多阶段任务系统通用可靠性仿真模型

杨春辉 杨建军 姚 路

(海军工程大学 管理科学与工程系, 武汉 430033)

摘 要: 归纳了当前多阶段任务系统(PMS,Phased Mission Systems)可靠性建模的基本假设,指出了解析模型描述和求解能力的不足以及仿真模型存在的难以转换的缺点. 应用着色 Petri 网(CPN,Colored Petri Net) Tools 建立 PMS 的多层通用仿真模型:顶层控制模型将 PMS 各阶段的故障树参数化,作为 CPN 通用仿真模型的输入;单阶段处理模型根据顶层控制模型的输入判别该阶段顶事件是否发生;底事件处理模型通过比较随机数和故障发生概率的大小产生故障. 通用仿真模型可以保持模型结构的稳定,同时又简化了仿真模型的生成. 案例对比了 CPN 仿真模型与二元决策图(BDD,Binary Decision Diagrams)算法的可靠性计算结果,证明了模型的正确性;具有动态变化参数的 PMS 仿真则说明了模型的适用性.

关 键 词: 可靠性; 多阶段任务系统; 着色 Petri 网; 通用仿真模型

中图分类号: E 911

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)12-1562-07

General model for PMS reliability

Yang Chunhui Yang Jianjun Yao Lu

(Department of Management Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The hypothesis of reliability model of phased mission systems (PMS) was summed up, and then the shortcoming was also presented that analytical model of PMS is difficult to describe and calculate the complex system, at the same time the simulation model is also hard to be set up. By using the colored Petri net (CPN) Tools, the general model for PMS reliability was set up. The model includes 3 levels: the top control model, which turns the fault trees of PMS into the input parameters of CPN model; the single phase model, whose output is the state of the top event by the input parameters of the top control model; the bottom event model, which produces fault events by comparing rand number to the probability of fault. The general simulation model is robust which can keep the stable model structure for different PMS and the modeling process. The case contrasts the results of the general CPN model with analytical solution, which shows the CPN model is correct and more efficient.

Key words: reliability; phased mission system; colored Petri nets; general simulation model

多阶段任务系统(PMS,Phased Mission System)由多个不同的任务阶段组成,在时间上具有连续性和不重叠性的特征,与单阶段任务系统相比,在进行可靠性建模时需要考虑更多的因素. 首先,PMS 具有跨阶段的依赖性,如系统中单元阶段开始时的状态依赖于前一阶段完成时的状态. 其次,PMS 在不同的任务阶段表现出动态性:不同的系统结构、不同的任务需求、不同的可靠性要求、不同的任务环境等[1]. 典型的 PMS 系统如飞机的一次飞行任务包括起飞、升空、水平飞行、下降和着陆 5 个阶段,各阶段还可以继续细分为更小的分阶段,显然不同阶段的可靠性要求和工作

收稿日期: 2010-07-26; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:19; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1719.006
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1719.006.html
基金项目: 海军工程大学青年自然科学基金资助项目(HGDQNJJ037); 国防技术基础项目(Z082010B001)
作者简介: 杨春辉(1980 -),男,湖南娄底人,讲师,yangch@nudt.edu.cn.

状态是不同的.

目前,PMS 的可靠性建模方法主要分为基于状态空间的分析方法和基于组合模型的分析方法[2]2 类. 基于状态空间的分析模型包括马尔可夫模型[3]和 Petri 网模型[4],这类模型的特点是能够完整、准确地描述可维修 PMS 的动态行为和系统单元在 PMS 运行过程中的各种依赖关系;基于组合模型的分析方法一般首先采用可靠性框图(RBD, Reliability Block Diagram)或故障树(FT, Fault Tree)建立系统的可靠性模型,再应用数值方法对相应的可靠性参数进行计算.

由于建模复杂程度、描述能力、处理方法等的限制,应用数值方法计算 PMS 可靠性都要基于一定的假设条件对问题进行简化,从而能够简化模型,实现模型的推导和计算. 常用的假设包括:①阶段时间、阶段数目和阶段之间的关系是确定的;②系统中的单元均是两态的,即正常和故障 2 种状态;③系统中的各个单元之间是统计独立的;④系统中的单元均服从指数分布;⑤系统中的单元不可修或者修理时间服从指数分布;⑥系统中单元不存在共因失效.

随着研究的不断深入,可以减少或弱化某些假设条件的约束,并且 PMS 还可以与其他可靠性问题结合起来进行分析. 如基于多态二元决策图[5](MBDD,Multistate Binary Decision Diagrams)和多值决策图[6-7](MDD,Multivalued Decision Diagrams)方法解决存在多种失效模式的 PMS 问题;应用 DIFtree 和二元决策图(BDD,Binary Decision Diagrams),描述和求解不完全覆盖(IPC,Imperfect fault Coverage)与 PMS 结合[8-9]的问题;应用 BDD 求解多平台多阶段任务系统(multiplatform PMS)[10]等等. 然而,随着问题复杂程度的不断提高,上述确定性方法建模和求解变得越来越困难. 而仿真方法由于具有较强的模型描述和计算能力,可以更进一步放宽约束条件,包括系统单元具有不同的故障率分布、维修队列、单元关联失效等. 文献[4]研究了采用 Petri 网对多阶段任务系统进行建模,采用分层的方法进行构建,包括阶段 Petri 网(phase PN)、组件 Petri 网(component PN)、控制 Petri 网(master PN),其中阶段 Petri 网将各阶段的故障树直接转化为 Petri 网模型,这种建模方法的不足之处是随着 PMS 各阶段故障树模型结构的变化,必须重新进行建模,模型缺乏鲁棒性.

本文针对仿真模型构建困难的问题,采用面向对象的思想,研究建立通用的模型结构,在不同的多阶段任务系统输入的情况下,仍然能够保持模型结构不变,使模型具有很好的鲁棒性.

1　着色 Petri 网

定义 1　着色 Petri 网[11](CPN,Colored Petri Net):一个着色 Petri 网是一个九元组,$F_{\mathrm{CPN}}=(\Sigma,P,T,A,N,C,G,E,I)$,其中:

1) Σ 是一个非空类型的有限集合,也可称为颜色集;

2) P 是位置的有限集合;

3) T 是变迁的有限集合;

4) A 是弧的有限集合,并且满足:$P\cap T=P\cap A=T\cap A=\varnothing$;

5) N 是一个节点函数,$N:A\to P\times T\cup T\times P$,节点函数将每一条弧映射到一个二元组;

6) C 是一个颜色函数,$C:P\to\Sigma$,颜色函数将每个位置映射到某一个类型 $C(p)$;

7) G 是一个 guard 函数,它将变迁 T 与表达式相关联,并使得:$\forall t\in T:[\mathrm{Type}(G(t))=\mathrm{Bool}\wedge \mathrm{Type}(\mathrm{Var}(G(t)))\subseteq\Sigma]$;

8) E 是一个弧表达式函数,它将弧 A 与表达式相关联,并使得:$\forall a\in A:[\mathrm{Type}(E(a))=C(p)_{\mathrm{MS}}\wedge\mathrm{Type}(\mathrm{Var}(E(a)))\subseteq\Sigma]$,$p$ 是 $N(a)$ 中的位置,即每个弧表达式的计算结果为一个与相连位置 p 类型相同的多重集;

9) I 是初始化函数. 它将位置 p 与一个常量表达式相关联,并使得:$\forall p\in P:[\mathrm{Type}(I(p))=C(p)_{\mathrm{MS}}]$.

CPN 是传统 Petri 网的一种扩展,它通过对网系统中的托肯进行分类或解析,使网系统的基本元素减少,从而达到缩小 Petri 网系统规模的目的,CPN 的层次性保证了仿真系统的微小变化不会完全改变模型的结构. 与基本 Petri 网相比,CPN 在系统建模分析上有几个明显优势:

1) CPN 能同时描述系统的状态和动作,其语义是并发的;

2) 模型具有一定的稳定性,模型部件的通用性和可重用性大大提高,原型系统的微小变化不会导致模型大的更改,相似系统的建模仅需要进行简单的调整,这使得对系统的建模变得更为简单;

3) CPN 中提供了层次概念,对系统的建模过程可以采用自顶向下或自底向上的方式来进行,这使得对系统的建模更为标准化和规范化.

CPN Tools 是由丹麦 Aarhus 大学开发的一个

编辑、仿真和分析着色 Petri 网的工具. CPN Tools 是在 Design/CPN 的基础上发展起来的,通过人机接口技术的发展来重新设计 Design/CPN 的图形用户界面(GUI). 用户可以利用 CPN Tools 对并行系统进行建模仿真和特性分析,由于采用 SML 语言对模型进行扩展而使得对各类系统的描述能力变得非常强大和方便.

本文利用 CPN Tools 的强大功能,建立多阶段任务系统的通用 CPN 模型.

2 多阶段任务系统通用 CPN 模型

传统的 PMS 转换为 Petri 网模型的做法是直接将各阶段故障树转换为对应的 Petri 网结构,见图 1. 这样的模型转换方式导致模型结构复杂,并且不易重用,给模型的自动生成带来了困难.

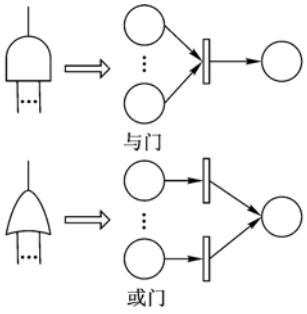


图 1 与门、或门的 Petri 网模型

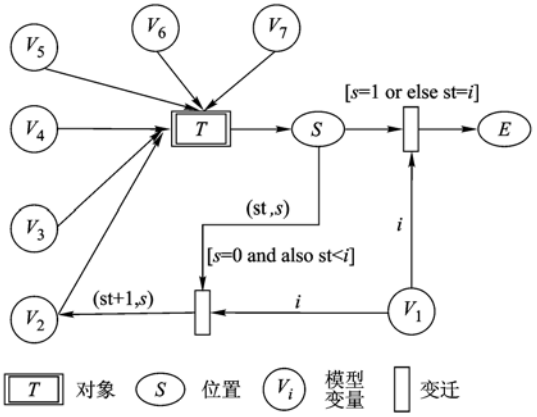
CPN 模型可以将 PMS 各阶段的故障树模型参数化,用着色的托肯描述系统中单元之间的故障逻辑关系,如逻辑门类型,输入、输出事件集等,这样可以保持 CPN 模型结构的稳定性. 而各单元的故障生成也可以由一个统一的模型完成,因此可以建立一个基于 CPN 的 PMS 的可靠性通用仿真模型.

PMS 的可靠性通用仿真模型利用 CPN 的层次化、模块化的特点,将整个模型分为 3 个层次:第 1 层为顶层控制模型;第 2 层为单阶段处理模型;第 3 层为底事件处理模型.

2.1 顶层控制模型

顶层控制模型用于控制模型中各任务阶段的仿真顺序,以及整个 PMS 任务成败,并统计仿真结果. 顶层控制模型将 PMS 系统的各阶段故障树模型结构、各单元的故障率参数、各阶段的任务时间等要素作为模型的输入. 模型包括的参数有阶段数、各阶段的持续时间、所有的底事件及其故障率、各阶段故障树中的逻辑门和顶事件. 底事件的故障分布可以各不相同,而不仅仅限于指数分布;并且随着阶段不同,底事件的故障率或故障分布可以发生改变. 各阶段持续时间可以是一个固定值,也可以是一个服从某个分布的随机数.

按照故障树的形式化模型特点以及多阶段任务系统中阶段相关的关系,可以将上述各种输入参数化为 CPN 模型中库所的初始托肯,称为模型变量. 如图 2 所示,整个模型包含 7 个输入的模型变量. 各模型变量的内容及数据格式如表 1 所示. 本文中的故障树仅包含与门和或门 2 种类型的逻辑门,其他的逻辑门可以首先转换为这 2 种逻辑门的组合,然后再进行参数化.



$s=0$ 表示阶段失败;$s=1$ 表示阶段成功;st 和 i 表示当前所处的阶段序号.

图 2 PMS 的顶层 CPN 模型

表 1 顶层 CPN 模型中的模型变量

模型变量名称	输入内容	输入格式	备注
V_1	当前仿真的任务阶段	(阶段号,状态)	状态 0:阶段成功 状态 1:阶段失败
V_2	PMS 的阶段数目	(阶段数)	
V_3	阶段持续时间	(阶段号,分布类型,参数 1,参数 2)	阶段时间固定时,分布类型为 NO,用参数 1 描述时间大小
V_4	阶段故障树顶事件	(阶段号,事件名称,事件类型)	事件类型为 TOP
V_5	各阶段故障树	(阶段号,序号,逻辑门类型,门输入列表,门输出)	逻辑门类型包括 AND 和 OR;如果门输出不是顶事件,就是中间事件
V_6	底事件故障率	(阶段号,底事件编号,分布类型,参数 1,参数 2)	分布类型包括指数、正态、威布尔、对数正态分布
V_7	输入底事件	(阶段号,底事件编号,事件类型,状态)	事件类型为 LEAF; 状态 0 正常;1 故障

2.2　单阶段处理模型

单阶段处理模型实际上对应着 PMS 每个阶段的故障树模型,通过顶事件状态判别该阶段任务是否成功完成,而顶事件的状态由底事件状态及它们之间的故障逻辑关系确定,如图 3 所示. 如果逻辑门是与门,通过判别门的输入列表是否包含在 P_2的列表当中来确定输出事件的状态;如果逻辑门是或门,则判别 P_2列表中是否包含门输入列表中的元素.

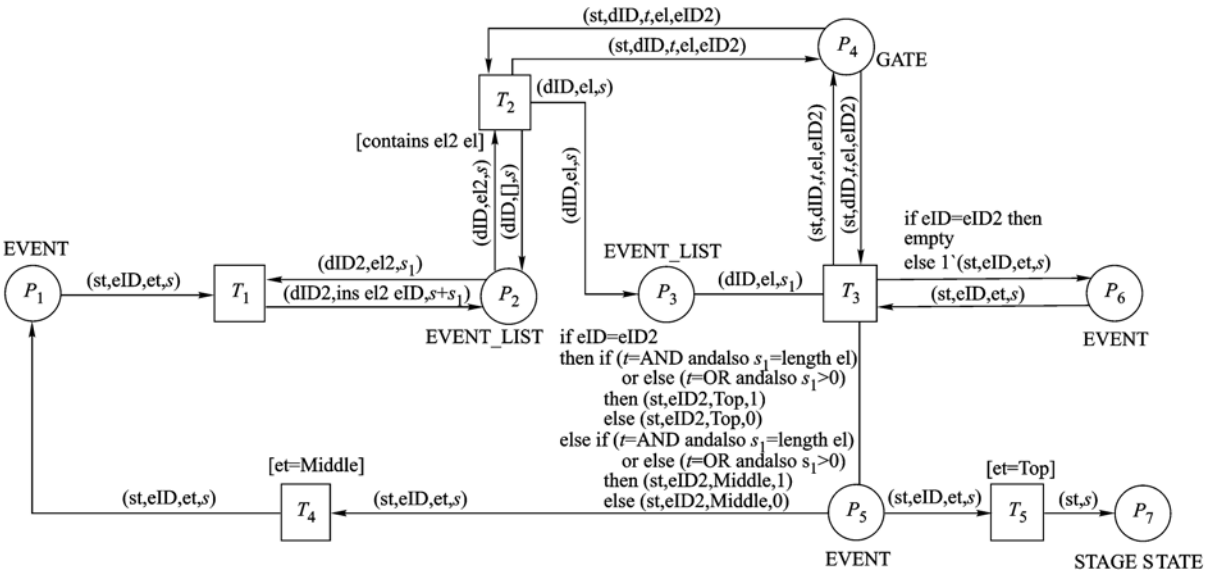
2.3　底事件处理模型

底事件处理模型根据输入的阶段持续时间、底事件服从的故障分布以及底事件之间存在的依赖关系导致故障分布发生变化等参数进行仿真,用于判别在整个仿真过程中底事件是否发生故障,以及故障后是否可修等.

如图 4 所示,P_1,P_3和 P_4分别输入阶段持续时间、底事件及底事件服从的分布.

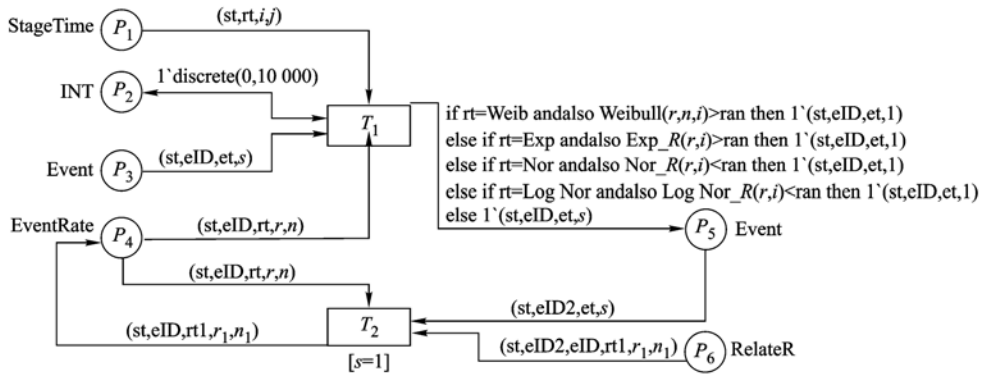
库所 P_1 的变量类型为阶段持续时间,对应的托肯为(st,rt,i,j),分别表示(阶段号,随机变量类型,随机数生成参数 1,随机数生成参数 2).

P_2用于产生一个随机数,与底事件的故障概率进行比较,当故障概率大于该随机数时,底事件状态发生改变,即该单元发生故障. 由于 CPN Tools 中没有浮点型参数,因此,将随机数取值范围设为[0,10 000],具体处理过程中再除以 10 000.



库所 P_1—经过该阶段的时间运行后,各底事件所处的状态,对应的托肯为(st,eID,et,s),即(阶段号,底事件编号,事件类型,状态);库所 P_2—储存各个阶段底事件处于故障状态的底事件的列表,对应的托肯为(dID,el,s),即(逻辑门编号,事件列表,状态);库所 P_3—某个逻辑门的输入事件列表;库所 P_4—储存各阶段故障树的门的类型、输入和输出参数,对应的托肯为(st,dID,t,el,eID2),即(阶段号,逻辑门编号,逻辑门类型,输入事件列表,输出事件);库所 P_5—逻辑门的输出事件;库所 P_6—储存每个阶段的顶事件,当 P_5中逻辑门的输出是顶事件时,P_7即输出本阶段的仿真结果,否则继续进行故障树的逻辑判别;库所 P_7—本阶段的仿真结果;变迁 T_1—将底事件依次添加到库所 P_2的列表中;变迁 T_2—比较库所 P_2的故障事件列表和库所 P_4中逻辑门的输入列表,如果存在包含关系,则输出 P_2的列表到 P_3;变迁 T_3—根据逻辑门的类型、输出是否是顶事件来产生逻辑门的输出;变迁 T_4—将逻辑门的输出加入到库所 P_1中;变迁 T_5—将顶事件状态输出到库所 P_7.

图 3　PMS 的单阶段 CPN 模型



Exp_R,Nor_R,Log Nor_R 分别表示用于产生指数分布、正态分布、对数正态分布的随机数.

图 4　PMS 的底事件 CPN 模型

库所 P_6 描述底事件之间存在的依赖关系导致故障分布发生变化,并将 P_4 中的参数更新. 因此 P_6 的托肯为(st,eID2,eID,rt,r,n),分别表示(阶段号,底事件2,底事件1,随机变量类型,随机数生成参数1,随机数生成参数2),底事件2与底事件1之间存在依赖关系,并改变底事件1的故障分布.

3 模型验证

为了验证仿真模型的正确性,分别采用解析方法和 CPN 通用模型方法对一个指控系统的任务可靠性进行了建模和计算.

某型指控系统包括3个子系统 X,Y,Z,各子系统均包含2类单元:处理器(A_i,B_i,C_i)和存储器(M_i)($i=1,2,3$),如图5所示. 该指控系统执行一次攻击任务需要经历搜索、解算、攻击3个阶段. 为了保证指控系统具有较高的任务可靠性,该型指控系统采用了较多的冗余设计以及多种替代的工作模式. 参与各阶段任务的单元及其故障逻辑关系如图6所示,图中,搜索、解算和攻击3个阶段分别由 Phase 1,Phase 2 和 Phase 3 表示,各阶段底事件的故障率均服从指数分布,阶段的持续时间及各底事件的故障率参数如表2所示.

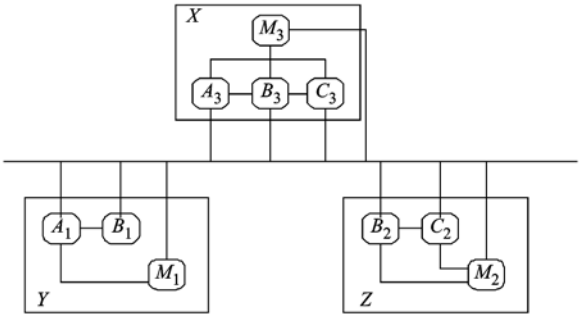
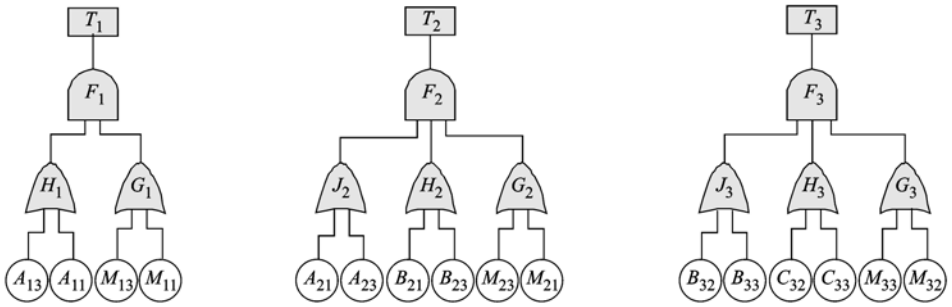


图5 某型指控系统结构



a Phase 1 b Phase 2 c Phase 3

图6 某型指控系统多阶段故障树

表2 某型指控系统可靠性参数

底事件($i=1,2,3$)	故障率 λ/h^{-1}	阶段	阶段时间/h
A_i	0.028 5	1	4.5
B_i	0.013 4	2	2.5
C_i	0.010 8	3	2.0
M_i	0.031 1		

上述各阶段模型较为简单,可以采用解析的方法建立可靠性模型. 首先将每个阶段的故障树转化为BDD,再将3个阶段的BDD关联成为一个总的BDD模型. 通过对BDD模型的求解,可以获得各阶段最小割集,并依据最小割集算出各阶段的故障发生概率,如表3所示.

CPN 模型仿真则将3个阶段的故障树以及阶段持续时间、底事件故障率等参数化作为模型的输入. 模型参数化的结果如表4所示. 其中,模型变量 V_3 中的阶段持续时间扩大了10倍,模型变量 V_6 中的故障率参数扩大了10 000倍,都用整数进行描述. 而在实际处理时,仍然把它们转为实际值大小.

仿真运行过程中,由顶层控制模型调用单阶段处理模型,并按照阶段顺序分别输入相应的模型变量依次运行;单阶段处理模型根据底事件模型的输出状态判别各阶段任务是否能成功完成.

表3 某型指控系统 BDD 求解结果

阶段	阶段成功最小割集	各阶段的任务成功概率	阶段不可靠率
1	$A_{11}M_{11}$,$A_{11}\overline{M}_{11}M_{13}$,$\overline{A}_{11}A_{13}M_{11}$,$\overline{A}_{11}A_{13}\overline{M}_{11}M_{13}$	0.968 7	0.031 3
2	$A_{21}B_{21}M_{21}$,$A_{21}B_{21}\overline{M}_{21}M_{23}$,$A_{21}\overline{B}_{21}B_{23}M_{21}$,$A_{21}\overline{B}_{21}M_{23}\overline{M}_{21}M_{23}$,$\overline{A}_{21}A_{23}B_{21}M_{21}$,$\overline{A}_{21}A_{23}B_{21}\overline{M}_{21}M_{23}$,$\overline{A}_{21}A_{23}\overline{B}_{21}B_{23}M_{21}$,$\overline{A}_{21}A_{23}\overline{B}_{21}B_{23}\overline{M}_{21}M_{23}$	0.957 7	0.011 4
3	$B_{32}C_{32}M_{32}$,$B_{32}C_{32}\overline{M}_{32}M_{33}$,$B_{32}\overline{C}_{32}C_{33}M_{32}$,$B_{32}\overline{C}_{32}C_{33}\overline{M}_{32}M_{33}$,$\overline{B}_{32}B_{33}C_{32}M_{32}$,$\overline{B}_{32}B_{33}C_{32}\overline{M}_{32}M_{33}$,$\overline{B}_{32}B_{33}\overline{C}_{32}C_{33}M_{32}$,$\overline{B}_{32}B_{33}\overline{C}_{32}C_{33}\overline{M}_{32}M_{33}$	0.950 6	0.007 4

表 4　某型指控系统的模型变量

模型变量	输入内容
V_1	1`[1,0] + +1`[2,0] + +1`[3,0]
V_2	3
V_3	1`[1,NO,45,0] + +1`[2,NO,25,0] + +1`[3,NO,20,0]
V_4	1`[1,$T_1$,TOP] + +1`[2,T_2,TOP] + +1`[3,T_3,TOP]
V_5	1`[1,1,OR,[$A_{13}$,$A_{11}$],$H_1$] + +1`[1,2,OR,[M_{13},M_{11}],G_1] + +1`[1,3,AND,[$H_1$,$G_1$],$F_1$] + +1`[2,4,OR,[A_{21},A_{23}],J_2] + +1`[2,5,OR,[$B_{21}$,$B_{23}$],$H_2$] + +1`[2,6,OR,[M_{21},M_{23}],G_2] + +1`[2,7,AND,[$H_2$,$G_2$,$J_2$],$F_2$] + +1`[3,8,OR,[A_{32},A_{33}],J_3] + +1`[3,9,OR,[$C_{32}$,$C_{33}$],$H_3$] + +1`[3,10,OR,[M_{32},M_{33}],G_2] + +1`[3,11,AND,[H_3,G_3,J_3],F_3]
V_6	1`[1,$A_{11}$,EXP,285,0] + +1`[1,A_{13},EXP,285,0] + +1`[1,$A_{21}$,EXP,285,0] + +1`[3,A_{23},EXP,285,0] + +1`[2,$B_{21}$,EXP,134,0] + +1`[2,B_{23},EXP,134,0] + +1`[3,$B_{32}$,EXP,134,0] + +1`[3,B_{33},EXP,134,0] + +1`[3,$C_{32}$,EXP,108,0] + +1`[3,C_{33},EXP,108,0] + +1`[1,$M_{11}$,EXP,311,0] + +1`[1,M_{11},EXP,311,0] + +1`[1,$M_{13}$,EXP,311,0] + +1`[2,M_{21},EXP,311,0] + +1`[2,$M_{23}$,EXP,311,0] + +1`[3,M_{32},EXP,311,0] + +1`[3,M_{33},EXP,311,0]
V_7	1`[1,$A_{11}$,LEAF,0] + +1`[1,A_{13},LEAF,0] + +1`[1,$A_{21}$,LEAF,0] + +1`[3,A_{23},LEAF,0] + +1`[2,$B_{21}$,LEAF,0] + +1`[2,B_{23},LEAF,0] + +1`[3,$B_{32}$,LEAF,0] + +1`[3,B_{33},LEAF,0] + +1`[3,$C_{32}$,LEAF,0] + +1`[3,C_{33},LEAF,0] + +1`[1,$M_{11}$,LEAF,0] + +1`[1,M_{11},LEAF,0] + +1`[1,$M_{13}$,LEAF,0] + +1`[2,M_{21},LEAF,0] + +1`[2,$M_{23}$,LEAF,0] + +1`[3,M_{32},LEAF,0] + +1`[3,M_{33},LEAF,0]

为了使仿真模型能够准确地模拟多阶段任务系统的故障发生过程,整个模型仿真运行了1 000 000次. 如图 7 所示,在仿真运行到约 50 000 次时,仿真结果已经非常接近理论计算值 0.049 4,误差为 1.6%,说明仿真模型的正确性.

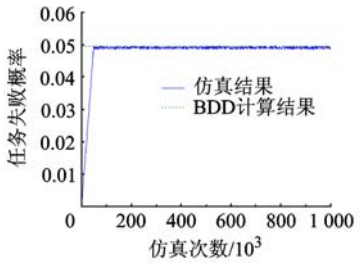


图 7　CPN 仿真结果与 BDD 结果对比

解析模型对 PMS 中包含随机的阶段持续时间、单元之间故障具有依赖性等复杂的情形模型描述困难,对单元故障概率不再服从指数分布时直接计算比较复杂.

如表 5 所示,对上述的指控系统的可靠性参数进行动态调整后,这时阶段 1、阶段 3 的持续时间不再是常数,而是一个分布. 并且不同单元共同工作时,由于相互的影响导致故障分布及相应的参数发生变化. 此时,解析模型难以运用,而 CPN 通用仿真模型结构仍然可以不变,只是模型的输入变量相应地发生了变化. 同样通过 1 000 000 次仿真,可以获得该多阶段任务系统的成功率为 0.926 3.

表 5　动态变化的某型指控系统可靠性参数

底事件(i=1,2,3)	故障分布	故障依赖性	阶段	阶段时间/h
A_i	指数分布 λ=0.028 5		1	正态分布 N(4.5,0.2)
B_i	威布尔分布 β=3.2,η=240		2	2.5
C_i	指数分布 λ=0.010 8	B_{22},C_{32}共同工作时,C_{32}服从指数分布 λ=0.032 4	3	指数分布 λ=0.5
M_i	指数分布 λ=0.031 1	与不同系统的 C_j工作时,M_i服从指数分布 λ=0.046 3		

4　结　论

CPN 具有并发、层次化和模块化的特点,使复杂系统建模变得简单、高效. 本文应用 CPN 建立 PMS 的可靠性分析模型,解决了解析模型求解能力有限和状态空间爆炸的问题. 并且 CPN 模型能够拓展 PMS 的研究领域,可以包含复杂的底事件之间故障率依赖、底事件满足不同的分布类型、阶段持续时间随机变化等现在解析模型无法涉及的领域. 本文层次化、模块化的建模思想可以使模型保持结构的稳定性,通过改变模型变量实现对不同 PMS 的描述. 案例研究首先对比了一个 PMS 可靠性计算的解析结果和 CPN 模型的仿真结果,证明了仿真模型的正确性,在此基础上对 PMS 进行了动态的扩展,并应用 CPN 仿真获得了此时的任务可靠性大小. CPN 模型的仿真表明模型具有较高的计算效率,可以适应大规模复杂 PMS 的可靠性分析. 下一步将重点研究故障树的形式化描述,并建立故障树到 CPN 模型参数的自动转化算法,进一步提高建模的效率.

参考文献（References）

[1] 陈光宇. 不完全覆盖多阶段任务系统的静态和动态故障树综合研究[D]. 成都:电子科技大学管理学院,2005
Chen Guangyu. Synthetic research on imperfect coverage, phased-mission systems, and static and dynamic fault trees[D]. Chengdu: School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, 2005(in Chinese)

[2] 莫毓昌,杨孝宗,崔刚,等. 一般阶段任务系统的任务可靠性分析[J]. 软件学报,2007,18(4):1068 - 1076
Mo Yuchang, Yang Xiaozong, Cui Gang, et al. Mission reliability analysis of generalized phased mission systems[J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 1068 - 1076(in Chinese)

[3] Alam M, Al-Saggaf U M. Quantitative reliability evaluation of repairable phased-mission systems using Markov approach[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1986, 35(5): 498 - 503

[4] Chew S P, Dunnett S J, Andrews J D. Phased mission modelling of systems with maintenance-free operating periods using simulated Petri nets[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008(93): 980 - 994

[5] Xing L, Dugan J B. Generalized imperfect coverage phased-mission analysis[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington, DC: IEEE, 2002: 112 - 119

[6] Xing L, Dugan J B. A separable ternary decision diagram based analysis of generalized phased-mission reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(2): 174 - 184

[7] Amari S V, Xing L D, Shrestha A, et al. Performability analysis of multistate computing systems using multivalued decision diagrams[J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(10): 1419 - 1433

[8] Xing L. Reliability evaluation of phased-mission systems with imperfect fault coverage and common-cause failures[J]. IEEE Trans on Reliability, 2007, 56(1): 58 - 68

[9] Suprasad Amari, Leland McLaughlin, Bhanu Yadlapati. Optimal cost-effective design of parallel systems subject to imperfect fault-coverage[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington, DC: IEEE, 2003: 29 - 34

[10] Prescott D R, Andrews J D, Downes C G. Multiplatform phased mission reliability modeling for mission planning[J]. J Risk and Reliability, 2009, 223(2): 27 - 39

[11] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005
Yuan Chongyi. Theory and application of petri nets[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005(in Chinese)

（编　辑:文丽芳）

（上接第 1545 页）

[7] 贾宏鑫,叶云岳. 直线感应电动机的全局优化设计研究[J]. 电工技术学报,2001,16(4):16 - 20
Jia Hongxin, Ye Yunyue. Study on design of linear induction motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Scociety, 2001, 16(4): 16 - 20(in Chinese)

[8] 王兴华,励庆孚,王曙鸿. 永磁无刷直流电机空载气隙磁场和绕组反电势的解析计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):126 - 130
Wang Xinghua, Li Qingfu, Wang Shuhong. Analytical calculation of no-load air-gap magnetic field and back electromotive force in brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 126 - 130(in Chinese)

[9] Zhu Z Q. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1993, 29(1): 143 - 151

[10] Jiao Guozhu. Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(4): 2234 - 2242

[11] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Trans on magnetics, 1988, 24(1): 621 - 630

[12] Fiorill F, Novikov A. An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(7): 2234 - 2242

[13] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000:118 - 134
Chen Shikun. The design of motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 118 - 134(in Chinese)

[14] Jérome Legranger, Guy Friedrich. Combination of finite-element and analytical models in the optimal multidomain design of machines: application to an interior permanent-magnet starter generator[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2010, 46(1): 232 - 239

[15] Makni Z, Besbes M, Marchand C. Multiphysics design methodology of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1525 - 1530

（编　辑:刘登敏）