

# 基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断系统研究

袁文杰<sup>1</sup>, 曲朝阳<sup>2</sup>, 李月玲<sup>1</sup>, 孟吉<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学输变电技术学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学信息工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 如何有效利用电网调度中心的大量数据进行电网故障诊断是一个重要课题。提出一种基于 Tabu-RoughSet 的电网故障诊断系统, 包含数据采集、电网故障诊断、基于 Web 的电网故障诊断结果表示三个模块。在电网故障诊断模块里, 利用 Roughset 理论对接收到的故障信息建立决策表并构成可辨识矩阵, 利用 Tabu 搜索对可辨识矩阵寻找最优解, 迅速准确地给出电网故障诊断结果。基于 Web 的诊断表示模块能够根据用户提出的查询请求采用可视化技术将诊断结果以基于网络的 Web 方式显示。实验结果表明, 该系统能快速寻找最优解, 较好地实现对电网故障的诊断。

**关键词:** 电网; Tabu 搜索; Roughset; 可辨识矩阵; 属性约简; 故障诊断

## Research on fault diagnosis system of power network based on tabu-roughset

YUAN Wen-jie<sup>1</sup>, QU Zhao-yang<sup>2</sup>, LI Yue-ling<sup>1</sup>, MENG Ji<sup>2</sup>

(1. Department of Transmission and Transformation Technology, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China ;  
2. Department of Information Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China )

**Abstract:** How to utilize the large scale data of dispatch center to solve the fault of power network effectively is very important. A new power network fault diagnosis system based on tabu-roughset is presented. It contains three modules, including data collecting, power network fault diagnosis and Web-based result display. In power network module, it utilizes roughset theory to form decision table on collected fault information, then to construct a discernibility matrix. Using tabu search can find the optimal result from the discernibility matrix, thus getting the correct power fault diagnosis quickly. The module of Web-based result display can provide the diagnosis with Web service according to the user's request by using visualization techniques. Experimental results show that the system based on the new method can find the best answer and better to achieve the power fault diagnosis.

**Key words:** power network; tabu search; roughset; discernibility matrix; attributes reduction; fault diagnosis

中图分类号: TM72; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)23-0032-04

## 0 引言

随着以高电压、交直流混合、跨区域联网等为特征的大电网时代的到来, 电力走向市场, 电网运行承担的风险(事故发生的概率与其可能造成的后果的乘积)在加大, 人们对电网的安全运行和供电可靠性的要求越来越高, 这就使得为调度、检修人员提供电网故障诊断系统具有重要的理论和现实意义。电网故障诊断, 就是利用可监测到的保护装置等信息来识别故障元件及判别误动、拒动装置, 其重点是故障元件的识别问题<sup>[1]</sup>。电网故障诊断尤为重要, 特别是当电力系统发生多重故障且主保护拒动时, 后备保护动作扩大了停电区域, 此时, 需迅速、准确地定位故障, 为故障恢复赢得时间并提供可靠依据。

目前, 国内外对电网系统的故障诊断方法进行了较为深入的研究, 从总体上分为以下几种: 专家系统<sup>[2]</sup>、模糊集<sup>[3]</sup>、人工神经网络<sup>[4]</sup>、模拟退火<sup>[5]</sup>以及遗传算法<sup>[6]</sup>等方法。现从提高电网故障诊断的实时性、可靠性和容错性出发, 提出一种基于 Tabu-RoughSet 的电网故障诊断新方法。

## 1 电网故障分析的一般流程

电网故障诊断是以故障后所表现出的征兆信息为基础。电网发生故障时, 首先反映是电网各节点电压、支路电流或功率等电气量的变化, 之后是保护装置依据电气量信息对故障的判断生成的保护动作信息, 然后是由保护跳开相应的开关来隔离故障的断路器动作信息。

电网故障时, 根据主保护、后备保护和断路器的

配合动作关系可得如图 1 所示的实际故障信息序列。

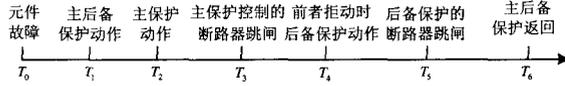


图 1 按时间顺序排列的电网故障信息

Fig.1 Fault information of power network based on time stamp

当电网发生故障时,可以收集到保护动作信息、保护动作时间  $T_2$ 、 $T_4$  以及断路器动作信息。电网故障分析的目的就是对收集到的这些信息进行快速、准确的故障诊断。但是,当电网故障发生时,这些信息存在很多不准确性,如存在监测信息不完备,信道故障等因素,并且系统本身接收到的数据里还包含着误动、拒动的信息,因此如何快速准确地进行电网故障诊断就显得尤为重要。

## 2 Tabu-Roughset 基本原理

### 2.1 Tabu 搜索

Tabu 搜索算法是一种成功的智能优化算法,由 Fred Glover 在 1986 年首次提出。Tabu 搜索从一个初始可行解  $E_0$  (为  $N \cdot T$  维向量) 出发,选择一系列的特定搜索方向(移动)作为试探,从当前解的邻域中随机产生一系列试验解  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 选择其中最优化解  $E^*$  作为当前解,重复迭代,直到满足一定的终止准则。Tabu 搜索方法的三个基本要素是移动、Tabu 表和释放水平<sup>[7,8]</sup>。

### 2.2 Roughset

Roughset 是波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的一种处理不确定性知识的数学理论,它能有效分析和处理各种不完备信息并从中发现隐含的知识。在一个决策系统中,各个条件属性之间往往存在着某种程度上的依赖和分类,约简可理解为在不丢失关键信息的前提下,以最简单的决策属性对条件属性集合进行分类<sup>[9]</sup>。

考虑 Roughset 决策表系统  $S = \{U, R = C \cup D, V, f\}$ , 式中  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  是要处理问题的论域;  $R$  是对象的属性集合,分为两个不相交的子集  $C = \{c_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  和  $D = \{d\}$ , 分别称为条件属性集和决策属性集;  $V = \{c_i(x_j)\}$  为对象  $x_j$  在属性  $c_i$  上的取值,  $\forall a \in R, x \in U$ , 则函数  $f_a(x) \in V_a$ 。这样,  $U$  中的每个对象  $x$  都可以用一个基于属性值  $R$  的矢量表示,而属性值  $R$  表明对象  $x$  可以获得的的知识信息。

设  $P$  和  $Q$  为  $U$  中的等价关系 (IND(P)),  $Q$  的  $P$

正域记为  $POS_C(Q)$ , 如果满足:  $C1 \subseteq C, C1 \neq \emptyset$ ;  $POS_{IND(C1)}(IND(D)) = POS_{IND(C)}(IND(D))$ ; 不存在  $C2 \subseteq C1$ , 使  $POS_{IND(C2)}(IND(D)) = POS_{IND(C1)}(IND(D))$ ; 则称  $C1$  为  $C$  相对于决策属性集  $D$  的约简<sup>[10]</sup>。

### 2.3 对可辨识矩阵进行 Tabu-Roughset 搜索和约简

在 Roughset 理论中,可辨识矩阵是一个非常重要的概念,它将任意复杂的信息都容纳于一个矩阵中却不影响原来系统中潜在的知识,因此可以大大提高分析系统知识的能力<sup>[11]</sup>。

$A_D(i, j)$  表示可辨识矩阵中第  $i$  行  $j$  列的元素,则可辨识矩阵  $A_D$  定义为:

$$A_D(i, j) = \begin{cases} \{c_k | c_k \in (x_i) \neq c_k(x_j)\} & d(x_i) \neq d(x_j) \\ 0 & d(x_i) = d(x_j) \end{cases}$$

其中:  $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。显然,可辨识矩阵是对称矩阵,只须考虑其上(下)三角矩阵。定义用于属性约简的可辨识上(下)三角矩阵,矩阵中元素的取值为  $\{0, 1\}$ 。若  $R_1$  是  $R_2$  的属性子集,对象  $x_i$  和  $x_j$  可辨识,即可以通过  $R_1$  中某些条件属性的取值不同加以区分时,对应元素取值为 1; 否则,对应元素取值为 0。如果元素取值全为 1,表明属性子集  $R_1$  与原属性子集  $R_2$  具有相同的分类能力,则  $R_1$  为  $R_2$  的一个约简。

基于 Tabu-Roughset 的属性约简算法步骤如下:

step1 Tabu 搜索初值选取。随机生成一初始可行解  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_i = 1$  或 0 表示  $i$  个属性在或不在属性子集中,令当前最优解  $Temp = X$ , 最优解  $Best = Temp$ , 迭代步数  $k$  置初值 1, Tabu 表  $T = \emptyset$ 。

step2 生成候选解集合。通过每次加入或去掉一个属性生成  $X$  的邻域,从邻域中找出一定数量的解作为候选解集合  $N(X)$ 。可以取邻域中全部解或者随机取一部分解作为候选解集合并利用属性约简的可辨识上(下)三角矩阵进行解的可行性检查。

step3 Tabu 搜索: ①若  $N(X) = \emptyset$ , 转 step1 重新生成候选集; 否则,从  $N(X)$  中找出最优解  $Y$ 。目标函数定义为解的各个基本取值的和,数值越小,则解越好。②若当前最优解  $Y \in T$ , 并且  $Y$  不满足激活条件,令  $N(X) = N(X) - \{Y\}$ , 转①; 否则,令  $X = Y$ , 若  $Y$  优于  $Temp$ , 则  $Temp = Y$ 。若  $Temp$  优于  $Best$ , 则  $Best = Temp$ 。

Step4 修改 Tabu 表。采用 FIFO 队列管理方式,在每次迭代结束时,将刚刚实现的 Tabu “移动”的反方向 “移动”放入  $T$  中。

step5 根据终止条件进行判断。若满足终止条件,在当前的检验周期内,目标函数最优化则输出

Best; 否则, 令  $k=k+1$ , 转 step2。

由于 Tabu 搜索算法是一种有效的启发式优化技术, 因此可以为寻求最小约简提供一种有效的途径。利用可辨识矩阵对 Tabu 搜索属性约简算法求得的每一个解进行检查, 确保其代表的属性子集是原属性子集的约简。

### 3 基于 Tabu-Roughset 电网故障诊断系统

#### 3.1 基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断算例

下面以一个具体的算例来验证引入 Tabu-Roughset 电网故障诊断方法后可以迅速进行电网故障定位。

图 2 表示一个简单的电网测试系统。该系统划分为三个区域 Sec1, Sec2 和 Sec3。Sec1 配有距离保护 RR1, 为 Sec2 和 Sec3 提供后备保护。CO1 是过流保护, CD1、CD2 是主变差动保护, CB1, CB2 和 CB3 是断路器。根据保护动作原理, 只考虑单一故障时列出故障诊断决策表(表 1), 由保护和断路器的信号组成该决策表的条件属性集 {CB1, CB2, CB3, CO1, RR1, CD1, CD2}。表中“1”为断路器打开或保护动作, “0”为断路器闭合或保护未动作; Sample4 和 Sample5 为断路器拒动情况, Sample6 为保护拒动情况; Sec2-3 为故障发生在 Sec2 或 Sec3; NO 为无故障。

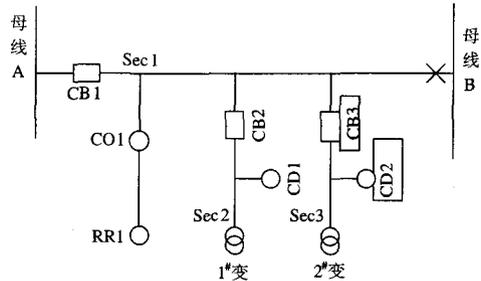


图 2 测试算例电网系统图

Fig.2 System of power network for test

表 1 故障诊断决策表

Tab.1 Decision table of fault diagnosis

Sample	CB1	CB2	CB3	CO1	RR1	CD1	CD2	Fault
1	1	0	0	1	0	0	0	Sec1
2	0	1	0	0	0	1	0	Sec2
3	0	0	1	0	0	0	1	Sec3
4	1	0	0	0	1	1	0	Sec2
5	1	0	0	0	1	0	1	Sec3
6	1	0	0	0	1	0	0	Sec2-3
7	0	0	0	0	0	0	0	NO

通过将电网故障决策表中每个样本记录与所有其它样本记录进行决策属性值和条件属性值的比较得到对应的  $7 \times 7$  可辨识矩阵(表 2), 由于可辨识矩阵的对称性, 这里只列出上三角矩阵。

表 2 电网故障诊断决策表的可辨识矩阵

Tab.2 Discernibility matrix of power network fault diagnosis

0	{CB1, CB2, CO1, CD1}	{CB1, CB3, CO1, CD2}	{CO1, RR1, CD1}	{CO1, RR1, CD2}	{CO1, RR1}	{CB1, CO1}
0		{CB1, CB3, CD1, CD2}	{0}	{CB1, CB2, RR1, CD1, CD2}	{CB1, CB2, RR1, CD1}	{CB2, CD1}
	0		{CB1, CB3, RR1, CD1, CD2}	0	{CB1, CB3, RR1, CD2}	{CB3, CD2}
		0		{CD1, CD2}	{CD1}	{CB1, RR1, CD1}
			0		{CD2}	{CB1, RR1, CD2}
					{0}	{CB1, RR1}
						0

利用基于 Tabu-Roughset 的电网故障决策表属性约简算法, 可以快速得到电网故障诊断决策表可辨识矩阵的 3 个最小属性约简, 结果见表 3。

表 3 基于 Tabu-RoughSet 属性约简结果

Tab.3 Result of attributes reduction based on Tabu-Roughset

序号	基于 Tabu-RoughSet 最小属性约简
1	{ CB1, CO1, CD1, CD2 }
2	{ CO1, RR1, CD1, CD2 }
3	{ CB1, RR1, CD1, CD2 }

以 {CB1, CO1, CD1, CD2} 为例, 可以得到表 4 所示

的电网故障诊断结果。这表明在辨识故障能力不变的情况下, 故障诊断所需的条件属性信息就由原来的 7 个减为 4 个, 其他属性信息即使出现误警报或者丢失也不会影响故障诊断的最终结果。

#### 3.2 与其它方法的比较

目前, 专家系统方法应用较多, 但是难以获得完备的知识库, 同时存在实时效果差的缺点; 模糊集理论存在如何确定各种不定因素的模糊程度及如何建立完善的模糊推理诊断等问题; 人工神经网络故障诊断性能取决于样本的完备代表性, 对诊断结果缺乏解释能力; 模拟退火算法易于陷入局部最优解;

如何建立合理的电网故障诊断数学模型是使用遗传算法的主要“瓶颈”。在解的优劣程度相当的情况下, 利用 Tabu-Roughset 电网故障诊断方法寻找解的搜索速度一般快于遗传和模拟退火等算法。

表 4 诊断结果

Tab.4 Diagnostic results

Sample	CO1	CB1	CD1	CD2	Fault
1	1	1	0	0	Sec1
2	0	0	1	1	Sec2
3	0	0	0	1	Sec3
4	0	1	1	0	Sec2
5	0	1	0	1	Sec3
6	0	1	0	0	Sec2-3
7	0	0	0	0	NO

### 3.3 基于 Web 界面的系统结构

基于 Web 界面的系统结构(见图 3)包含以下三个模块的功能: 数据采集模块、基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断模块、基于 Web 的诊断表示模块。

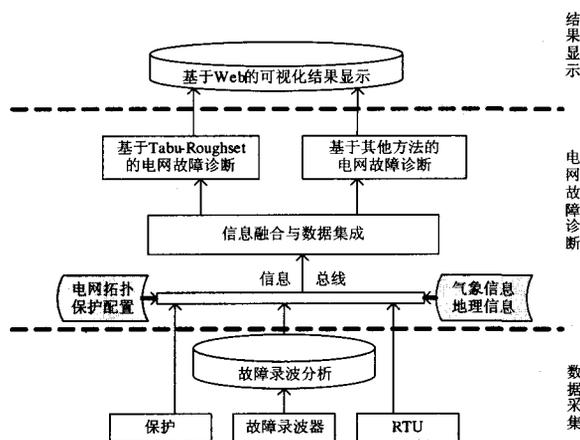


图 3 系统设计框图

Fig.3 System design frame

数据采集模块是电网故障诊断系统的底层, 负责数据采集, 通过通信环节将采集到的信息输送到电网故障诊断平台, 为故障诊断提供基础测量数据; 基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断模块对底层输入的数据进行计算和分析处理, 判定电网故障区域, 得到系统需要的准确的状态信息; 基于 Web 的诊断表示模块能够根据用户提出的查询请求, 采用可视化技术将诊断结果以用户理解的基于网络的 Web 方式显示, 向用户提供数据分析和计算得出的结果。

### 4 结语

基于 Tabu-Roughset 的电网故障诊断系统利用

Roughset 理论对接收到的故障信息建立决策表并构成可辨识矩阵, 利用 Tabu 搜索对可辨识矩阵寻找最优解, 通过对电网量测系统的数据进行计算和分析, 能够快速有效寻找电网故障, 为故障的及时诊断和恢复提供有力的保证; 采用基于 Web 界面的系统结构, 以形象直观的方式向用户提供电网故障诊断结果, 为电网调度员提供相关决策分析的基础, 有效提高电网故障诊断水平, 具有很好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 徐青山. 电力系统故障诊断及恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
XU Qing-shan. Electric Power System Fault Diagnosis and Restore[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [2] ANGELI C. Application of a Real - time Expert System for Fault Diagnosis[M]. Berlin: Lecture Notes in Computer Science Springer, 2000.
- [3] 束洪春, 王晶, 葛耀中. 基于故障投诉电话信息的配电网故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11).  
SHU Hong-chun, WANG Jing, GE Yao-zhong. Study of a Fault Location Based on Trouble Calls for Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11).
- [4] CHEN Kok- yeng, LIM Chee- peng, LAI Weng- kin. Fault Detection and Diagnosis Using the Fuzzy Min-max Neural Network with Rule Extraction[M]. Berlin: Computer Science Springer-Verlag, 2004.
- [5] 卢耀川, 廖迎春, 陈星莺, 等. 基于模拟退火法的网络重构技术[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (1): 28-31.  
LU Yao-chuan, LIAO Ying-chen, CHEN Xing-ying, et al. Distribution Reconfiguration Technology Based on GA and SA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (1): 28-31.
- [6] 武晓今, 朱仲英. 基于模式记忆的免疫遗传算法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 8-100.  
WU Xiao-jin, ZHU Zhong-ying. Schema control for Immune Genetic Algorithm[J]. Computer Simulation, 2005, 22(8): 98-100.
- [7] Chelouah R, Siarry P. Tabu Search Applied to Global Optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 123(2): 256-270.
- [8] Glover F, Laguna Metal. Tabu Search [M]. Basel, Switzerland: Science Publisher, 1998.
- [9] Pawlak Z. Vagueness and Uncertainty- a Rough Set Perspective[J]. Computational Intelligence, 1995, 10(2).
- [10] Pawlak Z. Rough sets[J]. Communications of ACM, 1995, 38(11): 89-95.

(下转第 64 页 continued on page 64)

Technology in Monitoring System of Sistribution Transformer[J].Relay, 2004,32(24):37-40.

[5] Britton J P. Devos N.CIM-Based Standards and CIM Evolution[J].IEEE Trans on Power Systems,2005,20(2): 758-764.

[6] 郭上华,刘保玉.GPRS网络在配电自动化中的应用[J].继电器, 2005, 23(8): 56-60.  
GUO Shang-hua, LIU Bao-yu.Application of GPRS Network to Power Distribution Automation System[J]. Relay, 2005,23(8): 56-60.

[7] 许卫兵.基于SOA的电力系统信息集成平台的研究与实现[J].自动化仪器与仪表, 2008, (1): 34-37.  
XU Wei-bing.

[8] 刘英丹,董传良.利用Web Service实现企业应用集成[J].计算机应用, 2003, 23(7): 124-126.  
LIU Ying-dan,DONG Chuan-liang.Implement EAI with Web Service[J].Computer Applications, 2003,23(7): 124-126.

[9] 苗青,陈钢.基于WebService的高校应用集成[J].计算机技术与发展, 2008, 18(3): 17-20.  
MIAO Qing, CHEN Gang. Application Integration Based on Webservice in Universities[J]. Computer Technology and Development, 2008,18(3):17-20.

[10] 占梁梁,张勇传基于SOA的水轮发电机组电子诊断系统设计[J].电力系统自动化, 2007, 31(13): 96-100.  
ZHAN Liang-liang, ZHANG Yong-chuan. Design of a SOA-oriented E-diagnosis System for Hydroelectric Generating Sets[J].Automation of Electric Power System, 2007,31(13):96-100.

[11] 毛新生. SOA原理、方法、实践[M].北京:电子工业出版社, 2007.  
Beijing: Publishing House of Electronics Industry

[12] 张慎明,刘国定. IEC 61970 标准系列简介[J]. 电力系

统自动化, 2002, 26(24): 1-6.  
ZHANG Shen-ming, LIU Guo-ding.Introduction of Standard IEC 61970[J].Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.

[13] 简斌,左荣国,等.基于SOA的中小制造企业应用集成系统研究[M].计算机工程, 2007, 33(5): 243-245.  
JIAN Bin, ZUO Rong-guo. SOA-based Application Integration System of Small and Medium-sized Manufacture Enterprises[M].Computer Engineering, 2007,33(5):243-245.

[14] 索红光,左利云.基于UDDI的服务代理的设计与实现[J].计算机工程与设计, 2007, 28(18): 4526-4528.  
SUO Hong-guang, ZUO Li-yun. Design and Implementation on Service Broker Based on UDDI[J]. Computer Engineering and Design,2007,28(18):4526-4528.

[15] 马晓轩,怀进鹏.基于UDDI的应用服务注册中心的设计与实现[J].北京航空航天大学学报 2005, 31(9): 1040-1044.  
MA Xiao-xuan,HUAI Jin-peng. Design and Implementation on UDDI-based Application Service Center[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(9):1040-1044.

收稿日期: 2008-05-14; 修回日期: 2008-07-13

作者简介:

周芝庭(1968-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为机械制造及其自动化;

蒋宏图(1972-),男,工程师,主要从事电力系统及其自动化的研究与开发;

熊晔(1981-),男,学士,助理工程师,主要进行电力系统自动化的研发。

(上接第 17 页 continued from page 17)

[2] 何首贤,葛廷友,姜秀玲. 供电技术[M].北京:中国水利水电出版社, 2005.

[3] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社, 2002.

[4] 贺家李. 电力系统继电保护原理(第三版)[M].北京:中国电力出版社, 2000.

[5] 潘绵英,臧潘颖. 论两种不对称短路的对偶性[J]. 济南:山东建材学院学报, 1994

[6] 王宝华. 电力系统故障分析[M].北京:中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2008-03-21; 修回日期: 2008-05-03

作者简介:

刘云鹏(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: yun5136@163.com

孟庆臣(1965-),男,本科,工程师,从事变电运行、检修研究管理工作。

(上接第 35 页 continued from page 35)

[11] 刘同明.数据挖掘技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,2001.  
LIU Tong-ming. Data Mining Technology with Applications[M]. Beijing:National Defence Industry Press,2001.

袁文杰(1971-),女,讲师,硕士生,研究方向为计算机应用技术、电网故障诊断; E-mail: helen\_99\_00@163.com

曲朝阳(1964-),男,教授,硕士生导师,研究方向为计算机网络、电力系统应用;

李月玲(1965-),女,副教授,研究方向为电力分析、电力系统自动化。

收稿日期: 2008-04-07; 修回日期: 2008-06-19

作者简介: