0254-6124/2011/31(4)-520–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yang Xu, Liu Jing, Wang Ronglan, Yu Youcheng. Collision prediction analysis using refined error data. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 520-526

利用精化误差进行危险交会分析

杨 旭 刘 静 王荣兰 于友成

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 空间碎片碰撞预警工作主要针对的是可监测的较大空间碎片, 预测航天器与碎片之间的碰撞风险, 并根据一定的预警判据来评估风险的大小, 进而做出合理的轨道规避决策. 碰撞概率是碰撞风险评估的重要依据. 复合体尺寸、交会距离和误差是影响碰撞概率的三个决定性因素. 当复合体尺寸与交会距离差别不大时, 误差因素对碰撞概率结果起着决定性的作用. 在利用整天误差计算碰撞概率的基础上, 提出了利用精化误差计算碰撞概率的方法, 在危险交会分析中取得了良好的效果.

关键词 空间碎片, 碰撞概率, 误差处理, 精化误差

中图法分类号 V 556

Collision Prediction Analysis Using Refined Error Data

YANG Xu LIU Jing WANG Ronglan YU Youcheng

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract With the expansion of human's activity in the outer space, the population of the space debris has grown greatly. Several collisions and breakup events in the recent period increased the total number of space debris sharply. These debris are causing serious threat to orbital spacecraft, and efficient protection must be done to deal with the growing collision risk. Space debris collision avoidance job mainly aims at big space debris that can be monitored, and predicting the collision risk between spacecraft and space debris and then evaluating the risk through certain collision criterion. So a reasonable orbit maneuver decision can be made to perform any necessary mitigate action to avoid possible collisions. Collision probability is the primary index to evaluate collision risk. The combined object size, the minimum distance and errors are main factors affecting collision probability. When the combined object size and the minimum distances are not different significantly, error data will be the crucial factor affecting collision probability. This paper brings forward a method of using refined error data to compute collision probability on the basis of whole day errors. And this method makes improvement in analyzing possible collisions.

Key words Space debris, Collision probability, Error manage, Refined error

2010-02-01 收到原稿, 2011-04-21 收到修定稿

E-mail: yangxu@nao.cas.cn

1　引言

随着人类航天活动日益频繁, 空间碎片的数量逐年上升. 近期, 包括美俄卫星碰撞在内的几次大的空间碰撞和解体事件更是使得空间碎片数量大幅增加, 严重威胁到在轨航天器的安全 [1]. 危险目标与航天器的相对速度平均可达 10 km/s, 所以一旦发生碰撞, 后果十分严重. 对在轨航天器进行碰撞预警是避免发生碰撞的最有效办法. 空间碎片的碰撞预警主要是针对能够被监测的直径大于 10 cm 的碎片. 通过计算, 并根据一定的碰撞判据来评估在轨航天器的碰撞风险, 以确定航天器是否需要进行规避机动来避免与空间碎片发生碰撞.

碰撞概率 (P_{c}) 是当前普遍采用的碰撞判据. 碰撞概率不仅考虑了轨道预报方面的误差, 还考虑了空间交会物体的轨道特征, 交会时刻双方的距离、交会角度以及相对速度. 基于一定假设建立数学模型, 通过考虑这些交会参量的相互关系, 最终得到碰撞概率来评估空间碰撞的风险.

由于观测数据和轨道预报都会存在误差, 编目物体在任一时刻的位置数据都有误差, 实际物体的位置包含在一个误差椭球之内. 基于交会物体二者误差相互独立的假设, 将二者尺寸复合到同一个物体上, 得到如图 1 所示的交会情况. 在交会平面上的联合球体区域内对二维概率密度函数进行积分, 便可得到碰撞概率的值. 这与在三维球体内进行积分得到的值是一致的. 此时碰撞概率的计算公式为

$$P_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\int_{r_{\mathrm{a}}}^{-r_{\mathrm{a}}}\int_{-\sqrt{r_{\mathrm{a}}^2-x^2}}^{\sqrt{r_{\mathrm{a}}^2-x^2}}\times$$
$$\exp\Big\{-\frac{1}{2}\Big[\Big(\frac{x-x_m}{\sigma_x}\Big)^2+\Big(\frac{y-y_m}{\sigma_y}\Big)^2\Big]\Big\}\mathrm{d}y\mathrm{d}x.$$

碰撞概率算法的基本公式需要进行二维积分. 为了能够简化计算过程, 提高计算效率, 保持计算精度, 近年来出现了多种碰撞概率的计算方法. 当前主要的计算方法有 4 种, 分别为 Foster 方法 [2]、Chan 方法 [3]、Patera 方法 [4] 和 Alfano 方法 [5−6]. 就目前的观测能力而言, 4 种方法都能够满足碰撞分析的精度要求. 一般情况下, 4 种方法计算得到的 (P_{c}) 值并无明显差异.

2　影响碰撞概率的因素分析

由碰撞概率的计算方法可知, 其影响因素主要有交会目标尺寸、交会关系、交会距离、误差等 [7]. 对于同一组交会, 利用不同时间更新的轨道数据计算得到的交会角、相对速度、交会时间等交会关系量基本稳定.

由于碰撞概率的计算公式是在复合体区域内进行积分的, 碰撞概率受复合体半径的影响很大, 而复合体的大小由交会目标的尺寸确定, 所以尺寸对碰撞概率有着显著的影响. 用 TLE (Two Line Elements) 数据进行碰撞预警时, 交会距离和误差是影响碰撞概率大小的另外两个决定性因素. 投影距离的大小和方向决定积分区域的位置, 而误差投影决定概率密度函数的大小和在各个方向上的差异. 距离及误差两个因素共同作用决定了积分区域的位置和概率密度.

2.1　复合体尺寸对碰撞概率的影响

复合体的大小由交会目标的尺寸确定, 因此目标尺寸对碰撞概率具有显著的影响. 图 2 为在误差投

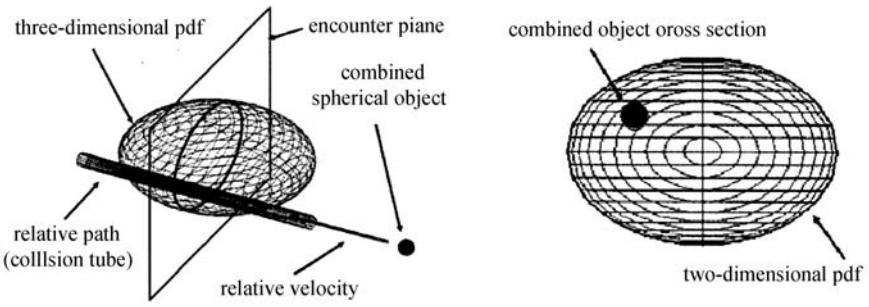


图 1　碰撞概率计算示意

Fig. 1　Collision probability computing illustration

影长短轴分别为 0.5 km, 0.25 km, 交会距离为 0.01 km, 交会距离投影方向沿误差主轴方向的条件下, 不同复合体尺寸计算得到的碰撞概率变化情况. 从图 2 可以看出, 碰撞概率随复合体半径增大而迅速增大, 大致趋势为当复合体半径增大一个量级时, 碰撞概率增大两个量级. 一般由于当前多数空间物体的尺寸信息无法获得, 所以对所有目标都采取统一尺寸. 这里将不再分析尺寸对碰撞概率的影响.

2.2 交会距离对碰撞概率的影响

交会距离是指两个交会目标间的最近距离, 也就是在相对速度矢量垂直于相对位置矢量时刻两者间的瞬时距离. 交会距离与交会平面上的投影距离大小相等.

通常, 在误差不变、投影距离方位角不变的情况下, 投影距离越大则积分区域内的概率密度函数值越小, 积分所得的碰撞概率值也就越小. 图 3 所示为在

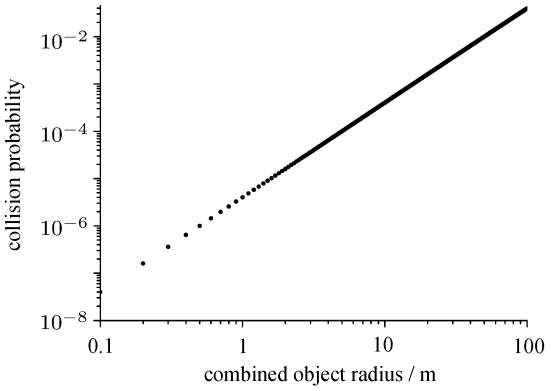


图 2 碰撞概率与复合体半径的关系

Fig. 2 Relationship between collision probability and the combined object radius

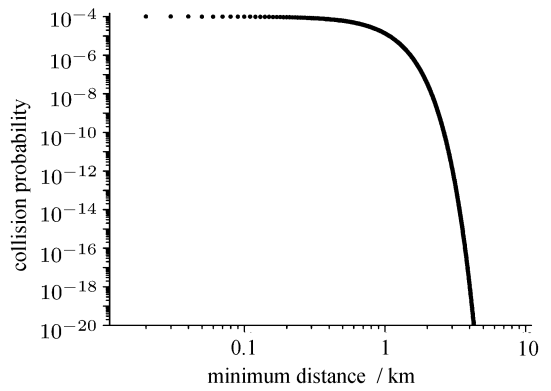


图 3 碰撞概率与交会距离的关系

Fig. 3 Relationship between collision probability and the minimum distance

误差投影长短轴分别为 0.5 km, 0.25 km, 复合体半径为 5 m, 交会距离投影方向沿误差主轴方向的条件下, 不同交会距离计算得到的碰撞概率变化. 在交会距离小于 1 km 时碰撞概率变化相对缓慢, 而交会距离大于 1 km 后碰撞概率急剧减小. 碰撞概率与交会距离存在较强的依赖关系. 但是, 当同一组交会利用不同的轨道根数计算得到的交会距离差别不大时, 误差因素就会成为影响碰撞概率计算结果的主要因素.

2.3 误差对碰撞概率的影响

本文所讨论的误差均为 TLE 数据的总体误差. 在进行轨道预报时所采用的模型是 SGP (Simplified General Perturbation) 预报模型. 误差大小对碰撞概率的影响关系较为复杂, 一般来讲, 在交会距离不变的条件下, 误差由小变大会致使碰撞概率先增大后减小 [8−9]. 图 4 所示为当复合体半径为 5 m, 交会距离为 1 km, 投影误差长短轴相等时, 改变误差投影长轴计算得到的碰撞概率变化情况. 可见碰撞概率随误差增大呈现先增大后减小的变化趋势. 其中, 碰撞概率取到最大值时对应的交会距离和误差大小相当. 误差的大小是由数据精度和预报模型等因素决定的, 其不是本文讨论的重点. 这里主要针对误差处理模式进行研究分析, 并提出精化误差的处理模式.

3 精化误差方法

3.1 一般误差处理方法

利用数据库中长期的轨道数据, 把大量的预报数据与发布数据进行对比, 通过统计分析即可得到对于

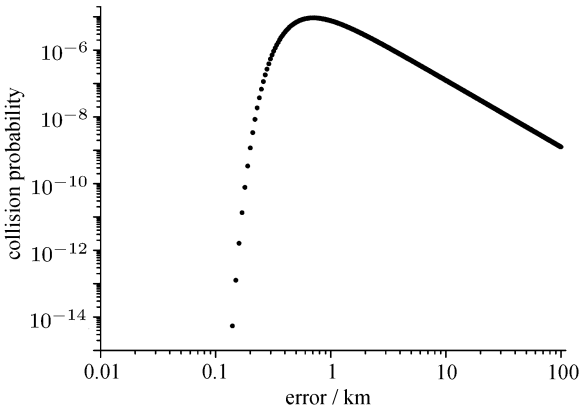


图 4 碰撞概率与误差关系

Fig. 4 Relationship between collision probability and the error

该轨道的总体误差 [10−12]. 这里的总体误差为统计误差, 是根据大量的样本得到的. 由于数据量的限制, 为保证误差数据的可靠性, 一般只计算预报期为整天的误差. 在进行预报时, 根据实际的预报期, 寻找最相近的整天误差作为实际计算碰撞概率时采用的误差. 所以这里的误差与实际预报期的误差是有差别的. 正是由于这种差别, 有时会使预警结果产生很大的差异.

对于重点关注卫星的危险交会, 需要及时跟踪, 详细分析碰撞概率变化趋势, 给出准确的风险评估结果. 在这种情况下, 采用整天误差计算得到的碰撞概率结果有时无法满足预警的需求, 尤其是在预报期较小的情况下.

精化误差方法正是为解决这种问题而提出的新的误差处理模式. 其基本思路是将原来分散的误差数据点用连续的拟合误差代替, 这样就能够用准确的预报期来确定每一条数据自己的误差大小, 得到更加精确的碰撞概率计算结果. 精化误差对碰撞概率计算结果的改进在小预报期时尤为明显, 可为碰撞风险评估提供更加及时、准确的依据.

3.2　误差精化方法及实例

首先利用数据库中的大量数据, 得到整天预报期的误差数据, 而后就这些误差数据进行分析, 拟合出误差大小, 用于碰撞预警计算. 需要说明的是, 数据量越大越有利于误差的处理. 如果数据偏少, 误差结果在大的趋势上不会有变化, 但精度会受影响.

下面以编号为 33320 (NORAD 编号) 的卫星为例, 介绍如何精化误差.

为了得到精化的误差, 首先计算危险目标在 15 天内的整天误差. 同时, 由于小预报期的计算结果对于风险评估影响颇大, 在数据量允许的情况下还应该计算小预报期 (< 0.5 天) 的误差. 对这些误差结果进行二次多项式拟合, 得到误差和预报期的关系式, 这样就能够得到不同预报期的误差拟合值. 用精化误差进行计算, 便可得到更加精确的碰撞概率.

对误差采取二次多项式拟合的原因是由于对于比较低的轨道, 误差大小的主要影响因素是大气阻力, 而大气阻力对位置的影响关系式为二次式. 采用二次多项式拟合误差的相关系数均接近于 1. 大量的碰撞预警计算表明, 二次多项式拟合误差可以满足预警需求. 表 1 给出了编目物体 33320 于 2009 年 4 月的误差数据 (文中所有轨道数据均为 TLE 数据). 三个方向的误差如图 5 所示. 最终, 三个方向的误差与预报期的拟合关系式如下.

U 方向: $y = 0.0044x^2 + 0.0913x + 0.0407$.

N 方向: $y = -0.0007x^2 + 0.0514x + 0.00004$.

W 方向: $y = -0.0008x^2 + 0.0262x + 0.0049$.

将不同的预报期代入三个方向误差的拟合式中, 便可得到各个预报期的精化误差. 表 2 给出了编目物体 33320 某次危险交会的部分精化误差数据.

对发生危险交会的两个编号数据都采用精化误差, 这样计算得到的碰撞概率结果更加精确, 能够对危险交会做出更为准确的风险评估. 下面将详细介绍两个精化误差进行精准预警分析的实例.

表 1　编目物体 33320 于 2009 年 4 月的误差计算结果

Table 1　Error data of Object 33320 in April 2009

预报期/天	误差/km			预报期/天	误差/km		
	U 方向	N 方向	W 方向		U 方向	N 方向	W 方向
0.1	0.0417	0.0172	0.0098	6	0.7690	0.2822	0.1344
0.2	0.0475	0.0129	0.0096	7	0.8290	0.3253	0.1494
0.3	0.0619	0.0154	0.0132	8	1.0400	0.3659	0.1651
0.4	0.0675	0.0178	0.0149	9	1.2656	0.4055	0.1798
0.5	0.0789	0.0199	0.0157	10	1.4179	0.4436	0.1896
1	0.1553	0.0455	0.0276	11	1.5342	0.4806	0.1965
2	0.3050	0.0998	0.0540	12	1.7593	0.5123	0.2012
3	0.3429	0.1464	0.0766	13	1.9867	0.5444	0.2055
4	0.4416	0.1924	0.0988	14	2.1929	0.5759	0.2151
5	0.6310	0.2368	0.1175	15	2.3906	0.6070	0.2285

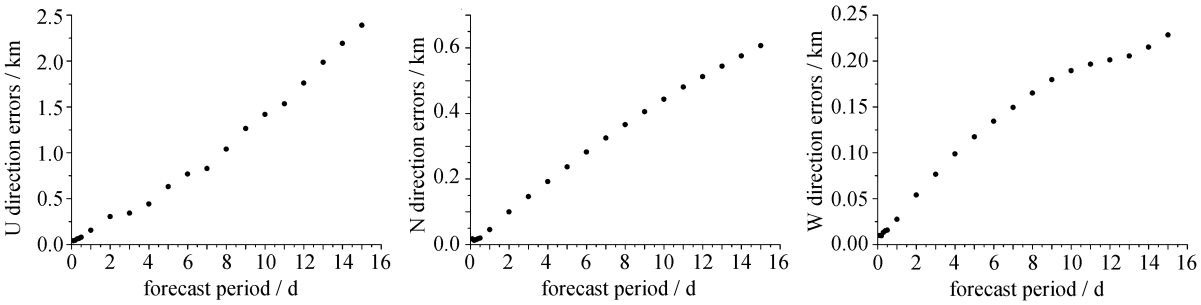


图 5 编目物体 33320 三个方向的误差

Fig. 5 Errors of Object 33320

表 2 编目物体 33320 精化误差

Table 2 Object 33320 refined error data

根数时间 (UTC)	预报期/天	误差/km		
		U 方向	N 方向	W 方向
2009-05-03 03:45	0.1847	0.0577	0.0094	0.0097
2009-05-02 21:14	0.4563	0.0833	0.0233	0.0167
2009-05-02 17:59	0.5917	0.0963	0.0301	0.0201
2009-05-02 11:28	0.8632	0.1228	0.0438	0.0269
2009-05-02 03:20	1.2021	0.1568	0.0607	0.0352
2009-05-01 20:49	1.4736	0.1848	0.0742	0.0418
2009-05-01 11:03	1.8806	0.2280	0.0941	0.0513
2009-05-01 02:54	2.2201	0.2651	0.1106	0.0591
2009-04-30 22:01	2.4236	0.2878	0.1204	0.0637
2009-04-30 17:08	2.6271	0.3109	0.1302	0.0682
2009-04-30 10:38	2.8979	0.3422	0.1430	0.0741

4 利用精化误差进行危险交会分析实例

4.1 在轨卫星 33320 危险交会分析

预报发现卫星 33320 与俄罗斯 OKEAN4 卫星 (编号 23317) 可能会在 2009 年 5 月 3 日 08:11:15.99 UTC 发生一次危险交会, 碰撞概率为 1.83×10^{-4}, 最近距离为 0.09 km, 相对速度为 15.05 km/s, 交会角为 176.79°. 2009 年 4 月 26 日至 5 月 3 日更新的 TLE 数据的连续分析结果表明, 二者交会时间和几何关系稳定, 碰撞概率随数据更新时间先增大后减小. 利用不同时间更新的数据, 分别采取整天误差和精化误差计算得到碰撞概率的变化曲线如图 6 所示.

在交会发生后, 利用事后更新的 TLE 数据进行此次碰撞的验证计算, 其交会时间和几何关系与预报结果并无差异, 碰撞概率结果列于表 3.

分析采用两种误差计算的碰撞概率趋势以及事后验证概率值, 可得出以下几点结论.

(1) 整体而言, 两次计算的碰撞概率结果均呈现先增大后减小的趋势. 采用整天误差计算的碰撞概率

表 3 不同历元根数对应的碰撞概率

Table 3 Collision probability results using later TLE data

根数时间 (UTC)	碰撞概率
2009-5-3 10:10	2.14×10^{-11}
2009-5-3 11:53	1.68×10^{-10}
2009-5-3 16:38	1.42×10^{-10}
2009-5-3 18:24	2.08×10^{-10}
2009-5-3 21:39	2.75×10^{-11}

随数据更新时间呈明显分段跳跃, 而精化误差后的碰撞概率更加光滑连续, 有助于进行风险评估.

(2) 整天误差计算结果中, 开始出现碰撞概率 $P_c > 10^{-4}$ 的时间为 2009 年 4 月 28 日 16:47:35 UTC, 而精化误差计算结果中开始出现 $P_c > 10^{-4}$ 的时间为 2009 年 4 月 27 日 12:37:59 UTC. 由此可见, 采用精化误差后的计算结果能够更早地发现危险交会, 以便有更充足的时间进行跟踪分析.

(3) 整天误差计算结果中, 直到最后的交会时刻前, 碰撞概率仍然大于 10^{-4}, 危险没有解除. 而精化误差的计算结果中, 从 5 月 1 日下午开始的计算结果碰撞概率均小于 10^{-4}, 并不断呈减小趋势, 到交会前碰撞概率已经降到了 10^{-10} 量级. 表 3 给出的事后验证结果表明, 发生碰撞的概率很小, 事实上, 交会两者擦肩而过并没有发生碰撞. 精化误差计算在交会时刻之前两天左右就能够解除危险警报, 这样就保证了有充足的时间做出恰当的规避决策. 这也是精化误差计算结果最重要的实际意义之一.

4.2　在轨卫星 33446 危险交会分析

预报发现卫星 33446 与俄罗斯 SL-14 火箭残骸 (编号 18153) 会在 2009 年 4 月 23 日 06:32:32.41 UTC 发生一次危险交会, 碰撞概率为 1.35×10^{-4} , 最近距离为 0.25 km, 相对速度为 15.08 km/s, 交会角为 179.56°. 4 月 15 日至 22 日更新的 TLE 数据的连续分析表明, 交会时间和几何关系稳定. 碰撞概率随数据更新时间先增大后减小. 利用不同时间更新的数据, 分别采取整天误差和精化误差计算得到的碰撞概率变化如图 7 所示. 对比采用两种误差计算得到的碰撞概率结果, 可以得到如下结论.

(1) 两种误差计算的结果大体都呈现先增大后减小的趋势, 最终交会风险解除. 与上例相同, 精化误差计算结果更加光滑、连续.

(2) 在整天误差计算结果中, 有 7 条 $P_c > 10^{-4}$, 达到警戒区域. 而精化误差的计算结果中没有超过

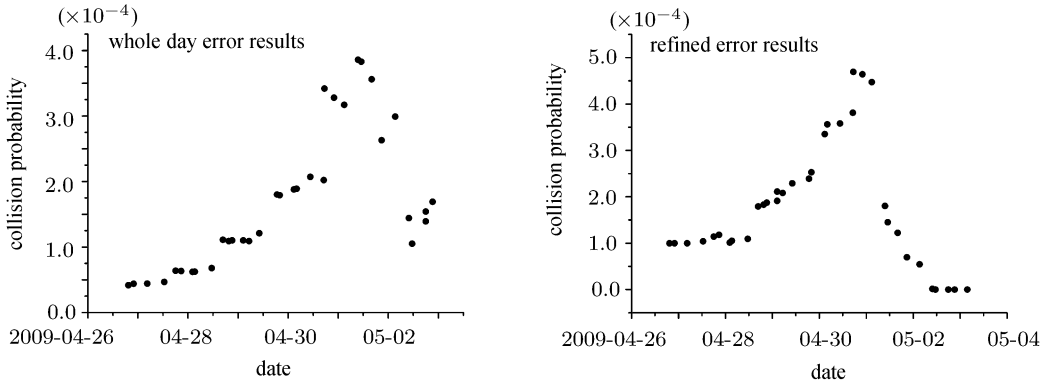


图 6　编目物体 33320 危险交会碰撞概率

Fig. 6　Collision probability of Object 33320

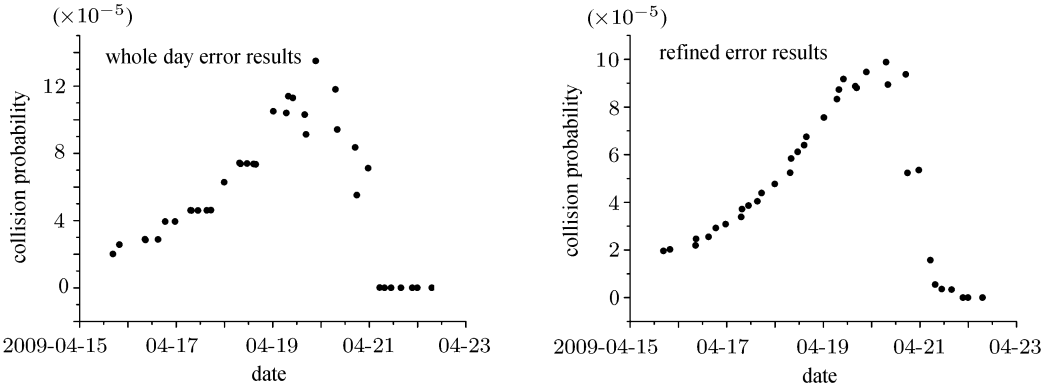


图 7　编目物体 33446 危险交会碰撞概率

Fig. 7　Collision probability of 33446

10^{-4} 的, 始终处于安全区域. 也就是说, 整天误差计算结果认为, 此次交会的 P_c 值已超过危险阈值, 而精化误差计算结果认为此次交会相对安全. 鉴于 P_c 值最终降到安全阈值以下, 碰撞没有发生, 说明用精化误差计算可以避免这次虚警.

5 结论

研究结果表明, 采用精化误差进行危险交会分析对碰撞概率的计算结果有明显改进. 精化误差的计算结果通常要比整天误差的结果光滑、连续, 对实际碰撞风险并不高的交会能够及时解除警报, 有效避免虚警.

据文献 [13] 统计, 2008 年法国卫星发生过 344 次危险交会, 最终进行了 4 次轨道规避, 其余多是在交会前解除了危险警报. 这说明常规预警发现的绝大多数危险交会是不需要进行轨道规避的, 精准预报的目的就是要更加准确地评估危险交会的风险. 对于一次危险交会而言, 从发现跟踪到做出规避决策需要尽可能长时间的数据支持, 越早发现危险交会就能越早采取密切跟踪分析, 越有利于规避决策. 而对于风险小的危险交会, 则越早解除警报越好, 这样就能够留下充足的时间, 以便做出恰当的决策.

利用本文介绍的精化误差处理方法进行危险交会分析能够有效避免一些虚警, 及早发现危险交会, 并及早解除风险小的危险交会警报, 实现更为精确的碰撞预警. 需要说明的是, 精化的误差必须依赖长时间的高质量数据, 数据质量直接影响误差大小, 长期的数据库建设对碰撞预警工作意义重大.

参考文献

[1] Du Heng, Zhang Wenxiang, Pang Baojun, Liu Jing. Space Debris [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007. In Chinese (都亨, 张文祥, 庞宝君, 刘静. 空间碎片 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007)

[2] Foster J L, Estes H S. A Parametric Analysis of Orbital Debris Collision Probability and Maneuver Rate for Space Vehicles [R]. NASA/JSC-25898. 1992

[3] Chan K. Improved analytical expressions for computing spacecraft collision probabilities [J]. *Spacef. Mech.*, 2003, **114**(1-3):1197-1216

[4] Patera R P. General method for calculating satellite collision probability [J]. *J. Guid. Cont. Dyn.*, 2001, **24**(4): 716-722

[5] Alfano S. A numerical implementation of spherical object collision probability [J]. *J. Astron. Sci.*, 2005, **53**(1):103-109

[6] Alfano S. Review of conjunction probability methods for short-term encounters [J]. *Spacefl. Mech.*, 2007, **127**(1-2):25

[7] Cheng Tao. Collision probability analysis and application of cataloged space debris [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006. In Chinese (程陶. 编目空间碎片的碰撞概率方法研究及应用 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006)

[8] Feng Hao. Analysis and research for space debris collision probability and its threshold [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. In Chinese (冯昊. 空间碎片碰撞概率及其阈值分析和研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008)

[9] Alfano S. Relating position uncertainty to maximum conjunction probability [J]. *J. Astron. Sci.*, 2005, **53**(2):163-205

[10] Wang Ronglan, Liu Jing. SGP4-SDP4 propagation error analysis [R]. Beijing: The 3rd China Space Debris Symposium, 2005. In Chinese (王荣兰, 刘静. SGP4-SDP4 轨道预报误差分析 [R]. 北京: 第三届全国空间碎片专题研讨会, 2005)

[11] Wang R, Liu J, Zhang Q M. Propagation error analysis of TLE data [J]. *Adv. Space Res.*, 2009, **43**:1065-1069

[12] Matney M J, Anz-Meador P, Foster J L. Covariance correlation in collision avoidance probability calculations [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**:1109-1114

[13] Klinkrad H, Alby F, Crowther R, Gronert-Marquardt H, Portelli C. Space Debris Activities in Europe [R]. Darmstadt, Germany: Fifth European Conference on Space Debris, 2009