



社论:

## 人工智能在空间碎片对航天器损伤评估中的应用

包为民<sup>1</sup>, 殷春<sup>†‡2</sup>, 黄雪刚<sup>3</sup>, 易伟<sup>†4</sup>, Sara DADRAS<sup>†5</sup>

<sup>1</sup>中国航天科技集团有限公司, 中国北京市, 100048

<sup>2</sup>电子科技大学自动化工程学院, 中国成都市, 611731

<sup>3</sup>中国空气动力学研究发展中心超高速空气动力学研究所, 中国绵阳市, 621000

<sup>4</sup>电子科技大学信息与通信工程学院, 中国成都市, 611731

<sup>5</sup>犹他州立大学电气与计算机工程系, 美国犹他州, 84321

<sup>†</sup>E-mail: chunyin@uestc.edu.cn; kusso@uestc.edu.cn; s\_dadras@ieee.org

本文编译自 Bao WM, Yin C, Huang XG, et al., 2022. Artificial intelligence in impact damage evaluation of space debris for spacecraft. *Front Inform Technol Electron Eng*, 23(4):511-514. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2220000>

自 1957 年第一颗人造卫星发射以来, 日益增加的人类太空活动导致空间环境不断恶化。地球轨道上出现大量微小空间碎片 (毫米到微米级), 其超高速撞击会对航天器的结构和功能单元, 如舱室外表面、热障材料、热控涂层、太阳能电池板、管道、电缆等, 造成严重破坏。因此, 对空间碎片造成的撞击损伤进行探测和评估, 进而提供风险预警和及时修复, 是保证航天器安全运行和空间任务顺利完成的重要环节。然而, 由于航天器外表面材料的复杂性以及撞击损伤事件的不可预测性, 采集的损伤检测数据呈现多样性特点。传统的基于人们经验的损伤特征提取与识别评估方法难以准确描述复杂损伤特征信息。近年来, 人工智能技术受到相关学者及工程技术人员广泛关注, 在解决诸如空间碎片撞击感知、损伤检测、风险评估等复杂技术问题上取得一系列突破。然而, 应用人工智能技术解决空间碎片问题仍有许多难题需要解决。在此背景下, 利用人工智能方法进行航天器损伤检测和评估显现出以下几个重要趋势:

1. 运用并结合多种人工智能学习算法 (如神经网络与深度学习), 实现航天器复杂损伤检测与

特征分类。

人工智能学习算法具有多样性的算法架构, 不同学习算法擅长解决不同问题。结合不同应用场景下的多种人工智能学习算法, 可有效提高航天器复杂撞击损伤检测效率和损伤特征分类效果。

2. 改进和优化学习算法, 更准确有效地进行损伤模式识别和评估。

为提高学习算法性能, 优化与改进是必不可少的环节。对算法本身的优化与改进, 包括损失函数设置、迭代步骤优化、终止条件判断等, 可对学习算法的性能产生重大影响。此外, 复杂学习算法网络本身拥有大量需要优化的参数, 网络参数的优化方法已成为决定学习算法性能的核心因素之一。

3. 扩展人工智能学习算法和模型, 更好地适应航天器损伤检测与评估系统。

结合具体的航天器损伤检测与评估系统, 扩展现有学习算法和模型, 包括对实际输入的测试数据进行预处理以获得更好的迭代算法计算结果, 对不同损伤检测场景进行分类, 使用不同优化模块以获得更好的性能对比测试, 以及依据损伤评估输出结果划定合理分类标准。

4. 利用人工智能技术分析典型航天器撞击损伤样本的数据特征, 指导航天器空间碎片防护设计。

<sup>‡</sup> 通讯作者

© 浙江大学出版社 2022

人工智能技术的优势在于可从大量数据样本中提取典型特征。基于在轨空间碎片环境试验和地面模拟试验的大量损伤样本，人工智能技术可以表征不同撞击条件下航天器损伤特征差异，从而建立撞击条件与损伤结果之间的联系。因此，工程师可通过优化航天器的防护结构提高航天器在轨运行的安全性。

5. 利用人工智能技术对空间碎片环境建模和分析，实现空间碎片的监测、预警、减缓和清除，以减轻空间碎片对航天器的影响。

利用人工智能技术对空间碎片建模和分析，能够描述复杂的、难以用数学公式描述的定性经验知识，具有较强表达能力。人工智能建模可以根据对空间碎片模型知识的新领悟进行修改和扩展，系统可以更加灵活地适应新的需求。对空间碎片的建模和分析越清晰，对碎片影响的监测、预警、减缓和消除就越准确，从而大大降低空间碎片对在轨航天器的影响。

总之，基于人工智能的航天器损伤检测识别和空间碎片风险评估对于航天工业的发展至关重要，这些挑战需要航天装备研究、模式识别和人工智能等领域工作者的不断努力。

在此背景下，《信息与电子工程前沿（英文）》期刊组织了“人工智能在空间环境和航天器中的应用”专题。主要内容关于利用人工智能方法学习检测数据，以及对航天器进行损伤检测与损伤评估的方法，包括航天器损伤特征与检测数据之间的层次关联性和如何利用人工智能分析数据对航天器进行损伤评估。经严格审查，选用了5篇研究论文。

曹九稳等研究了基于同步压缩变换（SST）和纹理颜色分布（TCD）的超高速碰撞（HVI）振动源识别与定位。提取的SST和TCD图像特征被进一步融合用于HVI图像表示。通过关联和评估样本标签与特征维度之间的相似性，得出最优选择性拼接特征 $OS_{SST+TCD}$ ，以保证更准确的检测和定位。将常用的传统分类模型和回归模型通过投票和叠加的方式融合，实现最终的检测和定位。最后，基于采集的3种高速子弹撞击铝合金板产生的HVI数据，验证了所提算法的有效性。

黄雪刚等基于红外热图像序列构建了多区域损伤挖掘模型，以描述不同空间层的撞击损伤。

采用变分贝叶斯推理求解模型参数，有效地从红外图像数据中识别不同类型的撞击损伤。此外，将具有能量函数的图像分割算法和具有稀疏表示的图像融合方法结合，建立图像处理框架，以消除变分贝叶斯误差并比较不同类型损伤的位置。在实验中，将所提方法用于评估二次碎片云对典型Whipple防护结构后壁撞击造成的复杂损伤。通过对HVI造成的复杂损伤（包括表面和内部损伤缺陷）进行识别和评估，验证了所提方法的有效性。

为满足航天器损伤无损检测和定量评价的要求，霍建亮等将拼接思想引入红外热成像无损检测技术，以实现大尺寸检测。他们通过对采集到的热数据进行分类和重构，获得凸显损伤信息的图像，并提出一种图像拼接方法，实现多个检测场景图像快速、准确拼接，从而得到全景图像。结合图像分割等处理方法，对损伤区域进行标记、提取和定量计算，实现对损伤信息的定位和定量评估。

宋燕等研究了连续阴影图中碎片云的分布特征，以提高HVI在典型双层板Whipple防护结构的损伤估计精度。具体而言，他们使用图像处理技术从获取的阴影图中提取碎片云的目标运动参数，构建轨迹模型，从而估计出具有理想性能的损伤。在HVI实验中，使用超高速序列激光阴影图成像仪处理8个连续阴影图片帧，并选择其中4个具有代表性的帧用于后续特征分析。然后，使用图像处理技术，从连续图像帧中提取特殊碎片特征。根据提取的信息，对碎片进行图像匹配，并根据匹配的碎片对碎片云的轨迹进行建模。最后，基于所构建的模型，提出改进的后壁损伤估计方法。

殷春等基于温度变化特征构造高斯混合模型对红外视频流采样数据进行分类，并重构图像，得到反映缺陷特征的红外重构图像（IRRI）。他们设计了多分割目标函数以保证图像分割结果对于去噪和细节保留的有效性。即，提出一种多目标优化算法实现细节保留和去噪之间的平衡，并对MOEA/D算法进行优化，以保证损伤分割的准确性。在分割过程中，尽可能从材料背景区域分割出损坏区域的详细信息，以确保损伤检测的完整性。实现了对噪声区域的正确划分，同时保证了

损伤检测的准确性。

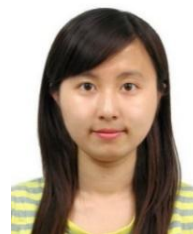
总体而言，本专题涵盖了与人工智能在空间环境和航天器中的应用密切相关的一些研究课题，从撞击损伤的自动检测和智能评估、智能建模和风险预测到撞击感知等。我们衷心希望这一专题能够激发对这些课题感兴趣的研究人员，促进人工智能技术在航空航天领域的应用。

最后，我们要特别感谢作者和审稿人对本专题的大力支持和宝贵贡献，感谢本专题的编辑和主编潘云鹤院士、卢锡城院士。



包为民，中国科学院院士、国际宇航科学院院士。现任中国航天科技集团科技委主任，兼任第十届中国科协副主席，中国科学院主席团成员，国际宇航科学院主席团成员、工程学部主席，中国惯性学会理事长，西安电子科技大学空间科学与技术学院院长，是我国航天运载器总体及控制系统领域学术带头人。获国家科技进步

特等奖 1 项、一等奖 1 项，国家技术发明一等奖 1 项。



殷春，2014 年获电子科技大学博士学位。2014 年 7 月至 2019 年 7 月，为电子科技大学自动化工程学院副教授。2019 年 8 月成为电子科技大学自动化工程学院教授。

她的一篇发表在 *J Mechatron* 的论文进入该期刊“2013 - 2016 年度高被引 top 5 论文”名单，另一篇论文进入 ScienceDirect “2012 年度 top 25 下载文章”名单。获 2015 年 IEEE 国际仪器与测量技术会议最佳论文奖。担任 *Front Inform Technol Electron Eng* 通讯专家。她的一项技术成果获四川省科技进步一等奖。研究兴趣包括极值寻求控制、多目标优化、红外热成像测试和超高速撞击工程。



黄雪刚，副研究员，在西南交通大学获学士学位，分别于 2010 和 2014 年在军械工程学院获硕士和博士学位。2014 年至今在中国空气动力学研究与发展中心超高速空气动力研究所任职。

他的硕士论文入选 2012 年中国河北省优秀硕士论文，博士论文入选 2017 年全国优秀博士论文。发表期刊论文 60 余篇。主要研究方向为航天器测控技术、空间屏蔽工程、超高速撞击工程和材料动力学行为。



易伟，分别于 2006 和 2012 年在电子科技大学获电子工程学士和博士学位。2010 至 2012 年，为澳大利亚墨尔本大学墨尔本系统实验室访问学生。2013 年至今在电子科技大学信息与通信工程学院任职，现任教授。

曾获 2012 年美国亚特兰大 IEEE 雷达会议“最佳学生论文奖一等奖”、2012 年新加坡第 15 届信息融合国际会议“最佳学生论文奖”以及 2018 年英国剑桥第 21 届信息融合国际会议“最佳学生论文奖”。他是 *J Radars* 编委和 *MDPI Sensors* 客座编辑。担任 *Front Inform Technol Electron Eng* 通讯专家。分别担任过 2018、2019 和 2020 年 ICCAIS 组织联席主席、总联席主席和出版联席主席。研究兴趣包括目标和信号检测与跟踪、雷达信号处理、多传感器信息融合和资源管理。



Sara DADRAS，2006 年在伊朗 Shiraz 大学获学士学位，并分别于 2008 和 2012 年在伊朗 Tarbiat Modares 大学获电气工程硕士和博士学位。2012 年加入美国犹他州立大学电气与计算机工程系。

她是 SAE 电子技术委员会的组织者之一。目前担任 *IEEE Trans Autom Sci Eng*、*IEEE Access* 和 *Asian J Contr* 副编辑。她是 IEEE、ASME 和 SAE 会员。研究兴趣包括混合动力电动汽车、自动驾驶汽车、可再生能源系统、图像处理和优化控制。