

文章编号:1000-8055(2012)12-2769-09

基于任务弧段的测控通信任务可靠性建模方法

闫 华, 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: 基于对任务的弧段划分,建立了测控通信任务的可靠性模型. 根据任务执行时序图,参与任务的测控通信资源及任务成败标准,将测控通信任务划分为不同的任务弧段,定义了正常任务弧段和空闲任务弧段. 基于 Markov 过程,提出了正常任务弧段和空闲任务弧段的可靠性建模方法. 提出了在考虑测控通信资源的开机准备时间和停机时间的情况下的可靠性建模方法. 对测控通信任务重新划分任务弧段,各任务弧段依据相应方法单独建立模型,依次求解各模型可得整个任务的可靠性. 最后以具体的测控通信任务为例,计算并分析了不考虑资源开机准备时间和停机时间、仅考虑资源开机准备时间、仅考虑资源停机时间以及考虑资源开机准备时间和停机时间的任务可靠性,验证了模型的正确性.

关 键 词: 测控通信系统; 任务弧段; 可靠性模型; Markov 过程; 任务可靠性

中图分类号: V57

文献标志码: A

Reliability model of TT&C and communication task based on task arc

YAN Hua, WU Xiao-yue

(College of Information Systems and Management,
National University of Defense Technology, Changsha 4100731, China)

Abstract: Reliability model of tracking, telemetry and command (TT&C) and communication task was constructed based on task arc division. According to time sequence of TT&C and communication resources, and the resources taking part in task and task success criterion, the TT&C and communication task can be divided into several successive task arcs. General task arc and idle task arc were defined, and their reliability modeling methods were proposed by using Markov approach. Moreover, the modeling methods considering the preparation time after resource opening and the resource close time were proposed. In these cases, task arcs were re-divided, and each of them was modeled according to the corresponding methods discussed. The task reliability can be obtained by solving these task arc models one by one. Finally, examples with numerical results under several cases show efficiency of the modeling methods.

Key words: tracking, telemetry and command (TT&C) and communication system;
task arc; reliability model; Markov process; task reliability

航天测控系统是任何空间活动中不可缺少的一个重要组成部分,负责对直接承载空间活动的飞行状态的运载器及航天器进行跟踪、测量、监

视、控制^[1]. 当系统中还包括有天地话音、电视和用户数据传输等通信功能时,又称为航天测控通信系统^[2]. 航天测控通信系统是天地通信的唯一

收稿日期:2011-12-01; 修订日期:2012-02-20

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2769_020.html

基金项目:国家自然科学基金(71071159)

作者简介:闫华(1983—),甘肃甘南人,男,博士生,主要研究方向为系统可靠性建模与分析.

途径^[3],任何航天任务的执行都必须借助测控通信系统进行任务规划,实施空间操作,使地面人员随时掌握飞行情况,因此,航天测控通信系统的可靠性直接关系到航天器的发射、在轨运行等任务能否顺利完成。

航天测控通信系统的可靠性分析是以测控通信总体设计方案为基础,通过对总体方案中各测控通信任务的可靠性分析,发现系统的薄弱环节、改进设计、合理地分配各组成部分(测控站、测控设备等,下文统一称为测控资源)的可靠性指标。测控通信系统的总体设计通过测控通信任务分析确定任务执行时间,分配执行任务的测控资源。测控通信任务分析是指根据测控技术要求,对测控通信任务及其时序性和所需测控条件(主要是测控弧段,即通常所说的“测控覆盖”)进行分析,具体安排各测控通信任务,使所选测控资源符合测控实时性和时间充裕性要求^[2]。因此,测控通信任务具有很强的计划性,任务被安排在资源与飞行器的可见时间窗口中,其开始时间和结束时间都是固定的。以某一测控通信任务为例,根据所分配的测控资源及其测控弧段,得到该任务的资源执行时序图如图 1 所示。其中 $r_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示测控资源, r_1, r_2 为测控中心, r_3 和 r_4 为测控站(船)。

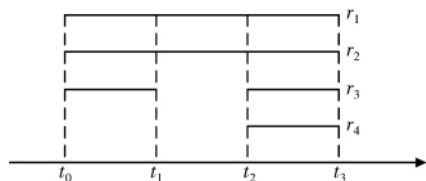


图 1 测控通信任务的资源执行时序图

Fig. 1 Time sequence of resources in TT&C and communication tasks

目前关于航天测控通信系统可靠性的研究,国外 Wolman W^[4]利用基于集合论的可靠性分析框架建立了航天任务可靠性模型,并对水星探测任务可靠性进行了分析;Pedar A 等^[5]利用故障树方法分析了航天计算机系统的任务可靠性;Mura I 等^[6]建立了基于齐次 Markov 链的层次化模型,并根据此模型对 Rosetta 航天任务的可靠性进行了分析。国内采用的主要方法有基于经典的单元/系统可靠性评价理论^[7]、可靠性框图^[8]以及故障树方法^[9]等。测控通信任务具有任务类型多、任务阶段多以及飞行阶段多等特点,本质上可

以认为是一个多阶段任务系统(phased mission system, PMS),很多文献^[10-16]都对 PMS 进行了研究,其可靠性建模与分析方法大致可分为静态方法与动态方法。静态方法主要有可靠性框图法^[11,17]和故障树法^[18-19],其优点是简洁直观,缺点是无法正确描述动态系统中各单元之间和阶段间的相关性;动态方法主要是基于 Markov 过程的分析方法,包括各阶段单独建模^[12,14,20]和建立统一模型^[17,21],其优点是能够处理动态可修系统,同时能够正确描述阶段内部件之间以及部件跨阶段的依赖性,并且理论上能够求得精确的解析解。

本文建立了航天测控通信任务的可靠性模型,根据参与任务的测控通信资源及任务成败标准,将测控通信任务划分为多个任务弧段,每个任务弧段单独建模并依次求解。建模时考虑了任务中的空闲弧段,以及设备的开机准备时间和停机时间,使所建模型更加符合工程实际。

1 基于任务弧段的测控通信任务可靠性建模

定义 1 任务弧段:一个测控通信任务的执行通常有多个测控通信资源参与,由于资源的地理位置不同,不同资源与飞行器的可见时间不同,导致不同资源的任务起止时间也不同。因此,测控通信任务在不同的时间参与执行的资源数目及任务成败标准均会发生变化。为进行可靠性分析,将测控通信任务划分为多个阶段,单个阶段内参与任务的测控资源、资源间逻辑结构及任务成败标准都是相同的,将每一个阶段称为一个任务弧段。

以 T_1 表示图 1 中的测控通信任务, $A_i(t_s, t_e)$ 表示第 i 个任务弧段,其中 t_s 和 t_e 分别表示任务弧段的开始时间和结束时间。则根据其任务执行时序图,可以将 T_1 划分为 3 个任务弧段,分别为 $A_1(t_0, t_1)$, $A_2(t_1, t_2)$ 和 $A_3(t_2, t_3)$ 。不同弧段参与任务的测控资源不同,资源间的逻辑结构不同,且任务成败标准也不同。

建立可靠性模型时,根据测控通信任务的弧段划分,每个弧段单独建立 Markov 模型。模型假设如下:

- 1) 测控资源只有正常与失效 2 种状态,且假设资源的失效与维修时间服从指数分布。
- 2) 对测控资源的维修是完全修复。
- 3) 若资源在停机之后重新开机,则假设资源开机后为全新状态。

4) 2 个连续阶段间的转移是瞬时的,即可以忽略其转移时间。

5) 在任一弧段中任务执行失败,都会导致整个任务失败。

1.1 正常任务弧段的可靠性模型

测控通信任务的任务弧段包括 2 种类型:正常和空闲任务弧段。正常任务弧段定义如下:

定义 2 正常任务弧段:若在测控通信任务的某一任务弧段内,各测控资源不但处于运行状态,且执行指定的测控任务,则该任务弧段称为正常任务弧段。在正常任务弧段内,各测控资源根据任务需求,组成一定的逻辑结构,该逻辑结构决定了任务的成败。

以 T_1 为例,其任务弧段 A_1 和 A_3 为正常任务弧段,测控资源间的逻辑结构如图 2。

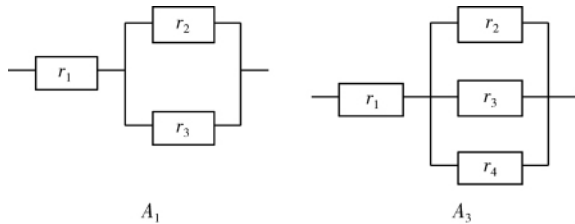


图 2 A_1 和 A_3 中测控资源间的逻辑结构

Fig. 2 Logic structure between TT&C resources in A_1 and A_3

以 S_i 表示 Markov 模型中的状态,若以 0 和 1 表示测控资源的失效与正常状态,则系统状态可由一个二进制字符串表示,由测控资源间的逻辑结构可以得到状态对应的任务成功或失败。由

连续时间 Markov 链的概念可知,若系统状态 S_i 对应的转移率为 0,则称该状态为吸收态。在进行测控通信任务可靠性建模中,将导致任务失败的状态作为吸收态,可以理解为任务一旦失败,则系统不会向其他任何状态进行转移。表 1 列出了弧段 A_1 中的系统状态。

表 1 弧段 A_1 中的系统状态

Table 1 System states in A_1

系统状态	各资源对应状态			任务成败	是否为吸收态
	r_1	r_2	r_3		
$S_1(000)$	0	0	0	失败	是
$S_2(001)$	0	0	1	失败	是
$S_3(010)$	0	1	0	失败	是
$S_4(011)$	0	1	1	失败	是
$S_5(100)$	1	0	0	失败	是
$S_6(101)$	1	0	1	成功	否
$S_7(110)$	1	1	0	成功	否
$S_8(111)$	1	1	1	成功	否

测控资源的失效与维修时间均服从指数分布,假设测控通信任务 T_1 中资源 r_i 的故障率及修复率分别为 λ_i 和 μ_i ,则可以对任务弧段 A_1 建立相应的连续时间 Markov 链模型,记 Q 为转移速率矩阵(transition rate matrix, TRM),或称为无穷小生成子,根据表 1 可得 Q 如下:其中 S_1, S_2, S_3, S_4 和 S_5 为吸收态,若令 q_{ij} 表示矩阵 Q 中第 i 行、第 j 列的元素,根据转移速率矩阵的定义^[22],有 $q_{ii} = -\sum_j q_{ij} (j \neq i)$ 。

$$Q(A_1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_3 & -\sum q_{6j} & 0 & \mu_2 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & -\sum q_{7j} & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & -\sum q_{8j} \end{bmatrix}$$

令任务弧段 A_1 结束时刻 t_1 系统处于状态 S_i 的概率为 $P_{S_i}(t_1)$,则可得 t_1 时刻任务可靠性为

$$R(t_1) = P_{S_6}(t_1) + P_{S_7}(t_1) + P_{S_8}(t_1) \quad (1)$$

任务弧段 A_1 的建模过程与上述 A_1 的可靠

性建模过程相似。

1.2 空闲任务弧段的可靠性模型

测控通信任务中的空闲任务弧段定义如下。

定义 3 空闲任务弧段:是一种特殊的任务

弧段,如果任务弧段中的测控资源处于运行状态,但并不执行具体任务,则称该弧段为空闲任务弧段.一种典型的情况是任务弧段中只有测控中心及其设备,其他测控站点对飞行器在该弧段内都处于不可见状态,则无法执行测控通信任务,但中心设备处于运行状态.

以 T_1 为例,在任务弧段 A_2 中,只有测控中心设备 r_1 和 r_2 处于运行状态,没有测控站(船)的支持,测控中心无法单独完成测控通信任务,因此 A_2 为空闲任务弧段.空闲任务弧段与正常任务弧段的区别在于是否在该弧段内执行测控通信任务,其可靠性模型的区别在于模型中是否包含吸收态.

测控资源 r_3 在 A_2 中未执行测控通信任务,但由于在 A_1 和 A_3 中均参与任务执行,在不考虑设备停机的情况下, r_3 在 A_2 中处于开机运行状态.因此,空闲任务弧段 A_2 的 Markov 模型中包含 3 个测控资源 r_1, r_2 和 r_3 ,模型中的系统状态如表 2 所示.

表 2 弧段 A_2 中的系统状态Table 2 System states in A_2

系统状态	各资源对应状态			任务成败	是否为吸收态
	r_1	r_2	r_3		
$S_1(000)$	0	0	0	不影响	否
$S_2(001)$	0	0	1	不影响	否
$S_3(010)$	0	1	0	不影响	否
$S_4(011)$	0	1	1	不影响	否
$S_5(100)$	1	0	0	不影响	否
$S_6(101)$	1	0	1	不影响	否
$S_7(110)$	1	1	0	不影响	否
$S_8(111)$	1	1	1	不影响	否

根据表 2 可得空闲任务弧段 A_2 中 Markov 模型的转移速率矩阵 Q 如下,系统状态中没有吸收态.

$$Q(A_2) = \begin{bmatrix} -\sum q_{1j} & \mu_3 & \mu_2 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_3 & -\sum q_{2j} & 0 & \mu_2 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -\sum q_{3j} & \mu_3 & 0 & 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & -\sum q_{4j} & 0 & 0 & 0 & \mu_1 \\ \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & -\sum q_{5j} & \mu_2 & \mu_3 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_3 & -\sum q_{6j} & 0 & \mu_2 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & -\sum q_{7j} & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & -\sum q_{8j} \end{bmatrix}$$

空闲任务弧段中不执行任务,也不存在任务的成败.因此,若令在任务弧段 A_2 结束时刻 t_2 时系统处于状态 S_i 的概率为 $P_{S_i}(t_2)$,则可得弧段未任务的可靠性为

$$R(t_2) = \sum_i P_{S_i}(t_2) \quad (2)$$

1.3 考虑资源开机准备时间的任务可靠性模型

在实际使用过程中,测控通信资源通常存在一段开机准备时间 ΔP .若考虑资源的开机准备时间,首先可在测控通信任务的执行时序图中,增加各资源的开机准备时间,然后根据新的任务执行时序图,重新划分任务弧段,并对各任务弧段建立 Markov 模型.以任务 T_1 为例,增加各资源的开机准备时间后,可得到新的任务执行时序图如

图 3 所示.

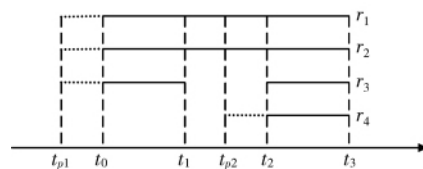


图 3 考虑资源开机准备时间的任务资源执行时序图

Fig. 3 Time sequence of resources as the preparing time after resource opening is considered

其中,假设资源 r_1, r_2, r_3 和 r_4 的开机准备时间均为 ΔP ,则图 3 中 $t_{p1} = t_0 - \Delta P, t_{p2} = t_2 - \Delta P$,且有 $t_1 < t_{p2}$,同时不考虑资源停机的情况.图 3 中用点划线表示的时间段即为各资源的开机准备

时间,则在重新划分任务弧段后,可分别记为 $A_1(t_{p1}, t_0)$, $A_2(t_0, t_1)$, $A_3(t_1, t_{p2})$, $A_4(t_{p2}, t_2)$ 和 $A_5(t_2, t_3)$. 其中 $A_1(t_{p1}, t_0)$, $A_3(t_1, t_{p2})$ 和 $A_4(t_{p2}, t_2)$ 为空闲任务弧段, $A_2(t_0, t_1)$ 和 $A_5(t_2, t_3)$ 为正常任务弧段,对空闲任务弧段和正常任务弧段分别建立其 Markov 模型,综合上述各任务弧段的模型,可得考虑资源开机准备时间情况下整个任务的可靠性模型.

1.4 考虑资源停机时间的任务可靠性模型

在资源的实际运行过程中,当测控通信资源的空闲时间 ΔI 大于某一阈值 H 时,资源将会关机,并在下次执行任务时重新开机. H 称为测控通信资源的停机时间,根据假设一旦资源停机并在下次执行任务时重新开机,则该资源处于全新状态.在测控通信任务可靠性建模过程中考虑资源的停机时间,需要对各任务弧段中的每一个测控资源 r_i 进行判断,是否在前一任务弧段中处于空闲状态,如果处于空闲状态,计算其空闲时间 ΔI_{r_i} 是否大于资源停机时间 H_{r_i} ,若 $\Delta I_{r_i} > H_{r_i}$,则资源 r_i 在当前处理的任务弧段中重新开机,即在任务弧段的初始时刻处于全新状态.考虑资源停机时间下的建模流程如图 4.

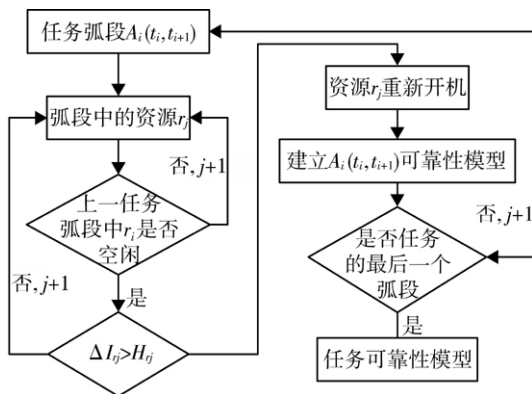


图 4 考虑资源停机时间下的建模流程

Fig. 4 Flow chart of modeling process as the resource close time is considered

以上文中任务 T_1 为例,资源 r_3 在时间区间 (t_1, t_2) 中处于空闲状态,其空闲时间 $\Delta I_{r_3} = t_2 - t_1$. 假设 $t_2 - t_1 > H_{r_3}$, 即 $\Delta I_{r_3} > H_{r_3}$, 则可知 r_3 在任务弧段 $A_5(t_2, t_3)$ 的开始时刻重新开机,同时考虑资源 r_3 的开机准备时间,在图 3 的任务执行时序图中增加 r_3 在时刻 t_2 的开机准备时间,并再次进行弧段重新划分,可得考虑资源停机时间的任务资源执行时序图,如图 5 所示.

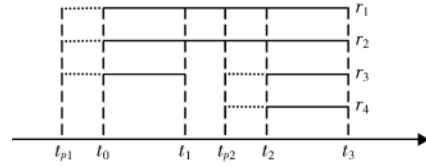


图 5 考虑资源停机时间的任务资源执行时序图

Fig. 5 Time sequence of resources as the resource close time is considered

重新进行弧段划分后,可得各任务弧段分别为 $A_1(t_{p1}, t_0)$, $A_2(t_0, t_1)$, $A_3(t_1, t_{p2})$, $A_4(t_{p2}, t_2)$ 和 $A_5(t_2, t_3)$, 分别建立其 Markov 模型,则综合上述各任务弧段的模型,可得考虑资源停机时间下整个任务的可靠性模型.

2 模型求解方法

建立测控通信任务的可靠性模型后,其求解方法为以前一任务弧段结束时刻的状态概率向量作为当前任务弧段开始时刻的状态概率向量,由此可求得当前任务弧段结束时刻的状态概率向量,因为整个任务初始时刻的状态概率向量已知,则可根据上述方法依次求解各任务弧段 Markov 模型,最后一个任务弧段得到的可靠性即为整个任务的可靠性.

若令 $v(t)$ 表示 t 时刻系统处于各状态的概率向量, $P(t)$ 为转移概率矩阵, Q 为转移速率矩阵(或称无穷小生成子),则根据连续时间 Markov 链的概念可得

$$v(t) = v(0)P(t) \quad (3)$$

由 Kolmogorov 前向方程可得

$$P'(t) = P(t)Q \quad (4)$$

对式(3)两边同时求导后代入式(4)可得

$$v'(t) = v(0)P(t)Q = v(t)Q \quad (5)$$

对于形如式(5)的微分方程,可得其解为

$$v(t) = v(0)e^{tQ} \quad (6)$$

令 $A = Q^T$, $\omega(t) = v(t)^T$, $\pi = v(0)^T$, 则可将式(6)写为

$$\omega(t) = e^{tA}\pi \quad (7)$$

当矩阵 A 规模较大时,式(7)中矩阵指数运算 e^{tA} 的计算十分困难.一种近似计算方法是利用 Krylov 子空间 $K_m(A, \pi) = \text{Span}\{\pi, A\pi, \dots, A^{m-1}\pi\}$, 将向量 $\omega = e^{tA}\pi$ 投影至 m 维子空间 $K_m(A, \pi)$ 中,并利用 Arnoldi 过程构造子空间 $K_m(A, \pi)$ 的一组标准正交基 B_m , 同时根据 Arnoldi 过程会生成 1 个上 Hessenberg 矩阵 H_m . 则可得到 $\omega(t)$ 的近似计算公式^[23]

$$\omega(t) \approx \beta B_m e^{H_m t} e_1 \quad (8)$$

其中 $\beta = \|\pi\|_2$, e_i 为单位矩阵 I 的第 i 个列向量, 其长度为 m . 公式(8)中矩阵 H_m 的规模远小于公式(7)中矩阵 A 的规模, 因此, 上述计算方法通过将初始矩阵投影至 Krylov 子空间中, 将 $\omega(t)$ 近似为小规模矩阵的指数运算, 提高了 Markov 模型中状态概率向量的求解效率.

3 算例分析

以实际测控通信任务为例, 建立任务可靠性模型计算: ①不考虑资源开机准备时间和停机时间的任务可靠性; ②仅考虑资源开机准备时间的任务可靠性; ③仅考虑资源停机时间的任务可靠性; ④同时考虑资源开机准备时间和停机时间的任务可靠性. 并对上述计算结果进行分析.

记算例中的测控通信任务为 T_2 , 在不考虑资源开机准备时间和停机时间的情况下可划分为 3 个任务弧段 $A_1(0, 20)$, $A_2(20, 50)$ 和 $A_3(50, 70)$, 其持续时间分别为 20, 30 min 和 20 min. 假设所有测控资源的 MTTR(平均修复时间)和 MTBF(平均故障间隔时间)均为 30 min 和 300 min, 资源的开机准备时间 $\Delta P = 10$ min, 停机时间 $H = 25$ min. T_2 的任务执行时序如图 6 所示.

其中 r_1 和 r_2 为测控中心资源, 则由图 6 可以看出, 任务弧段 A_2 并不执行测控任务, 因此为空闲任务弧段. 其余 2 个任务弧段 A_1 和 A_3 的系统故障树分别如图 7 和图 8 所示.

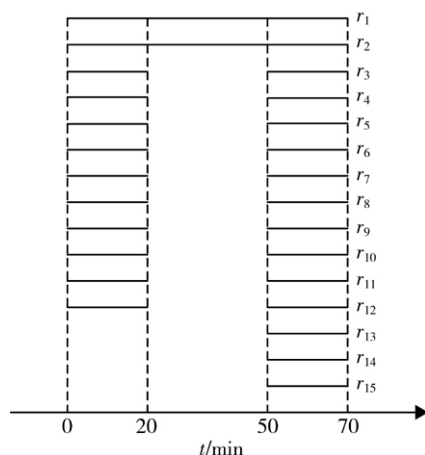


图 6 T_2 任务执行时序图

Fig. 6 Time sequence of resources of T_2

利用公式(8)求解 Markov 模型的状态概率向量, 取 Krylov 子空间的规模 $m = 50$, 可得到不同情况下的可靠性计算结果如表 3~表 6 所示.

为便于分析, 记 Case 1 为不考虑资源开机准备时间和停机时间, Case 2 为仅考虑资源停机时间, Case 3 为仅考虑资源开机准备时间, Case 4 为同时考虑资源开机准备时间和停机时间. 由上述计算结果可以看出:

1) 在 Case 1 中, 任务 T_2 被划分为 3 个任务弧段 $A_1(0, 20)$, $A_2(20, 50)$ 和 $A_3(50, 70)$, 各任务弧段结束时刻的任务可靠性依次为 0.875 157 749, 0.875 157 749 和 0.675 584 513. 由于 $A_2(20, 50)$ 为空闲任务弧段, 因此不会影响任务可靠性, 该任务弧段末的可靠性与上一任务弧段末的任务可靠

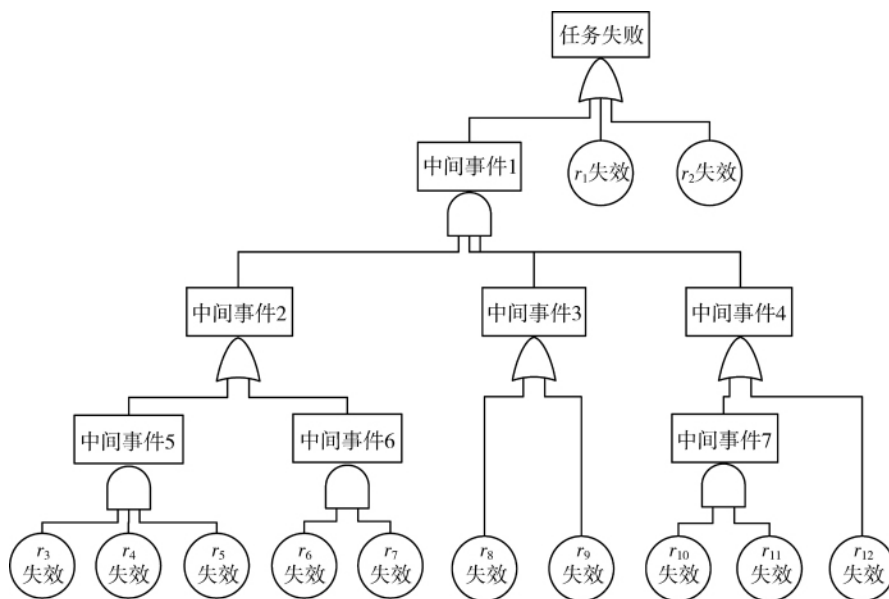


图 7 任务弧段 A_1 的系统故障树

Fig. 7 System fault tree of A_1

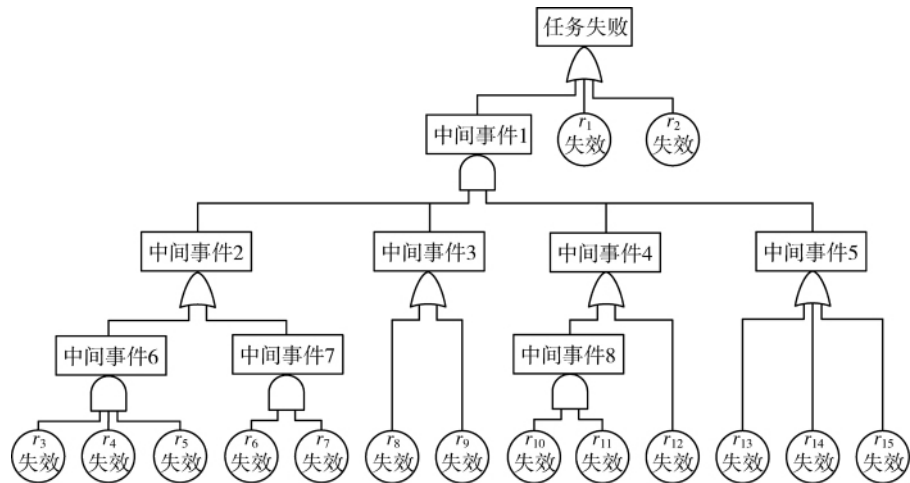


图 8 任务弧段 A_3 的系统故障树

Fig. 8 System fault tree of A_3

表 3 不考虑资源开机准备时间和停机时间的任务可靠性

Table 3 Task reliability as the preparing time after resource opening and the resource close time is not considered

任务弧段	可靠性结果
$A_1(0,20)$	0.875157749
$A_2(20,50)$	0.875157749
$A_3(50,70)$	0.675584513
T_2 任务可靠性	0.675584513

表 4 仅考虑资源停机时间的任务可靠性

Table 4 Task reliability as the resource close time is considered

任务弧段	可靠性结果
$A_1(0,20)$	0.875157749
$A_2(20,50)$	0.875157749
$A_3(50,70)$	0.675817343
T_2 任务可靠性	0.675817343

表 5 仅考虑资源开机准备时间的任务可靠性

Table 5 Task reliability as the preparing time after resource opening is considered

任务弧段	可靠性结果
$A_1(-10,0)$	1.000000000
$A_2(0,20)$	0.826959397
$A_3(20,40)$	0.826959397
$A_4(40,50)$	0.826959397
$A_5(50,70)$	0.638343194
T_2 任务可靠性	0.638343194

表 6 考虑资源开机准备时间和停机时间的任务可靠性

Table 6 Task reliability as the preparing time after resource opening and the resource close time is considered

任务弧段	可靠性结果
$A_1(-10,0)$	1.000000000
$A_2(0,20)$	0.826959397
$A_3(20,40)$	0.826959397
$A_4(40,50)$	0.826959397
$A_5(50,70)$	0.638569190
T_2 任务可靠性	0.638569190

性相比,没有发生变化,但由于在 $A_2(20,50)$ 中资源 r_1 和 r_2 一直处于运行状态,因此在 $A_2(20,50)$ 的结束时刻($t=50\text{ min}$),系统处于各状态的概率会发生变化.

2) 在 Case 2 中,任务 T_2 的任务弧段仍旧为 $A_1(0,20)$, $A_2(20,50)$ 和 $A_3(50,70)$,但与不考虑资源开机准备时间和停机时间相比,不同的是由于资源 $r_3 \sim r_{12}$ 满足停机条件,在任务弧段 $A_3(50,70)$ 的初始时刻($t=50\text{ min}$)将会重新开机,则根据假设,上述 10 个资源 $r_3 \sim r_{12}$ 在时刻 $t=50\text{ min}$ 处于全新的状态.因此,整个任务可靠性为 0.675817343,高于 Case 1 下的任务可靠性.

3) 在 Case 3 中,任务 T_2 被划分为 5 个任务弧段 $A_1(-10,0)$, $A_2(0,20)$, $A_3(20,40)$, $A_4(40,50)$ 和 $A_5(50,70)$,其中 $A_1(-10,0)$ 和 $A_4(40,50)$ 为增加各资源的开机准备时间,并重新进行弧段划分后增加的 2 个任务弧段. $A_1(-10,0)$ 包括了资

源 $r_1 \sim r_{12}$ 的开机准备时间, 由于这段时间不执行测控通信任务, 因此 $A_1(-10, 0)$ 是空闲任务弧段; 而 $A_4(40, 50)$ 是不考虑开机准备时间情况下任务弧段 $A_2(20, 50)$ 的一部分, 与之不同的是增加了资源 r_{13}, r_{14} 和 r_{15} 的开机准备时间. 由上述分析可知, 5 个任务弧段中, $A_1(-10, 0)$, $A_3(20, 40)$ 和 $A_4(40, 50)$ 均为空闲任务弧段. 因此, $A_1(-10, 0)$ 的任务可靠性为 1, 由于这段时间任务尚未开始执行; 而 $A_3(20, 40)$ 和 $A_4(40, 50)$ 的任务可靠性与 $A_2(0, 20)$ 相同, 是由于在 $t=20\text{min}$ 至 $t=50\text{min}$ 这段时间内任务暂停执行, 表 5 中的数据与上述结论相符. 另外, Case 3 下的任务可靠性为 0.631951933, 低于 Case 1 下的 0.675584513, 这是由于考虑开机准备时间后, 各资源的运行时间增大, 结果明显会偏低.

4) 在 Case 4 中, 任务 T_2 被划分为 5 个任务弧段 $A_1(-10, 0)$, $A_2(0, 20)$, $A_3(20, 40)$, $A_4(40, 50)$ 和 $A_5(50, 70)$, 与 Case 3 不同的是, 由于资源 $r_3 \sim r_{12}$ 在时段 $t=20\text{min}$ 至 $t=50\text{min}$ 内满足停机条件, 同时又考虑了资源开机准备时间, 因此, 这 10 个资源在时刻 $t=40\text{min}$ 将会重新开机, 并处于全新状态. 综上, Case 3 和 Case 4 都考虑了资源的开机准备时间, 但因为 Case 4 又考虑了资源的停机时间, 在满足停机的条件下, 资源重新开机后将会处于全新状态, 因此, Case 4 的任务可靠性结果明显会高于 Case 3, 这一点由表 5 和表 6 可以看出. 比较 Case 4 和 Case 1, 虽然 Case 4 考虑了资源停机时间, 但在考虑开机准备时间后会增加资源的运行时间, 因此, 对于同一任务, Case 1 和 Case 4 下任务可靠性的降低取决于任务具体配置和资源开机准备时间的长度. 最后, 与 Case 3 相同, 由于 5 个任务弧段中 $A_1(-10, 0)$, $A_3(20, 40)$ 和 $A_4(40, 50)$ 均为空闲任务弧段, 因此, $A_1(-10, 0)$ 的任务可靠性为 1, 而 $A_3(20, 40)$ 和 $A_4(40, 50)$ 的任务可靠性与 $A_2(0, 20)$ 相同, 表 6 中的数据也证明了这一点.

综上所述, 可得以下结论:

1) 对于同一任务, Case 2 的任务可靠性最高, Case 3 最低, Case 1 和 Case 4 下任务可靠性的降低取决于任务配置和资源开机准备时间的长度. T_2 在不同情况下的任务可靠性如图 9 所示.

2) 空闲任务弧段不会影响整个任务的可靠性. 以 Case 4 下各任务弧段末的可靠性为例, 得到图 10, 其中 $A_1(-10, 0)$, $A_3(20, 40)$ 和 $A_4(40, 50)$ 为空闲任务弧段.

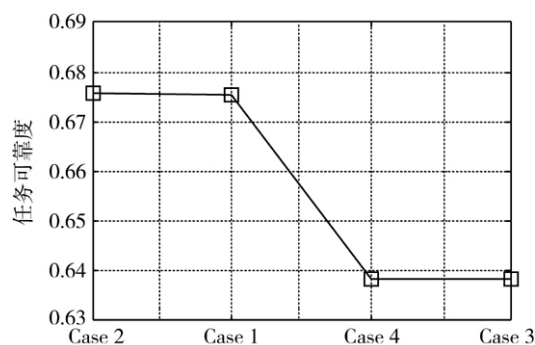


图 9 不同情况下 T_2 的任务可靠性

Fig. 9 Task reliability of T_2 in different cases

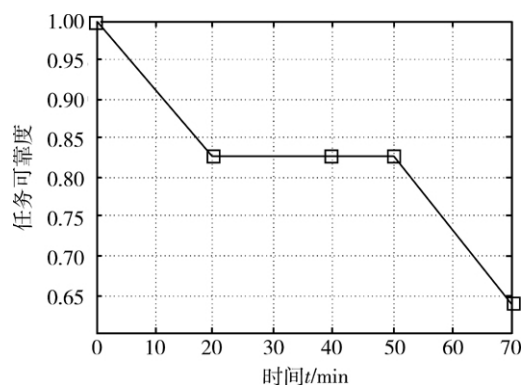


图 10 Case 4 下各任务弧段末 T_2 的任务可靠性

Fig. 10 Task reliability of T_2 at the end of each task arc in Case 4

3) 考虑资源的开机准备时间后, 增加了资源的运行时间, 因此会降低整个任务可靠性. 以 Case 1 和 Case 3 为例, 取 $t=0, t=20, t=50$ 和 $t=70$ 四个时刻的任务可靠性, 如图 11 所示.

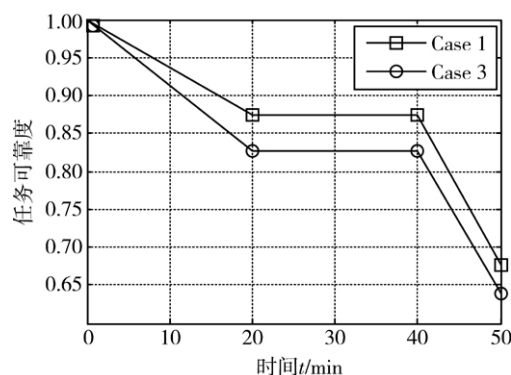


图 11 Case 1 和 Case 3 下 T_2 的任务可靠性比较

Fig. 11 Task reliability of T_2 in Case 1 compared with in Case 3

4) 考虑资源的停机时间后, 若资源满足停机条件, 停机后重新开机将会处于全新状态, 因此会

提高任务可靠性.但在 T_2 中,比较 Case 1 和 Case 2,整个任务的可靠性提高很小.这是因为对于任务 T_2 , r_1 和 r_2 是任务必需的资源,对可靠性影响较大,但在整个任务过程中一直处于运行状态.而其它的资源虽然满足停机条件,但对整个任务可靠性的贡献较小.同理,比较 Case 3 和 Case 4, Case 4 下的任务可靠性提高也很小.

4 结 论

本文研究了航天测控通信系统的任务可靠性建模方法,根据参与的测控通信资源及任务成败标准,将航天测控通信任务划分为多个任务弧段,每个任务弧段采用基于 Markov 过程的建模方法单独建立可靠性模型,并依次进行求解.提出了正常任务弧段和空闲任务弧段的可靠性建模方法,以及在考虑资源开机准备时间和考虑资源停机时间情况下的任务可靠性建模方法.最后利用本文提出的建模方法对具体的测控通信任务可靠性进行分析,得到了不同情况下的任务可靠性并对结果进行了对比分析,证明了本文方法的有效性.

参考文献:

- [1] 于志坚.我国航天测控系统的现状与发展[J].中国工程科学,2006,8(10):42-46.
YU Zhijian. Status quo and development of spaceflight TT&C systems[J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 42-46. (in Chinese)
- [2] 夏南银.航天测控系统[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 于志坚.载人航天测控通信系统[J].宇航学报,2004,25(3):247-250.
YU Zhijian. TT&C and communication system of Chinese manned space flight[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(3): 247-250. (in Chinese)
- [4] Wolman W. A model for the reliability estimation of space systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1963, 12(1): 32-39.
- [5] Pedar A, Sarma V V S. Phased-mission analysis for evaluating the effectiveness of aerospace computing-systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1981, 30(5): 429-437.
- [6] Mura I, Bondavalli A. Hierarchical modeling & evaluation of phased-mission systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(8): 360-368.
- [7] 于志坚.航天测控系统工程[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [8] 马顺南,张士峰,刘秋辉,等.靶场测控通信系统可靠性分析[J].飞行器测控学报,2005,24(1):11-16.
MA Shunnan, ZHANG Shifeng, LIU Qiuhui, et al. Reliability analysis for TT&C system of missile test range[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2005, 24(1): 11-16. (in Chinese)
- [9] 高薇,张强.故障树分析方法在航天测控系统中的应用[C]//中国系统工程学会决策科学专业委员会第六届学术年会论文集.北京:中国系统工程学会,2005:158-162.
- [10] Burdick G R, Fussell J B, Rasmuson D M, et al. Phased mission analysis: a review of new developments and an application[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1977, 26(1): 43-49.
- [11] Esary J D, Ziehms H. Reliability analysis of phased missions[C]//Proceedings of the Conference on Reliability and Fault Tree Analysis. Philadelphia, USA: SIAM, 1975: 213-236.
- [12] 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.
- [13] Alam M, Song M, Hester S L, et al. Reliability analysis of phased-mission systems: a practical approach[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium. Newport Beach, CA, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, 2006: 551-558.
- [14] Kim K, Park K S. Phased-mission system reliability under Markov environment[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(2): 301-309.
- [15] Shrestha A, Xing L D, Dai Y S. Reliability analysis of multi-state phased-mission systems[C]//Reliability and Maintainability Symposium. Fort Worth, TX, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, 2009: 151-156.
- [16] Wang D Z, Trivedi K S. Reliability analysis of phased-mission system with independent component repairs[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2007, 56(3): 540-551.
- [17] Dugan J B. Automated analysis of phased-mission reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(1): 45-52.
- [18] Zang X Y, Sun H R, Trivedi K S. A BDD-based algorithm for reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(1): 50-60.
- [19] Xing L D, Dugan J B. Analysis of generalized phased-mission system reliability, performance, and sensitivity[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(2): 199-211.
- [20] Somani A K, Ritcey J A, Au S H L. Computationally-efficient phased-mission reliability analysis for systems with variable configurations[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(4): 504-511.
- [21] Boyd M A. Converting fault trees to Markov chains for reliability prediction[D]. NC, US: Duke University, 1986.
- [22] Ross S M. Introduction to probability models[M]. [S. l.]: Academic Press, 2006.
- [23] Saad Y. Analysis of some Krylov subspace approximations to the matrix exponential operator[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1992, 29(1): 209-228.