

基于 OBDD 的可修航天测控系统任务 可靠性分析

孟 礼, 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: 基于顺序二元决策图(OBDD)理论, 针对航天测控系统(TT&C 系统)特点定义了新的 OBDD 数据结构, 提出了一种考虑设备可修的 TT&C 系统任务可靠性分析方法. 通过将各测控站的时间窗口划分为不同阶段, 分析各阶段内设备逻辑关系并构建阶段 OBDD 模型, 然后将所有阶段 OBDD 模型合并为最终的任务 OBDD 模型. 采用连续时间 Markov 链(CTMC)分析可修设备的状态转移行为, 基于新的 OBDD 数据结构给出了任务可靠性计算算法. 与 Markov 方法和仿真方法的对比分析结果表明: 所提出的方法能够精确计算设备可修的 TT&C 系统任务可靠性, 设备数量多于 30 个时算法效率高于 Markov 方法.

关 键 词: 航天测控系统; 可修设备; 任务可靠性分析; 顺序二元决策图; 数据结构

中图分类号: V57

文献标志码: A

Mission reliability analysis of repairable space TT&C system based on OBDD

MENG Li, WU Xiao-yue

(College of Information System and Management,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the ordered binary decision diagram (OBDD) theory, a new OBDD data structure in view of the characteristics of space telemetry, tracking and command system (TT&C system) was defined, and an approach to mission reliability analysis of repairable TT&C system was proposed. By dividing time windows of each station into phases, component logic relationship of each phase was analyzed, and the OBDD model of each phase was established. Then the final mission OBDD model was established by combining all single phase OBDD models together. Continuous time Markov chain (CTMC) was adopted to analyze the transition behaviors of each repairable component, and the mission reliability calculating algorithm was presented based on the new OBDD data structure. The result of a contrastive analysis with Markov method and simulation method reveals that: the proposed method can be used to analyze the mission reliability of repairable TT&C system accurately; the algorithm efficiency is higher than Markov method when there are more than 30 components.

Key words: space telemetry tracking and command system; repairable component; mission reliability analysis; ordered binary decision diagram; data structure

航天测控系统(TT&C 系统)是航天工程的重要组成部分, 通过建立地面与航天器之间的通信链路, 完成对航天器的跟踪、遥测、遥控和数据

传输等任务^[1]. TT&C 系统的任务可靠性定义为系统在所有测控阶段完成既定测控通信功能的能力^[2]. 在同一时刻, 通常由多个分布在不同地域的

测控站对同一航天器进行跟踪和监视,因此,航天测控任务是由多个连续的、互相搭接但不重叠的时间窗口构成的.所以,TT&C系统是一个典型的多阶段任务系统(phased-mission system,PMS)^[3].

目前,国内外学者围绕多阶段任务系统可靠性分析开展了很多研究工作^[3-7],顺序二元决策图(OBDD)是高效进行大规模布尔操作的有力工具^[8-9],很多研究成果采用连续时间 Markov 链(CTMC)、仿真等方法描述设备的维修行为.Zang 等^[4]提出了一种基于 OBDD 的多阶段任务系统可靠性分析算法,但是没有考虑设备可修的情况.Alam 等^[5]基于 Markov 链提出了一种分析多阶段任务系统可靠性的算法,但是该方法会消耗大量的计算时间和存储空间.

针对 TT&C 系统的任务可靠性建模与分析,杨晓松等^[10]基于确定与随机 Petri 网(DSPN)提出了 TT&C 系统任务可靠性分析的 Petri 网仿真模型,但是为提高任务可靠性计算精度,会造成仿真次数和运算时间的指数级增长.闫华等^[11]基于 CTMC 模型,针对航天测控任务中的正常任务弧段和空闲任务弧段提出了任务可靠性建模方法,该方法可以清晰描述可修设备的状态转移行为,但是在处理大规模测控任务时会遭遇状态空间爆炸问题.

ITE(if-then-else)算子^[9]可以统一表示布尔函数和布尔操作,很多基于 ITE 算子的二元决策图(BDD)程序包提出了高效的数据结构,可以进行基本的布尔逻辑操作,例如 Colorado University decision diagram (CUDD)^[12].但是,这些 BDD 数据结构缺乏描述设备维修行为和变量排序的机制,因而无法直接用于设备可修 TT&C 系统任务可靠性分析工程实践.文献[3-4,13]提出的可靠性分析算法都没有采用专门的数据结构.

进行设备可修的 TT&C 系统任务可靠性建模与分析,需要重点解决如下问题:

1) 针对 TT&C 系统特点,设计任务可靠性建模与分析的高效数据结构,解决设备的变量排序问题和维修行为描述问题.

2) 分析时间窗口逻辑关系,将各测控站的设备逻辑关系结构函数整合为最终的任务可靠性 OBDD 模型.

3) 描述设备维修行为,设计可修的 TT&C 系统任务可靠性分析算法.

本文提出了一种设备可修的 TT&C 系统任务可靠性分析方法.首先,基于 OBDD 和 ITE 算

子,定义了名为 BDD_TTC 的数据结构,该数据结构具有以下 3 个特点:①高效进行 OBDD 布尔逻辑操作;②规范、统一描述 OBDD 模型,在算法中将 OBDD 模型视为普通参数进行存储和传递;③封装 TT&C 系统设备和阶段信息,为进行 OBDD 模型变量排序、描述可修设备状态转移行为提供依据.其次,提出了航天测控任务可靠性建模与分析流程:①将各测控站的时间窗口划分为若干阶段,分析每个阶段的逻辑结构;②基于 BDD_TTC 构建阶段 OBDD 模型,并将所有阶段 OBDD 模型整合为任务 OBDD 模型;③采用 CTMC 分析可修设备的状态转移行为,基于 BDD_TTC 提出任务可靠性计算算法.最后,采用逐步增加测控设备数量的方式构建随机航天测控任务算例,对比分析了本文方法、Markov 方法和仿真方法的运行效率.

1 TT&C 系统任务可靠性分析的 OBDD 数据结构

关于 OBDD 模型,本文采用如下定义^[9]:

1) 标识为 1 和 0 的没有输出边的节点分别称为 1 节点(1-node)和 0 节点(0-node),统称为吸收节点(sink nodes).

2) 每个非吸收节点由变量 v 标识,并且具有两条标识为 1 和 0 的输出边,称为 1 边(1-edge)和 0 边(0-edge),本文分别使用实线和虚线表示.

3) 节点 v 的由 1 边决定的后继节点标记为 $\text{high}(v)$,0 边决定的后继节点标记为 $\text{low}(v)$.

假设有 3 个布尔函数 x, y, z ,则 ITE 算子表达如下运算:如果 x 成立,则 y 成立;否则, z 成立.ITE 算子的定义为

$$f_{\text{ite}}(x, y, z) = xy + \bar{x}z \quad (1)$$

从式(1)可以看出,ITE 算子表示了以 x 为 BDD 模型根节点变量时的香农分解(Shannon's decomposition)^[9]过程,因此 ITE 算子在形式上十分适于描述 BDD 模型.基于 ITE 算子的 BDD 数据结构得到了广泛的应用,如图 1(a)所示.该数据结构将每个 BDD 节点看作基本元素,储存该节点代表的变量信息;连接节点的边用指针表示.该数据结构能够高效表示基本的布尔逻辑操作,但是缺乏 TT&C 系统任务可靠性分析必需的设备变量排序机制和可修设备状态转移描述机制,因此无法直接用于测控任务可靠性分析.

本文定义了用于航天测控任务可靠性建模与分析的 OBDD 数据结构 BDD_TTC,如图 1(b)所

示,具体定义如下:

```
structure BDD_TTC
{
    BDD_TTC root;
    BDD_TTC high;
    BDD_TTC low;
    int component;
    int phase;
    double value;
}
```

BDD_TTC 中共包括 6 个元素.

1) 3 个 BDD_TTC 元素:root, high, low. 任何 OBDD 模型都可以分解为 3 个部分:根节点和根节点的两个后继子 OBDD 模型,分别用 root, high, low 表示.

2) Component 和 phase. 分别记录根节点所代表设备的排序信息和阶段信息.

3) Value. 记录 OBDD 模型构建和任务可靠性计算过程中的中间数据.

BDD_TTC 的嵌套定义方式,可以达到 3 个目的:①反映在任意节点处的香农分解过程,这是高效进行基本布尔逻辑操作的基础;②规范、统一

描述 OBDD 模型,从图 1(b)可以看出,每个基于 BDD_TTC 描述的 OBDD 模型都由 3 个子 BDD_TTC 组成,分别描述根节点和根节点的两个后继;③在计算机程序中,OBDD 模型及其任意分支都可以作为单独的参数存储、修改和传递. Component 和 phase 共同反映了设备在不同阶段的排序结果,具有两个作用:①构建 TT&C 系统可靠性模型时,基于这两个元素进行 OBDD 模型根节点变量比较,进而采取合理的变量排序策略;②在任务可靠性分析算法中,基于这两个元素描述可修设备的状态转移行为.

2 TT&C 系统任务可靠性 OBDD 模型

2.1 任务时间窗口分析

航天测控任务由配置于不同测控站的多套设备共同完成,测控站的地域差别造成多个时间窗口的重叠.为了明确设备逻辑关系,必须首先对各测控站的时间窗口进行预处理.

假设某航天测控任务 M 由测控站 A, B 和 C 共同执行,任务持续时间为 $[t_0, t_4]$,各测控站的时间窗口分别为 $[t_0, t_3], [t_1, t_4], [t_2, t_4]$,如图 2(a)所示.时间窗口分析的主要方式为弧段切割,原则是在每个时间窗口的起始和结束时刻对整个测控任务进行切割.通过弧段切割将任务 M 划分为 4 个阶段,如图 2(b)所示.对于 TT&C 系统,

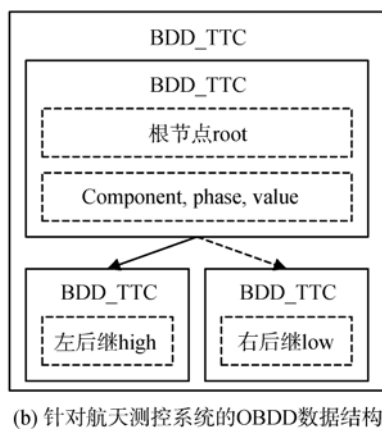
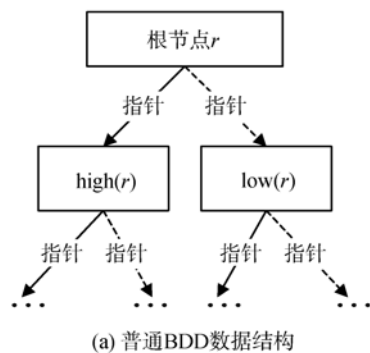


图 1 BDD 数据结构

Fig. 1 BDD data structure

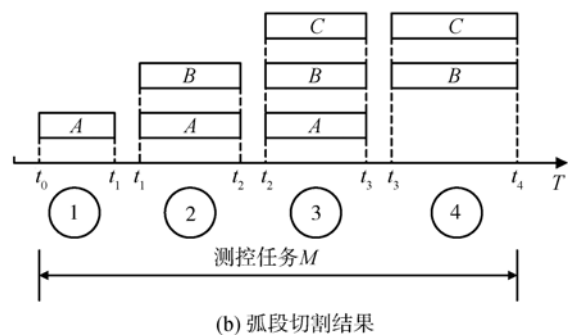
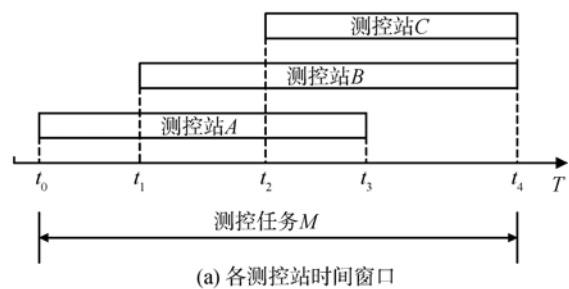


图 2 时间窗口分析

Fig. 2 Analysis of time windows

阶段失效为测控站失效的逻辑“与”的关系,任务失效为阶段失效的逻辑“或”的关系。

假设测控任务 M 中各测控站的设备逻辑关系可靠性框图如表 1 所示。令 $s_p (1 \leq p \leq 4)$ 为集合 $C (C = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k\})$ 中各测控设备在第 p 阶段的状态,则测控任务 M 在第 p 阶段的可靠性逻辑关系式 ϕ_p 为

$$\begin{cases} \phi_1 = a_1 b_1 c_1 (d_1 e_1 + f_1 g_1) \\ \phi_2 = a_2 b_2 c_2 (d_2 e_2 + f_2 g_2 + h_2 i_2) \\ \phi_3 = a_3 b_3 c_3 (d_3 e_3 + f_3 g_3 + h_3 i_3 + j_3 k_3) \\ \phi_4 = a_4 b_4 c_4 (h_4 i_4 + j_4 k_4) \end{cases} \quad (2)$$

表 1 测控站设备逻辑关系

Table 1 Component logic relationship of each station

测控站	设备可靠性框图
A	
B	
C	

2.2 任务可靠性 OBDD 模型

在变量顺序不变的条件下,每个布尔函数都可以由唯一的 OBDD 模型描述^[9]。采取科学的变量排序策略能够有效控制 OBDD 模型规模,提高布尔操作效率。可修设备的状态转移行为具备严格的时序关系,因此 OBDD 模型的变量排序策略必须以时序关系为基础。文献[3]中总结的多阶段任务系统 OBDD 变量排序策略未考虑部件维修,不能直接用于设备可修的 TT&C 系统可靠性建模。根据时间窗口分析结果,提出如下基于任务阶段的变量排序规则。

规则 1 同一阶段内的设备变量划分为一组,组内部的设备变量顺序可以是任意的。因此,测控任务 M 在阶段 1 的设备变量排序可以为

$$\pi_1: a_1 > b_1 > c_1 > d_1 > e_1 > f_1 > g_1$$

其中 $a_1 > b_1$ 表示设备变量 a_1 排在 b_1 之前。

基于数据结构 BDD_TTC,将设备变量的排序规则 1 解释为:对于两个 OBDD 模型,如果 phase 的排序结果相同,OBDD 模型根节点所代表的设备变量可以任意排序。基于 BDD_TTC 和排序规则 1,提出了将各阶段设备逻辑关系结构函数转化为 OBDD 模型的算法,如图 3 所示。

图 3 中算法的输入 X 是 TT&C 系统某阶段

的设备逻辑关系结构函数。以测控任务 M 的第 1 阶段为例:设备逻辑关系结构函数 $X = a_1 b_1 c_1 (d_1 e_1 + f_1 g_1)$,根据排序结果 π_1 ,排在第 1 位的变量是 a_1 。变量 a_1 所在的逻辑层次 L 中共包含 4 个元素: $\{a_1\}$, $\{b_1\}$, $\{c_1\}$ 和 $\{d_1 e_1 + f_1 g_1\}$,且逻辑层次 L 的逻辑关系 R 为“与”,则变量 a_1 两个后继的结构函数分别为

$$\begin{cases} \text{high_}X = b_1 c_1 (d_1 e_1 + f_1 g_1) \\ \text{low_}X = 0 \end{cases}$$

采用递归方式调用图 3 算法的,分别计算 $\text{high_}X$ 和 $\text{low_}X$ 的 OBDD 模型,直到将 X 分解为 1 和 0 为止。测控任务 M 各阶段的 OBDD 模型如图 4 (a)所示。

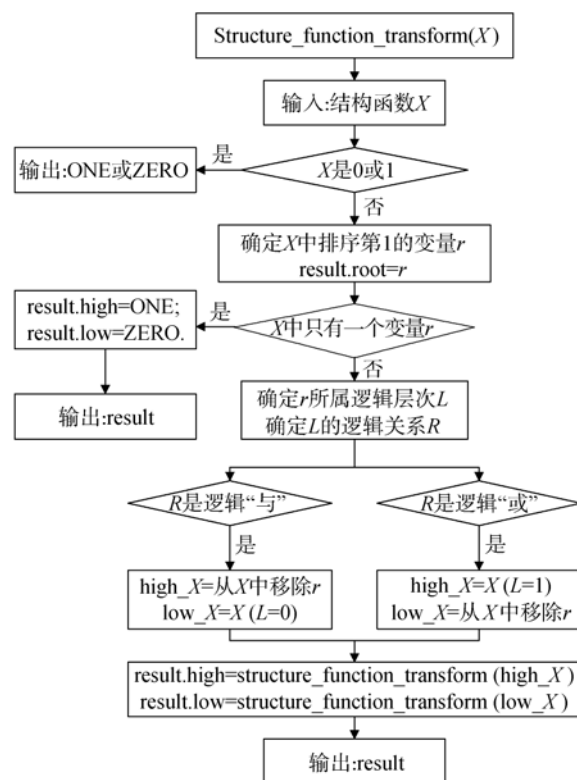


图 3 单阶段 OBDD 模型构建算法

Fig. 3 Algorithm of establishing single phase OBDD

规则 2 按照阶段先后对设备变量排序:从属于前面阶段的设备排序在前,从属于后面阶段的设备排序在后。例如,设备 a 的排序结果为

$$\pi_a: a_1 > a_2 > a_3$$

基于数据结构 BDD_TTC,将排序规则 2 解释为:对于两个 OBDD 模型,如果 phase 的排序结果不同,则无论 component 的排序结果如何,都按照 phase 的排序结果对 OBDD 模型根节点所代表的设备变量排序。

根据此排序策略,提出如下将阶段 OBDD 模型整合为任务 OBDD 模型的方法:①将所有阶段 OBDD 模型的 0 节点合并为一个 0 节点;②按照

阶段顺序,将第 p 阶段 OBDD 模型的 1 节点合并到第 $(p+1)$ 阶段 OBDD 模型的根节点. 测控任务 M 的 OBDD 模型构建过程如图 4(b)所示.

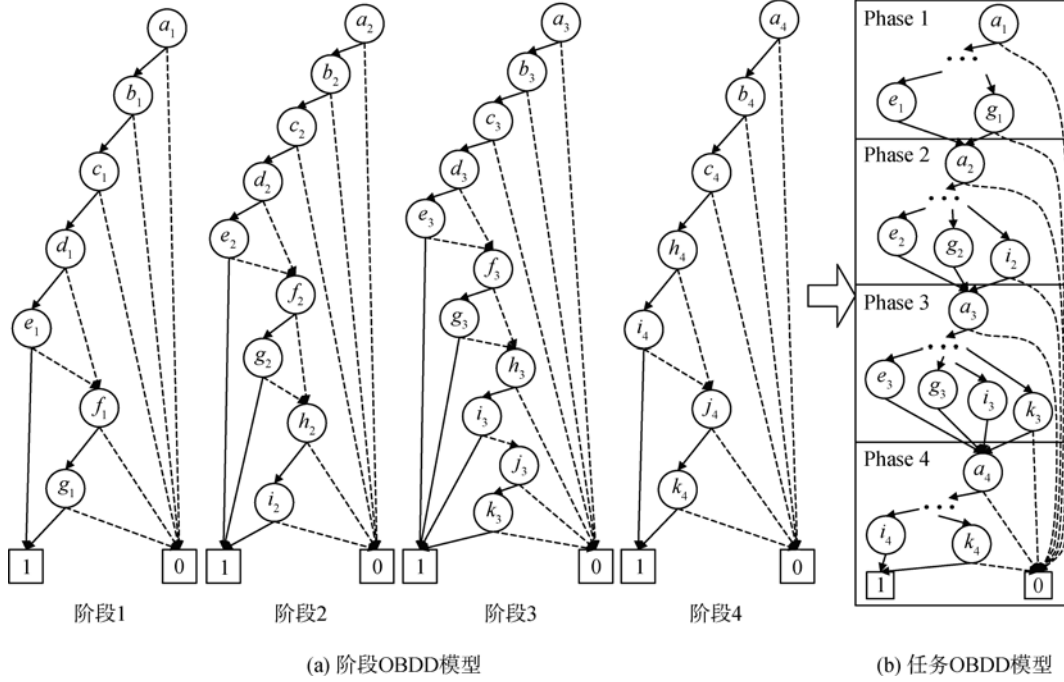


图 4 阶段 OBDD 模型与任务 OBDD 模型构建

Fig. 4 Generation of phase OBDD model and mission OBDD model

2.3 任务可靠性计算

采用 CTMC 方法分析可修设备的状态转移行为,假设:①某航天测控任务共划分为 m 个阶段,由 n 个设备共同完成,字母 $c(1 \leq c \leq n)$ 表示任意测控设备;② λ_c 和 μ_c 分别为设备 c 的故障率和修复率, $s_p^c(1 \leq p \leq m)$ 表示设备 c 在阶段 p 的状态;③每个测控设备具有状态空间 $\{0, 1, -1\}$,其中 0 为失效状态,1 为工作状态,-1 表示该状态对任务无影响;④每个设备的初始状态均为正常的工作状态,即设备 c 在起始时刻的概率向量为 $\mathbf{V}_0^c = [1, 0]$.

根据 Markov 随机过程理论^[14-15],计算得出设备 c 的状态转移方程系数矩阵

$$\mathbf{Q}_c = \begin{bmatrix} -\lambda_c & \lambda_c \\ \mu_c & -\mu_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} -\lambda_c & \lambda_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{Q}_c$ 和 $\mathbf{P}_c$ 分别为设备 c 在有、无维修条件下的系数矩阵. 进而得出设备 c 的状态转移系数矩阵

$$\mathbf{X}_p^c = \begin{cases} \mathbf{U}_p^c = \mathbf{e}^{p \cdot T_p} \mathbf{I}, & \text{if } s_p^c = 1 \\ \mathbf{D}_p^c = \mathbf{E}_p^c - \mathbf{U}_p^c, & \text{if } s_p^c = 0 \\ \mathbf{E}_p^c = \mathbf{e}^{Q_c T_p}, & \text{if } s_p^c = x \end{cases} \quad (4)$$

式中 T_p 为阶段 p 的持续时间; $\mathbf{U}_p^c$, $\mathbf{D}_p^c$ 和 $\mathbf{E}_p^c$ 分别为设备 c 在第 p 阶段处于正常工作状态、失效状态和对任务无影响状态时的状态转移系数矩阵. 假设设备 c 在阶段 p 起始时刻的状态概率向量为 $\mathbf{V}_{p-1}^c$, 则 c 的联合概率向量为

$$\mathbf{V}^c = \mathbf{V}_0^c \prod_{p=1}^m \mathbf{X}_p^c \quad (5)$$

在任务 OBDD 模型中,从根节点到吸收节点的每条路径都描述了所有设备的状态转移过程^[6]. 例如,假设测控任务 OBDD 模型中某条路径为 $\{s_1^a=1, \dots, s_3^a=0, \dots, s_4^a=1, \dots\}$, 则设备 a 的状态转移过程为 $\{1, -1, 0, 1\}$, 联合概率向量为

$$\mathbf{V}^a = \mathbf{V}_0^a \mathbf{U}_1^a \mathbf{E}_2^a \mathbf{D}_3^a \mathbf{U}_4^a$$

在所有路径中,到达 1 节点的路径描述了成功完成任务的设备状态转移过程,到达 0 节点的路径描述了导致任务失败的设备状态转移过程,因此,任务可靠性为所有到达 1 节点的路径概率之和. 到达 1 节点的路径 Z 的概率为该路径上所有设备联合概率的乘积

$$V\{Z=1\} = \prod_{c=1}^n (\mathbf{V}^c \cdot \mathbf{1}^T) \quad (6)$$

基于 BDD_TTC 数据结构和 CTMC 理论,提出了设备可修 TT&C 系统任务可靠性分析算法,如图 5 所示.算法的核心是遍历 OBDD 模型中所有从根节点到达 1 节点的路径并计算路径概率,具体方法为:分别遍历 OBDD 模型 Y 的根节点 r 和 r 的两个后继 $r.high$ 和 $r.low$,其中节点 r 代表设备 c .如果 $r.high$ 是 1 节点,则说明找到一条到达 1 节点的路径,根据式(5),按照设备 c 处于正常工作状态更新设备 c 的联合概率向量 V^c ,并计算该路径的概率;若 $r.high$ 不是 1 节点,则通过递归调用此算法的方式计算 $r.high$ 的概率.如果 $r.low$ 不是 0 节点,则根据式(5),按照设备 c 处于失效状态更新设备 c 的联合概率,并计算 $r.low$ 的概率.

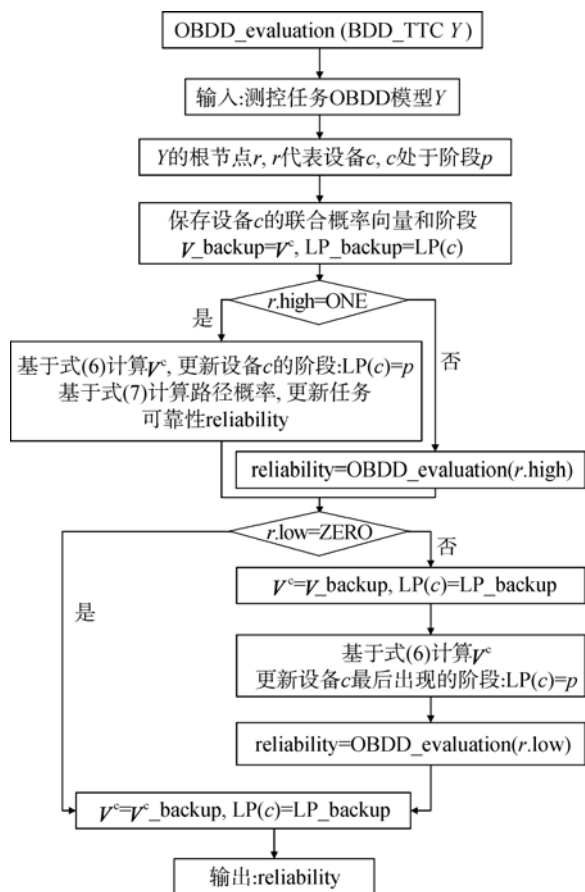


图5 任务可靠性分析算法

Fig. 5 Mission reliability analysis algorithm

图5中算法基于数据结构 BDD_TTC,通过遍历测控任务 OBDD 模型中到达 1 节点的路径,找出满足任务成功条件的设备状态转移过程,取代了单独采用 CTMC 算法时对设备所有状态的遍历,有效缩小了设备状态空间,可以提高算法运行效率.

3 算例分析

3.1 测控任务 M 的可靠性计算

假设测控任务 M 中测控站 A, B, C 的时间窗口分别为 $[0, 450], [250, 595], [390, 595]$, 设备 $a, b, \dots, k$ 的可靠性参数如表 2 所示.

表2 设备可靠性参数

Table 2 Reliability parameters of components

设备	λ	μ
a	0.0010	0.020
b	0.0011	0.025
c	0.0009	0.020
d	0.0030	0.010
e	0.0020	0.015
f	0.0040	0.015
g	0.0020	0.010
h	0.0030	0.010
i	0.0030	0.010
j	0.0030	0.015
k	0.0030	0.015

根据图 5 的算法,在考虑设备维修的情况下,测控任务 M 的可靠性为 0.796 474;在不考虑设备维修的情况下测控任务 M 的可靠性为 0.723 282.

在测控任务 M 的 OBDD 模型中,到达 1 节点的路径共有 693 条,例如某条路径 Z^* 上的设备状态转移过程和联合概率向量如表 3 所示.路径 Z^* 的概率为 $2.296\,859 \times 10^{-7}$.

3.2 算法运行效率分析

TT&C 系统具有测控站点数量多、时间窗口时序复杂等特点,是一类大规模的多阶段任务系统^[16],因此在工程实践中必须考虑任务可靠性分析算法的运行效率问题.本小节通过逐步增加测控设备数量、构建随机航天测控任务的方法,对比分析本文方法、Markov 方法和仿真方法的时间消耗.

航天测控任务随机生成规则:①分别按照设备数量为 20, 25, 30, 35, 40 和 45 的等级,随机生成设备任务弧段,构成航天测控任务;②由于航天测控任务生成的随机性,在每个设备数量等级下生成 3 个不同的测控任务.采用不同分析方法计算随机测控任务可靠性的时间消耗如表 4 所示(其中仿真次数为 10^6 次),随设备数量增加各方法时间消耗均值曲线如图 6 所示.

表 3 路径 Z^* 上设备 c 联合概率向量
Table 3 Joint probability vector of component c in path Z^*

设备	状态转移过程	联合概率向量 V^c	设备	状态转移过程	联合概率向量 V^c
a	$\{1,1,1,1\}$	$[0.942\,236,0]$	f	$\{1,-1,1,-1\}$	$[0.863\,092,0]$
b	$\{1,1,1,1\}$	$[0.936\,646,0]$	g	$\{1,-1,0,-1\}$	$[0.009\,130,0.016\,226]$
c	$\{1,1,1,1\}$	$[0.947\,859,0]$	h	$\{-1,-1,1,-1\}$	$[0.954\,070,0]$
d	$\{1,1,1,-1\}$	$[0.873\,716,0]$	i	$\{-1,-1,1,0\}$	$[0.019\,065,0.021\,548]$
e	$\{0,1,0,-1\}$	$[1.416\,24\times10^{-4},$ $2.748\,59\times10^{-5}]$	j	$\{-1,-1,-1,1\}$	$[0.938\,679,0]$
			k	$\{-1,-1,-1,1\}$	$[0.947\,953,0]$

表 4 算法时间消耗对比分析
Table 4 Time consuming contrastive analysis of each algorithm

设备 数量/台	消耗时间/s								
	本文方法			Markov 方法			仿真方法		
	任务 1	任务 2	任务 3	任务 1	任务 2	任务 3	任务 1	任务 2	任务 3
20	1.314	1.062	1.671	1.119	0.896 1	1.279	126.1	124.5	127.4
25	3.110	2.945	3.276	2.822	2.801	2.839	188.6	188.2	189.9
30	23.87	29.65	31.44	25.42	28.74	33.08	250.5	250.9	249.7
35	150.6	143.7	144.9	160.4	159.1	156.2	293.4	295.7	295.2
40	351.7	348.6	342.9	499.0	486.5	488.3	325.9	326.2	327.5
45	737.9	805.6	767.2	967.8	1000.3	1052.9	381.1	389.4	380.7

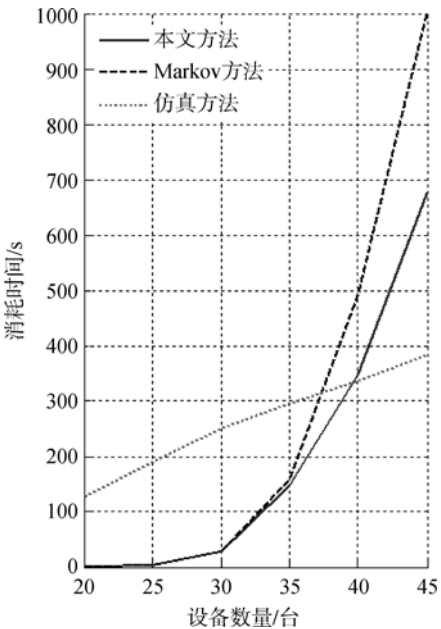


图 6 算法时间消耗均值曲线

Fig. 6 Time consuming average curves of each algorithm

从表 4 和图 6 中可以得出如下结论:①随设备数量增加,本文算法与 Markov 方法的时间消

耗呈指数形式增长,仿真方法的时间消耗呈线性增长,但是为提高结果精度往往造成仿真次数的指数形式增长^[17-18];②设备数量小于 30 个时,Markov 方法的效率比本文方法高,原因是 Markov 方法无需构建 OBDD 模型,减少了总的可靠性计算时间;设备数量大于 30 个时,本文方法可明显缩小设备状态空间,效率高于 Markov 方法;③对于设备数量相同的不同航天测控任务,本文算法的时间消耗差别较大,说明算法效率还会受到除设备数量以外的因素影响。

4 结 论

本文基于 OBDD 提出了设备可修 TT&C 系统任务可靠性建模与分析方法.首先定义了新的 OBDD 数据结构 BDD_TTC,通过递归的定义方式规范、统一描述 OBDD 模型;封装了 TT&C 系统的设备和阶段信息,便于描述设备的状态转移行为和进行 OBDD 变量排序;基于 BDD_TTC 给出了可修航天测控任务的可靠性建模与分析算法.航天测控任务可靠性建模与分析过程共分为 4 个步骤:①测控系统时间窗口分析,将测控任务

划分为若干阶段,并进行阶段内设备逻辑关系分析;②采取合适的设备变量排序策略构建阶段 OBDD 模型;③将阶段 OBDD 模型整合为任务 OBDD 模型;④基于 CTMC 分析可修设备的状态转移行为,并计算测控任务可靠性。最后,通过算例验证了算法的可用性,对比分析了不同任务可靠性分析算法的效率,得出在测控任务规模较大时,采用本文算法比 Markov 方法效率高的结论。

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] Demircioglu E, Nefes M M. Reliability-based TT&C subsystem design methodology for complex spacecraft missions[C]//Proceedings of 42nd Annual Conference on Information Science and Systems. Princeton, NJ: IEEE, 2008:1268-1272.
- [3] Mo Y C. New insights into the BDD-based reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2009, 58(4):667-678.
- [4] Zang X Y, Sun H R, Trivedi K S. A BDD-based algorithm for reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1999, 48(1):50-60.
- [5] Alam M, Al-Saggaf U M. Quantitative reliability evaluation of repairable phased-mission systems using Markov approach[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1986, 35(5):498-503.
- [6] Wang D Z, Trivedi K S. Reliability analysis of phased-mission system with independent component repairs[J]. IEEE Transaction on Reliability, 2007, 56(3):540-551.
- [7] Pedar A, Sarma V V S. Phased-mission analysis for evaluating the effectiveness of aerospace computing systems[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1981, 30(5):429-437.
- [8] Bryant R. Graph based algorithms for Boolean function manipulation[J]. IEEE Transaction on Computers, 1986, 25(8):677-691.
- [9] Meinel C, Theobald T. Algorithms and data structures in VLSI design; BDD foundations and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [10] 杨晓松, 武小悦. 基于 DSPN 的航天测控系统任务可靠性仿真建模[J]. 航空动力学报, 2014, 29(1):233-240.
YANG Xiaosong, WU Xiaoyue. Mission reliability simulation modeling of space TT&C system based on DSPN[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1):233-240. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Somenzi F. CUDD: CU decision diagram package release [EB/OL]. [2015-9-20]. <http://vlsi.colorado.edu/~fabio/>.
- [13] 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, Application. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011:682-686.
- [14] Trivedi K S. Probability and statistics with reliability, queuing and computer science applications [M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [15] Sheldon M R. Introduction to probability models[M]. Singapore: Elsevier, 2007.
- [16] 张新贵, 武小悦. 基于自适应粒子群算法的航天测控系统任务可靠性分配[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9):2147-2154.
ZHANG Xingui, WU Xiaoyue. Mission reliability allocation of spaceflight TT&C system based on adaptive particle swarm optimization[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9):2147-2154. (in Chinese)
- [17] 王维平. 离散事件系统建模与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [18] 李祥明, 李永刚, 郭力兵, 等. 基于航天测控的实时仿真系统设计[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(2):9-14.
LI Xiangming, LI Yonggang, GUO Libing, et al. Design of a real-time aerospace TT&C simulation system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(2):9-14. (in Chinese)

(编辑:陈越)