

StarLink 星座对空间安全态势的影响

田 鑫, 崔 文, 张 炜, 王丽洁, 罗 朗
(西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘 要: 针对 StarLink 星座部署后带来的空间安全问题, 对 StarLink 星座构型仿真, 利用碰撞概率的算法, 从碰撞风险的角度分析了 StarLink 星座部署后对其他卫星在轨安全的影响。结果表明: StarLink 星座部署对低轨航天器将带来较大的碰撞风险, 碰撞风险比部署前提升一个量级, 对 535~555 km 空间区域的航天器影响尤为突出, 一旦产生碰撞碎片将带来更大的碰撞风险。通过分析提出了警示, 并针对大型卫星星座带来的碰撞危险提供了应对建议。

关键词: 低轨卫星; 卫星星座; 碰撞概率; 碰撞预警

中图分类号: TN 911.73; TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.02.018

Effects of Starlink Constellation on Space Security

TIAN Xin, CUI Wen, ZHANG Wei, WANG Lijie, LUO Lang
(Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the security problems brought by the deployment of Starlink constellation, the configuration of Starlink constellation is simulated, and the effects of the deployed Starlink constellation on the security of other satellites in the low-earth orbit space are analyzed from the perspective of collision risk. The results show that the deployment of Starlink constellation will bring great collision risk to satellites laid between the altitude of 535 km and the altitude of 555 km, and the collision risk after deployment is about ten times that before deployment. Once a space collision happens, the generated space debris will bring disastrous chain reactions. It alarms us that deploying large satellite constellation is a double-edged sword, which will bring not only enormous economic benefits but also a great danger of security to the near earth space for several years to a few hundred years.

Key words: low earth orbit (LEO) satellite; satellite constellation; collision probability; collision warning

0 引言

微小卫星具有体积小、重量轻、成本低、灵活性和研制周期短等优点^[1], 通过微小卫星组网可实现更加复杂的功能, 并大幅度降低大卫星发射运行所承担的成本和风险。自 20 世纪 90 年代以来, 微小卫星星座受到世界各国的广泛关注, 越来越多的航天任务采用卫星组网的方式来完成。同时, 为了满足全球不断增长的卫星宽带接入需求, 全球多家企业开始打造低轨宽带卫星星座计划, 在已公布的低轨卫星通信方案中, 新增加卫星的总数量达到 2 万多颗。据统计, 截至 2016 年 2 月 24 日, 地面能观测到面积达

到或超过亚平方分米的空间目标总数为 17 552 个, 其中, 形态基本完整且可能在用的航天器不超过 2 000 个, 其余均为空间碎片^[2]。新增加的星座卫星将使低轨空间目标密度大幅度增加, 低轨空间变得越来越拥堵, 空间目标的区域密集化会增大航天器通过该区域时的碰撞风险。1981 年, 苏联卫星“宇宙 1275”与一片空间碎片相撞而被摧毁; 1991 年, 俄罗斯“COSMOS 1934”与一片空间碎片相撞; 2009 年, 美国“铱星 33”通信卫星与俄罗斯“宇宙 2251”在太空相撞, 两颗卫星都粉身碎骨, 产生大量的碎片。因为碎片与航天器、航天器与航天器相撞会产生更多的碎片, 每次撞击事件不仅直接摧毁了航天器, 其产生

收稿日期: 2020-5-26; 修回日期: 2020-6-4

作者简介: 田 鑫(1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为空间事件分析、精密轨道确定、空间目标探测与编目等。

的大量碎片滞留太空,进一步恶化了太空环境,从而提高了太空“交通事故”的发生概率。数量庞大的星座卫星涌入低地球轨道空间,必然会对太空安全产生影响。本文构建了StarLink星座布局,利用碰撞概率计算方法,分别对StarLink计划部署后对其他在轨航天器产生的碰撞风险以及StarLink星座在当前太空环境下的碰撞风险进行了研究。

根据《外层空间条约》,太空是人类共有的资源,各国都有和平探索和利用太空资源的权力,为了从太空公地中获得最大利益,一些国家与企业不顾太空的承受能力而最大限度地向太空中投放卫星。资料显示,当前一些大型星座正在筹划部署与逐步实施,例如SpaceX公司的StarLink星座、LeoSat公司的LeoSat的和“一网”公司的OneWeb星座等均计划部署在低轨空间区域,低轨空间卫星数量的剧增必将使各类空间目标发生碰撞的可能性大大增加。数万颗卫星一旦部署,不仅将增加邻近轨道航天器的碰撞风险,也会给其他航天器的入轨与离轨带来安全隐患。通过分析StarLink星座部署后对太空安全带来的影响,思考了StarLink等大型星座卫星部署后可能带来的安全隐患,并提出了应对太空交通拥堵和预防航天器碰撞的建议,从而保证航天器的长期稳定运行和太空的可持续利用。

1 低轨空间目标和StarLink星座的分布

空间目标包括航天器、火箭箭体和空间碎片3类^[3]。运行在低于2 000 km高度轨道上的目标称为低轨空间目标,低轨空间是人们开展空间应用活动的主要区域。根据美国北美防空司令部2019年7月1日公布的空间目标编目目录,低轨空间目标已达14 089个,不同轨道高度与倾角下的各类空间目标数量的统计信息分别见表1和表2,现有低轨空间目标主要分布在高度400~1 600 km、倾角40°~100°的轨道上。

StarLink计划是SpaceX公司推出的全球高速卫星互联网计划,旨在通过太空在全球范围内提供互联网接入服务。SpaceX公司计划通过发射两批卫星(第1批4 425颗卫星、第2批7 518颗卫星)构成庞大的卫星星座,从而将互联网覆盖到全球每一个角落。2018年3月美国联邦通信委员会批准SpaceX公司发射4 425颗卫星,2018年11月15日又批准第2批共7 518颗卫星的发射计划,StarLink星座规划的卫星数达到了惊人的11 943颗。

表1 低轨空间目标不同轨道高度分布统计表

Tab.1 Low orbit spatial target distributions at different orbit altitudes

轨道高度/km	航天器/个	箭体/个	碎片/个
小于400	65	11	30
400~800	1 968	313	3 381
800~1 200	851	387	4 812
1 200~1 600	732	148	1 093
1 600~2 000	55	17	226
合计	3 671	876	9 542

表2 低轨空间目标在不同倾角分布统计表

Tab.2 Low orbit spatial target distributions at different inclination angles

轨道倾角/(°)	航天器/个	箭体/个	碎片/个
小于40	109	70	121
40~60	352	27	93
60~80	944	210	2 411
80~100	2 144	535	6 058
大于100	122	34	859
合计	3 671	876	9 542

为了减少如此数量庞大的卫星对近地空间造成的影响,SpaceX公司2018年12月对StarLink计划做出修订,修订后轨道设计情况见表3。第1批发射计划分为两个阶段执行,修订主要是针对第1阶段,该阶段发射的卫星总数由1 600颗减少至1 584颗,轨道高度由1 150 km降至550 km,分布在倾角为53°的24个轨道面上,每个轨道面66颗卫星,部署后的轨道构型如图1所示。StarLink星座第2批7 518颗卫星分布在330~350 km轨道范围,其星座轨道设计情况见表4。

表3 StarLink第一批轨道设计

Tab.3 Orbit design of the first StarLink constellation

参数	第1 阶段 初始	第1 阶段 修订	第2阶段			
轨道平面/个	32	24	32	8	5	6
各平面卫星数/颗	50	66	50	50	75	75
卫星总数/颗	1 600	1 584	1 600	400	375	450
轨道高度/km	1 150	550	1 110	1 130	1 275	1 325
轨道倾角/(°)	53	53	53.8	74	81	70

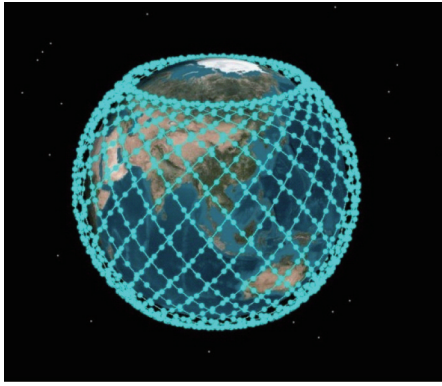


图 1 StarLink 星座构型图

Fig.1 Diagram of the Starlink constellation configuration

表 4 StarLink 第二批轨道设计

Tab.4 Orbit design of the second StarLink constellation

参数	指标		
轨道高度/km	345.9	340.8	335.9
轨道倾角/(°)	53.0	48.0	42.0
卫星数量/颗	2 547	2 478	2 493

2019 年 5 月 16 日美国 SpaceX 公司使用猎鹰 9 号运载火箭,在卡纳维拉尔角空军基地发射的 60 颗 StarLink 测试星现分布在 550 km、倾角 53° 的轨道上,可以推断 StarLink 星座计划的第 1 批已经付诸实施,第 1 阶段、第 2 阶段部署完成后低轨卫星将增至现有数量的 1.5 倍和 2.2 倍。由于第 1 批 StarLink 星座卫星恰分布于低轨空间目标密集的区域,部署完成后势必会给低轨空间的“交通安全”带来新的影响。

2 碰撞风险分析

空间目标碰撞风险分析中常用的方法有最小距离法和碰撞概率法,相对于最小距离法,碰撞概率法虚警概率更低。基于碰撞概率的轨迹安全分析方法,采用碰撞概率作为碰撞危险程度的描述指标,碰撞概率定义为两个位置预报有误差的空间目标发生碰撞的概率。碰撞概率的计算需要用到两个空间目标在相遇时刻的位置、速度和位置协方差矩阵信息。

碰撞概率 P_c 就是两目标中心的距离小于等效半径之和的概率,可以表示为

$$P_c = P(\rho < r) \quad (1)$$

式中: $r = R_1 + R_2$ 为等效半径之和; ρ 为两目标中心的距离,

$$\rho = |\boldsymbol{\rho}| = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 分别为两目标的实际位置矢量,可以表示为两目标的分布中心矢量加上随机误差矢量,即

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_{10} + \mathbf{e}_1, \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_{20} + \mathbf{e}_2 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r}_{10}$ 、 $\mathbf{r}_{20}$ 为分布中心矢量; $\mathbf{e}_1$ 、 $\mathbf{e}_2$ 为随机误差矢量。

经论证^[4],两目标距离达到最小时,它们的相对位置矢量 $\boldsymbol{\rho}(t_{\text{cpa}})$ 和相对速度矢量 $\mathbf{v}_r$ 互相垂直。也就是说,当两目标间的距离最近时,它们处在与相对速度矢量 $\mathbf{v}_r$ 垂直的平面内,定义这个平面为相遇平面(Encounter Plane)^[5]。这样就可以把两物体的位置不确定性投影到相遇平面上,从而将三维问题化为二维问题。

定义相遇坐标系 $o-x_e y_e z_e$, 如图 2 所示。原点在目标 2 的分布中心 o_2 , y_e 轴指向相对速度方向 $\mathbf{v}_r$, x_e 轴和 z_e 轴在相遇平面内, x_e 轴指向目标 1 的分布中心在相遇平面内的投影点, z_e 轴在相遇平面内与 x_e 轴垂直。

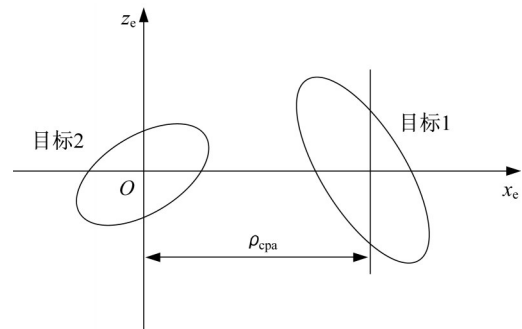


图 2 位置误差在坐标系中的投影

Fig.2 Projection of the position error in the coordinate system

两个三维随机矢量投影到了相遇平面上,两目标在相遇平面内的位置矢量 $\mathbf{X}_1$ 和 $\mathbf{X}_2$ 服从二维正态分布,分布中心分别为 $(0, 0)$ 和 $(\rho_{\text{cpa}}, 0)$, 协方差矩阵分别为 $\text{Var}(\mathbf{X}_1)$ 和 $\text{Var}(\mathbf{X}_2)$ 。由于两物体的位置随机矢量相互独立,故目标 1 对目标 2 的相对位置矢量 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$ 也是二维正态随机矢量,均值为

$$E(\mathbf{X}) = E(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2) = [\rho_{\text{cpa}} \ 0]^T \quad (4)$$

方差矩阵为

$$\text{Var}(\mathbf{X}) = \text{Var}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2) =$$

$$\text{Var}(\mathbf{X}_1) + \text{Var}(\mathbf{X}_2) - 2\text{Cov}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) \quad (5)$$

由 X_1 和 X_2 相互独立得 $\text{Cov}(X_1, X_2) = 0$, 则

$$\text{Var}(X) = \text{Var}(X_1) + \text{Var}(X_2) \quad (6)$$

这样, 就可以把相对位置矢量 X 表示在相遇平面上。

两目标发生碰撞的概率就是它们之间距离小于它们等效半径之和的概率, 即相对位置矢量落入以 $r = R_1 + R_2$ 为半径的圆域的概率。这样, 可以把两目标的大小联合到目标 2 上形成联合球体, 把两目标的位置不确定椭圆联合到目标 1 上形成联合不确定椭圆^[6]。

二维正态分布概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 为

$$f(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma'_x\sigma'_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma'^2_x} + \frac{(z-\mu_z)^2}{\sigma'^2_z}\right)\right] \quad (7)$$

碰撞概率可表示为 PDF 在圆域内的积分:

$$P_c = \iint_{x^2+z^2 \leq r^2} f(x, z) dx dz \quad (8)$$

这样, 就把计算概率的问题转化为求概率密度函数在圆域内的积分问题, 该二重积分在计算机上可以用数值积分求解。

理论和实际分析表明, 对于一定的交会位置、速度、几何条件和目标大小, 碰撞概率会随着位置误差不确定性的增大先增大, 在一定的位置误差条件下达到碰撞概率极大值, 而后碰撞概率随着位置误差的增大而减小。

在实际的工程应用中, 最大碰撞概率的计算十分重要, 因为一般情况下航天器和空间目标的实际位置误差协方差矩阵都是未知的, 或者是只知道他们的误差椭球的形状而不知具体的参数大小, 这时就需要确定最坏情况下的碰撞概率大小。最大碰撞概率可用于空间目标的预筛选, 当最大碰撞概率小于某个设定的门限值时认为该空间目标不会对航天器造成威胁^[7]。2009 年 2 月 10 日的美、俄卫星相撞事件中, 采用国外公布的轨道数据计算的最大碰撞概率为 6.45×10^{-5} ^[8], 似乎这是一个非常小概率的事件, 但由于雷达测量误差、预报误差等因素的影响, 该值在太空碰撞预警中已经是高风险事件了。

3 StarLink 星座影响分析

StarLink 星座卫星第 1 批第 1 阶段的平均轨道高度为 550 km, 美国 SpaceX 公司于 2019 年 5 月 16 日发射了 60 颗测试星, 截至 7 月 1 日, 其中的 52 颗已按计划爬升到预定轨道, 近、远地点分布如图 3 所示。其中的 3 颗在发射时失联, 这 3 颗卫星将继续绕地球运行一段时间, 最终坠入大气层, 其中的 2 颗正常卫星将被用来开展离轨测试, 剩余 3 颗仍在爬升当中。大部分卫星运行在近地点 535~550 km、远地点 540~560 km、倾角 53° 的轨道上, 少数卫星的近地点处于 520~530 km 的高度, 远地点处于 560~570 km 的高度。基于此, 可以大致认为第 1 阶段的其余的 StarLink 星座卫星与测试星在同一空域飞行, 在仿真中参考公布的试验星的 TLE 数据, 依据公布的轨道部署计划设计生成其余卫星的 TLE。将第 1 阶段 StarLink 星座卫星的空间分为 3 个区域进行分析: 区域 1 为 520~530 km 的高度, 少数星座卫星的近地点位于该区域; 区域 2 为 530~560 km 的高度, 是星座卫星主要的运行空间; 区域 3 为 560~570 km 的高度, 少数星座卫星的远地点位于该区域, 由于第 1 阶段已经开始部署, 将作为重点的研究。

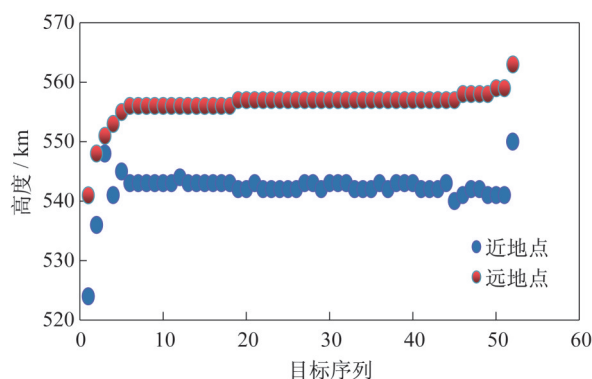


图 3 第 1 批 StarLink 第 1 阶段卫星近、远地点分布图

Fig.3 Perigee and apogee distributions of the first StarLink satellites in the first phase

首先, 针对性地选择以上 3 个区域的 5 颗卫星, 见表 5, 进行碰撞预警计算来研究第 1 批第 1 阶段的 StarLink 星座卫星对 520~570 km 高度范围的卫星带来的碰撞风险。利用美国北美防空联合司令部开发的 SGP4/SDP4 轨道预报模型^[9-10]和 2019 年 1 月 1 日—2019 年 7 月 1 日半年时间内的 TLE 数据, 分别计算 5 颗卫星在星座部署前后与所有低轨目标在 180 d 内的碰撞风险。分别选取 3 个最大碰撞概

率门限: 1×10^{-4} (极度危险)、 1×10^{-5} (很危险)、 1×10^{-6} (危险) 对接近事件进行统计分析。

表 5 选取卫星的基本情况

Tab.5 Basic information of satellite selection

卫星编号	倾角/(°)	远地点/km	近地点/km	区域
17 191	82.4	519	532	1
42 758	43.0	538	546	2
26 702	97.5	533	546	2
14 699	82.5	540	553	2
40 420	97.8	564	568	3

从统计结果可见,对于分别位于区域 1 和区域 3 的卫星 17 191 和 40 420,如图 4 和图 5 所示。

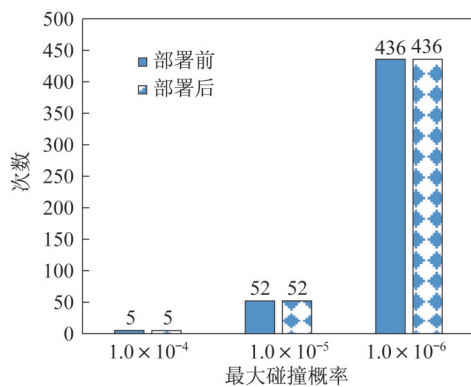


图 4 180 d 内 17 191 卫星最大碰撞概率的次数

Fig.4 Times of the maximum collision probability of 17 191 satellites within 180 d

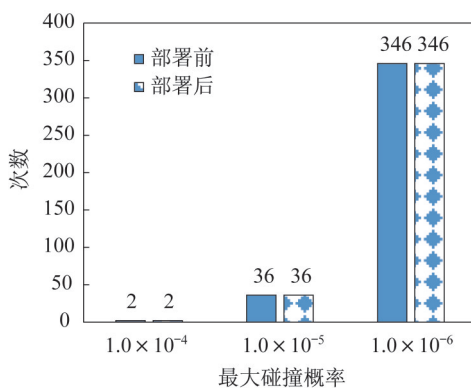


图 5 180 d 内 40 420 卫星最大碰撞概率的次数

Fig.5 Times of the maximum collision probability of 40 420 satellites within 180 d

星座部署前后这 2 颗卫星与其他空间目标的最大碰撞概率进入门限的次数几乎没有差异,这是由于位于区域 1 和区域 3 的 StarLink 星座卫星数目很少,对其他卫星产生的影响非常小。然而对于位于

区域 2 的卫星 42 758、26 702 和 14 699,分别如图 6、图 7 和图 8 所示,星座部署前位于该区域的 3 颗卫星与其他空间目标的最大碰撞概率进入 1×10^{-4} 门限的次数非常少,半年分别为 0 次、3 次和 3 次,星座部署后,进入 1×10^{-4} 门限的次数分别增加到 11 次、20 次和 11 次,可见星座部署后使区域 2 其他卫星进入极度危险的状况增加了数倍;对最大碰撞概率门限 1×10^{-5} ,星座部署前,3 颗卫星进入的次数分别为 16 次、22 次和 40 次,部署后增加至 89 次、236 次和 164 次,可见星座部署后使其他卫星进入很危险的状况大幅度增加,平均几乎 1 颗卫星一两天就会处于 1 次高风险碰撞的情况;对于最大碰撞概率门限 1×10^{-6} ,星座部署前,3 颗卫星每半年进入门限的次数在两三百次,平均每天 1~3 次,星座部署后,每半年进入门限的次数达到了一两千次,平均每天有十几次之多,这意味着平均而言位于该区域的卫星几乎每一圈都会面临碰撞的威胁。

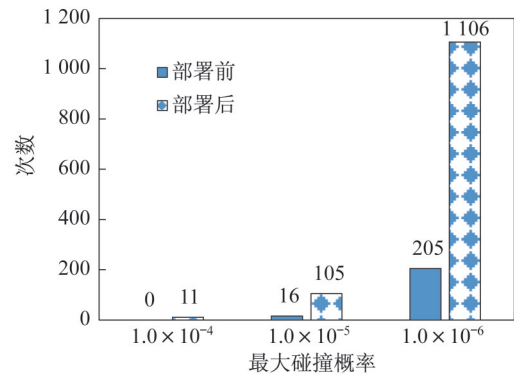


图 6 180 d 内 42 758 卫星最大碰撞概率的次数

Fig.6 Times of the maximum collision probability of 42 758 satellites within 180 d

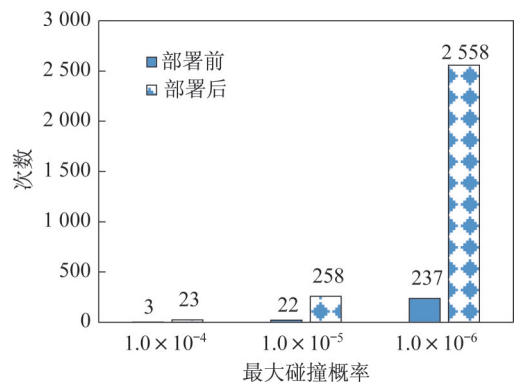


图 7 180 d 内 26 702 卫星最大碰撞概率的次数

Fig.7 Times of the maximum collision probability of 26 702 satellites within 180 d

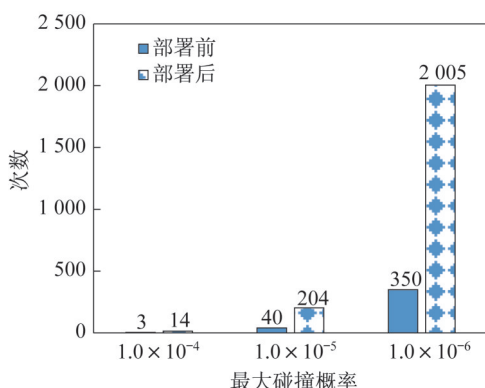


图 8 180 d 内 14 699 卫星最大碰撞概率的次数

Fig.8 Times of the maximum collision probability of 14 699 satellites within 180 d

其次,从碰撞风险角度研究 StarLink 星座卫星第 1 批第 1 阶段部署后对整个 550 km 附近轨道空间带来的影响。空间目标的选择上尽可能考虑这个空间带内所有的空间目标,由于观测能力的限制,非常小的空间碎片不考虑在内,以美国公布的 TLE 数据在该轨道带的所有空间目标为目标集进行 7 d 的碰撞风险性分析。仿真情况如图 9 所示。

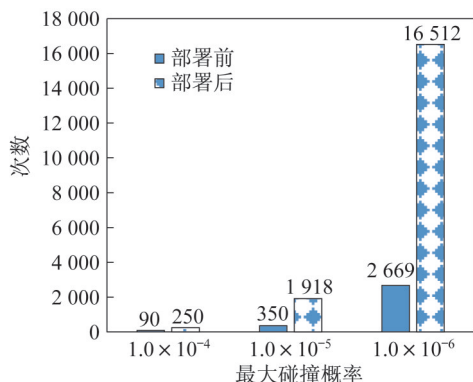


图 9 在轨卫星(550 km 高度带)最大碰撞概率的次数

Fig.9 Times of the maximum collision probabilities of on-orbit satellites at the altitude of 550 km

星座部署前,7 d 内最大碰撞概率进入 1×10^{-4} 门限的事件有 90 次,星座部署后进入 1×10^{-4} 门限的事件增至 250 次。可见星座部署后该区域极度危险的事件发生的次数几乎增长了近 3 倍,碰撞事件一旦发生,产生的连锁反应会严重威胁未来几年这个轨道带所有航天器的安全,同时也给进入更高轨道的航天器带来了威胁,3 倍的增长量必须敲响警钟。对 1×10^{-5} 门限和 1×10^{-6} 门限,星座部署前,7 d 内最大碰撞概率进入门限分别 350 次和

2 669 次;部署后,7 d 内最大碰撞概率进入门限分别 1 918 和 16 512 次。可见随着门限量级的缩小,进入门限内的次数呈现量级反比的增长,星座部署后其进入门限的次数比部署前几乎增长一个量级。

按照计划,StarLink 星座卫星第 1 批第 2 阶段将部署于 1 100~1 325 km 轨道高度空间,选择美国公布的 TLE 数据在轨道高度 1 000~1 500 km 的所有空间目标研究星座部署后对这个范围轨道空间 7 d 内的碰撞风险进行研究。如图 10 所示,第 2 阶段星座部署后对相应轨道空间产生的影响没有第 1 阶段产生的影响明显,这是由于第 2 阶段选择的轨道高度和倾角的附近空间目标较少。但仍能发现,在相同的门限下,部署后进入门限的次数比部署前高出一个量级;随着门限量级的减小,进入门限的次数呈量级反比的增长。

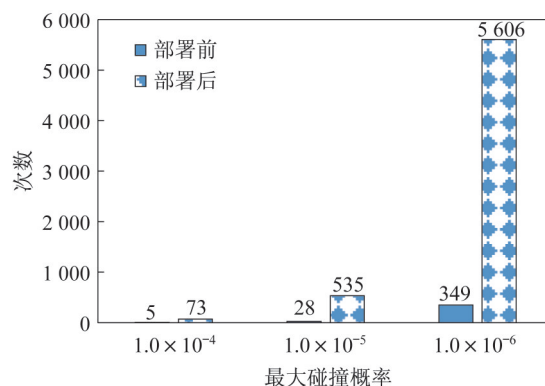


图 10 在轨卫星(1 100 km 高度带)最大碰撞概率的次数

Fig.10 Times of the maximum collision probabilities of on-orbit satellites at the altitude of 1 100 km

第 2 批 StarLink 星座卫星按计划将部署于高度 340 km 附近轨道空间,该轨道范围内航天器非常少,一旦发生太空交通事故,残骸可以尽快陨落,这里对第 2 批 StarLink 星座卫星部署后对碰撞风险产生的影响暂不做研究。

StarLink 星座卫星完全部署后将位于不同高度的轨道空间,由于卫星数量多、轨道机动频繁,不可避免地会出现卫星故障、失效等问题,从而使卫星失去轨道机动能力而滞留太空,更有甚者一旦某颗 StarLink 星座卫星与其他空间目标发生碰撞,其残荷与产生的空间碎片亦会滞留太空,在没有太空垃圾清理的能力下,这些废弃物只能靠自然陨落。在地球非球形和大气阻力情况下,考虑 StarLink 星座卫星所在轨道高度范围,通过陨落预报计算得出的

不同高度的空间目标自然陨落时长,见表 6。330~350 km 轨道空间的空间目标在 1 个月的时间内可以坠入地球,因此,对太空安全的影响持续期短;520~570 km 轨道空间卫星需要数年才可以坠入地球,该轨道带又是航天器密集区域,因此,对太空安全会带来较大的隐患;1 100 km 以上的轨道空间,空间目标自然陨落需要数百年的时间,因此为太空安全埋下了长期的定时炸弹。

表 6 不同高度空间目标自然陨落时长
Tab.6 Natural falling time of space targets at different altitudes

轨道高度/km	陨落时长
330	约 19 d
350	约 30 d
520	约 22 个月
570	约 51 个月
1 110~1 325	远超 100 a

4 思考与建议

1) 根据 StarLink 试验星的发射运行情况,至今有 15 颗卫星的近地点掉高在 1~10 km 之间,另外还有 7 颗卫星轨道误差超过 50 km。可以推测,如果数以万计的星座卫星发射升空一定存在发射失败、部分卫星失效或者轨道机动出现大误差的情况,同时这些星座卫星寿命短、回收难,容易形成太空垃圾,必然会对其他在轨航天器造成碰撞威胁。

2) StarLink 星座卫星在离轨处置时,其 95% 以上的部件可在再入大气时烧毁,但由于其数量多、寿命短,其再入过程会威胁地面居住地和设施安全。

3) 对于航天器密度大的星座而言(如 StarLink 计划、OneWeb 计划等),从碰撞安全角度考虑,其他航天器都要尽量避免部署于或者经过其所在区域,同时星座卫星位于从低到高分层的低轨空间,对其他航天器的发射入轨与返回带来了较大的风险。

4) 为了避免太空碰撞的发生,需要利用地基和天基设备进行空间目标探测。地基探测是空间目标探测数据的主要来源,但其受测站部署位置限制,无法达到对空域、时域的无缝覆盖;天基探测方法分辨率高,但其成本高且体积功率受限。因此,提高空间目标探测能力具有重要意义。针对于大批量目标的编目管理可借鉴美“太空篱笆”系统,增

加空间目标探测容量,提高空间目标探测精度和时效性,针对于发生碰撞后短期无观测数据的情况,加强碰撞碎片短期演化风险分析,为航天器规避提供参考^[11]。此外,发展航天器自主规避技术、高效且低成本的太空垃圾回收技术等也是可以拓展的解决方案。

5) 空间碎片在空间目标的数量中占绝大多数,且逐年递增,尤其是在诸如 2009 年 2 月 11 日美、俄卫星相撞事件等重大空间碰撞事件发生后,碎片数量都会急剧增加^[2]。若在高密度的星座卫星空间发生碰撞事件,则更可能会引起空间碎片成爆炸式膨胀。就当前技术而言,大规模回收太空垃圾面临较大的困难,这会对同轨道带的其他航天器造成严重威胁,并且随着自然陨落还会对处于更低轨道空间的航天器造成数年乃至数十年的威胁。因此,亟需完善新型空间碎片回收技术,如空间碎片网捕法^[12]、绳系拖拽法^[13]、激光辐照法^[14]、运载火箭末级钝化处理^[15]等。

5 结束语

微小卫星组网开展航天任务能带来很大的经济效益与社会效益,已经开始实施的 StarLink 星座计划部署完毕后将在低轨空间部署 1 万多颗卫星,OneWeb 公司计划在太空投放 4 000 多颗微小卫星,这类大型星座计划全部实现,低轨空间将呈现更加拥挤的状态。本文通过仿真对比了 StarLink 星座部署前后的低轨空间航天器进入碰撞预警门限的次数变化情况,可见 StarLink 星座部署后将极大增加附近轨道航天器的碰撞风险,而一旦发生卫星相撞,产生的空间碎片又会产生一系列连锁反应,造成进一步的安全隐患,对卫星的安全防护及碰撞预警带来了新的挑战。为了太空安全和可持续发展,大型星座的部署需要慎重。

参考文献

- [1] 李亮,王洪,刘良玉,等.微小卫星星座与编队技术发展[J].空间电子技术,2017,14(1):1-3.
- [2] 张荣之,杨开忠.航天器飞行防碰撞预警技术[M].北京:国防工业出版社,2017.
- [3] 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.

(下转第 148 页)