

# 模糊理论在网络故障实时诊断中的应用

冷晓杰,李兴明

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室,四川 成都 611731)

**摘要:**通信网络故障诊断的核心就是进行告警相关性分析,定位根源告警,从而定位故障。文中将基于数据挖掘的相关性分析方法与模糊理论相结合应用于网络故障实时诊断;将模糊聚类方法应用于网络告警模糊化处理,提出了一种应用于告警模糊关联规则知识库建立的挖掘算法,最后应用模糊聚类和模糊匹配方法对实时收集的新发告警集进行根源告警的模糊推理。模糊理论在通信网络故障诊断中的应用,为网络故障的实时诊断提供了一种崭新思路,对网络故障的及时恢复具有重要意义。实验仿真验证了整个思路的可行性。

**关键词:**故障实时诊断;数据挖掘;模糊关联规则;模糊聚类;模糊匹配

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)06-0170-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.06.044

## Application of Fuzzy Theory in Real-time Diagnosis of Network Fault

LENG Xiao-jie, LI Xing-ming

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication of Ministry  
of Education, UESTC, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The core of the communication network fault diagnosis is the alarm correlation analysis, locate the root alarm for fault. The correlation analysis method based on data mining and fuzzy theory are combined in this article, applying to real-time network fault diagnosis. Fuzzy clustering method is applied to the fuzzy processing of network alarms. After that, a new alarm fuzzy association rules mining algorithm is raised for establishing the knowledge base. At last, fuzzy clustering and fuzzy matching method is applied to infer the root one of real-time collected alarm set. The application of fuzzy theory in the communication network fault diagnosis gives a new method for real-time diagnosis of network failures. It is of great significance for the timely recovery of network failures. Simulation experiments verify the feasibility of the whole idea.

**Key words:** real-time fault diagnosis; data mining; fuzzy association rule; fuzzy clustering; fuzzy matching

### 0 引言

故障诊断的核心是进行告警的相关性分析。数据挖掘技术可以解决相关性分析中规则来源的瓶颈问题,可调整适应动态变化的通信网络,还可减少对管理人员和专家的依赖<sup>[1,2]</sup>。在通信领域中的典型应用是基于历史告警数据库,发现告警相关性规则,建立关联规则知识库,分析和预测网络元件可能出现的故障。

网络故障诊断实际上就是利用告警关联规则进行推理的过程。关联规则的挖掘是基于历史告警数据的累积,而且鉴于挖掘算法效率的原因,无法对流数据进行实时在线挖掘,故障的诊断具有滞后性。同时,故障和告警的边界也存在着一定的模糊性。比如,故障等

级之间的界限划分、服务质量下降引起的告警等等,都具有某些模糊性的特点。

针对这种情况,将模糊理论、模糊推理与数据挖掘结合起来,采用基于告警模糊关联规则挖掘的网络故障诊断<sup>[3-5]</sup>。即根据故障引发的相似性,充分利用本网历史告警关联规则知识库资源,对新生告警进行规则模糊匹配,从而对根源告警进行模糊推理<sup>[6,7]</sup>,达到实时诊断的目的。

文中根据告警是根源告警的逼近程度进行模糊化,从而能有效反映该告警在网络中的相对重要程度和影响范围,使在此基础上的告警相关性分析、模糊推理和网络故障诊断更加科学。

收稿日期:2012-08-31

修回日期:2012-12-03

网络出版时间:2013-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171090)

作者简介:冷晓杰(1987-),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为宽带网络技术、网络故障诊断;李兴明,教授,博士生导师,主要研究方向为网络管理、光纤通信、光交换与自动光网络。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130514.1711.015.html>

## 1 背景知识

### 1.1 模糊关联规则相关公式

对于属性  $x$ , 令  $F_x = \{f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}\}$  为不同语言评价变量对应的函数集。 $u_{f_x}$  代表  $x$  对  $f_{x_i}$  函数代表的模糊区间的隶属度, 取值区间  $D_x \rightarrow [0, 1]$ 。如果  $u_{f_x}(x) = 1$ , 那么  $x$  完全属于  $f_{x_i}$  代表的模糊区间, 否则, 它部分属于。模糊化后, 项集  $X$  的模糊支持度定义为:

$$f_{\text{support}}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \prod_{j=1, k \in F_{x_i}}^m u_{f_k}(s_{ij}) \quad (1)$$

$n$  是事务数,  $m$  代表项集  $X$  的长度,  $u_{f_k}(s_{ij})$  代表  $X$  的第  $j$  个项在第  $i$  个事务中的隶属度。对于项集  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$  和  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$ , 模糊关联规则  $X \Rightarrow Y$  以及模糊支持度, 置信度定义为:

$$f_{\text{support}}(XY) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \prod_{m=1, j_m \in F_{x_m}}^p u_{f_{j_m}}(s_{im}) \times \prod_{n=1, j_n \in F_{y_n}}^q u_{f_{j_n}}(s_{in}) \right) \quad (2)$$

$$f_{\text{confidence}}(X \Rightarrow Y) = \frac{f_{\text{support}}(XY)}{f_{\text{support}}(X)} \quad (3)$$

### 1.2 匹配算子

若模糊告警的语言评价集的论域为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 在文中用归一化的隶属度向量表示。令  $N(\bar{A}, \bar{B})$  为模糊化的新采集告警  $\bar{A}$  与规则中所含模糊告警  $\bar{B}$  的贴进度, 也就是  $\bar{A}$  与  $\bar{B}$  的相似程度。几种常见类型的贴进度函数有: 海明贴进度、欧几里得贴进度、黎曼贴进度等。文中模糊匹配应用的是欧几里得贴进度。

$$N(A, B) \triangleq 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \left( \sum_{i=1}^n (A(u_i) - B(u_i))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

当  $\bar{A} = \bar{B}$  时  $N(\bar{A}, \bar{B}) = 1$ 。

### 1.3 网络故障诊断系统框图

网络故障诊断系统模型如图1所示。文中实现网络故障的实时诊断分为以下几个步骤:

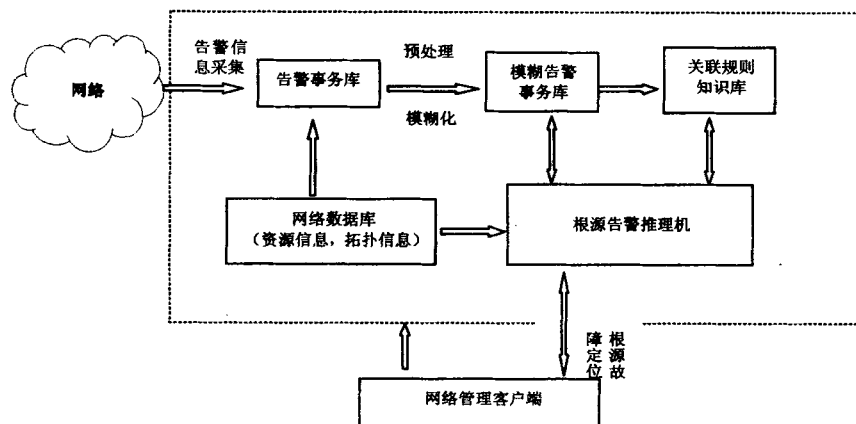


图1 网络故障诊断模型图

1) 告警预处理: 对历史告警数据/新生告警数据

进行预处理, 提取反映故障信息的重要属性, 预处理成统一的告警模型, 然后将告警模糊化。

2) 模糊关联规则知识库的建立: 基于具有丰富历史告警的数据库, 运用文中提出的 DMSFRM 算法得到足够丰富的告警模糊关联规则。关联规则作为新生告警进行模糊匹配的依据, 对根源告警进行模糊推理。

3) 应用模糊聚类, 模糊匹配等一系列方法, 对实时收集到的新生告警集进行根源告警模糊推理。

## 2 告警预处理

网络告警事件包含被管网络对象异常的信息, 参考 ITU-T 的 X.733 标准对告警的定义<sup>[8]</sup>。文中提取对于故障与定位有用的信息字段, 定义告警的模型由 5 个属性组成, 分别为 Node, Link, Level, Type, Count。

然后, 应用 FCM 算法对数据库进行模糊化处理。即考虑一个网络告警与根源告警的逼近程度, 语言变量评价模糊集为  $F_{\text{alarm}} = J = \{EC, C, MC, NC, F\}$ , 从左到右分别表示告警“非常逼近”、“逼近”、“比较逼近”、“很少逼近”以及“远离”根源告警。因此, 对告警  $j$  进行模糊化, 就是求出  $j$  对上述 5 个聚类中心的模糊隶属度向量  $(u_{sj}, u_{cj}, u_{mj}, u_{nj}, u_{fj})$ 。

每个属性评价标准定义如下:

Node: 节点属性对告警重要程度的贡献, 主要通过本节点的链路数目。显然, 节点的链路数越多, 节点产生和传播告警的能力越强, 告警越可能是根源告警。

Link: 当一条链路出现故障时, 经过这条链路传输的所有数据都将受到影响, 路由数越多, 网络受到的通信影响就越大。

Level: 定义四个级别的告警: Critical, Major, Minor 和 Warning, 分别用数值 4, 3, 2, 1 来依次表示它们对告警重要程度的贡献。

Type: 基于 TCP/IP 模型, 上层实体需要下层实体提供服务。底层的故障会引发上层产生告警, 文中定义  $\{ \text{Device Layer alarm, Network Layer alarm, Service Layer alarm} \}$  分别代表不同层的告警, 用数字 3, 2, 1 来代表它们的相对重要程度。

Count: 很显然, 告警出现次数越多, 说明这个告警越有可能逼近根源告警。

最后, 应用模糊聚类算法 FCM<sup>[9]</sup> 将模式化的告警数据库进行聚类。达到目标函数条件时的

5 个聚类中心设为  $C_5, C_4, C_3, C_2, C_1$ 。

表格 1 给出了模糊告警的格式。

表 1 模糊告警模型

Node	Link	Level	Type	Count	Fuzzy membership degree
------	------	-------	------	-------	-------------------------

### 3 基于动态支持度的告警模糊关联规则挖掘算法

文中提出一种应用于告警模糊关联规则挖掘的算法:DMSFRM(Alarm Fuzzy Association Rules Mining Algorithm Based on Dynamic Minimum Support)。DMSFRM 吸收借鉴了层次化的挖掘思路<sup>[10,11]</sup>,并在频繁项集挖掘过程中,采用动态最小支持度的策略和告警事务库动态删减的方法。一方面可以有效提高算法的效率,另一方面可以有效改善静态最小支持度造成的规则遗漏。本部分首先介绍了算法中动态 $f_{minsup}$ 的选取,然后介绍了挖掘过程中告警数据库动态删减的策略。

#### 3.1 动态 $f_{minsup}$ 的选取

依据最大隶属度原则,模糊告警的支持数用最大隶属度 $u_{max} = \max(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ 表示;Candidate\_k-itemset 的支持度 $f_{sup}(k) = f_{sup}(item1) * f_{sup}(item2) * \dots * f_{sup}(itemk)$ ,如果采用静态最小支持度 $f_{minsup}$ ,必然随着 $k$ 增大, $f_{sup}(k\_itemset) < f_{minsup}$ ,即高次频繁项集数量骤减以致于遗漏规则。所以,随着 $k$ 增大, $f_{minsup}$ 必须适度的动态变小。

文中采用动态最小支持度为: $f_{minsup}(k) = f_{minsup}(k-1) * \gamma$ ;系数 $\gamma = (1/2)(1 + f_{minsup}(1))$ ,其中 $f_{minsup}(1)$ 为初始化最小支持度。满足 $0 < f_{minsup} \leq 1; 0 < \gamma < 1$ 。

#### 3.2 数据库动态删减的方法

算法执行效率的瓶颈体现在对数目庞大的低次候选项集扫描事务库进行计数的过程中,算法中应用了提高效率的如下技巧。

(1)扫描事务数据库 $D'$ ,生成 $L_1$ ,不属于 $L_1$ 中的项在事务 $t$ 中删除。

(2)transaction  $t$  中任一项,它至少在 $C_k$ 中出现 $k$ 次,才有可能出现在 $L_{k+1}$ 中。(因为: $K+1\_FI$ 有 $k+1$ 个 $k$ 频繁子集,例如:频繁项集 $ABCD$ ,有4个3频繁子集 $ABC, ABD, ACD, BCD$ ,标记item  $B$ ,则 $B$ 在 $C_3$ 中至少存在3次,不然,将得不到频繁项集 $ABCD$ ),所以,数目较少的项,不保留在用于生成 $L_{k+1}$ 的事务库 $D_{k+1}$ 中。

(3)告警事务 $t$ 的长度 $|t| < k$ 时,对 $C_{k+1}$ 的生成没有作用,在生成 $L_{k+1}$ 之前删除。

### 4 网络故障实时诊断方法

本部分首先介绍告警模糊关联规则知识库的预处理方法,实现规则的合并与删减,使其更适用于根源告

警的模糊推理。然后详细阐述了根源告警模糊推理的2种方法。

#### 4.1 规则库预处理策略

文中采用的规则使用产生式的表示方法。为了使规则库更加简练,避免模糊匹配中意义相同的冗余规则被重复匹配,对规则库进行预处理操作。

A. 由于多后件规则蕴含单后件规则,所有多前件多后件规则均分解为多前件单后件规则。

B. 前后件互置的规则,若都满足置信度要求,保留置信度大的那条。

#### 4.2 根源告警模糊推理

设某时刻突发网络故障,将产生一系列告警和次生告警,设在短暂时间内,管理端从各终端同步收集到的告警集为 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ,下面介绍两种用于根源告警定位的推理方法。

##### A. 告警模糊聚类法。

模糊隶属度向量综合反映了某告警隶属于各聚类的程度。将突发故障产生的告警集 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 做模糊化预处理得到 $\{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n\}$ 。即需求得 $A_j(j=1, 2, \dots, n)$ 对历史告警数据库模糊化最终聚类中心 $C_5, C_4, C_3, C_2, C_1$ 的隶属度向量 $(u_{sj}, u_{4j}, u_{3j}, u_{2j}, u_{1j})$ 即可。

为了更直观地比较各告警是根源告警的相对可能性大小,文中利用加权平均法得到一个综合评价值 $S$ ,用来作为衡量标准。对于模糊评价语言集 $J = \{EC, C, MC, NC, F\}$ ,设置对应的权值分别为 $\{5, 4, 3, 2, 1\}$ 。令 $S = u_{sj} * 5 + u_{4j} * 4 + u_{3j} * 3 + u_{2j} * 2 + u_{1j}$ 。所以,依据综合评价值 $S$ 的相对大小来粗略判定根源告警。同时,为了不遗漏对多故障网络中多根源告警的定位,可以假设 $S$ 值大于某一特征值 $ST$ 的多个告警为根源告警。假设成立与否可以在故障修复过程中验证得到。

##### B. 基于模糊关联规则匹配的推理。

##### 1)告警模糊化预处理。

2)扫描模糊关联规则知识库,依次查找模糊告警集中各项在规则库中匹配的规则。

规则匹配原则:给定模糊告警集中的元素 $\tilde{A}_i$ ,模糊关联规则 $\gamma$ 中任意模糊告警 $\tilde{I}_j$ 。计算贴近度 $N(\tilde{A}_i, \tilde{I}_j)$ 。当 $N(\tilde{A}_i, \tilde{I}_j)$ 大于某一阈值 $MT$ 时,定义该规则被匹配。然后,反过来将规则 $\gamma$ 中其余告警在模糊告警集 $\{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n\}$ 中寻找匹配项,如果规则中其余告警都能找到满足 $MT$ 的匹配,那么定义规则 $\gamma$ 被激活。在规则库中标记为已激活。

然后,将规则 $\gamma$ 中其余告警在模糊告警集中寻找匹配项,如果满足 $MT$ 时都满足匹配关系,那么定义规

则  $\gamma$  被激活。在规则库中标记已激活。 $\bar{A}_i$  若匹配到  $n$  条规则,继续验证下一条规则是否被激活。在激活规则中,求规则中各模糊告警项的模糊综合评价值  $S$ ,大于阈值  $ST$  的告警为根源告警。

3)继续执行  $\bar{A}_{i+1}$ ,先前已激活的规则,不再进行重复匹配,直到找到所有可能的根源告警。

5 仿真分析

仿真用到的通信网络拓扑图如图 2 所示。实验采用 C++编程,在 VS2008 仿真平台上进行测试。PC 配置信息为 Dual\_Core 2.10GHz,Memory 2GB,OS Win7。

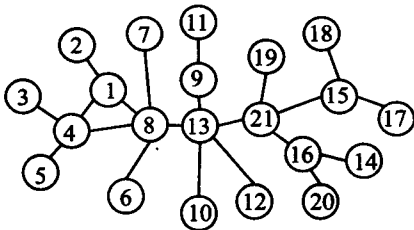


图 2 网络故障诊断模型图

5.1 数据库

仿真告警数据库采用人工合成的方式得到,告警依据网络拓扑产生,产生的告警符合文中定义的告警信息模型。

故障引发告警的原则如下:

A. 当一个网络节点的底层或链路发生故障时,不

仅底层会产生告警,高层也会产生次生告警。

B. 当网络中一个节点设备发生告警或链路性能降低时,会对周围的网络节点产生影响,引发相应的告警,但引发的告警没有根源告警严重。

C. 在故障排除之前,告警将不断重复产生。

D. 网络中的故障产生是随机的。

接下来,通过设置时间窗口与滑动步长<sup>[12]</sup>构造告警事务库。最后,将告警数据进行模糊化处理,为模糊关联规则挖掘做准备。

5.2 网络故障实时诊断

实验应用文中提出的 DMSFRM 算法,得到的产生式规则知识库实例如表 2。模拟故障产生时,依据告警引发原则,产生一系列相关告警。对管理端实时收集的告警集为依据,模糊化预处理后,进行实时诊断。

表 3 给出了某时刻实时收集到故障告警集模糊化后的实例,下面对两种推测根源告警的方法进行比较。

方法一:设阈值  $ST=4.0$ ;根源告警推测为: $A_1$ ,  $A_4$ ;可以推理为:

- 1)8/4 号节点对应地址为“125.70.8.3/125.70.4.2”的端口发生硬件故障。
- 2)二者之间的链路出现故障。

方法二:实验采用欧几里得匹配算子。文中假设规则中所有告警之间模糊匹配的阈值  $MT>0.60$ ,规则才算匹配。

表 2 知识库中模糊关联规则实例

Condition	Conclusion	$f_{confidence}$
$I_3: 13 \& 125.70.13.5 \& \text{Device layer} \& \text{Critical} \& 5 \& (0.7799, 0.1413, 0.0451, 0.0214, 0.0123)$ and $I_1: 21 \& 125.70.21.2 \& \text{Device layer} \& \text{Critical} \& 5 \& (0.6617, 0.2141, 0.0711, 0.0337, 0.0194)$	$I_4: 16 \& 125.70.16.1 \& \text{Network layer} \& \text{Major} \& 3 \& (0.2724, 0.5752, 0.0998, 0.0351, 0.0175)$	94.5%
$I_{15}: 21 \& 125.70.21.3 \& \text{Device layer} \& \text{Major} \& 5 \& (0.5871, 0.3045, 0.0723, 0.0125, 0.0236)$	$I_{18}: 15 \& 125.70.15.2 \& \text{Service layer} \& \text{Major} \& 3 \& (0.2154, 0.3862, 0.3595, 0.0232, 0.0157)$	83.7%

表 3 某时刻实时收集的告警集(模糊化后)

编号	属性	综合值 $S$
$\bar{A}_1$	8&125.70.8.3& Device layer& Critical &1&(0.7815,0.1314,0.0479,0.0244,0.0148)	4.64
$\bar{A}_2$	13&125.70.13.2&Service layer& Warning &1&(0.0812,0.0151,0.0393,0.2496,0.6148)	1.70
$\bar{A}_3$	7&125.70.7.1&Network layer& Major &1&(0.1008,0.2724,0.5752,0.0351,0.0165)	3.41
$\bar{A}_4$	4&125.70.4.2& Device layer& Critical &1&(0.6021,0.2459,0.086,0.0415,0.0245)	4.36
$\bar{A}_5$	3&125.70.3.1&Network layer&Major &1&(0.0197,0.0616,0.7219,0.1639,0.032)	2.87
$\bar{A}_6$	5&125.70.5.1&Service layer &Minor &1&(0.0019,0.0043,0.0179,0.9613,0.0146)	2.02

新生告警集在规则库中匹配到的规则如表 4 所示。

其中  $N(\bar{A}_1, \bar{I}_{32})=0.97$ ;  $N(\bar{A}_4, \bar{I}_{31})=0.90$ ,  $N(\bar{A}_3,$

$\bar{I}_{35})=0.79$ ,又  $S(\bar{A}_1)=4.64$ ,  $S(\bar{A}_4)=4.36$ ;由匹配到的规则可以模糊推理为:4,8 节点间的链路出现故障。

表 4 匹配到的规则

$I_{32}: 8 \& 125.70.8.3 \& \text{Device layer} \& \text{Critical} \& 4 \& (0.8236, 0.1033, 0.0583, 0.0035, 0.0113) \Rightarrow$ $I_{31}: 4 \& 125.70.4.2 \& \text{Device layer} \& \text{Critical} \& 5 \& (0.7609, 0.1056, 0.0832, 0.0179, 0.0324)$
$I_{32} \& I_{31} \Rightarrow$ $I_{35}: 7 \& 125.70.7.1 \& \text{Network layer} \& \text{Major} \& 1 \& (0.2365, 0.4608, 0.1745, 0.0252, 0.103)$

两种思路的推理结果对比分析:

1)模糊聚类的方法简单,时间消耗少。缺点是根源告警判定的阈值不同,得到的准根源告警数目不同,而且各准根源告警间的关系相对孤立,多个准根源告警之间的关系不能很直观地看出,这种方法更适用于根源告警单一的情况。

2) 基于规则模糊匹配的方法, 时间消耗较前者大, 主要体现在扫描规则库与新生告警集进行匹配的过程, 但是整个匹配过程耗时也是在  $s$  级的, 可以达到实时的要求。

从实验结果来看规则模糊匹配的方法可以较为精确地实现根源告警定位。也就是通过时间上的牺牲提高了根源告警定位的精确度。这种方法特别适合于多根源告警的情况, 或者是多发故障的情况。多准根源告警间的关系, 以及根源告警与次生告警间的关系, 通过匹配到的规则呈现。

## 6 结束语

文中将 FCM 算法应用于网络故障管理领域, 将网络告警模糊化成附带模糊隶属度向量的模糊告警。

应用文中提出的 DMSFRM 算法实现了告警模糊关联规则知识库的建立。算法中采用动态最小支持度策略, 并结合数据库动态删减策略, 不仅提高了算法的效率, 而且避免了规则的遗漏。其优越性相对于静态支持度的算法是显然的。文中仅作为功能实现, 性能上的对比以及动态最小支持度的选择策略对比将在后续研究中具体论述。

将模糊聚类和模糊匹配原理应用于故障告警实时诊断中, 提供了一种解决故障实时诊断的思路。在各种不同故障情况下, 如何对模糊告警综合评价值  $S$  的阈值  $ST$  以及模糊匹配的阈值  $MT$  进行智能取值也是下一步的研究方向。

## 参考文献:

- [1] Li Tongyan, Li Xingming. Preprocessing expert system for mining association rules in telecommunication networks [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 38(3): 1709-1715.
- [2] 夏海涛, 詹志强. 新一代网络管理技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [3] Wu Jian, Li Xingming. Mining Multidimensional Fuzzy Association Rules of Alarms in Communication Networks [C] // Proc of Int Conf on Computer Science and Service System. Nanjing: IEEE, 2011.
- [4] Islam S M, Wu T, Ledwich G. A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 177-186.
- [5] 杨纶标, 高英议. 模糊数学 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2004.
- [6] Zadeh L A. Syllogistic Reasoning in Fuzzy Logic and Its Application on Usuality and Reasoning with Disposition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, SMC-15(6): 754-763.
- [7] 王立新, 王迎军. 模糊系统与模糊控制教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] ITU-T Recommendation M. 20. Maintenance philosophy for telecommunication networks [S]. 1992.
- [9] Bezdek J C. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithms [J]. IEEE Trans on PAMI, 1980, PAMI-2(1): 1-8.
- [10] Srikanth R, Agrawal R. Mining quantitative association rules in large relational tables [C] // Proceedings of the ACM SIGMOD Conference on Management of Data. Montreal, Canada: [s. n.], 1996.
- [11] Intan R. A Proposal of Fuzzy Multidimensional Association Rules [J]. Journal Informatika, 2006, 7(2): 85-90.
- [12] Hauptmann M, Lubin J H, Rosenberg P. The use of sliding time windows for the exploratory analysis of temporal effects of smoking histories on lung cancer risk [J]. Statistics in Medicine, 2000, 19(1): 2185-2194.
- [1] Li Tongyan, Li Xingming. Preprocessing expert system for mining association rules in telecommunication networks [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 38(3): 1709-1715.
- [2] Lin Y K, Chang P C. Performance indicator evaluation for a cloud computing system from QoS viewpoint [J]. Quality & Quantity, 2011, 35(10): 96-103.
- [3] 刘洪波. 北京市高科技中小企业技术创新能力评价研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- [4] 刘俊斌. 软件企业中对软件人员的绩效考核管理研究 [J]. 生产力研究, 2006, 16(7): 263-264.
- [5] 唐秀玉. 中小软件企业绩效管理体系研究与设计 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [6] Yu V F, Hu Kuo-Jen. An integrated fuzzy multi-criteria approach for the performance evaluation of multiple manufacturing plants [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(2): 269-277.
- [7] 谢宁, 李天匀. 基于古林法的新船市场景气指数构建及其应用 [J]. 中国水运, 2011, 33(2): 36-38.
- [8] 兰爽. 基于 KLEE 和模糊综合评价的作业者认知能力评估 [J]. 人类工效学, 2010, 16(1): 30-31.
- [9] 葛亚微, 沈敏, 庞阿霞. 基于主成分和层次分析法的公安绩效考核系统 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 161-163.
- [10] Kumar A, Choi Seung-Kyum, Goksel L. Tolerance allocation of assemblies using fuzzy comprehensive evaluation and decision support process [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2011, 51(1): 379-391.
- [11] Annadurai G, Babu S R, Srinivasamoorthy V R. Mathematical modeling of phenol degradation system using fuzzy comprehensive evaluation [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2000, 23(6): 599-606.
- [12] 吴祈宗. 系统工程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [13] Xing X, Liu D C, Zhao G Q. Study on System Analyst Comprehensive Capacity Evaluation Method [C] // Proceedings of 10th Conference on Man-Machine-Engineering. USA: Scientific Research Publishing, 2010: 48-52.

(上接第 169 页)

# 模糊理论在网络故障实时诊断中的应用

作者: [冷晓杰](#), [李兴明](#), [LENG Xiao-jie](#), [LI Xing-ming](#)  
作者单位: [电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川成都, 611731](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)   
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2013, 23 (6)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201306044.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201306044.aspx)