基于 BER 和 CTMC 的航天器发射组织过程可靠度模型*

董学军[1,2],白国庆[1],陈英武[1]
(1. 国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073;
2. 酒泉卫星发射中心,甘肃 酒泉 732750)

摘 要:在航天器发射工程中,存在组织过程可靠性评估难以量化的问题。基于航天器发射组织过程的时间特性呈现多个子过程并发执行且子过程具有 Markov 性和齐次性的特点,使用连续时间 Markov 链(CTMC)建立多吸收态的组织过程可靠度模型,利用互模拟等价关系(BER)简化组织过程的状态空间,并进一步给出各种状态转移率和组织过程可靠度计算方法。最后,通过数据分析说明模型在航天器发射工程进度计划评估中的作用和意义。

关键词:航天器发射;互模拟等价关系;连续时间 Markov 链;过程可靠度
中图分类号:V554 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2013)02-0046-06

Scheduler reliability model of spacecraft launch based on BER and CTMC

DONG Xuejun[1,2], *BAI Guoqing*[1], *CHEN Yingwu*[1]
(1. College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

Abstract: In spacecraft launch engineering, it is very difficult to quantify reliability of implementation process. In terms of the peculiarities which the reliability of implementation process presents, such as many sub-processes having concurrency and every sub-process having the Markovian property and homogeneity. this research presents a model of implementation processes reliability with multi-absorbing state by utilizing the model of continuous-time Markov chain (CTMC), which simplifies the state space of the implementation processes reliability through the use of bisimulation equivalence relation. Moreover, the calculation method for various state transition rates and implementation process reliability is also presented. Finally, the simulation case by engineering data verifies the role and significance of the model in the assessment schedule of spacecraft launch engineering.

Key words: spacecraft launch; bisimulation equivalences relation; continuous-time Markov chains; process reliability

航天器发射工程是以航天器和运载器为对象,综合运用测试、测控和发射技术,按照预定的程序和规范,将航天器准确送入预定轨道的过程。航天器发射组织过程可靠性是指工程在规定条件下、规定时间内达成基本预期目的的概率。航天器发射工程属多阶段任务系统(Multiple Phased Systems, MPS)。20世纪70年代以来,国内外学者对 MPS 进行了大量研究,已有方法可分为组合建模[1-4]、状态空间建模[5-8]和将两者相结合的其他建模[9-10]。组合建模本质上是一种静态逻辑代数分析法。状态空间建模对于大规模问题存在状态爆炸问题。它们都不能解决多过程并发执行的建模问题。

航天器发射工程组织过程表现为在统一的任务流程下,相互衔接而又各自相对独立的活动集合。当把活动当作状态来考察时,一组相互衔接的活动就构成一个 CTMC,使用多个并发执行的 CTMC 可以完整地描述航天器发射工程组织的全过程。CTMC 是一个用于系统性能分析的数学模型[11],利用 CTMC 的研究成果[12]可以建立任何一个独立的 CTMC 解析模型,但由于航天器发射工程中存在多个 CTMC 并发执行情况,须考虑多个并发 CTMC 的集结问题。Baier C 等[13]将 BER 引入 CTMC 中,为相应系统状态空间简化提供了手段。本文利用 CTMC 上的 BER,研究将多个并发和顺序执行的 CTMC 集结成一个 CTMC 的方法,达到使用 CTMC 模型考察航天器发射工程组织过程可靠性的目的。

* **收稿日期**:2012-09-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(70971131, 71071156)
作者简介:董学军(1969—),男,河南沈丘人,高级工程师,博士研究生,E-mail: dongxuejun10@163.com;
陈英武(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: ywchen@nudt.edu.cn

1　问题描述

1.1　过程含义

航天器发射工程一般按照任务准备、单机测试、分系统测试、联合检查和发射的流程组织,并依据物流的实际需要在相应时间节点处安排吊装、对接、转运和加注等活动。地面测量、发射、控制和通信系统的活动,按照航天器和运载器测试发射的时间节点要求,参与相关工作。通常依据不同时段工作场所、内容和特点,将航天器发射工程的组织过程划分成很多个子过程。决策者依据子过程输出结果与输出标准的吻合程度决定是转入下一子过程,或转入之前的某个子过程,或重新组织实施,或终止任务发射。表 1 是按照 X - 51 航天器发射工程(对真实工程的模拟)的组织流程和里程碑进行归纳后的主要子过程列表。

表 1　航天器发射工程主要子过程及其性能列表

Tab. 1　The spacecraft launch engineering mainly sub-processes and their performance list

子过程编号及名称	航天产品可靠度			地面设备可靠度		组织可靠度	ΔT_i	$\Delta T_i'$
	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i		
1　航天器进场	1	——	1	0.9999	——	0.9995	32	42
2　航天器单元、分系统检查测试	0.9990	——	0.9990	0.9995	——	0.9995	32	42
3　航天器总装及检漏	0.9990	——	——	0.9995	——	0.9995	28	38
4　航天器电测及匹配检查	0.9990	——	0.9990	0.9995	——	0.9995	48	60
5　航天器模飞	0.9990	——	——	0.9995	——	0.9995	44	55
6　航天器与应用系统总装、联试	0.9990	——	0.9990	0.9995	——	0.9995	24	32
7　航天器扣罩、转运	0.9990	——	——	0.9995	——	0.9995	28	38
8　运载器进场	——	1	——	0.9999	——	0.9995	32	42
9　运载器吊装对接、单元测试	——	0.9980	——	0.9995	——	0.9995	32	42
10　运载器分系统测试	——	0.9980	——	0.9995	——	0.9995	36	48
11　运载器匹配测试	——	0.9980	——	0.9995	——	0.9995	32	42
12　运载器总检查	——	0.9980	——	0.9995	——	0.9995	24	33
13　线电路调整、装备转场	——	——	——	1	1	1	40	66
14　测控通信系统联调联试	——	——	——	0.9999	0.9995	0.9995	40	66
15　飞行控制模式演练	——	——	——	0.9995	0.9990	1	28	45
16　联合检查	0.9990	0.9990	0.9990	0.9995	0.9995	0.9995	36	48
17　航天器加注、运载器电性能复测	0.9990	0.9990	0.9990	0.9995	——	0.9995	40	52
18　对接及转运	0.9990	0.9990	0.9990	0.9995	——	0.9995	16	22
19　运载器加注及发射	0.9990	0.9990	0.9990	0.9995	0.9995	0.9995	24	32
点火后,航天产品的安全性	0.9800	0.9700	0.9900	—	—	—		

备注:1. 以航天器到达发射场记为初始时刻 $T_0=0$,运载器到达发射场时刻 $T_{L_2,0}=100$,线电路调整开始时刻 $T_{I3,0}=130$;

2. "——"表示不参与此过程。3. 表中安全性是指运载器点火后,航天产品达成基本预期目的的概率。

1.2　概念定义

定义 1　CTMC 三元组。将一组有先后时间关系约束,在工作性质上具有某种一致性的子过程看成一个状态空间 S,首先执行的子过程为初始态 D,S 内状态间转移率构成状态转移率矩阵 M,则$(S,\boldsymbol{M},D)$是一个 CTMC 的三元组。

定义 2　过程可靠度。在规定的时间内,CTMC 到达预定结果态的概率是航天器发射工程过程可靠度;状态 s 按工艺流程方向转移到下一状态 s'的概率是子过程 s 的可靠度。

定义 3　互模拟等价关系(BER)。定义在 CTMC $(S,\boldsymbol{M},D)$上的等价关系 B 称为互模拟等

价关系，当且仅当对所有的 $s_i B s_j$，以下条件成立：

对于 B 中的所有等价类 $C, C \neq [s_i]_B$，有

$$\mathscr{R}(s_i, C) = R(s_j, C) \tag{1}$$

如果 $s_i B s_j$ 存在，则称 s_i 和 s_j 互模拟，记为 $s_i \approx s_j$。定义中 $\mathscr{R}(s, C) = \sum_{s' \in C}(s, s')$，$r$ 是一步 Markov 状态转移率。

1.3 过程可靠度考察

航天器发射工程开始时刻记为 t_0，$i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 是工程中的一个状态，t_i 是工程处于状态 i 的时刻，$t_n > t_{n-1} > \cdots > t_1 > t_0$，则组织过程可表示为 CTMC 的三元组 $(S, \boldsymbol{M}, D)$，S 是状态空间 $\{1, 2, \cdots, n\}$ 的集合，$\boldsymbol{M}$ 是 $S \times S$ 的转移率矩阵，D 是初始态。

由于需要多个并发 CTMC 才能有效描述航天器发射工程组织过程的性能。如果按照定义 3 设置一个虚拟态，该虚拟态的开始时间、逗留时间数学期望和向等价类转移的转移率与多个并发的 CTMC 相同，就可以利用 BER 将多个并发 CTMC 等价成一个虚拟态，进而将工程组织实施全过程抽象成一个含有虚拟态的 CTMC。

2 模型设计

2.1 航天器发射工程 CTMC 模型

图 1 是依据表 1 中的子过程项目和前后约束关系绘制的航天器发射工程状态转换关系图。图中粗箭头线表示工艺流程的路径和方向，CTMC L_1、L_2 和 L_3 分别表示航天器、运载器和测控通信系统的状态变化过程，CTMC L_4 表示联合检查与发射的状态变化过程。$S_{L_1} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 16\}$，$S_{L_2} = \{8, 9, 10, 11, 12, 16\}$ 和 $S_{L_3} = \{13, 14, 15, 16\}$ 分别是 CTMC L_1、L_2 和 L_3 的状态集，$S_{L_4} = \{16, 17, 18, 19, 20, 21, 22\}$ 是 CTMC L_4 的状态集。状态 20，21，22 分别表示工程终止、发射成功和失败。S_{L_1}、S_{L_2} 和 S_{L_3} 中 16，22 为吸收态，其他为暂态。S_{L_4} 中的 20，21，22 为吸收态，其他是暂态。实际工程中，航天器、运载器和测控通信系统都满足联合检查条件时，才会进入 CTMC L_4，因此，状态 7，12 和 15 同时转移到状态 16。

2.2 状态转移率模型

按图 1 中的航天器发射工程工艺流程方向，定义 i 是 CTMC L_k 中的暂态，i' 是 i 的下一状态，当 $i = 19$ 时，i' 包括 20 和 21。

(1) i 的总转移率

已知状态 i 的逗留时间 Δt_i 服从指数分布，其

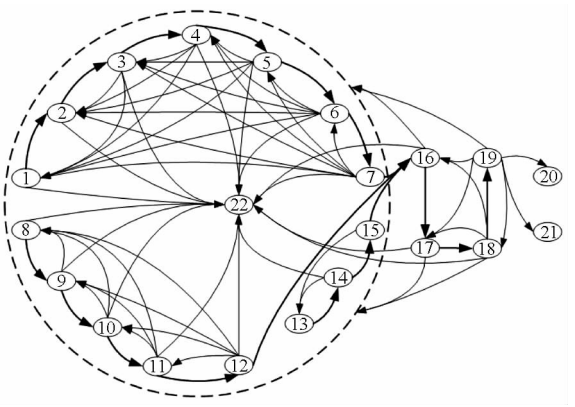


图 1 X－51 航天器发射工程状态转移关系简图

Fig. 1 Spacecraft launch engineering state transition relationship schematic figure

概率密度为

$$f(\Delta t_i) = \begin{cases} \lambda_i e^{-\lambda_i \cdot \Delta t_i}, & \Delta t_i > 0 \\ 0, & \Delta t_i < 0 \end{cases} \tag{2}$$

实际工程中，完成子过程 i 的平均时间 ΔT_i 是可以预期的，从 CTMC 模型的角度看，ΔT_i 就是状态 i 逗留时间的数学期望，因此有

$$\lambda_i = \frac{1}{\Delta T_i} \tag{3}$$

(2) i 到 i' 的转移率

工程实际中，i 转移到 i' 的概率只与航天产品任务可靠度、地面设施设备任务可靠度和子过程组织可靠度相关。航天产品包括航天器、运载器和有效载荷，设其在子过程 i 的任务剖面内可靠度分别为 a_i、b_i 和 c_i，则航天产品任务可靠度 $r_{sp,i} = a_i \times b_i \times c_i$。地面设施设备包括发射场系统和测控通信系统，设其在子过程 i 的任务剖面内可靠度分为 d_i 和 e_i，则地面设施设备的任务可靠度 $r_{eq,i} = d_i \times c_i$。设子过程 i 任务剖面内包含 n 项活动 $E_1, E_2, \cdots, E_n$，$f(E_j)$ 是活动 $j(j = 1, 2, \cdots, n)$ 的组织可靠度，则子过程 i 的组织可靠度 $r_{og,i} = \prod_j f(E_j)$。

由于航天产品和地面设施设备任务可靠度、子过程组织可靠度相互独立，因此，当时间满足要求时，子过程 i 完成规定工作且结果符合标准要求的概率 r_i 为

$$r_i = r_{sp,i} \times r_{eq,i} \times r_{og,i} \tag{4}$$

子过程 i 完成规定的工作且结果符合标准要求意味着工程状态按工艺流程方向从状态 i 转移到 i'，因此，当状态 i 发生转移时，其转移到状态 i' 的概率就是 r_i，即

$$p_{i,i'} = r_i \xrightarrow{\frac{P_{i,i'}}{P_i} = \frac{\lambda_{i,i'}}{\lambda_i}} \lambda_{i,i'} = r_i \cdot \lambda_i = \frac{r_i}{\Delta T_i} \tag{5}$$

(3)i 到状态 $j(j < i)$ 和吸收态的转移率

当 $i = 1,8,13$ 时,i 的一步 Markov 转移状态只有 i' 和 22,则

$$\lambda_{i,22} = \lambda_i - \lambda_{i,i'} = \frac{1 - r_i}{\Delta T_i} \tag{6}$$

当 $i = 19$ 时,工程直接转移到 22 是几乎不可能的,因此,实践中假定 $\lambda_{19,22} \approx 0$。在没有工程关于从 19 转到 j 的先验知识时,假定 19 到每个 j 的转移率相等,有

$$\lambda_{19,j} = \frac{\lambda_{19} - (\lambda_{19,20} + \lambda_{19,21})}{18} = \frac{1 - r_{19}}{18\Delta T_{19}} \tag{7}$$

19 到 20 和 21 的转移率还与航天产品的安全性有关,设航天产品安全性概率为 sa,则

$$\lambda_{19,20} = \frac{sa \cdot r_{19}}{\Delta T_{19}}, \quad \lambda_{19,21} = \frac{r_{19} \cdot (1 - sa)}{\Delta T_{19}} \tag{8}$$

当 $i \neq 1,8,13,19$ 时,由于航天器发射工程是航天器建造工程的最后一个环节,航天产品已完成正样生产,因此,发生工程终止的概率相对较小,由某个子过程转移到终止态的概率会更小。所以,在实际操作中可凭借航天器发射工程统计性数据,假定一个终止概率,然后将其平分到每次子过程转移。设平分后的终止概率为 t,状态 i 前共有 m 个状态 j,则

$$\lambda_{i,22} = t \cdot \lambda_i, \lambda_{i,j} = \frac{\lambda_i - \lambda_{i,i'} - \lambda_{i,22}}{m} = \frac{1 - r_i - t}{m \cdot \Delta T_i} \tag{9}$$

2.3　互模拟等价关系模型

CTMC L_1、L_2 和 L_3 并发执行时一步 Markov 转移的外部状态只有 16 和 22。令等价类 $C = \{16,22\}$,假定存在一个状态 L_{123},其开始时间与 CTMC L_1、L_2 和 L_3 的最早开始时间相同,其到 16 和 22 的转移率分别等于 CTMC L_1、L_2 和 L_3 同时转移到 16 的转移率和累计到 22 的转移率之和。按照定义 3,状态 L_{123} 与 CTMC L_1、L_2 和 L_3 并发执行间存在互模拟等价关系 B。

第一步,计算 CTMC L_k 到 16 和 22 的转移概率。

使用 2.2 节给出的状态转移率模型,构建 CTMC $L_k(k = 1,2,3)$ 的转移率矩阵 M_{L_k},由文献[14]给出的转移概率计算方法

$$P(\Delta t) = \left[\left(I - M\frac{\Delta t}{n}\right)^{-1}\right]^n, n \text{ 为 2 的一个大的幂} \tag{10}$$

得 CTMC L_k 的转移概率矩阵 $P_{L_k}(\Delta t)$。

当给 Δt 一个足够大的值 T 时,在 $P_{L_k}(T)$ 中,除到 16 和 22 的转移概率外,到其他暂态的转移概率都为零。继续增大 Δt 发现 $P_{L_k}(T + \Delta) = P_{L_k}(T)$。此时,$P_{L_k}(T)$ 中从初始态到 16 和 22 的转移概率就是 CTMC L_k 从自初始态开始,离开暂态集时到 16 和 22 的转移概率,记为 $P_{L_k,16}$ 和 $P_{L_k,22}$。

第二步,计算 CTMC L_k 到 16 和 22 所用时间期望。

设 CTMC $L_k(k = 1,2,3)$ 从初始态开始的时刻为 $T_{L_k,0}$,从初始态开始到 16 和 22 时所用时间期望为 ΔT_{L_k},则在 $[T_{L_k,0},\ T_{L_k,0} + \Delta T_{L_k}]$ 内,CTMC L_k 进入 16 和 22 的概率和为

$$P_{L_k}(\Delta T_{L_k}) = 1 - e^{-\lambda_{L_k} \cdot \Delta T_{L_k}} = 1 - e^{-\frac{1}{\Delta T_{L_k}} \cdot \Delta T_{L_k}} = 1 - e^{-1} \tag{11}$$

进入 16 的概率为

$$P_{L_k,16}(\Delta T_{L_k}) = P_{L_k,16} \cdot P_{L_k}(\Delta T_{L_k}) = P_{L_k,16}(1 - e^{-1}) \tag{12}$$

进入 22 的概率为

$$P_{L_k,22}(\Delta T_{L_k}) = P_{L_k,22} \cdot P_{L_k}(\Delta T_{L_k}) = P_{L_k,22}(1 - e^{-1}) \tag{13}$$

给定一个 Δt,使用式(10)计算 CTMC L_k 的转移概率矩阵,得到 $P_{L_k,16}(\Delta t)$,如果

$$P_{L_k,16}(\Delta t) < P_{L_k,16}(1 - e^{-1}) - \varepsilon \tag{14}$$

ε 是一个可以接受的很小的数,则逐渐增大 Δt 至 Δt_{L_k},否则,逐渐减小 Δt 至 Δt_{L_k},使得

$$P_{L_k,16}(\Delta t) \in [P_{L_k,16}(1 - e^{-1}) - \varepsilon, P_{L_k,16}(1 - e^{-1}) - \varepsilon]$$

此时有

$$\lambda_{L_k} \approx \frac{1}{\Delta t_{L_k}}, \lambda_{L_k,16} \approx \frac{P_{L_k,16}}{\Delta t_{L_k}}, \lambda_{L_k,22} \approx \frac{P_{L_k,22}}{\Delta t_{L_k}} \tag{15}$$

第三步,计算 CTMC L_1、L_2 和 L_3 并发执行转移到 16 和 22 的转移率。

一般情况下,CTMC L_1,L_2 和 L_3 的开始时刻不同,令 CTMC L_1 开始时刻 $T_{L_1,0} = T_0 = 0$,CTMC L_2 和 L_3 的开始时刻分别为 $T_{L_2,0}$ 和 $T_{L_3,0}$。由于 CTMC L_1、L_2 和 L_3 必须同时转移到 16,所以,工程离开 CTMC L_1、L_2 和 L_3 并发执行状态转入 16 或 22 所花时间的数学期望为

$$\Delta T_{L_1,L_2,L_3} \approx \max\{\Delta t_{L_1}, T_{L_2,0} + \Delta t_{l2}, T_{L_3,0} + \Delta t_{L_3}\} \tag{16}$$

总转移率为

$$\lambda_{L_1,L_2,L_3} \approx \frac{1}{\max\{\Delta t_{L_1}, T_{L_2,0} + \Delta t_{L_2}, T_{L_2,0} + \Delta t_{L_2}\}} \tag{17}$$

由于 CTMC L_1,L_2 和 L_3 并发执行时相互独立,但又必须同时转移到状态 16,因此

$$P_{(L_1,L_2,L_3),16}=P_{L_1,16}\times P_{L_2,16}\times P_{L_3,16}$$

$$\lambda_{(L_1,L_2,L_3),16}\approx\frac{P_{L_1,16}\times P_{L_2,16}\times P_{L_3,16}}{\max\{\Delta t_{L_1},T_{2,0}+\Delta t_{L_2},T_{L_2,0}+\Delta t_{L_2}\}} \tag{18}$$

$$\lambda_{(L_1,L_2,L_3),22}\approx\frac{1-P_{L_1,16}\times P_{L_2,16}\times P_{L_3,16}}{\max\{\Delta t_{L_1},T_{L_2,0}+\Delta t_{L_2},T_{L_2,0}+\Delta t_{L_2}\}} \tag{19}$$

第四步,构建与 CTMC L_1,L_2 和 L_3 并发执行实现互模拟的虚拟态 L_{123}。

定义一个模拟态 L_{123},满足:(1)开始时间 $T_{L_{123}}=0$;(2)一步 Markov 转移的状态包括 16 和 22;(3)从模拟态 L_{123} 出发的转移率分别为

$$\lambda_{L_{123},16}\approx\lambda_{(L_1,L_2,L_3),16},\lambda_{L_{123},22}\approx\lambda_{(L_1,L_2,L_3),22} \tag{20}$$

则对于等价类 $C=\{16,22\}$,有

$$\mathscr{R}(L_{123},C)=\mathscr{R}((\text{CTMC } L_1,L_2 \text{ 和 } L_3 \text{ 并发执行}),C) \tag{21}$$

根据定义 3,L_{123} 与 CTMC L_1,L_2 和 L_3 并发执行互模拟成立。使用互模拟等价关系对图 1 进行状态空间压缩后的简图见图 2。图中各状态形成一个新的 CTMC EL,其他状态向 L_{123} 的转移率等于其向状态集 $\{1,2,\cdots,15\}$ 中各状态的转移率的和。

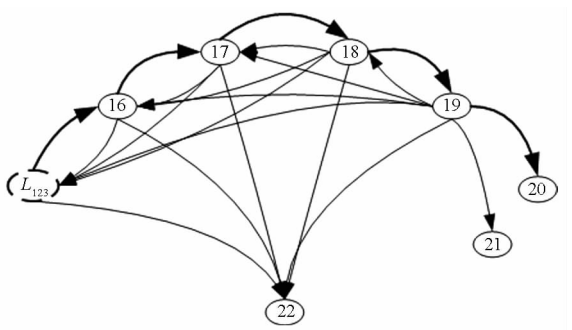


图 2 X-51 工程状态空间压缩图

Fig. 2 State space compression figure of X-51 engineering

2.4 过程可靠度模型

使用 2.2 节给出的状态转移率模型计算 CTMC L_1、L_2、L_3 和 EL 中的各状态转移率,然后分别构建它们的状态转移率矩阵。给定计划完成时间 Δt,由式(10)得 CTMC L_k($k=1,2,3,EL$)的过程可靠度模型

$$P_{L_k}(\Delta t)=\left[\left(I-M_{L_k}\frac{\Delta t}{n}\right)^{-1}\right]^n,n \text{ 为 2 的一个大的幂} \tag{22}$$

其中 $P_{1,16}(\Delta t)$、$P_{8,16}(\Delta t)$ 和 $P_{13,16}(\Delta t)$ 分别是 CTMC L_1、L_2 和 L_3 的过程可靠度,$P_{L_{123},20}(\Delta t)+P_{L_{123},21}(\Delta t)$ 是 CTMC EL 的过程可靠度。

模拟态 L_{123} 的过程可靠度模型

$$r_{L_{123}}(\Delta t)=P_{(L_1,L_2,L_3),16}(\Delta t)\approx P_{L_1,16}\cdot P_{L_2,16}\cdot P_{L_3,16}(1-\mathrm{e}^{-\frac{\Delta t}{\max\{\Delta t_{L_1},T_{L_2,0}+\Delta t_{L_2},T_{L_3,0}+\Delta t_{L_3}\}}}) \tag{23}$$

3 数据分析

X-51 航天器发射工程主要子过程数据见表 1。统计数据显示,发射场 M 在执行 X-51 任务前共实施过 198 次发射任务,其中发生过 2 次任务终止,分别在第 25 次和第 130 次。因此,假定任务终止的可能性约为 1.2%。

X-51 任务共有 19 个主要子过程,除子过程 13、15 和 19 到 22 的转移率为 0 外,假定每个子过程发生转移时,到 22 的转移概率均为 x。统计显示平均一次任务有 2.5 次子过程向后转移,因此,X-51 任务中约有 18.5 子过程发生转移时,其到 22 的转移概率为 x。基于每个子过程到 22 的转移都是独立的,有

$$(1-x)^{18.5}\approx 0.988\longrightarrow x\approx 6.52\times 10^{-4}$$

使用 2.2 节状态转移率模型构建 CTMC L_1、L_2、L_3 和 EL 的转移率矩阵,再使用 2.3 节给出的互模拟等价关系模型构建模拟态 L_{123},得

$$\lambda_{L_{123}}=\lambda_{L_1,L_2,L_3}\approx 0.00370,$$

$$\lambda_{L_{123},16}=\lambda_{(L_1,L_2,L_3),16}\approx 0.00367$$

$$\lambda_{L_{123},22}=\lambda_{(L_1,L_2,L_3),22}\approx 0.00003$$

使用式(22)计算得 CTMC L_1、L_2、L_3 过程可靠度与时间关系,使用式(23)计算 L_{123} 的过程可靠度与时间关系,上述过程可靠度与时间的关系图见图 3。

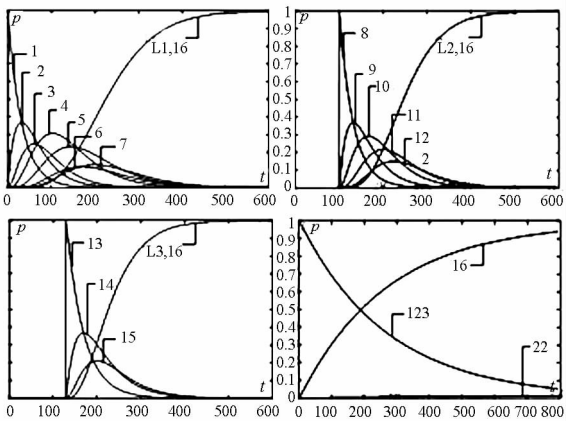


图 3 CTMC L_1、L_2、L_3 和 L_{123} 的可靠度与时间关系

Fig. 3 CTMC L_1, L_2, L_3, L_{123} reliability and time relationships

使用式(22)计算 CTMC EL 的过程可靠度与时间关系见图 4。

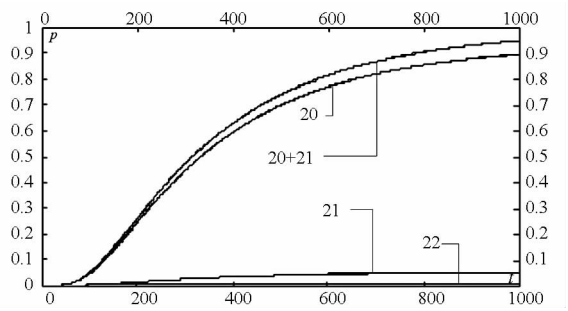


图 4　CTMC *EL* 过程可靠度与时间关系

Fig. 4　CTMC EL reliability and time relationships

由表 1 知,CTMC L_1 的计划工作时间是 307,计算得其过程可靠度约为 0. 80;CTMC L_2 的计划工作时间是 207,计算得其过程可靠度约为 0. 79;CTMC L_3 的计划工作时间是 177,计算得其过程可靠度约为 0. 86;状态 L_{123} 的期望时间是 307,计算得其过程可靠度约为 0. 67;任务总计划时间是 461,计算得其过程可靠度为 0. 69。综上所述,CTMC L_1、L_2、L_3 的过程可靠度均在 0. 79 以上,且相差不大;在计划时间内成功实施发射的可靠度约 0. 69,因此,X - 51 任务计划可行。

4　结论

本文针对航天器发射任务组织过程的特点,使用 CTMC 特性分析模型和互模拟等价关系构建了过程可靠度模型,并用实例验证表明模型可用于航天器发射任务计划评价,弥补了航天器发射任务计划评价和优化缺少过程可靠度评价方法的弊端。同时,本文所给模型还可用于航天器发射工程工期的推演,并对其他领域的任务时间计划评价具有借鉴意义。

参考文献(References)

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

[2] Xing L. Reliability analysis of phased-mission systems with combinatorial phase requirements[M]. Annual reliability and Maintainability Symposium, 2001: 344 - 51.

[3] 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 - 60.

[4] Zang X, Wang D, Sun H, et al. A BDD-based algorithm for analysis of multistate systems with multistate components[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(12): 1608 - 18.

[5] Alam M, Song M, Hester S L, et al. reliability analysis of phased-mission systems: a practical approach[C]. proceeding of the Annual Reliability & Maintainability Symposium, F, 2006.

[6] Murphy K E, Carter C M, Malerich A W. reliability analysis of phased-mission system: a correct approach; Reliability and Maintainability, 2007 RAMS'07[C].

[7] Mura I, Bondavalli. Hierarchical modeling and evaluation of phased-mission systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(4): 360 - 8.

[8] Mo Y C, Siewiorek D, Yang X Z. Mission reliability analysis of fault-tolerant multiple-phased systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(7): 1036 - 46.

[9] Ou Y, Meshkat L, Dugan J B. Multi-phase reliability analysis for dynamic and static phases [C]. proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, F, 2002.

[10] Wang D, Trivedi K S. Reliability analysis of phased-mission system with independent component repairs [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2007, 56(3): 540 - 50.

[11] 吴尽召, 王永祥, 谭广平. 交互式马尔科夫链[M]. 北京:科学出版社, 2007.
WU Jinzhao, WANG Yongxiang, TAN Guangping. Interactive markov chains [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[12] Ross S M. Introduction to probability models [M] ninth edition. Academic Press, 2006.

[13] Baier C, Katoen J P, Hermanns H, et al. Simulation for continuous-time markov chains[M]. Uni. Bonn: Technical Report, 2002.