

DOI: 10.7667/PSPC160837

基于模糊 FMEA 分析的系统自动故障诊断方法

杨舟, 陈俊, 唐利涛, 韦杏秋

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘要: 在缺乏历史数据统计的情况下, 传统系统故障诊断方法无法进行自动诊断。对此提出了一套基于模糊 FMEA 分析的系统故障自动诊断的方法。该方法结合故障模式、影响及危害分析诊断模型, 实现了基于不同观测数据的故障诊断, 并在计算风险优先数(RPN)时引入模糊理论建模, 通过灰色关联理论解模糊集得出故障危害程度的模糊风险优先数(FRPN), 达到了在缺乏统计数据的情况下将专家经验融入评价模型的目的。以计量自动化系统故障(异常)智能化自诊断系统作为分析案例, 通过对比仿真计算与实际运行一年的风险优先数验证了方法的可行性。

关键词: 模糊理论; FMEA; 故障诊断; 自动诊断

Automatic fault diagnosis analysis method of system FMEA based on fuzzy theory

YANG Zhou, CHEN Jun, TANG Litao, WEI Xingqiu

(Guangxi Power Grid Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: The traditional methods of system fault diagnosis are unable to automatically diagnose in the absence of historical statistics. In view of the above problem, a method of automatic fault diagnosis based on fuzzy FMEA analysis is proposed in this paper. By combining with fault modes, fault effect and diagnosis models of harm analysis, the method fulfills fault diagnosis based on different measured data. Fuzzy theory modeling is introduced while risk priorities number (RPN) is calculated. By means of gray correlation theory, fuzzy RPN (FRPN) of harm levels is concluded by solving fuzzy set, thus the expertise is merged into the evaluation model in the absence of statistics. Intelligent self-diagnosis system of fault in automatic measurement system is taken as an analysis case. By comparing the simulated results and actual results of RPN, the method is verified to be the feasible.

Key words: fuzzy theory; FMEA; fault diagnosis; automatic diagnosis

0 引言

随着监测设备和软件系统的集成化、复杂化和自动化程度的不断提高, 作为对设备和系统进行故障危害评估的故障诊断方法变得十分重要。特别是在复杂条件下, 系统设备等故障发生频率高, 容易引起失误操作。如何实现有效监测, 通过诊断方法来弱化或者消除故障的影响和危害, 以达到稳定安全运行的目标是急需解决的问题^[1-2]。

在系统的故障诊断领域, 故障模式影响分析(FMEA)方法是一种提高产品或系统可靠性、降低成本损失、自上而下的单因素系统性分析方法, 其工作的主要目的是对系统可能发生的所有的故障模式

进行单个分析, 并对每一种故障模式产生影响的严重程度进行分类^[3-4]。目前, 一方面大多数故障诊断的实现是通过数据统计的结果进行计算评估而来, 在故障诊断方面不能实现系统的自动诊断, 无法通过数据规则或知识经验库实现系统自动诊断。另一方面, FMEA 分析方法在定量分析的过程中常常采用的是风险优先数(Risk Priority Number, RPN)方法, RPN 方法是将故障模式发生度(O)、严重度(S)及检测度(D)三者的乘积作为风险优先系数, 并对其进行优先排序的一种评估方法, RPN 值越大, 说明故障的影响越严重^[5]。许多 FMEA 分析的研究工作都是在实际统计的 O、S、D 频度结果的基础上直接进行计算, 以计算结果来说明风险危害的情况。这种方法没有对评价等级结果进行任何处理, 对等级之间的数据无法评估, 缺乏一定的客观性。

基金项目: 南方电网公司科技项目“计量自动化系统故障(异常)智能化自诊断技术研究”(GX2014-2-0020)

在 FMEA 分析方法的研究工作中, 在故障模式风险评估和排序方面, 多位国内外专家提出了模糊 FMEA 的风险评价理论, 使用模糊逻辑进行系统危害性分析得到了改进^[6-7]。

基于系统在故障诊断领域难以自动诊断以及通过 O、S、D 统计结果直接计算来评估风故障危害的不客观性, 我们提出了系统的故障诊断信息模型, 增加规则库和专家库, 并结合国内外在模糊理论 FMEA 分析的研究成果, 实现基于模糊 FMEA 分析的系统自动故障诊断方法, 以解决无法进行自行诊断且难以客观评估的故障诊断分析。

1 故障诊断信息模型

系统故障分析的前提是建立有效的故障诊断信息模型, 在系统所监测的各类有效数据的基础上, 将数据和现象进行归类融合, 根据涉及范围的知识体系进行可行的诊断分析, 制定准确有效的检修决策方案。这种分析数据信息运动的过程可以描述为系统的信息模型, 主要用于研究信息源、信息通道和信息处理等环节。为了更为直观地进行故障诊断, 使用类比的方法进行科学研究, 建立的故障诊断信息模型如图 1 所示。

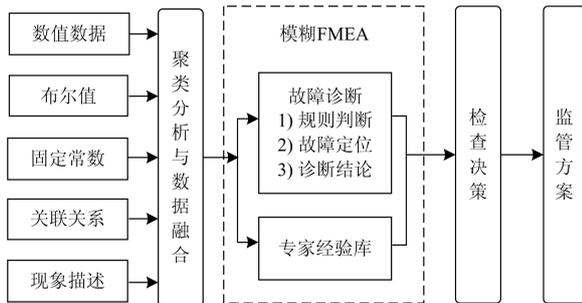


图 1 故障诊断信息模型

Fig. 1 Fault diagnosis information model

1) 信息获取

信息源包括数值数据、布尔值、固定常数、关联关系和现象等。这些信息是设备或系统的性能实时数据值。信息的获取是故障诊断的前提条件。

2) 聚类与数据融合

数据的聚类与融合一方面是将有效的数据进行归类计算, 得到可以通过规则判断的可用数据。另一方面将监测现象进行归类, 作为判断的依据。

3) 模糊 FMEA 分析

模糊 FMEA 分析是利用模糊 FMEA 理论将聚类分析与数据融合后的结果作为故障因素输入, 遵从故障模式的规则进行故障判断定位, 输出故障危害影响情况。

4) 决策与监管

系统进行故障诊断之后, 得到故障诊断结果, 包括故障定位与危害等。在此基础上, 进行检查, 制定管理措施和监管方案, 避免故障的进一步扩大。

2 模糊 FMEA 分析

上一部分介绍了故障诊断的信息模型。其中在故障诊断的过程中, 模糊 FMEA 分析是故障的判断、定位和分析的部分, 是故障诊断的核心环节, 也是本文的重点内容。对于系统进行故障诊断, 首先需要建立故障因素、故障模式和故障影响之间的模型关系^[8-9]。故障因素作为输入, 故障影响作为输出结果, 建立如图 2 所示的模型关系。

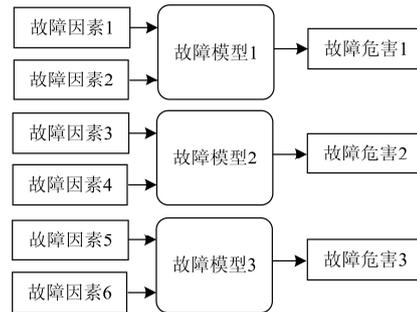


图 2 故障诊断模型

Fig. 2 Fault diagnosis model

系统的故障诊断就是对图 2 中的故障模型进行分析, 通过对故障模型的发生频度、危害等级和检测难易等级进行处理得出故障模型的风险优先数, 通过风险优先数排序可以评估故障影响程度。通过专家经验对故障模式的发生频度、危害等级和检测难易等级进行等级评定, 但这种等级评定难以客观全面地评价故障危害。因此, 门峰提出了模糊 FMEA 分析方法, 从模糊的角度将专家经验以模糊函数的形式进行量化建模^[10]。

2.1 建立 O、S、D 模糊集

故障模式的 O、S、D 三因素作为模糊变量, 与传统 FMEA 进行对照分成若干级, 通过专业人员打分给出准则表^[11], 具体如表 1—表 3 所示。

表 1 故障模式发生度模糊数

Table 1 Failure mode occurred degrees of fuzzy numbers

| 等级 | 描述 | 发生概率 | 打分 | 模糊数 |
|-----|-----------|------------|----|-------------|
| 非常高 | 几乎不可避免的故障 | 大于 1E-2 | VH | (8,9,10,10) |
| 高 | 反复发生的故障 | 1E-4, 1E-2 | H | (6,7,8,9) |
| 中等 | 偶尔发生的故障 | 1E-4, 1E-6 | M | (3,4,6,7) |
| 低 | 相对很少发生的故障 | 1E-8, 1E-6 | L | (1,2,3,4) |
| 极低 | 不太可能发生的故障 | 小于 1E-8 | R | (1,1,2,2) |

表 2 故障模式危害度模糊数

Table 2 Failure mode harm degrees of fuzzy numbers

| 等级 | 描述 | 级别 | 打分 | 模糊数 |
|--------|-----------------|-----|------|-----------|
| 极高且无预警 | 非常高的危害度且无预警 | I | HWOW | (9,10,10) |
| 极高但有预警 | 非常高的危害度且有预警 | | HWW | (8,9,10) |
| 非常高 | 系统不能运行,有破坏性故障 | II | VH | (7,8,9) |
| 高 | 系统不能运行,有设备损坏 | | H | (6,7,8) |
| 中等 | 系统不能运行,有小型损坏 | III | M | (5,6,7) |
| 低 | 系统不能运行,没有损害 | | L | (4,5,6) |
| 较低 | 系统可运行,但有重大的性能下降 | | VL | (3,4,5) |
| 次要 | 系统可运行,有一些性能下降 | IV | MR | (2,3,4) |
| 非常次要 | 系统可操作,有极小的影响 | | VMR | (1,2,3) |
| 无 | 无影响 | | N | (1,1,2) |

表 3 故障模式检测度模糊数

Table 3 Failure mode detection degrees of fuzzy numbers

| 等级 | 描述 | 打分 | 模糊数 |
|-------|-----------|----|-----------|
| 完全不确定 | 确定绝对无法检测 | AU | (9,10,10) |
| 非常微小 | 现行方法将不可检测 | VR | (8,9,10) |
| 微小 | 检测可能性很小 | R | (7,8,9) |
| 非常低 | 现行方法有可能检测 | VL | (6,7,8) |
| 低 | | L | (5,6,7) |
| 中等 | 可能检测 | M | (4,5,6) |
| 中等偏高 | | MH | (3,4,5) |
| 高 | | H | (2,3,4) |
| 非常高 | 几乎确定可以检测 | VH | (1,2,3) |
| 完全确定 | 肯定可以检测 | AC | (1,1,2) |

2.2 确定模糊数

模糊集理论利用模糊数对主观或不确定的信息进行量化描述^[12]。模糊数的计算形式有多种多样,本文选用常用的三角形(a, b, c)模糊数隶属函数进行量化处理,表达式如式(1)所示。

$$\mu(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

采用 Delphi 方法结合专家权重经验来确定三角模糊数。假设有 n 个专家,第 i 个专家的经验值为 β_i,此专家对故障模式的某变量的评价语为 x_i,使用三角模糊数表示为 x_i=(a_i,b_i,c_i),则三角模糊数可表示为式(2)^[13]。

$$\begin{cases} a = \sum_{i=0}^n \beta_i a_i \\ b = \sum_{i=0}^n \beta_i b_i \\ c = \sum_{i=0}^n \beta_i c_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\sum_{i=0}^n \beta_i = 1, \beta_i \in (0,1)$ 。

2.3 解模糊集

将系统的故障模式分为 n 种,分别用 x₁,x₂,...,x_n 表示, x_j 表示第 j 种故障模式,每种故障模式均包括 O、S、D 三个变量,所以第 j 种故障模式可表示为 x_j={x_j(1),x_j(2),x_j(3)},其中 x_j(t)(t=1,2,3) 表示 FMEA 对三因素的评价。由此,可以建立反映 n 种故障模式的比较矩阵 A。

$$A = \{x_j(t)\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(1)x_1(2)x_1(3) \\ x_2(1)x_2(2)x_2(3) \\ \vdots \\ x_3(1)x_3(2)x_3(3) \end{pmatrix} \quad (3)$$

故障模式的风险排序是相对于一定的参考基准而言,参考基准一般选择故障模式各变量的最优值、最差值或平均值作为比较对象。本文就选用最差值作为比较对象,建立参考矩阵如 A₀^[14-15]。

$$A_0 = \{x_0(t)\} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ \vdots \\ 10 & 10 & 10 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据灰色关联理论,计算故障模式各变量与参考基准的关联系数,计算式如式(5)。

$$\xi(x_0(t),x_j(t)) = \frac{\min_j \min_i |x_0(t) - x_j(t)| + \zeta \max_j \max_i |x_0(t) - x_j(t)|}{|x_0(t) - x_j(t)| + \zeta \max_j \max_i |x_0(t) - x_j(t)|} \quad (5)$$

式中, ζ 为分辨系数, ζ ∈ (0,1)。

考虑故障模式各因素的影响权重不同,给出 3 种因素的权重参数为 λ_i,则第 j 种故障模式与参考基准之间的关联度可由式(6)计算出来。

$$\gamma(x_0, x_j) = \sum_{i=0}^3 \lambda_i \{\zeta(x_0(t), x_j(t))\} \quad (6)$$

式中, $\sum_{i=0}^3 \lambda_i = 1, \lambda_i$ 由专家参考实际分析对象进行确定^[10]。

3 计量自动化故障诊断系统案例

通过上述研究内容说明了系统故障诊断的诊

断过程和计算实现。以电网计量自动化故障诊断系统为例进行仿真计算, 并将计算结果与系统在一年内实际运行的数据进行对比来验证方法的正确性。

计量自动化系统故障(异常)智能化自诊断系统是用于解决计量自动化系统故障定位、排查、原因诊断的一套用于电力计量运维的工程运用系统。系统在技术实现上, 采用了先进的技术架构, 数据的来源通过存储服务接口和档案数据接口两类数据接口获取, 实现对数据按照业务应用划分为 6 个层次, 以此来支撑采集故障和计量故障这两类故障诊断服务, 诊断结果通过业务运用层的业务功能体现出来。具体架构图如图 3 所示。

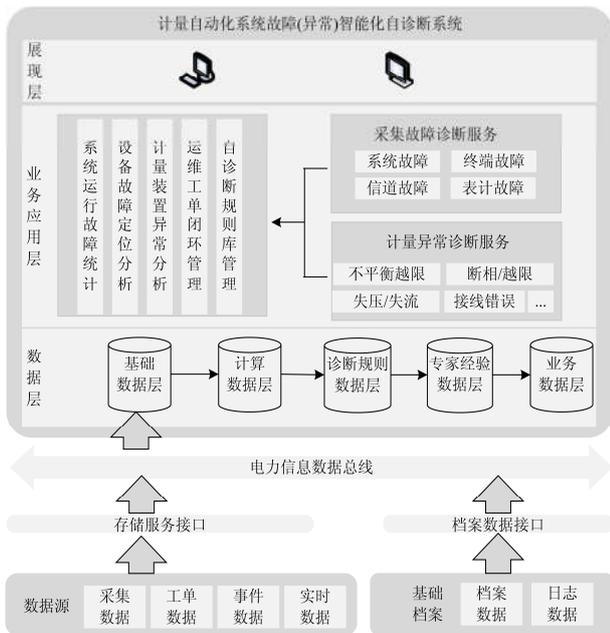


图 3 故障诊断系统架构图

Fig. 3 Fault diagnosis system architecture diagram

从图 3 可以看出, 整个系统的运转是建立在从计量自动化系统提取数据的基础上, 通过接口获取数据, 完成数据的分析整理, 通过计算、归类数据, 对数据和故障表象特征进行综合故障诊断, 实现两类故障类型的精准定位, 得出故障结论, 以此来支撑系统的业务应用。整个故障诊断分析的流程如图 4 所示。

通过流程图可以看出, 系统对数据源分类进行获取, 结合对象的档案信息实现对数据的聚类分析与数据融合处理, 根据数据的特征和表象可采用故障规则和专家经验库进行故障的诊断, 结合两种方法得到故障原因定位, 得出故障结论, 进行相应的检查决策, 制定对应的监管方案。

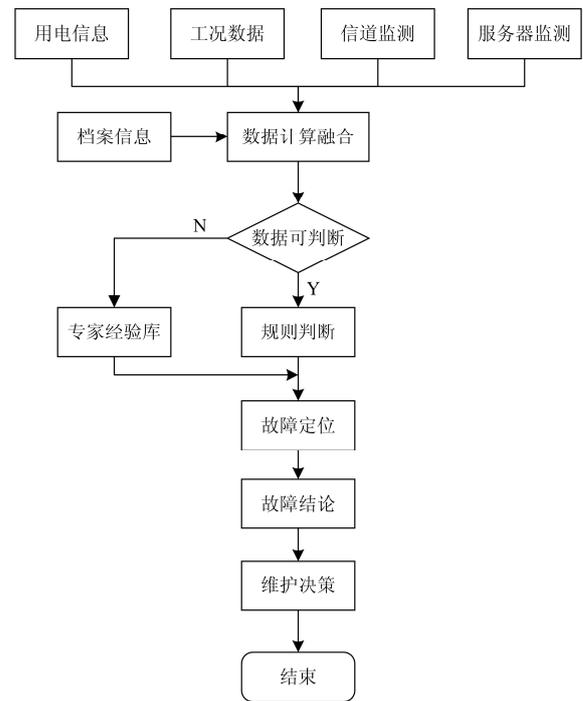


图 4 故障诊断流程

Fig. 4 Fault diagnosis process

根据计量自动化系统故障(异常)智能化自诊断系统的诊断特点, 将故障模式划分为两大类, 一是采集故障; 二是计量故障。采集故障模型的划分主要基于计量自动化系统的拓扑结构, 分为主站故障、信道故障、终端故障和电表故障。计量故障主要分为电压回路异常、电流回路异常、电压电流不平衡、示度飞走等。

根据第 2 部分在模糊 FMEA 分析方面的描述, 我们对计量自动化故障(异常)智能化自诊断系统进行基于模糊理论的 FMEA 分析, 并将结果与实际故障运维的风险统计结果进行对照, 以此验证结果是否可靠。

表 4 是故障模型三因素的评价等级、由模糊数计算出的模糊风险优先数(FRPN)和实际运维现场经过一年时间统计的故障风险等级排序的对比情况。

通过将计算结果与实际情况对比, 将计算结果作为 x 轴值, 实际统计结果作为 y 轴值进行相关性分析。

如图 5 所示, 计算出故障风险排序与实际情况呈现较好的线性关系。因此, 计算结果能够反映出模糊 FMEA 分析在计量自动化故障诊断系统上运用的可靠性。

表 4 故障模式风险优先数计算结果与统计结果对照表
Table 4 failure mode risk priority number calculation results and the statistical result table

| 故障因素 | 发生 频度 | 影响 程度 | 检测 程度 | FRP N | 统计 结果 |
|----------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 终端频繁上下线 | (6,7,8,9) | (7,8,9) | (5,6,7) | 6.92 | 8 级 |
| 电压不平衡 | (8,7,8,9) | (6,7,8) | (5,6,7) | 6.83 | 8 级 |
| 终端时间超差 | (6,7,8,9) | (6,7,8) | (2,3,4) | 5.96 | 7 级 |
| 电流不平衡 | (6,7,8,9) | (6,7,8) | (4,5,6) | 6.26 | 8 级 |
| 终端下采集项不完整且存在采集成功的数据项 | (6,7,8,9) | (6,7,8) | (1,1,2) | 5.91 | 7 级 |
| 电表时间超差 | (3,4,6,7) | (6,7,8) | (2,3,4) | 5.78 | 7 级 |
| 测量点数据项不完整且存在采集成功的数据项 | (6,7,8,9) | (3,4,5) | (3,4,5) | 5.66 | 6 级 |
| 测量点数据项完整且数据点在时间上不连续 | (3,4,6,7) | (3,4,5) | (4,5,6) | 5.23 | 7 级 |
| 测量点未采集 | (3,4,6,7) | (4,5,6) | (3,4,5) | 5.03 | 6 级 |
| 谐波超限告警 | (3,4,6,7) | (4,5,6) | (4,5,6) | 4.63 | 5 级 |
| 终端日运行时间异常 | (3,4,6,7) | (3,4,5) | (3,4,5) | 4.53 | 6 级 |
| 电压过压 | (3,4,6,7) | (3,4,5) | (2,3,4) | 4.18 | 6 级 |
| 电压错误 | (3,4,6,7) | (3,4,5) | (2,3,4) | 4.18 | 5 级 |
| 电能量超差 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (4,5,6) | 4.07 | 5 级 |
| 电流过流 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (3,4,5) | 3.92 | 4 级 |
| 电流断相 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (3,4,5) | 3.92 | 4 级 |
| 电流错误 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (4,5,6) | 3.52 | 3 级 |
| 电压回路异常 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (2,3,4) | 3.62 | 4 级 |
| 示度下降 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (2,3,4) | 3.21 | 3 级 |
| 电能表飞走 | (1,2,3,4) | (3,4,5) | (2,3,4) | 3.17 | 3 级 |
| 电能表停走 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (1,2,3) | 3.01 | 3 级 |
| 功率数据错误 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (1,2,3) | 2.71 | 2 级 |
| 电量示度错误 | (1,2,3,4) | (6,7,8) | (1,2,3) | 3.01 | 3 级 |
| 电流回路异常 | (1,2,3,4) | (5,6,7) | (3,4,5) | 2.71 | 3 级 |
| 功率因数错误 | (1,2,3,4) | (5,6,7) | (1,2,3) | 2.53 | 3 级 |
| 直流模拟量超限 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (4,5,6) | 2.32 | 2 级 |
| 有功总电能量差动超限 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (3,4,5) | 2.22 | 2 级 |
| 视在功率超限 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (2,3,4) | 2.12 | 1 级 |
| 电压、电流逆相序 | (1,2,3,4) | (4,5,6) | (1,1,2) | 1.41 | 2 级 |
| 终端故障 | (1,2,3,4) | (3,4,5) | (1,1,2) | 1.1 | 2 级 |
| 主站系统出错 | (1,1,2,2) | (7,8,9) | (1,2,3) | 1.22 | 1 级 |
| 信道不通 | (1,1,2,2) | (6,7,8) | (1,2,3) | 1.13 | 1 级 |

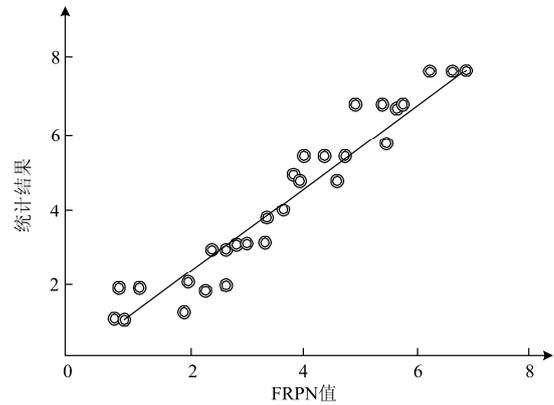


图 5 计算结果与实际统计结果的线性相关计算
Fig. 5 Calculation results and the actual results of the linear correlation calculation

4 结论

本文从模糊 FMEA 分析理论出发,详细地阐述了模糊 FMEA 分析运用场景和运用模型。对于模糊 FMEA 分析从建立模糊集、确定模糊数到进一步解析模糊集,到最终得出风险优先数排序进行了详细讲解。并以计量自动化系统故障(异常)智能化自诊断系统为例,通过对系统的模糊 FMEA 分析,将计算结果与实际统计情况进行对照,验证了模糊 FMEA 的分析过程和计算结果,表明本文基于模糊 FMEA 理论分析方法的正确性。

参考文献

[1] 郭江. 电厂维护中基于虚拟现实及智能代理的人机融合技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
GUO Jiang. Man-machine fusion techniques based on virtual reality and agent in maintenance of power plants[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

[2] 郭江, 曾洪涛, 李朝晖. 水电厂维护分布式协同决策支持系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 127-132.
GUO Jiang, ZENG Hongtao, LI Zhaohui. Maintenance orient distributed cooperative decision supported system for hydropower plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 127-132.

[3] 陈理渊, 黄进. 电机故障诊断的多传感器数据融合方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 48-52.
CHEN Liyuan, HUANG Jin. Motor fault diagnosis with multisensory data fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 48-52.

[4] 陈焱涛, 李朝晖. 面向检修的水电设备数字化建模[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 79-83.

- CHEN Yitao, LI Zhaohui. Maintenance-oriented digitized modeling of the hydraulic generating device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 79-83.
- [5] 白建社, 樊波, 黄文华, 等. 基于决策树的变电站故障诊断知识表示与获取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 5-8.
- BAI Jianshe, FAN Bo, HUANG Wenhua, et al. Knowledge representation and acquisition based on decision tree for substation fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(2): 5-8.
- [6] PELAEZ C E, BOWLES J B. Using fuzzy logic for system criticality analysis[C] // Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1994: 449-455.
- [7] CHENG Y, CHUNG T S, YU C W, et al. Application of reliability-centered stochastic approach and FMECA to conditional maintenance of electric power plants in China[C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT 2004), Hong Kong: 2004: 463-467.
- [8] 姜晨, 高亮. 基于负序功率方向比较与聚类算法的改进继电保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 92-98.
- JIANG Chen, GAO Liang. Study on an improved relaying protection method based on negative-sequence power direction comparison and cluster algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 92-98.
- [9] 郭江, 罗云, 曾洪涛. 基于 B/C/S 的机组远程协作诊断决策支持系统研究[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(6): 70-72.
- GUO Jiang, LUO Yun, ZENG Hongtao. Research of B/C/S-based remote cooperative diagnostic decision support system[J]. Journal of Huazhong University of Science Edition, 2005, 33(6): 70-72.
- [10] 门峰. 模糊集理论与灰色关联理论的 FMEA 方法[J]. 工业工程, 2008, 11(4): 109-112.
- MEN Feng. FMEA method based upon fuzzy set theory and grey relational theory[J]. Industrial Engineering Journal, 2008, 11(4): 109-112.
- [11] 方培培, 李永丽, 杨晓军. Petri 网与专家系统结合的输电网络故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 17(2): 26-30.
- FANG Peipei, LI Yongli, YANG Xiaojun. Transmission power system fault diagnosis based on Petri nets and expert system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 17(2): 26-30.
- [12] 刘怀东, 马林, 王曦冉, 等. 基于概率不安全指标的实时故障筛选策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 16-21.
- LIU Huaidong, MA Lin, WANG Xiran, et al. Strategies of real time contingency screening based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 16-21.
- [13] 郭江, 曾洪涛, 肖志怀. 基于软件传感器和 FMECA 的调速系统故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 97-102.
- GUO Jiang, ZENG Hongtao, XIAO Zhihui. Fault diagnosis of hydro turbine governor system based on soft sensor and FMECA[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19(6): 97-102.
- [14] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.
- HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [15] 马存宝, 李雯, 孙焱, 等. 基于模糊理论的 FMEA 方法研究[J]. 测控技术, 2013, 32(8): 137-140.
- MA Cunbao, LI Wen, SUN Yan, et al. Research on the method of FMEA based on fuzzy theory[J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(8): 137-140.

收稿日期: 2016-06-07; 修回日期: 2016-09-28

作者简介:

杨舟(1985—), 男, 工学博士, 工程师, 研究方向为电能计量管理, 产品及系统可靠性; E-mail: yang_zsy@gx.csg.cn

唐利涛(1985—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电能计量自动化管理及需求侧管理研究工作;

陈俊(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事计量自动化及需求侧管理研究工作。

(编辑 魏小丽)