

基于不完备信息系统规则提取 和 Petri Nets 的电力变压器故障诊断

荣雅君, 赵杰, 王健, 吴闻婧, 葛葆华

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 鉴于电力变压器故障信息具有不完备性及复杂性, 将不完备信息系统规则的提取与 Petri Nets (PNs) 有机结合在一起进行变压器故障诊断。利用不完备信息规则提取对信息表进行知识的简化与故障特征的压缩, 获得最小诊断规则, 并利用此规则建造 PNs 的模型。同时利用 PNs 实现并行推理, 对变压器进行快速分析。故障实例分析表明, 文中所提出的智能方法具有准确性, 有效性。

关键词: Petri Nets; 电力变压器; 故障诊断; 规则提取; 不完备信息系统

Fault diagnosis of transformer based on incomplete information system rule extraction and Petri Nets

RONG Ya-jun, ZHAO Jie, WANG Jian, WU Wen-jing, GE Bao-hua

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Due to the incompleteness and complexity of fault information for power transformer, based on complementary strategy, rule extraction in incomplete information system and Petri nets (PNs) are integrated for synthetic fault diagnosis of transformer in this paper. Through rule extraction reducing information knowledge and fault symptoms, table to simplify the minimal diagnostic rules can be mined, then based on this rules, the Petri nets are built. Meanwhile, parallel reasoning can be used to analyze the transformers fast. The correctness and effectiveness are validated by the analysis result of practical fault examples.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hebei Province (No.07M007).

Key words: Petri Nets; power transformer; fault diagnosis; rule extraction; incomplete information system

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0001-04

0 引言

大型电力变压器是电力系统重要的变电设备, 其运行状态直接影响系统的安全性, 因此建立智能诊断系统来保证变压器的安全可靠运行, 具有非常重要的意义。

文献[1]提出了用经典粗糙集理论对完备的变压器信息决策表进行属性约简和值约简, 并从中提取最小诊断规则, 利用此规则和 PNs 相结合, 实现对变压器的故障诊断。而实际变压器故障的复杂性与运行环境的恶劣, 又造成了故障信息的不完备或检测信息缺失, 鉴于上述原因, 本文将不完备信息系统作为研究对象, 对经典粗糙集理论进行扩展,

实现不完备信息系统属性约简和规则的提取, 并将其运用到变压器故障诊断中。

PNs 能够解释系统的结构和动态行为的重要信息, 图形化地表达系统的模型, 基于 PNs 的故障诊断方法可将知识表示和诊断推理融为一体, 完成描述性知识和过程性的诊断推理, 通过简单的矩阵计算即可快速获得诊断结果。但是对于变压器故障诊断而言, 系统的信息量非常的大, 而且具有较大的冗余性和不完备性, 这在一定程度会影响 PNs 建模的准确性和高效性。为此, 本文将不完备信息规则提取与 PNs 理论结合起来, 进一步探讨二者在知识表达上的互补性, 并一同运用于变压器故障诊断。故障实例表明, 本文所运用的智能方法可以有效地进行智能推理, 减小诊断信息的冗余性, 提高了诊断效率。

基金项目: 河北省自然科学基金资助 (07M007)

1 不完备信息系统规则提取

1.1 不完备信息系统的基本定义

定义 1 四元组 $S = \langle U, A, V, f \rangle$ 是决策信息系统, 其中, U 是论域, 是对象的非空有限集合, $A = C \cup D$, $C \cap D = \emptyset$, C 为条件属性集, D 为决策属性集. V 为属性值的集合, $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数, 它指定 U 中每一个对象 x 的属性值. 若存在 $x \in U$, $a \in C$, $f(x, a)$ 未知 (记作: $f(x, a) = *$), 则称信息系统是不完备的; 否则称信息系统是完备的^[2].

定义 2 在不完备信息系统 S 中, 对于属性子集 $\forall \phi \subset B \subseteq C$, 定义相容关系为:

$$SIM(B) = \{(x, y) \in U \times U : \forall a \in B, (f(x, a) = f(y, a)) \vee (f(x, a) = *) \vee (f(y, a) = *)\} \quad (1)$$

记 $S_B(x) = \{y \in U | (x, y) \in SIM(B)\}$, 对于 B 来说, $S_B(x)$ 是与 x 可能不可区分的对象的最大集合.

定义 3 函数 $\partial_B: U \rightarrow P(V_d)$ 定义为:

$$\partial_B(x) = \{i | i = f(y, d), y \in S_B(x)\} \quad (2)$$

称为不完备决策表 $S = \langle U, A, V, f \rangle$ 的广义决策函数. 其中 $P(V_d)$ 表示 V_d 的幂集^[3].

若对任意 $x \in U$, 有 $|\partial_C(x)| = 1$ ($|X|$ 表示集合 X 的基数), 则称 S 是一致的, 否则称它是不一致的.

1.2 决策表约简区分矩阵算法

定义 4 不完备信息系统 S , $(x_i, x_j) \in U \times U$, $B \subseteq C$, $d \in D$, $1 \leq i, j \leq n = |U|$, 则区分矩阵元素定义^[4]:

$$m_{ij} = \begin{cases} \{(\exists a \in B \wedge ((a(x_i) \neq *) \wedge (a(x_j) \neq *) \\ \wedge a(x_i) \neq a(x_j))) \wedge (d(x_i) \neq d(x_j)) \\ \wedge (\min\{\partial_C(x_i), \partial_C(x_j)\} = 1)\} \\ \phi & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

区分矩阵约简步骤:

- (1) 计算决策表可区分矩阵.
- (2) 对于可区分矩阵中所有非空集合的元素建立析取逻辑表达式.
- (3) 将所有析取逻辑表达式进行合取运算, 得到一个合取范式.
- (4) 将合取范式转化成析取范式.
- (5) 输出属性约简结果, 其中析取范式中的每个合取项对应一个属性约简的结果, 每个合取项中所包含的属性组成约简后的条件属性集合.

1.3 规则提取矩阵算法

定义 5 S 是一个不完备决策信息表, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 定义条件属性子集 $B \subseteq C$ 的相容矩阵 M_B 如下:

$$M_B = (m_{ij}^B)_{n \times n} = \begin{cases} 1 & x_j \in S_B(x_i) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

定义 6 S 是一个不完备决策信息表, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 定义 S 的决策属性矩阵 M_D 如下:

$$M_D = (m_{ij}^D)_{n \times n} = \begin{cases} 1 & f(x_j, d) \in \partial_C(x_i) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

条件属性子集相容矩阵表达了这个条件属性子集所确定的信息系统中所有对象的相容关系; 而决策属性矩阵描述了所有对象间确定不同决策属性值的区分关系^[5].

不完备信息系统规则提取的矩阵算法:

$S = \langle U, A, V, f \rangle$ 是一个不完备信息决策表, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $C_1 \subseteq C$, M_{C_1} , M_D 为 C_1 , D 的条件属性和决策属性矩阵. 规则提取按如下步骤实现^[6]:

- (1) 计算 S 的决策矩阵和条件属性相容矩阵.
- (2) 取每一个条件属性相容矩阵第 i 行与决策属性矩阵的第 i 行相交.
- (3) 如果相交的结果与条件属性等价矩阵第 i 行不一致, next i .
- (4) 否则以对象 i 的属性 $c_c \in C_1$, $d_k \in D$ 的取值生成规则: $\wedge(c_c = v_{c_c}) \wedge (d_k = v_{d_k})$, $c_c \in C_1$, $d_k \in D$. 将第 i 行置零. 求出所有的一阶约简规则.
- (5) 对所有的非零的一阶等价矩阵求交集得到所有的二阶等级矩阵用方法(2~4)求出所有的二阶约简规则.
- (6) 反复步骤(2~4)求出所有三阶以上的规则.

2 PNs 知识表示和推理机

2.1 PNs 的定义

定义 6 一个基本 PNs 的结构 N 是一个七元组 $N = (P, T, K, \alpha, \beta, I, O)$. 在此表达式中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ($n \geq 0$) 是库所节点的有限集合; $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ($m \geq 0$) 是转移节点的有限集合; $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ 是库所初始托肯 (Token) ($m \geq 0$) 的有限集合; $\alpha \subseteq (P \times T)$ 和 $\beta \subseteq (T \times P)$ 表示库所到迁移和迁移到库所的有向弧; I 和 O 是迁移的输入库所和输出库所的有限集合.

2.2 PNs 的推理机

PNs 的矩阵表示推理机, 矩阵运算推理机见参考文献[7].

3 基于规则提取和 PNs 的变压器故障诊断模型

3.1 规则提取与 PNs 结合

在变压器故障诊断中由于变压器故障征兆与故

障原因间的关系存在着不确定性、复杂性和模糊性, 所以难以借助确定性的数学模型来进行描述。这些问题正好是粗糙集理论可以解决的。通过对不完备信息系统规则的提取可以对故障信息中的冗余信息进行约简, 并进行更深度的数据挖掘, 找到决策表中隐藏的潜在规则(即“if...then...”规则), 在不影响诊断精度的情况下, 减少工作量, 降低不确定信息的影响, 提高故障诊断准确率。

不难看出, 不完备信息决策表和 PNs 本质上都蕴含着“if...then...”规则, 只是用不同的方法加以

描述。正是基于二者间的这种本质联系, 可以利用粗糙集较强的数据分析、压缩能力和容错性, 从大量的诊断知识中获得最小诊断规则, 用来建立优化的 PNs 模型, 利用 PNs 处理并行推理的能力来实现高效的变压器故障诊断。这样将粗糙集中不完备信息的规则提取与 PNs 的功能作了有效的结合, 有利于充分发挥它们各自的优点^[8]。

3.2 基于不完备信息规则提取的 PNs 模型

文献[9]给出了具有代表性的变压器故障信息决策表。如表 1 所示。

表 1 变压器故障样本集

Tab.1 A set of transformer fault samples

U	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	D
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	D ₀
2	1	2	0	0	*	*	1	0	1	D ₁
3	*	1	0	1	0	0	0	1	1	D ₂
4	0	2	*	0	0	1	0	0	0	D ₃
5	0	0	1	0	2	1	1	1	1	D ₄
6	*	0	1	1	0	*	0	1	0	D ₅
7	*	2	1	1	0	1	1	0	0	D ₆
8	1	0	1	0	2	1	1	0	1	D ₇
9	0	0	0	1	2	1	1	1	*	D ₈
10	1	0	*	0	2	*	0	0	1	D ₉
11	0	2	0	*	0	*	*	1	*	D ₁₀
12	0	1	0	0	0	0	0	0	*	D ₁₁
13	0	1	0	1	2	0	1	0	1	D ₁₂

(1)条件属性: C₁ 为铁心接地电流; C₂ 为 DGA 诊断结果为过热; C₃ 为绕组直流电阻三相不平衡; C₄ 为变压器本体油中微水含量; C₅ 为 DGA 诊断结果放电; C₆ 为瓦斯继电保护动作; C₇ 为局部放电参数; C₈ 为 CO/CO₂ 比值; C₉ 为绕组吸收比, 极化比参数。

(2)决策属性: D₀ 为没有故障; D₁ 为铁心多点接地; D₂ 为绝缘老化; D₃ 为漏磁引起发热或磁屏蔽过热; D₄ 为匝绝缘损伤并匝间短路; D₅ 为绝缘受潮; D₆ 为分接头开关及引线缺陷; D₇ 为悬浮放电; D₈ 为围屏放电; D₉ 为线圈变形并匝间短路; D₁₀ 为裸金属过热; D₁₁ 为变压器油流受阻引起过热; D₁₂ 为有载分接头开关渗漏。

U 表示样本分类, 条件属性 C₂ 中 1 表示中低温过热, 2 表示高温过热; C₅ 中 1 表示低能放电, 2 表示高能放电, 0 均表示不出现此故障征兆; 其它属性中, 1 表示出现该故障征兆, 0 表示不出现, *

表示该故障征兆缺失。

由于在变压器故障样本中存在着故障信息的冗余性和不确定性, 所以有必要对其样本进行约简。根据区分矩阵属性约简步骤, 得到 6 种最小属性约简集合, 分别为: {C₂, C₃, C₅, C₈, C₉}, {C₂, C₃, C₈, C₉, C₁₄}, {C₂, C₄, C₅, C₈, C₉}, {C₂, C₄, C₈, C₉, C₁₄}, {C₁, C₂, C₄, C₈, C₉}, {C₁, C₂, C₃, C₈, C₉}, 其中核值属性为 {C₂, C₈, C₉}。

根据不完备信息系统的规则提取矩阵算法, 从集合 {C₂, C₄, C₅, C₈, C₉} 中提取出 28 条最小故障诊断规则。这就为在不完整特征信息下的变压器故障诊断提供了一条新的思路, 即利用故障特征信息的冗余性, 避开了信号提取困难或受干扰较为强烈的那些特征信息, 从而达到准确诊断的目的。故障诊断规则如下所示:

$$\begin{aligned}
 &C_2 = 0, C_5 = 0, C_8 = 0 \rightarrow D_0; \\
 &C_2 = 0, C_4 = 0, C_5 = 0 \rightarrow D_0; \\
 &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 &C_4 = 0, C_5 = 2, C_8 = 1 \rightarrow D_4
 \end{aligned}$$

$$C_2 = 0, C_4 = 0, C_8 = 1 \rightarrow D_4$$

$$\begin{matrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_2 = 1, C_5 = 2 \rightarrow D_{12}; \\ C_2 = 1, C_8 = 1 \rightarrow D_{12}; \end{matrix}$$

根据提取的变压器故障样本的决策规则，可以得到 PNs 模型结构，如图 1 所示。

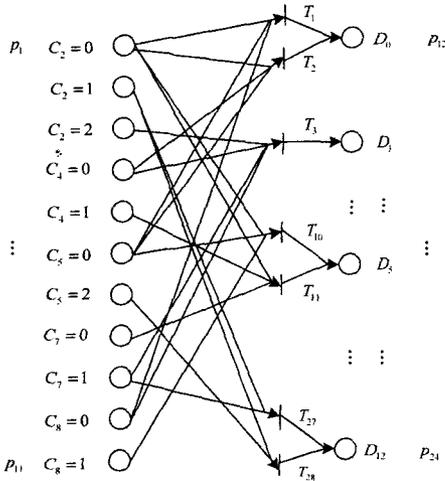


图 1 变压器故障诊断 PNs 模型

Fig.1 The PNs model structure of transformer fault diagnosis

4 实例分析

根据参考文献[10]给出的故障实例，对本文的方法进行仿真验证。根据故障数据可得 $C_3 = 1$ ， $C_4 = 0$ ， $C_5 = 2$ ， $C_8 = 1$ ， $C_9 = 1$ 。由图 1 形成的输出映射矩阵 D^+ 、输入映射矩阵 D^- 、连接输入映射矩阵 D_c^- 、非连接输入映射矩阵 D_d^- 和非连接邻接矩阵 D_{dw} 如下：

$$D^+ = \begin{bmatrix} 00000000000000000000000000000000 \\ 00000000000000000000000000000000 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 00000000000000000000000001110000 \\ 00000000000000000000000000001111 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 1100000011111001011000000000 \\ 00011100000000000000001111101 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 00000000000000000000000000000000 \\ 00000000000000000000000000000000 \end{bmatrix}$$

$$D^- = \begin{bmatrix} 1100000011111001011000000000 \\ 00011100000000000000001111101 \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 00000000000000000000000000000000 \\ 00000000000000000000000000000000 \end{bmatrix}$$

$$D_c^- = D^- , D_d^- = 0 , D_{dw} = D^+ \cdot (D_d^-)^T .$$

由给定的测试结果，可得初始托肯矩阵：

$$H_0 = [00010010001000000000000000]$$

经 PNs 的运算得：

$$H_1 = [00010010001000010000000000]$$

诊断结果为第五种故障，匝绝缘损伤并匝间短路，与实际情况相符。

5 结论

变压器故障诊断是一个复杂的信息融合过程，故障特征之间具有内在关联性与冗余性，采用不完备信息规则提取实现变压器故障特征的压缩，压缩后的特征具有与原来相同的分类能力，得出的主要特征也与实际相符。这为以往依赖先验知识进行诊断的智能方法，有效地压缩了输入空间，降低了知识获取的难度，提高了训练与计算的速度。本文通过规则提取获取约简知识来建立 PNs，能够实现最优的网络结构并充分发挥网络的并行快速处理能力，大大提高了诊断的效率，这在变压器故障诊断中实现粗糙集理论与智能方法之间的智能互补进行了有益的探索。

参考文献

- [1] 王楠,律方成,刘云鹏,等.基于决策表约简的变压器故障诊断 Petri 网络模型及其应用研究[J].电工技术学报,2003,18(6):88-92.
WANG Nan,Lu Fang-cheng,LIU Yun-peng, et al. Study on Application of Petri Nets Model of Transformer Fault Diagnosis Based on Decision Table Reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003,18(6):88-92.
- [2] 王庆东,陈建.不完备信息系统的粗糙集分解方法[J].计算机工程,2007,33(24):41-43.
WANG Qing-dong,CHEN Jian. Decomposition Approach in Incomplete Data System Based on Rough Set[J].Computer Engineering,2007,33(24):41-43.
- [3] 黄文涛,王伟杰,赵学增,等.从不完备数据中获取诊断规则的粗糙集方法[J].电力系统自动化,2005,29(14):49-54.
HUANG Wen-tao,WANG Wei-jie,ZHAO Xue-zeng, et al. Extracting Optimal Generalized Decision Rules for Fault Diagnosis from Incomplete Data based on Rough Set[J].Automation of Electric Power Systems, 2005,19(14):49-54.
- [4] 张腾飞,王锡淮,肖健梅.不完备信息系统的一种属性相对约简算法[J].计算机工程,2007,33(9):184-186.
ZHANG Teng-fei,WANG Xi-huai,XIAO Jian-mei. Algorithm for Attribute Relative Reduction in Incomplete Information System[J].Computer Engineering, 2007,33(9): 184-186.

(下转第 10 页 continued on page 10)

- [4] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A New Criterion for Earth Fault Line Selection Based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [5] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Study on Adaptively Choosing Fault line Under Single-phase to Grounded Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [6] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79.
PAN Lu, Lü Yan-ping, YU Fang, et al. Fault Line Selection in Non Solidly Earthed Network Based on Phase-frequency Characteristic and Multi-frequency Band Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 76-79.
- [7] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英. 基于小波包分析的配电网选线新方法[J]. 电网技术, 2006, 30(S): 394-397.
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, ZHONG Mai-ying. New Criterion of Faulty Line Detection for Distribution Networks Based on Wavelet Packet Analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 394-397.
- [8] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Faults in Neutral Point Non-effective Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [9] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Protected Relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [10] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
SUN Yan-kui. Wavelet Analysis and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [11] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
XU Chen, ZHAO Rui-zhen, GAN Xiao-bing. Wavelet Analysis Application Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [12] 陈仲英, 巫斌. 小波分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CHEN Zhong-ying, WU Bin. Wavelet Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007.

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-10-07

作者简介:

龚静(1975-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事建筑电气、电力系统继电保护和配电自动化等领域的教学与科研工作。
E-mail: lujing55@yahoo.com.cn

(上接第4页 continued from page 4)

- [5] 黄兵, 周献中. 不完备信息系统分配约简与规则提取的矩阵算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(17): 20-22.
HUANG Bing, ZHOU Xian-zhong. Matrix Computation for Assignment Reduction and Rule Extraction in Incomplete Information Systems[J]. Computer Engineering, 2005, 31(17): 20-22.
- [6] 谭天乐, 宋执环, 李平. 信息系统数据清洗、规则提取的矩阵算法[J]. 信息与控制, 2003, 32(4): 289-294.
TAN Tian-le, SONG Zhi-huan, LI Ping. Matrix Computation for Data Cleaning and Rule Extraction in Information System[J]. Information and Control, 2003, 32(4): 289-294.
- [7] 王建元, 纪延超. Petri 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 21-24.
WANG Jian-yuan, JI Yan-chao. Application of Petri Nets in Transformer Fault Diagnosis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 21-24.
- [8] 王建元, 纪延超. 模糊 Petri 网络知识表示及其在变压器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 121-125.
WANG Jian-yuan, JI Yan-chao. Application of Fuzzy Petri Nets Knowledge Representation in Electric Power Transformer Fault Diagnosis[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(1): 121-125.
- [9] 莫娟, 王雪, 董明, 等. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 162-167.
MO Juan, WANG Xue, DONG Ming, et al. Diagnostic Model of Insulation Faults in Power Equipment Based on Rough Set Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 162-167.
- [10] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器故障诊断技术的研究[J]. 变压器, 2002, 39(10): 38-42.
YANG Qi-ping, XUE Wu-de, LAN Zhi-da. Research on Diagnosing Techniques of Transformer Fault[J]. Transformer, 2002, 39(10): 38-42.

收稿日期: 2008-10-14

作者简介:

荣雅君(1957-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与电力系统故障诊断;

赵杰(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与电力系统故障诊断。