

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

# 基于马尔科夫决策过程的星座故障卫星 替换策略研究

林若禹<sup>1</sup>, 冯蕴雯<sup>1</sup>, 薛小锋<sup>1</sup>, 郑晓燕<sup>2</sup>, 崔帅<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201203)

**摘要:** 随着星座的大规模化, 单星重要程度降低, 在制定故障卫星替换策略时, 应当考虑采用多种替换方式和保留故障卫星的情况。针对这一需求, 提出一种基于马尔科夫决策过程的星座轨道卫星替换策略制定方法。根据在轨工作、在轨备份和地面备份的卫星颗数, 对轨道状态进行划分; 在此基础上, 结合故障卫星的不同替换策略及对应的订购、储存和惩罚成本, 构建代表预期维护成本的回报函数模型; 以最小化各决策周期的维护预期成本为目标, 制定序贯的替换策略并以某星座轨道为例进行应用分析。结果表明: 采用地面备份替换故障卫星时, 更趋向于补充消耗的备份卫星; 平均故障间隔时间越长, 预期维护总成本越低, 但效果逐渐减弱; 惩罚成本的提高会导致替换策略固化, 预期维护总成本的上升趋势会极大放缓。

**关键词:** 卫星星座; 备份策略; 马尔可夫决策过程; 替换方式; 维护成本

中图分类号: V19

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on constellation fault satellite replacement strategy based on Markov decision process

LIN Ruoyu<sup>1</sup>, FENG Yunwen<sup>1</sup>, XUE Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHENG Xiaoyan<sup>2</sup>, CUI Shuai<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

**Abstract:** With the decrease of the importance of single satellite caused by the large-scale constellation, multiple replacement methods and the retention of faulty satellites should be considered when formulating the replacement strategy of faulty satellites. In response to this requirement, a method of formulating constellation orbital satellite replacement strategy based on Markov decision process is proposed. The orbital states are divided to the number of satellites in orbit, on-orbit backup and ground backup. On this basis, a return function model representing the expected maintenance cost is constructed by combining different replacement methods of faulty satellites and corresponding ordering, storage and penalty costs. Sequential replacement strategies are formulated with the goal of minimizing the expected maintenance cost of each decision-making cycle and an application analysis is carried out taking a certain constellation orbit as an example. The results show that when ground backup satellites are used to replace faulty satellites, it tends to supplement the consumed. The longer the mean time between failures, the lower the total expected maintenance cost, but the effect is gradually weakened. The increase of penalty cost will lead to the solidification of strategies, and the upward trend of total maintenance cost is expected to be greatly slowed down.

**Key words:** satellite constellation; backup strategy; Markov decision process; replacement method; maintenance cost

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-11-15

通信作者: 林若禹(1999-), 男, 硕士研究生。E-mail: 13338431501@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 林若禹, 冯蕴雯, 薛小锋, 等. 基于马尔科夫决策过程的星座故障卫星替换策略研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-8.

LIN Ruoyu, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, et al. Research on constellation fault satellite replacement strategy based on Markov decision process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

## 0 引言

卫星在寿命限制与太空复杂环境的影响下,除了出现可以通过重启备件来修复的短期故障外,还会出现无法修复的长期故障<sup>[1]</sup>。然而,随着星座中卫星长期故障的不断发生,不可避免地需要对故障卫星进行替换。

目前,更换故障卫星有三种常用的方式:启用在轨备份卫星、使用停泊轨道备份卫星和从地面基地发射备份卫星,这也分别对应了星座的三种备份策略:在轨备份、停泊轨道备份和地面备份。Galileo星座就采用了在轨备份的策略,能够快速修复星座中的故障<sup>[2]</sup>。GPS星座不仅采用在轨备份的策略<sup>[3]</sup>,在地面上也备有大量备份卫星<sup>[4]</sup>。GlobalStar星座系统则在低于星座运行轨道的轨道上部署备份卫星<sup>[5]</sup>。对于大规模星座减少制造成本可能会选择可靠性较低的商业元器件<sup>[6]</sup>,使得大规模星座中的卫星更容易出现故障。因此,有必要将维护卫星星座的成本与卫星星座完成任务能力降级的损失进行权衡,研究适合的星座故障卫星替换策略。

根据选用的描述星座运行状态的模型不同,星座故障卫星替换策略的选取优化方法也会不同。Fan Xiaohui等<sup>[7]</sup>利用二项式概率模型分析了遥感星座的可用性;胡敏等<sup>[8]</sup>利用Petri网建立了具有多约束的星座运行状态变化模型,利用蒙特卡洛方法分析了在不同备份策略下星座系统可用性的随机分布情况,但是通过该方法无法找到可证明的最优替换策略;Ereau等<sup>[9]</sup>将随机赋时Petri网用于星座模型定量分析,但是由于引入了时间维度,其结果面临状态空间爆炸的问题;侯洪涛等<sup>[9]</sup>根据马尔科夫过程提出了单星可用度算法,建立了星座服务可用性计算模型,并计算了考虑在轨备份卫星数量的星座可用性;王尔申等<sup>[11]</sup>基于马尔科夫过程建立了单星可用性模型,结合卫星的在轨备份情况,同时考虑卫星故障率和修复率,提出了星座可用性评估方法模型;Valdez-Flores等<sup>[12]</sup>采用了离散时间马尔科夫链进行星座建模,为解决星座状态爆炸的问题,进行了诸如不考虑发射提前准备时间以及只考虑地面备份的假设,通过马尔科夫决策过程进行随机动态规划,利用最小的预期成本即可确定最优替换策略;Kelley等<sup>[13]</sup>使用马尔科夫链模型,考虑卫星的运行获取

以及补给成本来评估星座系统的寿命周期成本;Peng等<sup>[14]</sup>在单星马尔科夫链模型的基础上使用了概率模型检查工具PRISM<sup>[15]</sup>,对单颗卫星以及星座系统的可用性进行了分析;骆天溯等<sup>[16]</sup>考虑星座的降级运行,利用马尔科夫链对星座建模并研究了在轨备份策略。上述研究在建模或分析备份策略时只考虑了一种备份方式,若是星座规模增大,难免有所欠缺。

此外,也有研究人员通过存储论方法对卫星星座故障卫星替换策略进行研究。Dishon等<sup>[17]</sup>通过经典的(N,M)库存系统进行星座状态变化的建模以解决卫星补给的问题;Jakob等<sup>[18]</sup>基于库存管理的概念,采用多级(s,Q)库存策略进行建模,研究星座备份策略。将卫星星座备份策略视为一个多层次的备份供应链系统,旨在同时考虑系统中不同级别的备份卫星。但是该模型假设当卫星发生故障时就立即启用在轨备份的卫星进行更换,并未考虑使用地面的备份卫星进行替换,也不考虑暂时不进行替换的选项,令星座轨道在存在故障卫星的情况下有继续运行的可能。

在星座的大规模化成为趋势的当下,进行星座备份策略建模或分析时,有必要考虑多种的故障卫星替换方式以及不替换故障卫星的情况,以贴合大规模星座卫星数量多,生产快速但是可靠性较低的特点。本文提出一种基于马尔科夫决策过程的故障卫星替换策略的分析方法,并综合考虑使用在轨备份卫星、地面备份卫星或不进行故障卫星替换的情况,能够连续地审时度势,输出不同时期的最优故障卫星替换策略,使得分析更为全面。

## 1 模型假设

为基于马尔科夫决策过程进行系统建模,并产生易于处理的解决方案,本文对卫星星座及其运行提出以下假设:

1) 卫星寿命服从指数分布<sup>[17-18]</sup>,各星座轨道上卫星故障的发生遵循泊松过程<sup>[19]</sup>;采用该假设,意味着卫星故障率是常数,也意味着不考虑星座轨道上工作卫星的共因失效且认为这些卫星是相同的,这能够简化星座模型,增加方法实用性。与此同时,本文对星座故障卫星替换策略的研究是针对构建完毕的星座,考虑到这期间耗费的时间,

加之在卫星设计寿命制定合理的情况下,可以认为工作卫星处于稳定状态,从而使得假设具有合理性。

2) 将需要进行星座维护的总时间平均分为若干个时间段,当决定订购备用卫星时,它将在下一个时间段内可用,当决定发射备份卫星时,能够在当前时间段发射。恰当地设定模型中时间段的长度,在星地保障能力较为成熟时,备份卫星的生产以及发射是能够及时完成的;

3) 所有发射都有发射设施和发射器,以便在规定的时间内进行发射;

4) 只考虑与卫星的建造、储存和发射直接相关的成本,以及卫星故障的机会成本,不包括维护用于操作卫星的地面系统的成本;

5) 故障卫星在星座轨道中的位置不会影响作出的决策,只要选定了替换的策略,替换星座轨道上任意轨位的卫星,其成本都是相同的。

## 2 故障卫星替换策略的马尔可夫决策模型

马尔科夫决策过程由决策时机和周期、星座状态和策略、回报和转移概率组成。状态表示可以观察到系统的不同条件。对于系统可以假设的每一种状态,都有一组动作,决策者可以从中进行选择。这些动作,连同转换概率,决定了系统在下一个决策时期将处于哪个状态。

每个动作的选择都有一个相关的奖励。奖励可以被解释为收入或成本,以及选择特定行动的结果。决策规则规定了如何选择该行动,策略规定了在整个考虑的时间范围内选择哪个行动。决策时期、状态、策略、奖励和转移概率构成了马尔科夫决策过程。这些组成部分的组合和最优性准则被称为马尔科夫决策问题。

### 2.1 决策的周期和时机

维持星座的运行,需要在其服役时间内做出一系列决策。将需要做出这一系列决策的总时间范围均分为若干个时间段,这些时间段称为决策周期。在每个决策周期的开始则称为决策时机,此时需要做出决策,以决定在该决策周期内需要执行的动作。决策周期的时长为

$$\Delta t = T/N, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中: $T$ 为需要作出决策的总时间范围,例如星座预定的服役时期; $\Delta t$ 为决策周期的时长,是两个决策时机的间隔; $N$ 为决策周期总数。

### 2.2 星座轨道的状态和策略

为了避免状态数量过多的问题,备份策略的抉择是针对星座的各个轨道来制定的。某个星座轨道的状态可以通过使用以下观测值来确定:该星座轨道中正常运行的卫星数以及对应的在轨备份和地面备份的当前可用的备用卫星的数量。系统的状态变化可以用一个三元组表示为

$$s_{k,t} = (x_{k,t}, o_{k,t}, g_{k,t}) \quad (2)$$

式中: $s_{k,t}$ 为第 $k$ 条星座轨道在第 $t$ 个决策周期的状态; $x_{k,t}$ 为星座轨道上正常运行的卫星数; $o_{k,t}$ 为星座轨道在轨备份的备份卫星颗数; $g_{k,t}$ 为星座轨道对应的地面备份的备份卫星颗数。

例如 $s_{1,2} = (20, 0, 2)$ 代表着在第2个决策时期,第1条星座轨道处于轨道上有20颗正常工作的卫星、没有在轨备份卫星、地面基地有2颗备份卫星的状态。

在每个决策时机,必须选择一个策略 $\pi$ 执行。做出策略后就可以决定下一步的动作,第 $k$ 条星座轨道就会从目前的状态 $s_{k,t}$ 转换到状态 $j_{k,t+1}$ 。策略 $\pi$ 就是一个状态 $s_{k,t}$ 到动作 $a$ 的映射,给定了 $\pi$ 也就给定了 $a = \pi(s_{k,t})$ 。可用的动作的数量取决于当前星座的状态,例如,若是当前星座轨道处于系统中没有备份卫星的状态,那么在这个决策周期内,“替换故障卫星”就不是可用的动作;将星座处于状态 $s_{k,t}$ 时可以做出的动作集以 $A_{s_{k,t}}$ 表示, $A_{s_{k,t}} = \{a_{s_{k,t},1}, a_{s_{k,t},2}, \dots, a_{s_{k,t},m}\}$ , $a_{s_{k,t},m}$ 表示星座处于状态 $s_{k,t}$ 时可以做出的第 $m$ 个动作。

### 2.3 回报和转移概率

决策的依据是其会带来的回报。星座轨道处于 $s_{k,t}$ 状态时,做出动作 $a$ 后获得的立即回报用 $r(s_{k,t}, a)$ 表示。回报是有实际价值的,可能是收入,也可能是成本。本模型将决策的回报定为预期的星座轨道维护成本,简称为预期维护成本。该成本会同时考量当前和未来的情况,因此在最初的决策周期的预期维护成本就是预期维护的总成本。星座轨道在最终决策周期的预期维护成本仅是状态的函数,用 $r(s_{k,N})$ 表示,这是因为在最终

决策周期处做出的决策不会被执行。在最终决策周期之前,星座系统在下一个决策周期的状态基于系统的当前状态、决策者做出的决策和转移概率。转移概率是指在给定了动作  $a$  的情况下,系统在状态  $s_{k,t}$  移动到状态  $j_{k,t+1}$  的概率。

当星座轨道处于状态  $s_{k,t}$  下,采用策略  $\pi$  的预期维护成本可以表示为

$$u^\pi(s_{k,t}) = E_{s_{k,t}}^\pi \left\{ \sum_{n=t}^{N-1} r(s_{k,n}, a) + r(s_{k,N}) \right\} = r(s_{k,t}, a) + \sum_{j_{k,t+1} \in J} p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a) u^\pi(j_{k,t+1}) \quad (3)$$

式中:  $u^\pi(s_{k,t})$  为在状态  $s_{k,t}$  下,做出决策  $\pi$  的预期维护成本;  $E_{s_{k,t}}^\pi \left\{ \sum_{n=t}^{N-1} r(s_{k,n}, a) + r(s_{k,N}) \right\}$  为在状态  $s_{k,t}$  下,从第  $t$  个决策周期直到第  $N$  个决策周期(即最终决策周期),均做出决策  $\pi$  时,各决策周期维护成本的期望。 $p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a)$  为星座轨道在状态  $s_{k,t}$  下,做出动作  $a$ ,星座轨道的状态转变到  $j_{k,t+1}$  的转移概率。 $J$  为第  $t+1$  决策周期星座轨道状态的集合。

当星座轨道处于状态  $s_{k,t}$  下,在第  $t$  个决策周期,执行策略  $\pi$  的维护预期成本由执行决策带来的在该决策周期立即回报以及在下一个决策周期星座轨道各个状态执行策略  $\pi$  的维护预期成本的期望组成。

星座轨道的立即回报为四种成本之和。

$$r(s_{k,t}, a) = c_{sat} + c_{hold} + c_{launch} + c_{penalty} \quad (4)$$

式中:  $c_{sat}$  为卫星成本,是订购新卫星所涉及的所有成本,在做出订购卫星的决策时需要考虑此成本;  $c_{hold}$  为备份卫星的持有成本,在决策时机,只要在地面基地或者工作轨道上有备份卫星,就进行考虑,处于在轨备份状态的备份卫星的持有成本比处于地面备份的高;  $c_{launch}$  为发射成本包括与卫星发射相关的所有成本,这些费用包括发射助推器、发射助推器的运输、发射场支持等,在决策周期内若是存在发射卫星的行为就需要考虑此成本;  $c_{penalty}$  为惩罚成本,当星座轨道上存在故障卫星时就需要考虑此成本,反映了轨道上存在故障卫星时对其完成任务的能力的影响,体现了单星商业、军事等价值,该成本的值与执行的策略也有关,星座轨道上存在故障卫星时,选择“不进行干预”策略的惩罚成本最高,而选择“使用在轨备份

卫星替换故障卫星”的惩罚成本最少。

若选择的策略不涉及在决策周期内进行卫星发射,从状态  $s_{k,t} = (x_{k,t}, o_{k,t}, g_{k,t})$  变化至状态  $j_{k,t+1} = (x_{k,t+1}, o_{k,t+1}, g_{k,t+1})$  的概率  $P$  为

$$P = \frac{e^{-\lambda \Delta t} (\lambda \Delta t)^{o_a - j}}{(x_{s,t} - x_{j,t+1} + o_a + g_a)!} \cdot O \cdot G \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为单颗卫星的故障率;  $\Delta t$  为决策周期时长;  $o_a$  为预定要用在轨备份卫星替换的故障卫星数,应小于此决策时机下星座轨道对应的在轨备份卫星数;  $g_a$  为预定要用地面备份卫星替换的故障卫星数,应小于此决策时机下星座轨道对应的地面备份卫星数;  $O$  为判断两状态之间在轨备份卫星变化是否符合策略的函数

$$O = \text{bool}(o_{k,t} - o_{k,t+1} = o_a - o_b) \quad (6)$$

式中:  $\text{bool}(x)$  为布尔函数,当  $x$  成立时,值为 1,反之值为 0;  $o_b$  为预定要补充的在轨备份卫星数。 $G$  为判断两状态之间地面备份卫星变化是否符合策略的函数

$$G = \text{bool}(g_{k,t} - g_{k,t+1} = g_a - g_b) \quad (7)$$

式中:  $g_b$  为预定要补充的地面备份卫星数。

补充在轨备份卫星和用地面备份卫星替换故障卫星都需要火箭发射,考虑到发射成功的概率,从状态  $s_{k,t}$  变化至状态  $j_{k,t+1}$  的转移概率为

$$p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a) = P P_{launch} \quad (8)$$

式中:  $P_{launch}$  为发射卫星相关的概率,当在轨备份卫星补充成功或地面备份卫星替换故障卫星成功时为火箭发射卫星的成功概率,反之为火箭发射卫星的失败概率,若是策略不涉及在决策周期内进行卫星发射,则值为 1。

## 2.4 最优故障卫星替换策略的确定

星座的最优故障卫星替换策略可以通过下式确定:

$$u^*(s_{k,t}) = \min_{a \in A_{k,t}} \left\{ r(s_{k,t}, a) + \sum_{j_{k,t+1} \in J} p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a) u^\pi(j_{k,t+1}) \right\} \quad (9)$$

式中:  $u^*(s_{k,t})$  为在状态  $s_{k,t}$  下,处于第  $t$  个决策时机的最低预期维护成本;

随之可以确定在状态  $s_{k,t}$  下,处于第  $t$  个决策周期时,能够令预期维护成本最低的动作  $a_{s_{k,t}}^*$

$$a_{s_{k,t}}^* = \arg \min_{a_{k,t}^* \in A_{k,t}} \{u^\pi(s_{k,t})\} = \arg \min_{a_{k,t}^* \in A_{k,t}} \left\{ r(s_{k,t}, a) + \sum_{j_{k,t+1} \in J} p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a) u^\pi(j_{k,t+1}) \right\} \quad (10)$$

式中:  $\arg \min\{\cdot\}$  为令括号中函数最小时变量的取值。

根据动作  $a_{s_{k,t}}^*$  确定在状态  $s_{k,t}$  下,处于第  $t$  个决策周期的最优故障卫星替换策略。

综上所述,求解最优故障卫星替换策略的目标为令状态  $s_{k,t}$  下,处于第  $t$  个决策周期的预期维护成本最小,并且当前考虑的决策周期数不能超过决策周期总数,优化模型为

$$\min_{a \in A_{k,t}} \left\{ r(s_{k,t}, a) + \sum_{j_{k,t+1} \in J} p(j_{k,t+1} | s_{k,t}, a) u^\pi(j_{k,t+1}) \right\} \quad \text{s.t. } t \leq N \quad (11)$$

### 3 案例分析

#### 3.1 输入参数

故障卫星的替换是以各星座轨道为目标进行的。以一条有 20 颗工作卫星的星座轨道为例,每条轨道预期对应应有 1 颗在轨备份卫星以及 1 颗地面备份卫星,其固定参数如表 1 所示。

表 1 某卫星星座轨道固定参数  
Table 1 Fixed parameters of a satellite constellation orbit

固定参数	值
$T$ /年	5
$\Delta t$ /月	2
星座轨道工作卫星颗数/颗	20
星座轨道预定在轨备份卫星颗数/颗	1
星座轨道预定地面备份卫星颗数/颗	1
卫星平均故障时间间隔/月	2

轨道的结构冗余度,即能够满足一定性能指标的容许失效卫星数目,为 2。总的决策时长为 5 年,每个决策周期时长为 2 个月,即总共有 30 个决策周期。每颗工作卫星的平均故障时间间隔为 2 个月,对于整个决策时长而言,其故障率为 1/30。

根据在轨工作、在轨备份以及地面备份的卫星颗数,星座轨道的状态可以划分为 84 种,如表 2 所示。

表 2 星座轨道的状态  
Table 2 The state of constellation orbit

状态	$x_{k,t}$	$o_{k,t}$	$g_{k,t}$
状态 1	20	1	1
状态 2	20	1	0
状态 3	20	0	1
状态 4	20	0	0
...			
状态 13	17	1	1
状态 14	17	1	0
...			
状态 84	0	0	0

定义可选的故障卫星替换策略为 5 种,如表 3 所示。

表 3 故障卫星的替换策略  
Table 3 Replacement strategy of fault satellite

序号	策略	$o_a$	$g_a$	$o_b$	$g_b$
策略 I	不进行干预	0	0	0	0
策略 II	使用一颗在轨备份卫星替换故障卫星	1	0	0	0
策略 III	使用一颗在轨备份卫星替换故障卫星,并补充一颗在轨备份卫星	1	0	1	0
策略 IV	使用一颗地面备份卫星替换故障卫星	0	1	0	0
策略 V	使用一颗地面备份卫星替换故障卫星,并补充一颗地面备份卫星	0	1	0	1

根据星座轨道的状态和所选策略,就可以得到当前决策周期对应的预期总回报,用于计算预期总回报的维护相关成本如表 4 所示。

表 4 维护相关成本  
Table 4 Maintenance-related costs

名称	取值/元
卫星订购成本/颗	5000000
每周在轨备份卫星维持成本/颗	50000
每周地面备份卫星维持成本/颗	25000
卫星发射成本	5500000
未采取措施时的惩罚/颗	50000000
采用在轨备份卫星替换策略时的惩罚	20000000
采用地面备份卫星替换策略时的惩罚	30000000

当星座轨道上占据轨位的正常工作卫星颗数不满预定的 20 颗时,即便采取了使用备份卫星替换故障卫星的相关策略,由于在轨机动或发射卫星所需的时间,惩罚成本仍会产生,但是这将会少于同样状态下选取“不进行干预”策略而产生的惩罚成本。与此同时,轨道结构冗余度为 2,即星座轨道上故障卫星的颗数少于 2 颗时,仍能保有足够

的性能,因此此时的惩罚成本需要乘上折扣系数,值取 0.5。

### 3.2 输出结果与分析

以状态 2、6、7、13、14、15 为例,得到的策略输出结果如表 5 所示。

表 5 不同状态下各个决策周期的策略选择结果  
Table 5 The strategy selection results of each decision cycle in different states

状态名称	$x_{k,t}$	$o_{k,t}$	$g_{k,t}$	各决策周期选取的策略		
状态 2	20	1	0	决策周期序列		
				第 1 决策周期~第 30 决策周期 策略 I		
状态 6	19	1	0	决策周期序列		
				第 1~第 12 决策周期 策略 III	第 13 第 29 决策周期 策略 II	第 30 决策周期 策略 I
状态 7	19	0	1	决策周期序列		
				第 1~第 20 决策周期 策略 V	第 21~第 29 决策周期 策略 IV	第 30 决策周期 策略 I
状态 13	17	1	1	决策周期序列		
				第 1~第 27 决策周期 策略 III	第 28~第 29 决策周期 策略 II	第 30 决策周期 策略 I
状态 14	17	1	0	决策周期序列		
				第 1~第 29 决策周期 策略 III		第 30 决策周期 策略 I
状态 15	17	0	1	决策周期序列		
				第 1~第 29 决策周期 策略 V		第 30 决策周期 策略 I

该表节选了部分状态对应的从最初直到最终的共 30 个决策时机的策略选取结果。例如,若是星座轨道处于状态 2,那么在这 30 个决策周期的任何一个决策时机,均应选择策略 I,也就是“不进行干预”。这是由于星座轨道上不存在故障卫星。事实上,研究对象为组网部署完成的星座轨道,因此星座轨道的初始状态不会出现既没有在轨备份卫星,也没有地面备份卫星的情况。

状态 6 的前 12 个决策时机均选择了策略 III,“使用一颗在轨备份卫星替换故障卫星,并补充一颗在轨备份卫星”,但是从第 13 个决策周期开始就只选择策略 II,“使用一颗在轨备份卫星替换故障卫星”,而不进行补充,原因在于随着最终决策周期的临近,备份卫星的缺乏导致的无法及时替换故障卫星带来的惩罚比不上订购卫星以及剩余时间维持备份卫星的支出。状态 7 从选择策略 V 到选择策略 IV 的变化也是出于相同的原因,不过从

第 21 个决策周期开始,状态 7 对应的选择策略才转变为策略 IV,这是由于状态 7 可使用的备份卫星处于地面备份的状态,进行替换故障卫星所需的时间更长,其无法及时使用备份卫星替换故障卫星带来的惩罚也就更大。状态 14 总是选择策略 III,状态 15 则总是选择策略 V,也就是说二者均选择使用备份卫星替换故障卫星后,立刻补充消耗,这是由于这两个状态轨道上的故障卫星数量已经超过 2 颗,轨道性能进一步下降,星座轨道上存在故障卫星时带来的惩罚成本上升,因此会选择能够避免成为无法及时进行故障卫星替换的状态的策略。当工作轨道上存在故障卫星而星座轨道和地面上均有备份卫星,那么会选择启用在轨备份卫星来替换故障卫星,例如轨道上的有 3 颗故障卫星的状态 13。然而,与同样存在 3 颗故障卫星的状态,但仅有在轨备份卫星的状态 14 不同,状态 13 在第 1 至 27 决策周期选择策略 III,第 28 和 29 决策

周期会选择策略 II,而非总是选择策略 III。这是因为该状态下同时存在在轨备份和地面备份卫星,即便使用了在轨备份卫星替换了故障卫星,也不会进入因没有备份卫星而无法及时替换故障卫星的状态,因此更有可能选择不补充消耗的在轨备份卫星。

在不同初始状态下,星座轨道的预期维护总成本随着卫星平均故障间隔时间增加而变化的趋势如图 1 所示。

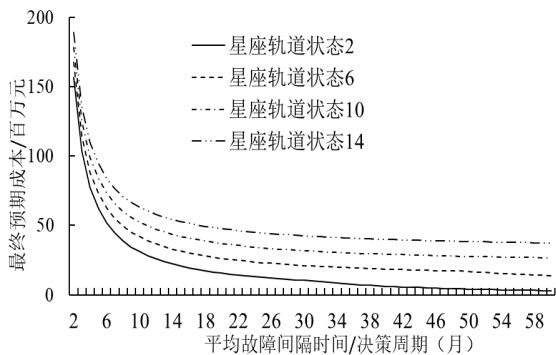


图 1 卫星平均故障间隔时间的增加对维护总成本的影响  
Fig. 1 The influence of the increase of the mean time between failure of satellites on the total maintenance cost

图中的四条曲线分别代表了星座轨道的第 2、6、10、14 个初始状态,它们的在轨正常工作卫星颗数分别是 20、19、18、17,均在轨备份有 1 颗卫星,没有地面备份卫星。每单位的平均故障时间间隔的长度与决策周期时长相同,即 2 个月。随着平均故障间隔时间增长至与 60 个决策周期相同,星座轨道的最终预期成本也逐渐下降,下降的幅度由剧烈趋于平缓,也就是说将卫星平均故障间隔时间延长 2 个月的价值也随之降低。对于图示的所有初始状态,当卫星的平均故障时间间隔达到星座决策的总时间范围 5 年时,将平均故障间隔时间延长 2 个月的价值不超过星座轨道上卫星总订购成本的 0.4%。这也与目前低轨大规模星座选择能够大批量生产的低成本小卫星的现状相符合。平均故障间隔时间的延长有助于降低星座轨道上出现故障卫星的概率,从而降低惩罚成本的期望,然而低轨大规模星座通过大量的在轨卫星实现更广的覆盖率,出现故障卫星对星座轨道性能的影响小,惩罚成本也就低,因此卫星平均故障时间间隔的延长的意义也就逐渐减弱。

在不同初始状态下,星座轨道的预期维护总成本随着惩罚成本增加而变化的趋势如图 2 所示。

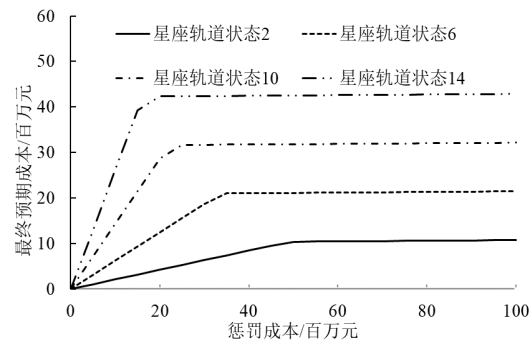


图 2 惩罚成本的增加对维护总成本的影响  
Fig. 2 The impact of the increase in penalty cost on the total maintenance cost

图中的四条曲线分别代表了星座轨道的第 2、6、10、14 个初始状态。随着惩罚成本的增加,星座轨道的预期总成本也逐渐上升。当惩罚成本接近 0 时,预期总成本也会十分低廉,这是由于过低的惩罚成本代表着几乎没有维护星座轨道的必要性,即便卫星故障,也不会选择发射卫星进行替换,也就没有进一步订购卫星的需求。除了支付因已经存在的在轨备份或者地面备份卫星带来的维持成本外,不会有其它支出。然而,过低的惩罚成本也表示该星座没有继续运行的必要性,有必要对方案进行重新评估。当惩罚成本提高至一定程度后,维护星座轨道的预期总成本的上升趋势会极大放缓,曲线趋于平稳。这是由于随着惩罚成本上升至一定程度,星座轨道上存在故障卫星时就总是会选择使用替换速度最快的在轨备份卫星替换故障卫星并及时补充备份卫星的消耗,使得惩罚成本及其期望最小,即策略会随之固定下来,因此预期总成本的曲线会变得平缓。这一结果也符合 GPS 等规模较小,有着重大军事价值的导航星座的替换策略,这类星座的单星更为重要,卫星故障对星座性能影响较大,惩罚成本也就会很高,因此都使用在轨备份卫星替换故障卫星。

## 4 结 论

1) 与使用在轨备份卫星替换故障卫星相比,当采用地面备份卫星替换故障卫星时,更趋向于选择在替换故障卫星之后补充消耗的备份卫星。除此之外,若是故障卫星颗数超过轨道的结构冗余度,也会选择在替换故障卫星后补充消耗的备份卫星。

2) 卫星的平均故障间隔时间的增长有助于预期维护总成本的降低,但是效果会逐渐减弱。与目前低轨大规模星座选择能够大批量生产的低成

本小卫星作为其组成的现状相符合。

3) 当惩罚成本提高至一定程度后, 替换策略会固定采用在轨备份卫星替换故障卫星, 并及时补充消耗, 因此星座轨道的预期维护总成本的上升趋势会极大放缓, 曲线趋于平稳, 这也与 GPS 等规模较小的导航星座的替换策略相符。

### 参考文献

- [1] 刘家兴, 崔小准, 董海青, 等. 一种导航星座卫星备份方法: 201110337755. 7[P]. 2023-07-02.  
LIU Jiahui, CUI Xiaohuai, DONG Haiqing, et al. A kind of navigation constellation satellite spare method: 201110337755. 7[P]. 2023-07-02. (in Chinese)
- [2] PRIZ R, MARTIN-PEIRB, ROMAY-MERINO M. The Galileo constellation design: a systematic approach[C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. USA: ION, 2005: 1296-1306.
- [3] 张育林, 范丽, 张艳, 等. 卫星星座理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 180-187.  
ZHANG Yulin, FAN Li, ZHANG Yan, et al. Theory and design of satellite constellations [M]. Beijing: Science Press, 2008: 180-187. (in Chinese)
- [4] KELLEY C W. GPS constellation state probabilities, historical and projected [C]// Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. USA: ION, 1999: 265-270.
- [5] TURNER A E, RODDEN J J, TSE M, et al. Globalstar constellation design and establishment experience [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2004, 116: 2127-2143.
- [6] 周剑波, 丛彦超, 赵鹏飞, 等. 采用商业元器件降低航天器成本研究[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(3): 144-149.  
ZHOU Jianbo, CONG Yanchao, ZHAO Pengfei, et al. Using COTS to reduce the cost of spacecraft[J]. Cyber Security and Data Governance, 2018, 37(3): 144-149. (in Chinese)
- [7] FAN Xiaohui, BAI Baocun. Efficiency analysis and reconfiguration control method of small satellite remote sensing formation constellation [C]// 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). China: IEEE, 2021: 6736-6743.
- [8] 胡敏, 宋旭民, 杨雪榕. 基于 Petri 网的 Walker 导航星座备份策略研究[J]. 航天器工程, 2017, 26(2): 14-21.  
HU Min, SONG Xumin, YANG Xuerong. Research on spare strategy of walker navigation constellation based on Petri net [J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(2): 14-21. (in Chinese)
- [9] EREAU J F, SALEMAN M. Modeling and simulation of a satellite constellation based on Petri nets [C]// International Symposium on Reliability and Maintainability Symposium. USA: IEEE, 1996: 66-72.
- [10] 侯洪涛. 面向全球导航卫星系统的多层可用性分析方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- HOU Hongtao. Multi-hierarchy based availability analysis method for global navigation satellite system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 王尔申, 张晴, 曲萍萍, 等. 基于马尔科夫过程的 GNSS 星座可用性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(4): 814-820.  
WANG Ershen, ZHANG Qing, QU Pingping, et al. GNSS constellation availability evaluation method based on Markov chain [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(4): 814-820. (in Chinese)
- [12] VALDEZ-FLORES C, FELDMAN R M. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit system [J]. Naval Research Logistics, 1989, 36(4): 419-446.
- [13] KELLEY C, DESSOUKY M. Minimizing the cost of availability of coverage from a constellation of satellites: evaluation of optimization methods [J]. Systems Engineering, 2004, 7(2): 113-122.
- [14] PENG Z, LU Y, MILLER A, et al. Formal specification and quantitative analysis of a constellation of navigation satellites [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32(2): 345-361.
- [15] KWIATKOWSKA M, NORMAN G, PARKER D. PRISM: probabilistic model checking for performance and reliability analysis [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2009, 36(4): 40-45.
- [16] 骆天溯, 赵灵峰, 冯蕴雯, 等. 基于 Markov 过程的卫星星座备份策略研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 168-174.  
LUO Tiansu, ZHAO Lingfeng, FENG Yunwen, et al. Study on satellite constellation spare strategy based on Markov process [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 168-174. (in Chinese)
- [17] DISHON M, WEISS G H. A communications satellite replenishment policy [J]. Technometrics, 1966, 8(3): 399-409.
- [18] JAKOB P C M, SHIMIZU S, YOSHIKAWA S, et al. Optimal satellite constellation spare strategy using multiechelon inventory control [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019: 1449-1461.
- [19] J-MDURAND, CASEAU A. GPS Availability, Part II: Evaluation of State Probabilities for 21 Satellite and 24 Satellite Constellations [C]// NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation. USA: ION, 1990: 285-296.
- [20] OCHIENG W Y, SHERIDAN K F, SAUER K, et al. An assessment of the RAIM performance of a combined Galileo/GPS navigation system using the marginally detectable errors (MDE) algorithm [J]. GPS Solutions, 2002, 5(3): 42-51.
- [21] COLLOPY P. Assigning value to reliability in satellite constellations [C]// AIAA Space 2003 Conference & Exposition. USA: AIAA, 2003: 23-25.

(编辑: 马文静)