

基于 DSPN 的航天测控系统任务可靠性仿真建模

杨晓松, 武小悦

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 提出了基于确定与随机 Petri 网(deterministic and stochastic Petri nets,DSPN)的航天测控系统(tracking,telemetry and command,TT&C)任务可靠性定量分析方法,旨在对相关航天测控方案进行可靠性预计.通过对 TT&C 系统任务剖面进行时序弧段划分,考虑实际系统中测控单元阶段依赖、单元故障可修以及各单元参与任务起止时间不同等其他建模方法难以处理的复杂因素,建立了“单元层-系统逻辑层-阶段层”3 层相互关联的 TT&C 系统任务可靠性 DSPN 模型.通过对模型仿真运行,实现了对给定测控方案下 TT&C 系统任务可靠性量化评估.分析表明:仿真结果随着仿真次数增加逐渐收敛,与 Markov 解析方法求得的确值对比误差控制在 1%以内.

关 键 词: 任务可靠性; 测控方案; 仿真; 确定与随机 Petri 网; 航天测控系统

中图分类号: V19

文献标志码: A

Mission reliability simulation modeling of space TT&C system based on DSPN

YANG Xiao-song, WU Xiao-yue

(College of Information System and Management,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A general methodology for mission reliability modeling and analysis of space TT&C system using DSPN was proposed to evaluate the TT&C scenarios. By dividing the time sequences of TT&C mission profile and taking into consideration of the complex situations which were difficult to be dealt with by other modeling methods such as phase dependency of TT&C units, reparability of the system and different time intervals for various TT&C units, the mission reliability of TT&C system was modeled by “component-system logic-phase” three levels of Petri nets (PN) that could interact with each other. After simulating the DSPN model, the quantitative assessment mission reliability of TT&C system for given TT&C scenario can be obtained. The case study reveals that the simulation results have a good convergence with the increase of simulation numbers, and the errors are controlled with one percent compared with the analytical result of Markov analytic method.

Key words: mission reliability; tracking, telemetry and command scenarios;
simulation; deterministic and stochastic Petri nets;
space TT&C system

航天测控系统是航天工程的重要组成部分,在航天器飞行的各个阶段,通过建立地面与航天

器之间的天地无线电链路,完成航天器及其有效载荷的跟踪测轨、遥测、遥控和天地通信、数据传

输等任务^[1-2]。作为天地之间唯一联系的通道, TT&C 系统的可靠性直接关系到航天飞行任务的成败,对航天器的发射、在轨运行、回收工作能否顺利完成具有重要的影响,因此有必要定量评价给定测控总体设计方案的可靠性水平,以便于科学合理地完善和优化测控方案。TT&C 系统任务执行过程中涉及到测控站与航天器时间窗口限制,因此对于有多个连续测控站共同参与的航天测控任务,从任务剖面可以将其任务时序划分为多个时间上连续且不重叠的阶段,在每个阶段系统的结构配置将不再相同,此时 TT&C 系统可被视为一个多阶段任务系统(phased-mission system, PMS),这样系统组成单元存在阶段依赖,测控单元参与任务的起止时刻不同以及测控单元故障维修等复杂动态特性将导致其可靠性建模与分析的困难。

关于 PMS 可靠性建模与分析方面的研究主要采用 3 类基本方法:组合模型方法、状态空间方法以及仿真方法。组合模型方法以故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法为代表,具有简洁直观的特点,通过单元间的阶段依赖处理后,可以采用二元决策图(binary decision diagram, BDD)算法^[3-4]分析计算。其缺点是难以描述单元的故障修复,并且 BDD 规模受阶段依赖性运算排序影响较大。状态空间方法主要是基于 Markov 模型^[5-6],能够处理复杂动态系统,通过正确描述阶段内各部件之间的依赖性以及部件跨阶段的依赖性,可以建立状态微分方程进行解析分析,但 Markov 模型存在状态空间爆炸和求解困难等问题。仿真方法^[7-8]能处理更加复杂的情况,在建立能够反映真实系统特征和行为的模型后,通过模拟系统的实际运行过程就能得到所需的数据并进行统计分析,但其存在仿真时间和精度问题,因此需要研究建立合理仿真模型和设计有效仿真程序。

Petri 网作为兼具图形表达能力、数学分析性能和仿真运行特征的建模方法,能够反映系统的静态结构和动态行为,近年来已被广泛应用于系统可靠性分析领域。文献[9-11]应用 Petri 网研究多阶段任务系统的可靠性,通过建立 2 个不同层面但相互关联的 Petri 网模型来描述多阶段任务系统。即利用阶段网描述任务阶段的递进转换和利用系统网描述各个阶段所关联的系统组成、逻辑结构等,并最终利用 semi-Markov 过程或 Markov 再生过程理论建立状态微分方程求解。由于 2 个网之间需要通过所谓的“标识依赖

(marking dependence)”进行交互,必须另外详细列表说明不同网之间的关联关系,对于由异构单元间复杂逻辑结构组成的 PMS,该表格十分复杂。文献[12]针对具有 MFOP(maintenance free operating periods)的 PMS 建立了 Petri 网仿真模型,较好地反映了多阶段任务系统的层次关系,但认为所有单元在任务开始时刻即进入工作状态,没有体现单元因参与任务的起止时刻不同而状态变化的情况,并且在任务期间内不考虑维修。

本文根据 TT&C 系统组成特点和任务执行过程,首先从测控站点层级考虑通过任务时序弧段切割,建立起各阶段串联的 TT&C 系统 FTA(fault tree analysis)模型,然后在 FTA 基础上,考虑系统单元阶段依赖、单元故障可修以及各单元参与任务起止时间不同等复杂特性,建立起 3 层子网相互关联的完整 TT&C 系统任务可靠性 DSPN 模型;最后采用事件驱动机制对 Petri 网进行 Monte Carlo 仿真运行求解并针对具体算例验证了所提出方法的有效性。

1 TT&C 系统任务可靠性建模需求分析

1.1 TT&C 系统任务阶段划分

从系统组成上看,TT&C 系统是由分布在不同地域空间的众多测控站(包括地面测控站、测量船、天基测控站)和航天指挥控制中心通过通信系统联结成的复杂网络系统。它具有层次化特征,即指挥控制中心和每个测控站还包含诸多可直接服务于测控任务的设备或分系统,这些设备按照一定的逻辑关系(如串联、并联、混联等)组成来执行测控任务。在可靠性建模中,不同层次的测控资源可能会在同一个模型里同时出现,因此既可以把测控站作为一个整体来考虑,也可以将测控站逐层分解,每层由若干设备或分系统单元组成,这主要取决于系统分析颗粒度、可获取的单元可靠性参数、计算精确性要求以及计算时间等因素。为了便于资源管理和满足不同需求,这里将所有的不同层次的测控资源都统一定义为测控单元。

从任务执行过程来看,由于各测控站位置的相对固定和航天器围绕地球的旋转,测控站与航天器之间将存在可见时间窗口的限制。测控单元的地理位置不同,不同单元与航天器的可见时间不同,就导致不同测控单元的任务起止时间也不同,从而该测控任务在不同的时间参与执行的单元数目及任务成败标准均会发生变化。同时由于

航天器的轨道、飞程序等都是事先分析、设计的,具有较强的计划性,在测控单元布局已定的情况下,测控任务发生的条件和时刻都是确定的.以某入轨运行段测控任务执行过程为例,如图 1 所示,该任务持续时间为固定区间 $[t_0, t_4]$,该时间段内有 3 个测控站 a, b, c 对航天器依次可见并且都要求参与任务执行,各站可见时间窗口分别为 $[t_0, t_3]$, $[t_1, t_4]$, $[t_2, t_4]$.

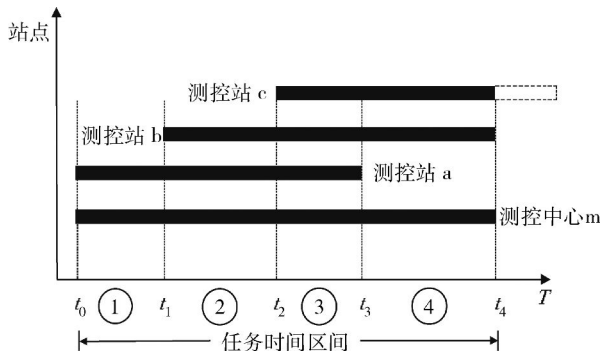


图 1 测控站可见时间窗口及任务弧段划分

Fig. 1 Visible time windows and mission phase division of TT&C station

由此,可以将测控任务执行过程按各测控单元可见时间窗口起止时间点和任务区间起止时间点划分为时间连续但不重叠的多个单一阶段,此时 TT&C 系统本质上是一个 PMS.

1.2 TT&C 系统故障树模型

经过任务时序弧段切割后,每个任务阶段的系统组成逻辑结构就会清晰明确.由图 1 可知,执行该测控任务时,系统可划分为 4 个阶段,从测控点层级考虑,在各阶段中,各测控站与测控中心之间组成串联关系,不同测控站之间为并联关系,如在第 2 阶段 $[t_1, t_2]$ 由测控站 a, b 和测控中心 m 提供业务支持,要求 m 必须正常工作, a 和 b 至少有一个正常工作才能完成任务,从而可以建立起每个阶段的系统故障树模型.对于 PMS 要求每个阶段任务都必须成功,各个任务阶段间则表现为串联关系,由此可以建立起整个任务系统的静态故障树可靠性模型.如图 2 所示为上述测控任务执行过程中测控站层级的故障树可靠性模型,从左到右的 4 个子树分别表示 4 个任务阶段的系统逻辑关系. X_{ij} 表示底事件即某一阶段某一测控单元故障事件的发生,其中 $i = a, b, c, m$ 分别表示不同的测控单元, $j = 1, 2, 3, 4$ 表示不同的任务阶段.

故障树可靠性模型建立后,可采用求最小割

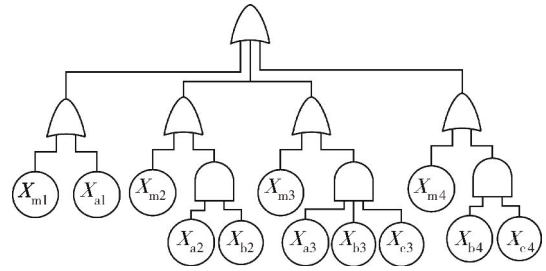


图 2 任务剖面内故障树可靠性模型

Fig. 2 Fault tree reliability model of mission profile

集或路集的方法来进行定量和定性分析,然而对于 PMS,故障树可靠性模型并不能反映系统单元的阶段依赖关系,因此首先需要对故障树可靠性模型进行阶段依赖处理,然后再采用 BDD 算法求解.尽管如此,故障树可靠性模型依然难以反映单元状态的动态变化即不能考虑单元的修复情况.所以对于可修系统,可以考虑以 FTA 模型为基础,建立能反映系统动态特性的 Petri 网模型.

2 基于 DSPN 的 TT&C 系统任务可靠性仿真建模

2.1 DSPN

Petri 网基于库所、变迁、令牌和有向弧等图形元素建立模型,以研究系统的组织结构和动态行为为目标,着眼于系统中可能发生的各种状态变化及变化之间的关系.通过在库所或变迁中引入时间约束条件,可以将基本 Petri 网扩展为随机 Petri 网(stochastic Petri nets, SPN, 量符号记为 N_{sp})^[13]、广义随机 Petri 网(generalized stochastic Petri nets, GSPN)^[14]和 DSPN^[15]等高级 Petri 网形式.

SPN 由多元组构成,其形式化定义为: $N_{sp} = (P, T; F, K, W, M_0, \lambda)$, 各元素的具体含义如下:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$ 为库所(place)集, l 为库所的数量,库所用于描述系统的状态或条件,在图形中用圆圈表示;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁(transition)集, m 为变迁数量,变迁用于描述改变系统状态的事件,如单元故障、维修活动等,在图形中用竖线或长方形表示;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为连接库所和变迁之间的有向弧,建立了系统状态与事件之间的双向联系,在图形中用带箭头的线段表示;

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ 为库所的容量函数集;

W 为连接变迁和库所的弧的权函数;

M_0 为系统初始标识;

$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 为变迁平均激发速率的集合, 表示可激发变迁单位时间内的激发次数, 平均激发速率的倒数为变迁的平均延时. 在可靠性分析中, λ 可用来表示单元的故障率或维修率.

GSPN 是 SPN 的一种扩充形式. 首先增加了禁止弧, 禁止弧由库所指向变迁, 当库所中含有禁止弧上权重数量的令牌时, 该变迁将被禁止激发, 在图形表示上为一端带有小圆圈的线段; 其次将变迁分为两类, 一类为瞬时变迁, 其实施延时为 0, 图形用细竖线表示; 另一种为赋时变迁, 其延时服从随机分布, 可用于表述测控单元的故障和修复过程, 图形用长方形表示.

DSPN 又是对 GSPN 的一种扩充, 主要表现为赋时变迁的实施延时可以是确定常量, 在图形上, 确定延时变迁用黑色长方形表示. 如图 3 所示为 DSPN 模型的运行示意图, 经过时长 τ 以后, 固定变迁点火转移, 禁止弧作用消失, 随机变迁使能, 随机时间变量可以通过前述抽样公式得到, 从而在 Petri 网运行至 $\tau + \xi$ 时刻, 随机变迁触发, 令牌按其弧权重移出相应数量令牌至输出库所.

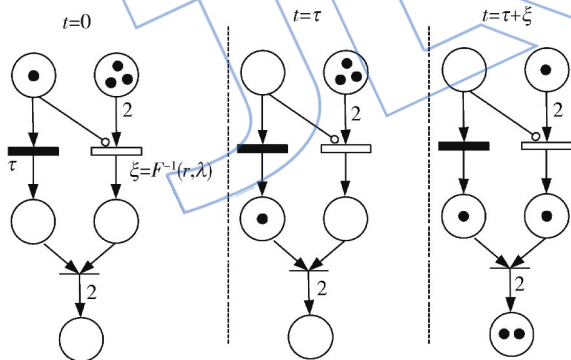


图 3 DSPN 运行示意图

Fig. 3 Working diagrammatic sketch of DSPN

2.2 TT&C 系统 DSPN 模型的建立

由于 TT&C 系统任务执行的强计划性, 各阶段持续时间为固定值, 因此采用 DSPN 对系统任务可靠性建模, 考虑到系统中测控单元的阶段依赖性, 单元发生故障可以修复, 以及单元任务起止时间不同等动态特性, 本文通过建立 3 层相互关联的 Petri 网模型来表示系统的组成结构和任务执行过程, 分别为: ①单元层: 描述测控单元基本事件和状态的变化; ②系统逻辑层: 描述系统各阶段的系统逻辑结构组成, 即底层故障事件发生导

致的系统顶事件故障发生; ③阶段层: 描述任务阶段的递进转换.

2.2.1 单元层 Petri 网模型

单元层模型主要描述测控单元由于开机、故障、修复、关机的事件所引起的单元状态变化, 其中基本故障事件的发生将可能导致参与任务的各测控单元逻辑组合系统状态变化, 即故障树中顶事件的发生. 考虑到测控单元可修复和各单元工作起止时间不同, 所建立的单元层 Petri 网模型如图 4 所示. 具体运行过程为: 当库所 $X_{i,st}$ 输入令牌时表示测控单元接受任务并开机执行, 测控单元由正常非工作状态 $X_{i,nr}$ 通过瞬时转移 $T_{i,s}$ 进入工作状态 $X_{i,up}$; 在工作状态期间, 一方面测控单元可能发生故障事件 $T_{i,f}$ 转移到故障状态 $X_{i,dl}$, 并通过修复事件 $T_{i,r}$ 恢复到正常状态, 其中故障和修复转移服从随机时间分布; 另一方面随着单元执行任务结束, 库所 $X_{i,rl}$ 中的令牌将转移出去, 与其相连的禁止弧将不再阻止瞬时转移 $T_{i,e}$ 的使能, 从而测控单元被释放到正常非工作状态.

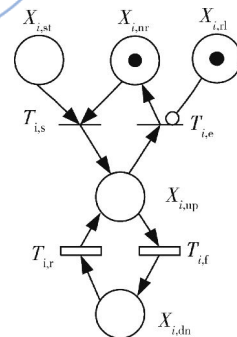


图 4 单元层 Petri 网模型

Fig. 4 Unit level Petri net model

2.2.2 系统逻辑层 Petri 网模型

系统逻辑层模型主要描述了系统各阶段的组成逻辑结构, 表示由底事件引起的顶事件的发生, 其 Petri 网模型可以由故障树转化而来. 文献 [16] 中已经提出了 FTA 模型向 GSPN 模型的基本转化算法. 但在 PMS 中由于单元存在阶段依赖关系, 因此在考虑单元故障可修的情况下, 其各阶段系统逻辑层 Petri 网建模将会较为复杂. 例如, 测控单元在某一阶段发生故障, 但由于未导致该阶段系统顶事件的发生而不会影响任务的执行, 虽然此时可能导致后续某阶段系统顶事件发生, 但当系统阶段任务运行至后续该阶段时, 测控单元可能已经修复, 也将不会影响任务的执行. 对

于串联可修复系统,需要考虑各单元之间的独立性,即某单元发生故障时,与其串联的其他单元是否也停止工作,故障单元修复后系统各组成单元重新开始运行.如图 5 所示为考虑单元故障导致系统其他单元停机的可修串联系统(或门)Petri 网模型.当某一单元发生故障,令牌将被输入到系统顶事件库所 S_{dn} 并通过禁止弧抑制其他单元故障的变迁使能,当故障单元修复后,系统顶事件库所中的令牌将被移出,系统恢复正常状态(对于不考虑其他单元停机的情况,只需要去掉图 5 中单元故障变迁与系统故障库所之间的禁止弧即可).类似的对于单元可修并联系统(与门)可依理得到,至于串并混联系统可以在基本串、并联系统的基础上进行组合扩展.

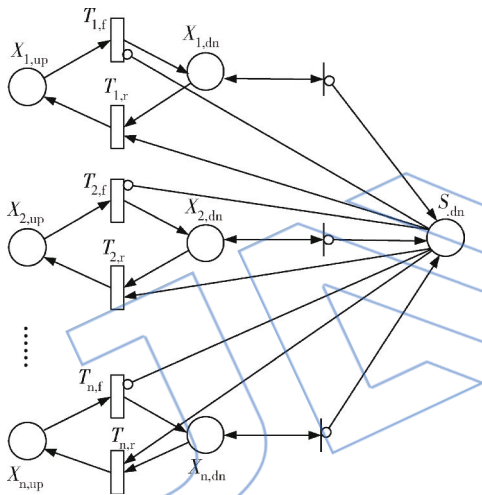


图 5 可修串联系统(或门)Petri 网模型

Fig. 5 Petri net model of series (or gate) repairable system

2.2.3 阶段层 Petri 网模型

阶段层 Petri 网模型控制阶段的递进转移和任务的成败判断,对于 TT&C 系统执行任务过程来说其阶段转换时间为固定常量,当然对于更一般的任务的阶段持续时间可能服从某一随机分布,这并不影响 Petri 网模型的结构和仿真执行.阶段层 Petri 网模型如图 6 所示.库所 $P_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示系统处于各个阶段, P_s 和 P_e 分别表示阶段的开始和结束,库所中含有令牌表示系统处于该阶段;转移 $T_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示各个阶段的持续时间.阶段层的转移与单元层的相应库所相连,表示随着阶段的递进,单元参与任务和释放任务;阶段层的库所与系统逻辑层的顶事件库所共同决定了阶段任务的成败.

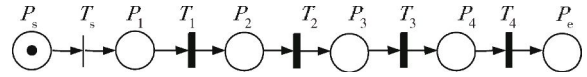


图 6 阶段层 Petri 网模型

Fig. 6 Phase level Petri net model

2.2.4 任务可靠性 DSPN 模型的建立

在建立各层 Petri 网模型之后,根据各层 Petri 网之间的关联关系,通过添加适当的 Petri 网基本元素,就可以建立完整的 TT&C 系统任务可靠性 DSPN 模型,如图 7 所示为图 1 某入轨运行段航天测控任务建立的总体 DSPN 模型.

从单元层来看,在故障树中,由于存在阶段依赖关系的原因,相同测控单元(底事件)不能对应多个逻辑门,而在 Petri 网中则不存在这样的问题.因此可以在基本测控单元数量不变的基础上,通过相应的弧连接可以表示不同阶段的系统逻辑组成结构.

从系统逻辑层来看,它将任务执行过程和资源状态相关联,反映了由于资源故障所导致的任务失败的内在机理.图 7 中所示为第 1,3 阶段的系统逻辑层 Petri 网模型.

从阶段层来看,如果该任务正处于阶段 i ,并且该阶段系统失效(S_{dn} 库所中存在令牌),则任务失败,将令牌转移至阶段失败库所 $P_{i,fa} (i = 1, 2, 3, 4)$,这样可以清晰地看到各个阶段的任务成败情况,以及总的任务成败情况,其中 M_{in} 库所存储总任务失败数, P_e 库所存储总任务成功数.

2.2.5 DSPN 仿真

在建立了 TT&C 系统任务可靠性 DSPN 模型之后,需要对其进行分析以评价系统的可靠性,寻找系统的薄弱环节以优化和完善测控方案.对于 Petri 网模型,既可以应用数学解析方法也可以进行仿真模拟分析.

考虑到 TT&C 系统可靠性建模粒度的细化(可以深化到设备或分系统级),以及数学解析方法存在的状态空间爆炸问题和分析复杂性问题,本文将利用仿真方法对建立的模型进行分析求解. Monte Carlo 仿真对单元寿命及维修分布没有限制,能适应各种规模的系统,是求解复杂动态系统可靠性指标的有效方法. DSPN 模型清晰地描述了 TT&C-PMS 状态演变过程,为仿真计算提供了条件.基于 DSPN 模型的系统可靠性 Monte Carlo 仿真,着眼于模型中各转移和库所状态的变化,重点关注任务的失败,即任务的不可

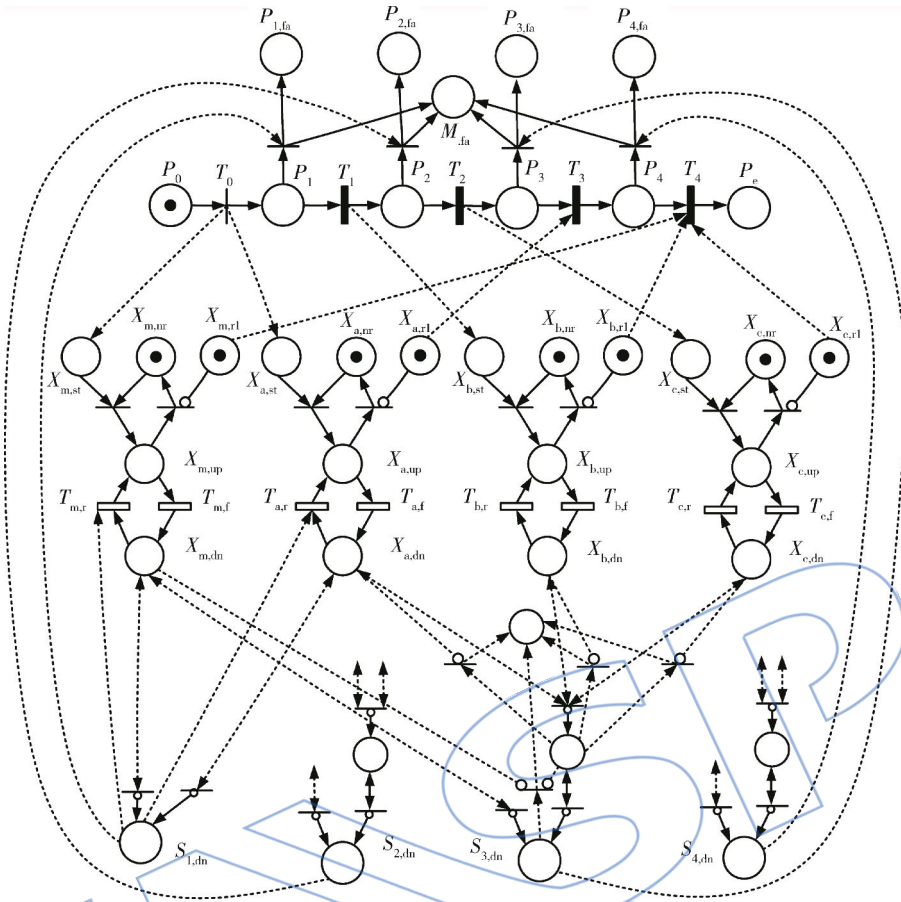


图 7 TT&C 系统任务可靠性 DSPN 模型

Fig. 7 Mission reliability DSPN model of TT&C system

靠度. 对 Petri 网进行仿真需要软件的支持, 目前可以采用成熟的软件例如 GreatSPN, 或通过编写程序实现. 在获取单元故障率和阶段持续时长的基础上, 就可以对每个延时转移赋予相应的时间. 本文采用基于事件驱动机制的仿真算法, 具体步骤如下:

Step 1: 输入 DSPN 模型, 指定仿真次数, 开始执行仿真;

Step 2: 读取所有变迁和初始标识, 为每个新使能的赋时变迁按其寿命分布函数随机抽样转移时间;

Step 3: 找到在当前标识下所有可触发变迁, 形成事件列表;

Step 4: 通过比较变迁触发时间, 在所有变迁中, 寻找具有最早转移时间的变迁, 并对变迁实施点火;

Step 5: 更新事件列表中各变迁的发生时间, 记录时间推进量, 将仿真时钟推进到该时刻. 在新的系统状态标识下, 重复 step 3 和 step 4 直到任务成功或失败;

Step 6: 判断任务成败, 如果阶段任务出现失败直接进行下一次仿真; 如果任务成功, 转入下一次仿真.

假设仿真总次数为 N , 第 i 次仿真 TT&C 系统在第 j 阶段的任务执行情况用 T_i^j 表示, 其中

$$T_i^j = \begin{cases} 1 & \text{令牌转移至 } P_{j,fa} (j = 1, 2, 3, 4) \text{ 库所} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

则可得到系统在各阶段末的任务不可靠度的统计值

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 T_i^j}{N} \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

3 算例分析

为验证 Petri 网建模与 Monte Carlo 仿真方法的有效性, 以图 1 所示航天测控任务为例, 考虑系统可修情况下与解析方法结果的对比情况. 假设各测控单元的故障和修复过程相互独立且服从指数分布, 对于各测控站由于设备老旧程度不同, 其可靠性参数不同, 用平均故障间隔时间 (mean

time between failures, MTBF) 和平均维修时间 (mean time to repair, MTTR) 分别表示相应的可靠性和维修性信息, 阶段持续时间和可靠性参数如表 1 所示。

为保证仿真结果精度, 设置仿真运行次数为 5000 万次, 从而可以获得系统各阶段任务不可靠度的点估计值。如表 2 所示, 通过与 Markov 解析方法^[17-18]所得的精确值对比可以看出, 两者之间的误差在 1% 以内, 从而验证了 Petri 网建模与仿真方法的有效性。

表 1 阶段持续时间及设备 MTBF 和 MTTR (单位: h)
Table 1 Phase length and component MTBF and MTTR (unit: h)

阶段	持续时间	测控单元	MTBF	MTTR
1	0.025 0	X_m	250	0.25
2	0.041 6	X_a	125	0.4
3	0.050 0	X_b	50	0.5
4	0.033 3	X_c	100	0.6

表 2 各阶段末 Markov 解析结果与 Petri 网仿真结果对比

Table 2 Comparison of Markov analytical results and Petri net simulation results at end of each phase

	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
阶段任务失败次数	2975	1667	1962	1405
阶段开始仿真次数	10000000	9997025	9995358	9993396
Petri 网仿真任务不可靠度/ 10^{-4}	2.975	4.642	6.604	8.009
Markov 解析任务不可靠度/ 10^{-4}	2.999	4.668	6.667	8.018
误差百分比/%	0.8333	0.5570	0.9540	0.1122

图 8 所示为仿真次数与测控任务不可靠度之间的关系图, 图中直线所示为 Markov 模型解析结果, 可以看出仿真结果具有较好的收敛性。由于系统任务可靠度较高, 要获取可信的仿真结果需要大量的仿真次数, 但从图中可以看出随着仿真次数的增加, 仿真结果与解析结果的误差逐渐缩小至可接受范围。

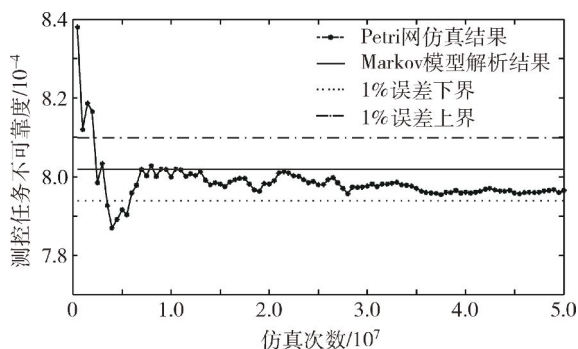


图 8 仿真次数与测控任务不可靠度关系图

Fig. 8 Relation scheme between number of simulation and TT&C mission unreliability

4 结 论

Petri 网技术为系统可靠性预计、评估和分析提供了有效支持, 将 Petri 网建模与仿真方法应

用到 TT&C 系统任务可靠性评估领域, 可以很好地反映问题的复杂性, 例如阶段依赖、单元可修、单元起止工作时间不同等动态特性。对于小规模问题, 直接建立 Petri 网模型相对比较容易且求解速度快, 相对于解析方法, 其问题约束影响较小, 不需要简化问题的假设。但随着问题规模的增加, Petri 网建模将显现与 Markov 解析方法同样的状态爆炸和复杂性问题, 因此, 下一步将研究 Petri 网模型的自动化生成以及对 Petri 网进行扩展以降低模型的复杂性等问题。

参考文献:

- [1] 夏南银. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 郝岩. 航天测控网[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] Zang X, Sun H, Trivedi K S. A BDD-based algorithm for reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1): 50-60.
- [4] Tang Z, Dugan J B. BDD-based reliability analysis of phased-mission systems with multimode failures[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(2): 350-360.
- [5] 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.
- [6] Kim K, Park K S. Phased-mission system reliability under Markov environment[J]. IEEE Transactions on Reliability,

- ty, 1994, 43(2): 301-309.
- [7] 杨建军, 刘锋, 黎放. 多阶段任务多态系统可靠性建模与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(2): 89-92.
YANG Jianjun, LIU Feng, LI Fang. Reliability modeling and simulation for phased mission system with multi-mode failures[J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(2): 89-92. (in Chinese)
- [8] 张玉涛, 唐俊, 张明清, 等. 基于蒙特卡洛方法的可靠性仿真过程模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1374-1380.
ZHANG Yutao, TANG Jun, ZHANG Mingqing, et al. Research on reliability simulation process model based on Monte Carlo method[J]. System Engineering and Electronics, 2008, 30(7): 1374-1380. (in Chinese)
- [9] Mura I, Bondavalli A, Zang X, et al. Dependability modeling and evaluation of phased mission systems: a DSPN approach[C]// Proceeding of the 7th International Conference on Dependable Computing for Critical Applications. San Jose, California, US: IEEE Computer Society Press, 1999: 319-337.
- [10] Mura I, Bondavalli A. Markov regenerative stochastic Petri nets to model and evaluate phased mission systems dependability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2001, 50(12): 1337-1351.
- [11] Bondavalli A, Chiaradonna S, Giandomenico F D, et al. Dependability modeling and evaluation of multiple-phased systems using DEEM[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(4): 509-522.
- [12] 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(7): 980-994.
- [13] Molloy M K. Performance analysis using stochastic Petri nets[J]. IEEE Transactions on Computers, 1982, C-31(9): 913-917.
- [14] Marsan M A, Conte G, Balbo G. A class of generalized stochastic Petri nets for performance evaluation of multiprocessor systems[J]. ACM Transaction on Computer System, 1984, 2(2): 93-122.
- [15] Marsan M A, Chiola G. On Petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times[R]. London: The 7th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 1987.
- [16] Daniele C R. The conversion of dynamic fault trees to stochastic Petri nets: as a case of graph transformation[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2005, 127(2): 45-60.
- [17] 闫华, 武小悦. 基于任务弧段的测控通信任务可靠性建模方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2769-2777.
YAN Hua, WU Xiaoyue. Reliability model of TT&C and communication task based on task arc[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2769-2777. (in Chinese)
- [18] WU Xiaoyue, YAN Hua, LI Lirong. Numerical method for reliability analysis of phased mission system using Markov chains[J]. Communication in Statistics: Theory and Methods, 2012, 41(21): 3960-3973.