

航天测控系统任务可靠性分析的 EOOPN 模型*

杨晓松,武小悦

(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南长沙 410073)

摘要:提出了一种可用于航天测控系统任务可靠性分析的扩展面向对象 Petri 网(Extend Object-Oriented Petri Nets, EOOPN)模型,旨在对给定的航天测控方案进行可靠性评估分析。针对问题特点明确了 OOPN 扩展思路,给出了 EOOPN 模型的形式化定义、运行规则和建模步骤,模型通过引入公共库所、激发弧、消息变迁和消息处理函数等概念,体现了面向对象的思想,具有很好的层次性和模块性。所建立的 EOOPN 模型能够完整地描述航天测控系统的组成和任务特点。通过对算例模型仿真运行,表明实验结果具有良好收敛性,与 Markov 解析值对比误差在 1% 以内,从而验证了模型的有效性。

关键词:任务可靠性;面向对象;Petri 网;航天测控系统

中图分类号:V19 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0037-07

Mission reliability analysis of space TT&C system using extended object-oriented Petri net model

YANG Xiaosong, WU Xiaoyue

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A methodology is proposed to evaluate the mission reliability of TT&C scenarios by modeling and analyzing space tracking, telemetry and command (TT&C) system using extended object-oriented Petri nets (EOOPN). The formal definition, operational rules and the modeling approach were given. It can embody the object-oriented idea by introducing the concepts of public place, message arc and message handle function into the model, and it has good hierarchical structure and modularity. The EOOPN model can completely describe the TT&C system composite and mission process and reflect the dynamic stochastic factors in system operation. After simulating the EOOPN model, the case study reveals that the simulation results have a good convergence, and the errors are controlled within one percent compared with the analytical result of Markov models, proving the effectiveness of the model.

Key words: mission reliability; object-oriented; Petri nets; space tracking, telemetry and command system

航天测控系统是对航天器飞行轨道、姿态和其上分系统工作状态进行跟踪测量、监视与控制的技术系统,用于保障航天器按照预先设计好的状态飞行与工作,以完成规定的任务^[1]。作为天地之间唯一联系的通道,其任务可靠性水平直接关系到航天飞行过程的成败,对于航天器的发射、在轨运行、回收工作能否顺利完成具有重要影响。测控方案是航天测控系统计划执行的航天测控任务的综合描述,它规定了对航天器所需实施的各类测控业务、提供测控服务的测控资源、测控服务时间信息、测控资源的使用起止时间,以及测控任务成败的判断标准等。航天测控系统任务可靠性评估是指在给定测控方案的基础上,考虑测控过程中的任务资源关联关系和资源故障、维修等动态随机影响因素,定量评估给定测控方案完成航

天测控任务的能力,以便于辅助方案决策和科学合理地完善、优化测控方案。

目前,针对航天测控系统任务可靠性问题主要是在三类基本可靠性建模分析方法即故障树模型^[2],Markov 模型^[3]和仿真模型^[4]的基础上进行研究,在发挥各模型方法优势的同时,着力解决建模求解中面临的问题,包括故障树模型及其二元决策图(BDD)数据存储和高效计算^[5-6],Markov 模型及其矩阵压缩和近似求解算法^[7-8],以及仿真模型及其抽样技术^[9-10]。这些研究的共同点是将航天测控系统看作一个多阶段任务系统,反映了系统时序和故障关联等本质特征。但在寻求建模便利性和求解快速性的同时,对问题也做出了一些简化和假设,难以全面反映系统资源故障可修,资源使用起止时间不同,资源故障时间分布

* 收稿日期:2013-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071159)

作者简介:杨晓松(1984—),男,河南三门峡人,博士研究生,E-mail:yangxiaosong1211@gmail.com;

武小悦(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xiaoyuewucn@yahoo.com.cn

函数不同,多测控业务间资源共用,以及不同维修策略等实际情况。

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。但基本 Petri 网因其状态空间复杂性问题难以直接用于大规模实际系统建模,为此各种形式的高级 Petri 网模型被相继提出,如随机 Petri 网(SPN)^[11],着色 Petri 网(CPN)^[12],面向对象 Petri 网(OOPN)^[13]等,这些模型很大程度上提高了 Petri 网的描述建模能力和降低模型的复杂度。其中 OOPN 建模方法将面向对象建模技术和 Petri 网相结合,将系统视为相互关联的对象组成,进行模块化分析,从而简化了大型复杂系统的建模过程,具有较好的可重用性和可维护性。此后,通过在基本 OOPN 模型的基础上进行扩展和改进,文献[14-15]分别针对具体领域问题研究的特点建立了相应的系统可靠性分析 Petri 网模型。

航天测控系统是一个具有多层次资源、多冗余备份、多业务执行和多阶段运行等复杂特性的大规模系统,因此,本文在 OOPN 的基础上,通过引入公共库所、激发弧、消息变迁和消息处理函数等概念对 OOPN 进行扩展,运用层次化和模块化建模方法,提出了一种扩展的面向对象 Petri 网(EOOPN)模型,并利用该模型建立起能够全面反映航天测控系统组成结构和任务特点的可靠性分析模型。

1 航天测控系统特点及 OOPN 扩展思路

根据航天测控系统的组成和任务特点以及任务可靠性建模分析的需要,主要考虑从以下几个方面对 OOPN 进行扩展:

(1) 层次化 Petri 网结构。从测控资源角度,航天测控系统可划分为三个层次:站点级、设备级和分系统级;从测控任务角度,一次航天测控任务需要并行完成多个测控业务。系统的层次化特征要求在用 Petri 网建模时能够体现该特点,采用由粗到细的层次化建模方法,既能适应不同粒度建模的需求,又能提高模型的直观性、可重用性和可扩展性,更符合大型复杂系统建模需求。

(2) 对象间关联关系。在任务可靠性建模中,任务和资源两类对象间需要重点处理和交互的两类消息为任务时间消息和资源状态消息。任务时间消息方面,各测控业务的起止时间可能不同,由于可见时间窗口限制,不同地理位置的测控

资源也将具有不同的起止工作时间;状态消息方面,由于资源的开关机、故障和维修,资源的状态将会发生动态变化。因此,在各对象之间、对象与子对象之间需要通过引入相应的公共库所、消息变迁及相应的消息处理函数来存储、传递和处理这些时间和状态信息。

(3) 资源属性和逻辑关系表示。可靠性模型中还应反映资源的可靠性/维修性属性和各种业务、资源逻辑结构关系。不同测控资源由于类型、使用年限、所处环境及维修策略等的不同将具有不同的故障和维修时间分布函数,需通过不同分布的随机变迁来表示。逻辑关系主要包括测控业务之间,业务资源之间等复杂逻辑结构关系,利用普通 Petri 网进行表示将导致建模规模急剧增大,因此考虑在变迁上赋予反映逻辑结构关系的布尔条件表达式来简化模型结构。

2 扩展的 OOPN 模型

针对上述建模要求和扩展思路,可得到扩展的 OOPN 模型形式化定义和运行规则如下:

2.1 形式化定义

定义 1 EOOPN 可以形式化递归定义为二元组 (O, R) , 其中:

(1) $O = \{O_i\}_{i=1}^I$ 是 EOOPN 中所有对象集合, 其中每个对象 $O_i (i = 1, 2, \dots, I)$ 也对应一个 EOOPN 模型, 这既体现模块性的设计特性, 也反映了层次化的设计思想。

(2) $R = \{R_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, I; i \neq j\}$ 是 EOOPN 中的对象关联关系集合, $R_{ij} = (PP_i, f_{ij}, PP_j)$, 其中 $f_{ij} = \{\check{f}_{ij}, \hat{f}_{ij}\}$ 是消息处理与转移函数, 而不仅仅是消息传递的逻辑关系表示;

$\check{f}_{ij}: PP_i \rightarrow MC(PP_i)$ 为输入消息函数, $\hat{f}_{ij}(PP_i)$ 是 f_{ij} 使能所需的 PP_i 上的消息集合;

$\hat{f}_{ij}: PP_j \rightarrow MC(PP_j)$ 为输出消息函数, $\check{f}_{ij}(PP_j)$ 是 f_{ij} 转移发生后 PP_j 上的消息变化。

定义 2 对象 $O_i = (P, T, F, C, K, W, \Pi, \Phi, M_0, Q, Pr)$, 其中各符号含义如下:

$P = BP \cup PP$ 为库所集, BP 为基本库所集, 与 CPN 中的库所集定义相同; $PP = OPP \cup SOPP$ 为对象的公共库所集, 其中 OPP 为对象公共库所集, $SOPP$ 为所有子对象的公共库所集, 公共库所用椭圆表示;

$T = BT \cup MT$ 为变迁集, $BT = T_i \cup T_d \cup T_s$ 为基本变迁集, 与 CPN 中的变迁集定义相同, 其中 T_i 为瞬时变迁子集, T_d 为固定时延变迁子集, T_s 为随机变迁子集; MT 为消息变迁集, 用于根据公共

库所集中的消息触发启动相应的行为;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 表示流关系,为连接库所和变迁的有向弧集; $F|_{P \times T} \rightarrow \{0,1\}$ 表示 F 在集合 $P \times T$ 上的限制集;

$F_{MC}: F|_{P \times T} \rightarrow \{0,1\}$, $F_{MC}(p,t) = 0$ 时表示 (p,t) 为激发弧,用虚线表示。 $F_{MC}(p,t) = 1$ 表示 (p,t) 为基本弧;

$F_{IH}: F|_{P \times T} \rightarrow \{0,1\}$, $F_{IH}(p,t) = 0$ 时表示 (p,t) 为禁止弧;

$C: P \cup T \rightarrow \Psi(D)$ 称为颜色函数, D 表示有限非空颜色集, $\Psi(D)$ 为 D 的幂集。对于 $\forall p \in P$, $C(p)$ 是 p 上所有可能的颜色集合,对 $\forall t \in T$, $C(t)$ 是 t 上所有可能的颜色集合;

$K: P \rightarrow D_{MS}$ 为容量函数,且 $\forall p \in BP$, $K(p) \in C(p)_{MS}$ 表示库所 p 能容纳不同资源的数量, D_{MS} 为 D 上的多重集;

$W: F \rightarrow [C_{MS} \rightarrow C_{MS}]$ 为弧权函数,且 $W = \{Pre, Post\}$, 其中 $Pre(p,t) \in [C(p)_{MS} \rightarrow C(t)_{MS}]$ 是输入函数,且 $Pre(p,t) = 0 \Leftrightarrow (p,t) \notin F$, 同理, $Post(p,t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(s)_{MS}]$ 是输出函数;

$\Pi: T \times C(T) \rightarrow [R^0 \rightarrow R]$ 为与每个变迁关联的时延分布函数, R^0 表示非负实数集, $[R^0 \rightarrow R]$ 为实函数集;

$M: P \rightarrow C_{MS}$ 为标识函数,且有 $\forall p \in BP \cup PP$, $M(p) \in C(p)_{MS}$;

$\Phi: T \times C(T) \rightarrow [\Phi(t) \rightarrow \{0,1\}]$ 是定义在变迁上的条件表达式,其中 $[\Phi(t) \rightarrow \{0,1\}]$ 为与表达式相关联的命题函数;

$M_0: P \rightarrow C_{MS}$ 为初始标识,且有 $\forall p \in BP \cup PP$, $M_0(p) \in C(p)_{MS}$;

$Q: BP \cup PP \rightarrow \{FIFO, LIFO\}$ 为定义在库所集上的排队规则;

$Pr: T \times C(T) \rightarrow N^+$ 为转移激发优先权函数。

由于上述定义中允许子对象 O_i 为空集,故上述定义具有递归性质,即同时包含了对子对象的定义。公共库所的引入一方面允许对子对象的消息进行操作,增强其问题描述和表达能力,另一方面简化了模型的图形表示;消息函数的引入便于任务时间消息和资源状态消息的存储、传递和处理;时间分布函数的引入可以处理具有不同时间分布函数的故障和维修变迁;命题函数的引入为变迁赋予条件表达式来表示逻辑结构关系简化了模型的复杂性;排队规则和转移优先权函数的引入可以表达不同的维修策略。

2.2 EOOPN 模型运行规则

EOOPN 描述系统的动态行为是通过变迁激

发引起 EOOPN 的标识发生变化而体现。

定义 3 (变迁使能条件) 在标识 M 下,变迁 $t \in T$ 在颜色 $c \in C(t)$ 下使能的条件是:

(1) (条件表达式成立) $\Phi(t,c) = 1$;

(2) (禁止弧条件成立) $\forall (p,t) \in F$, $\forall a_{ih} \in C(p_i)$, 当 $F_{IH}(p,t) \neq 0$ 时, $M(p_i)(a_{ih}) \geq Pre(p,t)(a_{ih})$, 当 $F_{IH}(p,t) = 0$, $M(p_i)(a_{ih}) = 0$;

(3) (库所容量条件成立) 若 $Post(p,t) \neq 0$, $M(p_i)(a) - F_{MC}(p_i,t)F_{IH}(p_i,t)Pre(p_i,t)(a) + Post(p_i,t)(a) \leq K(p_i)(a)$

定义 4 (变迁激发规则) 当转移 $t \in T$ 在颜色 $c \in C(t)$ 下使能激发时,EOOPN 的新标识 M' 由下式确定: $\forall p_i \in P$, $\forall a \in C(p_i)$,

$$M'(p_i)(a) = M(p_i)(a) - F_{MC}(p_i,t)F_{IH}(p_i,t)Pre(p_i,t)(a) + Post(p_i,t)(a)$$

当变迁激发时,与激发弧相连的输入库所不失去令牌,但对变迁的使能产生作用,而禁止弧起到使变迁不使能的作用。当变迁使能,并经过由 Π 函数所规定的时间延迟后,变迁激发过程完成。

2.3 建模步骤

利用 EOOPN 模型对系统进行可靠性建模,可以采用自上向下、从高层抽象到逐步细化的建模方式,避免过早详细定义所有的变迁和库所,以减少模型的复杂性,具体的建模方法为:

(1) 了解系统组成结构和功能任务,明确系统可靠性建模目标;

(2) 将系统按其复杂程度分解为若干模块,建立递阶的层次模型,并确定系统与下一级子系统之间的上下层关系;

(3) 找出各子系统的公共库所,对各层子系统建立相应的 EOOPN 模型;

(4) 根据对象间的相互关联,确定对象之间的通信连接关系;

(5) 在所研究的各个层次上,按层次建立对象模型;

(6) 构建完整的 EOOPN 模型。

3 航天测控系统任务可靠性建模

以某航天器发射入轨段测控任务为例,其测控业务包括遥测接收业务、遥控指令发送业务等,其任务实施过程如图 1 所示,该任务持续时间段为 $[t_0, t_3]$,期间测控中心 A 始终处于工作状态,两个测控站 B, C 对航天器依次可见,并且根据各测控业务需求开启相应的测控设备,各站可见时

间窗口分别为 $[t_0, t_2], [t_1, t_3]$ 。

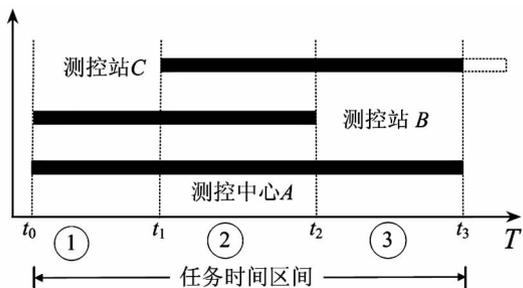


图 1 任务总体过程

Fig. 1 Whole process of the mission

根据层次化、模块化建模原则,建立其任务可靠性分析的 EOOPN 模型如下:

3.1 基本对象层

从测控任务总体过程来看,可以将其任务可靠性 EOOPN 模型划分为两大类对象:测控任务对象、测控资源(站点级)对象,资源的个数依据实际参与任务的测控中心和测控站个数而定,用不同颜色的令牌表示。如图 2 所示,任务对象包含 4 个公共库所: P_{m1} 存储测控任务的起止时间; P_{m2} 存储执行该测控任务所需的测控资源及其任务起止时间; P_{m3} 存储各测控资源状态信息; P_{m4} 表示任务发生失败。资源对象包含两个库所: P_{r1} 表示测控资源接收测控任务,不同测控资源用不同颜色的令牌表示, P_{r2} 表示测控资源的状态变化,故障和完好状态分别用不同颜色令牌表示。其具体运行过程为:当 P_{m1} 中有令牌时,表示任务开始执行,通过 P_{m2} 将任务分配各测控资源,各测控资源通过 P_{r1} 获取各自的任务起止时间,在任务执行过程中,当有资源发生状态变化时, P_{r2} 存储的各站点状态消息将被传递至任务对象的状态监视库所 P_{m3} ,并根据各测控站点状态的变化以及内在逻辑关系来判断任务的成败,当任务失败,输出令牌至 P_{m4} 。

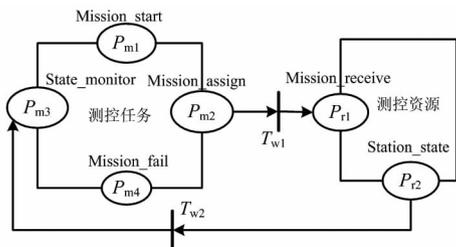


图 2 测控系统基本对象模型

Fig. 2 Basic object model of TT&C system

3.2 测控任务对象细化

一次测控任务需执行多个测控业务,各测控业务之间也存在一定逻辑关系,因此需要根据测

控业务间的时序和逻辑关系对测控任务对象进行细化,从而得到测控任务对象的 EOOPN 模型。图 3 给出了含有两个测控业务的测控任务对象细化模型,表 1 给出各元素具体含义。各测控业务开始库所 P_{i1} 、 P_{i5} 通过上一层库所 P_{m1} 和业务消息处理与转移函数 T_{i1} 获取各自的业务起止时间,并根据业务需求通过库所 P_{i2} 、 P_{i6} 和变迁 T_{i2} 、 T_{i3} 申请相应的测控站点,将申请信息返回到 P_{m2} ,然后从 P_{m3} 处获取站点的状态信息,并根据参与该业务的测控站点的状态及内在逻辑结构关系判断业务的成败,如果业务失败,输出令牌至库所 P_{i4} 、 P_{i8} ,最后,各业务间根据逻辑关系来判断整个测控任务的成败,例如当库所 P_{i4} 中存在令牌时,表示测控业务 1 失败,如果变迁 T_{i5} 上的条件逻辑表达式表示串联关系,则将令牌输出到库所 P_{m4} ,表示整个测控任务失败。

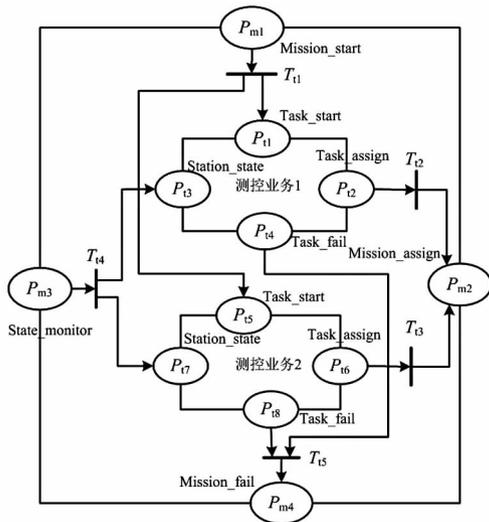


图 3 测控任务对象模型

Fig. 3 TT&C mission object model

表 1 测控任务对象模型库所和变迁具体含义

Tab. 1 Places and transitions in mission object model

元素	含义	元素	含义
$P_{i1} \setminus P_{i5}$	业务起止时间	T_{i1}	业务消息处理
$P_{i2} \setminus P_{i6}$	指定测控站点	$T_{i2} \setminus T_{i3}$	站点消息处理
$P_{i3} \setminus P_{i7}$	测控站点状态	T_{i4}	状态消息处理
$P_{i4} \setminus P_{i8}$	测控业务失败	T_{i5}	逻辑关系判断

3.3 测控业务对象细化

不同测控业务所需的测控站及业务成败判断标准不同。例如,对于一些业务,由指定的主站来实施,当主站执行任务失败时,将启动备份站来执行任务,两站之间形成冷备份逻辑关系;而对于另外一些具有时长要求的业务,则需要多个测控站接力测控来保证测控时长,因此在不同的时间段

上,参与该业务的测控资源及资源间的逻辑构成发生了变化,测控业务的成功要求在每个时间段上的测控业务都成功,此时的航天测控业务具有多阶段任务特性。由图1可知,经过任务时序弧段切割可划分为3个阶段,每个任务阶段的系统组成逻辑结构将清晰明确。在各阶段中,各测控站点与测控中心之间组成串联关系,不同测控站点之间为并联关系,如在第二阶段 $[t_1, t_2]$ 由测控站B、C和测控中心A提供业务支持,要求A必须正常工作,B和C至少有一个正常工作,才能完成任务。图4给出该测控业务对象细化模型, P_{i1} 存在令牌表示业务开始执行,通过 P_{i2} 向所需的各测控站发送消息,同时根据库所 P_{i3} 中的站点状态信息和各变迁关联的系统失效条件逻辑表达式来判断各阶段业务成败,只要有一个阶段发生失败,则整个测控业务失败。其中变迁上赋予的条件表达式通过各阶段的故障逻辑结构函数获取。具体元素含义见表2。

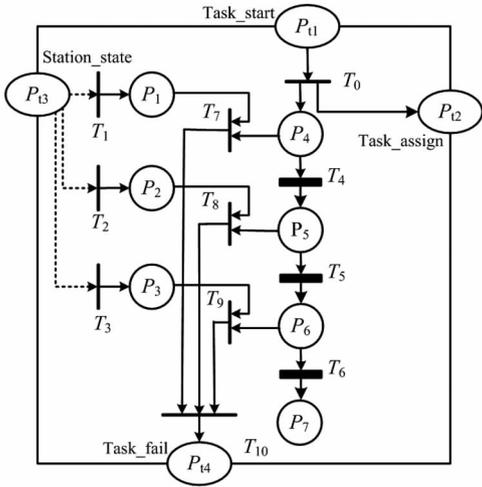


图4 测控业务对象模型

Fig. 4 TT&C task object model

表2 测控任务对象模型库所和变迁具体含义

Tab.2 Places and transitions in task object model

元素	含义
$P_1 \setminus P_2 \setminus P_3$	各阶段站点逻辑组合处于失效状态
$P_4 \setminus P_5 \setminus P_6$	测控业务处于某个阶段状态
$T_1 \setminus T_2 \setminus T_3$	关联系统失效条件逻辑表达式
$T_4 \setminus T_5 \setminus T_6$	具有固定时延的阶段转移

3.4 测控站点对象细化

由于测控站下属各类型设备或分系统通过一定的逻辑组合来执行任务,当设备发生故障后考虑维修,因此测控站点对象又由测控设备对象和维修单元对象组成。如图5所示,根据进入 P_{i1} 中

令牌的颜色,通过消息传递和处理函数 T_{a1} ,可以在 P_{s1} 中确定由哪些设备参与某个或某些测控业务,不同的设备用不同颜色的令牌来表示。当设备发生故障时,将通过 P_{s3} 将故障信息传递到维修单元对象,经过维修后返回。这里测控站点的状态变化,主要依据该站点下执行测控业务所需的测控设备的状态和逻辑结构关系来判断,子公共库所 P_{s2} 中令牌反映了执行业务的正常设备的数量和状态,通过在变迁 T_{a2} 上赋予条件逻辑表达式,可以将设备状态的变化映射到站点状态的变化库所 P_{i2} 。

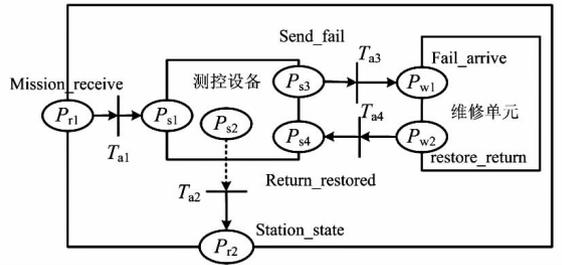


图5 测控站点对象模型

Fig. 5 TT&C station object model

3.5 测控设备对象细化

根据参与测控业务所需设备及其可靠性属性,可建立设备的对象细化模型。在设备对象中用不同颜色的令牌代表测控站中执行某一测控业务的各测控设备。如图6所示,当测控设备接收到测控业务申请后,从正常状态库所 P_1 中选取所需的测控设备,经过 T_{s4} 转移进入工作状态 P_2 ;对于具有多状态属性的资源,分别用库所 P_4 、 P_5 、 P_6 表示致命性故障、严重故障和一般故障,当设备发生状态变化后,根据各故障状态时间分布函数抽样通过随机变迁转移到各状态库所,只有当设备发生致命性故障时,设备才需要维修,同时经公共库所 P_{s3} 向维修单元发出维修申请;当设备修复完毕,设备从故障状态恢复到正常工作状态;当测控业务完成后,测控设备由工作状态经固定时延变迁 T_{s1} 释放到正常待命状态。

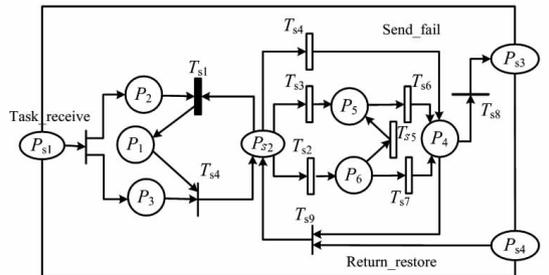


图6 测控设备对象模型

Fig. 6 TT&C equipment object model

3.6 维修单元对象细化

图 7 给出了简单的维修单元对象细化模型,即维修工库所 P_1 在设备故障到达时开始维修,维修完毕后恢复到空闲状态。当然,维修单元对象本身又是一个很复杂和值得研究的问题,如不同维修工数量,不同的维修策略,不同的维修优先权和排队规则,以及维修资源共享机制和备件供应能力等,都需要根据具体问题进行具体的分析。

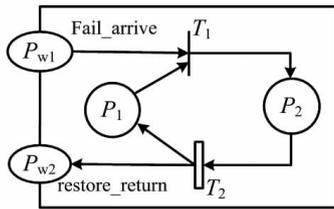


图 7 维修单元对象模型

Fig. 7 Maintenance unit object model

综上所述,整个航天测控系统可靠性分析 EOOPN 模型主要包括两大类对象:测控任务对象和测控资源(站点级)对象,测控任务对象又由若干测控业务对象组成,测控资源对象又由测控设备对象和维修单元对象组成,两大类对象在测控业务和测控站点对象处实现接口。在建立 EOOPN 模型之后,就可以利用该模型分析航天测控系统任务可靠性指标,首先按照测控方案实际参数设定任务执行时间、各测控业务的起止时间、测控资源故障率、维修时间分布函数等,运用离散事件系统仿真技术对 EOOPN 模型进行仿真运

行,通过统计相关数据就可以得到航天测控系统的任务可靠度、各测控业务可靠度、测控资源关键度等指标,从而分析出测控方案能否满足测控任务可靠性要求以及分析测控过程中的薄弱环节。

4 算例验证与分析

为了验证本文所提模型的有效性,以图 1 所示航天测控任务过程为例,包含两个测控业务 task1 和 task2,测控任务的成功要求两个测控业务都完成。测控业务过程如图 4 所示,假设各阶段持续时长均为 2min。各测控站下属设备情况分别为: $A = \{a, j, p\}$, $B = \{b, c, d, e, f, g, h\}$, $C = \{i, k, l, m, n, o\}$ 。各测控业务与测控设备之间的在每个阶段的布尔逻辑结构函数如表 3 所示。

表 3 各阶段布尔逻辑结构函数

Tab. 3 Boolean structure function of each phase

业务阶段	布尔逻辑结构函数 $\Phi(X)$	
	task1	task 2
phase1	$abcdef + jbegh$	$jpghe$
phase2	$(abcdef + jbegh) + (aimno + jklo)$	$jpghe + jpimn$
phase3	$aimno + jklo$	$jpimn$

考虑到与 Markov 模型解析结果进行对比,假设各测控设备的故障和修复过程相互独立且服从指数分布,用 MTBF 和 MTTR 分别表示设备相应的可靠性和维修性信息,如表 4 所示。

表 4 测控设备 MTBF 和 MTTR(单位:小时)

Tab. 4 TT&C equipments MTBF and MTTR(unit: hour)

	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR
a	165	0.733 3	e	170	0.400 0	i	80	0.300 0
b	80	0.600 0	f	225	0.833 3	j	700	1.000 0
c	125	0.500 0	g	150	0.500 0	k	125	1.000 0
d	50	0.333 3	h	114	0.533 3	l	150	0.500 0
						m	90	0.333 3
						n	150	0.400 0
						o	250	0.750 0
						p	500	0.666 7

为保证仿真结果精度,设置仿真运行三千万次,根据相应失败库中所令牌出现的次数可统计得到各测控业务不可靠度的点估计值。如表 5 所示,通过与 Markov 解析方法^[7]所得的精确值的对比可以看出,两者之间的误差在 1% 以内,从而验证了本文所提 EOOPN 建模方法的有效性。图 8 所示为各测控业务不可靠度随仿真次数变化的关系图,直线所示为 Markov 模型解析值,可以看出仿真结果具有较好的收敛性,随着仿真次数增加,仿真值与解析值误差逐渐缩小至可接受范围。

由于 Markov 模型难以处理多测控业务间共

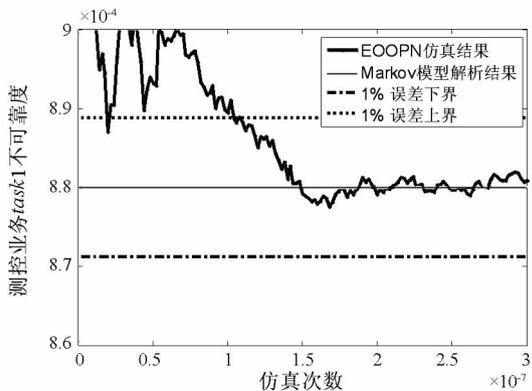
表 5 可靠性计算结果对比

Tab. 5 Comparison of reliability results

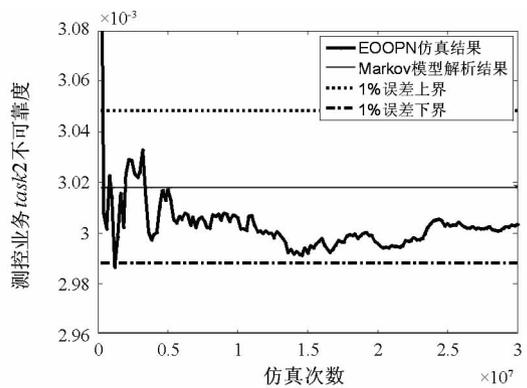
测控业务	可靠性结果(不可靠度)		
	Markov	EOOPN	误差
task1	$8.800e^{-4}$	$8.809e^{-4}$	0.1023%
task2	$3.018e^{-3}$	$3.004e^{-3}$	0.4639%
综合业务	—	$3.684e^{-3}$	—

用测控设备的情况,因此只能分析计算单个测控业务的可靠性,而应用 EOOPN 模型可以统计分析各测控业务的综合可靠性,即整个测控任务的

可靠性。同时 EOOPN 模型又能处理诸如测控资源故障和维修不服从指数分布,维修资源争用等复杂情况,因此具有广泛适用性。



(a) task1 不可靠度随仿真次数变化图



(b) task2 不可靠度随仿真次数变化图

图8 测控业务不可靠度与仿真次数关系图

Fig. 8 Convergence of the unreliability

5 结论

EOOPN 模型体现了面向对象的思想,通过模块化和层次化的建模方法能够在很大程度上降低建模的复杂性和增强模型的直观性,并且提高了模型的可重用性和可维护性。通过将 EOOPN 建模方法应用到航天测控系统任务可靠性评估领域,可以全面反映系统资源故障可修,资源使用起止时间不同,资源故障时间分布函数不同,多测控业务间资源共用以及不同维修策略等实际情况。所建立的模型具有先进有效性和广泛适用性,通过适当的调整即可应用于其他类似复杂系统的任务可靠性评估中去。

参考文献 (References)

[1] 夏南银,张守信,穆鸿飞. 航天测控系统[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
XIA Nanyin, ZHANG Shouxin, MU Hongfei. Space tracking, telemetry and command system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

[2] Vesely W E, Goldberg F F, Roberts N H. Fault tree handbook [M]. US Nuclear Regulatory Commission, 1981.

[3] Dugan J B. Automated analysis of phased-mission reliability [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(1): 45 - 52, 55.

[4] 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)

[5] 王刚. 航天测控系统的任务可靠性建模及BDD算法[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
WANG Gang. Mission reliability modeling of space TT&C system and BDD algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

[6] Meng L, Wang G, Wu X Y. Mission reliability analysis of TT&C system using BDD algorithm [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: theory, Methods, Applications, China, Beijing, 2011: 682 - 686.

[7] 闫华,武小悦. 航天测控通信系统可靠性分析的 Krylov 子空间投影算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 63 - 67.
YAN Hua, WU Xiaoyue. Krylov subspace projection algorithm of reliability analysis of TT&C and communication System[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(4): 63 - 67. (in Chinese)

[8] 黎丽荣. 基于 Markov 模型的大型 PMS 任务可靠性分析方法[D]. 国防科学技术大学:长沙,2011.
LI Lirong. Mission reliability analysis of large PMS based on Markov model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[9] 许双伟,武小悦. 高可靠多阶段任务系统可靠性仿真的高效方法[J]. 装备学院学报, 2012, 23(2): 69 - 74.
XU Shuangwei, WU Xiaoyue. An efficient reliability simulation method for highly reliable phased mission system[J]. Journal of Academy of Equipment, 2012, 23(2): 69 - 74. (in Chinese)

[10] Yang X S, Wu X Y. Mission reliability evaluation of TT&C system using discrete-event simulation [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: theory, Methods, Applications, China, Beijing, 2011: 672 - 676.

[11] Molloy M K. Performance analysis using stochastic Petri nets [J]. IEEE Transactions on Computers, 1982, C - 31(9): 913 - 917.

[12] Jensen K, Kristensen L M, Wells L. Colored Petri nets and CPN tools for modeling and validation of concurrent systems [J]. International Journal of Software Tools Technology Transfer, 2007, 9: 213 - 254.

[13] Wang L. An integrated object-oriented Petri net paradigm for manufacturing control systems [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1996, 9(1): 73 - 87.

[14] 武小悦,张维明,沙基昌. 通信网络可靠性分析的 GOOPN 模型[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 84 - 86.
WU Xiaoyue, ZHANG Weiming, SHA Jichang. Generalized object-oriented Petri net model for reliability analysis of communication network [J]. System Engineering and Electronics, 2000, 22(3): 84 - 86. (in Chinese)

[15] 张涛,郭波,谭跃进,等. 基于增强型扩展的面向对象 Petri 网模型的装备保障能力评估建模[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 273 - 277.
ZHANG Tao, GUO Bo, TAN Yuejin, et al. GOOPN + + based model for capability assessment of equipment support [J]. Acta Armamentar, 2006, 27(2): 273 - 277. (in Chinese).