第24卷 第6期 空 间 科 学 学 报 Vol.24, No.6
2004 年 11月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Nov., 2004

空间碎片碰撞预警研究 *

刘 静 王荣兰 张宏博
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)
肖 佐
(北京大学地球物理系)

摘 要

介绍了空间碎片的分布和危害，阐明了航天器进行碎片预警规避的必要性，讨论了碎片碰撞预警技术中的关键问题，用已有的碰撞和规避实例对自行研制的软件进行了计算检验，结果证明了软件的正确性，也说明了国内进行碎片预警工作的可行性.

关键词 空间碎片；碰撞预警规避；软件测试

1 引言

空间碎片是人类遗留在空间的废弃物，包括完成任务的火箭箭体和卫星本体、火箭的喷射物、在执行航天任务过程中的抛弃物、空间物体之间碰撞产生的碎片 [1] 等. 从 1957 年发射第一颗人造地球卫星开始，空间碎片就在不断地积累，碎片的大小从微米级到米级. 这些物体分布在从 LEO 到 GEO 的区域，其密集区正是常用的航天器轨道，这些碎片与目标航天器的相对速度可能达到 10 km/s 或更高，一旦碰撞发生，后果严重，影响巨大. 这对人类航天活动是巨大的威胁.

对于毫米级以下的小碎片，由于探测限制，无法知道其确切轨道，只能够根据有限的航天器返回样本，得知其统计分布. 由于尺寸小，可以用屏蔽的方式防御其对航天器的碰撞. 但对于尺寸大于 2—4 cm 粒子的高速碰撞，对它们提供屏蔽保护是不实际的，惟一的解决办法是变轨规避. 因为根据碎片自身运动特点和特性，可以知道，即使是 1 cm 的碎片就有可能对航天器造成破坏性损伤 [2]. 可以这样粗略估计：直径 1 cm 的小铝粒当以 10 km/s 的速度运行时，其动能相当于一辆时速 50 km/h 的小轿车，如此大动能的物体如果撞击航天器，猛烈撞击所造成的损伤是巨大的，一般的屏蔽防护层无法抵御，因此对航天器来说是致命的. 如果是更大碎片与航天器遭遇，危害程度不言而喻.

历史上确有因空间碎片撞击而导致航天器失效的事例. 法国 1995 年 7 月 7 日发射了电子侦察卫星 CERISE, 它是倾角 98° 的太阳同步轨道，轨道高度 666 km. 1996 年 7 月 24 日，该卫星与 1986 年发射的 Ariane 火箭的残骸相撞，撞击时相对速度达到 14 km/s. 撞击的结果是卫星的重力梯度稳定杆被撞断，卫星姿态失去控制，之后很快失效.

近年来，随着人类空间活动的增加，在轨碎片和航天器不断增多. 美国长期以来利用自己的空间监视网 SSN, 对在轨物体进行连续跟踪. 根据空间监视网的数据记载，1999 年

* 国家自然科学基金重点资助项目 (40134020), 空间碎片专项研究资助项目 (KJSP-2003-0203) 共同资助
2003-12-26 收到原稿， 2004-07-11 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

的在轨编目物体有 8000 多个，而当 2003 年 11 月 30 日时，空间监视网总共观测到的在轨运行的大于 10 cm 的空间碎片为 9300 多个 *，4 年间在轨编目物体增加了 1000 多个，相互发生碰撞的概率显然大大增加，航天器的被撞击风险也大大增加.

实际上，为了确保航天器在任务期的安全运行，对于目前能够跟踪的物体，可以利用探测数据进行轨道预测，预测它们与工作航天器之间是否会有碰撞发生，通过适时变轨保证它不受碰撞，这已经成为国外航天技术发达国家航天器安全保障的一项常规项目.

我国目前在轨航天器还没有将大碎片碰撞预警作为一项安全保障内容，但已经开始考虑并研究这一问题. 计划在十一五期间发射大量应用卫星，现有碎片环境对计划发射卫星和现有工作卫星的安全可靠运行存在碰撞威胁，为保障卫星的安全可靠发射和在轨运行，尤其对于载人航天器和长期运行航天器进行碎片碰撞预警显然是必要的. 因此必须充分了解现有碎片的运行状况，研制可用于工程的预警规避系统，为卫星主动规避碎片碰撞提供实用预测和警报工具.

2　国外现状

2.1　美国空间监视网 —— 探测跟踪系统

美国空间监视网探测、跟踪、编目和识别围绕地球运动的人造物体，包括还在工作的和停止工作的卫星、废弃的火箭箭体或解体的碎片等. 空间监视网主要任务是：预报何时何地空间物体将再入大气陨落；防止一个返回的空间物体在美国国家反导弹预警系统触发假警报；描绘空间物体当前位置，预报其轨道径迹；探测新的人造空间物体；编制动态的人造空间物体目录；确定再入物体的拥有国家；通知 NASA 是否有物体将接近、碰撞或干扰航天飞机或和平号空间站.

美国空间监视网由全球 16 个地方的 31 台雷达 (包括机械跟踪雷达、相控阵雷达和连续波雷达) 或光电望远镜、通信网络、几个数据处理操作中心组成 *. 空间监视中心，负责维护所有可跟踪物体的数据库，预报空间物体轨道根数，并分送到各个监视设备，监视设备在预报的时间和空域搜索空间物体，并将跟踪数据送回到空间监视中心处理和分析，空间监视中心利用这些数据计算新的轨道根数并进行预报. 这些数据目前可以通过 NASA 向民用用户和国外用户限制性提供.

2.2　探测跟踪能力

所有空间监视网的设备都能跟踪尺度大于 10 cm 的物体，其中有 11 台有跟踪小于 10 cm 的物体的能力，1 台能跟踪 1 cm 的物体 [3]. 这些设备的探测能力如表 1.

2.3　美国的碰撞预警能力

美国空间监视中心受命对航天飞机与编目物体可能的交会进行预警. 通过地基探测器探测的在轨物体数据，估计其位置和轨迹 (轨道根数)，预报是否有碰撞发生. 但目前只能对编目中能够被识别的物体进行碰撞预报. 当预报出航天器与编目物体接近时就通知 NASA 的飞行控制人员. 该消息用于对发射是否要推迟，或在轨航天器是否需要进行机动

* 都亨等. 空间碎片研究的重要应用领域 —— 军事. 第二届全国空间碎片研讨会论文集. 上海：中国国家航天局，2003, 111—116

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

规避的问题进行决策.

表 1 美国空间监测网的跟踪能力

Table 1 Tracking ability of US Space Surveillance Net

空间碎片尺寸 /cm	探测到物体的比例 /(%)
> 100	全部
30—100	95
10—20	50—85
< 10	基本不包括

2.4 规避事例

(1) 航天飞机

航天飞机与可跟踪空间碎片的碰撞将是灾难性的, 因此很早就制定了规避政策, 划定了警戒区和规避区. 警戒区是以航天飞机为中心, 沿运行方向 25 km, 垂直运行方向 5 km 的区域 [4], 如果预测将有碎片进入警戒区, 航天飞机的控制部门将要求美国空间监视网加强警戒, 加密观测, 提高轨道测量精度和预测精度. 规避区是以航天飞机为中心, 沿运行方向 5 km, 垂直运行方向 2 km 的区域, 如果预测将有碎片进入警戒区, 航天飞机将根据预测的碰撞关系, 采取机动变轨措施. 自 1988 年 STS26 开始, 美国航天飞机在飞行过程中先后发生过近 30 次的目标进入警戒区域的事件 [3], 其中有多次进入规避区, 不得不采取避免碰撞的机动操作.

(2) 国际空间站

国际空间站也制定了与航天飞机类似的规避策略. 1999 年 10 月 26 日国际空间站进行了第一次躲避空间碎片的机动飞行, 躲避对象是废弃的 Pegasus 火箭的上面级. 10 月 24 日下午, Johnson 空间站中心接到美国空间司令部的通知, 预期在 10 月 27 日两个物体将要交会, 达到了规避的指标. 在预计交会前 18 h, 空间站实施规避机动, 使国际空间站和飞马座的距离从不到 1 km 增加到安全的距离 140 km.

根据目前的指标和情况, 国际空间站每年要规避飞行 3—4 次.

(3) 和平号空间站

1997 年 9 月 15 日, 美国预报和平号空间站有可能与美国卫星 MSTI 2 (1994-028A) 碰撞, 航天员进入联盟号的返回舱躲避.

(4) 欧空局卫星规避

欧空局利用美国空间监视网提供的数据, 监视卫星 ERS 1 与空间物体碰撞的可能性, 1997 年 6 月, 注意到 ERS 1 卫星有可能在 6 月 25 日与 COSMOS614 卫星交会, 决定机动飞行进行规避, 卫星速度增加 1 m/s, 卫星在预测的碰撞位置处高度升高了 4 km.

3 空间碎片预警的关键技术

根据国外目前进行空间碎片碰撞预警的情况, 可以归纳出, 实施空间碎片预警必须突破以下几种关键技术: 掌握在轨碎片的轨道数据、危险物体的快速筛选方法、精确的轨道预测方法.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3.1　准确获知当前在轨物体的轨道数据

碎片数据是进行预警的基础，只有掌握了尽可能多和尽可能新的轨道数据，预警结果才是全而准确的．因此了解目前 9000 多个碎片的资料，掌握碎片尤其是危险碎片的详细信息，外推出所需时刻的轨道数据是预警的基础．目前我们可以通过国际合作获取当前在轨碎片的轨道数据．

3.2　危险物体筛选

目前在轨物体大约有 9000 多个，如此多的物体，如果全部逐点计算其轨道，计算量之大会极大增加计算时间，即使在当今计算机高速发展的时代都不太可能在很短时间内得到结果．为了极大减少计算量，必须要进行危险物体筛选工作，即在进行高精度轨道预报之前从大量在轨物体中快速剔除与目标轨道绝无可能相交的物体，筛选出与目标航天器有可能发生碰撞的或与目标物体距离小于某一值 d 的危险物体．我们用的危险物体筛选方法是轨道高度范围筛选和轨道间最小距离筛选．

(1) 近地点 - 远地点筛选

假设目标航天器轨道 S 近地点高度为 h_{p}，远地点高度为 h_{a}，则那些远地点高度小于 h_{p} 的物体 ($h_{\mathrm{a}2} < h_{\mathrm{p}}$)，或近地点高度大于 h_{a} ($h_{\mathrm{a}2} < h_{\mathrm{p}}$) 的物体，显然绝无可能与 S 相交，首先可以剔除．

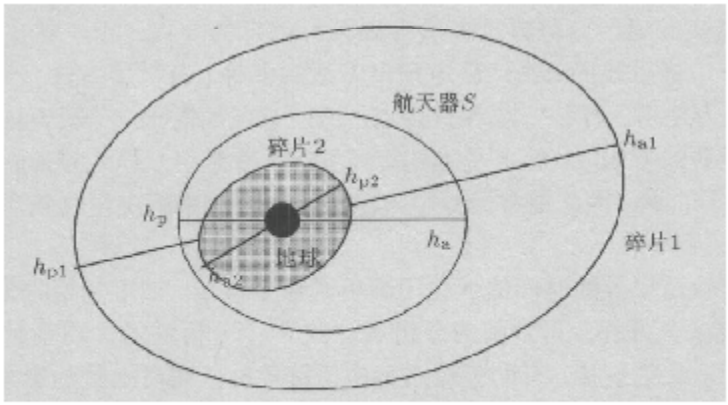

图 1　近地点-远地点筛选

Fig.1　Perigee-Apogee filter

(2) 轨道面最小距离筛选

根据卫星相对运动规律可知，碰撞只有可能发生在两物体的轨道面的交线附近．任何两个非共面物体只有可能相交在交线上的两个位置，其间角度相距 180°．根据球面三角和矢量分析 [5] 可以确定轨道面的交线位置与两物体通过交线的地心距之差，即为两物体轨道间最小距离 r_{min1} 和 r_{min2}．排除距离超过警戒距离 (事先定好的两物体距离警戒阈值) 的物体．如果警戒距离选得小，此法可以排除大量物体．

另外也有一些其他方法可以用于筛选危险物体．不论什么方法，目的都是用快速判断法，筛掉任务期内不可能与目标相遇 (与目标距离在警戒距离之外) 的物体，使之后进行轨道预报的物体尽可能少，以提高计算效率．

但在筛选时必须注意的是，要考虑到轨道数据本身的误差，以避免将有可能碰撞的物

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

体剔除掉，因此需要选取合适的距离余量.

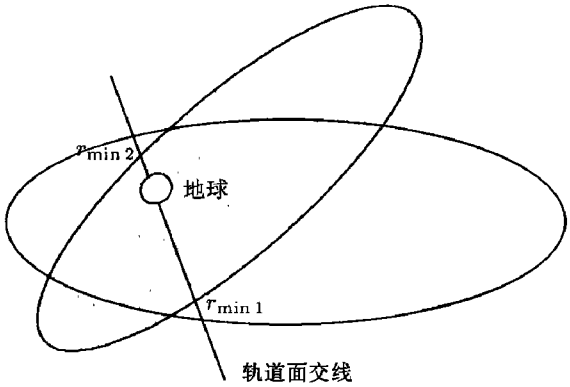

图 2 轨道间最小距离筛选

Fig.2 The nearest distance (between two orbit) filter

3.3 预警的轨道预测方法

要进行碎片碰撞预警，必须对碎片的轨道根数用轨道预报法进行轨道推演，以确定在指定飞行时间内极有可能与目标航天器发生碰撞的物体，并预报出碰撞发生的时间、相对速度等参数. 能够准确预测轨道是提供准确预警信息的前提. 用于轨道预测的轨道预报方法是预警系统中最重要的部分. 轨道预报方法有多种，有数值方法、分析方法、半分析方法、统计分析方法等，各种方法各有特点，适应不同的需求. 分析方法和数值方法是轨道预报主要的经典的方法. 从轨道基本知识可知，轨道摄动方程是复杂的非线性的微分方程，不能直接积分求解. 因此通常用数值方法和解析方法来解决预测轨道根数随时间变化的问题.

分析法是将轨道根数随时间的变化用解析函数来表示，知道初始时刻的轨道根数，用常数变易法求解微分方程，得到解的分析表达式 [7]. 分析法的优点是解的形式可以明显表示根数随时间变化的规律，有助于较清楚地了解各种摄动对根数的影响. 而且计算效率高，占用较少的机时就可以得到相当精度的解. 缺点就是推导分析解的过程比较麻烦，并且高阶解很难推导出来，另外有的摄动因素很难给出高精度的数学模型，也就很难给出高精度的分析解. 因此解的精度比数值解要低些.

数值法就是知道初始时刻的一组轨道根数，对各个轨道根数的微分方程直接进行数值积分，求出在一时间段里，多个离散点时刻上的轨道根数值. 数值方法是用离散化方法来处理连续性问题. 数值方法的优点是方程的右函数可以较精确地表示，可以用较完善的数学模型来表达卫星的运动. 数值解的精度比较高，常用在精密定轨中. 特别在 CPU 计算速度高速发展的时代，它的优点可以得到充分的体现. 但缺点是不能明显看到轨道根数随时间变化的规律. 数值解涉及到解的收敛性问题和稳定性问题. 而且它占用的机时较长.

合理的方法是，运用分析方法进行快速轨道预测，在碰撞点附近用高精度方法逼近，最后得出准确的交会时间和交会点位置及交会速度.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4　空间碎片碰撞预警软件测试

在解决以上关键技术的基础上，我们研制了空间碎片碰撞预警软件，并选择了过去的几次碰撞或规避事件作为事例进行测试，来检验我们的预警软件.

所选事件为 CERISE 和 Ariane V16 火箭残骸的碰撞事件，1999 年 10 月 27 日的 ISS 机动规避.

4.1　事例 1

1996 年 7 月 24 日，CERISE 和 Ariane V16 火箭残骸发射碰撞. CERISE 卫星重力稳定杆被 Ariane V16 火箭上面级的残骸撞断. CERISE 是法国国家航天局于 1995 年 7 月 7 日发射的卫星，与之相撞的 Ariane V16 的残骸是已在空间存在了 10 年的碎片. 这是第一次正在工作的卫星被已知的编目空间碎片撞击事件.

被撞物体：CERISE 卫星，国际代号 23606.

撞击物体：Ariane 火箭残骸，国际代号 18208.

轨道根数时刻：1996 年 7 月 19 日.

空间物体数：2 个.

软件计算结果见表 2(警戒距离设为 5 km).

表 2　法国 CERISE 卫星碰撞实例的软件计算结果

Table 2　Results from computation on French CERISE microsatellite collision with space ddebris

最近距离发生日期	时间 /UT	空间碎片编号	预计靠近距离 /km
1996-07-24	013702	18208	2.4938
1996-07-24	031514	18208	2.2366
1996-07-24	045326	18208	1.982
1996-07-24	063138	18208	1.7386
1996-07-24	080950	18208	1.7216
1996-07-24	094802	18208	1.4265
1996-07-24	112614	18208	1.4404
1996-07-24	130426	18208	1.4822
1996-07-24	144238	18208	1.4895
1996-07-24	162050	18208	1.7999
1996-07-24	175903	18208	1.9723
1996-07-24	193715	18208	2.2506
1996-07-24	211527	18208	2.4337
1996-07-24	225339	18208	2.7114

由表 2 结果可见，两物体在 7 月 24 日多次接近 3 km 以内，但最近的一次是 0948，该时间与国外分析的两物体相碰的时间是一致的.

4.2　事例 2

在本文第二节曾经说过，ISS 国际空间站每年都要进行几次机动规避. 1999 年 10

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

月 27 日，为了躲避 Pegasus 火箭的一片残骸， ISS 执行了一次机动规避. 我们找到了相关的数据资料，对它进行了预警测试.

目标物体： ISS 空间站， NORAD 编号 25544.

规避物体： Pegasus R/B(2) NORAD 编号 25422.

轨道根数时刻： 1999 年 10 月 25 日.

软件计算结果见表 3 (警戒距离设为 10 km).

表 3 空间站规避实例的软件计算结果

Table 3 Results from computation on internatinal space station avoidance

最近距离发生日期	时间 (世界时)/UT	空间碎片编号	预计靠近距离 /km
1999-10-31	222205	22847	9.7279
1999-10-27	080201	25422	9.3010
1999-10-27	080202	25422	4.0415
1999-10-27	080203	25422	8.7902

由上表可见， 25 422 物体 (即 PEGASUS 火箭残骸) 在 10 月 27 日 0802 UT 与 ISS 靠近距离在 5 km 以内，达到了美国对碎片进行规避的指标，应该实施规避机动操作. 实际上， 10 月 26 日、 ISS 提前进行了规避机动.

5 讨论和结论

空间碎片预警的准确结果依赖于碎片数据的完整性、时效性和预警软件的高效率和高精度，在此基础上才能做出准确的规避决策.

在目前实际情况下，数据本身是不完全的，在此基础上根据软件计算得出的结果也不会是完全的，即使有新的探测补充也仍然不能做到完全. 但是，有了预警手段，至少可以做到使航天器不遭到目前所知的 9000 多颗卫星的撞击，尤其在我国目前探测水平还不高，自主监测数据很少的情况下，这一点尤其重要.

轨道理论本身比较成熟，但是在应用中必须做出必要的简化，以在不损失精度的情况下提高运算速度，满足实际要求. 这样会带来一些误差，如果今后能够在这方面多做研究和探索，有可能使软件精度更高.

总的来说，在目前的条件下，利用软件进行空间碎片碰撞预警，提高在轨航天器的安全性是切实可行的.

参 考 文 献

[1] Committee on Space Debris. Orbital Debris——A Technical Assessment. Washington, National Academy Press, 1995, 17—30

[2] The Scientific and Technical Subcommittee of the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Technical Report on Space Debris. New York: Unitied Nations, 1999, 4—9

[3] Du Heng *et al.* Space debris environment and manned fight. *Manned Flight*, 2001, **6**:57—63. in Chinese (都亨等. 载人航天与空间碎片环境. 载人航天， 2001, **6**:57—63)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[4] Committee on Space Debris Space Shuttle from Meteroids/Orbital Debris Risk Management. Protecting the Space Shuttle from Meteroids and Orbital Debris. Washington DC: National Academy Press, 1997, 36—39

[5] Miao Yongkuan. Spherical Astronomy. Beijing: Science Press, 1983, 1—16. in Chinese (苗永宽. 球面天文学. 北京: 科学出版社, 1983, 1—16)

[6] Liu Lin. Orbital Mechanics of Artificial Satellite. Beijing: Higher Education Press, 1992, 79—102. in Chinese (刘林. 人造地球卫星轨道力学. 北京: 高等教育出版社, 1992, 79—102)

SPACE DEBRIS COLLISION PREDICTION RESEARCH

LIU JING WANG Ronglan ZHANG Hongbo

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

XIAO Zuo

(*Department of Geophysics, Peking University*)

Abstract

The population of orbital debris is increasing and these debris has serious hazards to spacecrafts in the earth orbit so to form an impact to human's space activities. In recent decades, researches on space debris and its applications have attracted more and more attentions as a branch of space environmental study. In this paper, the issue of Space Debris Collision Prediction key techniques were studied, thereafter, the prediction method was established and tested. With large numbers of debris orbital data collected, this method and codes were verified by two collision and avoidance examples so to prove their validity. The conclusion was deduced that developing the collision avoidance technique and applying it into practice is feasible.

Key words Space debris, Collision prediction, Software test

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com