

火箭残骸落点综合态势分析方法与应用

安金霞¹, 秦志刚¹, 李轩², 朱岩², 路远程¹

(1. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750; 2. 航天科工集团第三研究院航天海鹰卫星运营事业部, 北京 100071)

摘要: 随着高密度航天发射, 火箭残骸数量呈现快速增长态势, 全面掌握火箭残骸落点综合态势, 是高效评估火箭残骸灾害风险和应急指挥决策的重要依据。提出了火箭残骸落点综合态势分析业务模型和主题域数据模型, 论述了基于海量历史残骸落点数据资源, 开展火箭残骸落点预报精确度分析、火箭残骸预置落点区域准确度分析和火箭残骸落点散布区域特征分析等数据挖掘分析方法, 给出了航天发射残骸落点“态势一张图”的可视化设计要素。工程实践证明, 该成果可为提高航天发射火箭残骸风险评估和应急指挥决策能力提供技术支撑, 应用效益较好。

关键词: 火箭残骸; 落点; 态势分析; 精确度; 置信椭圆

中图分类号: V525; TP391

文献标识码: A

DOI: 10.19358/j.issn.2097-1788.2024.11.007

引用格式: 安金霞, 秦志刚, 李轩, 等. 火箭残骸落点综合态势分析方法与应用 [J]. 网络安全与数据治理, 2024, 43(11): 37-42.

Methods and application of comprehensive situation analysis for rocket debris landing points

An Jinxia¹, Qin Zhigang¹, Li Xuan², Zhu Yan², Lu Yuancheng¹

(1. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China; 2. The Third Institute of CASIC HiWing Satellite Operation Division, Beijing 100071, China)

Abstract: With high-density space launch mission, the number of rocket debris shows a rapid growth-trend. The comprehensive situation of rocket debris landing points is the most important basis for assessment of rocket debris risk and emergence command decision-making. Firstly, the business requirements model and topic domain data model are proposed. Then, some relative data mining analysis methods are studied which based on the data resource of rocket debris landing points, such as the accuracy analysis of rocket debris landing points prediction, the accuracy analysis of preplan-region for rocket debris and the scattering area features analysis of the landing points. Last, visual design elements of situation map for rocket debris landing points in space launch mission are discussed. Engineering practice has shown that this research has application value and can be the technical support for risk assessment of rocket debris and emergence command decision-making in space launch mission.

Key words: rocket debris; landing points; situation analysis; accuracy; confidence ellipse

0 引言

运载火箭通常由助推器、子级、整流罩、上面级等火箭结构体组成, 并在飞行的不同阶段完成其推进使命后, 自动分离成为火箭残骸坠落。我国酒泉、西昌和太原卫星发射中心都在内陆地区, 发射产生的火箭残骸绝大部分都落回到我国陆地预先规划的安全落点区域; 文昌发射场位于海边, 火箭残骸会掉入公海预定区域; 航天器入轨后分离的火箭末级和上面级等残骸一般会进行钝化处理, 并在再入大气层的过程中烧蚀销毁, 少部分未烧毁器件(如较大的发动机等部件)落入公海预定区

域^[1]。若火箭点火起飞后发生故障掉落或炸毁(包括失控自毁), 导致航天器无法正常入轨情况下, 则会产生更多的火箭及航天器残骸, 可能落入非安全落点区域, 存在不同程度的灾害风险。

随着我国经济不断发展, 规划的火箭残骸落区已经从人口稀少地区发展为人口和生产生活设施较为密集的地区, 加之我国航天发射高密度常态化, 商业航天发射从无到有快速发展, 火箭正常发射和发射异常产生的残骸落区的安全性和应急保障等方面问题备受瞩目, 需要更加全面、及时和准确的航天发射残骸落点综合态势信

息, 为开展火箭残骸风险分析和应急指挥决策提供信息支持。

公开文献报道主要聚焦研究火箭残骸落点预报算法研究^[2-4]和火箭残骸控制回收技术等方面研究^[5-7]。本文采用大数据研究方法和技术, 基于航天发射积累的海量火箭残骸历史数据资源和实时数据, 讨论如何通过数据挖掘和可视化分析方法, 实现对火箭残骸的综合态势分析, 为航天发射火箭残骸管理和风险评估提供支撑。

本文首先给出了面向火箭残骸落点综合态势分析的业务模型, 并依次讨论了面向该主题域的数据需求模型、数据挖掘分析算法和可视化设计等, 基于航天发射数据资源库(模拟数据集), 给出了部分应用示例。

1 火箭残骸落点态势分析业务模型

面向航天发射指挥决策需求, 可从多个维度梳理火箭残骸落点综合态势分析业务需求, 从而明确数据挖掘的目标。业务需求模型详见图1, 主要包括下述三个方面。

(1) 统计分析历次航天发射火箭残骸的总体情况, 包括残骸名称、来源、时间、数量、类型、落点地理散布特征、回收处理及其他关联信息等;

(2) 基于历次火箭残骸落点数据集和当前发射数据, 开展挖掘分析, 尤其是围绕理论落点、预报落点和实际落点等数据, 分析相关数据的精确度和预报落点的置信区域等, 并对当前航天发射火箭残骸进行灾害风险分析与评估, 尤其是出现突发事件后, 提供应急指挥决策数据支持;

(3) 基于数字地球平台实现火箭残骸信息的综合态势可视化, 即“态势一张图”, 包括历次发射残骸数据挖掘分析结果、当前发射火箭残骸信息和灾害风险快速分析结果等信息的综合展示, 支持当前发射指挥决策和分析评估。

2 面向火箭残骸落点综合态势分析的主题域数据模型

基于火箭残骸落点综合态势分析业务需求模型, 需要确定面向该主题域的数据需求模型。主要包括航天发射及其残骸落点基础数据集、历次发射火箭残骸落点数据挖掘分析结果、火箭残骸落点散布特征分析数据、灾害风险分析评估数据及航天发射突发事件应急管理数据等, 如表1所示。主题域数据模型是开展火箭残骸落点综合态势数据挖掘分析的基础。

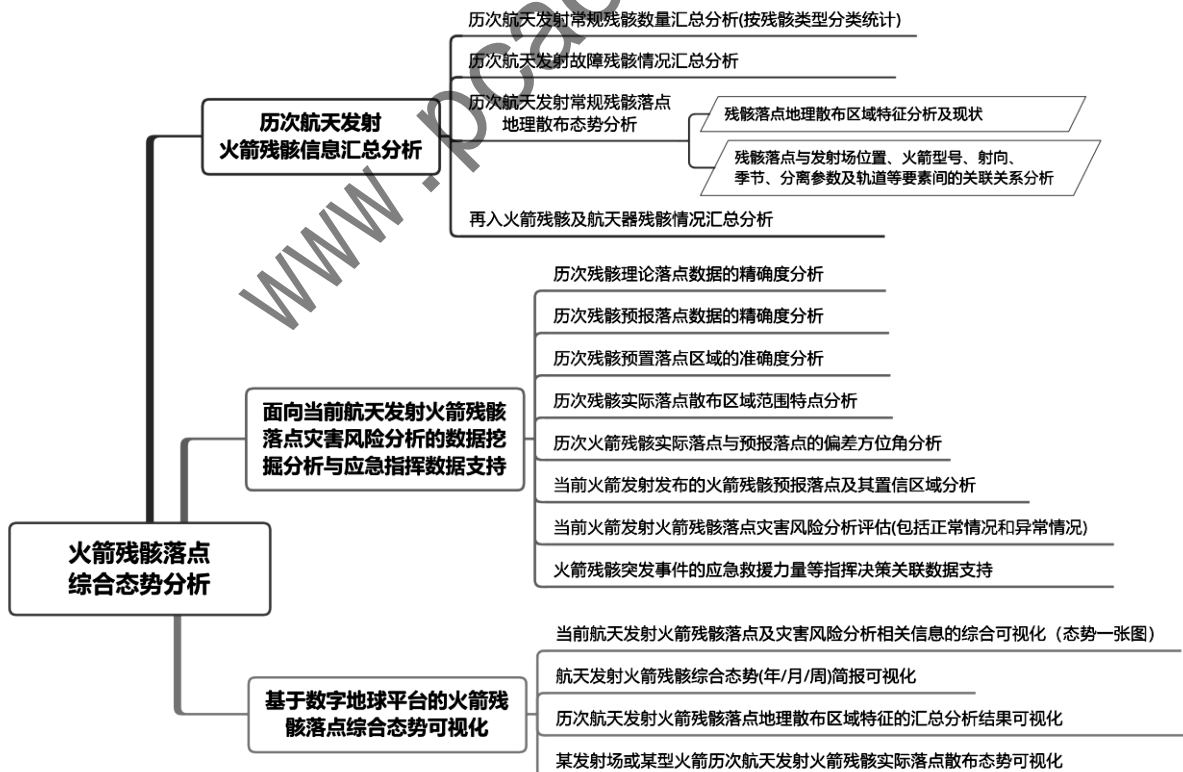


图1 火箭残骸落点综合态势分析业务需求模型

表1 火箭残骸落点综合态势主题域数据模型

航天发射火箭残骸落点基础数据	航天发射相关基础数据 火箭残骸理论落点数据 (历次 + 当前) 火箭残骸实际落点数据 (历次 + 当前) 火箭残骸预置落点区域数据 (历次 + 当前) 火箭再入残骸数据 (历次)
历次发射火箭残骸落点数据挖掘分析结果	火箭残骸概况统计分析 (来源、数量、类型、回收等) 历次残骸理论落点数据的准确度分析 历次残骸预报落点数据的准确度分析 历次残骸预置落点区域的准确度分析 历次火箭残骸实际落点与预报落点偏差方位角分析 火箭残骸落点预报数据置信区域分析
火箭残骸落点散布特征分析数据	历次残骸实际落点散布区域范围及地理环境数据 当前发射火箭残骸与同型残骸落点区域散布数据 残骸实际落点散布与分离点速度、高度、发射场位置、火箭型号、射向、气象、季节及轨道等要素之间的关联关系分析
火箭残骸落点灾害风险分析评估数据	灾害风险等级、灾害风险评估结论、辅助决策建议
航天发射突发事件应急管理数据	敏感目标及地面目标价值数据 残骸落点地区周边空间地理信息数据 消防救援力量数据 医疗救援力量数据 落点区域应急管理数据 相关事件 (网络) 社会舆情动态信息

3 火箭残骸落点数据挖掘分析方法

3.1 历次航天发射火箭残骸总体情况统计分析

基于历次航天发射产生的火箭残骸数据集,可对残骸名称、来源、时间、数量、类型、落点散布特征、回收处理及其他关联信息等情况进行多维度统计分析。图2和图3分别从四个发射场和残骸类型两个维度给出了1970年至2022年期间,我国航天发射火箭残骸数量的统计分析结果。

可知,截止到2022年底,我国成功执行航天发射500余次,产生各类火箭残骸共计不少于2960个(基于公开数据,不考虑发射异常或残骸落入地面后解体成更多碎片,火箭整流罩计为2块残骸)。



图2 历年我国各发射场航天发射火箭残骸数量统计

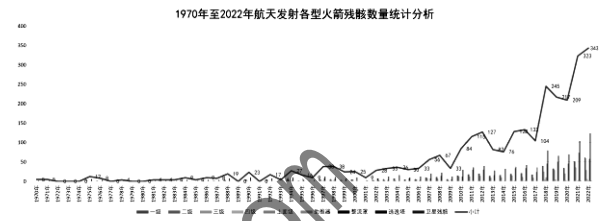


图3 历年我国航天发射各型火箭残骸数量统计分析

由图2、图3可见,近十多年,随着高密度航天发射,火箭残骸数量呈现快速增长态势,对及时掌握火箭残骸综合态势和航天发射应急处理指挥能力提出更高要求。

3.2 火箭残骸预报落点和理论落点精确度分析

火箭飞行过程中,数据处理部门会采用其火箭残骸落点预报算法给出每个残骸的落点预报数据。如何科学评价理论落点数据和落点预报数据的精确度是关键指标之一。本文基于历次发射积累的残骸实际落点、预报落点和理论落点数据集,给出其精确度分析方法。

首先,分别计算每次发射各型残骸落点预报数据、理论落点数据与实际落点数据之间的距离偏差;然后,基于模拟集统计分析火箭残骸预报落点和理论落点的精确度,具体算法如下。

设某次发射Task_i运载火箭产生N_i个残骸,表示为Debris_{ik},其中k=1,⋯,N_i;残骸Debris_{ik}的理论落点表示为Tlp_{ik}(LonT_{ik},LatT_{ik}),其中(LonT_{ik},LatT_{ik})表示该残骸理论落点的经纬度;预报落点表示为Plp_{ik}(LonP_{ik},LatP_{ik}),其中(LonP_{ik},LatP_{ik})表示该残骸预报落点的经纬度;实际落点表示为Rlp_{ik}(LonR_{ik},LatR_{ik}),其中(LonR_{ik},LatR_{ik})表示该残骸实际落点的经纬度。

由地球上两点距离计算公式,可得到残骸Debris_{ik}实际落点与预报落点之间的偏差距离,具体方法如下:

设地球上两点A(Lon_A,Lat_A)和B(Lon_B,Lat_B)点。首先,将经纬度转换成弧度值:

$$\begin{cases} a = \text{Lon}_A * \pi/180 \\ b = \text{Lon}_B * \pi/180 \\ c = \text{Lat}_A * \pi/180 \\ d = \text{Lat}_B * \pi/180 \end{cases} \quad (1)$$

设 $D_{Lon} = a - b$, $D_{Lat} = c - d$, $z = \cos(\text{Lat}_A) * \cos(\text{Lat}_B)$, 则地球上 A 和 B 的距离计算公式为:

$$\text{Dis}_{AB} = 2 * R * \left(\arcsin \left(\sqrt{\left(\sin \left(\frac{D_{Lat}}{2} \right) \right)^2 + z * \left(\sin \left(\frac{D_{Lon}}{2} \right) \right)^2} \right) \right) \quad (2)$$

其中, R 表示地球半径平均值 ($R = 6371 \text{ km}$), $\pi = 3.1416$ 。

由此可得到残骸理论落点与实际落点的偏差距离及预报落点与实际落点之间的偏差距离。

采用 origin 分析工具对随机模拟落点数据集进行统计分析和可视化, 并计算得到模拟落点数据集的均值、中位数、最大值和最小值结果, 可直观了解残骸落点偏差汇总情况, 如图 4 所示。

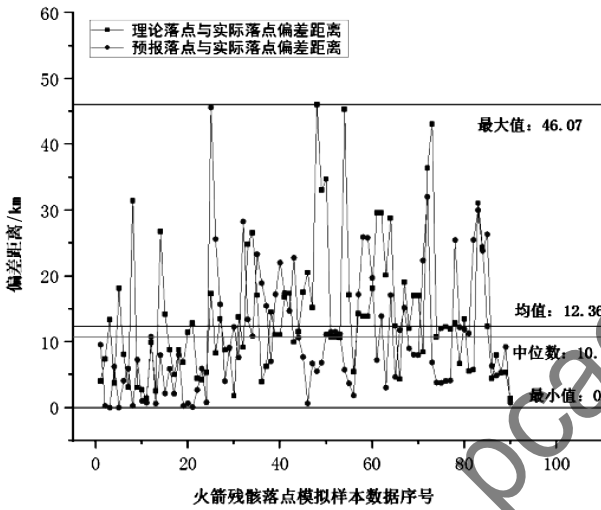


图 4 多型火箭残骸落点偏差距离统计分析示例

仅对火箭一子级残骸落点随机模拟数据的统计分析和可视化结果如图 5 所示。

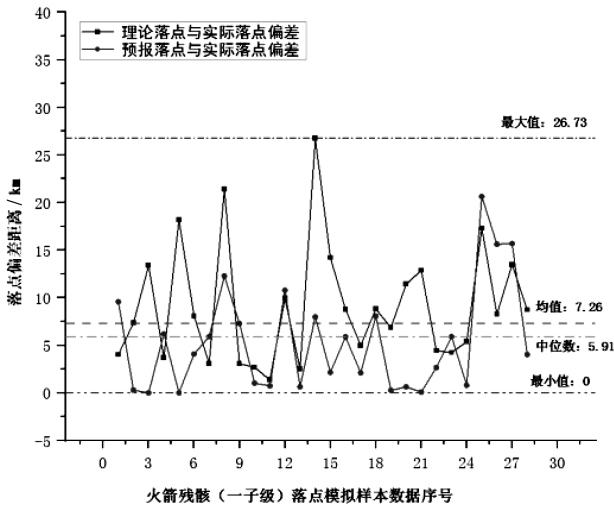


图 5 一子级残骸理论落点与实际落点精确度分析示例

统计分析方法中, 均方根误差可以较好地反映残骸落点预报数据 (或理论落点数据) 与实际数据的偏差程度, 可用来分析预报或理论落点数据的精确度^[8]。设模拟数据集是 M 次发射的残骸落点数据, 则其残骸落点预报数据的精确度 AcuRP_M 计算公式为:

$$\text{AcuRP}_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^{N_i} \text{DisRP}_{ik}^2 \right)}{\sum_{i=1}^M N_i}} \quad (3)$$

残骸理论落点数据的精确度 AcuRT_M 计算公式为:

$$\text{AcuRT}_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^{N_i} \text{DisRT}_{ik}^2 \right)}{\sum_{i=1}^M N_i}} \quad (4)$$

计算过程中, 残骸落点预报精确度分析可以针对采用同一个残骸落点预报算法得到的数据结果开展统计分析, 用于评价其预报算法的科学性; 也可以针对某型火箭系列开展统计分析。当然, 还可以针对同一类型火箭残骸的残骸落点数据开展统计分析。通过模拟近 100 个多型火箭残骸落点, 使用同一预报算法模拟生成测试数据, 计算得到的理论落点和预报落点的精确度分析结果约为 17.18 km 和 14.02 km。

可见, 基于残骸落点数据集, 采用统计计算和可视化分析方法可以获知其理论落点和预报落点的精确度情况。一方面, 该分析结果可用来验证和评价设计部门给出的残骸落点理论数据以及数据处理部门给出的残骸预报落点数据的可信性和准确性; 另一方面, 对当前发射而言, 当收到某残骸预报落点数据, 并立即开展该残骸落点的灾害风险分析时, 该分析结果可作为确定灾害风险分析置信区域范围大小的依据。如上述示例中, 火箭残骸风险分析的重点区域范围可划定以预报落点为圆心, 半径大约为 14 km 范围内的圆形区域, 并可基于图 4、图 5 分析获知历次残骸落点偏差数据的均值、中位数、最大值和最小值等结果, 用于补充分析。

3.3 火箭残骸预置落点区域准确度分析方法

每次航天发射前, 设计部门都会给出本次发射火箭各型残骸的预置落点区域。为了对残骸落点预置区域范围的准确性和科学性进行分析评价, 可基于历次发射火箭残骸实际落点数据及其预置区域数据, 统计分析历次发射火箭残骸是否落入预置落点区域范围内 (主要针对正常飞行) 的汇总分析情况。换言之, 统计分析其命中率, 具体方法如下。

设某次发射 Task_i 理论设计给出的火箭残骸 Debris_{ik} 的预定安全落点区域 D_{i0} 表示为:

$$D_{ik0} = \left\{ \begin{array}{l} (\text{Lon}_{ik01}, \text{Lat}_{ik01}), (\text{Lon}_{ik02}, \text{Lat}_{ik02}), \\ (\text{Lon}_{ik03}, \text{Lat}_{ik03}), (\text{Lon}_{ik04}, \text{Lat}_{ik04}) \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中 $(\text{Lon}_{ik01}, \text{Lat}_{ik01})$ 、 $(\text{Lon}_{ik02}, \text{Lat}_{ik02})$ 、 $(\text{Lon}_{ik03}, \text{Lat}_{ik03})$ 、 $(\text{Lon}_{ik04}, \text{Lat}_{ik04})$ 分别表示矩形区域 D_{ik0} 四个顶点的经纬度。

仍设某次发射 Task_i 运载火箭产生 N_i 个残骸，表示为 Debris_{ik} ，其中 $k = 1, \dots, N_i$ 。若残骸 Debris_{ik} 的实际落点 $\text{Rlp}_{ik}(\text{LonR}_{ik}, \text{LatR}_{ik})$ 落入区域 D_{ik0} 内，则设 $a_{ik} = 1$ ；若未落入，则设 $a_{ik} = 0$ 。则历史 M 次发射某类型火箭残骸 Debris_k （如火箭一级）实际落点命中预定区域的概率 P_k 可表示为：

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^M a_{ik}}{M} \times 100\% \quad (6)$$

历史 M 次发射所有火箭残骸实际落点命中预定区域的概率 P_{total} 可表示为：

$$P_{\text{total}} = \frac{\sum_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^{N_i} a_{ik} \right)}{N_i \times M} \times 100\% \quad (7)$$

依据概率 P_{total} 可对预置落点区域设计结果的科学性进行评价。

3.4 基于聚类分析和置信椭圆方法的火箭残骸实际落点散布区域特征分析

要全面分析所有航天发射或某一发射场历年火箭发射残骸实际落点的散布区域分布特点和发展态势，可基于所有火箭残骸实际落点数据集统计分析残骸散布区域范围特征，如散布（密集）区域地理位置分布、散布区域范围大小、散布密集度、随时间发展变化趋势以及上述区域发展变化情况分析，包括地物地貌、人口密度、生活设施、产业等方面信息。

本文主要论述如何基于数字地球平台、残骸实际落点数据集、聚类分析和置信椭圆分析方法，开展残骸实际落点散布区域态势分析的相关步骤，并使用模拟数据集给出示例。

3.4.1 火箭残骸落点地理区域散布态势的可视化方法

在数字地球平台上打点标绘残骸落点数据，绘制残骸落点地理散布图可直观获悉各型残骸落点的散布区域信息；通过对残骸落点区域的放大缩小显示，可直观了解残骸对象的地理散布区域的位置、地形地貌、地物、行政区和道路交通等相关信息。

3.4.2 基于聚类分析和置信椭圆方法的残骸落点散布区域特征分析

首先对所有残骸落点数据集进行聚类分析^[8]，将模拟数据集中落点分成几个相对密集的散布区域，然后使用置信椭圆对聚类结果进行分析^[8-9]。

为了准确分析残骸落点地理分布的置信椭圆，计算置信椭圆的长短半轴大小，必须将模拟数据集中所有残骸落点的经纬度值（大地坐标系角度经纬度）进行 Web 墨卡托投影处理，转换成二维平面直角坐标系坐标。

对残骸实际落点 $\text{Rlp}_{ik}(\text{LonR}_{ik}, \text{LatR}_{ik})$ ，采用常用转换方法进行 Web 墨卡托投影转换，设 Web 墨卡托坐标为 (x, y) ，则：

$$x = r * \text{LonR}_{ik} * (\pi/180) \quad (8)$$

$$y = \frac{1}{2} * R * \ln \left(\frac{1 + \sin(\text{LatR}_{ik} * (\pi/180))}{1 - \sin(\text{LatR}_{ik} * (\pi/180))} \right) \quad (9)$$

其中， \ln 表示自然对数， r 是地球半径平均值 ($r \approx 6378.14 \text{ km}$)， $\pi \approx 3.1416$ 。

有了墨卡托坐标系下残骸落点的坐标，可以得到所有落点模拟数据的散点图，对散点进行聚类分析，根据散点区域分布特点，聚类成 5 个密集区域，进一步采用 origin 二维置信椭圆分析工具，分析上面几个聚类散布区域的置信椭圆，置信度分别取 95% 和 80% 来绘制，计算得到其长短半轴及椭圆面积，如图 6 所示，其中 a 表示 80% 置信椭圆的短轴， b 表示 80% 置信椭圆的长轴， area 表示其椭圆面积。

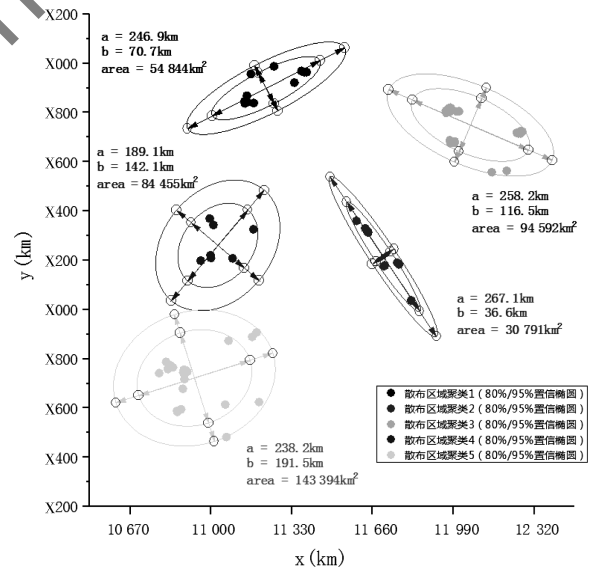


图 6 残骸落点模拟数据集聚类及置信椭圆分析示例

可以看出，通过对模拟数据集中残骸落点的聚类分析，可知落点主要集中散布在五个区域，通过置信椭圆分析，能够了解其散布区域范围特征，为进一步分析落点区域选择的科学性和风险评估提供依据。

4 残骸落点综合态势可视化设计

随着航天发射日益密集，全面高效掌握航天发射残骸落点综合态势尤为重要，关键是需要实现“态势一张

图”，对各类态势信息进行可视化展示，提高科学决策效率。本文提出基于数字地球平台实现“态势一张图”的可视化设计，如表 2 所示。首先需要遵循以下 3 个设计原则：

- (1) 不同可视化需求模块，可选择不同的可视化组件实现；
- (2) 可视化组件模块可分层组合显示，支持灵活排版；
- (3) 可视化组件可按需选择显现或隐藏。

表 2 火箭残骸综合态势可视化设计

可视化需求	可视化设计 (组件)
残骸落点地理散布态势	基于数字地球平台，标绘残骸落点数据 (集)，缩放场景可直观展示残骸落点周边地形、地貌、地物、城市道路交通、气象水文和敏感目标等信息；可直观展示残骸落点散布密集态势
历次航天发射火箭残骸汇总统计分析结果	簇状柱形图 + 折线图
残骸落点精确度、区域命中概率等挖掘分析结果和火箭残骸灾害风险分析结果等	表格 + 文本框
落点置信区域和散布区域分析结果	散布置信区域可基于二维数据地球 + 聚类分析 + 置信椭圆可视化
残骸基本信息和应急管理数据等 ^[10-11]	支持查询框智能搜索 + 文本框或表格显示
火箭残骸相关突发事件社会舆情信息及救助信息显示 ^[11]	文本框 + 滚动显示

5 结论

本文围绕航天发射火箭残骸落点综合态势分析现实问题需求，实现“用数据说话，用数据决策”的目标，比较系统地讨论了该领域业务需求模型、主题域数据模型和落点精确度、散布区域特征分析等 4 个方面的数据挖掘分析方法，并给出了综合态势可视化设计方案。篇幅所限，基于模拟数据仅给出部分示例，该成果已用于工程实践，取得较好应用效益，可推广应用。

后续将进一步讨论如何基于残骸落点数据集开展火

箭残骸落点散布态势与发射位置、火箭型号、季节气候、推进剂类型等相关要素间的关联关系及其数据挖掘分析方法，并针对再入返回残骸及火箭残骸落区精准控制及回收技术的研究试验情况^[5-7]，针对性开展其火箭残骸综合态势和残骸灾害风险分析方法研究。

参考文献

- [1] 刘秉, 黄辉, 李平岐, 等. 火箭残骸处理方式及风险控制 [J]. 航天系统与技术, 2021 (8): 39-42.
- [2] 黄普, 何雨帆, 王奥, 等. CZ-2C 火箭子级残骸实时落点偏差分析 [J]. 航天返回与遥感, 2020, 41 (5): 13-20.
- [3] 王景国, 卞韩城, 陈学林, 等. CZ-2F 火箭整流罩残骸落点预报方法研究 [J]. 载人航天, 2014, 20 (5): 457-460.
- [4] 张骁, 刘丙杰, 王瑞臣. 基于分离点信息的火箭残骸落点计算模型 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (11): 161-167.
- [5] 徐明兴, 贾洪印, 陈功, 等. 基于栅格舵的火箭芯一级残骸落点控制问题研究 [J]. 飞行力学, 2019, 37 (4): 68-72.
- [6] 我国火箭残骸精准回收技术研究取得重大突破 [J]. 卫星与网络, 2020 (3): 72.
- [7] 我国利用火箭助推器首次实现火箭残骸伞降控制精准回收 [J]. 军民两用技术与产品, 2020 (4): 69.
- [8] 王国胤, 刘群, 于洪, 等. 大数据挖掘及应用 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [9] 杨少龙, 黄金. 基于置信椭圆的无人艇区域覆盖搜寻规划优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (7): 2263-2268.
- [10] 朱建平. 基于大数据的环境应急指挥和决策全流程管理系统的研究和应用 [J]. 网络安全技术与应用, 2023 (1): 104-106.
- [11] 李攀, 周兆军, 刘庆杰. 基于多维大数据预测的应急灾备统筹救助系统研究 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (3): 122-129.

(收稿日期: 2024-09-01)

作者简介:

安金霞 (1973-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 大数据工程、数据挖掘。

秦志刚 (1979-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 航天发射领域飞行数据处理、软件工程。

李轩 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器测运控、数据工程。

版权声明

凡《网络安全与数据治理》录用的文章，如作者没有关于汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权等版权的特殊声明，即视作该文章署名作者同意将该文章的汇编权、翻译权、印刷权及电子版的复制权、信息网络传播权与发行权授予本刊，本刊有权授权本刊合作数据库、合作媒体等合作伙伴使用。同时，本刊支付的稿酬已包含上述使用的费用，特此声明。

《网络安全与数据治理》编辑部

www.pcachina.com