

基于多级库存管理理论的导航星座可用性研究

赵灵峰^{1,2}, 黄朝伟^{3,4}, 林若禹^{3,4}, 黄莎莎⁵, 薛小锋^{3,4}, 冯蕴雯^{3,4}

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2.中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304;
3.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 4.飞行器基础布局全国重点实验室, 陕西 西安 710072;
5.上海航空工业(集团)有限公司 标准化部, 上海 200232)

摘 要:目前星座可用性的备份策略研究方法单一且忽略了卫星短期故障,采用马尔可夫理论但对备份策略研究不够深入。针对上述问题,提出了一种基于多级库存管理理论并考虑星座状态的星座可用性研究方法。以备份卫星的保障率为指标建立星座备份策略的数学模型;根据马尔可夫理论,结合单星可用性和星座状态概率进一步建立星座服务可用性数学模型;以某导航星座为例进行案例分析对比。根据模型计算结果,探究了星座故障状态概率变化;给出了备份卫星部署位置、补充时机以及增加数量对提高星座服务可用性的影响;验证了短期故障对卫星星座可用性的影响程度与长期故障相当,在工程应用中不可忽视。

关 键 词:卫星星座;多级库存管理理论;备份策略;Petri 网;马尔可夫过程;星座可用性

中图分类号:V474.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)02-0222-11

导航卫星是全球卫星导航系统不可或缺的组成部分,星座可用性是其系统可靠性与可维护性的综合体现,与星座备份策略、补充替换方案、地面控制等因素密切相关^[1-3]。通过冗余配置设计,防止星座因工作卫星发生故障而无法满足性能要求,这是确保卫星星座运行稳定的关键因素^[4]。从星座备份策略的角度对星座的可用性进行研究极具意义。

目前,国内外很多机构和学者对卫星星座的备份策略和可用性进行了研究。Ereau 等^[5]使用了随机时间 Petri 网以进行星座模型定量分析。王许煜等^[6]利用随机时间 Petri 网建立了星座运行状态变化模型,以星座可用性作为评价指标之一研究星座的备份策略,然而在考虑在轨备份卫星的补充方式时,只研究了当某条轨道面内的在轨备份卫星耗尽时才将其补充至原有水平的情况,并且未对星座的备份策略和可用性建立明确的数学模型。侯洪涛等^[7]根据马尔可夫过程,利用分系统的部件失效提出了单星可用度算法,基于星座的状态概率建立了

导航星座服务可用性计算模型。然而在模型中并未详细考虑星座的备份策略,仅仅是使用维修率作为代表。王尔申等^[8]同时考虑卫星故障率和修复率,并结合卫星的在轨备份情况,基于马尔可夫过程建立了星座可用性评估方法模型,然而其备份策略并未考虑备份卫星在地面备份的情况,也未对在轨备份卫星的补充方式进行探讨。Valdez-Flores 等^[9]利用离散时间马尔可夫链进行星座建模,并做了诸如不考虑发射提前准备时间等假设以解决星座状态空间爆炸的问题,接着利用马尔可夫决策过程进行随机动态规划以确定最优替换策略,但是其星座备份策略只考虑了地面备份的情况。Kelley 等^[10]也使用马尔可夫链模型计算星座的覆盖可用性,结合备份策略的相关成本评估星座系统的寿命周期成本,并使用模拟退火算法和遗传算法进行优化,但是并未分析备份策略是如何影响星座可用性的,对于备份卫星的部署位置也只考虑了在轨备份。Peng 等^[11]考虑了在轨以及地面备份卫星,在单星马尔可夫链模型的基础上,使用了概率模型检查工具 PRISM^[12],对单星以及星座可用性进行了分析,不过其并未分析备份策略对星座可用性的影响。上述文献在进行星座建模时主要关注星座状态的随机变

收稿日期:2024-03-13

作者简介:赵灵峰(1981—),博士研究生

通信作者:薛小锋(1982—),副研究员

e-mail: xuexiaofeng@nwpu.edu.cn

化,星座的备份策略并非建模重点。也有学者基于库存管理理论,通过星座的备份策略对星座可用性进行分析。Dishon 等^[13]通过 (N,M) 库存系统对星座的状态变化进行建模,以求解卫星补给问题。Jakob 等^[14]采用多级 (s,Q) 库存策略,同时考虑系统中不同级别的备份卫星,将星座的保障系统视为一个多层次的备份供应链。骆天溯等^[15]基于多级库存管理理论 (multi-echelon technique for recoverable item control, METRIC) 提出一种超大规模卫星星座多级备份策略。同时考虑地面备份、停泊轨道及星座轨道备份 3 种备份模式,建立星座可用度模型和以星座可用度为约束,最低星座备份费用为优化目标的优化模型。上述文献虽然着重考虑了备份策略对星座可用性的影响,但是在计算可用性时直接将备份卫星能满足替换需求的概率作为星座可用性,结果相对静态,无法反映星座在不同故障卫星颗数下的可用性,且忽视了卫星在轨短期故障与短期修复的过程。然而在实际工程中,卫星被设计为冗余备份的形式,具有应对短期故障的准备(硬件冗余、地面重启等),不考虑短期故障在工程应用中是一种资源浪费。本文对短期故障的考虑能进一步降低应用成本,保证系统功能最大化利用。

本文在上述研究成果及相应问题的基础上,考虑导航卫星星座备份策略、故障卫星颗数、短期故障和长期故障及修复,提出一种基于多级库存管理理论的星座可用性研究方法。通过分析星座备份策略的组成要素以及备份策略与卫星长期故障修复率的关系,以备份卫星的保障率为指标建立星座备份策略的数学模型,并集成应用 Petri 网、马尔可夫链理论,建立星座服务可用性的数学模型。该方法克服了多级库存管理理论只提及静态星座服务可用性、马尔可夫法未考虑星座备份策略的问题,并将短期故障纳入考虑范围。此外,本文以具体案例探讨了不同备份卫星部署位置及其补充方式对星座可用性的影响,进一步完善了备份策略的优化模型,从而能够更细致全面地研究星座备份策略对星座服务可用性的影响。

1 星座的备份策略模型

1.1 备份策略概述

星座的备份策略可以归结出 3 个要素:①备份卫星的部署位置;②使用与补充备份卫星的方式;

③备份卫星的部署数量。

为了简化建模过程,提高工程适用性,对卫星星座采取以下假设:

- 1) 星座中卫星的失效次数服从泊松分布^[16];
- 2) 处于备份状态的卫星不会发生失效,不考虑卫星工作期间共因失效的情况。

1.2 备份卫星的部署场所

星座的备份策略通常包括 3 种模式:在轨备份、停泊轨道备份以及地面备份,前 2 种统称为空间备份^[17]。从这个角度出发,根据星座部署备份卫星的位置,可以划分出 2 种备份层级:空间备份层级和地面备份层级。各备份层级中备份卫星的部署场所及特点如表 1 所示。

表 1 各备份层级中备份卫星的部署场所及特点

备份层级	部署场所	特点
空间备份	各星座工作轨道或	可以快速替换故障卫星,最大程度保证星座性能。
	低于星座工作轨道的各停泊轨道	
地面备份	地面仓库	替换故障卫星耗时长,但是储存成本低廉,可以具有较多的备份数量。

1.3 使用与补充备份卫星的方式

使用备份卫星的方式分为 2 种:

- 1) 替换故障卫星:因工作卫星故障产生替换的需求时,就启用备份卫星进行替换;
- 2) 补充其他部署场所消耗的备份卫星:部署在地面备份层级的备份卫星可以用于补充空间备份层级的备份卫星。

对消耗的备份卫星进行补充的方式也有 2 种:

- 1) 使用其他部署场所的备份卫星进行补充;
- 2) 生产新的备份卫星进行补充。

当明确补充备份卫星的方式时,还需确定备份卫星数量的控制策略,即考虑进行补充的时机以及需要补充的备份卫星颗数。备份卫星的数量控制策略用 (R,Q) 来描述,即当某一部署位置上的备份卫星颗数降至 R 时,就调配其他部署位置的 Q 颗备份卫星或生产 Q 颗备份卫星进行补充。

1.4 备份卫星的部署数量

在整个星座的服役时期中,部署于轨道或仓库中的备份卫星的数量并不是一个定值,而是会随着使用与补给而发生变化。用预定的备份卫星目标数

量 S 与一段时期内备份卫星的平均数量 $\bar{S}$ 来衡量某个轨道或仓库中备份卫星的部署数量的水平。

$$\begin{cases} \bar{S} = \frac{Q + 2R - 2N(t) + 1}{2} \\ Q \leq S - R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 为在 t 时间内星座需要替换的故障卫星数量; t 为补充该场所备份卫星的耗时。

1.5 星座备份策略的评价指标

本文将各部署场所的备份卫星保障率作为星座备份策略的评价指标。备份卫星保障率指当星座产生备份卫星的使用需求时,某一部署场所上的备份卫星数量能够满足该需求的概率。为了计算备份卫星的保障率,需要计算 2 个中间量:备份卫星的平均需求量以及期望短缺颗数。

各部署场所的备份卫星平均需求量 m 与备份卫星所处的备份层级有关,如(2)式所示。

$$m = m_0 / P \quad (2)$$

式中: m_0 为星座的年平均备份卫星需求量; P 为备份层级的备份卫星部署场所数量,对于空间备份层级,其为星座工作轨道数或停泊轨道数;对于地面备份层级,其为贮存备份卫星的仓库数。

星座的年平均备份卫星需求量计算公式为

$$m_0 = T_y \times \left(\sum_{c=1}^{P_c} n_c \right) / t_L \quad (3)$$

式中: T_y 为星座在每年内的运行时间; P_c 为星座工作轨道数量; n_c 为第 c 个星座工作轨道上的工作卫星数量; t_L 为工作卫星发生长期故障的平均故障间隔时间。

当备份卫星部署场所 i 产生使用备份卫星的需求时,若具有的备份卫星数量少于需求数量,就会发生短缺现象。假设备份卫星需求量为 N_{Di} 且服从均值为 μ_i 的泊松分布,在该备份场所的备份卫星平均数量为 $\bar{S}_i$ 的情况下,期望短缺数 $E_{BO}(\bar{S}_i)$ 计算公式为

$$E_{BO}(\bar{S}_i) = 0 \times P(N_{Di} \leq \bar{S}_i) + 1 \times P(N_{Di} = \bar{S}_i + 1) + 2 \times P(N_{Di} = \bar{S}_i + 1) + L = \sum_{x=\bar{S}_i}^{\infty} (x - \bar{S}_i) \frac{\mu^x e^{-\mu_i}}{x!} \quad (4)$$

μ_i 是备份卫星的部署场所等待从其他部署场所补充备份卫星时的备份卫星期望需求量,由该时期内的备份卫星使用需求和因后方补给不及时而造成的短缺两部分组成。 μ_i 计算公式为

$$\mu_i = m_i t_{j,i} + m_j \cdot E_{BO}(\bar{S}_j) / m_0 \quad (5)$$

式中: m_i 为备份场所 i 的年平均备份卫星需求量; $t_{j,i}$

是补给用备份卫星的备份场所 j 向备份场所 i 补充备份卫星的耗时; m_j 为备份场所 j 的年平均备份卫星需求量; $E_{BO}(\bar{S}_j)$ 为备份场所 j 的期望短缺数; m_0 是星座的年平均备份卫星需求量。

对于部署场所 i 而言,当贮存在该处的备份卫星用于替换故障卫星时,其备份卫星保障率 P_i 为

$$P_i = \prod_{c=1}^{P_c} \left(1 - \frac{E_{BO}(\bar{S}_i)}{\sum_{c=1}^{P_c} n_c} \right)^{n_c} \quad (6)$$

式中: P_c 为星座工作轨道数量; n_c 为第 c 个星座工作轨道上的工作卫星数量。

当贮存在该处的备份卫星用于补充其他部署场所 h 的备份卫星时,其备份卫星保障率 $P_{i,h}$ 为

$$P_{i,h} = \prod_{h=1}^{P_h} \left(1 - \frac{E_{BO}(\bar{S}_i)}{\sum_{h=1}^{P_h} n_h} \right)^{n_h} \quad (7)$$

式中: P_h 为部署场所 h 所在的备份层级轨道数; n_h 为第 h 个备份层级轨道上的备份卫星数量。

2 星座可用性

2.1 单星可用性模型

卫星的在轨故障模式可以分为短期和长期故障^[18]。短期故障可以通过地面发出重启指令或切换备件等手段修复,耗时较短;长期故障则需要启用备份卫星进行替换,这需要较长的时间。假设卫星的长期故障和短期故障的平均故障间隔时间以及平均修复间隔时间都服从指数分布^[19-20],根据可靠性理论^[21-22],在轨工作卫星稳态可用度为

$$a = \frac{\mu_{\text{total}}}{\lambda_{\text{total}} + \mu_{\text{total}}} \quad (8)$$

式中: λ_{total} 为在轨工作卫星故障率; μ_{total} 为在轨工作卫星修复率。

λ_{total} 和 μ_{total} 受卫星在轨期间会发生的故障模式及对应的修复方式影响。在轨工作卫星的故障率 λ_{total} 的计算公式为

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_L + \lambda_S \quad (9)$$

式中: λ_L 为在轨工作卫星发生长期故障的故障率; λ_S 为在轨工作卫星发生短期故障的故障率。

在轨工作卫星的总修复率 μ_{total} 为

$$\mu_{\text{total}} = \frac{\lambda_L + \lambda_S}{\frac{\lambda_L}{\mu_L} + \frac{\lambda_S}{\mu_S}} \quad (10)$$

式中: μ_s 为在轨工作卫星发生短期故障的修复率; μ_L 为在轨工作卫星发生长期故障的修复率。

单星的长期非计划故障一般难以预见,长期非计划故障的时间取决于在轨备份、停泊轨道备份、按需发射备份等不同星座备份策略,需要依靠启用备份卫星替换解决。然而长期非计划故障难以预见,因此在发生长期非计划故障时,若是星座没有采用在轨备份的策略或者说在轨备份卫星还未得到补给,那么就需要等待一段时间。Petri 网可以详细地表达系统中的运行逻辑,反映系统的静态布局以及动态变化,传统的 Petri 网只研究当某条轨道面内的在轨备份卫星耗尽时才将其补充至原有水平,本文所采用的随机 Petri 网模型中,变迁时间假设服从指数分布,使用 Petri 网建立卫星发生长期故障并启用备份卫星替换的流程模型如图 1 所示,其中圆圈表示库所,短线表示变迁,有向弧表示关系,圆点表示标记^[23-24]。

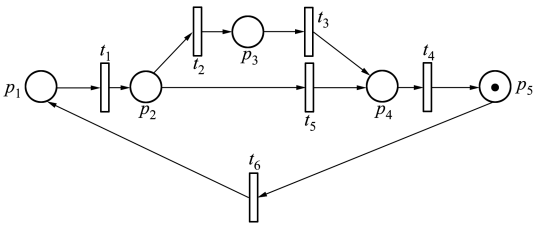


图 1 替换故障卫星的 Petri 网模型

图 1 中各库所的意义如表 2 所示。结合图 1 可知,当工作卫星发生长期故障,需要启用备份卫星进行替换时,若是备份卫星的部署场所中卫星数量不足,则需要等待补充完毕后才能进行替换。

表 2 替换故障卫星的 Petri 网符号意义

库所	意义	迁移	意义
p_1	卫星处于长期故障状态	t_1	地面发现故障
p_2	地面确定卫星发生故障	t_2	备份卫星短缺
p_3	等待备份卫星补充	t_3	补充备份卫星
p_4	备份卫星准备完毕	t_4	替换故障卫星
p_5	卫星正常可用	t_5	启用备份卫星
		t_6	卫星发生长期故障

卫星长期故障的故障率可用(11)式表示

$$G(t_0 + k\Delta t) = [G_0(t_0 + k\Delta t), G_1(t_0 + k\Delta t), \cdots, G_N(t_0 + k\Delta t)]^T \tag{17}$$

$$G(t_0 + (k - 1)\Delta t) = [G_0(t_0 + (k - 1)\Delta t), G_1(t_0 + (k - 1)\Delta t), \cdots, G_N(t_0 + (k - 1)\Delta t)]^T \tag{18}$$

$$\lambda_L = \frac{1}{T_6} \tag{11}$$

式中: λ_L 为卫星发生长期故障的故障率; T_6 为长期计划中断的平均故障间隔时间。

卫星的长期故障修复率可用(12)式表示。

$$\mu_L = 1/(T_1 + f \cdot T_3 + T_4) \tag{12}$$

式中: μ_L 为卫星长期计划故障中断的修复率; T_1 为平均排故耗时,是发现卫星发生长期故障的时间; f 为备份卫星不足的概率; T_3 为补充备份卫星平均耗时; T_4 是卫星长期故障的平均修复时间,可以认为是由备份卫星启用到开始承担故障卫星任务所需的时间。

当工作卫星发生长期故障,使用部署场所 i 的备份卫星进行替换,则备份卫星不足的概率 f 为

$$f = 1 - P_i \tag{13}$$

式中, P_i 为部署场所 i 的备份卫星保障率。

2.2 星座的状态概率

若星座具有 N 颗工作卫星,在某时刻 t ,每颗工作卫星均有正常和故障 2 种状态,这 2 种状态可视为此随机过程的未来状态条件概率分布只依赖于当前的状态,而不依赖于这之前的状态,根据马尔可夫链的定义,可认为这个随机过程具有马尔可夫性质。根据星座中故障卫星的颗数区分星座的状态,从无卫星故障到 N 颗卫星故障共会有 $N + 1$ 种状态^[8]。

用 λ_i 表示星座在有 $i - 1$ 颗卫星发生故障状态下的故障率, Δt 表示状态转移时间间隔。

$$\lambda_i = C_{N+1-i}^1 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^{N-i}, i = 1, 2, \cdots, N \tag{14}$$

式中, λ 为 N 颗工作卫星的平均故障率。

用 μ_j 表示星座在有 j 颗卫星发生故障的状态下的修复率,其计算公式为

$$\mu_j = C_j^1 \cdot \mu \cdot (1 - \mu)^{j-1}, j = 1, 2, \cdots, N \tag{15}$$

式中, μ 为 N 颗工作卫星的平均修复率。

令 $G_n(t_0 + k\Delta t)$ 表示 $t_0 + k\Delta t$ 时刻星座处于有 n 颗卫星发生故障的状态的概率, $n = 0, 1, \cdots, N$ 。那么在不同的时间点,星座处于不同状态的概率向量为

$$G(t_0 + k\Delta t) = G(\Delta t) \cdot G(t_0 + (k - 1)\Delta t) \tag{16}$$

式中

$$\mathbf{G}(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_1 \Delta t & \mu_1 \Delta t & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 \Delta t & 1 - (\lambda_2 + \mu_1) \Delta t & \mu_2 \Delta t & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \Delta t & 1 - (\lambda_3 + \mu_2) \Delta t & \mu_3 \Delta t & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \Delta t & 1 - (\lambda_4 + \mu_3) \Delta t & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda_{N-1} \Delta t & 1 - (\lambda_N + \mu_{N-1}) \Delta t & \mu_N \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_N \Delta t & 1 - \mu_N \Delta t \end{bmatrix} \quad (19)$$

定义当 $k = 0$ 时, $\mathbf{G}(t_0)$ 表示卫星星座初始时刻状态概率向量,如(20)式所示。

$$\mathbf{G}(t_0) = [G_0(t_0), G_1(t_0), G_2(t_0), \cdots, G_N(t_0)]^T = [C_N^0(A)^N, C_N^1(1-A)A^{N-1}, C_N^2(1-A)^2A^{N-2}, \cdots, C_N^N(1-A)^N]^T \quad (20)$$

式中, A 表示卫星单星可用度。

2.3 星座的服务可用性

利用星座的服务可用性衡量导航星座的可用性。星座的服务可用性定义为在一段时间内,系统提供的卫星业务服务满足用户需求的时间百分比,通过星座的状态概率以及星座值计算。星座值是星座的固有特性,反映了星座在某种状态下满足规定性能要求的能力。对于导航星座,可以指覆盖区内位置精度衰减因子 (position dilution of precision, PDOP) 小于阈值的区域占整个服务区的面积的百分比在全时段上的平均值^[25],计算公式为

$$\alpha_{k,n} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+k\Delta t} \sum_{i=1}^L B(\beta_{\text{PDOP},t,i} \leq \max \beta_{\text{PDOP},t,i}) \cdot A_i}{k\Delta t \cdot A_t} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $k\Delta t$ 为星座总运行时间; t_0 为初始时刻; L 为格网点总个数; $B(x)$ 为布尔函数,当 x 为真时, $B(x) = 1$,当 x 为假时, $B(x) = 0$; $\beta_{\text{PDOP},t,i}$ 为第 i 个格网点在 t 时刻的 PDOP 值; A_t 为服务区域总面积; A_i 为第 i 个格网点的面积。

星座的服务可用性计算公式如下

$$A_s = \sum_{n=0}^N G_n(t_0 + k\Delta t) \cdot \alpha_n \quad (22)$$

式中: A_s 为星座服务可用性; N 为星座中的工作卫星总数。

采用基于多级库存管理理论的导航星座可用性计算流程如图 2 所示。

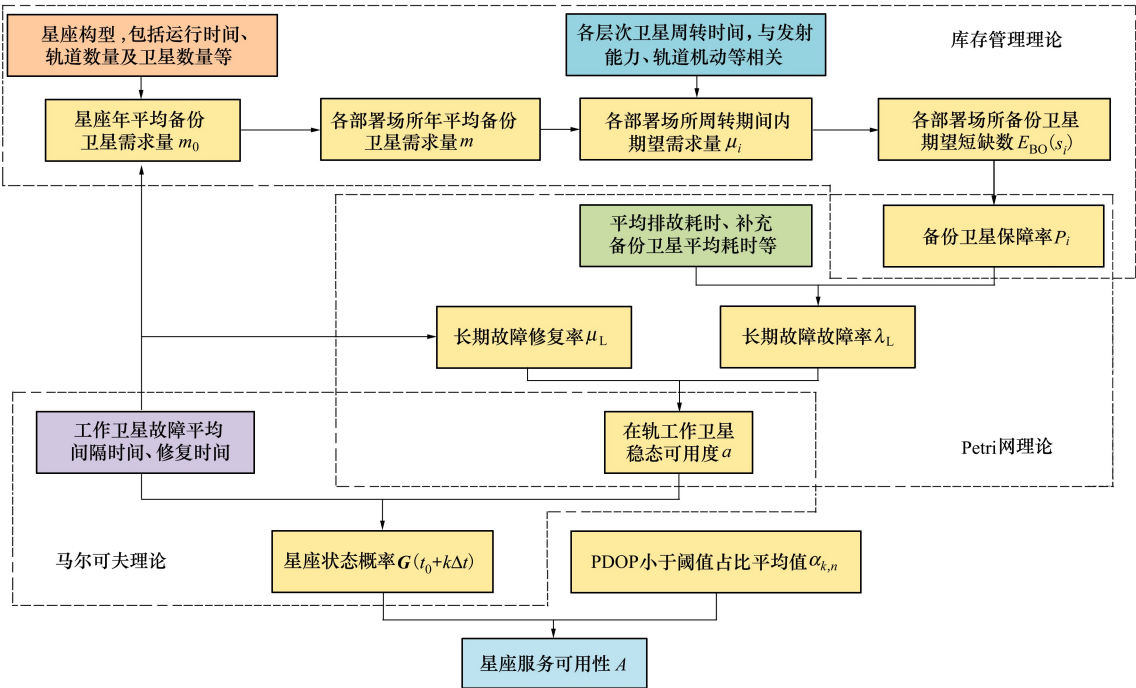


图 2 星座服务可用性建立流程图

3 案例分析

3.1 案例星座参数

Walker 星座是由英国航天院的 John Walker 提出的一种由等高度和等倾角的同构圆轨道组成的倾斜对称圆轨道卫星星座^[26],某 Walker 导航星座构型及平均故障间隔时间如表 3 所示。

表 3 导航星座案例输入	
参数名称	数值
星座轨道数量	3
星座中每个轨道上运行中的卫星颗数	8
工作卫星长期故障平均间隔时间/h	52 560
工作卫星短期故障平均间隔时间/h	9 090
卫星短期故障平均修复时间/h	3

以全球为服务区域,网格划分为 5°×5°,最小观测仰角为 5°,指标要求为 $\beta_{PDOP} \leq 4$,计算时间取一个星座回归周期,步长 300 s。表 4 给出了星座在无故障卫星直至有 3 颗卫星发生故障的情况下,星座值的最大值与最小值。

表 4 不同故障卫星数下的星座值		
故障卫星颗数	星座值最大值/%	星座值最小值/%
0	100	100
1	99.46	97.94
2	99.10	94.25
3	95.62	89.45

当出现星座故障卫星达到 4 颗及以上的状态时,认为星座服务不可用,此时星座值取为 0。

3.2 星座状态概率

案例星座中可能出现的故障卫星颗数为 0~8,将各星座轨道划分为 9 种状态,即星座的起始状态为“无故障卫星”。根据 2.2 节基于马尔科夫链计算星座状态概率的方法,以时间步长 $\Delta t = 1\text{ h}$ 、总运行时长 5 年作约束,仿真得到星座轨道处于这 9 种状态的概率,其中前 4 种状态概率结果如表 5 所示。

表 5 运行 5 年后星座的状态概率	
轨道故障卫星颗数	状态概率
0	0.916 2
1	0.080 2
2	0.003 5
3	0.000 1

以整个星座处于无故障卫星、1 颗故障卫星和 2 颗故障卫星的状态为例,该状态概率随着时间的变化如图 3~4 所示。

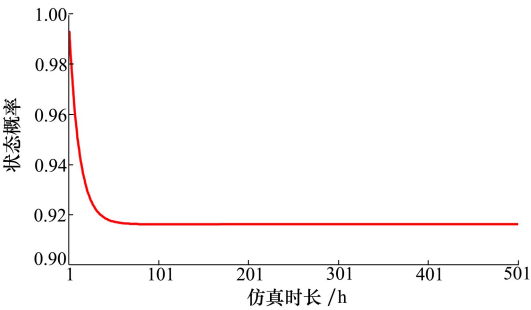


图 3 星座无故障卫星状态概率变化示意图

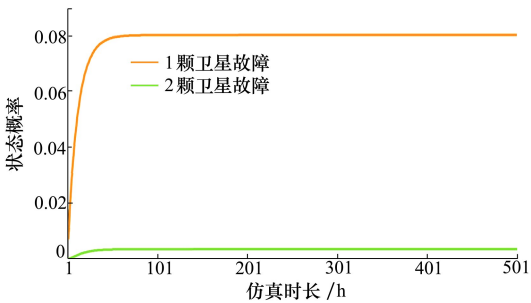


图 4 星座存在卫星故障状态概率变化示意图

随着时间增加,星座处于无故障卫星状态的概率逐渐下降,直到 50 h 后才逐渐趋于平稳,而处于有 1 颗故障卫星以及 2 颗故障卫星状态的概率逐渐上升,这意味着星座中卫星故障逐渐发生,在前 50 h 星座处于有 1 颗故障卫星状态概率的上升趋势更加显著,50 h 后处于 1 颗故障卫星和 2 颗故障卫星状态概率逐渐趋于平稳。根据上述结果可以发现,导航星座在运行中处于无故障卫星状态的概率并不高,这也表明了分析星座状态概率,并将其融入衡量星座可用性量化值的必要性。

3.3 备份策略分析

3.3.1 地面备份卫星颗数影响

若是星座不采取备份策略,仅在地面备份卫星,

即当在轨工作卫星发生长期故障后,就由地面生产卫星然后进行发射替换,对于使用地面与停泊轨道备份的 2 级备份策略执行模式和仅采用地面备份的单级备份策略执行模式,在其他备份层级的备份卫

星订购点和每次的补充数量为 1 颗的情况下,地面备份卫星数量对星座服务可用度及星座保障率的影响如图 5 所示。

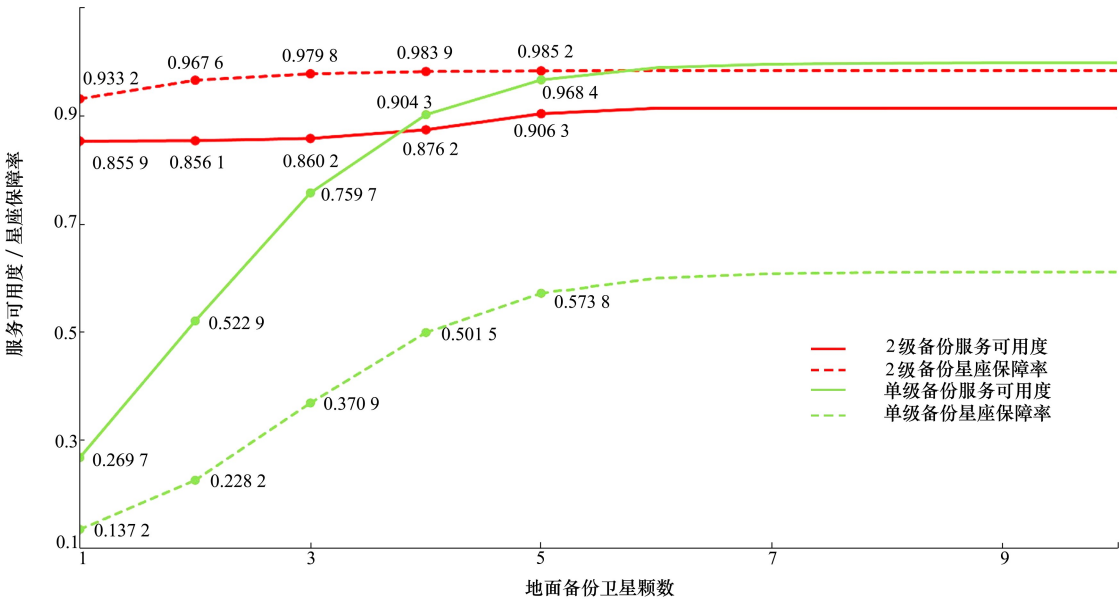


图 5 地面备份卫星数量对 2 级备份和单级备份的星座服务可用度及星座保障率影响

对于单级设备策略,仅在地面备份 1 颗卫星,服务可用度和星座保障率分别为 0.269 7 和 0.137 2,而采取 2 级备份策略后,仅在地面备份 1 颗卫星,星座的服务可用性也会上升为 0.855 9,星座保障率上升为 0.933 2,与单级备份策略相比分别上升了 217.35%和 580.17%,可见采取 2 级备份策略对星座服务可用性和保障率的提升显著。

使用地面与停泊轨道备份的 2 级备份策略执行模式的星座比单级备份策略执行模式具有更多的备份卫星,因此起初服务可用度较高。并且替换故障卫星时,一个需要等待备份卫星漂移和变轨,一个需要地面准备和发射,所以一开始地面备份卫星数量的增加对结果影响并不显著,随着地面备份卫星颗数的增加,单级备份服务可用度呈显著上升趋势,在地面备份卫星颗数达到 4 颗时,其服务可用度超过了使用地面与停泊轨道备份的情况,之后两者服务可用度的变化都趋于平缓,单级备份策略的更高,这是由于对于地面备份卫星而言,在单级备份情况下可以直接用于替换故障卫星,而在 2 级备份的情况下还需先储存在停泊轨道上,耗时更长。

不论是单级备份还是 2 级备份,星座服务可用度均在数值上对比星座保障率有较大提升,说明仅

采取库存管理理论对保障导航星座可用性是远远不够的。

3.3.2 申请补给的备份卫星颗数影响

针对本文中使用地面备份与在轨备份的 2 级备份模式,改变星座轨道每次申请补给的备份卫星颗数 Q_0 。以研究该变量对计算结果的影响。在订购点 $R_0 = 1$ 和地面备份卫星数量为 0 的情况下,不同 Q_0 值下的计算结果如图 6 所示。

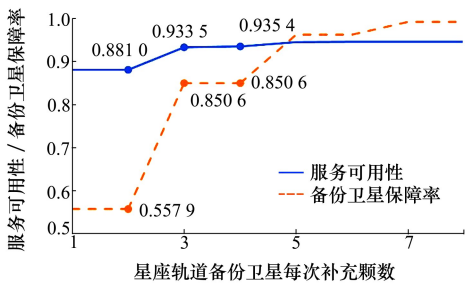


图 6 Q_0 值的变化对计算结果的影响

由图 6 可以看出,随着星座轨道每次申请补给的备份卫星数 Q_0 增加,星座服务可用性以及在轨备份卫星的保障率均上升。 Q_0 对备份卫星保障率的影响比对服务可用性的影响更为显著。当其数量从

2 颗增长至 3 颗时,星座服务可用性和备份卫星保障率的增幅最大,分别为 5.96% 和 52.46%,之后服务可用性增幅放缓,最终稳定至近 0.95,备份卫星保障率从 4 颗开始再次产生较大增幅,最终稳定至近 1,说明备份卫星每次补充颗数与在轨工作卫星颗数已接近。

3.3.3 星座轨道订购点影响

改变星座轨道备份卫星的订购点 R_0 以研究该变量对计算结果的影响。在每次补给的在轨备份卫星数 $Q_0 = 1$ 和地面备份卫星数量为 0 的情况下,不同 R_0 值下的计算结果如图 7 所示。

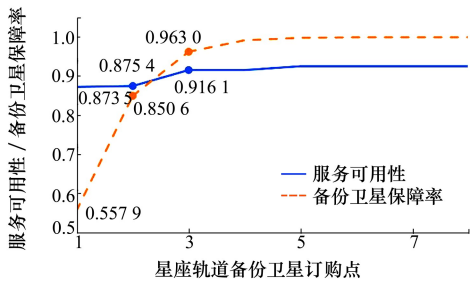


图 7 R_0 值的变化对 2 级备份计算结果的影响

随着星座轨道备份卫星订购点 R_0 的增加,星座服务可用性以及在轨备份卫星的保障率均上升。从 1 颗增至 2 颗和 2 颗增至 3 颗过程中,备份卫星保障率增幅显著,分别为 52.46% 和 13.21%,之后增幅放缓;服务可用性在 2 颗增至 3 颗过程中增幅较为显著(为 4.65%)。由于 R_0 表征的是某一星座轨道上备份卫星的最少颗数,因此相比于同一备份层级的另一参数 Q_0 ,增加 R_0 星座的服务可用性和备份卫星的保障率增长更加迅速。

3.4 故障影响分析

根据前文分析,采取备份策略能有效提高星座可用度,针对单个导航卫星的可用性,传统文献往往只考虑卫星的长期故障,而忽视卫星存在的短期故障,但在实际工程中,卫星被设计为冗余备份的形式,具有应对短期故障的准备,例如硬件冗余、地面重启等,若不考虑短期故障,在工程应用中是一种浪费。长期故障可采用延长单元寿命进行改善,而通过加强单粒子设计、电磁兼容设计、静电防护设计等措施,可有效提升短期故障平均故障间隔时间^[27]。根据备份策略分析结果,选择同时采用地面备份与在轨备份策略并选取地面备份 4 颗卫星的较优方案, $R_0 = 2, Q_0 = 4$ 的轨道备份卫星数量控制策略,分

别对长期故障平均故障间隔和短期故障平均故障间隔按一定比例进行提升优化,将所得星座服务可用性结果进行对比,如图 8 所示。

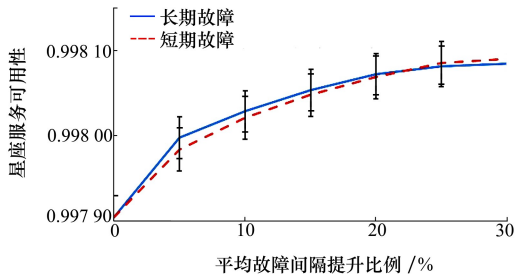


图 8 平均故障间隔提升对比

随着平均故障间隔提升比例的提高,在 20% 前,长期故障对星座服务可用性的影响略高于短期故障,且两者的方差逐渐减小,在提升比例达到 20%~25% 之间后,短期故障对星座服务可用性的影响开始高于长期故障。由此可见短期故障对星座服务可用性的影响与长期故障相差无几,甚至在优化一定程度后优于长期故障,短期故障在实际计算星座服务可用性中是不可忽视的。在实际星座设计中,应根据短期故障和长期故障的不同特点,分别制定相应的优化策略,进一步提升星座的整体可用性和效能。

4 结 论

本文基于库存管理理论建立了星座备份策略的分析模型,结合 Petri 网和马尔可夫理论提出了星座备份策略的评价指标以及根据该指标计算星座服务可用性的方法,克服了传统单一方法只提及静态服务可用性、忽视短期故障的问题,更加符合工程实际,进一步降低应用成本,最后使用所提方法对案例导航星座进行研究验证,得出以下结论:

- 1) 实际导航星座在运行中处于无故障卫星状态的概率并不高,仅采用马尔可夫理论而不考虑备份策略分析星座可用性具有局限性。
- 2) 库存管理理论能够解决星座备份策略不够细致的问题,而仅采取库存管理理论的备份策略具有服务可用性静态且忽视短期故障的局限性,利用马尔可夫理论分析星座状态概率并将其融入衡量星座可用性的量化值具有重要意义。
- 3) 采用基于多级库存管理理论的 2 级备份策

略相比于单级备份策略在星座服务可用性的提升上效果显著。在相同的备份卫星数量下,比起仅在地面备份,采用将备份卫星部署在地面和星座工作轨道上的 2 级备份策略对星座的服务可用性具有较大提升。使用备份卫星后,增加地面备份卫星的数量、提前补充备份卫星的时机、增加备份卫星每次补充颗数对星座的服务可用性提升效果有限,实际应用中应根据成本灵活选择最优策略。提升短期故障平均故障间隔与提升长期故障平均故障间隔对提高星

座服务可用性的效果近似,短期故障在工程应用中同样不可忽略。

4) 所提方法在应对复杂或高度随机的故障模式时,Petri 网和马尔可夫法可能存在局限性。此外,结果对输入数据的依赖性较强,实际应用中可能会因数据偏差影响准确性。未来研究应探索提高模型的扩展性和计算效率,并结合实际数据和先进算法实现备份策略的精确优化和系统效能的全面提升。

参考文献:

- [1] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉:武汉大学, 2013
HU Zhigang. Beidou navigation satellite system performance assessment theory and experimental verification[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (in Chinese)
- [2] 张清华, 王源, 孙阳阳, 等. 北斗卫星导航系统空间信号可用性的初步评估[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(6): 22-24
ZHANG Qinghua, WANG Yuan, SUN Yangyang, et al. Initial assessment of signal-in-space availability for BDS[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(6): 22-24 (in Chinese)
- [3] LU Y, PENG Z G, ALICEA M, et al. How reliable is satellite navigation for aviation checking availability properties with probabilistic verification[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 144(12): 95-116
- [4] 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)
- [5] EREAU J F, SALEMAN M. Modeling and simulation of a satellite constellation based on Petri nets[C]//International Symposium on Reliability and Maintain Ability Symposium, 1996: 66-72
- [6] 王许煜, 胡敏, 张学阳, 等. 基于 Petri 网的导航卫星星座备份策略分析评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 434-442
WANG Xuyu, HU Min, ZHANG Xueyang, et al. Analysis and evaluation method of navigation satellite constellation backup strategy based on Petri net[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(2): 434-442 (in Chinese)
- [7] 侯洪涛, 谢菲, 张旺勋, 等. 基于 Markov 过程的导航系统星座可用性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 685-690
HOU Hongtao, XIE Fei, ZHANG Wangxun, et al. Availability analysis for constellation of GNSS based on Markov process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 685-690 (in Chinese)
- [8] 王尔申, 张晴, 曲萍萍, 等. 基于马尔可夫过程的 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)
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] DISHON M, WEISS G H. A communications satellite replenishment policy[J]. Technometrics, 1966, 8(3): 399-409

- [14] JAKOB P C M, SHIMIZU S, YOSHIKAWA S, et al. Optimal satellite constellation spare strategy using multi-echelon inventory control[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019, 56(5): 1449-1461
- [15] 骆天溯, 赵灵峰, 冯蕴雯, 等. 基于 METRIC 理论的超大规模卫星星座多级备份策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(7): 2181-2190
- LUO Tiansu, ZHAO Lingfeng, FENG Yunwen, et al. Super large-scale satellite constellation multi-level backup strategy based on METRIC theory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(7): 2181-2190 (in Chinese)
- [16] COLLOPY P. Assigning value to reliability in satellite constellations[C]//AIAA Space 2003 Conference & Exposition, 2003
- [17] 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. *Satellite constellation theory and design*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 180-187 (in Chinese)
- [18] 刘家兴, 崔小准, 董海青, 等. 一种导航星座卫星备份方法: 中国, 201110337755.7[P]. 2023-07-02
- LIU Jiaxing, CUI Xiaozhun, DONG Haiqing, et al. A backup method for navigation constellation satellites: CN, 201110337755.7 [P]. 2023-07-02 (in Chinese)
- [19] KELLEY C W. GPS constellation state probabilities, historical and projected[C]//Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, 1999: 265-270
- [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] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 182-222
- CAO Jinhua, CHENG Kan. *Introduction to mathematical reliability*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 182-222 (in Chinese)
- [22] SONIA M, NIKOLAOS L, PIERRE D. Reliability of maintained systems under a semi-Markov setting[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2014, 131(3): 282-290
- [23] 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)
- [24] 陆维明, 林闯. 生产系统的 Petri 网模型[J]. *自动化学报*, 1993(3): 290-299
- LU Weiming, LIN Chuang. Petri net model of production system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993(3): 290-299 (in Chinese)
- [25] 蔡洪亮, 李星. 基于服务可用性的导航星座薄弱环节分析[C]//第五届中国卫星导航学术年会, 2014
- CAI Hongliang, LI Xing. Weakness analysis of navigation constellation based on service availability[C]//Proceedings of the 5th China Satellite Navigation Conference, 2014 (in Chinese)
- [26] WALKER J G. Satellite constellations[J]. *Journal of British Interplanetary Society*, 1984, 37: 559-571
- [27] 杨卓鹏, 郑恒, 角淑媛, 等. 一种导航卫星的系统效能建模与分析方法[J]. *宇航学报*, 2017, 38(6): 647-654
- YANG Zhuopeng, ZHENG Heng, JIAO Shuyuan, et al. A system effectiveness modeling and analysis method of single navigation satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(6): 647-654 (in Chinese)

Navigation constellation availability research based on multi-echelon technique for recoverable item control theory

ZHAO Lingfeng^{1,2}, HUANG Chaowei^{3,4}, LIN Ruoyu^{3,4}, HUANG Shasha⁵,
XUE Xiaofeng^{3,4}, FENG Yunwen^{3,4}

- 1.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China;
3.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4.National Key Laboratory of Aircraft Configuration Design, Xi'an 710072, China;
5.Standardization Department, COMAC Shanghai Aviation Industrial(Group) Co., Ltd., Shanghai 200232, China

Abstract: In view of the problems existing in the current research on backup strategies for constellations, such as the single method and the neglect of short-term satellite failures, as well as the insufficient in-depth study of backup strategies using Markov theory, this paper proposes a constellation availability research method based on multi-level inventory management theory and considering constellation status. Firstly, a mathematical model of constellation backup strategy is established with the guarantee rate of backup satellites as the index. Then, based on Markov theory, a mathematical model of constellation service availability is further established by combining the availability of individual satellites and the probability of constellation status. Finally, a case analysis and comparison are conducted using a certain navigation constellation as an example. According to the calculation results of the model, the changes in the probability of constellation failure status are explored; the influence of the deployment position, replenishment timing, and increase in the number of backup satellites on improving constellation service availability is given; and it is verified that the impact of short-term failures on constellation availability is similar to that of long-term failures and cannot be ignored in engineering applications.

Keywords: satellite constellation; multi-echelon technique for recoverable item control theory; backup strategy; Markov process; Petri net; constellation availability

引用格式:赵灵峰, 黄朝伟, 林若禹, 等. 基于多级库存管理理论的导航星座可用性研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(2): 222-232
ZHAO Lingfeng, HUANG Chaowei, LIN Ruoyu, et al. Navigation constellation availability research based on multi-echelon technique for recoverable item control theory[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(2): 222-232 (in Chinese)