引用格式:李桢,张永生. 多场景卫星碰撞概率下的星载时频系统性能需求分析[J]. 时间频率学报,2026,49(2):295-304.

多场景卫星碰撞概率下的星载时频系统性能需求分析

李桢[1,2], 张永生[2,3]

1. 北京航空航天大学 空间与地球科学学院,北京 100191;
2. 卫星导航与移动通信融合技术工业和信息化部重点实验室,北京 100191;
3. 北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191

摘要:随着近地轨道空间目标数量持续增加,卫星危险接近事件日益频繁,碰撞风险评估对轨道预报精度、时频设备性能等提出了更高要求。面向卫星碰撞风险评估任务,分析星载时频设备性能需求及其场景依赖性,梳理"时频性能—时间误差—观测与状态偏差—协方差—碰撞概率"的传递机理,分析频率准确度、频率稳定度、频率漂移率和守时能力在风险评估各环节中的作用机理,并提出基于无量纲比值的时频影响度指标 η_t。结合常规预警、高精度预警和长弧段自主预报 3 类典型场景进行定性分析。在此基础上,构建参数化蒙特卡洛仿真框架,将时频误差注入典型双目标交会场景,统计最接近时刻偏差、最接近距离偏差和碰撞概率相对变化。仿真结果表明:常规预警场景下时频误差被轨道位置不确定度掩盖,1 ms 时间误差引起的碰撞概率平均相对变化仅为 0.42%;高精度预警场景下同等误差引起的碰撞概率平均相对变化达 41.00%,超过 10% 阈值的样本占比为 88.66%;长弧段自主预报场景中,频率稳定度 1×10^{-9}/d 量级、守时 24 h 即可产生显著影响。协方差尺度扫描进一步表明,协方差尺度降至 10 m 以下时,百微秒量级的时间误差即可引起碰撞概率的明显变化。上述结果为星载时频设备指标的分场景论证提供了定量依据,其中长弧段指标为白频噪声简化下的量级参考。

关键词:碰撞风险评估;星载时频设备;时频影响度指标;蒙特卡洛仿真
DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-02-0295-10

Analysis of performance requirements for spaceborne time-frequency systems under multi-scenario collision probability

LI Zhen[1,2], ZHANG Yong-sheng[2,3]

1. School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Laboratory of Satellite Navigation and Mobile Communication Fusion Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100191, China;
3. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: With the continuous increase in the number of space objects in low Earth orbit, close-approach events involving satellites become more frequent, and collision risk assessment places higher requirements on orbit prediction accuracy and time-frequency equipment performance. This paper focuses

收稿日期:2026-02-28;接受日期:2026-03-25
基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3906503)

on satellite collision risk assessment and analyzes the performance requirements and scenario dependence of onboard time-frequency equipment. The transfer mechanism from time-frequency performance to time error, observation and state bias, covariance, and collision probability is analyzed. The roles of frequency accuracy, frequency stability, frequency drift rate, and timekeeping capability in different stages of risk assessment are examined, and a time-frequency impact index based on a dimensionless ratio is proposed. Qualitative analyses are conducted for three typical scenarios, namely routine warning, high-precision warning, and long-arc autonomous prediction. On this basis, a parametric Monte Carlo simulation framework is constructed, in which time-frequency errors are injected into a typical two-object conjunction scenario. The deviations in the time of closest approach, the miss distance, and the relative change in collision probability are then statistically evaluated. The simulation results show that, in the routine warning scenario, the effect of time-frequency errors is masked by orbital position uncertainty, and a 1 ms time error causes an average relative change of only 0.42% in collision probability. In the high-precision warning scenario, the same error leads to an average relative change of 41.00% in collision probability, and 88.66% of the samples exceed the 10% threshold. In the long-arc autonomous prediction scenario, frequency stability at the considered order of magnitude and 24 h of timekeeping are sufficient to produce a significant effect. A further covariance-scale scan shows that, when the covariance scale decreases below 10 m, time errors at the hundred-microsecond level can already cause clear changes in collision probability. These results provide a quantitative basis for scenario-specific justification of onboard time-frequency equipment specifications, in which the long-arc indicators are order-of-magnitude references obtained under a white-frequency-noise simplification.

Keywords: collision risk assessment; spaceborne time-frequency equipment; time-frequency impact index; Monte Carlo simulation

近年来，随着低轨互联网星座、遥感星座以及在轨服务航天器的快速部署，近地轨道空间物体数量激增，轨道环境日趋拥挤，危险接近事件频繁发生[1-2]。卫星碰撞风险评估与规避决策已成为保障航天器在轨安全、任务连续性和延长运行寿命的核心环节[3-4]。碰撞风险评估通常依赖轨道确定、轨道预报、危险目标筛选、最接近时刻(time of closest approach，TCA)计算、协方差传播和碰撞概率计算等环节，而这些环节中观测时间标记、数据同步和状态预报过程均与星载时频设备性能密切相关[5-7]。因此，分析碰撞风险评估对星载时频设备的性能需求，对于提升预警结果可信度和支撑未来自主化、高精度空间安全系统设计具有重要意义。

现有研究主要集中于空间目标碰撞风险评估和卫星时频系统两个方向。在碰撞风险评估方面，国内外学者已围绕接近分析、轨道预报误差建模、协方差传播和碰撞概率计算等方面开展了大量研究，形成了较为系统的方法体系，并指出轨道预报误差和协方差真实性是影响风险评估可信度的关键因素[8-14]。在时频系统方面，主要围绕星载高精度原子钟、时间维护与同步技术、时间传输通道以及对卫星导航系统高精度定位、精密轨道确定和自主运行的支撑作用展开[6,15-19]。这些研究为碰撞预警和星载时频系统的发展奠定了重要基础。

然而，现有碰撞风险评估研究通常将时间信息作为外部已知条件处理，较少分析星载时频设备性能对风险评估结果的具体影响。时频设备性能参数虽不直接写入碰撞概率计算公式，但其误差可能通过观测时间标记、多源测量时间同步以及轨道状态与协方差传播等环节影响风险评估结果。当轨道误差较大时，这类误差通常被掩盖；而在高精度定轨、长弧段自主预报等场景下，时间误差可能转化为位置误差，进而对碰撞风险评估结果产生不可忽略的影响。

针对上述问题，本文梳理时频误差从时间基准到碰撞概率的传递机理，提出时频影响度指标 η_t，结合常规预警、高精度预警和长弧段自主预报 3 类典型场景进行定性分析，并构建参数化蒙特卡洛仿真框架，通过在不同轨道位置不确定度水平下分析时频误差对碰撞概率的影响，确定时频误差产生显

著影响的性能边界,为星载时频设备指标论证提供定量参考。

1　风险评估流程与时频误差传递机理

本节围绕卫星碰撞风险评估基本流程,分析星载时频误差由时间基准、观测历元、轨道状态估计向协方差传播及风险判定的传递机理,并梳理与风险评估密切相关的关键时频性能指标,为后续分场景性能需求分析奠定基础。

1.1　碰撞风险评估基本流程

卫星碰撞风险评估通常包括轨道数据获取与更新、危险目标预筛选、轨道预报、最接近时刻确定、相对状态解算、协方差传播、碰撞概率计算和风险等级判定等环节,基本流程如图 1 所示。

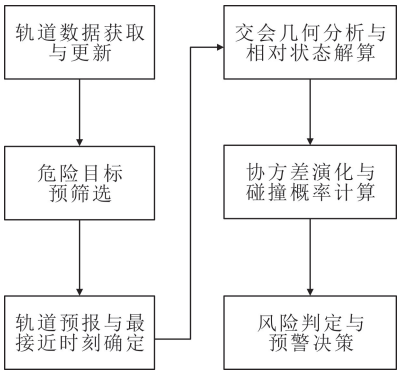


图 1　碰撞风险评估基本流程图

首先,系统获取并更新空间物体轨道数据,作为后续分析的输入。由于在轨空间目标数量众多,实际预警系统通常先基于轨道根数、筛选体积开展危险目标预筛选,将潜在危险目标对缩减;随后对筛选后的目标对进行轨道预报和最接近时刻计算,并在最接近时刻附近计算相对位置、相对速度和最接近距离等交会参数。同时,还需将目标轨道协方差由定轨历元传播至最接近时刻,并投影至相遇平面内,用于碰撞概率计算和风险等级判定。由此可见,碰撞风险评估不仅依赖轨道状态,还依赖状态误差和协方差尺度。

1.2　时频误差传递机理与关键指标

在卫星碰撞风险评估中,时频误差不直接作为碰撞概率计算的输入量出现,而是通过观测时间标记、测量误差、状态估计、轨道预报和协方差传播等环节逐级传递至风险评估阶段,其基本传递关系如图 2 所示。

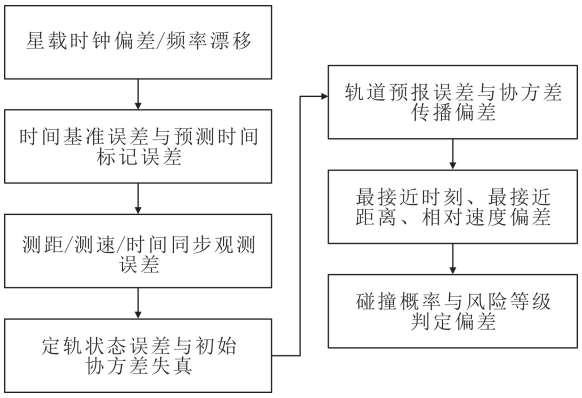


图 2　时频误差对风险评估的传递路径

星载时频误差主要表现为初始时间偏差、频率稳定度不足和频率漂移等。对于外部校时受限场景,时间偏差可由初始钟差和频率偏差持续累积:

$$\Delta t(T)=\Delta t_0+yT+\frac{1}{2}DT^2+\varepsilon_t(T)。\tag{1}$$

式(1)中,Δt_0 为初始时间偏差,y 为归一化频率偏差,D 为频率漂移率,T 为守时时间,$\varepsilon_t(T)$ 为随机频率噪声引起的时间偏差。由式(1)可知,频率偏差或漂移控制能力不足时,时间误差随运行时间逐渐累积,影响轨道预报精度和交会分析。

时间偏差进入风险评估链路主要有两类途径。第一类体现为测量误差,时间偏差可等效为距离误差,其一阶近似为

$$\Delta\rho=c\Delta t。\tag{2}$$

式(2)中,$\Delta\rho$ 为等效测距误差,c 为光速,Δt 为时间偏差。

第二类为状态历元偏差。若时钟存在偏差 Δt,计算所用的交会时刻将偏离真实值;而两目标在最接近时刻附近以相对速度 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}$ 飞过,时间偏差因此直接转化为等效位置偏差:

$$\Delta r_t\approx\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}\cdot\Delta t。\tag{3}$$

经过轨道确定、轨道预报和协方差传播后,时频误差最终表现为相对位置、相对速度、最接近时刻、最接近距离和碰撞概率的变化。碰撞概率可概括表示为相对位置、相对协方差和综合碰撞半径的函数:

$$P_{\mathrm{c}}=f(\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel}},\boldsymbol{C}_{\mathrm{rel}},R_{\mathrm{c}})。\tag{4}$$

式(4)中,P_{c} 为碰撞概率,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel}}$ 为最接近时刻的相对位置,$\boldsymbol{C}_{\mathrm{rel}}$ 为协方差,R_{c} 为综合碰撞半径。

为了便于后续分场景分析,可将与碰撞风险评估相关的星载时频性能指标归纳于表 1。

表 1 星载时频设备关键性能指标

时频指标	基本含义	主要作用环节	潜在影响
频率准确度	输出频率与标称频率的相对偏差	时间基准建立、频率校准	系统性时间偏差，随时间线性累积
频率稳定度	频率随机波动水平	连续观测、长弧段自主预报	随机时间误差，标准差随时间幂律累积
频率漂移率	频率随时间的系统性单调变化率	长期自主运行、弱校时	长期时间基准偏差，随时间二次累积
守时能力	外部校时受限时维持时间基准的能力	自主运行、长弧段预报	守时窗口内的综合累积时间误差

1.3 时频影响度指标

卫星时频设备是否构成碰撞风险评估中的关键约束，并不取决于其是否存在误差，而取决于该误差相对于场景主导误差源的大小。为了描述时频误差相对于任务误差背景的显著程度，可定义无量纲时频影响度指标：

$$\eta_t = \frac{|\Delta r_t|}{\sigma_{\mathrm{orb}}}。\tag{5}$$

式(5)中，$|\Delta r_t|$为时间误差引起的等效相对位置偏差，σ_{orb}为轨道位置不确定度，η_t为时频影响度指标，表示时频误差相对于场景误差背景的显著程度。

当 $\eta_t \ll 1$ 时，时频性能通常不是主导约束；当 η_t 接近或达到 0.1 的量级时，时间误差引起的等效相对位置偏差已达到轨道位置不确定度的 1/10，此时时频误差对总误差的贡献不可忽略，应在风险评估误差预算中予以考虑。结合式(3)，对于两目标独立时间误差标准差为 σ_t 的情形：

$$\eta_t = \frac{\sqrt{2}\,v_{\mathrm{rel}} \cdot \sigma_t}{\sigma_{\mathrm{orb}}}。\tag{6}$$

时频影响度指标 η_t 说明，星载时频设备性能需求不是脱离任务背景的统一常数，而是随任务模式、交会几何、轨道位置不确定度和自主运行时间变化的场景相关量。

2 典型场景下的时频性能需求分析

为便于后续分析，本文按数据源与守时模式将卫星碰撞风险评估划分为 3 类典型场景：①常规碰撞预警：以地面测控或公开轨道产品为输入，位置不确定度为 100 m 到 1 km；②高精度预警：以精密定轨产品为输入，位置不确定度收紧至 10 m 量级；③长弧段自主预报：长时间无外部校时，依靠星载时频设备维持时间基准，守时窗口典型 24 h 到 72 h。下文按场景分析各自的时频性能需求，并在第 3 节给出参数化仿真验证。

2.1 常规碰撞预警与高精度预警场景

常规碰撞预警场景通常以地面测控数据或公开轨道产品为主要输入，轨道位置不确定度通常较大，处于百米至千米量级。以典型低轨交会相对速度 $v_{\mathrm{rel}}=10$ km/s 为例，1 ms 时间误差对应的等效位置偏差约为 10 m。若常规预警场景下协方差尺度处于百米至千米量级，则由式(6)可知时频影响度指标 η_t 约为 0.01～0.1，该位置偏差相对于轨道位置不确定度很小，通常不会成为限制碰撞概率计算精度的主导因素。因此，在常规预警场景中，时频设备只需满足基本的时间同步精度和短期频率稳定度即可，无需达到高精度指标。

与常规预警相比，高精度预警场景下，观测精度、动力学建模水平和状态解算能力均有所提高，轨道位置不确定度相应减小。此时，原本容易被粗精度轨道误差掩盖的时间基准误差，更容易传递到状态估计、TCA 计算和最接近距离分析中。当轨道位置不确定度降低至十米级甚至米级时，时间误差的相对影响会明显增强。例如，在 $v_{\mathrm{rel}}=10$ km/s 条件下，若轨道位置不确定度为 10 m，则时频影响度指标 η_t 约为 0.14，已进入需要关注的范围。因此，高精度预警场景下时频设备可能成为风险评估误差预算中的组成部分，应重点关注时间同步精度和频率稳定度。该定性判断将在 3.2 节通过参数化仿真给出定量验证。

2.2 长弧段自主预报

长弧段自主预报场景下，航天器在较长时间内不能持续依赖外部高精度校时，需要依靠星上系统完成时间保持和轨道预报。该场景中时频误差主要体现为时间基准在较长时间尺度上的持续漂移。频率准确度不足将导致时间误差随守时时间持续累积，而频率稳定度引起的随机时间误差也会随时间逐渐增长，其增长规律与噪声类型和时间尺度有关。例如，频率准确度为 10^{-9} 的时钟在 24 h 后累

积时间误差约 86 μs,已可能对高精度场景产生显著影响。频率稳定度对长弧段守时的累积影响将在 3.3 节通过 σ_y 与守时窗口的扫描仿真定量分析。

因此,该场景下的关键指标不只是初始时间同步精度,还包括长期频率稳定度、频率漂移控制能力和守时能力。需要指出的是,本文仿真中式(1)的频率偏差 y 按白频噪声建模,对应 Allan 偏差曲线中短期至中期的 $\tau^{-1/2}$ 段。实际星载原子钟还存在闪烁频率噪声、随机游走频率噪声等长期噪声成分,其长期累积效应可能大于纯白频噪声假设下的估计,因此本文给出的守时误差边界可视为乐观估计。

综合 2.1 与 2.2 节的分析,不同场景下时频设备的性能需求差异可归纳如表 2 所示。

表 2　不同任务场景下时频设备性能需求对比

场景	主导误差背景	时频指标
常规碰撞预警	轨道误差和协方差背景较大($\sigma_{\mathrm{cov}}\geqslant 100$ m)	频率准确度、短期频率稳定度
高精度预警	轨道误差和协方差背景较小($\sigma_{\mathrm{cov}}\leqslant 100$ m)	频率准确度、频率稳定度
长弧段自主预报	时间误差随守时窗口持续累积	长期频率稳定度、频率漂移率、守时能力

上述定性分析表明,时频性能需求具有场景依赖性。为进一步量化不同场景下时频误差对碰撞概率的影响程度及其显著性边界,下一节章将通过参数化蒙特卡洛仿真给出定量结果。

3　时频误差参数化分析与性能边界

本节构建参数化蒙特卡洛分析模型,在典型双目标交会场景中注入时频误差,分析其对 TCA、最接近距离和碰撞概率的影响。

3.1　分析模型与仿真设置

在最接近时刻附近,短期交会的持续时间远小于轨道周期,两目标的相对运动可近似为线性。在此短期线性相对运动假设下,设基准最接近时间为 t_0,两目标在该时刻的相对位置和相对速度分别为 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel},0}$ 和 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel},0}$。根据最接近时刻的定义,两目标间距离取极值时相对位置与相对速度正交,即满足[20]:

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel},0}\cdot\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel},0}=0。\tag{7}$$

即无时频误差条件下,基准最接近距离为

$$d_{\mathrm{min},0}=\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel},0}\|。\tag{8}$$

在最接近时刻附近,对各目标轨道状态在 t_0 处作泰勒展开,保留位置的二阶项和速度的一阶项,得到局部二阶运动近似模型。设第 i 个目标在基准时刻的状态分别为 $\boldsymbol{r}_i$、$\boldsymbol{v}_i$、$\boldsymbol{a}_i$,当其存在时间误差 Δt_i 时,有:

$$\boldsymbol{r}_i(t_0+\Delta t_i)=\boldsymbol{r}_i(t_0)+\boldsymbol{v}_i(t_0)\Delta t_i+\frac{1}{2}\boldsymbol{a}_i(t_0)\Delta t_i^2,\tag{9}$$

$$\boldsymbol{v}_i(t_0+\Delta t_i)=\boldsymbol{v}_i(t_0)+\boldsymbol{a}_i(t_0)\Delta t_i。\tag{10}$$

由此可得扰动后的相对位置和相对速度,进而求解扰动后的最接近时刻偏移量和最接近距离分别为

$$t_{\mathrm{TCA}}^{(k)}=-\frac{\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel}}^{(k)}\cdot\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}^{(k)}}{\|\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}^{(k)}\|^2},\tag{11}$$

$$d_{\mathrm{min}}^{(k)}=\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{rel}}^{(k)}+\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}^{(k)}\cdot t_{\mathrm{TCA}}^{(k)}\|。\tag{12}$$

碰撞概率在相遇平面内计算。以相对速度方向为法向量构造相遇平面,将最接近相对位置投影至该平面,得到二维坐标(x_{p},z_{p})。在二维高斯假设下,碰撞概率可表示为[21]

$$P_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2\pi\sigma_{\mathrm{cov}}^2}\iint_{x^2+z^2\leqslant R_{\mathrm{c}}^2}\exp\left[-\frac{(x-x_{\mathrm{p}})^2+(z-z_{\mathrm{p}})^2}{2\sigma_{\mathrm{cov}}^2}\right]\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z。\tag{13}$$

式(13)中,R_{c} 为综合碰撞半径,σ_{cov} 为相遇平面等效协方差尺度。

为衡量时频误差注入前后碰撞风险的变化,定义碰撞概率相对变化 $\delta P_{\mathrm{c}}^{(k)}$ 为

$$\delta P_{\mathrm{c}}^{(k)}=\frac{|P_{\mathrm{c}}^{(k)}-P_{\mathrm{c},0}|}{P_{\mathrm{c},0}}。\tag{14}$$

本文采用蒙特卡洛方法量化时频误差对碰撞风险评估的影响。在给定基准交会场景中,对两目标独立抽取时间误差 $\Delta t_1^{(k)}$ 和 $\Delta t_2^{(k)}$,按式(9)和(10)计算扰动后状态,按式(11)和(12)求解 TCA 和最接近距离,按式(13)计算扰动后碰撞概率,按式(14)统计相对变化。重复 N 次后,统计各指标的均值、均方根(root mean square,RMS)和超阈值样本占比。针

对不同场景，时间误差的注入方式有所不同。在前两类场景中，两目标的时间误差直接从零均值高斯分布中独立抽取，即 $\Delta t_1^{(k)},\Delta t_2^{(k)} \sim N(0,\sigma_t^2)$。在长弧段自主预报场景中，时间误差不仅包含初始同步误差，还包含频率偏差在守时窗口内的累积。此时，第 k 次抽样中目标 i 的总时间误差为

$$\Delta t_i^{(k)}(T)=\Delta t_{0,i}^{(k)}+y_i^{(k)}\cdot T \tag{15}$$

式(15)中，$\Delta t_{0,i}^{(k)} \sim N(0,\sigma_{t0}^2)$ 为初始时间误差，$y_i^{(k)} \sim N(0,\sigma_y^2)$ 为等效归一化频率偏差，T 为自主守时窗口时长。σ_y 对应白频噪声条件下的 Allan 偏差量级。随着守时时间 T 增长，频率偏差项 $y_i^{(k)}\cdot T$ 逐渐成为时间误差的主导成分。仿真主要参数如表 3 所示。

表 3 参数化仿真主要参数

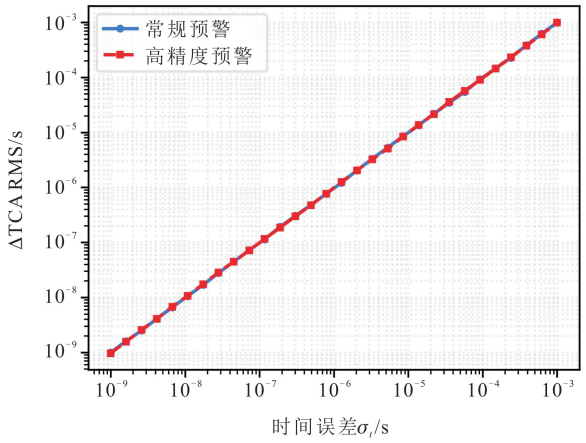
参数	取值
蒙特卡洛次数 N	5 000
相对速度 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}$	10 km/s
最接近距离 $d_{\min}$	10/100/500 m
时间同步误差 σ_t	1 ns ～ 1 ms
等效频率偏差 σ_y	10^{-12} ～ 10^{-9}
协方差尺度 σ_{cov}	1 ～ 1 000 m

3.2 时间误差影响分析

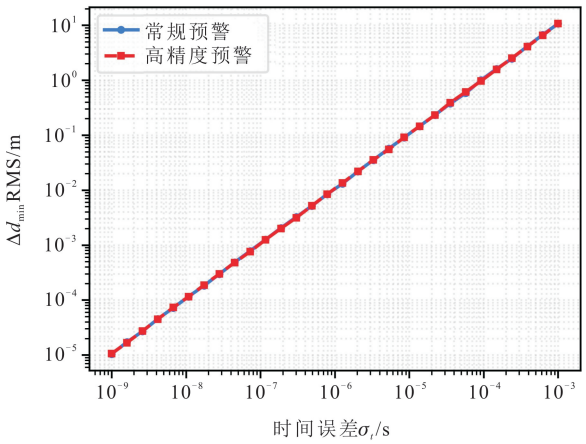
本节分析时间误差对 TCA、最接近距离和碰撞概率的影响。此处时间误差 σ_t 表征频率准确度和频率稳定度不足导致的综合时间偏差。仿真中，两目标的时间误差分别从零均值高斯分布中独立抽取，时间误差标准差 σ_t 从 10^{-9} s 扫描至 10^{-3} s，分别设置常规预警场景($\sigma_{\mathrm{cov}}=1\ 000$ m，$d_{\min,0}=500$ m)和高精度预警场景($\sigma_{\mathrm{cov}}=10$ m，$d_{\min,0}=10$ m)进行对比。

时间误差首先表现为交会几何参数的扰动。图 3 给出了不同条件下 TCA 偏差和最接近距离偏差的 RMS(root mean square)统计结果。

图 3 表明 TCA 偏差和最接近距离偏差均近似呈线性增长关系，与式(3)等效位置偏差关系一致。几何偏差主要由时间误差和交会几何决定，不直接受协方差尺度影响。当时间误差 σ_t 增大至毫秒量级时，最接近距离偏差 RMS 可达约 8～10 m，说明在低轨高速交会条件下，较大的时间同步误差已经能够引入可观的几何扰动。



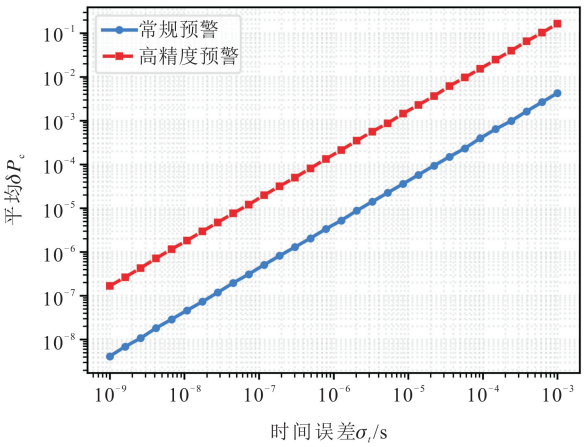
(a) 最接近时刻偏差



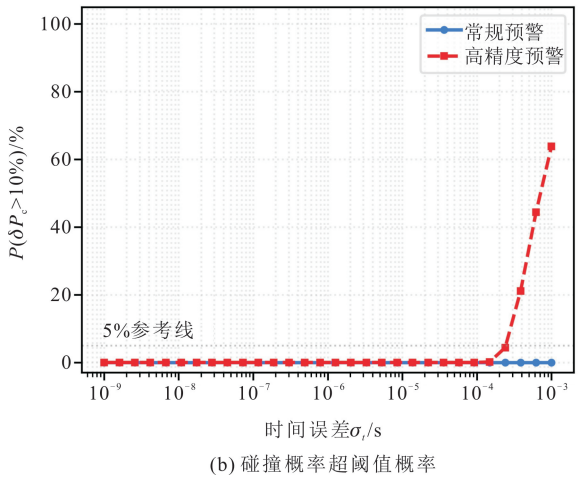
(b) 最接近距离偏差

图 3 不同时间误差下 TCA 偏差 RMS 和最接近距离偏差 RMS

然而，几何偏差是否会进一步造成明显的碰撞概率变化，还取决于该偏差相对于协方差尺度的大小。图 4 给出了不同协方差尺度下，时间误差对碰撞概率平均相对变化和超过 10% 阈值样本占比的影响。



(a) 碰撞概率平均相对变化



(b) 碰撞概率超阈值概率

图 4　时间误差对碰撞概率变化的影响

由图 4 可见,在常规预警场景下,即使时间误差 σ_t 增大至 1 ms,碰撞概率平均相对变化仅为 0.42%,超过 10%变化的样本占比基本为零,时间误差引起的几何扰动被轨道位置不确定度掩盖。在高精度预警场景下,1 ms 时间误差对应的碰撞概率平均相对变化达 41.00%,超过 10%变化的样本占比为 88.66%,已具有不可忽略的影响。

为验证时频影响度指标 η_t 判据的有效性,表 4 给出了固定 $\sigma_t=100$ μs、不同协方差尺度下的碰撞概率变化。

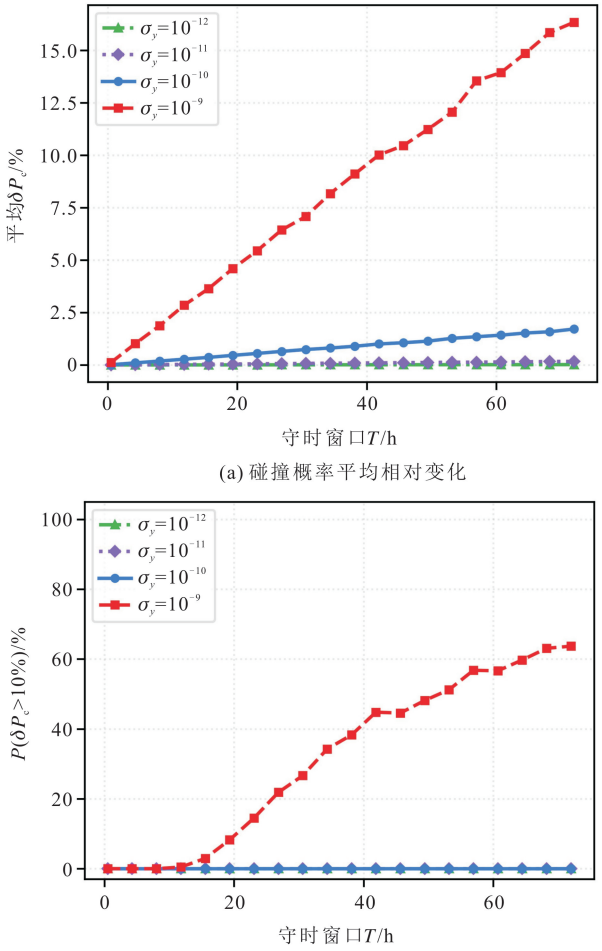
表 4　不同协方差尺度下 η_t 与碰撞概率变化的对应关系

σ_{cov}/m	η_t	δP_c 均值	$P(\delta P_c>10\%)$
1 000	0.001 4	0.000 84%	0%
100	0.014	0.084%	0%
30	0.047	0.91%	0%
10	0.14	6.52%	22.4%
1	1.41	55.71%	90.4%

表 4 表明,时频影响度指标 η_t 是决定时频误差显著性的关键参数:$\eta_t<0.01$ 时碰撞概率变化可忽略;η_t 达到 0.1 量级时变化开始进入不可忽略范围;$\eta_t>1$ 时碰撞概率已发生根本性改变。这一结果从仿真角度验证了 1.3 节提出的时频影响度指标 η_t。

3.3　频率稳定度与长弧段误差累积分析

本节考察频率稳定度 σ_y 和守时窗口 T 对碰撞概率的累积影响。设置高精度预警场景 $\sigma_{cov}=10$ m,$d_{min,0}=10$ m,初始时间误差 $\sigma_{t_0}=10$ ns,σ_y 取 10^{-12}、10^{-11}、10^{-10}、10^{-9} 四个量级,守时窗口 T 从 0.5 h 连续扫描至 72 h。图 5 给出了频率稳定度与守时窗口对碰撞概率变化的影响。



(a) 碰撞概率平均相对变化

(b) 碰撞概率超阈值概率

图 5　频率稳定度与守时窗口对碰撞概率变化的影响

由图 5 可以看出,10^{-12} 和 10^{-11} 两个量级在整个守时范围内影响均可忽略,曲线贴近零值。这两个量级对应高性能星载铷钟或氢钟的典型水平,在 72 h 守时窗口内均能满足高精度预警场景的需求。10^{-10} 量级在 72 h 守时窗口内碰撞概率平均相对变化达 18.59%,$P(\delta P_c>10\%)$ 达 67.86%,已进入需要关注的范围。10^{-9} 量级的累积效应十分显著:守时 24 h 时 δP_c 均值达 51.71%,$P(\delta P_c>10\%)$ 达 90.02%,已远超显著性判据;守时 72 h 后 Δd_{min} RMS 达 2.73 m,碰撞概率平均相对变化达 83.79%,$P(\delta P_c>10\%)$ 达 96.56%。

从图 5 还可以观察到,σ_y 每升高一个数量级,达到相同影响程度所需的守时时间缩短约一个数量级,这与式(15)中时间误差随 $\sigma_y\cdot T$ 线性累积的特征一致。此处的线性关系来自单次蒙特卡洛抽

样中将等效频率偏差视为恒定值的工程简化，用于描述长弧段频偏积累导致的时间偏差量级，并非对白频噪声随机过程的严格统计刻画。实际星载原子钟的 Allan 偏差曲线会在某一过渡时间之后由白频噪声段转入闪烁频率噪声段乃至随机游走频率噪声段，该过渡时间取决于具体钟型；当守时窗口进入过渡区之后，实际累积时间误差的增长将快于本小节线性模型，因此本小节给出的长弧段边界对应过渡区之前的乐观情形。

上述结果可与现有星载钟性能对照：北斗三号 MEO 卫星星载铷钟的日稳定度约为 2×10^{-14}，6×10^{-14}，星载氢钟约为 6×10^{-15}，2×10^{-14}，均远优于 10^{-12} 量级，因此在正常工作条件下能够充分满足 72 h 守时窗口内的碰撞预警需求[6]。然而，对于采用低成本晶振或微型原子钟的小卫星和商业星座，日稳定度可能处于 $1\times10^{-10}\sim1\times10^{-9}$ 量级，此时守时窗口的限制将成为碰撞风险评估可靠性的重要约束。

3.4 不同轨道误差下的性能边界讨论

本节讨论协方差尺度 σ_{cov} 与时间误差 σ_t 的组合关系，分析时频误差进入碰撞风险评估误差的边界。以碰撞概率相对变化超过 10%的样本占比作为评价指标，并定义显著性判据为

$$P(\delta P_c>10\%)\geqslant5\%。\tag{16}$$

即当超过 5%的蒙特卡洛样本中碰撞概率相对变化大于 10%时，认为该时间误差在当前协方差尺度下已具有不可忽略影响。

图 6 给出了不同参数组合下的超阈值样本占比分布。

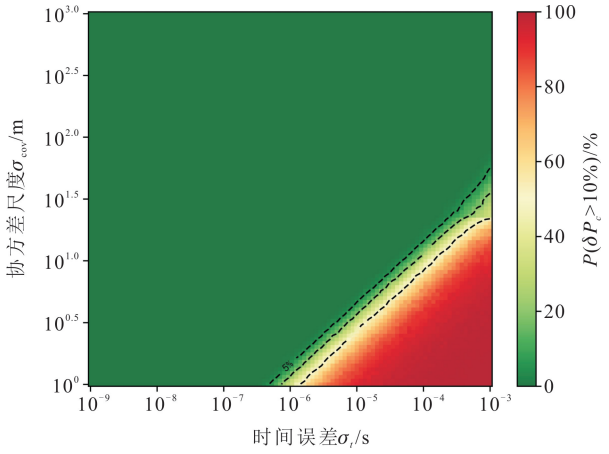


图 6 不同协方差尺度下 $P(\delta P_c>10\%)$随时间误差的变化

由图 6 可以看出，时间误差对碰撞概率的影响具有明显的协方差尺度依赖性。当协方差尺度较大($\sigma_{cov}\geqslant100$ m)时，在整个 σ_t 扫描范围内超阈值样本占比均未达到显著性判据，说明时间同步误差引起的几何扰动被轨道位置不确定度掩盖。随着协方差尺度逐渐减小，相同时间误差对应的位置偏差在误差中的占比增大，碰撞概率变化随之增强，敏感区域逐渐向较小 σ_t 方向扩展。

根据显著性判据，可提取不同协方差尺度下的时间误差敏感边界及其对应的时频影响度指标 η_t 值，结果如表 5 所示。

表 5 不同协方差尺度下时间误差敏感边界

协方差大小	敏感边界 σ_t^*	时频影响度指标 η_t
1 m	10 μs	0.14
3 m	100 μs	0.47
10 m	100 μs	0.14
30 m	1 ms	0.47
≥100 m	可忽略	<0.14

由表 5 可知，协方差尺度是决定时频误差显著性的关键背景参数。在常规碰撞预警场景中，协方差尺度通常处于百米级及以上，毫秒量级以内的时间同步误差对碰撞概率的影响较弱；而在高精度预警或精细交会评估场景中，当协方差尺度降低至米级或十米级时，时间误差的敏感边界将收紧至 10～100 μs 量级。

值得注意的是，表 5 中敏感边界对应的时频影响度指标 η_t 值集中在 0.1～0.5 范围内，这与 1.3 节提出的判据一致：当时频影响度指标 η_t 达到 0.1 量级时，时频误差开始影响碰撞风险评估。该结果从仿真角度验证了时频影响度指标 η_t 的实用性，可作为工程中快速评估时频设备性能需求的参考工具。

综合本节(第 3 节)结果，时频误差对碰撞风险评估的影响由时间误差、协方差尺度和守时窗口共同决定。基于上述分析，表 6 给出了面向不同任务场景的星载时频设备推荐指标范围。

表 6 不同任务场景下星载时频设备指标需求的参考范围

场景	时间同步精度	频率稳定度	守时窗口限制
常规预警	≤1 ms	无特殊要求	无
高精度预警	≤100 μs	$\leqslant1\times10^{-10}$/d	按需
长弧段自主预报	≤10 μs	$\leqslant1\times10^{-12}$/d	≤72 h

4　结语

本文面向卫星碰撞风险评估任务,梳理了时频误差从时间基准到碰撞概率的传递机理,提出了基于无量纲比值的时频影响度指标 η_t,结合典型场景进行了定性分析和参数化蒙特卡洛仿真,主要结论如下。

① 时频误差对碰撞风险评估的影响具有链式传递特征。时频误差通过观测时间标记、等效位置偏差、TCA 偏差和协方差传播等环节逐级传递;其显著性由时频影响度指标 η_t 衡量,仿真验证表明 η_t 达到 0.1 量级时影响开始不可忽略。

② 常规碰撞预警场景下,时频设备承担基础支撑作用。仿真表明,1 ms 时间同步误差引起的碰撞概率平均相对变化仅为 0.42%,时频误差被轨道位置不确定度掩盖,不构成主导约束。

③ 高精度预警场景下,时间误差和频率稳定度需进行考虑。协方差尺度扫描表明,$\sigma_{\mathrm{cov}}=10$ m 时敏感边界 σ_t^* 为 100 μs 量级,$\sigma_{\mathrm{cov}}=1$ m 时收紧至 10 μs 量级。

④ 在白频噪声简化条件下,长弧段自主预报场景中频率稳定度和守时能力成为关键约束。10^{-10} 量级在 72 h 守时窗口内碰撞概率平均相对变化达 18.59%,已进入需要关注的范围;10^{-9} 量级守时 24 h 时 $P(\delta P_c>10\%)$达 90.02%,已超过显著性判据。该结果说明低成本晶振和微型原子钟在弱校时条件下可能面临守时窗口限制,高性能铷钟和氢钟在短期白频特性上可满足上述需求,但其长弧段适用性仍需结合具体钟差噪声特性进一步评估。

上述结果表明,星载时频设备性能需求具有明确的场景依赖性,应按任务场景分层论证。本文方法用于工程论证早期阶段,对各场景的指标量级做初步筛选与敏感性分析,而非对星载钟长期行为做高保真预测。其中长弧段结论建立在白频噪声简化之上,如 3.3 节所述,计入闪烁与随机游走频率噪声后实际守时误差增长更快,故本文长弧段守时误差边界为乐观估计,表 6 中长弧段指标应理解为量级参考。本文仍采用圆对称协方差模型与单一交会几何假设;后续工作将引入椭圆协方差模型和包含多种噪声类型的完整钟差模型,并结合实测交会数据报文(conjunction data message,CDM)数据验证结论的适用范围。

参考文献:

[1] 林骁雄,李新刚,齐彧,等. 国外超大规模星座自主碰撞规避技术进展[J]. 国际太空,2025(7):10-14.

[2] 段玉瑞,孙振江,王建伟,等. 地球轨道空间碰撞风险区域态势分析[J]. 力学与实践,2022,44(6):1279-1285.

[3] 王翔. 击水中流:载人空间站针对空间碎片的设计[J]. 航天器工程,2024,33(S1):51-65.

[4] 曹进,孙钰,张元玉,等. 卫星互联网安全综述[J]. 中国科学:信息科学,2026,56(3):491-522.

[5] 袁利,姜甜甜. 航天器威胁规避智能自主控制技术研究综述[J]. 自动化学报,2023,49(2):229-245.

[6] 刘湘楠,李桢,施闯. 卫星时频系统发展综述[J]. 时间频率学报,2025,48(1):8-22.

[7] 张岩,许彤,蔡铤彬. 美欧空间碰撞规避服务实践研究综述[J]. 航天器工程,2025,34(3):134-143.

[8] 白显宗,陈磊,张翼,等. 空间目标碰撞预警技术研究综述[J]. 宇航学报,2013,34(8):1027-1039.

[9] ALFANO S. A numerical implementation of spherical object collision probability [J]. The Journal of the Astronautical Sciences,2005,53(1):103-109.

[10] SERRA R, ARZELIER D, JOLDES M, et al. Fast and accurate computation of orbital collision probability for short-term encounters[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2016,39(5):1009-1021.

[11] National Aeronautics and Space Administration. NASA spacecraft conjunction assessment and collision avoidance best practices handbook: NASA/SP-20230002470 Rev 1[R]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration,2023.

[12] LI J S, YANG Z, LUO Y Z. A review of space-object collision probability computation methods[J]. Astrodynamics,2022,6(2):95-120.

[13] BAI X Z, CHEN L, TANG G J. Periodicity characterization of orbital prediction error and poisson series fitting[J]. Advances in Space Research, 2012, 50(5): 560-575.

[14] LOPEZ-JIMENEZ S, PASTOR A, ESCOBAR D. Improving orbital uncertainty realism through covariance determination[J]. Acta Astronautica,2021,181:679-693.

[15] 贺玉玲,何克亮,王国永,等. 导航卫星时频系统发展综述[J]. 导航定位与授时,2021,8(5):61-70.

[16] 周善石,胡小工,刘利,等. 导航卫星精密定轨与时间同

步技术进展[J]. 天文学报,2019,60(4):59-68.

[17] GUO Y,ZENG L,ZHANG F,et al. Time synchronization between satellites via inter-satellite link observations of BDS-3 constellation: method, experiment and analysis[J]. Measurement,2024,224:113855.

[18] WANG W,WANG Y,YU C,et al. Spaceborne atomic clock performance review of BDS-3 MEO satellites[J]. Measurement,2021,175:109075.

[19] BERTIGER W, DUNN C, HARRIS I, et al. Relative time and frequency alignment between two low Earth orbiters, GRACE[C] //IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, Tampa: IEEE,2003:273-279.

[20] AKELLA M R, ALFRIEND K T. Probability of collision between space objects[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics-J Guid Control Dynam,2000,23(5):769-772.

[21] CHAN F K. Spacecraft collision probability[M]. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporated,2008.