基于模糊着色 Petri 网的多状态系统可靠性分析

张新菊 姚淑珍
(北京航空航天大学计算机学院 北京 100191)

摘 要 在多状态系统中,由于性能退化、局部失效等原因,系统或元件会表现出从完全失效到完美工作之间的一系列过渡状态,这些过渡状态信息将直接影响系统的可靠性。针对这一问题,提出一种模糊着色 Petri 网模型,该模型通过对模糊状态及状态变迁进行建模来刻画多状态系统的可靠性特征。在这种模糊着色 Petri 网模型中,变迁阈值会随着节点状态模糊信息的动态变化而发生变化,为此提出自适应模糊推理算法进行阈值调整,为多状态系统模型的可靠性分析及性能优化提供指导。通过对多状态系统可靠性分析进行验证,表明研究提出的模糊着色 Petri 网及参数调整策略合理有效,有利于提高多状态系统整体性能。

关键词 多状态系统,模糊着色 Petri 网,自适应模糊推理算法
中图法分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.014

Multi-state System Reliability Analysis Based on Fuzzy-colored Petri Nets

ZHANG Xin-ju YAO Shu-zhen
(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In the multi-state system, due to the performance degradation, partial failure, system or component may exsit a series of middle states between the perfect state and the failure state, these middle states will influence the system reliability directly. According to the problem, the fuzzy-colored Petri nets was put forward. The model fully characterized the multi-state reliability through fuzzy state information and the dynamic transition between state nodes. In the fuzzy-colored petri nets, the weighted threshold will change with the dynamic change of fuzzy information and node state. So the adaptive fuzzy reasoning algorithm of threshold adjustment was proposed, which provides sufficient model guidance for multi-state system reliability analysis and the performance optimization. Multi-state reliability is verified, which shows that the fuzzy-colored petri nets and the parameter adjustment strategy are reasonable and effective, and the overall performance of the multi-state system is improved.

Keywords Multi-state system, Fuzzy-colored petri nets, Adaptive fuzzy reasoning algorithm

1 引言

在实际工作中,系统和系统元件的状态由于元件本身的性能退化、系统元件局部失效等因素,会存在两种以上的状态。当状态不同时,该元件对整个系统正常工作的影响是不同的,此时该系统即为多状态系统[1,2]。多状态系统在实际工作中较常见,如通信系统、银行灾备系统、电力传输系统和流体传输系统等[3-6]。现实中的实际工作系统会由于系统固有的动态等特性和人们认知存在模糊不完备等因素,难以建立起精确的系统模型[4-6]。

基于对模糊 Petri 网与着色 Petri 网建模扩展对多状态系统进行建模,并对扩展的模糊着色 Petri 网模型理论分析进行介绍。模糊 Petri 网由 Bechtold 于 1991[7] 年提出,是将模糊集理论与 Petri 网理论有机结合的一种新型网络理论。近年来,模糊 Petri 网在建模扩展与系统分析中有大量应用[8-12],模糊 Petri 网常用于不确定状态的完整描述,具有强大的逻辑推理能力和丰富的定量定性分析能力,使其与多状态系统的可靠性理论分析的精准要求相吻合。

2 国内外研究现状

在模糊 Petri 网中,S. Ribaric[13] 利用面向对象的概念机制实现模糊 Petri 建模扩展,该模型适用于对知识库和真实世界的系统元件在处理模糊、模糊智能系统中推理机的设计,类似人类的语言表达。Wei-Ming Wang[14] 利用模糊 Petri 网提出模糊知识的动态表示模型,该模型具有模糊 Petri 网和进化算法的学习能力的特点,对信息动态调整的表达模型非常有用。Fei Qiao[15] 提出调度的模糊 Petri 网模型,该模型兼顾了最优调度和动态调度,使用重新启动决策和重调度方法,并涉及到一些模糊和随机信息。Fedor[16] 提出模糊 Petri 网作为知识表示模型,知识的传播终止于一个独特的稳定状态,并在此基础上,介绍了决策支持系统中的知识传播的一种算法。G. Xirogiannis[17] 提出了模糊认知图的模糊因果特性的利用

到稿日期:2015-07-25 返修日期:2016-02-15
张新菊(1981-),博士生,主要研究方向为系统可靠性、模糊 Petri 网等,E-mail:juzi200501@163.com;姚淑珍(1965-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为软件工程、Petri 网、分布式系统网络安全。

为基本的方法，以生成一个分层动态互连网络性能指标。Mohamed Amin[18]为满足各种应用领域的系统变化(如计算机数值控制、天气预报和专家系统等)引入了一类新的模糊Petri网，考虑了模糊推理过程电弧的体重变化，并给出了模型的形式化描述及稳定性分析。Barzegar[23]基于着色Petri网提出一种自适应模型，根据模糊逻辑和学习自动机，有效地降低交通拥堵时间。Wang[24]提出模糊着色时间Petri网规则模型，用来分析普适计算环境下的动态行为特征，根据模糊事件-条件-动作规则模型提出终止规则分析算法，通过基于模糊着色时间Petri网的分析验证，该模型和终止规则算法更适合普适计算。但是，模糊Petri网及扩展应用模型在构建的过程中随着模糊状态参数的动态变化而变化，则模糊阈值也会随着模型其他参数的变化而不断发生变化。目前在模糊Petri网应用方面取得一定的突破，但是在阈值调整方面还少有报道。Looney[19]提出模糊Petri网具有学习能力并可以调整阈值，Konar[20]通过训练实例提出阈值调整算法，本文基于多状态系统的动态变化状态建立多状态系统的模糊着色Petri网，并通过自适应模糊推理算法对模糊阈值参数进行调整，使模糊着色Petri网为多状态系统可靠性理论分析提供更好的模型基础。

3 模糊着色Petri网(FCPN)

为了定义模糊着色Petri网，先定义以下数学含义。

M^+：表示[0,1]之间的模糊集合；

MS：表示多重集合；

$Type$与Var：表示类型集；

命题：表示判断多状态系统状态是否发生的句子；

$p(a)$：表示节点函数中的节点；

则模糊着色Petri网(Fuzzy-Colored Petri Net，FCPN)定义为十七元组[25]。

$$S_{FCPN}=\langle \Sigma,P,D,T,A,N,C,G,E,Th,W,CF,\alpha,\beta,\gamma,\vartheta,\theta\rangle$$

其中，Σ表示有限非空类集合，称为颜色集；$P=\{P_1,P_2,\cdots,P_n\}$为库所(元件节点)节点的有限集合，表示多状态系统中每一个元件节点。其中，连续库所用单环圆表示，离散库所用双环圆表示，离散控制库所用虚线双环圆表示，连续控制库所用虚线单环圆表示。连续库所可以用来表示多状态系统中的非控制节点，离散库所可以用来表示多状态系统组中的控制节点。

$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_m\}$为变迁结点的有限集合，表示多状态系统节点之间的连接关系；

$D=\{d_1,d_2,\cdots,d_k\}$表示节点命题的有限集合；

$A=\{a_1,a_2,\cdots,a_k\}$为有限弧集，表示某一时刻多状态系统可以发生的变迁弧集；

$N:A->P\times T\cup T\times P$为节点函数，每条弧映射为一个节点对，节点对中的第一个元素为源节点，第二个为目标节点；

$C:P->\Sigma$为库所的颜色函数，即映射每个库所到颜色集的有限子集；

$G:T\to expression$为卫函数，其中，$\forall t\in T:[Type(G(t))=Boolean\wedge Type(VarG(t)))\subseteq\Sigma]$；

$E:A\to expression$为弧表达函数，其中，$\forall a\in A:[Type(E(a))=C(p(a))MS\wedge Type(Var(E(a)))\subseteq\Sigma]$；

$T_h=diag\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_k\}$，$\lambda_i->M^+$，表示变迁$t_j$的启动阈值；

$W=\{\omega_{ij}\}$，$\omega_{ij}->M^+$，表示从输入库所p_i到变迁t_j或者变迁t_j到输出库所p_i的弧权重集合；

$CF=\{cf_1,cf_2,\cdots,cf_m\}$为置信因子集合；

$\alpha:T->[0,1]$表示模糊变迁到置信因子的模糊函数；

$\beta:P->D$表示每个节点命题到模糊库所之间的双向映射函数；

$\gamma:P->Th$为关联函数，表示模糊库所映射到阈值的函数；

$\vartheta:P->M^+$为关联函数，表示模糊集合分配到每个模糊库所的关联函数；

$\theta:P->W$为关联函数，表示将权重分配到每个模糊库所的关联函数。

下面对FCPN模型进行几点说明。

说明1　模糊着色Petri网的点火规则：1)当且仅当变迁的输入库所中的token颜色集的数量等于变迁相关的颜色集的数量，此时变迁可以点火；2)当变迁点火成功之后，输入库所中的token颜色消失，其输出库所中的token颜色由输出弧上的关联函数来定义。

说明2　若$p_i\in I(t),t\in T$，则从库所p_i到变迁t之间存在一条有向弧，该弧是变迁t的输入弧，库所p_i是变迁t的输入库所；若$p_i\in O(t),t\in T$，则从变迁t到库所p_i之间存在一条有向弧，该弧是变迁t的输出弧，库所p_i是变迁t的输出库所。

说明3　$\forall t_k\in T,\sum_{i=1}^{n}\alpha(d_i,t_k)-\omega_{ij}\geqslant\lambda_k$，则称该变迁$t_k$($k=1,2,\cdots,m$)是使能的。即对于任意变迁..($k=1,2,\cdots,m$)来说，其所有输入库所的置信度(相应命题的置信度之和)与相应输入弧上的权重之差大于或等于变迁的启动阈值，则变迁t_k是使能的。

说明4　当变迁t_k触发时，输入库所中的标记值不发生变化，输出库所p_i新的置信度值变化为：

$$\alpha(t_k,d_j)=\sum_{i=1}^{n}\alpha(d_i,t_k)-\omega_{ik}+\alpha(t_k,d_j),j=1,2,\cdots,n,\quad k=1,2,\cdots,m \tag{1}$$

说明5　当离散库所p_i是多个变迁$t_k(k=1,2,\cdots,m)$的输出库所，且当这些使能的变迁t_k触发时，离散库所p_i得到的命题置信度为：

$$\max\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha(d_i,t_k)-\omega_{ik}+\alpha(t_k,d_j)\right),j=1,2,\cdots,n,\quad k=1,2,\cdots,m \tag{2}$$

由以上定义可知，对于模糊着色Petri网的某一变迁，若其输入库所的置信度较低，该变迁引发伴随一定的资源消耗，将导致输出库所置信度更低。

说明6　如果在时刻t，连续变迁的使能状态不发生变化且连续变迁的平均实施速率为τ_i，则模糊着色Petri网的连续库所p_i中的命题置信度为：

$$\sum_{t}C(p_{i-1},t_{i-1,i})\ \tau_j \tag{3}$$

其中，$C(p_{i-1},t_{i-1,i})$表示关联矩阵中库所p_{i-1}所对应的行和变迁$t_{i-1,i}$所对应的列相交处的元素，τ_i为库所p_{i-1}所对应的行和变迁$t_{i-1,i}$所对应的列相交处的列向量。

4 FCPN的自适应模糊推理算法

4.1 多状态系统可靠度

在该模糊着色Petri网模型中，有3个特征：1)一个库所有多个token，并且每个token对应不同的命题，每个命题对应不同的变迁阈值；2)每个库所可能存在特殊token，该类to-

ken 对应不同的变迁阈值；3）每个库所到每个变迁阈值是一个双向映射。

文献[21]指出多状态系统可靠性时，需要满足指定的需求，该需求可以是一个固定值，也可以是一个可变值。在本文中，该需求值即随着不同的操作而发生变化，此时多状态系统可靠性为平均无故障时间间隔。则向量 $T=(T_1,\cdots,T_k)$ 和 $d=(d_1,\cdots,d_k)$ 分别表示持续时间和需求值，则多状态系统可靠度(MR_d)定义为：

$$MR_d=\frac{\sum_{\omega=1}^{k}P(\varphi(x)\geqslant d_\omega)T_\omega}{\sum_{\omega=1}^{k}T_\omega} \tag{4}$$

结合模糊着色 Petri 网定义，可靠度表示为：

$$MR_d=\frac{\sum_{\omega=1}^{k}P(\varphi(d_i)\geqslant d_\omega)T_\omega}{\sum_{\omega=1}^{k}T_\omega}$$

$$\text{或 } MR_d=\frac{\sum_{\omega=1}^{k}P(\varphi(d_i)\geqslant d_\omega)T_\omega}{\sum_{\omega=1}^{k}T_\omega} \tag{5}$$

此外，在多状态系统中，每个元件的多个模糊状态之间可以进行概率分配，其中关键状态概率对分析多状态系统的可靠性起着重要作用。在文献[18]中，多状态系统元件可靠度(MSRMC)融合了每个系统状态信息，在模糊 Petri 网中，结合可调整阈值，当 $P(\alpha(d_i,t_k)\geqslant\lambda_\omega\mid d_i)$ 和 $P(x)\geqslant\lambda_\omega$ 时，可靠度定义为平均绝对误差(MAD)：

$$MAD_i=E(\sum_{\omega}(P(\varphi(d_i)\geqslant\lambda_\omega-P(x)\geqslant\lambda_\omega\mid T_\omega'))$$

$$=\sum_j\alpha(d_i,t_k)\sum_{\omega}(P(\varphi(d_i)\geqslant\lambda_\omega-P(x)\geqslant\lambda_\omega\mid T_\omega')$$

$$T_\omega'=\frac{T_\omega}{\sum_{i=1}^{k}T_i} \tag{6}$$

同理，在模糊着色 Petri 网中，平均多状态系统可靠性值(MMAW)定义为：

$$MMAW_i=1+E[\sum_{\omega}\max(0,\beta_{ij}^{\omega})]$$

$$=1+\sum_j\alpha(d_i,t_k)\sum_{\omega}\max(0,\beta_{ij}^{\omega}) \tag{7}$$

$$\beta_{ij}^{\omega}=\frac{\sum_{\omega}(P(\varphi(d_i)\geqslant\lambda_\omega T_\omega'-P(x)\geqslant\lambda_\omega T_\omega')}{\sum_{\omega}P(x)\geqslant\lambda_\omega T_\omega'} \tag{8}$$

此外，多状态系统福塞尔-维斯利[18]定义为：

$$MMFV_i=E[\sum_{\omega}\max(0,-\beta_{ij}^{\omega})]$$

$$=\sum_j\alpha(d_i,t_k)\sum_{\omega}\max(0,-\beta_{ij}^{\omega}) \tag{9}$$

由于模糊着色 Petri 网不具备学习特征，神经网络的学习算法的扩展算法可以对该模型参数进行自适应调整，使其更符合多状态系统动态变化可靠性分析需求。

4.2 模糊着色 Petri 网对模糊规则的定义

由 4.1 节可知，多状态系统模糊可靠性分析中的主要问题在于如何给可靠性模型建立一个具有明确物理定义的隶属函数，为了进行模糊可靠性分析，首先介绍模糊集的知识。

定义 1 对于模糊集 $A\in F(U)$ 和任意的 $\alpha\in[0,1]$，定义 A 的 α 截集为 $A^\alpha=\{\mu\mid U_A(\mu)\geqslant\alpha\}$，其中，$\alpha$ 为置信水平，若 $A^\alpha=\{\mu\mid U_A(\mu)>\alpha\}$，则 A^α 为 A 的 α 强截集。

显然，A^α 和 A 都是论域 U 上的普通集合。因此，模糊集的截集和强截集都是将模糊集转变为普通集的一种方法。

在半梯形分布中，命题可信度也即 d_i 的重要度，可用 $(a1,a2)$ 来表示，$a1$ 和 $a2$ 给出模糊数据的最小和最大限。在模糊集中，截集四则运算规则如下：

$$A^\alpha+B^\alpha=[A_1^\alpha+B_1^\alpha,A_2^\alpha+B_2^\alpha]$$

$$A^\alpha-B^\alpha=[A_1^\alpha-B_1^\alpha,A_2^\alpha-B_2^\alpha]$$

$$A^\alpha*B^\alpha=[A_1^\alpha*B_1^\alpha,A_2^\alpha*B_2^\alpha]$$

$$A^\alpha/B^\alpha=[A_1^\alpha/B_1^\alpha,A_2^\alpha/B_2^\alpha]$$

当 $R_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 为 $[0,1]$ 上的模糊集时，系统可靠性为 $R=f(R_1,R_2,\cdots,R_n)$，可根据模糊集的四则运算规则得到。则串联系统和并联系统的系统模糊可靠度的 α 截集为：

$$R_{串}=\prod_{i=1}^{n}R_i=\prod_{i=1}^{n}(a_{i2}-a_{i1})\alpha+a_{i1}$$

$$R_{并}=1-\prod_{i=1}^{n}(1-R_i)=1-\prod_{i=1}^{n}1-a_{i2}-(a_{i2}-a_{i1})\alpha$$

$R_{串}$ 和 $R_{并}$ 都是模糊数，因此需要通过解模糊来求得系统的整体可靠度。

可以看出，根据模糊数对系统进行可靠性分析时，其计算是非常复杂的，特别对于庞大的复杂系统，其计算量相当大，因此需要寻找比较简单的方法进行具有模糊参数的系统可靠性估计。本文提出神经网络的学习算法的扩展算法即自适应模糊推理算法对该模型参数进行自适应调整。

4.3 自适应模糊推理算法

在自适应模糊推理算法中，根据调整的速度和范围进行阈值调整。在调整过程中，每一个模糊状态的阈值会产生一个局部最优值。

首先，定义 $\lambda_{mi}=\langle\lambda_{mi_1},\lambda_{mi_{12}},\cdots,\lambda_{mi_n}\rangle$ 和 $\lambda_{mj}=\langle\lambda_{mj_1},\lambda_{mj_2},\cdots,\lambda_{mj_n}\rangle$ 是 $[0,1]$ 之间的向量，$.\lambda_{mi_n}$ 代表开始命题的阈值，$.\lambda_{mj_n}$ 代表调整之后的命题阈值。因此，子集 $S(.\lambda_{mi_n},.\lambda_{mj_n})$ 定义为：

$$S(.\lambda_{mi_n},.\lambda_{mj_n})=\frac{M(\lambda_{mi_n}\cap.\lambda_{mj_n})}{M(\lambda_{mi_n})} \tag{10}$$

其中，$M(\lambda_{mi_n})$ 是向量 $.\lambda_{mi_n}$ 的西格玛计数，$M(\lambda_{mi_n}\cap.\lambda_{mj_n})$ 是向量 $.\lambda_{mi_n}$ 和 $.\lambda_{mj_n}$ 交集的西格玛计数。

以往对多模型参数算法的研究把目标参数的调整范围无限细分，然后对每一个调整范围进行精确的估算。然而，即使将所有精确描述调整范围的模型都选作模型集合的元素也无法覆盖所有的调整范围，相反，将导致计算量的急剧增加以及跟踪性能的下降。在本文提出的自适应模糊推理算法中，包含了通过不同模糊规则评估的方法，通过每个模糊状态对应不同的阈值并且结合不同模糊规则评估方法的使用，可以有效避免变迁的失误触发；

自适应模糊推理算法自适应地调整系统参数，同时增加了对目标参数调整范围的覆盖，它有两个功能：1）在自适应模糊推理过程中，模糊推理算法通过新增阈值数值来帮助模糊参数跳出局部极小点，加快评估参数的收敛速度；2）参数训练结束后，模糊推理算法通过删除多余参数值来改善模糊推理算法的泛化能力。其原理流程图如图 1 所示。

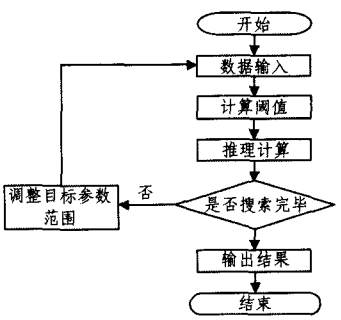

图 1 自适应模糊推理算法原理流程图

其算法实现伪代码为：

1)构造所有库所的可达状态库所 $P=\{P_1,P_1,\cdots,P_n\}$；

2)构造可达状态库所中所有库所的相邻库所集合；

3)在可达状态库所 P 中，对于 P_i 列中所有未达库所 P_j：

If P_j 是输入库所，

Then 输入变迁 t_j 的值；

End

If 输入变迁 t_j 对应的阈值是随机数，$.\lambda_{mj_n}=\langle y_i\rangle$，$.\lambda_{mi_n}=\langle z_i\rangle$，且 $.y_i\in[0,1]$，$y_i>=\alpha(d_i,t_m)$；

Then $.\lambda_m=\langle y_i\rangle$；

Else λ_m 保持不变；

End.

在可达状态库所 P 中，对于 P_i 列中所有库所 P_j

If P_j 无相邻库所，

Then P_i 标记为“可达”

Else If 相邻集合 $AP_i=\emptyset$，$y_i\geqslant\alpha(d_i,t_m)$，

Then $\lambda_m=\lambda_m+S(.\lambda_{mi_n},.\lambda_{mj_n})*\mu_m$（$\mu_m$是确定性因子）；

Else λ_m 保持不变；

End

End.

If $AP_i=\{p_1,p_2,\cdots,p_m\}$ 且 $y_1\geqslant\alpha(d_i,t_1)$，$y_2\geqslant\alpha(d_i,t_2)$，$\cdots$，$y_i\geqslant\alpha(d_i,t_m)$；

Then $\lambda_m=\lambda_m+S(.\lambda_{mi_n},.\lambda_{mj_n})*\mu_m$（$\mu_m$是确定性因子）；

Else λ_m 保持不变 end

End.

If P_i 不是输出库所，且存在相邻状态库所集 $AP_i=\emptyset$ 且 $y_i\geqslant\alpha(d_i,t_m)$，

Then $\lambda_m=\lambda_m+S(.\lambda_{mi_n},.\lambda_{mj_n})*\mu_m$（$\mu_m$是确定性因子）；

Else λ_m 保持不变

End

If $AP_i=\{p_1,p_2,\cdots,p_m\}$且

$y_1\geqslant\alpha(d_i,t_1)$，$y_2\geqslant\alpha(d_i,t_2)$，$\cdots$，$y_i\geqslant\alpha(d_i,t_m)$，

Then $\lambda_m=\lambda_m+S(.\lambda_{ij_n},.\lambda_{ij_n})*\mu_i$（$\mu_i$ 是确定性因子）；

Else λ_m 保持不变；

End.

4)对于每一个 P_i，选择所有变迁阈值中的最大值为该库所对于变迁的阈值；

5)输出变迁 t_i 的阈值，并且该阈值要大于或等于每个模糊状态对应的命题可信度。

该自适应模糊推理算法与其他模糊系统如文献[10]提出的 BP 网络的模糊推理算法相比较，具有以下优点：

1)该算法具有全局搜索能力，并且在随机初始值和自适应评估的基础上得到每一个阈值的最优值；

2)可以得到多个阈值，这在许多实际应用中是一个非常吻合的情况，并且通过该算法的实现，可以有效避免许多变迁的失误触发；

3)当自适应模糊推理算法在训练过程中，相邻状态库所之间的依赖关系可以动态发生变化，这是 BP 网络的模糊推理算法所不具备的。

通过下面实例及比较来验证本算法的正确性、可行性及优点。

5 实例验证及比较

5.1 实验验证

在实际情况中，电力传输系统会存在不同的工作状态容量，所以整个电力传输系统实际是一个多状态系统。以电力传输系统为实例进行阈值调整验证并与传统可靠性计算方法进行比较，电力传输系统业务执行过程流程图如图 2 所示。

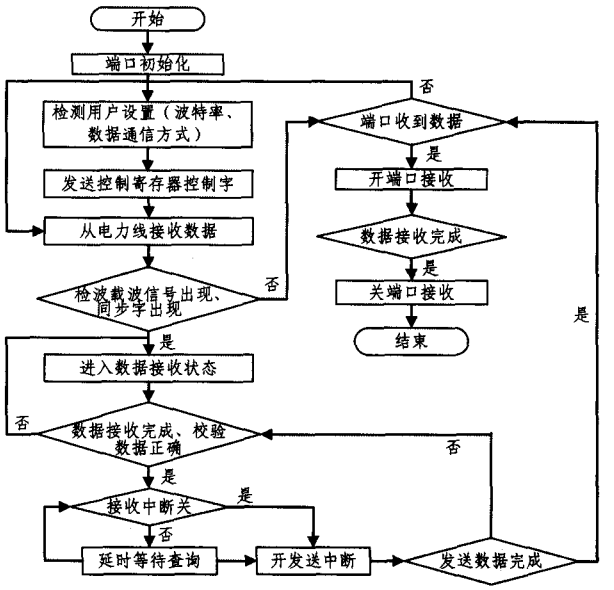

图 2 电力传输系统业务执行流程图

每层节点抽象成一个库所表示，节点库各节点 P_0，P_1，P_2，P_3 分别表示监测用户设置、发送控制寄存器控制字、发送端口信号以及数据传送。其变迁权重 w_{11} 表示参数接收成功，w_{12} 表示参数接收失败，以此类推。T_h 表示每个变迁的阈值；μ 表示每层节点库所对应命题的可信度，则生成该电力传输系统型执行流程图对应的模糊着色 Petri 网模型如图 3 所示（为抽象所需，只考虑一种颜色）。

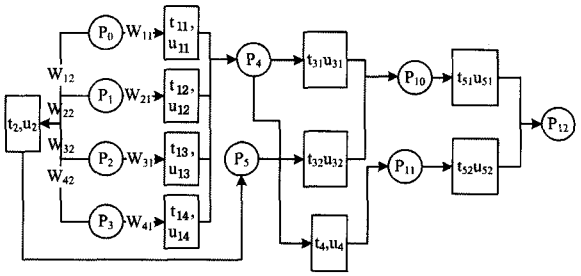

图 3 电力传输系统的模糊着色 Petri 网模型

在该模糊着色 Petri 网模型中，节点 P_0，P_1，P_2，P_3 初始可靠度分别假设为 0.9，0.8，0.7，0.6。ω 表示了该模型中各节点的连接关系。P_4 表示该模型的正常中间状态，P_5 表示该模型非正常状态所需修复的中间状态，P_{10} 表示正常状态，P_{11} 表示非正常状态修复之后的状态，P_{12} 表示系统终态。

根据式(4)－式(8)计算该电力传输系统的可靠性，如 $MR_d=\dfrac{\sum_{\omega=1}^{k}P(\varphi(d_i)\geqslant\lambda_{i\omega})T_\omega}{\sum_{\omega=1}^{k}T_\omega}$，得知首先需要估算出阈值 $\lambda_{i\omega}$。在计算可靠性的过程中，阈值会发生动态变化，为了得到更为精确的可靠性，需要利用本文提出的自适应模糊推理算法进行阈值参数优化。

首先，根据自适应模糊推理算法利用 matlab 进行仿真，并给出一组阈值初始值：$\lambda_{11}=\lambda_{21}=\lambda_{31}=\lambda_{41}=\lambda_{61}=\lambda_{71}=0$，$\lambda_{12}=$

$\lambda_{22}=\lambda_{32}=\lambda_{42}=\lambda_{62}=\lambda_{72}=1$。

其仿真验证步骤如下：

(1)数据预处理，对上述电力传输系统模型参考丹麦信息与数学建模技术大学提供的数学数据包中的某一通信模型失效数据，作为该模型的实例数据(见表 1)进行分析。分别用可靠性定义的函数计算此模型从 t_1 到 t_{10} 的阈值，记作 $n_{节点}(t_i)$，实际测试的协同通信模型的平均无故障时间记作 $N_{xt}(t_i)$。采用前 4 个时刻各模型的阈值计算模型动态可靠性。

(2)利用自适应模糊推理算法评估各故障时刻节点的阈值。

(3)预计第 $t+1$ 时刻的系统平均无故障时间，并利用系统可靠度计算方法式(5)－式(9)计算可靠性动态预计值。

表 1　电力传输系统模型的失效实例数据

数据组	故障发现时间(天)	$n_A(t_i)$	$n_B(t_i)$	$n_C(t_i)$	N_{xt}	动态预计值
1	9	1	0	0	1	
2	21	0.759	0.884	0	2	
3	24	0.849	0.567	0.973	3	
4	26	0.958	0.967	0.431	6	
5	31	0.591	0.121	0.531	11	10.897
6	43	0.592	0.987	0.263	16	15.876
7	50	0.431	0.323	0.697	17	19.85
8	58	0.843	0.342	0.315	19	20.529
9	63	0.948	0.215	0.723	20	21.723
10	70	0.421	0.862	0.431	21	22.431

阈值调整的 Matlab 仿真图如图 4 所示。

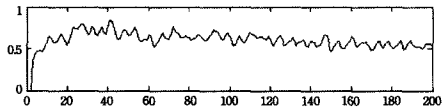

图 4　模糊着色 Petri 网阈值仿真图

经过一系列的循环仿真之后，得到各节点阈值代表值为：

$\lambda_{11}=0.0011$，$\lambda_{21}=0.5305$，$\lambda_{31}=0.4385$，$\lambda_{41}=0.6534$，

$\lambda_{05}=0.0456$，$\lambda_{14}=0.8999$，$\lambda_{24}=0.4674$，$\lambda_{34}=0.2888$，

$\lambda_{44}=0.3526$，$\lambda_{45}=0.6896$，$\lambda_{56}=0.9133$，$\lambda_{65}=0.6435$，

$\lambda_{66}=0.6536$，$\lambda_{68}=0.5786$，$\lambda_{88}=0.8023$

结果表明，若改变阈值的搜索范围和确定性因子会影响循环收敛速度和所能达到的阈值最小误差，确定性因子越大，收敛速度越快，且可以得到多个阈值，这在许多实际应用中是一个非常吻合的情况，并且通过该算法的实现，可以有效避免许多变迁的失误触发。此外，进行了模糊着色 Petri 网的自适应模糊推理算法和 BP 网络的模糊推理算法在收敛速度和相邻库所的依赖关系的验证比较，其验证实验结果如图 5、图 6 所示。

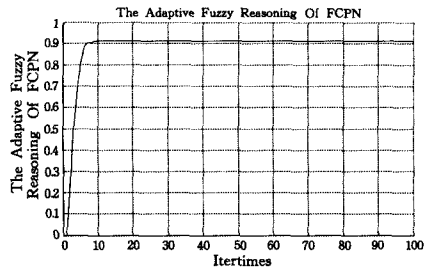

图 5　模糊着色 Petri 网的自适应模糊推理算法

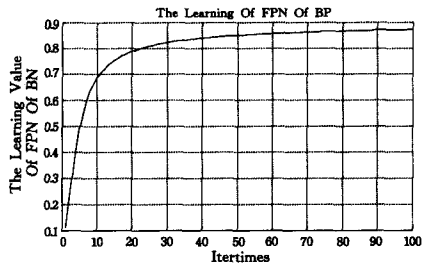

图 6　BP 网络的模糊推理算法

通过对模糊着色 Petri 网的自适应模糊推理算法和 BP 网络的模糊推理算法进行比较，可以看出模糊着色 Petri 网的自适应模糊推理算法在全局搜索方面，通过调整参数范围，收敛速度较快，并且在随机初始值和自适应评估的基础上得到每一个阈值的最优值；且自适应模糊推理算法在训练过程中，相邻状态库所之间的依赖关系可以动态发生变化，更具有实际应用价值。

此外，利用自适应模糊推理算法仿真得到的阈值，根据系统可靠度计算方法如式(5)－式(9)计算可靠性动态预计值，实例数据如表 2 所列。

表 2　不同阈值的可靠度

Transition	Transition Capacity	Probability	$MR_d=0.916$ $\sum_{\omega=1}^{k} P(\alpha(d_{ij},t_k)\geqslant\lambda_\omega)T_\omega$
T_0	0 3	0 0.0456	0 0.90286
T_1	0 3 4 8	0.0011 0.5305 0.4385 0.6534	0.92632 0.92610 0.92632 0.93535
T_2	0 3 4 6	0 0 0.4674 0	0 0 0.91624 0
T_3	0 3 6	0 0.2888 0	0 0.91519 0
T_4	0 3 4	0.3526 0 0	0.92628 0 0
T_5	0 3 4 8	0 0 0.6896 0.6435	0 0 0.91686 0.92158
T_6	0 3 8	0.9133 0.6536 0	0.90640 0.91634 0
T_7	0 3 4 6	0 0 0 0	0 0 0 0
T_8	0 3 4	0 0.5786 0.8023	0 0.91594 0.92548
T_9	0 3 6	0 0 0	0 0 0

表 3　FCPN 的 MAD，MMAW 及 MMFV 值

次数	MAD		MMAW		MMFV	
j	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance
1	0.01026	2.768E−10	1.00032	3.243E−10	0.02000	1.230E−38
2	0.03673	2.198E−10	1.01024	3.390E−09	0.00001	1.923E−14
3	0.00012	2.324E−11	1.01023	2.148E−09	0.01034	3.342E−13
4	0.01915	2.100E−09	1.00561	2.345E−10	0.00066	1.238E−13
5	0.05494	2.878E−09	1.02998	5.304E−09	0.00012	4.562E−15
6	0.61821	1.608E−10	1.02940	2.495E−08	0.01100	6.178E−14
7	0.01023	1.234E−09	1.02007	2.123E−09	0.03000	1.098E−16
8	0.01923	2.192E−09	1.02561	1.562E−09	0.01012	1.428E−13
9	0.21024	1.075E−09	1.00072	5.324E−11	0.00529	1.327E−12
10	0.01869	2.304E−09	1.00012	1.881E−11	0.00101	3.502E−15

此时，为了验证不同阈值情况下多状态系统可靠度计算的鲁棒性，利用 1000000 个实验数据分 10 次进行验证，每个实验结果如表 3 所列。

通过以上实验结果表明该方法是可行的，实验结果符合阈值调整的预期值。随着多状态系统节点的增加，每一个过渡的状态变迁阈值变得更加准确，系统变得更为可靠。从统计表可以看到，各种误差非常低，证明该阈值调整措施在一定程度上具有实际应用价值。

5.2　结果比较

采用 Matlab 仿真法进行电力传输系统可靠性分析[26]比

较，用来评估由传统可靠性分析方法和基于多状态理论的可靠性分析方法得到的结果。比较结果如表 4 所列，从比较结果可以看出，虽然传统的可靠性分析方法比较简单，但是与参考值相比，传统可靠性分析结果比较传统。

表 4　电力传输系统的状态数与可靠性

分析方法	可靠度
参考文献	1
传统可靠性分析	0.9019
多状态可靠性分析	0.9988

从表 4 可以看出，此时利用传统的可靠性分析方法来分析电力传输系统是不可靠的，且当单元件无电压、低电压的失效模式对电力传输系统影响也是不同的，而传统的可靠性分析方法没有考虑这一点。而从结果对比可以看出，基于多状态理论的可靠性分析方法所得到的结果与传统分析方法对比，更加接近参考值。增加电力传输系统状态数，根据多阶段迭代算法得出的权重评估值来评估电力传输系统可靠性可以提高估算精度。

从图 7 可以看出，利用传统分析方法得出的电力传输系统可靠性分析比较保守，而基于多状态系统可靠性分析理论得出的可靠性与实际情况比较接近。因此，在电力传输系统开始工作之前，如果条件允许，尽量对各个元件进行电压测试，对低电压和无电压的元件进行替换，以保障电力传输系统稳定持续工作。

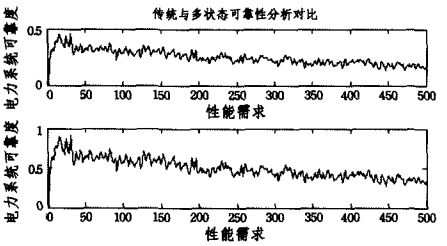

图 7　传统与多状态可靠性分析结果对比

结束语　本文提出多状态软件系统可靠性分析的模糊着色 Petri 网的建模与分析方法，这种新方法是基于模糊着色 Petri 网的模糊阈值的调整。首先提出了多状态系统的模糊着色 Petri 网模型；其次利用 FCPN 的自适应模糊推理算法，将阈值调整到最优值；最后，根据概率评估可靠性和 MAD，MMAW 及 MMFV 值。根据实验结果，并通过与 BP 网络的模糊推理算法进行比较，表明该方法是可行的，结果符合阈值调整的预期值，更具有实际应用价值，且误差非常低，这使得该方法从用户的角度来看更可靠、更高效。

参 考 文 献

[1] Ding Y, Zuo M J, Lisnianski A, et al. A framework for reliability approximation of multi-state weighted k-out-of-n systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2): 297-308

[2] Li W, Zuo M J. Reliability evaluation of multi-state weighted k-out-of-n systems[J]. Reliability Engineer System Safety, 2008, 93(1): 160-167

[3] Kong Z N, Yeh E M. On the latency of information dissemination in mobile ad hoc networks[C]// Proc. of the Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). New York: ACM Press, 2008: 139-148

[4] Gao Peng, Xie Li-yang. Reliability analysis of multi-state systems based on improved universal generating function [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 934-939

[5] Xing Liu-dong. A new decision-diagram-based method for efficient analysis on multistate systems [J]. IEEE Trans Dependable and Secure Computing, 2009, 6(3): 161-174

[6] Levitin G. Reliability evaluation for acyclic trans mission networks of multi-state elements with delays[J]. IEEE Trans Reliability, 2003, 52(2): 231-237

[7] Bechtold R. Knowledge Attributes: Fuzzy Application of Temporal Constraints in Active Expert Database Systems[C]// Proceedings of the IEEE/ACM forth International Conference on Developing and Managing Expert Systems. Los Alaminos, CAP, 1991: 29-35

[8] Marin A, Balsamo S, Harrison P G. Analysis of stochastic Petri nets with signals[J]. Perform. Eval., 2012, 69(11): 551-572

[9] Xu H, Wang Y, Jia P. Fuzzy neural Petri nets[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Neural Networks: Part II-Advances inNeural Networks. 2007: 328-335

[10] Bao Pei-ming. Fuzzy Petri net learning ability based on BP network[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(5): 695-702 (in Chinese)
鲍培明. 基于 BP 网络的模糊 Petri 网的学习能力[J]. 计算机学报, 2004, 27(5): 695-702

[11] Shen R L, Lai H Y, Lai A F. The implementation of a smartphone-based fall detection systemusing a high-level fuzzy Petri net[J]. Applied Soft Computing, 2015, 26(c): 390-400

[12] Feng Liang-bing. A Learning Fuzzy Petri Net Model[J]. IEEE Trans on Electrical & Electronic Engineering, 2012, 7: 274-282

[13] Ribaric S, Zadrija V. An object-oriented implementation of a knowledge representation scheme based on Fuzzy Petri nets[C]// 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery(FSKD). 2010: 123-132

[14] Wang Wei-ming, Peng Xun, Zhu Guo-niu, et al. Dynamic representation of fuzzy knowledge based on fuzzy petri net and genetic-particle swarm optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(4): 1369-1376

[15] Qiao Fei, Wu Qi-di, Li Li, et al. A fuzzy Petri net-based reasoning method for rescheduling[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(5): 221-229

[16] Lehocki F, Juhás G, Lorenz R, et al. Decision Support with Logical and Fuzzy Petri Nets[J]. Cybernetics and Systems, 2008, 39(6): 617-640

[17] Xirogiannis G, Glykas M. Fuzzy cognitive maps in business analysis and performance-driven change[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2004, 38: 439-452

[18] Mohamed A, Doaa S. Reasoning dynamic fuzzy systems based on adaptive fuzzy higher order Petri nets[J]. Information Sciences, 2014, 286(12): 161-172

[19] Looney C G. Fuzzy Petri nets and applications[C]// Tzafestas S G, et al. Fuzzy Reasoning in Information. Decision and Control Systems, 1994: 511-527

[20] Konar A, Chakraborty Uday K, Wang P. Supervised learning on a fuzzy Petri net[J]. Information Sciences, 2005, 172(3/4): 397-416

(下转第 101 页)

T_j 是有效冲突中的变迁，应标明是按优先级解决还是按比例分配流量

4)以 $p^{(k-1)}$ 作为 $DG[\sum_c(t)]$ 的一个位置，并标明 $v(t)=v(t_{k-1})$，从 $T^{(k-1)}$ 到 $p^{(k-1)}$ 画一条有向弧

5)计算 $B(t_{k-1})=Cv(t_{k-1})$

step 2 If $B(t_{k-1})\geqslant 0$，转 step 6； 否则，转 step 3

step 3 $t_k=t_{k-1}+\min_i\{\frac{m_i(t_{k-1})}{-B_i(t_{k-1})}\mid p_i\in P^s(t_{k-1})$且 $B_i(t_{k-1})<0\}$

$M(t_k)=M(t_{k-1})+(t_k-t_{k-1})B(t_{k-1})$

step 4 If $M(t_k)\neq M(t_i)$，$\forall i=0,1,\cdots,k-1$，则以 $T^{(k)}$ 为 $DG[\sum_c(t)]$ 的一个变迁，并标明 $M(t_k)$，t_k，从 $p^{(k-1)}$ 到 $T^{(k)}$ 画一条有向弧，转 step 5；If $M(t_k)=M(t_i)$，$\exists i=0,1,\cdots,k-1$，则从 $p^{(k-1)}$ 到 $T^{(i)}$ 画一条有向弧，转 step 6

step 5 $k=k+1$，转 step 1

step 6 输出 $DG[\sum_c(t)]$

5 应用举例

对于图 1 所示的有界 $\sum_c(t)$，它含有一个有效冲突 $cf=\langle p_2,\{T_2,T_3\},M(t)\rangle$，基于有效冲突的两种解决方式应用算法 3 分别构造其演变图。在初始时刻 $t_0=0$ 时，$M(0)=[1,0,0,0]^T$。

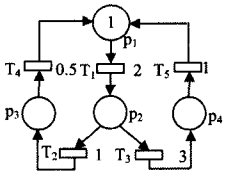

图 1 含有效冲突的 $\sum_c(t)$

(1)采用优先级解决图 1 中的有效冲突，设变迁 T_2 的优先级高于 T_3，应用算法 3，则得其演变图如图 2 所示。

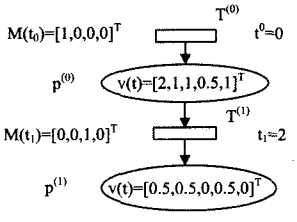

图 2 用优先级解决有效冲突的 $DG[\sum_c(t)]$

(2)采用按比例分配流量解决图 1 中的有效冲突，应用算法 3，则得其演变图如图 3 所示。

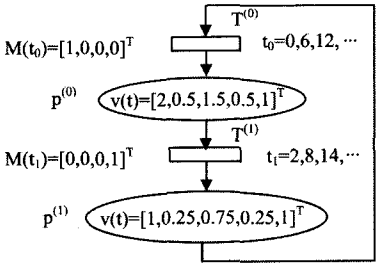

图 3 按比例分配流量解决有效冲突的 $DG[\sum_c(t)]$

参 考 文 献

[1] David R, Alla H. 佩特利网和逻辑控制器图形示工具[M]. 黄建文，赵不贿，译. 北京：机械工业出版社，1996

[2] David R, Alla H. Petri Nets and Grafcet: Tools for Modeling Discrete Event System[M]. London: Pretice-Hall, 1992

[3] Zhao Yi-jun. Propertries and Determining Methods of Continuous Petri Nets[D]. Taian: Shandong Mining Institute and Technology, 1998(in Chinese)
赵义军. 连续 Petri 网的性质及判定方法[D]. 泰安：山东矿业学院，1998

[4] Zhao Yi-jun, Wang Pei-liang. Developing Graph and Generating Algorithm of CCPN[J]. Computer Science, 1999, 26(6Suppl): 1-6(in Chinese)
赵义军，王培良. CCPN 的演变图及其构造算法[J]. 计算机科学，1999，26(6 增刊)：1-6

[5] Peter J L. Petri 网理论与系统模拟[M]. 吴哲辉，译. 徐州：中国矿业大学出版社，1989

[6] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京：机械工业出版社，2006

[7] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京：电子工业出版社，2005

[8] David R, Alla H. Petri Net for Modeling of Dynamic Systems-A Survey[J]. Automatica, 1994, 30(2): 36-41

[9] Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-581

[10] Li Zhi-jia, Hu Xiang, Jiao Li, et al. Performance Evaluation of Job Scheduling and InfiniBand Network Interconnection in High Performance Computing System Based on Stochastic Petri Nets [J]. Computer Science, 2015, 42(1): 31-37(in Chinese)
李智佳，胡翔，焦莉，等. 基于随机 Petri 网的高性能计算系统作业调度及 InfiniBand 网络互连的性能分析[J]. 计算机科学，2015，42(1)：31-37

(上接第 82 页)

[21] Ramirez-Marquez J E, Coit D W. Composite Importance Measures for Multi-State Systems with Multi-State Components[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(3): 321-331

[22] Looney C G. Fuzzy Petri nets and applications[C]// Tzafestas S G, et al. Fuzzy Reasoning in Information. Decision and Control Systems, 1994: 511-527

[23] Barzegar S, Davoudpour M, Meybodi M R. Formalized learning automata with adaptive fuzzy coloured Petri net; an application specific to managing traffic signals[J]. Scientia Iranica, 2011, 18 (3): 554-565

[24] Wang Xiao-ming, Zhang Li-chen, Dou Wen-yang. Fuzzy colored time Petri net and termination analysis for fuzzy Event-Condition-Action rules[J]. Information Sciences, 2013, 232(20): 225-240

[25] Hanafi J. Modeling of Collection Strategies for End-of-Life Products using Colored Petri Net[D]. Australian: The University of New South Wales, 2008

[26] Liu X, Zou J, Zhang X. Investigations on the reliability of storage battery array with high capability[C]// 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China, 2008: 735-737