文章编号:1674-8190(2025)01-001-08

冲偏出跑道事件风险评估研究进展

赵丁仪[1],齐心歌[1],汪磊[2]
(1.中国民航大学 安全科学与工程学院,天津 300300)
(2.中国民航大学 研究生院,天津 300300)

摘　要: 冲偏出跑道是位列第二的严重征候,为降低其发生概率并减轻其影响,国内外民航研究机构及相关研究人员针对冲偏出跑道事件的风险评估展开了诸多研究。目前的研究主要聚焦于以下关键致因因素:不利的天气条件、跑道表面条件,飞行员操作错误,机械问题等,相应的解决方案包括改善跑道维护情况、加强飞行员培训等。本文通过梳理国内外针对冲偏出跑道事件的研究工作进展,总结其成果、指出其不足;给出冲偏出跑道事件的风险影响因素,研究冲偏出跑道风险预测和风险分析的方法,并对未来的研究提出进一步探索思路。

关键词: 冲偏出跑道;风险评估;QAR数据
中图分类号: V328; X951　　**文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.01.01

Research progress analysis on risk assessment of runway excursion

ZHAO Dingyi[1], QI Xinge[1], WANG Lei[2]
(1. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)
(2. Graduate School, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Runway excursion ranks second among the most catastrophic symptoms. Research on the risk assessment of runway excursion has been done by domestic and international civil aviation research institutes, specialists, and academics in an effort to lessen both its likelihood and its effects. Several important contributing variables have been the subject of recent study, including unfavorable weather circumstances, runway surface conditions, pilot mistakes, and mechanical issues. These issues can be resolved by improving runway maintenance and improving pilot training. In this paper, the accomplishments and flaws are compiled by looking at the current designs of both domestic and international experts on the runway excursion occurrences. The techniques for predicting and analyzing the danger of a runway excursion are described, and suggestions for more research are made for future study.

Key words: runway excursion; risk assessment; quick access recorder data

收稿日期: 2023-09-11;　**修回日期:** 2024-02-17
基金项目: 中央高校基本科研业务费(KJZ53420210090);民航局安全能力建设资金资助项目(KJZ49420210076)
通信作者: 齐心歌(1991—),女,博士,讲师。E-mail: xgqi@cauc.edu.cn
引用格式: 赵丁仪,齐心歌,汪磊. 冲偏出跑道事件风险评估研究进展[J]. 航空工程进展,2025,16(1):1-8.
ZHAO Dingyi, QI Xinge, WANG Lei. Research progress analysis on risk assessment of runway excursion[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 1-8. (in Chinese)

0 引 言

冲偏出跑道是指在飞机起飞或者降落时，从跑道两侧偏离跑道表面或者从跑道末端冲出[1]。通过对世界各地发生的航空事件统计表明，约有52%的事件与跑道相关，其中41%的事件归属于冲偏出跑道，且大多数发生在飞机的着陆阶段[2-6]。国际民用航空组织(ICAO)将飞行事件划分为失事和事故两类。失事是指造成人员伤亡、飞机受到破坏或失踪等后果的事件；事故指严重程度不及失事，但直接威胁飞机安全操作和使用的事件。根据ICAO的统计数据显示，在2022年共有10起冲偏出跑道失事事件，导致10架飞机严重受损、损毁[7]。

根据国际航空运输协会(IATA)发布的2023年安全年报的数据统计可知：在2012—2022年间共发生了125起冲偏出跑道事件，其中有8起飞机失事事件，共造成88人死亡。2022年的冲偏出跑道事件事故率为0.22/百万航班，低于2018—2022年这5年冲偏出跑道事件事故率0.27/百万航班的平均值，其中98架为客运航班，27架为货运航班。2005—2022年间，事故率在2012年和2013年呈现下滑态势，随后在2014年上升，后因为全球新冠肺炎疫情原因在2019—2021年呈现下滑态势[8]。

冲偏出跑道事故被列入2023—2025年版《全球航空安全计划》草案中的全球高风险类别事件类型[9]。综上，冲偏出跑道事件是一类高风险事件，对世界民航安全已经构成了严重的威胁，多会造成人员伤亡和机体受损等重大损失。全球因冲偏出跑道事件每年造成的经济损失在9亿美元左右[10]。

冲偏出跑道是一个复杂的问题，受到多方面因素的影响，目前的研究已经确定了几个关键因素，包括不利的天气条件、跑道道面条件、飞行员操作问题和机械问题等，已经有大量研究人员建立了冲偏出跑道的风险影响因素集，提出了改善跑道维护和加强飞行员培训等解决方案。要降低此类事件的影响，需要诸多方法来减少其发生频率。此外，疲劳驾驶等人为因素对飞行员操作性能影响的风险预测模型和风险评估模型，可以为冲偏出跑道事件提供预防措施并提高风险评估的准确性。最终，解决冲偏出跑道问题需要航空业利益相关者、政策制定者和研究人员之间的合作，以制定有效的干预措施，降低其发生的频率。

本文旨在对比国内外相关研究针对冲偏出跑道事件研究方向和内容的不同，总结冲偏出跑道事件的风险因素，探讨深入研究冲偏出跑道风险预测和风险分析的方法，阐明并讨论目前研究的现状和对未来的研究提出进一步研究思路。

1 国外研究现状

针对冲偏出跑道事件，国外的研究方向多为量化分析，更注重于具体场景更加有针对性的风险分析和适用范围更加广泛的风险预测模型。

根据ICAO发布的2017—2022年安全年报[7,11-15]的数据，统计发生冲偏出跑道事件最多的机型为波音737系列，其中波音737-800机型发生频数最大，共发生7起；其次是737-400、757-200分别发生3起和2起冲偏出跑道事故。空客A319-100、A320机型均发生过一次冲偏出跑道事件，如图1所示。

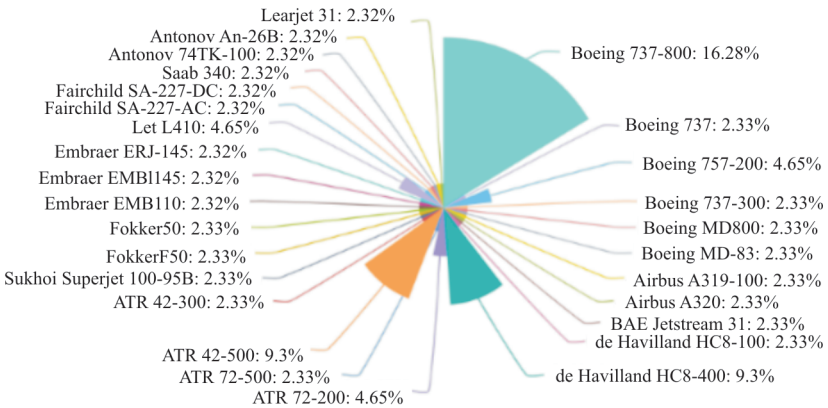

图1 2017—2022年发生冲偏出跑道事件机型占比饼图[7,11-15]

Fig. 1 Pie chart of aircraft types with runway excursion from 2017 to 2022[7,11-15]

1.1　针对特定机场和跑道的冲偏出跑道事件风险评估

美国联邦航空管理局（FAA）的一项研究[1]分析了1995—2007年间87起冲偏出跑道事件，发现最常见的原因是跑道污染、飞行员操作错误和飞机设备故障；该研究还提出了几种干预措施，如加强飞行员培训、改善跑道维护和优化机场设计，以预防和减轻飞机冲偏出跑道的影响。

Hong等[16]基于跑道安全区域相关事故的综合数据库，采用“RSA风险模型”估算某韩国机场冲出跑道的风险频率，并提出了将风险频率降低到合理可行的、尽可能低的替代方案。Di Mascio等[17]针对某一特定国际机场，评估不同区域的风险等级，从而达到预防事故的目的。Shao Q等[18]应用贝叶斯网络模型和误差修正模型提出了一种评价高原机场冲偏出跑道事故风险的方法，高原机场冲偏出跑道事故风险受气温和风速的影响较大，实验机场2月份的风险值约为9月份的11.8倍，高原机场的风险值为平原机场的7.32倍，该模型成功地模拟了高原机场和其他不同海拔高度机场的各种情景，为高原机场的安全管理提出了科学性的指导建议。

1.2　风险因素分析

Chang Y H等[19]基于145个现役飞行员的飞行数据，通过SHELLO模型将冲偏出跑道事故中飞行员的人的危险因素进行了重要度评判，并提出了4种预先风险防控的策略，以达到减小因人为因素导致的冲偏出跑道事故。Ju Z Q[20]在模糊数学分析法和网络分析法（ANP）的基础上，建立了冲偏出跑道风险评估模型，结果表明导致冲偏出跑道的主要因素是航空公司运营管理不合理、机组人员培训不足和跑道管理不充分等。

1.3　针对冲偏出跑道建立数学模型

Ayra等[21]借助贝叶斯网络研究了导致事故发生的主要因素及其关系，对影响因素之间的耦合关系进行了分析与挖掘，同时还对节点的条件分布进行了建模并提出可行性建议以减小事件发生的可能性。Kirkland等[22]提出针对冲偏出跑道事件的一种改进的风险评估方法，提出一种新的数学模型，该模型虽然为现有的风险评估方法增加了新的思路和工具，但由于缺乏正常运营的数据，效果并不理想。而快速存取记录器（Quick Access Recorder，QAR）数据可以反映飞机在飞行过程中的状态，也能间接体现飞行员的操作动作[23]，因此，可以使用QAR数据对整体的飞机运营过程进行更全面的分析。

跑道状况也直接影响着冲偏出跑道事件的发生，若跑道的长度较短易引发冲出跑道，若跑道的宽度受限则容易发生偏出跑道。除了跑道的长度和宽度，跑道表面的摩擦系数也是重要的影响因素之一。

Yousefi Y等[24]通过对跑道事故进行风险评估的建模，提出一个可以准确预估机场事故发生概率和安全评估的模型，同时也可以对现有机场和新建跑道进行初步的风险评估，以达到提高航空安全性的目的。

荷兰皇家航空航天中心在2005年发布的冲偏出跑道的事故报告[25]中提出了一个风险比的数学公式（如公式（1）所示），这个风险比公式提供了一个危险影响因素与冲偏出跑道事故风险之间的关系。风险比公式是当有危险影响因素存在时发生事故的概率与没有危险影响因素存在时的事故发生概率之比。

$$R=\frac{N_a/N_l}{M_a/M_l} \tag{1}$$

式中：R为风险比；N_a为存在危险因素的事故数量；N_l为存在危险因素的正常着陆数量；M_a为不存在危险因素的事故数量；M_l为不存在危险因素的正常着陆数量。

风险比大于1表示由于某种特定危险影响因素的存在，则发生冲偏出跑道事故风险水平增加。风险比为4意味着存在危险影响因素时发生事故的概率是不存在危险影响因素时的4倍。这个数学公式虽然表明了风险因素与冲偏出跑道事故之间存在正相关关系，但是它并不能证明危险影响因素与事故之间的因果关系。

Mauro等[26]分析了发生在慕尼黑的一个冲偏出跑道事故的系统功能复杂性失效，并讨论了如何在事故发生前对隐患的发掘和消除，为后续的研究者提出新的研究思路和方向。Distefano等[27]利用多重分析方法（MAC），基于大量冲偏出跑道事故数据，将起飞时发生的事件和着陆时发生的事件分开，确定了冲偏出跑道事件各个变量类别

之间的对应关系。这项研究有助于诠释变量之间的关系，研究结果可供民航组织进行风险评估及选择最有效的安全对策。

QAR是飞机上的可同时采集数百个飞行数据，能够直接反映飞机操作和状态信息的仪器[28-29]。通过QAR可以对飞机的状态进行检测和更好的分析，Lyu H等[30]通过QAR数据对飞机飞行过程中的超限事故进行分析，并提出相关建议。在日后的研究中，可以通过利用QAR数据对冲偏出跑道进行深层次的风险分析。

1.4 跑道状况相关性研究

Tingle等[31]建立了跑道状况等级和跑道表面摩擦系数之间的相关性，建立跑道条件评级的模型，能较准确地预测飞机在恶劣天气条件下在该跑道下的刹车表现，预测飞机在恶劣天气条件下的刹车距离阈值。Arnaldo等[32]通过历史事件数据，使用概率模型估计出跑道安全区的冲出跑道事件风险，此方法易于应用在机场规划、开发和运营，以减小飞机冲出跑道的严重度。

雨雪天气会导致跑道表面积水，使摩擦系数减小，容易产生飞机划水现象。Barton[33]在研究中介绍了一种能够快速准确地远程估计跑道积水深度的仪器，使用这种差压传感器能够减小因为跑道污染引发飞机冲偏出跑道的风险。Briscoe[34]提出在跑道上提前预放化学品减小跑道表面污染的风险。

2 国内研究现状

2.1 冲偏出跑道影响因素分析

目前我国研究人员对冲偏出跑道事件多是从历史数据统计分析、用系统工程方法论分析已有事故和通过事故数据建立风险评估模型[35-37]方面进行研究。其中利用历史数据统计方法分析事故原因和影响因素的占比最大。已经发生的事件能够客观地反映出飞机冲偏出跑道事故的影响因素，针对不同的情况会导致不同的风险。

孔祥骏[38]分析了2003—2008年我国发生的36起冲偏出跑道事件，定性分析了冲偏出跑道事故的影响因素，并提出相关建议与风险防范措施。王洁宁等[39-40]用系统分析方法分析冲偏出跑道中的人为因素，但是未得出相应人为因素的影响程度和权重。

目前分析冲偏出跑道的影响因素，多从人为因素[41-42]和环境因素[43-44]的角度切入。人为因素在所有致因因素中占比最大，人的决断也是最不稳定的因素[45-46]。

霍志勤[47]用历史事件原因统计分析了1996—2010年间的中国民航冲偏出跑道事件，得出了飞机着陆阶段偏出跑道的主要因素，并提出当至少有两种不同的风险因素同时存在时，因耦合效应着陆偏出跑道事件的发生概率会明显增加，但是针对耦合结果并没有更加深入地研究和具体的结果。针对多因素耦合还有很大空间进行更详细的数据挖掘，得出人为、天气、环境多因素共同影响下的风险评估。

崔振新等[48]综合应用事故分析理论模型和灰色关联度方法对飞机着陆冲出跑道事故影响因素进行分析，并提出相应的事故预防及控制措施。张晓全等[49]提出运用寻因分析法（WBA）进行危险源识别，在此基础上利用模糊层次分析法（FAHP）得出导致冲偏出跑道事故的危险因素。根据人们的研究得出，冲偏出跑道的主要因素有机组人员处置失误、飞机机组技术欠缺、天气原因、跑道表面积水、机组训练问题[50-54]。

陈文瑛等[55]采用单因素方差分析法对飞行数据进行分析，提出飞机的重量也是导致这类事故不可忽视的原因之一，同时提出容易导致飞机离地地速过大的危险操作。统计得出国内从人—机—环—管四类风险分类，总结出的冲偏出跑道影响因素占比，如图2所示。

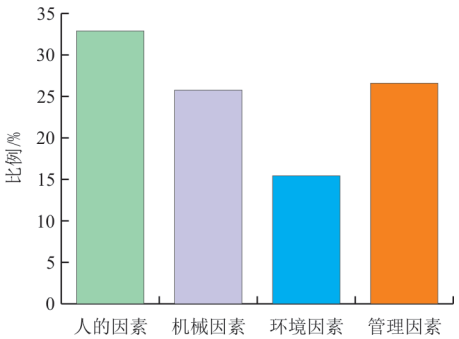

图2 冲偏出跑道影响因素占比柱形图[55]

Fig. 2 Column chart of the proportion of factors affecting the runway excursion[55]

2.2　冲偏出跑道风险量化分析与防控研究

国内研究人员多通过建立风险评估模型对冲偏出跑道事件风险进行量化分析。

赵宁宁等[56]通过系统分析方法分析了事故发生的原因（即影响因素），并用数学模型方法分析了影响因素能影响该类事件的风险程度。

国内大多数利用系统工程方法，从风险分析角度研究冲偏出跑道事件，很少有人建立此类事故的风险预测模型，几乎没有研究人员利用QAR数据研究飞行员操作对冲偏出跑道事件的影响机理。大量研究数据表明，导致冲偏出跑道事件发生的最大占比因素是人为因素，即机组的操作，而QAR数据能直观地表示出飞行机组的操作。因此基于QAR飞行数据对冲偏出跑道事件进行风险分析会更加直观，通过飞行数据建立的风险影响指标也包括了对操作特征的风险评估。

在跑道安全区铺设的特性材料拦阻系统（EMAS）会在飞机冲出跑道时，在机轮碾压下破碎，以此减小并吸收飞机的动能，让飞机减速停在安全区内。中国民航科学技术研究院自主研发的具有完整自主知识产权的阻拦系统已经在2012年正式获得许可[57]，目前已经在四川、西藏等地机场应用。

盛荣武[58]对西藏林芝高高原机场进行了飞机冲出跑道的安全形势的分析，并详细介绍了EMAS的工作原理。为了探究不同状态下EMAS的吸能性能，范苗苗[59]针对EMAS核心层材料两种破碎状态进行了力学性能试验，并编写出飞机冲出跑道后在安全区的阻滞距离计算系统。

3　总结与展望

通过历史数据统计和文献调查，发现大多数事故发生在着陆阶段，只有15%发生在起飞阶段；确定了几个影响因素，包括不利的天气条件、跑道表面条件和人的因素。众多研究结果表明，改善跑道表面条件和加强飞行员培训可以减少飞机偏离跑道的频率。

目前的研究已经指出导致冲偏出跑道事件的影响因素并对这些影响因素的重要度进行了排序，但是对于这些影响因素的评估指标还有待进一步的研究，建立更为系统性和广泛性的风险指标。虽然现有研究表明冲偏出跑道事件是由多重因素影响导致，我国研究人员对于致因因素的详细分析表明当两种或两种以上风险因素同时存在时，因耦合效应着陆偏出跑道事件的发生概率会明显增加，但对于系统功能复杂性失效还未找出相应的有效方法。

根据历史数据统计和专家访谈法得知，在冲偏出跑道事件中人的因素即飞行机组操作，占冲偏出跑道事件原因的70%。故在今后的研究中可以着重研究人为因素对此类事故的影响机制，从人的不安全行为层面减小产生这种事故的概率。HFACS（人为因素分析与差错系统）是一个在分析人为因素非常实用的系统，可进行进一步的深入研究。通过文献阅读法综合目前人们提出的减小冲偏出跑道的风险建议有扩大飞行员培训项目，包括更真实的冲偏出跑道模拟场景、并鼓励培养加强飞行员在紧张的环境中做出更好的决策的技能。

其次对于人的因素的作用路径并未进行明确的机理研究，该领域的实验研究很少，可将人的因素与具体的飞行场景相结合，通过QAR数据和人的生理心理指标进行更有针对性的研究。

对于高原特殊机场的冲偏出跑道风险评估模型的建立还存在大量空白，可以考虑在不同的飞行阶段，用系统性方法将复杂天气情况、跑道本身属性的良好程度分级确立，进行线性加权并结合跑道表面的摩擦系数预测下滑接地段、减速滑跑距离和跑道实际可用着陆长度的关系，形成更具普遍性的风险评估模型。

针对冲偏出跑道事件的风险分析，不仅要考虑事件发生的可能性，同时要考虑其严重度。目前研究者大多都研究冲偏出跑道事件的发生机理和风险分析，通过QAR数据的量化分析也只能在航班结束执飞任务之后进行，无法及时地准确预测风险。如何进行风险的事前防控是目前冲偏出跑道事件急需解决的难题。

参 考 文 献

[1]　United States Department of Transportation. Runway safety areas (RSAs): FAA—2022[R]. US: FAA, 2022.

[2]　VAN W H. A study of runway excursions from a European perspective [EB/OL]. (2010-03-23) [2023-09-11]. https://ukfsc. co. uk/files/Safety% 20Briefings% 20_% 20Presentations/ATC% 20-% 20IP04%20AOT% 2027%20ANNEX% 20III% 20Runway% 20Excursions%

20posted%20July%202010. pdf.

[3] PROGRAM A C R, BOARD T R. Analysis of aircraft overruns and undershoots for runway safety areas [M]. Washington, D. C. : Transportation Research Board, 2008.

[4] FRICKE H, SCHLOSSER M, GARCIA M A, et al. Embedding aircraft system modeling to ATM safety assessment techniques: the runway excursion safety case for runway strips with reduced strength[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2019, 3: 100026.

[5] HAWKINS F H. Human factors in flight[M]. 2nd ed. London: Ashgate Publishing Company, 2017.

[6] SAATY T L. Decision making: the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP) [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1-35.

[7] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2022[R]. Canada: ICAO, 2022.

[8] World Air Transport Summit. Annual safety review 2022: IATA—2023[R]. Canada: IATA, 2023.

[9] International Civil Aviation Organization. Global aviation safety program 2023—2025: ICAO—2022 [R]. Canada: ICAO, 2022.

[10] Honeywell Aerospace. Paris air show 2023: Honeywell—2023[R]. Paris: Honeywell Aerospace, 2023.

[11] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2017[R]. Canada: ICAO, 2017.

[12] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2018[R]. Canada: ICAO, 2018.

[13] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2019[R]. Canada: ICAO, 2019.

[14] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2020[R]. Canada: ICAO, 2020.

[15] International Civil Aviation Organization. Safety report: ICAO—2021[R]. Canada: ICAO, 2021.

[16] HONG S B, DILSHOD T, KIM D. An application of the risk assessment model for runway end safety areas to a specific airport in Korea[J]. International Journal of Control and Automation, 2016, 9(12): 287-298.

[17] DI MASCIO P, COSCIOTTI M, FUSCO R, et al. Runway veer-off risk analysis: an international airport case study [J]. Sustainability, 2020, 12(22): 9360.

[18] SHAO Q, YANG M M, XU C C, et al. Fire risk analysis of runway excursion accidents in high-plateau airport [J]. IEEE Access, 2020, 8: 204400-204416.

[19] CHANG Y H, YANG H H, HSIAO Y J. Human risk factors associated with pilots in runway excursions [J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 94: 227-237.

[20] JU Z Q. Fuzzy-ANP based research on the risk assessment of runway excursion[C]// The Tenth International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA 2011). Dunhuang, China: NSFC, 2011: 28-31.

[21] AYRA E S, RÍOS INSUA D, CANO J. Bayesian network for managing runway overruns in aviation safety[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2019, 16(12): 546-558.

[22] KIRKLAND I D L, CAVES R E, HUMPHREYS I M, et al. An improved methodology for assessing risk in aircraft operations at airports, applied to runway overruns[J]. Safety Science, 2004, 42(10): 891-905.

[23] 占欣. 基于QAR数据的冲/偏出跑道风险评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
ZHAN Xin. Research on risk assessment of runway surge/deviation based on QAR data[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)

[24] YOUSEFI Y, KARBALLAEEZADEH N, MOAZAMI D, et al. Improving aviation safety through modeling accident risk assessment of runway[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6085.

[25] National Aerospace Laboratory. Running out of runway-analysis of 35 years of landing overrun accidents: NLR-2005 [R]. Netherlands: NLR, 2005.

[26] MAURO R, SHERRY L. Confronting functional complexity failures: the case of a runway excursion in Munich[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2019, 63(1): 116-120.

[27] DISTEFANO N, LEONARDI S. Aircraft runway excursion features: a multiple correspondence analysis[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 91(1): 197-203.

[28] 汪磊, 孙景陆, 王文超, 等. 基于QAR数据的着陆超限风险贝叶斯网络分析模型[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 26-34.
WANG Lei, SUN Jinglu, WANG Wenchao, et al. Bayesian network analysis model on landing exceedance risk based on flight QAR data[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(1): 26-34. (in Chinese)

[29] 汪磊, 邹颖, 王朔. QAR数据驱动的飞行员不安全操作行为量化评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 49-56.
WANG Lei, ZOU Ying, WANG Shuo. Quantitative evaluation of pilots' unsafe operation behavior driven by QAR data [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 49-56. (in Chinese)

[30] LYU H, YU J J, ZHU T Y. A novel method of overrun risk measurement and assessment using large scale QAR data [C]// 2018 IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications. Bamberg, Germany: IEEE, 2018: 213-220.

[31] TINGLE J S, NORWOOD G J, COTTER B. Use of continuous friction measurement equipment to predict runway condition rating on unpaved runways[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2626(1): 58-65.

[32] ARNALDO V R M, GÓMEZ C F, MIJARES G L, et al. The development of probabilistic models to estimate accident risk (due to runway overrun and landing undershoot) applicable to the design and construction of runway safety areas[J]. Safety Science, 2011, 49(5): 633-650.

[33] BARTON I J. Runway water depth measurement: a simple accurate method[J]. The Aeronautical Journal, 1978, 82: 128-130.

[34] BRISCOE J. De-icing of runways from the air[J]. The Aeronautical Journal, 1971, 75: 71-72.

[35] 杨开，黄晋. 冲偏出跑道事件分析及防范措施[J]. 中国科技信息，2017(18)：21-22.
YANG Kai, HUANG Jin. Analysis and preventive measures of the incident of rushing off the runway[J]. China Science and Technology Information, 2017(18): 21-22. (in Chinese)

[36] 谢智辉. 跑道安全数据分析与管理建议[J]. 民航学报，2019，3(6)：15-18.
XIE Zhihui. Runway safety data analysis and management suggestions[J]. Journal of Civil Aviation, 2019, 3(6): 15-18. (in Chinese)

[37] 许晨晨. 高高原机场飞行区航空器地面事故火灾风险评估方法研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2019.
XU Chenchen. Study on fire risk assessment method of aircraft ground accident in high altitude airport flight area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

[38] 孔祥骏. 冲偏出跑道事件预防研究[J]. 中国民用航空，2009(9)：34-36.
KONG Xiangjun. Study on preventing runway excursion [J]. China Civil Aviation, 2009(9): 34-36. (in Chinese)

[39] 王洁宁，张钰涵，张聪俊. 基于STPA冲偏出跑道不安全控制行为分析[J]. 中国民航大学学报，2019，37(6)：46-50.
WANG Jiening, ZHANG Yuhan, ZHANG Congjun. Unsafe control action of runway excursion based on STPA[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2019, 37(6): 46-50. (in Chinese)

[40] 王洁宁，张聪俊. 飞机冲偏出跑道人为差错量化分析模型[J]. 安全与环境学报，2019，19(1)：106-113.
WANG Jiening, ZHANG Congjun. A quantification model for controlling human errors resulting from the runway excursion of the aircraft[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 106-113. (in Chinese)

[41] 刘浩然，邵荃，许晨晨，等. 基于情景推演的机场冲/偏出跑道应急能力评估[J]. 航空计算技术，2019，49(5)：27-31,35.
LIU Haoran, SHAO Quan, XU Chenchen, et al. Evaluation on emergency capability of airport impact/deviation runway based on scenario deduction[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(5): 27-31,35. (in Chinese)

[42] 齐心歌，毕晟，张楠，等. 冲偏出跑道事件风险影响指标分析[J]. 航空工程进展，2024，15(1)：61-68.
QI Xinge, BI Sheng, ZHANG Nan, et al. Risk impact indicator analysis of runway excursion event[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 61-68. (in Chinese)

[43] 郭海鹏，谢智辉. 民航防止冲偏出跑道政策分析与建议[J]. 民航管理，2016(7)：57-60.
GUO Haipeng, XIE Zhihui. The analysis of runway excursion prevention policies and our proposals[J]. Civil Aviation Management, 2016(7): 57-60. (in Chinese)

[44] 周易之，舒平. 起飞阶段冲偏出跑道事故预防分析[J]. 中国安全科学学报，2009，19(1)：38-44.
ZHOU Yizhi, SHU Ping. Analysis on prevention of runway overrun/excursion accident during takeoff[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(1): 38-44. (in Chinese)

[45] 王浩锋，谢孜楠. 1997—2006年中国民航冲出偏出跑道/场外接地事故征候的统计分析研究[J]. 中国民航飞行学院学报，2008，19(3)：3-9,14.
WANG Haofeng, XIE Zinan. Statistical analysis on the symptoms of China civil aviation runway/off-site grounding accidents from 1997 to 2006[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2008, 19(3): 3-9, 14. (in Chinese)

[46] 张艳，孙灿飞，郑国，等. 机场跑道异物监测技术的研究与进展[J]. 航空科学技术，2017，28(5)：14-18.
ZHANG Yan, SUN Canfei, ZHENG Guo, et al. Research and development of airport runway FOD detection technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(5): 14-18. (in Chinese)

[47] 霍志勤. 基于历史数据的中国民航跑道安全管理关键问题研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2012.
HUO Zhiqin. Research on key issues of China civil aviation runway safety management based on historical data [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[48] 崔振新，陆正，汪磊. 基于灰色关联的飞机着陆冲出跑道事故影响因素研究[J]. 安全与环境工程，2015，22(3)：99-104.
CUI Zhenxin, LU Zheng, WANG Lei. Evaluation of the influence factors of landing overrun accidents based on the grey relation theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(3): 99-104. (in Chinese)

[49] 张晓全，李秋实. 基于WBA方法的冲出跑道事故风险管理研究[J]. 中国安全科学学报，2012，22(11)：67-73.
ZHANG Xiaoquan, LI Qiushi. Study on risk management for overrun based on WBA[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(11): 67-73. (in Chinese)

[50] 戴湘龄. 面向机场冲/偏出跑道事件的应急协同决策仿真研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2017.
DAI Xiangling. Simulation study on emergency collabora-

tive decision-making for airport runway rushing/deviating events[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)

[51] 张建平，杨昌其，邹国良．基于ASBU的民用航空跑道安全促进战略研究[J]. 中国民航大学学报，2012，30(4)：1-5,10.
ZHANG Jianping, YANG Changqi, ZOU Guoliang. Research on runway safety promotion strategies in civil aviation based on ASBU[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(4): 1-5,10. (in Chinese)

[52] 赵顾颢，杨虎成，聂党民，等．侧风对近距平行跑道配对运行安全的影响[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(12)：197-202.
ZHAO Guhao, YANG Hucheng, NIE Dangmin, et al. Influence of crosswind on paired operation safety of closely spaced parallel runways[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(12): 197-202. (in Chinese)

[53] 潘卫军，张衡衡，吴天祎，等．基于神经网络的飞机着陆速度预测模型[J]. 舰船电子工程，2022，42(1)：73-78.
PAN Weijun, ZHANG Hengheng, WU Tianyi, et al. Prediction model of aircraft landing speed based on neural network[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(1): 73-78. (in Chinese)

[54] 苏泽．基于联合概率分布的飞机着陆变量影响分析[J]. 中国新技术新产品，2021(14)：18-20.
SU Ze. Influence analysis of aircraft landing variables based on joint probability distribution[J]. New Technology & New Products of China, 2021(14): 18-20. (in Chinese)

[55] 陈文瑛，傅佳萍，齐凯．基于方差分析的航班离地地速影响因素研究[J]. 安全，2021，42(10)：42-47.
CHEN Wenying, FU Jiaping, QI Kai. Study on influencing factors of liftoff speed of flight based on analysis of variance[J]. Safety & Security, 2021, 42(10): 42-47. (in Chinese)

[56] 赵宁宁，尔士玉．基于BP神经网络模型的飞机起降冲偏出跑道预测研究[J]. 数学的实践与认识，2020，50(18)：1-8.
ZHAO Ningning, ER Shiyu. The prediction of runway overrun and excursion event based on BP neural network[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(18): 1-8. (in Chinese)

[57] 徐晓明．为冲出跑道飞机设置最后安全屏障：航科院特性材料拦阻系统(EMAS)通过行业审定[J]. 中国民用航空，2012(7)：14.
XU Xiaoming. Set up the final safety barrier for aircraft flying off the runway: EMAS developed by CAST passed industry inspection[J]. China Civil Aviation, 2012(7): 14. (in Chinese)

[58] 盛荣武．特性材料拦阻系统(EMAS)在西藏林芝高高原机场的首次应用[J]. 科学咨询(科技·管理)，2018(8)：62-64.
SHENG Rongwu. The first application of characteristic material arrest system (EMAS) at Linzhi Plateau Airport in Tibet[J]. Scientific Consulting (Technology and Management), 2018(8): 62-64. (in Chinese)

[59] 范苗苗．EMAS核心层阻滞下飞机滑行距离研究[D]. 天津：天津工业大学，2016.
FAN Miaomiao. Research on aircraft taxi distance under EMAS core block[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016. (in Chinese)

(编辑:马文静)