

一种航天测控系统可靠性量化计算方法

李 塘, 王志生, 杨 洋, 王绍山
(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 航天测控系统具有动态性、复杂性、可维修性、阶段间相关性等显著特征, 作为航天器安全在轨运行的重要保障, 其可靠性至关重要。针对航天测控系统可靠性精确计算的难点, 提出了综合马尔可夫 (Markov) 模型和全概率思想的复杂、动态系统可靠性量化计算方法, 给出了计算流程。按照系统的动态组成特性, 将任务进程划分为多个阶段, 阶段内参试状态不变, 不同阶段之间参试状态不同。借鉴 Markov 模型描述阶段内状态转移过程, 通过求解 Kolmogorov 后向方程得到本阶段结束时的状态概率, 利用全概率思想实现阶段间状态映射, 体现阶段间的依赖性, 依次对各阶段求解获取整个任务可靠性, 具有求解准确度高、结果可信度高等特点。最后给出算例, 通过与蒙特卡洛仿真结果的对比校验 Markov 方法的准确性。

关键词: 航天测控系统; 可靠性计算; Markov; 全概率; 状态映射

中图分类号: V556 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)03-0024-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210310001

引用格式: 李塘, 王志生, 杨洋, 等. 一种航天测控系统可靠性量化计算方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 24-30.

A reliability analysis method for space TT&C system

LI Tang, WANG Zhisheng, YANG Yang, WANG Shaoshan

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094)

Abstract: Featured with dynamic, system complexity, maintainability and dependency across successive mission phases, space TT&C system ensures the stable and safe operation for any aerospace project, and its reliability is very important. Regarding the characteristic of space TT&C system, a Markov-based reliability analysis method is presented. In this method, TT&C is treated as a multiple phases mission system, with states keep unchanged in the same mission period, while there possibly exist changes across the different periods. According to the time variant dynamic reconfiguration characteristics, process of internal state transfer in each task stage is described using Markov model, through the Kolmogorov backward equation, the state probability of the system at the mission completion time is calculated, and the dependency between two task stages is fully considered with state mapping by probability theory. Consequently, the whole reliability of the system is derived by solving all the mission stages altogether. The method is proved with high precision and reliable. Finally, an example is given to show the validity of the algorithm through comparing with that of Monte Carlo-based method.

Key words: TT&C; Reliability analysis; Markov; Probability; State mapping

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210310001

Citation: LI Tang, WANG Zhisheng, YANG Yang, et al. A reliability analysis method for space TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 24-30.

引 言

航天测控系统是对航天器飞行进行跟踪测量、对工作状态进行监视与控制的技术系统^[1], 是天地联系的唯一手段。在载人航天任务中, 系统还提供天地话音、图像和应用数据传输等功能, 被称为测控通信系统。因此, 在航天任务中, 测控系统的可靠运转是航天器正常运行和航天员安全的重要保障, 对系统可靠性的定量分析是实现系统最优化设计的重要依据, 尤其是在航天器和航天员长期在轨工作阶段,

可靠性量化分析结果可直接指导测控通信资源配置。

航天测控系统本质上属于多阶段任务系统 PMS^[2]。从上世纪以来,国内外学者对 PMS 提出了经典的可靠性求解算法^[3-6],但是,关于航天测控系统的可靠性研究的相关成果较少,现有研究成果主要是基于经典的可靠性计算理论进行的。

Jeff B. Berried 指出了研究测控网可靠性的必要性,以及单元可靠性对系统可靠性的影响^[7],但并未对可靠性评价方法进行论述。南加州喷气推进实验室使用可靠性框图模型和仿真方法,建立了美国国家航空航天局的 SIM (Space Interferometry Mission) 任务的可靠模型^[8]。Erdem Demircioglu 等对航天测控系统的可靠性进行了分析^[9],仿真建立了航天测控系统可靠性指标曲线,用于优化系统结构。文献[10]介绍了串、并、混联、备份等经典的系统可靠性分析技术。高薇等运用故障树分析方法对航天测控系统中的应急通信网络系统进行了基本可靠性计算^[11]。马顺南等深入研究了测控系统的可靠性计算框架^[12],按照不同的测控业务建立可靠性原理框图,通过 Bayes 模型计算整个系统的可靠性。

分析表明,上述方法均为近似描述航天测控系统,未全面反映系统的特点。因此,可靠性量化准确计算成为长期以来困扰测控系统的难题。本文提出了基于 Markov 模型的航天测控系统可靠性计算方法,借鉴 Markov 链描述航天测控系统可靠性阶段内状态转移过程;综合利用全概率思想进行阶段间状态映射,体现阶段间的依赖性;最后通过与蒙特卡洛仿真结果的比对,验证 Markov 方法的准确性。

1 航天测控系统可靠性计算难点

航天测控系统由多个任务中心、分布在国内外的地面测控站、航行在海上的测量船、接近全球覆盖的中继卫星系统以及地面通信网组成。在可靠性方面,航天测控系统的特点包括动态性、复杂性、可维修性、阶段间相关性等。

① 动态性:中继卫星系统、地面测控站分布于不同的地理位置,各测控资源为航天器提供服务的时间有所不同,因此不同时间段内系统的参试结构和组成不同,呈现动态变化。

② 复杂性:系统执行任务的环节包括任务中心、通信网、测控设备等,测控设备可提供多种的服务,不同的服务之间使用的通信方式、涉及的任务中心不完全相同,因此系统的逻辑结构并非简单的串联、并联等,呈现复杂性。

③ 可维修性:测控设备、通信设备、任务中心均设计为可修复产品,出现故障后可在一定时间内修复。

④ 阶段间相关性:执行航天任务时,存在同一设备参与多个任务阶段(或圈次)的情况,各时段间并非统计独立的关系,存在相关性和依赖性。

在可靠性计算过程中,必须要真实反映上述特点,计算的结果才具有较高的可信度。通过分析现有经典可靠性计算模型的适用性,串、并联等方法均不适用于测控系统工作场景。

2 基于 Markov 模型和全概率思想的系统可靠性计算方法

航天测控系统本质上是一个具有多个任务阶段的动态结构系统,系统由多个单元组成,在执行不同阶段的任务时,参试的单元不尽相同,各单元间的逻辑结构也有所不同,同时,各阶段间还存在着一定的相关性。

基于 Markov 模型和全概率思想的航天测控系统可靠性计算的主要思路是,按系统参试结构是否变化分别处理,参试结构固定时以 Markov 思想进行状态转移,在每一个任务阶段分别建立各自的 Markov 模型,利用状态转移矩阵表示各参试单元在正常与故障之间的变化;当系统结构变化时以全概率思想将前一阶段的最终状态映射为下阶段的初态。依次对各阶段的任务可靠性进行递推求解,即得到全过程的任务可靠性。

2.1 阶段内 Markov 模型建立与求解方法

设某一阶段有 m 个单元参加任务,每个单元有故障和正常两种状态,建立这些单元的状态向量为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$,其中, $A_i = 1, 0$ 分别表示第 i 个单元正常或故障。 m 个单元参加任务时,微观

状态空间 S 共有 $|S| = 2^m$ 个状态。记在时刻 t 系统的状态向量为 $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_{|S|}(t)]^T$ 。

设起始时刻为 0, 则根据可靠性模型, 可以利用公式 (1) 确定状态转移概率关系^[13,14]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}(t) = \mathbf{Q} \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}(t) = [P_{X_1}(t), P_{X_2}(t), \dots, P_{X_i}(t), \dots, P_{X_{|S|}}(t)]^T$, $P_{X_i}(t)$ 为 t 时刻系统处于 X_i 状态的概率; \mathbf{Q} 为连续 Markov 链 (CTMC) 的无穷小生成子:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{1,0} & \cdots & p_{|S|,0} \\ p_{0,1} & p_{1,1} & \cdots & p_{|S|,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{0,|S|} & p_{1,|S|} & \cdots & p_{|S|,|S|} \end{bmatrix}_{|S| \times |S|} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{|S| \times |S|} \quad (2)$$

其中, $p_{i,j} = P\{X = j | X = i\}$, 为状态从 X_i 向 X_j 的转移概率的变化率, 由各参试单元的故障率 λ 和修复率 μ 推导得到。上述方程组的解为:

$$\mathbf{P}(t) = \exp(\mathbf{Q}t) \mathbf{P}(0) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{P}(0)$ 为系统处于 $\mathbf{X}(0)$ 的概率向量。给定第 k 个任务阶段系统的结构函数为 $\Phi(\mathbf{A})$, 则系统的失效状态集为:

$$T_k^c = \{\mathbf{A} | \Phi(\mathbf{A}) = 0\} \quad (4)$$

设 $T_k = \{\mathbf{A}\} - T_k^c$ 为 CTMC 的瞬态集合, T_k^c 为 CTMC 的吸收状态集合, \mathbf{Q} 的表达形式可写为:

$$\mathbf{Q} = \begin{matrix} & T_k^c & T_k \\ T_k^c & \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{U} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \\ T_k & \end{matrix} \quad (5)$$

设系统在阶段初处于各正常状态的概率向量为 $[p_1, p_2 \dots p_n]$, 任务时间为 t , 则阶段末的任务可靠度为:

$$R = [p_1, p_2 \dots p_n] V(t) \mathbf{1}_n \quad (6)$$

2.2 阶段间全概率状态映射方法

航天测控系统中, 各任务阶段间密切相关, 且每个阶段参试单元数量不尽相同, 因此, 不同阶段间的系统状态一般不能直接映射, 而应将后一阶段各状态的概率初值采用前阶段各状态概率的全概率函数表示。需注意的是, 因某一阶段的吸收态不会对整个任务可靠性产生贡献, 状态映射时不对前一阶段末的吸收状态进行映射。

$$\begin{bmatrix} p_0^n(0) \\ p_1^n(0) \\ \vdots \\ p_k^n(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{0,0}^{n-1,n}(\Delta t) & p_{1,0}^{n-1,n}(\Delta t) & \cdots & p_{l,0}^{n-1,n}(\Delta t) \\ p_{0,1}^{n-1,n}(\Delta t) & p_{1,1}^{n-1,n}(\Delta t) & \cdots & p_{l,1}^{n-1,n}(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{0,k}^{n-1,n}(\Delta t) & p_{1,k}^{n-1,n}(\Delta t) & \cdots & p_{l,k}^{n-1,n}(\Delta t) \end{bmatrix}_{k \times l} \begin{bmatrix} p_0^{n-1}(t_f) \\ p_1^{n-1}(t_f) \\ \vdots \\ p_l^{n-1}(t_f) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $p_i^n(0)$ 为前期任务中系统一直保持正常状态的前提下, 在阶段 n 的初始时刻, 系统处于正常状态 X_i 的概率; $p_i^{n-1}(t_f)$ 为前期任务中系统一直保持正常状态的前提下, 在阶段 $n-1$ 的结束时刻, 系统处于正常状态 X_i 的概率; $p_{i,j}^{n-1,n}(\Delta t)$ 为系统从阶段 $n-1$ 结束时刻状态 X_i 向阶段 n 初始时刻状态 X_j 的转移概率, Δt 为时间间隔。

由于各阶段间是无缝衔接的, 所以在阶段转移期间可以认为共用单元的状态不会发生变化。因此, 两个连续任务弧段间状态映射的基本规则为: 当前弧段中状态的初始概率值为前一弧段末相同状态对应的概率值。由于不同阶段的参试单元并不相同, 给阶段间状态匹配增加了复杂度。

系统状态可以用一个二进制字符串 $M = s_1s_2 \dots$ 表示, 其中 s_i 对应某个参试单元 u_i 的状态。令 M_i^{k-1} 表示阶段 $k-1(arc_{k-1})$ 中的第 i 种状态, M_j^k 表示阶段 $k(arc_k)$ 中的第 j 种状态。下面分三种情况进行讨论。

情况一: 当前任务弧段有新的参试单元加入。

若 arc_k 中有新的参试单元加入, 由于新单元初始状态为正常, 因此包含新单元为“0”的状态 M_j^k 在 arc_k 的初始概率为 0; 对于包含新单元为“1”的状态 M_j^k , 将 M_j^k 二进制串中新单元的对应位剔除, 然后按照上述基本规则将状态 M_i^{k-1} 映射为 M_j^k , 得到 arc_k 的初始状态概率向量。举例, 设 arc_{k-1} 中的参试单元为 u_1 、 u_2 , arc_k 中的参试单元为 u_1 、 u_2 和新单元 u_3 , 则其状态映射过程如图 1 所示。

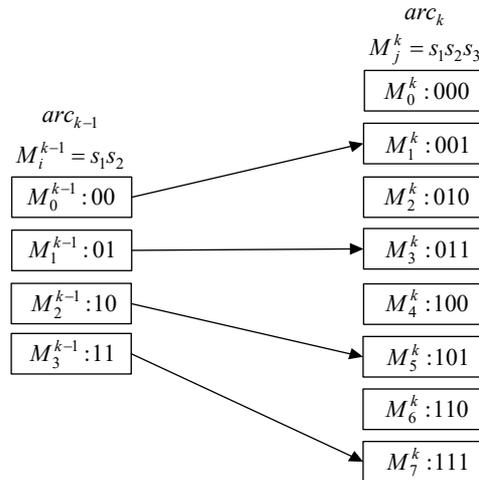


图 1 情况一阶段间状态映射过程
Fig. 1 Process of state mapping between stages for case 1

情况二: 前一任务弧段的某些参试单元在以后的任务弧段中都不再执行任务。

在这种情况下, 将 M_i^{k-1} 中不参与后续任务弧段的单元对应位剔除, 然后按照上述基本规则将状态 M_i^{k-1} 映射为 M_j^k , 得到 arc_k 的初始状态概率向量。举例, 设 arc_{k-1} 中的参试单元为 u_1 、 u_2 和 u_3 , arc_k 中的单元为 u_1 和 u_2 , u_3 在以后的任务弧段中都不再参试, 这种情况下可能存在状态的合并, 状态映射过程如图 2 所示。

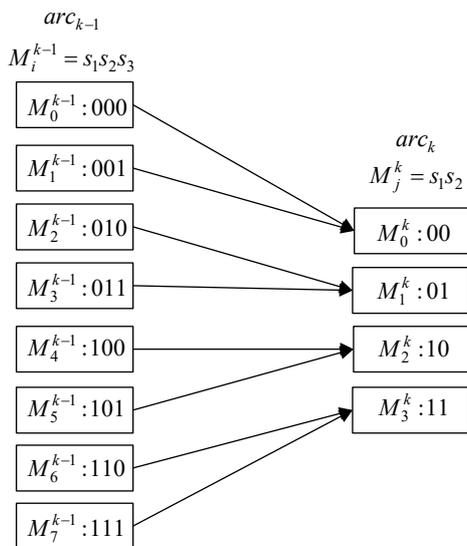


图 2 情况二阶段间状态映射过程
Fig. 2 Process of state mapping between stages for case 2

情况三: 前一阶段的单元在当前阶段不参试, 但会在后续阶段中再次使用。

这种情况下, 该单元虽不承担任务但应保持运行状态, 可认为该单元在 arc_k 中进行正常的状态转移, 但不影响任务成败。因此, arc_k 中的状态 M_j^k 是包含了对这些单元的描述。举例, 设 arc_{k-1} 中的参试单元为 u_1 、 u_2 和 u_3 , arc_k 中的单元为 u_1 , 单元 u_2 和 u_3 在 arc_k 中暂不参试, 但在以后的任务弧段中还会继续使用, 则其状态映射过程如图 3 所示。

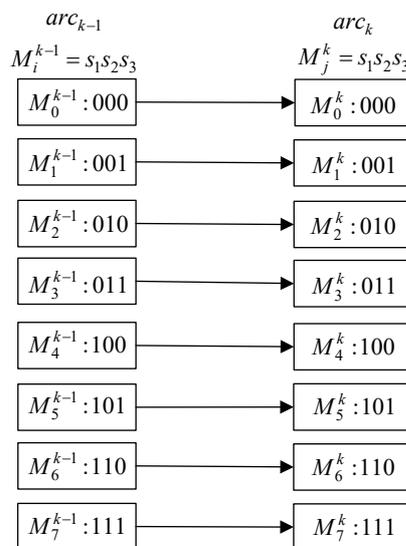


图 3 情况三阶段间状态映射过程
Fig. 3 Process of state mapping between stages for case 3

2.3 计算流程

基于 Markov 模型的系统可靠性计算流程如图 4 所示。

3 算例分析

为了验证基于 Markov 模型的可靠性计算方法的正确性和有效性，本章将使用该算法和蒙特卡洛仿真法针对同一场景进行可靠性计算，比较二者结果的一致性。蒙特卡洛仿真法的思路是，直接仿真测控系统执行任务的过程，根据各单元的可靠性指标随机仿真其发生故障和修复故障的时间，据此判定任务的成败，通过大样本次数仿真统计得到系统可靠性的近似值。这里的仿真次数设置为一千万次，可以证明此时与精确解的近似精度优于 10^{-4} 。

下面以某航天任务关键飞行段落为例进行可靠性计算。测控系统需提供轨道测量、遥控与数据注入、遥测接收等业务，上述任务由两个控制中心、两个测控站及地面通信网完成，如图 5 所示。

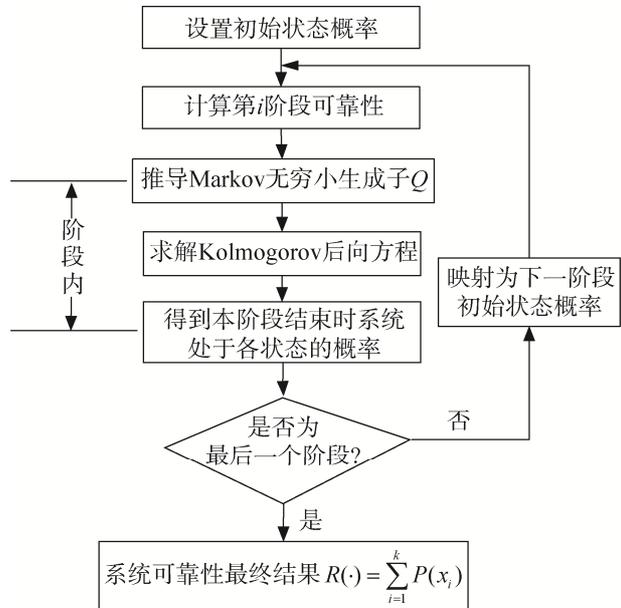


图 4 基于 Markov 模型的可靠性计算流程
Fig. 4 Flow chart of Markov-based reliability analysis

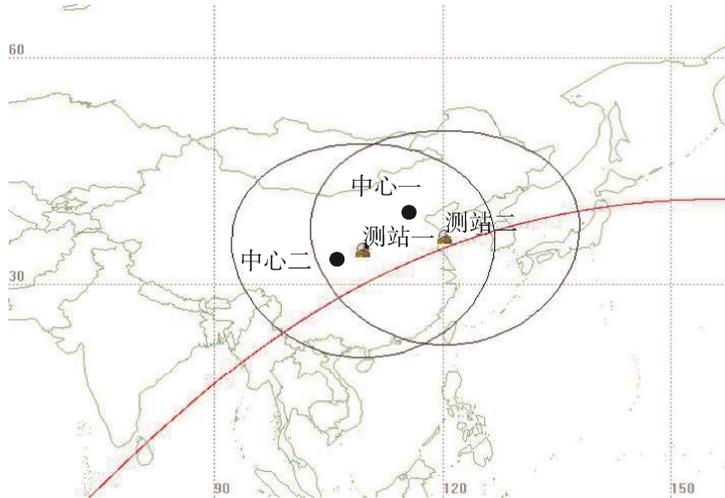


图 5 测控系统布局示意图
Fig. 5 Illustration of TT&C system layout

首先，按照本文第 2 节的方法建立任务可靠性模型。第一层次模型按照参加任务的组成单元是否发生变化切分为三个时段，每个时段相同的部分为两个任务中心和地面通信网，不同的部分为参试的测控站， t_1 时段为测站一， t_2 时段为测站一和测站二， t_3 时段为测站二，如图 6 所示。

以 t_1 时间段为例，给出轨道测量、遥测接收、遥控及数据注入任务的可靠性模型。

轨道测量任务由任务中心利用测站一的外测数据计算完成。其中，两个任务中心均具备计算能力，构成并联关系；地面通信网由双路由组成，构成并联关系。轨道测量的可靠性模型如图 7 所示。

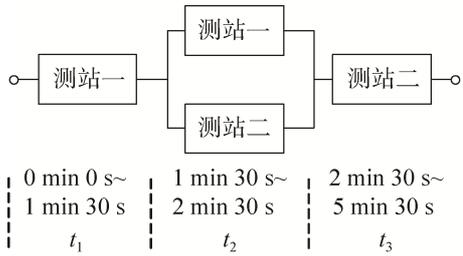


图6 按时段构建的可靠性模型

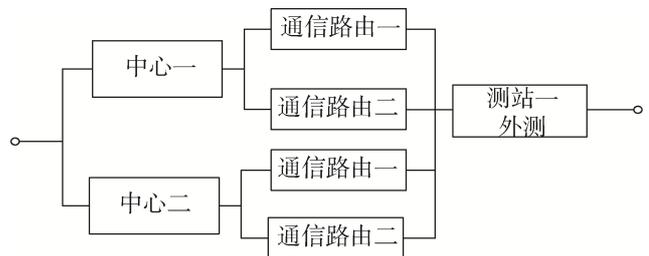


图7 轨道测量可靠性模型

Fig. 6 Reliability model of TT&C system for time stages Fig. 7 Reliability model of orbit measurement

遥测接收任务由任务中心处理测站一接收的遥测数据完成。其中，仅一个任务中心具备遥测处理能力；测站一具有遥测和数传接收能力，数传数据中也包含遥测数据，遥测功能和数传功能构成并联关系；遥测数据利用双路由向任务中心发送，数传数据仅从单路由向任务中心发送。遥测接收的可靠性模型如图8所示。

遥控及数据注入任务由任务中心通过测站一向航天器发送上行数据完成。其中，仅一个任务中心具备发送上行数据的能力；地面通信网由双路由组成，构成并联关系。遥控及数据注入可靠性模型如图9所示。

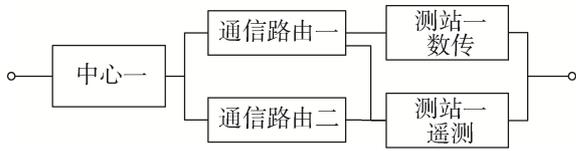


图8 遥测接收可靠性模型

Fig. 8 Reliability model of telemetry receiving

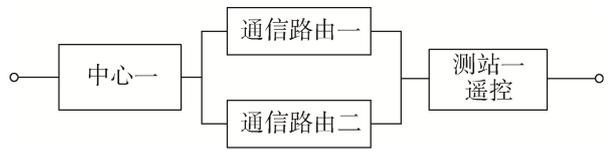


图9 遥控及数据注入可靠性模型

Fig. 9 Reliability model of remote control

t_2 时段、 t_3 时段内各测控任务可靠性模型可参考 t_1 时段，这里不再赘述。

表1给出各单元的可靠性参数； t_1 、 t_2 、 t_3 三个时段的时长分别是1.5 min、1 min、3 min，对于可靠性模型中的各参试单元，不妨设故障率、修复率服从指数分布。

在已知输入条件和可靠性模型的基础上，利用Markov方法和蒙特卡洛仿真法^[15]分别计算可靠性，最终的可靠性计算结果见表2，两种不同的方法得到结果的一致性较好。由于仿真次数足够多，仿真结果偏差可基本忽略，因此两种方法计算结果的吻合证明了Markov方法的有效性。需要说明的是，蒙特卡洛仿真法的计算精确度取决于仿真次数，因此，为获取较为准确的计算结果需要较大的仿真工作量，对应的计算时间较长；相比之下，Markov方法属于解析算法，计算量要小得多，在计算时间方面具有一定优势。

表1 单元可靠性参数

Table 1 Reliability of equipment

单元	MTBF/h	MTTR/min
测站（外测、遥测功能）	240	25
测站（数传功能）	200	25
通信路由	300	25
中心	800	25

表2 可靠性计算结果

Table 2 Result of reliability

任务	Markov法	蒙特卡洛法	结果偏差
轨道测量	0.996 62	0.996 59	0.000 03
遥测接收	0.996 57	0.996 56	0.000 01
遥控发送	0.996 49	0.996 43	0.000 06

4 结束语

本文分析了航天测控系统的特点，建立了系统可靠性模型，提出了基于Markov模型的精确求解可靠性的理论方法，能够针对测控通信系统执行任务的实际情况进行较为准确的量化计算。该方法的应用前景主要有两个方向：一是直接用于当前任务状态下系统可靠性评价，指导系统方案设计和资源合理

调配, 实现资源效益最大化; 二是用于指导系统可靠性指标分配, 消除系统可靠性短板, 为后续任务系统建设方案论证提供重要参考。

参考文献

- [1] 夏南银, 张守信. 航天测控系统[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2002.
- [2] XING L, AMARI S V. Handbook of perfromability engineering[M]. London: Springer, 2008.
- [3] SOMANI A K, TRIVEDI K S. Phased-mission system analysis using Boolean algebraic methods[C]// Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, Proceedings of the 1994 ACM SIGMETRICS Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, ACM, 1994: 98–107.
- [4] MO Yuchang. New insights into the BDD-based reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58 (4): 667–678.
- [5] ESARY J D, ZIEHMS H. Reliability analysis of phased missions[C]// Proceeding Conference Reliability and Fault Tree Analysis, 1975: 213–236.
- [6] 郭波, 武小悦. 系统可靠性分析[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [7] BERNER J B, ANDREWS K S. Deep space network turbo decoder implementation[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT; IEEE Press, 2001: 1149–1157.
- [8] AARON K M, STUBBS D M, KROENING K. Space Interferometry Mission Instrument Mechanical Layout [C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE Press, 2000: 219–230.
- [9] DEMIRICICOGU E, NEFES M M. Reliability-based TT&C subsystem design methodology for complex spacecraft missions[C]// Proceedings of the Annual Conference on Information Sciences and Systems. Princeton, NJ: IEEE Press, 2008: 1268–1272.
- [10] 于志坚, 航天测控系统工程[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2008.
- [11] 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, 2005: 158–162.
- [12] 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.
- [13] 陆传赉. 工程系统中的随机过程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [14] ROSS Sheldon M. 应用随机过程: 概率模型导论(第 10 版)[M]. 龚光鲁, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [15] 金星, 洪延姬. 蒙特卡罗方法在系统可靠性中应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[作者简介]

- 李 璿 1980 年生, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为航天测控。
王志生 1984 年生, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为航天测控。
杨 洋 1985 年生, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为航天测控。
王绍山 1975 年生, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为航天测控。

(本文编辑: 傅 杰)