进行最佳分档一致性检验, 经 Bartlett 检验,  $\chi^2_{P(1)} = 0.0089 < \chi^2_{0.05(1)} = 3.84$ , 故  $P > 0.05$ , 方差一致; 对 2 档  $\alpha RSR$  均值方差分析,  $F_{P(1,5)} = 13.265 > F_{0.05(1,5)} = 6.608$ , 故  $P < 0.05$ , 各档相差显著; 对 2 档进行两两 q 检验,  $Q_{P(2,5)} = 79.42 > Q_{0.05(2,5)} = 3.2$ , 故  $P < 0.05$ , 说明各档之间差异具有统计学意义, 且注意>异常。经上述计算, 证明表 5 分档合理, 因此本文所提方法能够对继电保护的状态得到准确的评估结果。

## 6. 结论

本文在分析继电保护状态评估流程和选取评估指标的基础上, 提出了一种基于综合权重与秩和比法的继电保护状态评估新方法。该方法将 VCM 应用于确定评估指标综合权重中, 弥补了主观确定权重的局限; 利用秩和比法与综合权重相结合, 形成加权秩和比对继电保护状态进行评估, 使结果更具客观性; 通过对算例评估分档结果的一致性检验, 证实了其得到的评估结果更具有说服力。本文所提方法为智能

变电站继电保护做出准确的状态评估提供了新思路,同时也为其他二次设备的状态评估提供了借鉴,促进了二次设备状态检修技术水平的发展。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈少华, 马碧燕, 等. 综合定量计算继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 111-115.
- [2] Dai, Z.H. and Wang, Z.P. (2011) Protection Dynamic Reliability Analysis System Based on 3RF Technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, **3**, 1137-1144.
- [3] 郑涛, 王方, 金乃正. 基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.
- [4] Abbarin, A. and Fotuhi-Firuzabad, M. (2009) A Novel Routine Test Schedule for Protective Systems Using an Extended Component-Based Reliability Model. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Shanghai*, 18-19 August 2009, 97-102.
- [5] 廖瑞金, 王谦, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-74.
- [6] 吕文超, 吕飞鹏, 等. 模糊聚类法在继电保护状态检修中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 93-97.
- [7] 刘永欣, 师峰, 等. 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): 37-40.
- [8] Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M. and Sidhu, T.S. (2002) Determination of the Optimum Routine Test and Self-Checking Intervals in Protective Relaying Using a Reliability Model. *IEEE Trans on Power Systems*, **17**, 663-669.
- [9] Damchi, Y. and Sadeh, J. (2009) Considering Failure Probability for Back-Up Relay in Determination of the Optimum Routine Test Interval in Protective System Using Markov Model. *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary*, 26-30 July 2009, 1-5.
- [10] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [11] 罗毅, 周创立, 等. 多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 97-102.
- [12] 马丽, 张建华, 等. 城市配电网规划方案的多阶段综合评估方法[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 150-154.
- [13] 王奇, 常安, 等. 基于组合赋权的变权模糊输电设备状态评估方法[J]. 中国电力, 2015, 48(5): 21-25.
- [14] 敖蕾蕾, 王慧芳, 等. 基于 D-S 证据理论的输变电设备状态检修多目标群决策[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1627-1633.
- [15] 田凤调. 秩和比法及其应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 1993.
- [16] 吴旭, 张建华. 基于状态检修的 N-k 故障在线辨识及路径搜索[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 81-85.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)