

空间目标轨道信息软件平台的建设

桑吉章^{1,2}, 陈立娟^{1,2}, 李彬¹, 杜建丽¹, 陈俊宇¹, 章品¹

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

摘要: 空间目标轨道信息是空间态势感知的重要要素, 是空间碰撞预警、空间碎片环境模型和许多空间应用的基础。因而, 空间目标轨道确定成为空间态势感知的主要任务之一。文章介绍武汉大学测绘学院正在开发建设的空间目标轨道信息服务软件平台, 该平台拥有的主要功能有: 利用多源数据的卫星/空间碎片轨道确定(包括初轨确定)与预报、大气质量密度模型精化、空间碰撞预警和半解析法快速精密轨道传播等。文章还针对软件平台功能的研究进展进行了综述, 介绍了软件平台发展规划。

关键词: 空间碎片; 轨道确定和预报; 大气质量密度模型; 空间碰撞预警; 软件平台

中图分类号: V520.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2016)01-0001-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.01.001

Development of space object orbit information software platform

Sang Jizhang^{1,2}, Chen Lijuan^{1,2}, Li Bin¹, Du Jianli¹, Chen Junyu¹, Zhang Pin¹

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The space object orbit information is one of the most important elements in the space situational awareness. It serves as the basis for the space collision warning, the space debris environment model and many other space applications, as they are all related with the determination of space object orbits. In this paper, the Space Object Orbit Information Software Platform developed at Wuhan University is presented. At the present, the platform includes or is going to include the following functions: the satellite/ debris orbit determination (including the initial orbit determination) and prediction using multi-source data, the atmospheric mass density model calibration, the space collision warning and the rapid precision orbit propagation based on the semi-analytical method. The research advances in the software platform are summarized, and the development plans are discussed.

Key words: space debris; orbit determination and orbit prediction; atmospheric mass density model; space collision warning; software platform

0 引言

空间态势感知(SSA)可概略定义为对空间环境和空间活动信息感知的能力。民用用户所关心的主要是空间目标(包括卫星和碎片)的轨道信息和空间天气, 而军事部门更关注的包括空间目标的特征、功用、意图和潜在威胁等。因此, 空间目标轨道信息是 SSA 中重点关注的内容。

空间目标的轨道可通过处理几何跟踪数据获

得。利用精密跟踪数据, 可较精确地确定工作卫星的轨道; 对于数量众多的空间碎片而言, 由于跟踪设施的缺乏、跟踪数据稀疏及精度不足和某些摄动力模型的较大误差等原因, 其轨道确定精度远远低于工作卫星的轨道精度, 而轨道预报精度更是 SSA 用户普遍关心的一个问题。

ESA 估计近地空间中大于 1 cm 的空间碎片约有 74 万个^[1], 其中编目的空间目标只有不到 2 万个。

收稿日期: 2015-12-06; 修回日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41474024); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: 410500078); 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金项目(编号: 410500083)

现有卫星只能抵抗 1 cm 以下碎片的碰撞；一旦 1 cm 以上的碎片与卫星发生碰撞，轻则影响卫星的工作性能，重则造成严重的空间事故。2009 年 2 月，Iridium 33 工作卫星与 Cosmos-2251 废弃卫星的碰撞不仅损毁了 Iridium-33 卫星，而且产生了近 2000 个 10 cm 以上的碎片（和不计其数更小的碎片）^[2]。自该碰撞事件之后，各国对以空间碎片为中心的近地空间环境的研究和投入的力度不断加大，SSA 被提到了空间战略的高度，也加强了空间碎片的预测。对目前已发生的空间碰撞事件之时间进行了统计，发现实际碰撞时间与 20 世纪 70 年代末 Kessler 博士和 90 年代 NASA 的预测时间基本上一致。最新预测表明，在未来数十年内有可能发生空间连锁碰撞，一旦发生则将严重威胁近地空间的可持续利用。

武汉大学正在针对空间碎片轨道力学和空间碰撞预警等问题开展深入研究，已在稀疏数据条件下的空间碎片轨道确定、大气质量密度模型精化、空间碰撞预警、半解析法轨道传播等方面取得了积极进展，初步完成了以空间碎片轨道确定和预报为核心的空间目标轨道信息服务软件平台建设。本文将重点介绍软件平台的主要功能及其发展。

1 软件平台

1.1 概况

目前的软件平台是在空间目标轨道确定软件的基础上扩展而来的，是武汉大学开展有关研究的主要软件工具。软件设计采用 OOD 思想和 Visual Studio C++ 语言，运行环境为 Windows，方便系统的维护、扩展和更新。图 1 为软件平台的主界面，为标准的 Windows 界面风格，运行方便。

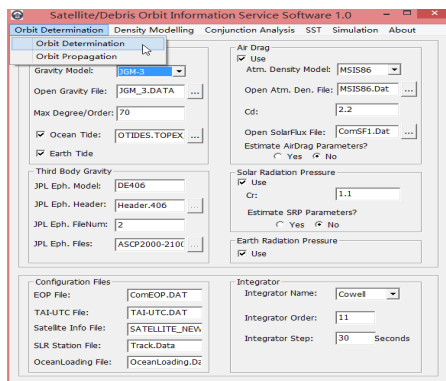


图 1 武汉大学空间目标轨道信息软件平台主界面
Fig. 1 Main interface of space object orbit information software platform developed at Wuhan University

1.2 平台的主要功能

1.2.1 轨道确定与预报

空间目标的跟踪技术主要为雷达、光学摄影和近几年发展起来的碎片激光测距，它们跟踪采集的数据以几何信息为主，包括距离、距离变率和方向（角度：方位角/高度角或赤经/赤纬）。空间目标的轨道确定就是利用几何跟踪数据解算它们的轨道参数，并据此进行轨道预报。

武汉大学空间目标轨道信息软件平台具有初轨确定和轨道改进的功能。初轨确定方法包括仅利用方向观测值的 Gauss、Laplace 等经典方法和较现代的 Gooding 方法。空间碎片方向观测值对应的弧段通常只有一次或不足一次通过的甚短弧段，针对这种常见情况，开发了基于质量控制技术的初轨确定算法。利用这一算法，实现了对新发现空间碎片的即时激光测距，成功率达 50%^[3]。

轨道改进采用最小二乘微分改进原理。在轨道改进的过程中，考虑目标轨道的各种摄动力，包括地球非球形摄动、大气阻力、第三体引力、太阳光压等。轨道积分采用 Cowell 方法。除几何跟踪数据外，轨道改进还可以三维位置、速度和轨道参数为观测值进行轨道解算。在精密激光测距数据下，利用该软件实现卫星的定轨精度在 cm 级；在稀疏数据情况下，空间碎片轨道确定和预报也达到了较好精度。此外，利用 7~10 天之内所有 TLE（two line element，二行参数）数据进行轨道解算，可以实现轨道预报精度的改善。

轨道确定解算的输入包括观测值文件、力模型文件、JPL 行星星历文件、测站坐标文件、太阳辐射通量和地磁指数文件等。观测值包括地基设施观测的数据和天基传感器采集的数据。力模型包含有地球重力场模型和海潮摄动模型，而这些模型还有多个选择项。软件可以一次解算多个目标的轨道。在解算时，需要选择 Cowell 积分器的阶数和步长，另外需对是否要解算大气阻力系数和太阳光压系数做出选择。

软件输出包括观测值残差、轨道确定和预报结果，以及大气阻力系数和太阳光压系数等。轨道确定结果同时以不同格式的文件给出，例如，TLE、CPF（consolidated prediction format）等文件格式，以适应不同用户的需求。

此外,考虑完整摄动力模型并利用精密轨道数值积分器,软件系统可以产生各类模拟观测值。

利用软件平台的轨道确定与预报功能,我们开展了稀疏数据条件下空间碎片轨道确定问题的研究,获得了可喜的成果^[4]。图 2 所示为空间目标轨道确定和预报的流程简图。

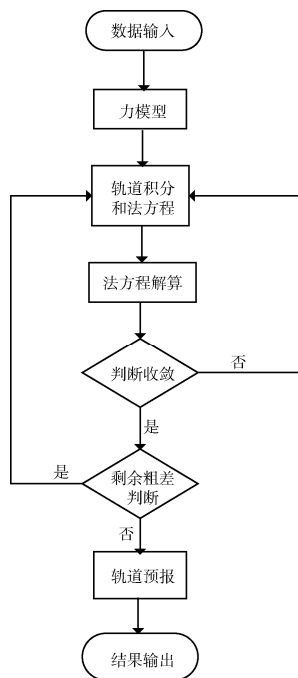


图 2 空间目标轨道确定和预报流程

Fig. 2 Flow chart of space object orbit determination and prediction

1.2.2 大气质量密度模型改进

低轨空间目标精密轨道确定和预报的主要问题是大气质量密度 (AMD) 模型的误差,该误差为 15%~25%。由于模型误差较大以及空间碎片的弹道系数 ($BC=C_D A/m$, 其中 C_D 为大气阻力系数, A 为截面积, m 为质量) 未知,导致低轨空间目标的轨道预报存在较大的误差,对空间碰撞预警造成不利的影响。因此,AMD 模型的精化在过去近 20 年引起了极大的重视。

利用空间目标跟踪数据开展了 AMD 模型的校正研究,结果表明校正后的密度误差可小于 5%^[5]。目前 AMD 模型的校正方法主要有 2 类: 1) 模型密度改正数法,以 HASDM 模型为代表^[6]; 2) 直接校正被选定基本模型的某些参数,可以称为密度模型参数校正法^[7]。

软件系统对 AMD 模型的校正基于上述 2 类方法展开: 1) 模型密度改正数法,类似于 HASDM

方法,但引入了球层的概念,即将整个低层空间按高度划分数个球层,每个球层的模型密度改正数用勒让德多项式来模型化; 2) 密度模型参数校正法,除要解算检校目标的轨道参数外,同时还要求解 AMD 模型的部分系数。实际和模拟实验表明,密度模型参数校正法对提高轨道预报精度更有效,相对于改正数法需要检校 60~70 个目标,只需要检校 20~30 个目标便有可能达到类似的结果^[7]。但在实现时,还需要获得观测值对密度模型参数的偏导数,即需要通过待估参数变分方程的数值积分获得。

此外,针对低轨空间碎片的弹道系数未知的困难,已组织了利用长期累积的 TLE 数据估计低轨空间碎片弹道系数的大规模计算,目前已解算得到了 2000 多个高度低于 850 km 的空间碎片的弹道系数。

1.2.3 快速高精度轨道传播

针对今后将被跟踪监测的数十万个碎片,若能实现快速、精确的轨道预报,且提供可靠的空间碰撞预警,则对未来 SSA 快速高效可靠服务具有十分重要意义。为了实现这些目标,开展了轨道传播方法的研究。目前常用的轨道传播方法以数值积分法和解析法为主。

数值积分方法精度很高,但十分耗时,用于大规模碎片轨道计算时效不佳。以单个碎片为例,传统的 11 阶 Gauss-Jackson 积分器积分耗时约 8 s, 10 万个碎片耗时则高达 10 d。而解析方法计算速度快,但精度低,不能满足高精度空间应用的要求。以 SGP4/TLE 为例,对 700 km 以下轨道高度的碎片进行 7 天预报时,误差可能高达 10 km。

兼顾了上述两种方法优势的半解析轨道积分方法,适用于大规模碎片的中、长期轨道预报。我们利用多尺度摄动方法,完成了半解析空间目标轨道积分器的研发,该积分器可对数量众多的空间目标进行快速、高精度的轨道传播。

区别于利用传统平均法的半解析轨道理论,利用多尺度摄动方法的半解析轨道积分方法更有效处理较为复杂的摄动影响,例如大气阻力、太阳光压等非保守力。其实现方法简述如下: 首先,利用 Fourier 变换将空间目标轨道摄动方程分解为以平经度 λ 为参数的 2 部分,即随长周期时间尺度 τ 缓慢变化的平均轨道根数和随短周期时间

尺度 t 快速变化的短周期项；然后，对平均轨道根数进行大步长数值积分（积分步长为 1 天以上），得到积分历元时刻的平均轨道根数；进行内插，获得任意时刻的平均轨道根数；接下来，利用解析算法重建目标轨道在任意时刻的短周期项（该短周期项是从内插后的平均轨道根数计算而来）；最后，对任意时刻的平均轨道根数和短周期项进行重新组合，得到目标任意时刻的密切轨道根数。

半解析轨道积分方法以轨道摄动理论、数值积分方法和解析方法为依托，仍在完善理论和算法。对已研发的半解析轨道积分器的测试结果显示：重力场模型取 30×30 阶/次时，对轨道高度为 $700 \sim 5000$ km、面质比为 $0.01 \text{ m}^2/\text{kg}$ （相当于横截面积 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ，质量 1 kg ）的目标进行 7 天的轨道传播，误差仅为几十 m 到几百 m，耗时约 0.5 s。这表明在大部分空间应用中，半解析轨道积分器可替代精密数值积分器^[8]。

1.2.4 空间碰撞预警

随着空间碎片数量的快速增加，空间碰撞预警 (SCW) 工作越来越重要，特别是对于运行在低地球轨道上的载人飞船和空间站。从保障载人航天安全、延长航天器运行寿命、维护空间安全和保护空间环境出发，SCW 研究不断深入。对于尺寸较大的空间目标，必须进行跟踪编目，利用实时更新的轨道数据进行接近分析和碰撞预警，才能使航天器对其进行及时的规避机动，以提高航天器运行的安全性。

SCW 和规避机动是一个完整过程的两个相对独立的方面。SCW 是利用预报得到的轨道信息和误差协方差信息，进行碰撞风险评估，得到各种碰撞风险参数（例如最近距离、碰撞概率、最大碰撞概率等），并根据一定的准则判断风险参数是否处在危险可接受区域（例如接近距离小于距离门限），如果在危险区域则发出预警。因此 SCW 实质上是一个对问题进行判别分析的过程，其核心是风险评估。根据分析得到的各种参数，得到“危险”或“安全”以及“机动”或“不机动”的判别^[9]。

在跟踪观测、轨道确定、轨道预报中将不可避免地会出现误差，因此误差分析在空间碰撞风险评估中至关重要。考虑到各种误差因素，目前在 SCW 风险评估中广泛采用最小接近距离、碰撞概率等评价指标方法，分别称为碰撞预警的区域方法（如 Box 方法）和碰撞概率方法（又称之为 P_c 方法）。Box

方法将任何进入事先设定的预警区域的空间目标认为是危险目标，并做出进行机动的决策^[10]，实质是一种平均方法，区域设定的根据是空间目标轨道预报的平均误差，在多数情况下过于保守。 P_c 方法比 Box 方法更精准，它不仅考虑最接近时刻（time of closest approach）两交会目标间的最小距离，还考虑目标交会时的相对位置和速度等几何关系以及两目标的位置和速度的不确定性。 P_c 方法利用轨道误差信息，通常较少发出规避机动指令，其虚警率比 Box 方法的小。基于碰撞概率的 SCW 是当前国际上主要应用的预警分析方法^[11-13]。

实现 SCW 功能的软件模块关键技术流程为：通过空间目标监测建立空间目标动态轨道数据库；对危险目标筛选和空间目标接近分析；进行轨道预报及其误差分析；完成碰撞概率计算（线性相对运动和非线性相对运动）；开展碰撞风险综合评估；制定基于碰撞概率的规避机动措施等。其流程如图 3 所示。

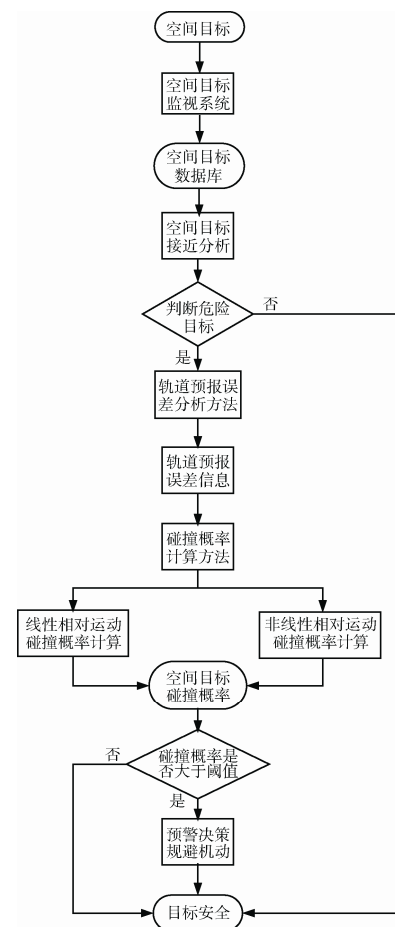


图 3 基于碰撞概率的空间碰撞预警与规避机动流程
Fig. 3 Flowchart of probability-based conjunction assessment and collision avoidance

2 发展规划

目前的软件平台主要用于研究目的,因此,从实际应用推广的角度,还须做大量软件工程方面的工作。其中,首要的一项是设计和建设一个空间目标数据库。

空间目标轨道力学一直是我们研究工作的重点内容之一,是提升 SSA 服务质量的理论与技术支撑。为此,将在以下几个方面开展进一步的研究:

1) 稀疏数据条件下空间碎片的轨道确定和预报问题。由于跟踪设施的缺乏与空间碎片数量的巨大,空间碎片的跟踪数据不可避免地缺乏。如何利用尽可能少的跟踪数据获得满足精度要求的空间碎片轨道信息,对空间目标跟踪作业任务规划和跟踪网设计等均具有较大的现实意义。

2) 大气质量密度模型精化。针对难于获取全球分布跟踪数据这一实际问题,将研究利用 TLE 数据及与卫星精密跟踪数据/卫星精密轨道数据相结合以优化大气质量密度模型的理论与方法,重点是能更有效地改善空间碎片的轨道预报精度。与此相关的工作还包括空间碎片面质比参数的确定。

3) 轨道误差传播理论与方法。针对空间碎片初始状态矢量和面质比参数误差较大的问题,采用精密轨道数值积分器,研究完整力模型下的预报轨道误差的特性;开展利用非线性系统理论(例如粒子滤波)进行空间碎片预报轨道误差传播的方法研究,并开发相应的软件,以提高空间碎片预报轨道误差的真实性。此项研究对提高空间碰撞预警的精度和可靠性具有重要作用。

4) 快速空间碰撞预警算法研究。随着被监测空间目标数量的增加,高效的空间碰撞预警服务将是一个挑战。将开展解析轨道积分和半解析轨道积分相结合、利用并行计算的面向数十万空间目标的空间碰撞预警算法和软件系统的研究。

武汉大学测绘学院已成立了空间态势感知研究中心,地球空间信息技术协同创新中心设立了空间目标跟踪与定位创新团队,致力于空间碎片的跟踪与轨道信息服务研究,其中的一项任务是完善武汉大学空间目标轨道信息服务软件平台。

3 结束语

本文介绍了武汉大学测绘学院正在开发建设的空间目标轨道信息服务软件平台,重点介绍了

主要功能模块的功能,包括利用多源数据的卫星/空间碎片轨道确定(包括初轨确定)与预报、大气质量密度模型精化、空间碰撞预警和半解析法快速精密轨道传播等。

本文还介绍了未来几年有关空间目标轨道力学和空间碰撞预警的几个研究方向,目的是为提升空间态势感知服务质量提供关键理论与技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] Klinkrad H. The space debris environment and its evolution[C]//6th IAASS Conference. [2013-05-21]. http://iaassconference2013.space-safety.org/wp-content/uploads/sites/19/2013/06/1145_Klinkrad.pdf
- [2] Kelso T S. Analysis of the Iridium 33 - Cosmos 2251 collision[C]//Proceedings of 2009 AMOS Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui, Hawaii, [2009-09-01]. http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2009/Iridium_Cosmos_Collision/Kelso.pdf
- [3] Sang Jizhang, Smith C. Performance assessment of the EOS space debris tracking system[R/OL]. [2013-05-21]. <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-5018>
- [4] Sang Jizhang, Bennett J C. Achievable debris orbit prediction accuracy using laser ranging data from a single station[J]. *Adv Space Res*, 2014, 54: 119-124
- [5] Vallado D A, Finkleman D. A critical assessment of satellite drag and atmospheric density modeling[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 95: 141-65
- [6] Storz M F, Bowman B R, Branson M J I, et al. High Accuracy Satellite Drag Model (HASDM)[J]. *Adv Space Res*, 2005, 36: 2497-2506
- [7] Sang J, Smith C, Zhang K. Modification of atmospheric mass density model coefficients using space tracking data: a simulation study for accurate debris orbit prediction[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2011, 140: 1479-1493
- [8] 李彬, 桑吉章, 宁津生. 空间碎片半解析法轨道预报精度性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3310-3316
Li Bin, Sang Jizhang, Ning Jinsheng. Analysis of accuracy in orbit predictions for space debris using semianalytic theory[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3310-3316
- [9] 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
Bai Xianzong, Chen Lei, Zhang Yi, et al. Survey on collision assessment and warning techniques for space object[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1027-1039

- [10] Leleux D, Spencer R, Zimmerman P, et al. Probability-based Space Shuttle collision avoidance[C]//Space OPS 2002 Conference. Houston, USA, [2013-05-21]. <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2002-T3-50>
- [11] Ken Chan. Collision probability analyses for earth-orbiting satellites[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 1997, 96: 1033-1048
- [12] Chen Lijuan, Sang Jizhang, Li Bin, et al. Research on calculational method of space debris collision probability for linear relative motion[C]//China-US Space Awareness Science Technical Interchange. Beijing, China, 2015-09-22
- [13] Patera R P. General method for calculation satellite collision probability[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(4): 716-722

(编辑: 肖福根)