

安全管理体系 (SMS) 在机场鸟击防灾与治理中的应用技术研究

孙可¹ 王翀¹ 施泽荣²

1. 首都机场集团有限公司北京大兴国际机场 北京 100000

2. 中国民用机场协会 北京 100000

摘要: 随着航空运输量的快速增长, 鸟击风险已成为威胁飞行安全的关键问题。北京大兴国际机场作为全球首个通过湿地认证的超大型枢纽, 其生态敏感区与高密度航空运行的矛盾尤为突出, 亟需探索兼顾生态保护与航空安全的综合治理方案。本研究以大兴机场为研究对象, 综合运用数学模型与实证分析, 研究基于大兴机场周边生态环境特征与运行数据, 提出以下创新方法: (1) 融合失效模式与影响分析 (FMEA) 和贝叶斯网络 (BN), 量化鸟击风险等级并解析因果关系; (2) 构建随机森林 (RF) 与长短期记忆网络 (LSTM) 双模型预测框架, 实现鸟击风险的动态预警; (3) 设计资源分配博弈模型, 优化驱鸟设备部署与生态干预策略的协同效益。研究数据涵盖大兴机场 2019-2023 年雷达监测、无人机巡检及生态环境数据库, 覆盖 12 类特征参数与 210 种鸟类活动记录。主要研究发现: (1) LSTM 模型在时序预测中表现最优, 准确率高达 92.3%, 较传统逻辑回归提升 20.8%; (2) 生态协同设计显著降低鸟击率, 实施后机场周边湿地覆盖率提升 50%, 鸟击事件发生率下降 78%; (3) 动态管控机制有效缓解矛盾, 当单日鸟类观测超 5000 只时, 航班限频措施使高风险时段事故率降低 65%。

关键词: 鸟击风险管理; 生态协同设计; LSTM 预测模型; 动态管控机制; 北京大兴国际机场

引言

国际航空运输协会 (IATA) 统计数据显示, 全球每年约 1.2 万起航空器鸟击事件, 导致超过 4 亿美元的直接经济损失 (IATA, 2022)。典型案例包括: 2009 年美国哈德逊河奇迹, 全美航空 A320 飞机因鸟击迫降纽约哈德逊河, 机上 155 人全部幸存; 2021 年新加坡樟宜机场, 一架波音 787 客机在起飞时遭遇鸟群撞击, 导致引擎受损。中国民航局数据显示, 2022 年中国民航共报告 127 起鸟击事件, 其中 43% 发生于跑道区域 (CAAC, 2023), 表明跑到及起降阶段是鸟击高风险环节。随着中国航空运输量的快速增长, 鸟击风险防控已成为保障飞行安全的关键课题。

北京大兴国际机场的鸟击风险管理挑战: 地处京津冀生态廊道交汇处, 周边湿地、农田密集, 鸟类种类达 200 余种; 2025 年旅客吞吐量目标为 8000 万人次, 日均起降航班 1600 架次, 安全管理复杂度高。

大兴机场周边生态环境特征: 大兴机场位于京津冀生态廊道交汇处, 周边 50km² 范围内包含永定河湿地公园、长子营湿地等 12 处自然生态区域, 植被覆盖情况如表 1 所示。

表 1 植被覆盖情况

生态区域	植被覆盖率	主要植物类型
永定河湿地	65%	芦苇、香蒲、菖蒲
机场隔离带	30%	低矮草本、灌木丛

鸟类栖息现状: 2023 年监测记录 210 种鸟类, 其中包括国家二级保护动物如白琵鹭、斑头雁; 繁殖期 (4-7 月), 鸟类聚集于湿地核心区, 日均活动量超 3000 只; 迁徙期 (9-11 月), 途经东亚-澳大利西亚迁飞通道的候鸟数量激增, 高峰期单日观测 5000 只以上。

生态保护与航空安全的矛盾: 典型案例包括, 2022 年春季, 大量红嘴鸥迁徙至机场西侧草地觅食, 导致连续 3 起轻微鸟击事件, 鸟击风险管理挑战在于如何在“生态红线保护”与“航空安全保障”之间实现平衡。

技术驱动的现代管理趋势: 多源数据融合, 雷达、无人机、气象数据的实时协同分析; AI 预测模型, 基于 LSTM、随机森林的鸟击风险动态预测; 生态协同设计, 通过人工湿地、植被管理等手段减少鸟类栖息吸引力。

研究意义: 理论层面, 探索 SMS 框架与鸟类危险源管

理的深度融合机制；实践层面，为高密度航空运输枢纽（如大兴机场）提供全周期、多维度的鸟击防控解决方案。

1. 文献综述

美国联邦航空管理局（FAA）提出基于 Wildlife Hazard Management Manual 的三级防控体系（识别、缓解、应急）。欧洲机场集团（ACI）推广“主动防护+生态补偿”模式（如巴黎戴高乐机场的鸟类迁徙路径干预）。张伟等（2022）利用随机森林模型构建机场鸟击风险预测系统，准确率达85%。李强等（2021）提出基于元胞自动机（CA）的鸟类扩散模拟方法。现有研究多聚焦单一技术（如雷达监测），缺乏 SMS 框架下的系统性集成；生态协同设计未形成标准化实施流程。

2. 数学模型分析方法

2.1 风险评估模型

失效模式与影响分析（FMEA），风险优先系数（RPN）如式（1）所示：

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

其中，

S: 严重度（1-10分，表示后果严重程度）

O: 发生频度（1-10分，表示风险事件发生概率）

D: 可检测度（1-10分，表示风险被发现的难易度）

若某驱鸟设备故障的 S=9、O=8、D=2，则 RPN=144，需优先改进。

2.2 贝叶斯网络（BN）因果推理

贝叶斯网络算法结构为：

```
graph LR
  A[暴雨] --> B[鸟类聚集]
  B --> C[鸟击概率]
  C --> D[启动一级应急预案]
  C --> E[维持常规监测]
```

概率计算如公式（2）所示：

$$p(c = \text{高} | A) = P(B|A) \times p(c = \text{高} | B) \quad (2)$$

其中，

$P(B|A) = 0.4$ （暴雨时鸟类集群概率提升40%）

$p(c = \text{高} | B) = 0.7$ （鸟类聚集时鸟击概率高达70%）

2.3 预测模型

随机森林（RF）风险预测算法步骤为：输入特征：鸟类种类、栖息地密度、跑道使用频率等；生成多个决策树，通过投票机制输出风险等级。特征重要性分析可用数学表达式（3）所示：

$$f(x) = \text{argC} \in \{1, 2, \dots, K\} \sum_{t=1}^T \mathbb{I}(y_{t=C}) \cdot \prod_{i=1}^n \mathbb{I}(x_i) \quad (3)$$

其中， $U_{t,c}$ 表示第 t 棵决策树中类别 C 的第 i 个分割阈值

长短期记忆网络（LSTM）模型算法结构为：

```
# LSTM 模型定义 (Keras 框架)
model = Sequential([
    LSTM(50, activation='relu', input_shape=(timesteps, n_features)),
    Dense(1)
])
model.compile(optimizer='adam', loss='mse')
```

时序预测公式如式（4）所示：

$$y_t = f(y_{t-1}, x_t) \quad (4)$$

其中， y_t 为时刻 t 的鸟击风险， x_t 为输入特征（如气象数据）。

2.4 优化模型

资源分配博弈模型目标函数如式（5）所示：

$$\min \sum_{i=1}^n (C_i x_i + E_i y_i) \quad (5)$$

其中，

C_i : 工程控制成本

E_i : 技术措施效益（风险降低量）

约束条件如式（6）所示：

$$\sum x_i + \sum y_i \leq B, \quad PRPN_{final} \leq RPN_{阈值} \quad (6)$$

使用 CPLEX 软件实现混合整数规划（MIP）作为求解工具。

2.5 模型验证与对比

表 2 模型验证数据对比

数据集	训练集	测试集	特征数
BDXA 雷达数据	80%	20%	12
全国机场数据	70%	30%	15

2.6 模型验证结果对比

表 3 模型验证结果对比

模型类型	准确率	F1-score	训练时间
LSTM	92.3	0.89	12h
随机森林	88.7%	0.85	3h
逻辑回归	76.5%	0.72	0.5h

2.7 案例应用

大兴机场鸟类扩散模拟，元胞自动机（CA）模型的网络规格如式（7）所示：

$$\text{扩散概率} = k \times e^{-d/\lambda} \quad (7)$$

其中，

- d: 到跑道的欧氏距离
- k: 扩散常数 (k=0.5)
- λ : 环境助力系数 (=100m)

3. 北京大兴国际机场实践分析

3.1 系统架构设计

物联感知层如表 4 所示,

表 4 物联感知层数据

设备类型	技术参数	功能描述
S 波段场面监视雷达	波长 10cm, 扫描频率 1Hz	高精度目标捕获 (分辨率)
多旋翼无人机	搭载 FLIR 热成像, 飞行高度 10m	夜间低空植被区巡检

智能决策平台核心功能模块算法为:

```
# 基于 LSTM 的风险预测模型
def predict_risk(X_train, y_train):
    model = Sequential([
        LSTM(50, activation='relu', input_shape=(timesteps, features)),
        Dense(1)
    ])
    model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')
    return model.fit(X_train, y_train, epochs=50, batch_size=32)
```

3.2 生态环境数据库建设

表 5 生态环境数据汇总

数据类型	监测参数	更新频率	数据来源
植被覆盖	NDVI 指数、植被高度	每月	卫星遥感
鸟类活动	种类、数量、分别热点	实时	雷达、无人机监测
水体质量	pH 值、溶解值、浊度	每季度	环境监测站

3.3 生态敏感区管控策略

表 6 生态敏感区数据汇总

区域	管控级别	允许活动
核心保护区	一级	禁止任何人类活动
缓冲区	二级	限制驱鸟剂使用
外围区	三级	允许科研监测

3.4 动态调整机制

鸟类活动强度: 当单日观测鸟类数量超过 5000 只时,

触发 三级响应 (限制航班起降频次); 植被生长周期: 根据植物生长高度动态调整割草频率 (夏季每月 1 次, 冬季每季度 1 次)。

3.5 生态效益与安全效益对比

表 7 生态效益与安全效益对比

指标	实施前	实施后	改进率
湿地覆盖率	8%	12%	+50%
鸟类撞击率	3.2 次 / 万架次	0.7 次 / 万架次	-78%
生态投诉事件	15 起 / 年	3 起 / 年	-80%

4. 结论与展望

主要结论: SMS 框架为鸟击防治提供了系统化方法论支撑; 多源数据融合与 AI 技术显著提升风险预测精度; 生态协同设计可实现安全与环境效益的双重目标。

生态协同管理启示: 科学规划是前提, 通过生态敏感区划分与动态管控, 实现“生态红线”与“安全红线”的协同; 技术赋能是关键, 利用卫星遥感、物联网等技术实现生态数据的实时监测与预警; 多方合作是保障: 需政府、机场运营方、环保机构建立 长效协调机制。

参考文献:

[1] ICAO. (2018). Global Aviation Safety Plan. Doc 9859.
 [2] FAA. (2020). Wildlife Hazard Management Manual. AC 150/5210-20.
 [3] 北京市生态环境局. (2023). 京津冀地区生物多样性保护行动计划.

作者简介: 孙可 (1994—), 男, 汉族, 河北省衡水市, 大学本科, 中级工程师, 隶属于首都机场集团有限公司北京大兴国际机场。

王翀 (1986—), 男, 汉族, 湖北省十堰市, 大学本科, 中级工程师, 隶属于首都机场集团有限公司北京大兴国际机场。

施泽荣 (1955—) 男, 汉族, 江苏省东台市, 鸟防组副组长, 职责教授, 隶属于中国民用机场协会。