

跑道侵入防范技术研究进展

朱苗苗, 温祥西, 黄子硕, 欧洋, 王昊, 尉晨洁, 彭佳
(空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 跑道侵入是当前航空安全领域最具挑战性的风险之一, 现有跑道侵入防范技术在监视覆盖完整性、冲突检测算法精度、人机交互有效性等方面仍存在不足, 目前, 国内外已针对上述不足开展了大量研究工作。本文从跑道侵入成因出发, 将防范技术归纳为监视技术、冲突检测算法、人机交互系统 3 个维度, 系统综述了广播式自动相关监视(ADS-B)、多点定位(MLAT)、场面监视雷达(SMR)及视频图像识别等监视手段的研究进展; 分析了基于几何模型与事件驱动的两类冲突检测算法, 重点讨论了跑道占用与跑道冲突两级告警机制。本文认为: 多源传感器融合与深度学习是提升监视能力的主流, 两级告警机制已成为冲突检测的共识框架, 人机交互界面正从单一显示向集成化、智能化决策平台演进; 未来需重点攻克非合作目标监视、复杂场景下的算法鲁棒性等关键问题, 以构建更完善的跑道侵入防范体系。

关键词: 跑道侵入防范; 监视技术; 冲突检测算法; 广播式自动相关监视(ADS-B); 多点定位(MLAT); 视频图像识别

中图分类号: V328

文献标识码: A

A review of research progress on runway incursion prevention technology

ZHU Miaomiao, WEN Xiangxi, HUANG Zishuo, OU Yang, WANG Hao,
WEI Chenjie, PENG Jia

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Runway incursion remains one of the most challenging risks in aviation safety. Existing prevention technologies still exhibit deficiencies in surveillance coverage completeness, conflict detection algorithm accuracy, and human-machine interaction effectiveness, and extensive research has been conducted to address these deficiencies. Starting from the causes of runway incursions, this paper categorizes prevention technologies into three dimensions: surveillance technology, conflict detection algorithms, and human-machine interaction system. It systematically reviews research progress of surveillance means including Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B), Multilateration (MLAT), Surface Movement Radar (SMR), and video image recognition. Two types of conflict detection algorithms—geometry-based and event-driven—are analyzed, with a focus on the two-level alert mechanism distinguishing runway occupancy from runway conflict. This review argues that multi-sensor fusion and deep learning represent the mainstream approach for enhancing surveillance capabilities. The two-tier alert mechanism has become the consensus framework for conflict detection, while human-machine interfaces are evolving from single information displays towards integrated, intelligent decision-support platforms. Future efforts should focus on addressing key challenges such as non-cooperative target surveillance and algorithm robustness in complex scenarios to establish a more comprehensive runway incursion prevention system.

Key words: runway incursion prevention; surveillance technology; conflict detection algorithm; automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); Multilateration (MLAT); video image recognition

收稿日期: 2026-06-23; 修回日期: 2026-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(2XGL001)

通信作者: 黄子硕(1996—), 男, 博士, 讲师。E-mail: kgdtthzs@163.com

引用格式: 朱苗苗, 温祥西, 黄子硕, 等. 跑道侵入防范技术研究进展[J]. 航空工程进展.

ZHU Miaomiao, WEN Xiangxi, HUANG Zishuo, et al. A review of research progress on runway incursion prevention technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

21世纪以来,随着国内外航空业的蓬勃发展,日均航班量逐年攀升,跑道利用率大幅提高,同一时间段内在机场运行的航空器、车辆和人员也变得越来越。为了满足高速增长的运行需求,机场规模扩大,跑滑结构日趋复杂,机场跑道入侵事件发生的概率也随之增长。在过去的几十年里,国内外机场因跑道侵入导致的飞行安全事故愈发频繁,造成了严重的人员伤亡和财产损失。1977年3月27日,西班牙加那利群岛洛司罗迪欧机场发生特内里费空难,两架波音747客机相撞造成583人遇难,是民航史上死亡人数最多的跑道入侵事件^[1]。2026年3月22日,美国纽约拉瓜迪亚机场发生跑道侵入,导致两名飞行员死亡,41人受伤^[2]。研究表明,机场运输量每增加20%,发生跑道侵入的概率会相应的增加140%^[3]。在美国,过去的20年里发生的跑道侵入事件从2002年的987次涨到了2020年的25 036次^[1]。跑道侵入已经连续十多年被列入美国国家运输安全委员会(NTSB)的安全改进“最紧迫”的清单中。跑道侵入事件为飞行安全带来极大的风险隐患,防止跑道侵入已成为保障飞行安全的重要环节,备受国内外航空领域的重视。

跑道侵入事件具有突发性与随机性。为有效降低其发生概率,一方面需深化对风险的认识并针对性消除隐患,另一方面需大力发展防范技术。然而,国内一些机场仍缺乏必要的预防手段与技术措施,行业发展面临诸多困难。

Schonefeld^[3]指出,所有有效的跑道侵入预防技术均围绕一个核心目标:增强运行参与者(飞行员、管制员、车辆驾驶员)的情景意识,具体包括自身位置意识、交通位置意识和跑道活动状态意识。据此,现有防范技术可分为两大方向:一是跑道侵入预防,通过提供精确导航、清晰指令和状态提示,从源头防止错误发生;二是跑道侵入检测与告警,在侵入即将或已经发生时,快速探测冲突并发出及时准确的告警。一套完整的防范系统通常包含三个技术模块:监视技术、冲突检测算法与人机交互。

本文梳理国内外对跑道侵入致因和防范技术的研究,针对跑道侵入防范监视技术、跑道侵入冲突检测算法以及人机交互3个方向综述了国内外

对跑道侵入技术研究的脉络,分析了国内跑道侵入防范技术存在的不足和未来发展趋势,为后续的研究指明方向。

1 跑道侵入致因

国际民用航空组织(ICAO)对跑道侵入的定义为:航空器、车辆或者人员错误地出现在为飞机起降划设的跑道及其保护区。FAA^[4]将跑道侵入根据严重等级分为A-D四个等级,A等级为极其严重的事件,几乎发生碰撞;B等级为碰撞可能性很高的情况,为避免碰撞,可能需要采取快速纠正措施或规避机动;C等级为有足够时间或空间避免碰撞的事件;D等级为符合跑道侵入标准,但由于车辆、人员或飞机错误地停留在跑道或受保护区,没有造成即时安全后果的事件。其中A和B是最危险、最需要立即响应的等级。

跑道侵入事件通常由多重因素叠加导致,其致因可根据主体与性质进行系统性分类。国外学界普遍将直接致因主要归结为飞行员偏差(Pilot Deviations,PD)、操作错误/偏差(Operational Errors/Deviations,OE)以及车辆/行人偏差(Vehicle/Pedestrian Deviations,VPD)^[3],Singh^[5]进一步补充了通信偏差(Effective Communication Gap,ECG)这一重要因素。其中,PD指飞行员在地面运行中违反程序(如错误转弯、超越等待点),是最主要的致因;OE涉及管制员发出错误指令(如允许进入已被占用的跑道);VPD指车辆或人员未经许可进入跑道区域;ECG则特指因无线电通信问题导致的飞行员与管制员间的误解,它作为一种潜在的促发因素,常加剧PD或OE,并在约70%的报告事件中与这两者相关联^[5]。

上述人为致因的背后,潜藏着共通的深层人为因素。国际民航组织(ICAO)等机构在《防止跑道侵入全球行动计划》(GAPPRI)中将其归纳为人为表现差异、沟通与协调失误、情景意识下降等关键原因^[6]。具体到操作层面,周青青^[7]基于NTSB数据的分析指出,情景意识不足、通信问题(如回听错误、穿越跑道前沟通不足)和违章/偏离程序是人为因素中的重中之重。此外,管制员和飞行员的工作负荷也是引发跑道侵入的核心深层问题之一^[8-10]。

除了人为因素,机场的物理与运行环境同样

是影响跑道侵入风险的系统性变量。Omosebi^[1]的研究表明,机场年运行架次的增加与跑道侵入数量呈正相关。另外,机场的几何特征具有显著影响:Johnson^[11]等人通过统计分析揭示,跑道与滑行道的交叉点数量是导致跑道侵入率显著增加的关键因素,拥有交叉跑道的机场侵入率更高。这印证了Thompson的观点,即机场的规模、交通流量和运营复杂度以复杂的方式影响着跑道侵入风险,使得预防策略需“量体裁衣”^[12]。由于机场规模、交通流量和运营复杂度的逐年增长是民航发展的必然趋势,并且还会加重人为因素,因此关键措施还是增强所有运行参与者(飞行员、管制员、车辆驾驶员)的情景意识。然而,Ison^[13]和Ding^[9]的研究表明,当前的自动化系统(如跑道状态灯、A-SMGCS)并未显著减少某些类别的严重侵入事件,甚至与C类事件增加相关。这说明自动化防范系统尽管有潜力减少人为错误,但其人机交互界面仍需优化以防止增加管制员/飞行员工作负荷。

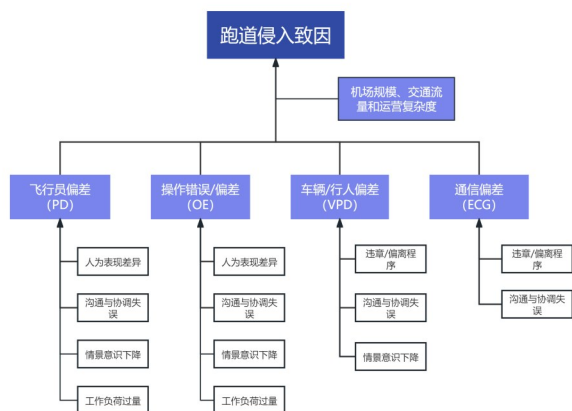


图1 跑道侵入成因分析图

Fig. 1 Analysis diagram of runway incursion causes

综合国内外研究可见,跑道侵入事件是多重因素叠加导致,其中人为因素是影响最大的因素(如图1所示)。因此,跑道侵入防范是一个系统工程,需要从多个角度入手,针对多种跑道侵入成因对症下药,从而将跑道侵入风险降到最低,这需要飞行机组、航空公司、机场和空管的协同努力^[14]。就人为因素而言,最关键的是要加强管制员/飞行员的情景意识,从源头上预防跑道侵入问题(监视技术);另一方面,在跑道侵入风险增加时第一时间向管制员/飞行员提出预警(在不增加管制员工

作负荷的前提下),使其采取措施将危害降到最低(冲突检测算法和人机交互信号)。这也是目前跑道侵入防范技术发展的主流方向。

深入剖析致因机理,旨在为后续防范技术与系统的研究提供问题导向与理论依据。以下章节将分别从跑道侵入防范系统架构、监视技术、冲突检测算法及人机交互系统四个维度展开系统综述。本文的整体结构框架如图2所示。

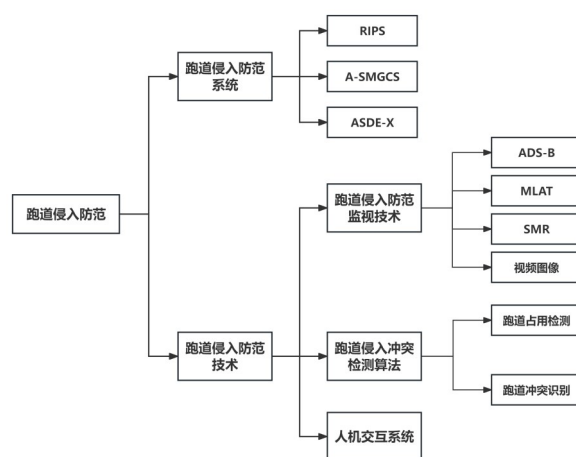


图2 本文结构框架示意图

Fig. 2 Diagram of the Structural Framework

2 跑道侵入防范系统研究进展

欧美国家对跑道侵入防范的研究起步较早,开发了一系列跑道侵入防范系统并投入使用,取得了较好的成果。本文选取了三种已部署或正在开发的系统进行介绍:跑道侵入预防系统(RIPS)、先进场面活动引导与控制系统架构(A-SMGCS)和机场场面探测设备模型X(ASDE-X);这些系统的架构均为多源数据(传感器、ADS-B、多点定位技术、场面监视雷达等)的融合与跟踪,再经过态势评估与冲突预测,最后通过人机界面(HMI)和信号发出告警提高管制员和情态意识(自身定位,路线和交通路况)。总结认为欧美国家的跑道侵入防范系统已经趋于成熟,但对非合作目标的监视依旧存在短板,对热点区域局部的监视需要加强。

2.1 跑道侵入预防系统

跑道侵入预防系统(Runway Incursion Prevention System, RIPS)是美国联邦航空局(FAA)于20

世纪90年代初开发的机载技术解决方案,旨在通过集成先进显示、检测算法和数据链通信,为飞行员和管制员提供增强的态势感知、实时交通信息与跑道侵入告警,以主动预防跑道侵入并提升机场地面运行效率。

该系统采用多源数据融合策略,主要依赖自动相关监视(ADS-B)与地面广播信息服务(STIS-B)获取交通态势,再通过数据链实现信息共享。其中,ADS-B是RIPS实现“机载自主”告警的关键,它使装备飞机或车辆能以约1~2 Hz的更新率广播高精度状态信息,具备低延迟(约0.25 s)和高精度(位置误差约3.1 m)的优势^[15];其数据来源通常为满足自身定位的差分GPS与惯性导航系统数据,以实现高精度、高更新率的自身状态确定^[16-17],这是精确引导与可靠冲突检测的前提。STIS-B则通过地面监视系统(多点定位、场面监视雷达等传感器)融合并向空中广播交通信息,能覆盖未装备ADS-B的目标,但其存在显著延迟(平均达2.6 s)和较低精度,可能导致警报生成滞后^[15]。

在冲突检测算法层面,RIPS主要集成两种算法:洛克希德马丁开发的跑道安全检测器(RSM)和Rannoch公司开发的PathProx算法。RSM是一个基于三维跑道入侵区域和操作状态矩阵的单阶段警报系统,仅在情况可能演变为冲突时发出警报。PathProx则是一个完整的机载告警系统,采用两级警报机制(跑道交通警报RTA和跑道冲突警报RCA),旨在直接向飞行员提供警报以最小化延迟。美国国家航空航天局(NASA)在达拉斯-沃斯堡、瓦勒普斯和雷诺的测试中证明^[16,18],RSM和PathProx系统的机载告警算法是可行且有效的,但其性能高度依赖于交通数据和自身位置信息的可靠性;且对非合作目标的入侵没有进行测试。

总体而言,RIPS代表了通过机载集成技术防范跑道侵入的早期重要探索,其核心在于融合多源监视数据、运行可靠检测算法并通过直观界面提供决策支持,但其效能受限于当时监视技术的精度、覆盖范围与数据链可靠性。

2.2 先进场面活动引导与控制系统

先进场面活动引导与控制系统(Advanced Surface Movement Guidance and Control System,

A-SMGCS)是国际民航组织推荐的高级机场地面活动引导和控制系统^[19],旨在提升跑道安全、运行效率与机场容量,其核心功能包括监视、路由、引导与控制^[20]。

学界对A-SMGCS关键技术性能的实证研究,主要集中于监视精度、路由和引导技术、控制技术三大层面。在监视技术层面,研究共识是ADS-B与多点定位(MLAT)的融合是提升精度的关键。EMMA2项目的测试表明,多传感器融合能将系统可用性提升至99.9%,而单一传感器在恶劣天气下可能低于70%^[21]。Strohmeier等^[22]的实测数据显示,1 090 MHz频段下ADS-B在高峰流量时报文丢失率可能超过50%,而融合MLAT可将平均定位误差控制在5 m以内。

在路由与引导技术层面,研究演进可分为三个阶段。2013年前以“被动路由”为核心,Eurocontrol和欧盟"Vision"等相关项目制定了初步标准与实现方法^[21,23]。2013年至2020年,研究转向“主动路由”创新,重点提升地图匹配算法精度并优化滑行速度剖面。Tran^[24]等人提出基于隐马尔可夫模型的匹配算法,在测试中降低了轨迹误差;Chen^[25]等人开发的基于帕累托优化的速度剖面生成算法,通过权衡燃油效率与滑行时间,在机场仿真中实现延误减少25%。2020年后,研究则聚焦于“全自动化集成”,SESAR计划探索利用数字孪生等技术实现实时动态规划,但需解决通信与网络安全等瓶颈^[21]。

在控制技术层面,研究核心在于通过冲突检测与告警增强情景意识,以实现从冲突规避到主动检测的防护。S. Young、D. R. Jones^[17]的研究为A-SMGCS的控制功能定义与技术标准提供了基础框架。欧盟EMMA2项目为系统的地面控制功能建立了一套详尽的技术要求规范^[21],指出控制功能的输出应被路由到各个客户端系统,包括管制员人机界面(HMI)、路由/规划功能以及引导功能。同时,G. K. Singh^[5]的研究指出当前系统在解决OE和ECG问题上存在局限,并提出通过集成自动化引导与跑道状态灯来动态“保护”跑道的新型架构。为支持系统向高级别发展。Zhang Hai-yan^[26]设计了优化先到先服务的自动化冲突解决策略,以构建从冲突识别、运动建模到控制决策的完整安全控制链条。

综上所述,A-SMGCS通过集成监视、路由、引导与控制功能,并依据可扩展的等级实施,为应对复杂场面运行挑战提供了系统性解决方案。其技术发展呈现从基础监视到全自动集成、从被动规划到主动优化的清晰路径,未来演进仍需攻克通信、数据融合与系统集成等关键瓶颈。

2.3 机场场面探测设备模型 X

机场场面探测设备模型 X(Airport Surface Detection Equipment, Model X, ASDE-X)是一种集成场面雷达、多点定位与 ADS-B 技术的多传感器融合监视系统。其核心目标是通过为管制员提供增强的态势感知与冲突告警,以降低跑道侵入风险^[27]。

欧美学界对 ASDE-X 的认知与研究不断深化。Pendergast^[27]率先对其概念和功能进行了清晰界定,并构建了被广泛引用的“传感器—数据处理—告警”三层模型。后续研究在此基础上不断拓展:美国 FAA 增加了“实时跟踪与识别”维度;Sandberg^[28]提出了强调动态监测能力的“检测—跟踪—告警”框架;而 Dy 和 Mott^[29]则补充了“经济性适配”视角,形成了更全面的四维度模型。围绕 ASDE-X 的实证研究主要集中在监视技术、数据融合算法和控制应用三大层面。

监视技术层面:研究共识认为传感器精度是系统效能的基础。Pendergast^[27]在亚特兰大机场的测试表明,其融合数据定位误差可低于 8 英尺,但 ADS-B 数据在飞机加速时存在滞后,可能影响跟踪连续性。此外,Bhadra 等^[30]在肯尼迪机场的实证发现传感器数量与几何布局对覆盖盲区有显著影响。

数据融合算法:研究聚焦于对高质量融合数据的深度利用。Waldron^[31]等人利用 ASDE-X 的高质量数据精确重构航空器轨迹,以检测和量化场面运动事件,为场面运行效率与安全研究提供新的分析工具。J. L. Gertz^[32]等人则针对达拉斯-沃斯堡国际机场 ASDE-X 数据异常问题,开发了一个监视数据清洗与验证算法包,对保障下一代依赖高精度融合数据的场面安全系统稳定运行具有重要意义。

控制应用层面:该层面研究旨在将数据转化为提升安全与效率的直接手段。具体研究包括:

为管制员开发可视化决策工具(如实时热力图)以提升空管决策效率^[28];基于 ASDE-X 数据设计离场管理、跑道调度优化算法以减少延误与拥堵风险^[30,33-34];以及将数据作为关键环境感知输入,集成到半自主电动拖车等新一代地面保障系统中^[35]。

综上所述,ASDE-X 代表了通过多传感器融合提升场面监视能力的重要技术路径。其在提供高精度态势感知、支持先进算法和应用方面价值显著。但其性能受限于具体传感器特性和机场布局,可能存在覆盖盲区,对非协作目标的监视能力亦存不足。

3 跑道侵入防范技术研究进展

3.1 跑道侵入防范监视技术

3.1.1 广播式自动相关监视技术

广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)是国际民航组织(ICAO)推荐的一种监视技术。其原理是加装机载设备的飞机或车辆通过地空数据链主动广播自身的身份、精确位置、速度、航向等状态信息。与传统雷达相比,ADS-B 设备成本与维护费用较低;不受地形与建筑物遮挡,可实现大范围、无死角的信号覆盖;能够精准获取所有配备该设备的航空器动态信息,为跑道侵入防范提供全面的态势感知。

2013 年,ADS-B 技术在提升场面安全、构建冲突告警系统方面的潜力被系统评估,为其融入跑道侵入防范系统架构奠定理论基础^[36-37]。次年,FAA 宣布完成全美 ADS-B 地面站、数据处理中心和数据交换网络的组建^[38]。RIPS、A-SMGCS、ASDE-X 等跑道侵入防范系统先后将 ADS-B 作为监视数据来源。在我国,民航局于 2019 年下发了《防止跑道侵入技术措施与实施路线》,明确将 ADS-B 确定为防止跑道侵入的成熟技术之一,建议 A 类以下机场部署以提升跑道安全水平。

国内对 ADS-B 在跑道侵入防范领域的研究聚焦于数据精度提升和基于 ADS-B 数据源的防范系统设计。在提升 ADS-B 数据质量方面,相关研究主要针对其“漏点”和定位噪声问题提出算法优化。申金星^[39]针对数据不连续问题提出了“位置/速度混合卡尔曼滤波”算法,旨在增强航迹的

连续性与精度。Yang^[40]等人则针对传统检测方法对定位噪声敏感的问题,提出并验证了一个“前端滤波+后端滞后决策”的双层鲁棒性架构,通过对含噪声的原始轨迹进行平滑处理,降低测量误差,为后续的侵入检测提供更干净、稳定的位置估计。在基于ADS-B的防范系统设计方面,国内学者也开展了一系列工作。冯岩^[41]遵循A-SMGCS理念,设计并仿真验证了以ADS-B为核心的场面监视系统原型,重点改进了适用于复杂机场环境的多传感器数据融合与冲突检测算法。沈笑云与张肖艳等人^[42-43]基于ADS-B实时位置数据,设计了一种两级告警机制。陈保^[44]提出了一个完整的基于ADS-B IN技术的机场场面情景感知与冲突检测系统解决方案,通过融合数据、高精度滤波算法、精细化误差模型与标准化检测逻辑,为机载自主场面监视与预警提供了技术路径。宋涛^[45]在此基础上,利用UE4引擎设计并实现了基于ADS-B数据的机场跑道冲突三维仿真与告警系统。

3.1.2 多点定位技术

场面多点定位技术(Multilateration, MLAT)是一种基于时差双曲线定位原理的先进监视手段,在机场场面监视中占据重要地位。其通过测量目标(如飞机或车辆)发射的无线电信号到达多个地面接收站的时差,解算目标位置,具有定位精度高、更新速度快的特点,能够不受低能见度制约且抗电磁干扰能力强,广泛应用于军民航等领域。

在欧美国家,FAA已将MLAT纳入“下一代空管系统”(NextGen),并在科罗拉多、阿拉斯加等雷达覆盖受限地区部署,以提升监视能力。欧洲亦在“单一欧洲天空”(SESAR)计划下推动其广泛应用。在我国,第一部具有自主知识产权的01型多点定位系统于2014年成功研制,在2019年正式获得民航航空管局的使用许可证。

当前MLAT技术主要采取TDOA定位算法^[46],然而传统算法在机场场面应用中暴露出计算量大、对观测噪声敏感、复杂地形中定位精度差的问题。因此,近年来国内外学者的研究聚焦于对TDOA算法的改进^[47]。Mantilla等人提出了Tikhonov正则化方法来解决“病态”定位问题、提升定位精度与算法收敛性^[48],还构建了用于分析比较各种定位算法的通用框架,为优化系统设计提供了重要理论指导^[49]。彭卫^[50]对经典三维

TDOA算法(如Chan算法)进行降维处理,得到适用于场面监视的改进二维算法,有效简化了计算。于雷^[51]提出了一套集成化的改进算法组合,包括联合优化定位算法、融合跟踪算法及智能布站方法,从多维度系统性提升了MLAT定位精度。以下研究致力于进一步增强相关算法的鲁棒性与稳定性:邓力^[52]针对机场无人机侵入监视,提出了自适应坏点剔除算法,以提升在低信噪比和遮挡环境下的稳定性。戴敏^[53]提出M-EKF混合定位算法,旨在解决非视距环境下非高斯观测噪声导致的精度下降问题。在优化抗噪性能方面,张思远^[54]提出了将Chan算法与改进布谷鸟搜索算法相结合的CICS混合算法,显著增强了在高噪声环境下的定位精度与稳定性。

3.1.3 微波场面监视雷达技术

微波场面监视雷达(Surface Movement Radar, SMR)是一种通过发射与接收微波信号,利用多普勒效应探测并跟踪机场地面目标(如飞机、车辆)的主动监视手段。作为主动式一次雷达,SMR的核心价值在于能够探测非合作目标(无论是否搭载应答机),并具备全天时、全天候的工作能力,在多源融合监视系统中有效弥补了ADS-B和光学监视手段的不足。

SMR技术发展起步较早,应用较为成熟。国外一些大型机场自20世纪60年代起即开始部署SMR用于场面监控。国内为满足运行需求,也开展了一系列相关研究和部署。然而,SMR在复杂电磁环境下的抗干扰能力以及高密度目标场景下的数据处理效率,仍是其有待进一步发展的技术方向。

学界对SMR的研究重心最初集中于雷达系统设计和目标探测能力的提升,随着基于多源融合数据监视系统研究的不断深入,研究逐步从基础性能提升发展为系统性优化与创新应用。在数据融合和质量提升方面:沈杰^[55]系统分析了复杂环境下的杂波问题,提出了采用X/Ku波段、优化架设高度、结合圆极化与频率分集等综合措施来有效抑制雨杂波等干扰。王乾伟^[56]则选择通过算法提升其数据质量与应用深度:针对雷达图像中的目标轮廓黏连与漏检问题,提出了基于高斯距离变换的改进分水岭算法,以更精准地提取飞机、车辆等目标的形状信息。而针对监视系统的高可

靠性要求,孙国梁^[57]提出了一种混合冗余设计架构,通过分级冗余设计来保障系统持续稳定运行。

在多传感器融合新架构的探索中,Perl^[58]指明了SMR向全固态、X波段、多频分集发展的趋势,并强调了其在多传感器融合体系中探测非合作目标的不可替代价值。王兴隆^[59]提出了基于Transformer与注意力机制的深度神经网络融合方法,旨在通过融合多源数据来获得更可靠的位置估计。Miccio^[60]还评估了将K波段雷达作为机载独立监视系统用于跑道侵入防范的可行性,并验证了从数据处理到轨迹生成的完整方法,为SMR的应用提供了新思路。

3.1.4 视频图像识别技术

场面监视雷达(SMR)、多点定位(MLAT)和广播式自动相关监视(ADS-B)等系统虽能提供有效监视,但存在建设成本高、有监视盲区或受特定机型限制等问题。随着视频监控技术的普及和计算机视觉算法的进步,基于视频图像的分析技术因其成本较低、部署灵活、可提供直观视觉信息等优势,已成为机场场面监视与跑道安全防护领域的研究热点与重要技术补充。

在跑道侵入防范的视频图像识别领域,研究从传统的图像处理逐渐向深度学习驱动的方向发展。其核心目标是应对复杂场面环境下的目标检测、跟踪与预警挑战。

早期研究侧重于传统算法以提升基础图像质量与目标分离能力。陈文^[61]等人通过融合帧间差分、背景差分与形态学滤波来检测运动目标,以处理光线突变和摄像头抖动问题。同期,研究也关注背景建模(如潘卫军^[62]使用的混合高斯模型)和恶劣天气下的图像增强(李佳骏^[63]等对比直方图均衡化与Retinex算法)。为弥补单一监视技术的不足,也有学者开始探索视频图像与其他传感器的融合。杨斌^[64]将视频监控与ADS-B数据结合,为兰州中川机场设计了综合防侵入系统,以增强态势感知。

随着技术进步,基于深度学习的目标检测与跟踪算法已成为主流解决方案。郭睿豪^[65]首次将Mask R-CNN算法系统性地应用于跑道侵入防范领域,提供了一条基于商用摄像头和深度学习、成本相对较低、易于部署的技术路径。贤继佳^[66]在此基础上利用卷积神经网络字符识别功能进行航

空器尾号识别与运动趋势预测,实现了高准确率的预警。随着深度学习在视频识别技术的广泛应用,YOLO系列、Transformer等先进深度学习架构进入学者的视野。从李佳泽^[67]较早应用YOLOv3进行目标检测,到赵毅^[68]等人提出更适用的MCC-YOLOv3模型,再到Li^[69]等人以高性能的单阶段检测器YOLOv8为基线,引入大分离核注意力(LSKA)为无人机着陆设计YOLO-RWY模型,体现了模型针对性的不断增强。在跟踪框架集成上,陈佳扬^[70]、李明^[71]和张天航^[72]等人分别构建了结合YOLO检测器与DeepSORT跟踪器的框架,实现了对道面目标的持续、稳定跟踪。同时,研究者也在探索更强大的网络架构(如杨昌其^[73]等融合Swin Transformer与Mask R-CNN以提升跑道环境中多尺度目标的特征提取能力)和更高效的图像预处理算法(如韩一杰^[74]改进AOD-Net去雾算法,引入通道注意力与特征金字塔池化模块以提升去雾图像质量),不断追求精度与鲁棒性的突破。

3.1.5 多源传感器融合:监视技术的发展趋势

广播式自动相关监视(ADS-B)、多点定位技术(MLAT)、微波场面监视雷达(SMR)及视频图像识别技术四种监视手段各有优劣。ADS-B成本低、部署简便,具备高精度和低延迟的优势,但依赖目标主动发射信号,无法探测非合作目标,且在高峰流量时易发生报文丢失。MLAT定位精度高、更新快、可全天候工作,并能利用应答机信号识别目标身份,但需部署多个地面站,成本较高,在复杂地形中多径效应会影响精度。SMR作为主动式一次雷达,可探测所有运动目标(包括非合作目标),具备全天时全天候工作能力,但抗干扰能力较弱,高密度目标场景下数据处理效率受限。视频图像识别技术成本低,可提供直观视觉证据,并能结合深度学习实现高精度目标分类与识别,但受光照、天气影响严重,覆盖范围有限。

由于单一传感器均存在固有短板,无法同时满足“全覆盖、全天候、高精度、低成本”的苛刻要求,多源传感器融合成为提升场面监视能力的必然选择。当前很多成熟的跑道侵入防范系统采用了多源传感器融合策略:其中,RIPS将ADS-B与STIS-B(融合MLAT、SMR等传感器)数据结合获取交通态势^[15-17],既能实现机载自主告警,又能

兼顾地面非合作目标,体现了精度与覆盖的互补融合。A-SMGCS将ADS-B与MLAT的定位数据融合,有效提升了恶劣天气条件下的定位精度^[21-22]。ASDE-X则同时集成SMR、MLAT与ADS-B监视技术,三者融合实现了“非合作目标可探测、合作目标可识别”的全覆盖监视。另外,融合图像识别技术的跑道侵入防范系统也已经开始推广^[64],弥补了传统ADS-B/MLAT/SMR技术无法识别非合作目标(如无应答机车辆、人员、动物)的短板,同时借助深度学习在低能见度、夜间等复杂条件下的增强能力,与既有合作式监视手段形成互补。

RIPS、A-SMGCS、ASDE-X等系统的成功实践证明,多源传感器融合是跑道侵入防范技术发展的主流方向。通过融合异构数据可实现优势互补:ADS-B提供高精度身份与位置,MLAT增强定位冗余与覆盖,SMR确保非合作目标探测,视频提供视觉验证与分类。未来应进一步优化融合算法,提升系统在恶劣环境下的鲁棒性与实时性,构建更安全、高效的场面监视体系。

3.2 跑道侵入冲突检测算法

冲突检测算法是跑道侵入防范系统的关键环节。国内外学者已形成两级告警机制的共识:跑道占用与跑道冲突是判定跑道侵入事件的两个不同指标,在跑道侵入的风险演化链中处于不同环节,判定依据和所需告警类型也不同,应当区别处理。

跑道占用指目标进入跑道保护区,其判定仅需依据目标与保护区的位置关系。单纯的跑道占用不等同于跑道侵入事件,实际风险与管制员是否保持态势感知、是否已发布跑道相关许可密切相关。系统应在跑道占用发生时提示管制员,防止其在未察觉情况下指挥其他目标进入跑道。

跑道冲突则是动态风险的判定,指在跑道已被占用的基础上,多个目标间存在碰撞风险。由于跑道运行规则复杂,多目标同时占用跑道不能简单等同于跑道冲突(如连续起降时多机可合法占用同一跑道)。因此,冲突识别需结合穿越、对头、尾随等具体场景,核心逻辑是利用监视数据获取目标位置与运动状态,通过运动学分析预测轨迹,再结合冲突场景判断是否存在时空重叠风险。

目前,国内研究围绕“跑道占用检测”与“跑道冲突识别”已形成了较为清晰的技术脉络,致力于实现从静态空间入侵告警到动态碰撞风险预警的闭环。

3.2.1 跑道占用检测

跑道保护区的划设是实施跑道占用检测的地理与规则基础。霍志勤^[75]对此做出了关键贡献:他论证并明确了ICAO定义中“地面保护区”的范围,指出其需综合ILS(仪表着陆系统)场地保护区、下滑台保护区、航空器跑道等待位置、升降带及端安全区等多个区域来确定。这为后续所有基于位置关系的冲突检测算法提供了统一、精确的地理边界和规则依据。2024年中国民用航空局下发了《防止机场地面车辆和人员跑道侵入管理规定》(民航规[2024]11号)^[76],规定跑道地面保护区包括:跑道、位于适用的跑道等待位置和跑道之间的部分滑行道、跑道中线两侧各75m-107.5m范围内的土面区、ILS临界区/敏感区和跑道端安全区(具体尺寸与范围划分如图3所示)。

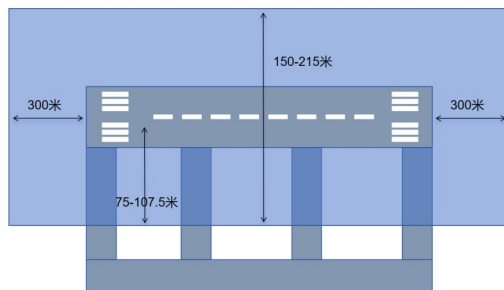


图3 跑道地面保护区示意图^[66,71]

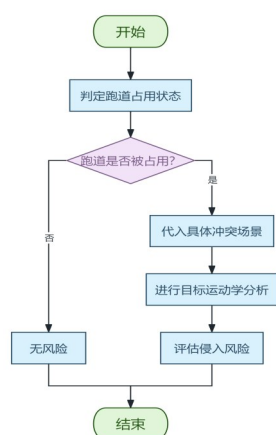
Fig. 3 Diagram of runway surface protection zone^[66,71]

跑道占用检测的核心是判断目标是否非法进入“跑道保护区”。沈笑云^[43]等人利用ADS-B提供的位置信息,分析移动目标与跑道保护区的位置关系来判定跑道是否被占用。李林春^[77]基于MLAT技术,采用了改进的射线法判断跑道占用情况。张睿^[78]等人则用分治法对跑道区域单独处理,并利用Delaunay网格化进行目标检测,为快速进行跑道占用判断提供基础。不同于ADS-B、MLAT和SMR这些技术,以视频图像技术为监视数据来源的检测算法为了精准识别出视频图像中目标与跑道保护区之间的相对位置,需进行三维到二维的坐标转换。对此潘卫军设计了物体位置

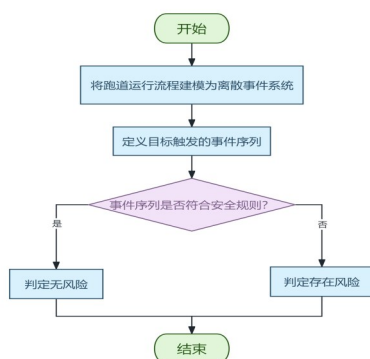
投影算法^[79],又采用旋转卡壳算法计算动态目标凸包与安全区域的距离,结合运动方向评估跑道占用状态^[62]。李明^[71]则建立了从三维到二维的坐标转换系统,为基于视频图像识别的不规则目标检测提出了有效方案。

3.2.2 跑道冲突识别

当前跑道冲突识别的主流方案是在跑道占用的基础上,结合具体冲突场景,通过几何计算(如距离、交点、相遇时间)对多个目标进行运动学分析(跟踪与轨迹预测),以评估动态冲突风险。此外也有学者提出了基于事件驱动的冲突检测模型,为跑道冲突识别提供了新的思路。传统几何法与事件驱动法具体流程如图4所示。



(a) 传统几何法



(b) 事件驱动法

图4 两种跑道冲突识别方案^[43,45]

Fig. 4 Two approaches for runway conflict identification^[43,45]

在传统几何法的冲突场景分类上,沈笑云^[43]等人系统地构建了尾随、穿越和对头三种典型的动态冲突场景模型,并通过判断目标间航向差确

定具体场景。宋涛^[45]则在此基础上将这三类经典冲突场景又细分为进港冲突和离港冲突。

在基于几何法的运动状态分析上,沈笑云和李林春均采用了相对运动状态、空间距离和相遇时间作为判断冲突的核心判据^[43,77]。李佳泽、李佳骏等人则使用卡尔曼滤波器预测目标的未来运动状态,从而实现对潜在风险的超前判定^[63,67]。焦卫东^[80]等人在ADS-B数据基础上,创造性引入共形几何代数来描述跑道侵入与冲突检测模型,相比传统欧氏几何方法,提升了运算效率。

除了基于精密位置测算与运动学分析的几何模型路径,还有学者提出了基于事件与规则推理的模型路径。代表研究有:陈平、汤新民的基于Petri网的目标感知事件驱动模型^[81],其核心逻辑为将跑道运行流程建模为离散事件系统,通过目标触发的特定事件序列是否符合安全规则判断侵入风险。贤继佳^[66]基于联络道摄像头和电子进程单提供的跑道占用信息,设计了基于电路逻辑的跑道冲突检测算法。陈佳场^[70]将复杂的跑道运行态势抽象为一个拥有有限个状态的自动机,通过状态转移函数判断跑道是否存在冲突。该路径侧重于逻辑和流程的合规性,对绝对定位的精度要求相对较低。但该方法也存在局限性:对于跑道侵入风险等级无法甄别,更无法处理未在模型中定义的非合作目标^[81]。

3.3 人机交互系统

跑道侵入防范的最终成效,高度依赖于安全信息能否被管制员和飞行员及时、准确地感知。因此,人机交互系统构成了连接后台算法与前端决策的“最后一公里”。当前研究主要沿两条路径展开:一是面向管制员的增强型视觉交互界面,二是面向飞行员的直接光学警告信号。

面向管制员的视觉交互界面已从单一信息显示演进为集多源数据融合、智能告警与系统管理于一体的决策支持平台,其核心设计逻辑在于降低认知负荷、增强情景意识。早期研究开创了“视频监控-道面俯视图”的双窗口映射模式^[62],实现了从细节监视到全局态势的转换。近期研究更注重工程化与实用性,集成了用户管理、视频监控、告警配置和日志审计等模块,并通过与ADS-B、电子进程单数据交叉验证,实现了高可靠的分级告

警^[74]。这些研究表明,现代交互界面正朝着深度嵌入管制 workflow、提供闭环决策支持的方向发展。

与管制员界面并行,以跑道状态灯(Runway Status Lights, RWSL)为代表的信号系统为飞行员提供了不依赖语音指令的强制性目视警告。国内研究集中于技术引进与本土化应用。在政策层面,民航局在《中国民航跑道安全工作指导意见》中明确推荐应用 RWSL 系统^[82]。吴大林^[83]系统剖析了 RWSL 的四大模块(检测、逻辑处理、灯光和塔台控制),为技术引进提供了清晰框架。刘学建^[84]分析了跑道状态灯在国内外机场的应用现状以及发展前景,呼吁对国内机场安全基础设施进行排查。在技术选型方面,刘卫东^[85]指出基于光纤通信的个体灯控制器在响应和可靠性上最优,宽带电力线载波是现有机场改造的可行替代方案。

当前人机交互系统的前沿研究致力于界面与信号的深度融合。例如,管制员界面中的逻辑状态可直接驱动虚拟 RWSL 显示,而 RWSL 的触发逻辑基于同一套感知与决策数据^[70]。这种融合创造了协同预警环境:管制员掌握全局逻辑,飞行员接收直接指令,两者数据同源,形成人机协同的双重保障。

4 总结与展望

本文从跑道侵入成因出发,分监视技术、冲突检测算法和人机交互系统三个模块综述了跑道侵入防范技术的研究进展。综合现有研究,本文认为:

1) 跑道侵入成因具有明显的系统性特征,人为因素(飞行员偏差(PD)、操作错误/偏差(OE)、车辆/行人偏差(VPD)、通信偏差(ECG))始终占据主导地位^[3,5]。解决的核心在于提高管制员/机组的情景意识^[3]。而对于情景意识的增强,则需要先进的监视技术、周密的冲突检测算法以及优化的人机交互界面。

2) 多源传感器融合已成为提升场面监视能力的主流技术路径。ADS-B、MLAT、SMR 与视频图像识别各具优势与局限,单一传感器难以实现全覆盖、全天候的可靠监视,而融合方案能够有效弥补各自短板,显著提升定位精度与目标识别能力^[15,21-22]。未来的主流研究方向为基于深度学习

的视频图像识别技术结合现有传统监视技术的多源融合监视。

3) 冲突检测算法已形成“跑道占用—跑道冲突”两级告警的共识框架。基于几何模型的运动学分析与基于事件驱动的逻辑推理两条技术路径并存,前者适用于高精度定位场景^[43,77],后者在低精度条件下仍可保证逻辑合规性判断^[66,70,81],二者互为补充。

4) 人机交互界面正从单一信息显示向集成化、智能化决策支持平台演进^[74]。面向管制员的增强型视觉界面与面向飞行员的跑道状态灯(RWSL)等直接光学信号系统正在深度融合^[70],旨在构建不额外增加人员工作负荷的协同预警环境。

5) 未来跑道侵入防范技术的突破方向在于:非合作目标的可靠监视、复杂场景下算法鲁棒性的提升,以及从实验室验证向系统级工程应用的转化。深度学习与多源数据融合的持续结合,将是实现全天候、高实时、高可靠防范体系的关键。

参考文献

- [1] Omosebi O, Azimi M, Olowokere D, et al. Investigating runway incursion incidents at United States Airports[J]. Future Transportation, 2023, 3(4): 1209-1222.
- [2] 每日经济新闻. 美国纽约一机场客机撞上消防车,机长和副机长死亡,41人受伤入院[EB/OL]. (2026-03-24) [2026-06-23]. <https://www.toutiao.com/article/76204-84923656258067/wid=1788703123221>. National Business Daily. Passenger Jet Hits Fire Truck at New York Airport, Killing Both Pilots and Injuring 41[EB/OL]. (2026-03-24) [2026-06-23]. <https://www.toutiao.com/article/7620484923656258067/wid=1788703123221>. (in Chinese)
- [3] Schönefeld J, Möller D P F. Runway incursion prevention systems: A review of runway incursion avoidance and alerting system approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 51: 31-49.
- [4] Eurocontrol. The European action plan for the prevention of runway incursions [EB/OL]. [2026-06-23]. <https://www.eurocontrol.int/publication/european-action-plan-prevention-runway-incursions-eappri>.
- [5] Singh G K, Meier C. Preventing runway incursions and conflicts[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(7): 653-670.
- [6] Federal Aviation Administration. Runway incursions [EB/OL]. [2026-06-23]. https://www.faa.gov/airports/runway_safety/resources/runway_incursions.

- [7] 周青青, 孙延进. 航空运营人防跑道侵入研究[J]. 民航学报, 2025, 9(5): 101-104, 85.
Zhou Qingqing, Sun Yanjin. Research on preventing runway incursion by aviation operators [J]. Journal of Civil Aviation, 2025, 9(5): 101-104, 85. (in Chinese)
- [8] 丁松滨, 刘佳琦, 徐苏. 跑道侵入风险评价的改进网络层次分析法研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 187-193.
Ding Songbin, Liu Jiayu, Xu Su. Research on runway incursion risk assessment based on improved analytic network process [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 187-193. (in Chinese)
- [9] Ding T. Advanced surface movement guidance and control system investigation and implementation in simulation [D]. Cranfield: Cranfield University, 2011.
- [10] 罗军, 林雪宁. 基于模糊集和改进 TOPSIS 方法的跑道侵入风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(12): 116-121.
Luo Jun, Lin Xuening. Runway incursion risk assessment based on fuzzy sets theory and improved TOPSIS method [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(12): 116-121. (in Chinese)
- [11] Johnson M E, Zhao X, Faulkner B, et al. Statistical models of runway incursions based on runway intersections and taxiways[J]. Journal of Aviation Technology and Engineering, 2016, 5(2): 15-26.
- [12] Thompson R S. Mitigating runway incursions: evaluating advanced technologies and methodologies for enhanced aviation safety [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2025.
- [13] Ison D. Analysis of runway incursion trends: Implications for cost-benefit analysis of mitigation investments[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2020: 1-12.
- [14] 杨德文, 阮文强. 规避跑道侵入风险的研究[J]. 民航学报, 2018, 2(4): 39-42, 20.
Yang Dewen, Ruan Wenqiang. How to avoid the risk of runway incursion [J]. Journal of Civil Aviation, 2018, 2(4): 39-42, 20. (in Chinese)
- [15] Jones D R, Prinzel L J. Runway incursion prevention for general aviation operations[C]// 2006 IEEE/AIAA 25TH digital avionics systems conference. Portland, OR, USA. IEEE, 2006: 1-12.
- [16] Jones D R, Quach C C, Young S D. Runway incursion prevention system-demonstration and testing at the Dallas/Fort Worth International Airport [C]// Proceedings of the 20th digital avionics systems conference (DASC). US: AIAA/IEEE, 2001: 1-12.
- [17] Jones D R. Runway incursion prevention system simulation evaluation[C]// Proceedings of the 21st digital avionics systems conference. Irvine, CA, USA. IEEE, 2002: 11B4.
- [18] Ison D C, Young S D, Kelly W M Jr. Testing of a runway incursion prevention system at the Wallops Flight Facility: NASA/CR-2004-213425 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 2004.
- [19] EUROCONTROL. A-SMGCS technical requirements - ground: 2-D1.1.2a [R]. Brussels, Belgium: EMMA2 Project, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2009.
- [20] 唐勇. A-SMGCS 航空器滑行路由规划及三维仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Tang Yong. Research on aircraft taxi routing planning and 3D simulation for A-SMGCS [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [21] Consortium E. Implementation roadmap for A-SMGCS: 2-D151_IR_V1.0 [R]. Brussels: European Airport Movement Management by A-SMGCS (EMMA2), 2010.
- [22] Strohmeier M, Schäfer M, Lenders V, et al. Realities and challenges of nextgen air traffic management: The case of ADS-B [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 111-118.
- [23] Piazza E. A-SMGCS routing and guidance functions [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(7): 15-23.
- [24] Tran T N, Pham D T, Alam S. A map-matching algorithm for ground movement trajectory representation using A-SMGCS data [C]// 2020 international conference on artificial intelligence and data analytics for air transportation (AIDA-AT). Singapore, Singapore. IEEE, 2020: 1-8.
- [25] Chen J, Weiszer M, Locatelli G, et al. Toward a more realistic, cost-effective, and greener ground movement through active routing: A multiobjective shortest path approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(12): 3524-3540.
- [26] Zhang H Y, Zhang J, Zhu F, et al. Research on conflict resolution control strategy for vehicles and aircrafts on airport surface [J]. Urban Lifeline, 2025, 3(1): 8.
- [27] Pendergast S. Multisensor fusion for airport surface movement area surveillance and safety [C]// Sensor fusion: Architectures, algorithms, and applications VI. US: SPIE, 2002, 4731: 1-12.
- [28] Sandberg M. Applications of ASDE-X data to the analysis of airport surface operations [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [29] Dy L R I, Mott J H. An affordable approach to runway incursion prevention [C]// 2024 systems and information engineering design symposium (SIEDS). Charlottesville, VA, USA. IEEE, 2024: 499-504.
- [30] Bhadra D, Knorr D A, Levy B. Benefits of virtual queuing at congested airports using ASDE-X: A case study of JFK airport [J]. Air Traffic Control Quarterly, 2012, 20(3): 225-251.
- [31] Waldron T P. Detecting airport surface movement events

- using ground surveillance[C]// 2009 IEEE/AIAA 28th digital avionics systems conference. Orlando, FL, USA. IEEE, 2009: 4. C. 1-1-4. C. 1-8.
- [32] Gertz J L, Grappel R D. Surveillance improvement algorithms for airport surface detection equipment model X (ASDE-X) at Dallas-Fort Worth airport[R]. Lexington, MA: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 2007. (Project Report No. ATC-333)
- [33] Mirmohanmadsad E N, Hu J, Trani A. Enhancements to the runway capacity simulation model using estimating airports throughput[R]. Blacksburg, VA: Virginia Tech.
- [34] Alsacius O, Hotle S. Deicing facility capacity and delay estimation using ASDE-X data: a Chicago O'Hare simulation case study[J]. Journal of Air Transportation, 2023, 31(2): 45-60.
- [35] NASA SAFETug Team. Human-machine interface design for semi-autonomous electric taxiing systems[R]. Washington, D. C.: NASA Technical Report, 2023.
- [36] Flight Safety Foundation. Maximum visibility [EB/OL]. (2012-04-17) [2026-06-23]. <https://flightsafety.org/archives-and-resources/maximum-visibility/>.
- [37] Kunzi F. Reduction of collisions between aircraft and surface vehicles: Conflict alerting on airport surfaces enabled by automatic dependent surveillance - broadcast[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2325(1): 56-62.
- [38] U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Next generation air transportation system (NextGen) [EB/OL]. (2024-07-18) [2026-06-23]. <https://www.faa.gov/newsroom/nextgen>.
- [39] 申金星. 基于ADS-B多地面站的实时监视系统[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- Shen Jinxing. Real-time surveillance system based on multi-station ADS-B[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [40] Yang S, Zhang Y G, Zhang X M. A noise-resilient detection algorithm for runway incursions based on Kalman filtering and dynamic hysteresis logic[J]. IEEE Access, 2025, 13: 197663-197677.
- [41] 冯岩. 基于ADS-B场面监视系统的设计与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- Feng Yan. Design and simulation of airport surface surveillance system based on ADS-B[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [42] 张肖艳. 基于ADS-B的跑道侵入检测与告警研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- Zhang Xiaoyan. Research on runway incursion detection and alerting based on ADS-B[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)
- [43] 沈笑云, 张肖艳, 张思远. 基于ADS-B的跑道侵入冲突检测与告警研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 119-124.
- Shen Xiaoyun, Zhang Xiaoyan, Zhang Siyuan. Research on runway incursion conflict detection and alarm based on ADS-B[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 119-124. (in Chinese)
- [44] 陈侯. 基于ADS-B IN的机场场面情景感知及冲突检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- Chen Yu. Research on airport surface situational awareness and conflict detection algorithm based on ADS-B IN[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [45] 宋涛. 机场跑道冲突检测及三维仿真研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2024.
- Song Tao. Research on airport runway conflict detection and three-dimensional simulation [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2024. (in Chinese)
- [46] 葛亚威, 戴雨, 孔建国. 基于A-SMGCS的航空器场面运行冲突探测研究[J]. 西安航空学院学报, 2017, 35(5): 14-18, 50.
- Ge Yawei, Dai Yu, Kong Jianguo. Research on the conflict detection of aircraft surface operation based on A-SMGCS [J]. Journal of XIAN Aeronautical University, 2017, 35(5): 14-18, 50. (in Chinese)
- [47] 王子玖, 黄涛, 孙宁, 等. 基于MLAT定位解析算法研究综述[J]. 航空计算技术, 2023, 53(2): 131-134.
- Wang Zijiu, Huang Tao, Sun Ning, et al. Review on MLAT-based surveillance and location parsing algorithms [J]. Aeronautical Computing Technique, 2023, 53(2): 131-134. (in Chinese)
- [48] Mantilla-Gaviria I A, Balbastre-Tejedor J V, De Los Reyes E, et al. Improvement of multilateration (MLAT) accuracy and convergence for airport surveillance[C]// 2011 Tyrrhenian international workshop on digital communications - enhanced surveillance of aircraft and vehicles (TI-WDC/ESAV 2011). US: IEEE, 2011: 173-184.
- [49] Mantilla-Gaviria I A, Leonardi M, Galati G, et al. Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(7): 1549-1558.
- [50] 彭卫, 黄荣顺, 郭建华, 等. 一种适用于机场场面MLAT监视系统的定位算法及其性能分析[J]. 航空学报, 2015(9): 3050-3059.
- Peng Wei, Huang Rongshun, Guo Jianhua, et al. A location algorithm suitable for MLAT surveillance system at airport surface and its performance analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015(9): 3050-3059. (in Chinese)
- [51] 于雷. 基于ADS-B的机场场面多点定位方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- Yu Lei. Research on airport surface multilateration method

- based on ADS-B[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [52] 邓力, 王钦, 贺元骅. 基于自适应坏点剔除的多点定位技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4599-4604.
- Deng Li, Wang Qin, He Yuanhua. Multi-point positioning based on adaptive bad pixel rejection[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4599-4604. (in Chinese)
- [53] 戴敏, 路晶, 惠国腾. 机场场面多点定位中结合M估计与EKF的高精度位置估计方法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(5): 79-84.
- Dai Min, Lu Jing, (Xi/hui) Guoteng. A high precision mlat method combining m-estimation and extended Kalman filter in airport surface surveillance[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(5): 79-84. (in Chinese)
- [54] 张思远, 刘倩倩, 焦卫东. 基于改进布谷鸟算法的机场场面多点定位方法[J]. 航空学报, 2025, 46(18): 431749.
- Zhang Siyuan, Liu Qianqian, Jiao Weidong. A multi-point location method of airport scene based on improved Cuckoo algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(18): 431749. (in Chinese)
- [55] 沈杰, 晏勇. 机场场面监视雷达反杂波性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(2): 123-126.
- Shen Jie, Yan Yong. Analysis of clutter suppression capability in surface movement radar[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(2): 123-126. (in Chinese)
- [56] 王乾伟, 尤立峰. 机场场面监视雷达目标轮廓检测算法研究[J]. 中国设备工程, 2025(4): 187-190.
- Wang Qianwei, You Lifeng. Research on target contour detection algorithm of airport scene surveillance radar[J]. China Plant Engineering, 2025(4): 187-190. (in Chinese)
- [57] 孙国梁, 曹兰英, 段晓军. 一种高任务可靠性雷达架构设计[J]. 测控技术, 2015, 34(3): 120-122, 126.
- Sun Guoliang, Cao Lanying, Duan Xiaojun. Architecture design for high mission reliability radar[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(3): 120-122, 126. (in Chinese)
- [58] Perl E. Review of airport surface movement radar technology[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(10): 24-27.
- [59] 王兴隆, 尹昊, 丁俊峰. 基于Trans-Attention的飞行区航空器监视数据融合方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1215-1223.
- Wang Xinglong, Yin Hao, Ding Junfeng. Aircraft surveillance data fusion method in flight area based on Trans-Attention[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1215-1223. (in Chinese)
- [60] Miccio E, d'Ortenzio A, Fasano G, et al. K-band radar system analysis for airport runway and taxiway intrusion surveillance applications[C]// 2025 AIAA DATC/IEEE 44th digital avionics systems conference (DASC). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2025: 1-10.
- [61] 陈文, 曹力, 黄圣国. 一种基于视频图像技术的跑道侵入检测方法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 103-107.
- Chen Wen, Cao Li, Huang Shengguo. Detection method of runway incursion based on video[J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 103-107. (in Chinese)
- [62] 潘卫军, 吴郑源, 陈佳炆, 等. 基于混合高斯模型的跑道侵入检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 63-67.
- Pan Weijun, Wu Zhengyuan, Chen Jiayang, et al. Runway intrusion detection method based on Gaussian mixture model[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(2): 63-67. (in Chinese)
- [63] 李佳骏, 王永忠, 千月欣, 等. 恶劣气象条件下机场跑道侵入的预警研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(4): 206-211, 216.
- Li Jiajun, Wang Yongzhong, Qian Yuexin, et al. Research on the early warning of airport runway invasion under severe weather conditions[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(4): 206-211, 216. (in Chinese)
- [64] 杨斌. 基于ADS-B和视频监控的兰州中川机场防跑道侵入系统设计[J]. 民航管理, 2020(4): 77-81.
- Yang Bin. Design of runway incursion prevention system for Lanzhou Zhongchuan Airport based on ADS-B and video surveillance[J]. Civil Aviation Management, 2020(4): 77-81. (in Chinese)
- [65] 郭睿豪. 基于R-CNN的目标检测在防止跑道侵入中的应用研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2020.
- Guo Ruihao. Application research of R-CNN based target detection in runway incursion prevention[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2020. (in Chinese)
- [66] 贤继佳. 图像识别技术在跑道侵入预警中的应用研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- Xian Jijia. Research on application of image recognition technology in runway intrusion warning[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022. (in Chinese)
- [67] 李佳泽. 基于视频处理的机场跑道侵入告警技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- Li Jiaze. Research on airport runway intrusion warning technology based on video processing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [68] 赵毅. 基于视频图像目标检测技术的防跑道侵入研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- Zhao Yi. Research on runway incursion prevention based on video image target detection technology[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. (in Chinese)
- [69] Li Y, Xia Y, Zheng G J, et al. YOLO-RWY: A novel runway detection model for vision-based autonomous landing of fixed-wing unmanned aerial vehicles[J]. Drones, 2024, 8(10): 571.

- [70] 陈佳扬. 基于计算机视觉的机场防跑道侵入研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
Chen Jiayang. Study on airport runway incursion prevention based on computer vision [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2021. (in Chinese)
- [71] 李明. 基于视频图像的机场跑道侵入检测技术研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
Li Ming. Research on airport runway intrusion detection technology based on video image [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. (in Chinese)
- [72] Zhang T H, Hu S S, Wang C, et al. Real-time runway safety surveillance using deep learning based video analytics [J]. Discover Computing, 2026, 29(1): 72.
- [73] 杨昌其, 韩一杰, 张天航. 基于计算机视觉的机场跑道上航空器目标检测[J]. 航空计算技术, 2025(2): 88-92.
Yang Changqi, Han Yijie, Zhang Tianhang. Aircraft target detection on airport runways based on computer vision [J]. Aeronautical Computing Technique, 2025(2): 88-92. (in Chinese)
- [74] 韩一杰. 雾天场景下基于视频图像目标检测的防跑道侵入研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2025.
Han Yijie. Research on runway incursion prevention based on video image target detection in foggy scene [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2025. (in Chinese)
- [75] 霍志勤. 跑道侵入概念中的地面保护区研究[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(6): 9-13.
Huo Zhiqin. Study on the protected area of a surface from the perspective of runway incursion [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(6): 9-13. (in Chinese)
- [76] 中国民用航空局. 运输机场地面车辆和人员跑道侵入防范管理办法: 民航规[2024]11号[Z]. 北京: 中国民用航空局, 2024-01-23.
Civil Aviation Administration of China. Administrative measures for prevention of runway incursion by ground vehicles and personnel at transport airports: MHG[2024]No. 11 [Z]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2024-01-23. (in Chinese)
- [77] 李林春. 基于多点定位的场面移动目标冲突检测研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
Li Linchun. Research on conflict detection of surface moving targets based on MLAT [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. (in Chinese)
- [78] 张睿, 张勇, 张友辉. ADS-B监视下的场面冲突检测算法研究[J]. 计算机与现代化, 2013(5): 16-18, 27.
Zhang Rui, Zhang Yong, Zhang Youhui. Study on airport surface conflict detection algorithm under ADS-B surveillance [J]. Computer and Modernization, 2013(5): 16-18, 27. (in Chinese)
- [79] 潘卫军, 许友水, 康瑞. 基于视频处理的机场跑道入侵检测模型的设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8366-8372.
Pan Weijun, Xu Youshui, Kang Rui. Design and realization of detecting runway incursion model based on process of video [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(28): 8366-8372. (in Chinese)
- [80] 焦卫东, 王瑞冬, 姚军强, 等. 跑道侵入与冲突检测的共形几何代数描述[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 325297.
Jiao Weidong, Wang Ruidong, Yao Junqiang, et al. Conformal geometric algebraic description of runway incursion and conflict detection [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 325297. (in Chinese)
- [81] 陈平, 汤新民, 邢健, 等. 目标感知事件驱动的跑道入侵控制策略研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(6): 125-131.
Chen Ping, Tang Xinmin, Xing Jian, et al. Research on the runway incursion control strategy based on objective perception events driven model [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(6): 125-131. (in Chinese)
- [82] 倪豆. 浅谈RWSL系统在防跑道侵入技术中的应用[J]. 中国信息化, 2018(8): 63-64.
Ni Dou. Application of RWSL system in runway intrusion prevention technology [J]. 1, 2018(8): 63-64. (in Chinese)
- [83] 吴大林. 机场跑道智能灯光系统的组成及架构分析[J]. 西部交通科技, 2018(11): 175-177.
Wu Dalin. Analysis on composition and structure of intelligent lighting system for airport runway [J]. Western China Communications Science & Technology, 2018(11): 175-177. (in Chinese)
- [84] 刘学建, 解增武. 浅析跑道状态灯(RWSL)系统在国内机场的应用前景[J]. 民航管理, 2020(4): 59-62.
Liu Xuejian, Xie Zengwu. Analysis on the application prospect of runway status light (RWSL) system in domestic airports [J]. Civil Aviation Management, 2020(4): 59-62. (in Chinese)
- [85] 刘卫东, 李拓, 董亮, 等. 跑道状态灯系统评估方法[C]//2021年IEEE第三届科学技术创新国际学术交流会议论文集. 北京: 电子工业出版社, 2021: 445-449.
Liu Weidong, Li Tuo, Dong Liang, et al. Evaluation method of runway status light system [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Academic Conference on Scientific and Technological Innovation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021: 445-449. (in Chinese)

(编辑: 马文静)