

专家介绍



张永杰,西北工业大学教授,博士生导师,飞行器布局设计研究所副所长,航天三院磁浮电磁推进总体部结构副总师,中国飞机强度研究所客座研究员,国际无人机标准委员会WG5工作组专家,《应用力学学报》青年编委。入选重庆市、安徽省、黑龙江省、山西省、江西省、江苏省科技专家库专家,山西省通用航空产业联盟专家委员会委员。主持国家自然科学基金2项、国家级项目20余项。参与制定多项国家和国际标准,发表高水平学术论文90余篇,申报中国和国际专利40余项。获得省部级一等奖3项、三等奖1项,中国航空学会科技二等奖1项,中航工业科技成果二等奖1项、三等奖1项,国家级教学成果一等奖1项,陕西省教学成果特等奖1项。

## 民机重着陆典型案例分析研究

张永杰<sup>1</sup>,周航<sup>1</sup>,李肖成<sup>2</sup>,白春玉<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学民航学院,710072 西安;

2. 中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室,710065 西安)

**摘要:**近十年来,民航飞机的重着陆事故引起了广泛关注,约1/3的民航飞机安全事故与着陆相关,其中重着陆事故几乎占着陆事故的1/5。重着陆不仅对飞机结构造成损害,严重时甚至会导致飞机毁坏或人员伤亡。然而,关于重着陆的统计数据仍不足。本研究通过定量标准、仿真分析和机器学习方法,系统研究了重着陆的判定标准及其对飞机结构的损伤模式,并通过对比波音737、空客A320等主流机型过去十年内53起典型重着陆事故进行了详细统计与分析。研究结果表明,重着陆事故通常会对飞机的起落架、机身、机翼等关键部件造成不同程度的损伤;不同类型的重着陆事故对飞机结构的破坏程度差异显著。

**关键词:**民航飞机安全事故;重着陆;仿真建模;机器学习;案例分析

中图分类号:V222;V226

文献标志码:A

文章编号:1000-4939(2025)06-1224-13

## Analysis of typical cases of heavy landing in civil aircraft

ZHANG Yongjie<sup>1</sup>,ZHOU Hang<sup>1</sup>,LI Xiaocheng<sup>2</sup>,BAI Chunyu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, 710072 Xi'an, China;

2. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute, 710065 Xi'an, China)

收稿日期:2024-12-23

通信作者:周航. E-mail:zhouh@mail.nwpu.edu.cn

引用格式:张永杰,周航,李肖成,等. 民机重着陆典型案例分析研究[J]. 应用力学学报,2025,42(6):1224-1236.

ZHANG Yongjie,ZHOU Hang,LI Xiaocheng,et al. Analysis of typical cases of heavy landing in civil aircraft[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(6):1224-1236.

**Abstract:** In the past decade, approximately one-third of civil aviation safety incidents have been related to landing, with hard landings comprising one-fifth of these landing-related incidents. Hard landings not only damage aircraft structures but also can lead to aircraft destruction or loss of life in severe cases. However, statistical data on hard landings remain limited. This paper systematically analyzes hard landing criteria through a review of quantitative standards, simulation analysis, and machine learning techniques. It also conducts a statistical examination of 53 typical hard landing incidents of mainstream aircraft such as Boeing-737 and Airbus-A320 over the past decade, offering a detailed exploration of common structural damage patterns associated with hard landings. Results show that heavy landing incidents often cause damage of different degrees to the aircraft's landing gear, fuselage, wings, and other key components. Moreover, the extent of damage differs significantly among various types of heavy landing incidents.

**Key words:** civil aviation safety incident; heavy landing; simulation modeling; machine learning; case analysis

重着陆 (heavy landing), 在某些地区也称为硬着陆 (hard landing), 参考波音公司对其定义如下: 飞机着陆时垂直加速度超过规定极限值或者垂直方向上的速度超过规定值即为重着陆<sup>[1-3]</sup>。当异常天气条件、机械问题、飞机超重、飞行员决策或操作失误便可能引起飞机以比正常着陆更大的垂直速度和力量撞击地面<sup>[4]</sup>。而空客公司将硬着陆、超重着陆 (下文简称“重着陆”) 以及高俯仰率着陆均纳入重着陆检查范围内。与飞机不受控制的下降到地面 (坠机) 不同, 重着陆发生时, 飞行员仍然可以完全或部分控制飞机。据 International Civil Aviation Organization<sup>[5]</sup>、National Transportation Safety Board<sup>[6]</sup> 以及 Aviation Safety Network<sup>[7]</sup> 事故数据统计, 2013—2022 年间, 全球发生的 815 起民航飞机安全事故中, 着陆不安全事件发生 267 起, 其中重着陆事故约占到了总事故的 6.1% (图 1)。由于重着陆至少导致 16 架飞机损毁、29 架严重损坏、8 架较为轻微的损坏 (图 2)。可见, 重着陆事故发生率虽占比不高, 但对飞机的影响程度有增大的趋势, 尤其是导致损毁的比例明显上升。

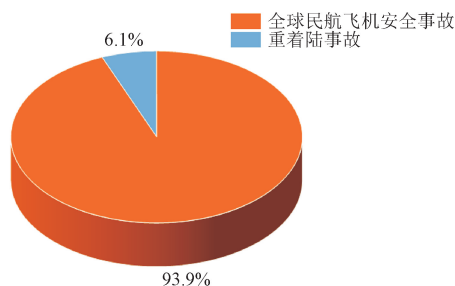


图 1 2013—2022 年间重着陆占民航飞机事故率

Fig. 1 Proportion of hard landing incidents among civil aviation accidents (2013—2022)

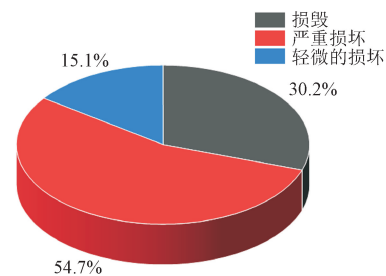


图 2 2013—2022 年间重着陆事故对飞机的损坏程度

Fig. 2 The degree of damage to the aircraft caused by hard landings (2013—2022)

目前, 关于重着陆的研究主要集中在事故征候统计<sup>[8]</sup>、风险评估预测<sup>[9-17]</sup> 以及智能诊断技术<sup>[18-20]</sup> 等领域。当飞机发生重着陆时, 轻则可能导致乘客感到轻微不适或结构受损, 重则可能引发飞机严重故障, 甚至造成人员伤亡。此外, 重着陆可能对飞机的起落架、起落架与机身的连接部位以及机身结构等产生不同程度的影响。因此, 明确重着陆的判断方法, 并预测在不同情况下重着陆可能引发的各种后果, 具有重要意义。

随着计算机计算能力的提升, 通过仿真建模从部件到整机层面对飞机重着陆进行分析逐渐成为可能。因此, 通过案例分析明确各类重着陆工况的输入参数, 并梳理重着陆的主要影响区域、结构以及主要损伤模式显得尤为关键。然而, 国内外相关资料较为匮乏。因此, 在采用仿真建模方法进行飞机重着陆分析时需要准确的参数输入, 并对重着陆的主要影响区域、结构及可能导致的损伤模式进行详细判定。

本研究对 ASN、NTSB 等数据库中记录的世界各

地波音 737 与空客 A320 等主流民航客机近十年内发生的 53 起重着陆事故案例进行了统计分析,为民航客机重着陆冲击动力学仿真提供了数据支持。同时,对现有的各类主流重着陆判定与分析方法进行了综合论述。

## 1 重着陆判定与分析

### 1.1 基于定量标准的重着陆判定方法

从定量分析的角度对升降率为零的理想状态下飞机重着陆进行受力分析,根据动量守恒定律以及牛顿定律可得着陆载荷计算方法如下。

$$mv = ft \quad (1)$$

$$a = \frac{f}{m} \quad (2)$$

$$G = \frac{ma}{W} = \frac{dv}{gdt} \quad (3)$$

式中: $m$  为飞机着陆质量; $v$  为飞机接地瞬间垂直方向的下沉速度; $f$  为飞机接地瞬间地面对飞机的反作用力; $t$  为接地时长; $W$  为飞机着陆时重力大小; $g$  为重力加速度。

考虑到飞机接地时,在垂直方向上是一个假设的均匀减速过程,即  $f$  恒定,则着陆载荷计算方法如下。

$$mv = f \frac{2s}{v} \quad (4)$$

$$a = \frac{f}{m} = \frac{v^2}{2s} \quad (5)$$

$$G = \frac{ma}{W} = \frac{v^2}{2sg} \quad (6)$$

式中, $s$  为飞机下沉速度从接地开始到大小为零时主轮的压缩距离。

由上文提及的理想状态下着陆载荷计算方法可推知,飞机着陆时载荷与下沉速度以及垂直加速度呈正相关趋势。而对飞机不同姿态下着陆载荷进行分析还可知,着陆载荷还受到飞机质量、俯仰角度和滚转角度的影响<sup>[21-22]</sup>。

通过对国内外适航标准和波音、空客等飞机制造商提供的飞机维护手册以及航空公司相关规定中对重着陆判定标准进行调研,可知目前对于重着陆的定量判定标准因飞机制造商与飞机机型等因素不同而存在差异。其中较为权威的重着陆定量判定标准如下。

1) 中国民用航空规章:运输类飞机适航标准 (CCAR-25-R4)<sup>[23]</sup>。

对于小于或等于飞机设计最大着陆质量的着陆情况(非超重着陆),限制下沉速度为 3.05 m/s (即 10 ft/s);对于设计起飞质量(以减小的下沉速度着陆情况中的最大质量)时的着陆情况,限制下沉速度为 1.83 m/s (即 6 ft/s)。

2) 波音公司飞机维护手册<sup>[24]</sup>。

对于小于或等于飞机设计最大着陆质量(非超重着陆),主起落架垂直加速度峰值超过 2.1g (具体判定标准因机型不同而存在差异,如 77 型飞机为 1.8g);对于小于或等于飞机设计最大着陆质量,主起落架垂直加速度远小于 2.1g,但着陆过程飞机滚转坡度大于 2°也可能是重着陆(具体判定标准因机型不同而存在差异,需参考对应机型 AMM 手册);飞机着陆质量大于最大着陆质量 453.59 kg (1000 磅)以上为超重着陆(overweight landing),超重着陆在重着陆范畴之外,但超重着陆常导致过大的下沉速度或  $g$  值,与重着陆密切相关。

3) 空客公司飞机维护手册<sup>[25]</sup>。

硬着陆(hard landing):对于小于或等于飞机设计最大着陆质量的着陆情况(非超重着陆),飞机重心处的垂直加速度大于等于 2.6g 且小于 2.86g,或者垂直速度大于等于 10 ft/s 且小于 14 ft/s (1 ft = 0.3048 m)。

严重硬着陆(severe hard landing):对于小于或等于飞机设计最大着陆质量的着陆情况,飞机重心处的垂直加速度大于 2.86g,或者垂直速度大于等于 14 ft/s。

重着陆(hard overweight landing):对于大于飞机设计最大着陆质量的着陆情况,飞机重心处的垂直加速度大于等于 1.7g 且小于 2.60g,或者垂直速度大于等于 6 ft/s 且小于 13 ft/s。

严重重着陆(severe hard overweight landing):对于大于飞机设计最大着陆质量的着陆情况,飞机重心处的垂直加速度大于 2.60g,或者垂直速度大于等于 13 ft/s。

高俯仰率着陆:对于小于或等于飞机设计最大着陆质量的着陆情况,俯仰变化率超过 10°/s (民航客机由于高俯仰率着陆很可能引起着陆过载,重着陆判定方法对该工况仍适用)。

本研究对重着陆的判定方法均参考空客公司飞机维护手册中的相关规定,如图 3、图 4 所示。并且,

下文对以上几种着陆情况统称为重着陆。

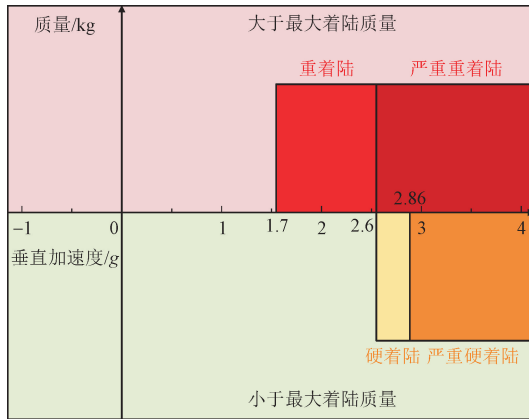


图3 通过垂直加速度判定重着陆方法

Fig. 3 Hard landing determination method based on vertical acceleration

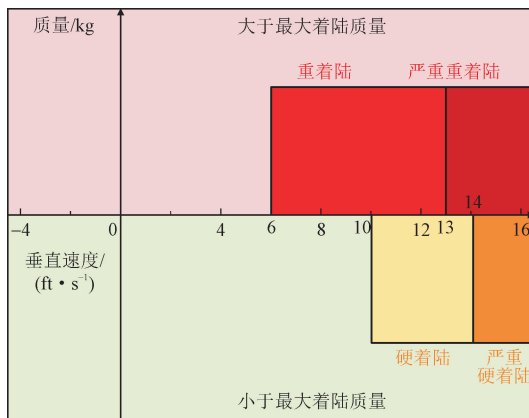


图4 通过下沉速度判定重着陆方法

Fig. 4 Hard landing determination method based on sink rate

## 1.2 基于仿真分析的重着陆判定方法

基于仿真分析的重着陆判定方法指利用计算机模拟飞机在着陆时的运动和受力情况,结合机体变形和受力情况或垂直速度与加速度等规定进行分析和判定<sup>[26]</sup>。该方法相对于传统基于QAR(quick access recorder)数据判断的方法具有更准确且细致的特点。因为QAR数据采集频率和区域有限,而基于有限元分析FEA(finite element analysis)和多体动力学MBD(multi-body dynamics)分析的仿真方法可对着陆过程中机体变形和受力情况进行全过程细致评估,但需要在计算效率和关注区域精细化建模间进行取舍。

目前,已有许多学者利用该方法对小型飞机或飞机部件进行重着陆仿真分析,但受制于计算效率,

该方法在大型飞机整机重着陆分析中应用较少。OH等<sup>[27]</sup>利用FEA研究了不同着陆角度下重着陆对老龄飞机的主起落架和机翼部件的结构完整性进行了评估。结果表明,重着陆时,主起落架的下侧支撑处出现了应力集中现象。CRISTIANI等<sup>[28]</sup>采用MBD和FEA耦合分析的方法对旋翼机紧急着陆时的动态过程和结构响应进行了仿真分析,并与实验进行了对照,提供了一种基于MBD和FEA耦合的飞机重着陆仿真分析方法。ESSIENUBONG等<sup>[29]</sup>利用LS-DYNA对超重着陆工况下的轮胎结构影响进行了分析,研究结果显示,重着陆对轮胎的损害程度与飞机着陆质量成正相关趋势。LEE等<sup>[30]</sup>提出了一种耦合MBD和线性动态仿真模型并结合扩展的惯性释放技术的高效仿真方法,并准确判断是否发生重着陆。

## 1.3 基于机器学习重着陆判定方法

与仿真建模方法相比,机器学习的判定方法避免了计算复杂度高、模型假设限制等问题。机器学习方法可在飞行过程中进行实时监控和判定,具有高度自动化的特点,无需手动构建复杂的物理模型。并且,机器学习模型可以不断更新和优化,适应不同类型的飞机和不同的飞行条件。但机器学习模型的性能高度依赖于训练数据的质量和数量并且其决策逻辑难以解释。

基于机器学习的重着陆判定方法主要包含垂直速度、加速度、俯仰角、飞行高度等数据收集;提取有助于区分重着陆和正常着陆的关键特征;利用支持向量机SVM(support vector machine)<sup>[31-36]</sup>、随机森林<sup>[17,37]</sup>、神经网络<sup>[14,38]</sup>等算法训练模型以及通过测试数据集对模型进行验证,评估模型的准确性和鲁棒性,并通过调整超参数或算法来优化模型性能等步骤。与传统的基于垂直速度或速度超限判定的方法不同,机器学习方法能够将下沉率、侧向加速度、横滚角和俯仰角变化率等多种影响因素纳入诊断训练,从而建立多指标的重着陆诊断模型。

初雪菲<sup>[39]</sup>、韩韶华<sup>[40]</sup>对基于机器学习的民航重着陆诊断模型进行了归纳。可得,在重着陆诊断中,随机森林模型在AUC、精度和查全率方面表现较好。SVM的召回率最高,神经网络最差,但随机森林的召回率与SVM相差不大。基于随机森林的模型构造简单、准确且能获取特征重要性;SVM适合样本不足和非线性数据分类,受不平衡样本影响小,

查准率和查全率差距小。相比之下,神经网络表现较差,AUC和查全率均低,因其对训练样本要求高,且正例样本有限,容易导致过拟合。3种模型ROC(receiver operating characteristic)曲线以及AUC、查全率、查准率与精度柱状图如图5、图6所示。

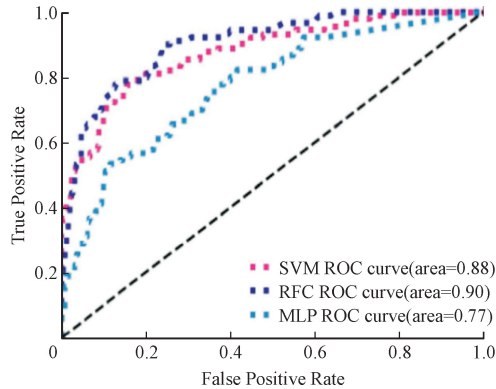


图5 各学习方法 ROC 曲线对比<sup>[39]</sup>

Fig. 5 Comparison of ROC curves for various learning methods<sup>[39]</sup>

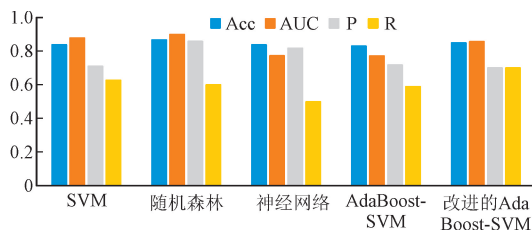


图6 不同模型多指标结果柱状图<sup>[40]</sup>

Fig. 6 Multi-metric bar chart for model performance<sup>[40]</sup>

## 2 重着陆事故典型场景梳理

### 2.1 事故典型着陆参数统计

以空客公司的硬着陆、严重硬着陆、重着陆和严重重着陆的判定标准为基础,针对4个典型民航硬着陆案例、7个严重硬着陆案例、4个重着陆案例以及4个严重重着陆案例事故调查报告进行了详细梳理分析。基于QAR数据<sup>[41-57]</sup>对各个案例中接地速度、着陆时俯仰角度、最大垂直加速度以及垂直速度取算术平均数得到了不同重着陆工况下民机的典型事故场景数据(表1)。事故典型场景雷达图如图7所示。

表1 典型着陆参数统计

Tab. 1 Statistics of typical landing parameters

重着陆类别	接地速度/kn	着陆时俯仰角度/(°)	最大垂直加速度/g	垂直速度/(ft·s <sup>-1</sup> )
硬着陆	129	4.50	2.38	11.13
严重硬着陆	140	4.70	3.22	15.24
重着陆	133	5.78	1.87	7.49
严重重着陆	140	1.50	3.64	6.00

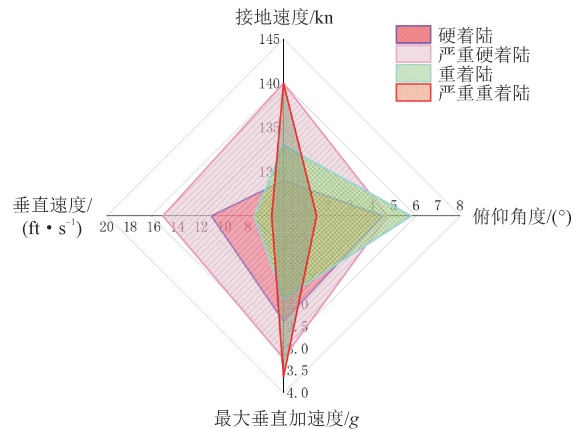


图7 重着陆事故典型着陆参数统计

Fig. 7 Landing parameters in hard landing incidents

### 2.2 重着陆事故典型环境梳理

环境中对飞机着陆具有影响的因素很多,本节主要结合对飞机重着陆具有显著影响的因素如进近着陆时机场风速、能见度等气象条件进行梳理<sup>[41-57]</sup>,可得如下结论。

1) 典型硬着陆场景具有如下特点:进近与着陆时风速在10~16 kn之间,普遍满足进近与着陆风速要求,且事故时能见度状况普遍良好;事故原因主要为进近遇到轻微风切变以及飞行员操纵不当,导致飞机进近姿态不稳定下降率过大,遭遇风切变时处理不当,或俯仰角度与弹跳控制不当。

2) 典型严重硬着陆场景具有如下特点:飞行员操作不规范仍为主要因素,其中包括在进近和着陆阶段的操作不当,如进近速度过快、俯仰角度不当、着陆姿态不稳定等;一半事故发生在风切变以及阵风气象条件下,并且一半严重硬着陆事故伴随弹跳现象,这通常与着陆姿态不当或下降速度过快有关,弹跳可能导致第二次着陆时飞机单个起落架受到过大的冲击力从而导致对单个起落架结构造成严重损坏。此外,飞机机翼结冰也可能导致飞机在着陆过程中具有过大的垂直速度。

3) 典型重着陆场景具有如下特点:着陆前普遍存在飞行员对飞机质量和能量管理不当的现象;进近与着陆过程中强烈的侧风和阵风导致着陆姿态不稳定带来的弹跳或不当姿态着陆会进一步加剧着陆对飞机结构损伤;进近过程中,飞行员为避免着陆速度过大,减小超重着陆的风险从而维持了飞机较高的俯仰姿态,这种高俯仰角度着陆姿态可能导致机尾擦地。

4) 典型严重重着陆场景具有如下特点:严重重着陆通常在严重的恶劣气象条件发生,阵风风速高达40 kn或伴随雷暴现象;在飞机以超出标准的速度与质量触地后常伴随严重的多次弹跳,严重重着陆弹跳常具有速度、俯仰/横滚角度变化快的特点,在第二次弹跳发生时飞机结构常发生严重损坏,飞行员很难从该状态中改出并复飞;并且,严重重着陆时飞机具有远大于正常工况的能量,对结构的破坏常常是灾难性的。由于超重着陆时飞机通常还有大量燃油未消耗,严重重着陆常引起火灾,带来严重的后果。

### 3 重着陆导致飞机结构损伤概率统计

根据近十年53起重着陆事故案例统计可得重着陆事故的主要损伤结构与典型损伤模式如下。

1) 起落架损伤模式:起落架损伤是重着陆事故中最常见的损伤类型之一。其中通常包括轮胎爆破脱落、起落架产生严重的塑性变形,起落架缓冲支柱出现裂纹或形变以及起落架支撑结构断裂导致起落架塌陷等问题。此外还可能出现起落架转向系统、起落架收放系统等部件失效的问题。

2) 机身损伤模式:包括与起落架所在区域的机身蒙皮起褶皱、破损或撕裂,隔框、桁条的塑性变形或折断;机尾与地面摩擦导致蒙皮产生裂缝和刮痕。其中,蒙皮褶皱或产生裂缝和刮痕是最常见的损伤模式,其次是隔框、桁条等结构发生塑性变形或断裂<sup>[58]</sup>。

3) 机翼损伤模式:包括机翼与地面擦伤,机翼蒙皮起褶皱,襟翼或副翼等舵面变形,机翼折断。

4) 发动机损伤模式:轮胎爆胎使碎片冲击发动机叶片,螺旋桨叶片与地面接触从而折断或破损,发动机着火。

5) 其他损伤模式:襟翼、扰流板等机构失效以及辅助动力装置磨损。

近十年发生的53起重着陆事故案例中,各部件损伤频率如图8所示。

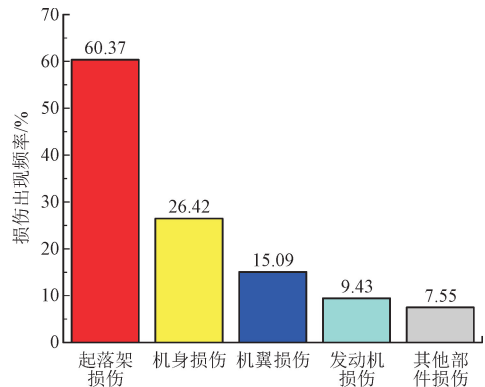


图8 重着陆事故中各结构部件出现损伤的频率

Fig. 8 Frequency of structural component damage in hard landing incidents

## 4 各类重着陆导致飞机结构损伤模式梳理

由上述统计可得,重着陆主要对飞机起落架和机身结构产生较大影响,并且不同类别的重着陆对飞机起落架和机身结构的损伤程度存在显著区别。下文根据硬着陆、严重硬着陆、重着陆和严重重着陆事故调查报告,系统概述这些不同类型的重着陆对起落架和机身结构的影响。

### 4.1 典型硬着陆事故结构损伤模式

根据事故的典型场景,可将飞机分为3种不同的着陆工况。

1) 飞机以正常姿态触地时,可能会导致主起落架的一些部件承受超过其设计负荷极限的载荷,从而可能出现裂纹等损伤。

2) 飞机以大俯仰角度姿态触地时,可能会导致机尾下部受到撞击和刮擦,加强筋和蒙皮会发生磨损。机尾隔框可能会发生变形,并且机尾侧面可能会出现凹痕和变形。

3) 飞机在着陆后弹跳时,起落架受到剧烈冲击,导致其下部结构中的局部液压阻尼显著增加,使起落架缓冲支柱由于异常高的应力而发生破损,从而导致起落架内的液压油泄漏。如果飞机以低头姿态反弹着陆,会在前起落架上施加过高的垂直载荷,可能导致前起落架轮轴发生形变。前机身下部的隔框和桁条可能会发生变形,导致蒙皮出现褶皱,如图9所示。同时,中机身或前机身上方的蒙皮可能也

会出现褶皱。



图9 典型硬着陆事故导致机身蒙皮褶皱<sup>[59]</sup>

Fig. 9 Wrinkling of fuselage skin caused by typical hard landing incidents<sup>[59]</sup>

#### 4.2 典型严重硬着陆事故结构损伤模式

根据事故的典型场景,可将飞机分为2种不同的着陆姿态。

1) 飞机以正常姿态触地时,可能会导致主起落架缓冲支柱产生较大的永久变形或裂纹。在下降速度较大的情况下,严重硬着陆可能导致前机轮爆胎,甚至在横滚角度较大时可能导致机轮轮毂断裂。前起落架以较大的垂直加速度触地时,可能使前起落架阻力撑杆断裂,引发前起落架的塌陷。导致机身两侧腹部整流罩蒙皮出现褶皱、机身中部隔框与长桁变形。

2) 飞机在着陆后弹跳时,可能导致飞机姿态不稳定,难以控制俯仰角和横滚角。该情况下,可能引起单个起落架垂直载荷出现过大的集中,从而引发严重的结构损伤,例如前起落架塌陷、爆胎和轮毂破裂等问题。此外还可能导致前轮舱内部的一些支架可能会折叠,如图10所示,前起落架上方的机身隔框可能会出现弯曲和裂纹。

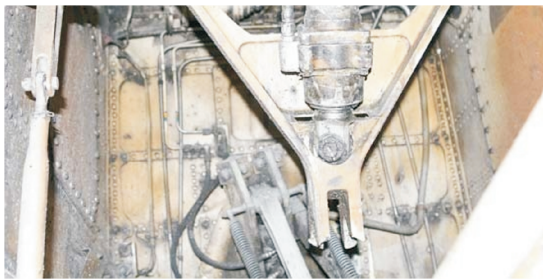


图10 典型严重硬着陆事故中前起落架阻力撑杆断裂<sup>[60]</sup>

Fig. 10 Fracture of nose landing gear drag strut in severe hard landing incidents<sup>[60]</sup>

通常情况下,前起落架上方的机身蒙皮也会出

现褶皱。此外,也可能导致中机身翼根上方区域出现褶皱,翼根处的翼梁也可能发生变形。

#### 4.3 典型重着陆事故结构损伤模式

重着陆事故发生时通常伴随多次弹跳。飞机在弹跳过程中可能会出现俯仰角度过大因此导致机尾擦地。飞机在着陆后弹跳时,前起落架可能承受过大的负载,导致前起落架轮胎内表面之间出现褶皱,并导致前起落架缓冲支柱的变形,同时可能引起轮轴、减震支柱和内筒衬内的划痕。当横滚角度过大时,可能导致一侧主起落架与机身连接螺栓被切断,使起落架塌陷。前起落架承受过大的负载会传递至机身,导致前机身结构受损。例如,飞机前机身上部蒙皮可能会出现断裂和变形,机身隔框与多根长桁可能会出现裂缝和变形,还可能导致前起落架舱门变形,如图11所示。弹跳引起的姿态不稳定性或重着陆时过高的俯仰角度还可能导致后机身与跑道发生刮擦,进而导致刮擦部位的蒙皮损坏,隔框和长桁的变形。



图11 重着陆引起前机身上部蒙皮长桁以及隔框结构损伤细节图<sup>[61]</sup>

Fig. 11 Detail of damage to the upper fuselage stringers and frames caused by hard landing<sup>[61]</sup>

#### 4.4 典型严重重着陆事故结构损伤模式

严重重着陆事故发生时通常伴随异常的着陆姿态,可分为2种典型的着陆姿态。

1) 飞机着陆后发生严重弹跳,期间可能引起前轮爆胎并使前起落架直接穿透驾驶舱。在连续的弹跳过程中,机翼可能发生撕裂或断裂,这可能导致油箱破损,从而引发严重的火灾。此外,机翼上的副翼、襟翼等舵面可能会变形,机翼蒙皮也可能出现褶皱。机身隔框和长桁可能会发生变形,蒙皮也可能出现撕裂,如图12所示。



图12 严重重着陆引起机翼断裂细节图<sup>[40]</sup>

Fig. 12 Wing fracture from severe hard landing<sup>[40]</sup>

2) 飞机着陆或在反弹过程中以低头姿态触地时,过高的载荷施加在前起落架上可能使前起落架阻力撑杆断裂或主起落架与机身链接销钉剪断导致起落架塌陷。可能引起前起落架上方机身出现凹坑或蒙皮撕裂(图13)。起落架舱门以及电子设备舱门门框严重变形。前机身大量隔框变形或破损。

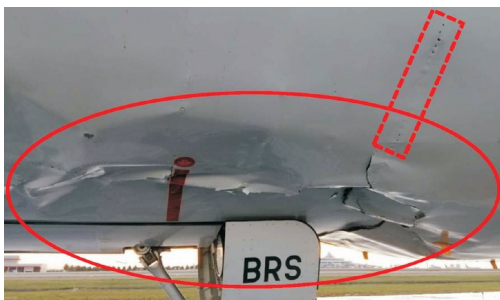


图13 严重重着陆引起前起落架上方机身结构损伤细节图<sup>[62]</sup>

Fig. 13 Detail of fuselage structure damage above nose landing gear caused by severe hard landing<sup>[62]</sup>

## 5 结论与展望

重着陆是一种危及飞行安全的事件,尤其是其对飞机起落架、机身、机翼等关键结构的影响不可忽视。本研究通过文献综述与案例分析统计得到如下结论与展望。

1) 通过对全球范围内发生的重着陆事故进行统计,揭示了这一事件的主要诱因,如异常天气、飞行员操作失误等,并提供了详尽的典型着陆参数。

2) 3种常用的重着陆判定方法分别为:基于定

量标准的方法,通过对比着陆时的重要参数与相关规章来判定是否发生重着陆;基于仿真分析的方法,利用计算机模拟飞机的着陆过程;以及基于机器学习的方法,通过飞行数据训练模型进行自动化判断。

3) 重着陆对飞机起落架和机身结构的影响尤为显著,且不同类型的重着陆事故对这些结构的损伤程度存在显著差异。

4) 在重着陆诊断中,有限元仿真方法凭借其可解释性和精细化分析优势,表现出较大的潜力。随着计算效率的提升,未来基于统计数据的民航客机重着陆研究将更多依赖于有限元仿真技术,从而对其力学特性和损伤过程进行更为细致的分析。

## 参考文献:

- [1] Boeing. Aircraft maintenance manual Boeing 737 documentation [EB/OL]. (2016-11-02) [2024-12-01]. [https://wtruib.ru/boeing\\_737/amm/](https://wtruib.ru/boeing_737/amm/).
- [2] Boeing. 737 Flight crew operations manual [EB/OL]. (2021-06-15) [2024-12-01]. <https://boredaviator.com/wp-content/uploads/2025/03/B737-300-FCOM-.pdf>.
- [3] Airbus. Airbus A320 A319/A320/A321 aircraft maintenance manual [EB/OL]. [2024-11-12]. [https://manualzz.com/doc/32187428/airbus-a320-a319-a320-a321-aircraft-maintenance-manual#google\\_vignette](https://manualzz.com/doc/32187428/airbus-a320-a319-a320-a321-aircraft-maintenance-manual#google_vignette).
- [4] Wikipedia. Hard landing [EB/OL]. [2024-11-15]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hard\\_landing](https://en.wikipedia.org/wiki/Hard_landing).
- [5] International Civil Aviation Organization. Homepage [EB/OL]. [2024-10-11]. <https://www.icao.int/>.
- [6] National Transportation Safety Board. Homepage [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.ntsb.gov/Pages/home.aspx>.
- [7] Aviation Safety Network. Homepage [EB/OL]. [2024-11-21]. <https://asn.flightsafety.org/>.
- [8] 王帅, 马昊, 陈吉明. 多型重着陆的分析及建议[J]. 综合运输, 2024, 46(1):125-133.  
WANG Shuai, MA Hao, CHEN Jiming. Analysis on multi type heavy landing[J]. China transportation review, 2024, 46(1):125-133 (in Chinese).
- [9] 蔡景, 蔡坤焯, 黄世杰. 基于实时监测参数的民用飞机重着陆预警方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2):298-309.  
CAI Jing, CAI Kunye, HUANG Shijie. Early warning method for heavy landing of civil aircraft based on real-time monitoring parameters[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2022, 22(2):298-309 (in Chinese).
- [10] 郑磊, 池宏, 许保光, 等. 飞机重着陆预警分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(3):56-72.  
ZHENG Lei, CHI Hong, XU Baoguang, et al. Method of early warning analysis for aircraft hard landing[J]. Mathematics in practice and theory, 2019, 49(3):56-72 (in Chinese).
- [11] 孙瑞山, 张思远, 汪磊. 基于统计过程控制的QAR数据风险

- 预测方法[J].统计与决策,2015(21):33-36.
- SUN Ruishan, ZHANG Siyuan, WANG Lei. Risk prediction method of QAR data based on statistical process control[J]. Statistics & decision, 2015(21):33-36(in Chinese).
- [12] 汪磊,孙瑞山,吴昌旭,等.基于飞行QAR数据的重着陆风险定量评价模型[J].中国安全科学学报,2014,24(2):88-92.
- WANG Lei, SUN Ruishan, WU Changxu, et al. A flight QAR data based model for hard landing risk quantitative evaluation[J]. China safety science journal, 2014, 24(2):88-92(in Chinese).
- [13] WANG X Z, WANG H, XU B H. Risk assessment and prediction of aircraft fleet hard landing based on QAR exceedance events [C]//2022 IEEE 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Piscataway, NJ, USA;IEEE, 2022:352-357.
- [14] KONG Y X, ZHANG X G, MAHADEVAN S. Bayesian deep learning for aircraft hard landing safety assessment [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(10):17062-17076.
- [15] LI X, SHANG J X, ZHENG L J, et al. CurveCluster+: curve clustering for hard landing pattern recognition and risk evaluation based on flight data[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(8):12811-12821.
- [16] ZHENG L, XIE J, QIAN S. Risk prediction method of aircraft hard landing based on flight data[M]//Safety and Reliability-Safe Societies in a Changing World. [S. l.]:CRC Press, 2018:1827-1832.
- [17] SUN R S, LI C F. A risk prediction model of hard landing based on random forest algorithm [C]//5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AE-SEE 2021). Les Ulis, France;EDP Sciences, 2021:02080.
- [18] 许桂梅,黄圣国.基于优化支持向量机的飞机重着陆智能诊断[J].计算机测量与控制,2011,19(2):256-259.
- XU Guimei, HUANG Shengguo. Airplane's hard landing diagnosis based on optimized support vector machine[J]. Computer measurement & control, 2011, 19(2):256-259(in Chinese).
- [19] 聂磊,黄圣国,舒平,等.基于支持向量机(SVM)的民用飞机重着陆智能诊断研究[J].中国安全科学学报,2009,19(7):149-153.
- NIE Lei, HUANG Shengguo, SHU Ping, et al. Intelligent diagnosis for hard landing of aircraft based on SVM[J]. China safety science journal, 2009, 19(7):149-153(in Chinese).
- [20] 曹海鹏,舒平,黄圣国.基于神经网络的民用飞机重着陆诊断技术研究[J].计算机测量与控制,2008,16(7):906-908.
- CAO Haipeng, SHU Ping, HUANG Shengguo. Study of aircraft hard landing diagnosis based on neural network [J]. Computer measurement & control, 2008, 16(7):906-908(in Chinese).
- [21] 曹海鹏. B737 重着陆诊断技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [22] 李波,沈航.飞机着陆下沉速度最大值的确定方法[J].应用力学学报,2008,25(1):168-171.
- LI Bo, SHEN Hang. Determination to maximum aircraft sinking speed[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2008, 25(1):168-171(in Chinese).
- [23] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准:CAR-25-R4[S].北京:中国民用航空局,2016.
- [24] Boeing. Boeing 747-400 aircraft maintenance manual[M]. Washington D. C., USA;Boeing Company, 2006.
- [25] Airbus. Aircraft maintenance manual temporary revision[M]. Toulouse;Airbus,2006.
- [26] 钱宇,叶亮.民航运输飞机重着陆研究综述[J].科学技术与工程,2021,21(31):13211-13220.
- QIAN Yu, YE Liang. Summary of research on civil commercial transport aircraft hard landing[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(31):13211-13220(in Chinese).
- [27] OH Y K, SIM S K, SHIN K S. A study of the effects of hard landing on aircraft structure[J]. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2011,14(5):805-811.
- [28] CRISTIANI D, COLOMBO L, ZIELINSKI W, et al. On the evaluation of a coupled sequential approach for rotorcraft landing simulation[J]. Sensors, 2020, 20(9):2540.
- [29] ESSIENUBONG I A, IKECHUKWU O, PAUL S. Finite element analysis of aircraft tire behaviour under overloaded aircraft landing phase[J]. Aeronautics and aerospace open access journal, 2018, 2(1):32-37.
- [30] LEE K B, JEONG S H, CHO J Y, et al. Hard-landing simulation by a hierarchical aircraft landing model and an extended inertia relief technique[J]. International journal of aeronautical and space sciences, 2015, 16(3):394-406.
- [31] 陈思,孙有朝,郑敏.基于支持向量机的飞机重着陆风险预警模型[J].兵器装备工程学报,2019,40(9):154-158.
- CHEN Si, SUN Youzhao, ZHENG Min. Heavy landing risk pre-warning model based on support vector machine[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2019, 40(9):154-158(in Chinese).
- [32] 常文兵,张佳宁,周晟瀚.基于支持向量机的飞机重着陆预测模型[J].飞机设计,2017,37(2):19-22.
- CHANG Wenbing, ZHANG Jianing, ZHOU Shenghan. A prediction model of airplane hard landing based on support vector machine[J]. Aircraft design, 2017, 37(2):19-22(in Chinese).
- [33] 许桂梅,黄圣国.基于多核支持向量机的飞机重着陆诊断[J].计算机工程,2011,37(10):157-159.
- XU Guimei, HUANG Shengguo. Airplane hard landing diagnosis based on multi-kernel support vector machine[J]. Computer engineering, 2011, 37(10):157-159(in Chinese).
- [34] HU C, ZHOU S H, XIE Y, et al. The study on hard landing prediction model with optimized parameter SVM method [C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016:4283-4287.
- [35] WANG X H, SHU P, RONG X, et al. A decision support system based on support vector machine for hard landing of civil aircraft [C]//2009 International Forum on Computer Science-Technology

- and Applications. Piscataway, NJ, USA;IEEE, 2009;66-70.
- [36] SILAGYI D V II, LIU D H. Prediction of severity of aviation landing accidents using support vector machine models[J]. Accident analysis & prevention, 2023, 187:107043.
- [37] 卢飞, 宋佳佳. 随机森林算法在擦机尾事件预测中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8):3028-3035.  
LU Fei, SONG Jiajia. Research on the application of random forest algorithm in predicting tail strike events[J]. Journal of safety and environment, 2024, 24(8):3028-3035 (in Chinese).
- [38] 于健, 董健康, 李佳. 基于神经网络的飞机着陆垂直载荷大诊断技术研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21(4):16-18.  
YU Jian, DONG Jiankang, LI Jia. Research on diagnosis technology of large vertical load during aircraft landing based on neural network[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2010, 21(4):16-18 (in Chinese).
- [39] 初雪菲. 基于机器学习的民航重着陆诊断[D]. 上海:华东师范大学, 2022.
- [40] 韩韶华. 基于机器学习的飞机重着陆预测研究[D]. 天津:中国民航大学, 2021.
- [41] The Aviation Safety Network. Accident Boeing 757-251 (WL) N543US, Sunday 18 August 2019 [EB/OL]. (2019-08-18) [2024-12-01]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319358>.
- [42] The Aviation Safety Network. Accident Airbus A330-343 9M-MTA, Saturday 14 March 2015 [EB/OL]. (2015-03-14) [2024-12-09]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/320336>.
- [43] The Aviation Safety Network. Accident Boeing 737-86N (WL) OK-TVT, Saturday 22 February 2014 [EB/OL]. (2014-02-22) [2024-12-10]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/320565>.
- [44] SKYbrary Aviation Safety. A332, Caracas Venezuela, 2013 [EB/OL]. [2024-12-11]. <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/a332-caracas-venezuela-2013>.
- [45] ATSB Transport Safety Report. Hard landing involving Boeing 737, VH-YQR [EB/OL]. (2023-12-08) [2024-12-11]. <https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/2023-12/AO-2023-010%20Final>.
- [46] The Aviation Safety Network. Hard landing serious incident Boeing 737-3U3 PK-GGO, Friday 22 July 2011 [EB/OL]. (2011-07-22) [2024-12-08]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/140472>.
- [47] Transportation Safety Board of Canada. Aviation investigation report A12Q0161 [EB/OL]. [2024-12-08]. <https://www.bst.gc.ca/eng/rappports-reports/aviation/2012/a12q0161/a12q0161.html>.
- [48] The Aviation Safety Network. Accident Dornier 328-110 D-CPWF, Monday 20 October 2014 [EB/OL]. (2014-10-20) [2024-12-10]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/320423>.
- [49] SKYbrary Aviation Safety. AT75, Rome Fiumicino Italy, 2013 [EB/OL]. [2024-12-20]. <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/at75-rome-fiumicino-italy-2013>.
- [50] The Aviation Safety Network. ASN aviation safety database results [EB/OL]. [2024-12-20]. <https://asn.flightsafety.org/asndb/cat/LTLH/1/B-M>.
- [51] The Aviation Safety Network. Serious incident Boeing 737-82R (WL) TC-CCK, Tuesday 7 January 2020 [EB/OL]. (2020-01-07) [2024-12-22]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/231989>.
- [52] The Australian Transport Safety Bureau. Hard landing involving Boeing 737-8FE, VH-YQR, Sydney Airport, New South Wales, on 10 March 2023 [EB/OL]. (2023-03-10) [2024-12-22]. [https://www.atsb.gov.au/publications/investigation\\_reports/2024/report/ao-2023-010](https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2024/report/ao-2023-010).
- [53] Japan Transport Safety Board. Aircraft accident investigation report [EB/OL]. (2013-06-28) [2024-12-19]. [https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air\\_report/JA6817.pdf](https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air_report/JA6817.pdf).
- [54] The Aviation Safety Network. Accident McDonnell Douglas MD-11F N526FE, Monday 23 March 2009 [EB/OL]. (2009-03-23) [2024-12-19]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/321535>.
- [55] Japan Transport Safety Board. Aircraft accident investigation report [EB/OL]. (2013-06-26) [2024-12-19]. [https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air\\_report/N526FE.pdf](https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air_report/N526FE.pdf).
- [56] The Aviation Safety Network. Accident Airbus A330-343 9M-MTA, Saturday 14 March 2015 [EB/OL]. (2015-03-14) [2024-12-10]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/320336>.
- [57] SKYbrary Aviation Safety. SU95, Moscow Sheremetyevo Russia, 2019 [EB/OL]. [2024-12-19]. <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/su95-moscow-sheremetyevo-russia-2019>.
- [58] 陈爽, 赵铭. 重着陆导致飞机机身前部结构损伤的力学分析[J]. 科技视界, 2014(23):85-85.  
CHEN Shuang, ZHAO Ming. Mechanical analysis of aircraft nose structure damage caused by hard landing[J]. Science & technology vision, 2014(23):85-85 (in Chinese).
- [59] The Aviation Safety Network. Accident Boeing 757-251 (WL) N543US, Sunday 18 August 2019 [EB/OL]. (2019-08-18) [2024-12-12]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319358>.
- [60] The Aviation Safety Network. Accident Boeing 737-230 Advanced PK-RIL, Thursday 1 November 2007 [EB/OL]. (2007-11-01) [2024-12-12]. <https://asn.flightsafety.org/asndb/321841>.
- [61] Japan Transport Safety Board. Aircraft accident investigation report [EB/OL]. (2016-07-28) [2024-12-13]. [https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air\\_report/JA610A.pdf](https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air_report/JA610A.pdf).
- [62] The Aviation Safety Network. Accident Airbus A321-231 (WL) VQ-BRS, Friday 10 January 2020 [EB/OL]. (2020-01-10) [2024-12-13]. <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319257>.

(编辑 李坤璐)

## 附录 A

本研究所统计的近 10 年民用航空器 53 起重着陆事故详细信息如下表所示。并依据 Aviation Safety Network 对飞机损伤程度的归类标准,将飞机损伤程度由轻到重分类为轻微损坏、严重损坏以及损毁。

表 A1 重着陆事故统计表

Tab. A1 Statistics of heavy landing accidents

事故程度及时间	飞机型号	事故原因	飞机损伤情况
17-JAN-2013 (损毁)	CASA C-212 Avio-car 300	飞行员操作不规范,飞机前轮着地且发生重着陆。随后飞机冲出跑道,左翼接触地面	机翼和发动机严重损坏
25-JAN-2013 (损毁)	BN-2B-26 Islander	因为风切变,飞行员降低了着陆的动力但无法阻止下降速度	起落架和制动装置均受到损坏,机翼的上下蒙皮均有褶皱
15-FEB-2013 (损毁)	Embraer Phenom 100	飞行员在已知结冰条件下进行了进近,并且没有打开机翼和水平稳定器除冰系统,违反了标准操作程序,速度低于结冰条件规定的进近速度,着陆飞行姿态异常	右侧机翼着地,起落架与机翼折断
01-JUN-2013 (严重损坏)	Dornier 228-202K	因机场大雾能见度低,着陆时下降速度过大导致严重硬着陆	起落架均折断,左翼折断,机身底部与地面摩擦,严重受损
07-JUN-2013 (轻微损坏)	Embraer EMB-145 LI (ERJ-145LI)	降落时机场阵雨导致能见度低于 7 000 m,发生硬着陆	前起落架受到轻微损伤,转向歧管总成和电液伺服阀损坏
28-JAN-2014 (损毁)	Saab 2000	飞行员操作不规范,使主起落架的轮子重重地撞击地面,飞机的指示速度约为 120 kn。随后飞机发生弹跳。飞行员将向前推操纵杆并拉动控制装置,使机头向下,导致飞机发生第二次弹跳	前起落架折断,机头与身结构严重受损
22-FEB-2014 (严重损坏)	Boeing 737- 86N (WL)	进近过程中遇到严重的湍流,飞机下沉率过高导致主起落架造成 3.52g 垂直加速度的冲击,随后发生弹跳。飞行员向前推动控制柱导致俯仰姿态为 $-1.9^\circ$ ,前轮上方的垂直加速度为 2.75g	对飞机机身的区域造成严重损坏。在前轮舱的内部结构中存在一些折叠的支架,有一些弯曲的支柱,在机身框架中发现的裂缝,这些裂缝因与跑道接触时施加的垂直载荷而遭受结构损坏
22-JUL-2014(损毁)	Lockheed C-130J Super Hercules	因超重发生严重重着陆,右侧主起落架被推入轮舱后偏离跑道	右侧主起落架被推入轮舱后,右翼尖着地
20-SEP-2014 (损毁)	Antonov An-32RE	未公布	右翼折断,飞机翻滚并倒置在跑道旁边的草地上。左翼也被切断,1 号螺旋桨脱离发动机。发动机发生火灾
01-OCT-2014 (轻微损坏)	Embraer ERJ-190	飞行员操作不规范,着陆姿势不当。主起落架接触地面后,飞机的俯仰进一步增加到 $8.6^\circ$ ,然后前轮着地	左侧主起落架舱门的操作杆损坏
20-OCT-2014 (严重损坏)	Dornier 328-110	飞机以 2.3g 的垂直加速度发生硬着陆	左侧主起落架损坏。此外,在机身后侧有一个 1.5 m 的刮痕
28-OCT-2014 (严重损坏)	Beech B100 King Air	飞机进近过程中,飞行员过早地降低了发动机功率。飞机着陆时,飞行员增加了推力。飞机发生严重的硬着陆	左侧主起落架断裂
14-MAR-2015 (轻微损坏)	Airbus A330-343	飞行员操纵不稳定导致着陆时下降率高。飞机以大约 700 ft/min 的垂直速度着陆,并记录了 2.61g 的垂直加速度	无明显损伤
03-APR-2015 (损毁)	Antonov An-74-200	在冰面着陆时垂直加速度为 2.4g	右主起落架部分结构产生永久变形
30-MAY-2015 (严重损坏)	DHC-8-315Q MPA	前起落架以 3.17g 垂直加速度接触地面	前起落架下部有磨损痕迹,前起落架部件损坏,机身前机身蒙皮变形

续表 A1

事故程度及时间	飞机型号	事故原因	飞机损伤情况
28-AUG-2015 (损毁)	Boeing 737-3Q8 (BDSF)	风切变期间推力大幅降低导致快速下降,飞机以3.683g降落,飞机在15号跑道起点前约35m处降落,停在距跑道门槛约1500m处	左主起落架塌陷,左发动机表面被跑道表面划伤
26-DEC-2015 (严重损坏)	ATR 72-212A (ATR 72-500)	降落时机场遭遇雷暴,飞机在着陆触地后反弹	前轮脱开,前起落架轴接触跑道,机身蒙皮变形
30-DEC-2015 (损毁)	Beech 200 Super King Air	飞行员在结冰条件下着陆时未能保持滑行路径和适当的空速,导致失速	前起落架损坏,机体严重损坏
23-MAR-2016	Avro RJ85	未公布	未公布
07-JUL-2016(轻微损坏)	DHC-8-402Q Dash 8	机长和飞行员的操作不规范。进近过程姿态不稳定。着陆前不久,机长开始准备复飞。当飞机着陆撞击跑道时,飞机的滚转角度为零且存在较小的上仰角,但垂直下降速度非常快,导致着陆时垂直加速度峰值为2.32g	左主起落架承受了过大的载荷,缓冲支柱总成发生了永久变形。右主起落架缓冲器组件损坏,包括因过载而无法维修的管路
24-AUG-2016 (损毁)	Tupolev Tu-204S	飞机在着陆时反弹。然后扰流板自动伸展,之后飞机以3.05g的加速度严重硬着陆	飞机机翼的后翼梁受到严重损坏
13-SEP-2016 (损毁)	Boeing 737-347(SF)	在大约2135m的高度,飞行员无法识别他的视觉检查点,并决定降低下降速度并继续进近。在着陆前,飞机向左滚动了28°,俯仰了11°,然后回到了大约机翼水平和+7°俯仰。飞机随后以3.25g的垂直加速度着陆	两个主起落架随后塌陷,左侧主起落架在着陆过程中完全分离
04-DEC-2016 (损毁)	Cessna 500 Citation I	飞机燃料不足。并且进近时,飞行员错误地判断了飞机离地面的高度	飞机的左主起落架和前起落架塌陷,飞机偏离跑道,导致左翼严重受损
24-MAY-2017 (轻微损坏)	Cessna 208 Caravan I	飞行员误判了海浪的大小,飞机在着陆后立即跳起,导致尾部撞水	飞机机身受损
30-MAY-2017 (严重损坏)	Cessna 208B Grand Caravan	未公布	右侧起落架折断 左侧起落架弯曲,机腹擦地
27-OCT-2017 (严重损坏)	Beech B200 Super King Air	下降过程中,飞机被闪电击中,飞行指挥和自动驾驶仪失灵。在最后进近时,飞机遇到了强烈的下沉气流	右翼和螺旋桨严重受损
27-OCT-2017 (损毁)	Cessna 560 Citation V	未公布	机身、机舱门框和机翼结构产生永久变形
09-NOV-2017 (严重损坏)	DHC-8-402Q Dash 8	飞机在进近时遭遇风切变。着陆时的垂直载荷超过5.5g	右机身后部和右主起落架的机身损坏
27-NOV-2017 (轻微损坏)	Embraer EMB-550 Legacy 500	飞机防冰系统激活故障导致机翼结冰无法去除,相关程序应导致机组人员在进近期间将参考速度提高30kn。下降速度约为22.5ft/s,载荷系数为4g	右主起落架折断,机翼舵面铰链刺穿机翼的上蒙皮
15-MAR-2018 (损毁)	Cessna 208 Caravan I	第一次失败着陆尝试中遭受了严重损坏,飞行员在最后一次进近时将飞机点燃并重重着陆,导致浮标和机身严重损坏	浮筒因谁冲击破坏,失去了浮力,飞机随后沉没
29-MAR-2018 (严重损坏)	Beech 99	第一次失败着陆尝试中遭受了严重损坏,复飞后着陆对结构产生了严重的二次损伤	右主起落架向后弯曲,右襟翼损坏,机翼漏出燃料。右主起落架塌陷,右翼落在跑道上严重损坏
06-JUL-2018(轻微损坏)	ATR 72-212A (ATR 72-600)	飞行员对飞机能量管理不善,运营商缺少对稳定进近标准的明确定义。着陆时的垂直加速度2.88g	尾部、腹部刮擦跑道。机身间框框之间的尾部凸起和机身下部蒙皮的一部分磨损
27-JUL-2018(轻微损坏)	Boeing 767-38EER	飞行员履行弹跳着陆恢复程序不当	机身中部蒙皮起皱

续表 A1

事故程度及时间	飞机型号	事故原因	飞机损伤情况
28-AUG-2018 (严重损坏)	Airbus A320-214	澳门国际机场没有探测低空风切变的设备,在着陆前一度遇到严重的低空风切变,顺风迅速增加,并有下沉气流趋势导致垂直加速度偏大,飞机第二次着陆时顺风过大,垂直加速度为3.41g,弹跳着陆后没有保持正常的着陆俯仰姿态	前机轮爆胎,前起落架折断,碎片被吸入两个发动机,1号发动机起火
15-DEC-2018 (损毁)	Learjet 35A	飞机在着陆期间遇到风切变	左发动机挂架、左翼和主起落架严重受损
12-JAN-2019 (损毁)	Canadair Challenger 601	飞机在短距离接近跑道时遇到风切变	硬着陆导致右主起落架断裂,最后冲出跑道
08-FEB-2019 (轻微损坏)	Airbus A321-251N	黑夜降落过程中遭遇阵风 and 强侧风,中度湍流和下沉气流,下沉率过高,推力管理不当,弹跳过程中的俯仰控制不当,导致俯仰角超过临界角	飞机尾部撞上了跑道,飞机尾部产生了擦伤
25-FEB-2019 (损毁)	EO-5C	未公布	右侧主起落架塌陷,导致1号和2号发动机上的螺旋桨损坏
15-JUN-2019 (损毁)	Boeing 757-224 (WL)	着陆时遭遇风切变并且着陆照明不当,导致弹跳机身左右前部区域有大量的结构损坏	12块蒙皮板破损,11根纵梁被切断的和12根纵梁弯曲,前起落架和支撑结构损坏
19-JUL-2019(轻微损坏)	DHC-8-402Q Dash 8	飞行员为避免进近过程遭遇雷暴与风切变而增大发动机推力过多	前起落架轮胎损坏而被更换
18-AUG-2019 (严重损坏)	Boeing 757-251 (WL)	飞行员操作不当对姿态和推力校正进行了过度修正,发动机推力过小,飞机着陆时的质量过大导致重着陆	机身下部起落架和机翼前部的上部中央区域观察到损坏。飞机的主要机身结构受损,框架,纵梁和蒙皮变形以及前起落架永久变形
20-SEP-2019 (严重损坏)	Cessna 208B Grand Caravan	飞机在着陆进近过程中遇到下沉气流,失去控制	前起落架断裂,左翼接触地面,并使机翼弯曲
03-JAN-2020 (损毁)	Hawker 900XP	飞行员操作不当使飞机下降率过高	飞机提前降落在跑到前的草地上,机身受到严重损坏
10-JAN-2020 (损毁)	Airbus A321-231 (WL)	前起落架以2.64g的冲击力撞击跑道。飞机复飞后迫降	部分仪表故障,起落架无法缩回
23-APR-2020 (严重损坏)	Lockheed C-130J-30 Super Hercules	飞行员未能识别过高的下沉率,3.62g,着陆下沉速率为13.9 ft/s	中翼、外翼、左右主起落架组件和发动机(包括安装结构)严重损坏
16-NOV-2020 (轻微损坏)	ATR 72-500 (72-212A)	降雨强度突然增加和强阵风,机长视线不清,无法确认跑道的具体方位	重着陆后复飞,无法缩回起落架。随后正常着陆
19-JAN-2021 (损毁)	Boeing 737-4Q8 (SF)	下降率过大导致超重着陆时,最大垂直加速度为3.8g,此时左滚角度为3°	机翼后部的机身蒙皮开裂并弯曲,机身后部向下扭曲。机身顶部蒙皮的大部分区域都有褶皱。发现两个主起落架减震器都触底,左主起落架梁向上扭曲,使飞机左翼低约2°。襟翼驱动机构损坏,左翼内侧传动轴弯曲;左内侧变速箱外壳及其安装件损坏
23-JUN-2021 (轻微损坏)	Gulfstream G280	仍在调查	右翼根部出现变形,并出现喷气燃油泄漏
28-DEC-2021 (严重损坏)	Beech A100 King Air	飞机在610 m英尺高空爬升时自动驾驶故障,随后超重返航	飞机左翼严重受损
06-MAY-2022 (严重损坏)	Boeing 737-82R (WL)	仍在调查	机身后部严重受损
18-JUL-2022(严重损坏)	Fokker 50	低空经历风切变之后,飞行员失去了对飞机的控制	左翼在机翼根部折断并发生火灾
29-JUL-2022(损毁)	CASA C-212 Aviocar 200	仍在调查	起落架及其与机身连接结构受损
01-OCT-2022 (严重损坏)	Boeing 737-8GJ (WL)	仍在调查	前轮胎爆胎,机身结构受损