

## 航空快件分类分级安检风险评估研究

赵振武, 李艳娇

(中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

**摘要:** 为应对不断增加的航空快件安检需求, 保证航空快件运输时效, 实现航空快件高效安检、安全运输, 在传统安检模式的基础上, 首先, 本文提出全货机航空快件分类分级安检模式, 从威胁性、脆弱性、后果严重性3方面对安检系统进行风险评估; 其次, 本文主要结合搜索-决策模型及安检员工作表现模型对脆弱性指标漏检率进行定量计算, 威胁性及后果严重性指标数据来源于事故数据统计规律。风险评估结果表明: 全货机航空快件分类分级安检系统风险值比传统快件安检系统降低了29.77%, 且在判图时间区间内, 增加安检员决策时间对系统漏检率和误检率影响较小, 这可为全货机实施分类分级安检策略提供理论指导。

**关键词:** 航空快件; 分类分级; 安检系统; 风险评估

中图分类号: V353; X949

文献标志码: A

文章编号: 1674-5590(2025)05-0044-07

### Research on risk assessment of classification and grading security inspection for aviation express

ZHAO Zhenwu, LI Yanjiao

(College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To cope with the increasing demand for security inspection for aviation express, ensure the timeliness of aviation express transportation, and achieve efficient security inspection and safe transportation of aviation express, on the basis of the traditional security inspection mode, a classification and grading security inspection mode for all cargo aircraft aviation express is firstly proposed in this paper, and the risk assessment of the security inspection system is conducted from three aspects, including threat, vulnerability, and consequence severity. Secondly, this paper mainly combines the search-decision model and the work performance model of security inspector to quantitatively calculate the vulnerability indicator missing rate, and the data of threat and consequence severity indicators are derived from the statistical laws of accident data. The risk assessment results indicate that the risk value of the classification and grading security inspection system for full cargo aircraft aviation express is reduced by 29.77% compared to the traditional express security inspection systems, and increasing the time for security inspectors to judge images within the time interval has little impact on the system's missed detection rate and false detection rate. This can provide theoretical guidance for implementing classification and grading security inspection strategies for full cargo aircraft.

**Key words:** aviation express; classification and grading; security inspection system; risk assessment

随着电子商务迅速发展, 快递业务量逐渐提升, 航空运输因其高效性在快件运输中发挥重要作用。由于全货机具有载货量大、中转效率高、安全裕度大等特点, 中国航空快件运载方式已逐渐倾向于使用全货机运输<sup>[1]</sup>。以顺丰为例, 2022年其航空快件总货运量为195万吨, 快件发运量持续增长, 其中全货机发运量占51.28%, 客机腹舱发运量占48.72%<sup>[2]</sup>。与此同时, 航空

快递收件品类逐渐复杂化、多样化, 航空快件运输造成的航空安保违规事件持续增多。为满足未来航空快件运输需求, 航空快递企业亟须保障全货机运输的安全性及效率, 以提升其核心竞争力。因此, 本文从安检环节入手, 提出全货机航空快件分类分级安检模式并进行风险评估, 对于发展全货机航空快件运输业务、保障全货机运输的安全性及效率具有重要意义。

在航空货邮安检系统风险评估方面,文献[3]通过分析欧洲航空货运安全监管政策,发现其已逐渐转向基于风险的安全检查流程。文献[4]对中小机场基于风险的货物安检策略进行定量评估,认为其能提升安全性但需合理部署。美国联邦运输安全管理局考虑全货机货运行业基于货物风险与数据的安检方案<sup>[5]</sup>。文献[6]指出中国邮政快递与安检部门在货邮安检上矛盾突出,提升处理效率是航空货运发展的关键。综上所述,基于风险的安检模式是航空货邮安检未来发展方向。在安检系统性能研究方面,文献[7]在托运行李安检系统的设计中考虑了安检设备阈值和安检员的可靠性,通过整数规划模型确定安检组合与阈值。文献[8]使用搜索-决策模型及排队论对航空货物分类分级安检系统安全性进行定量分析。在安检系统性能研究中,国内外学者均关注安检员人为因素,但更侧重于安检员的搜索时间而忽略了决策时间和安检员工作质量的影响。

目前,国内针对航空快递的相关研究主要集中在航空快递企业运营和航空快递路线优化问题,航空快件安检的相关研究较少<sup>[9-10]</sup>。为满足未来航空快件安检需求,本文根据航空快递企业特点及目前航空快件安检模式,提出航空快件分类分级安检模式。由于安检员是安检系统中的主要影响因素,本文在分析安检系统性能时增加了安检员决策时间影响,综合考虑安检员工作表现及安检员与设备之间的关联性。首先,根据航空快件分类以及风险特性,将全货机运输的航空快件划分为低、中、高 3 个风险等级,采取严格程度由低到高的安检标准;其次,从威胁性、脆弱性、后果严重性 3 个角度对航空快件分类分级安检系统进行风险评估。

### 1 航空快件分类

本文将快递企业中运输的信件、包裹、印刷品等统称为航空快件。航空快件的尺寸一般要求为单件计费,重量不超过 50 kg,任何一边的尺寸不超过 150 cm,长、宽、高合计不超过 300 cm<sup>[11]</sup>。目前,国内外并未形成统一的快件分类体系。国际上,世界海关组织制定了《商品名称及编码协调制度》,把国际贸易商品划分为 22 大类<sup>[12]</sup>。美国交通运输统计局根据货物运输统计需求将航空货物划分为 41 类。中国内地全货机安检差异化项目将货物分为 32 类。在国内外货物分类分级基础上,本文根据快件内件的自然属性、理化性质、危险性将其分为 25 类。综合航空快件分类情况以及国内实施全货机安检差异化项目的货物分级,考虑

快件风险性、X 光机辨识度及可能含有隐含危险品等因素,将快件风险等级划分为低、中、高 3 个风险等级,如表 1 所示。

表 1 航空快件风险等级划分表

Tab.1 Classification of risk levels for aviation express

低风险快件	中风险快件	高风险快件
1.纺织品类	1.光学、医疗仪器; 钟表;乐器类	1.含粉末、液体、颗粒、膏状类货物
2.塑料制品类;橡胶制品类	2.不含锂电池电子产品类	2.机械设备类
3.纸质品类	3.酒及酒精制品	3.含锂电池电子产品类
4.工艺品类	4.医药品类	4.危险品类
5.革、毛皮制品类	5.生物制品类	5.特殊货物类
6.贵重物品类	6.鲜活或冷冻水产品、肉类	6.杂项类
7.动植物油、脂、蜡;精制食用油脂类	—	—
8.食品类	—	—
9.活体动物类	—	—
10.植物和植物产品	—	—
11.烟草及其制品类	—	—
12.化学工业及其相关工业的产品(不含危险品)	—	—
13.鞋帽伞等;羽毛制品;人造花;发制品等	—	—

## 2 航空快件分级安检模式

### 2.1 航空快件安检现状

目前航空快件安检分为 2 个阶段。首先,快件由分拣系统运送至 X 光机,安检员对生成图像进行人工判图,对携带违禁品或与实际申报品名不符的快件做出报警决策,即需要开包检查,未报警快件则通过安检;其次,开包检查员对报警快件进行开包检查,存在违禁品则做出报警决策,即退运或移交公安机关,未报警快件则通过安检,安检系统流程如图 1 所示。

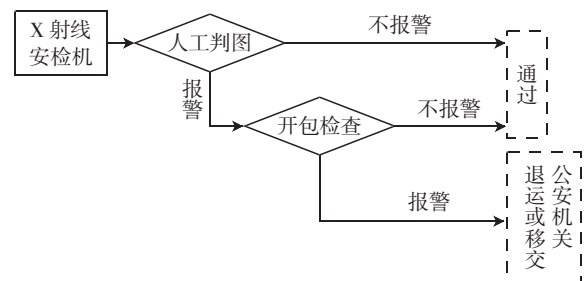


图 1 航空快件安检系统流程图

Fig.1 Flow chart of security inspection system for aviation express

### 2.2 航空快件分级安检标准

本文根据全货机运输特点及航空快件分类情况,提出航空快件分级安检模式。全货机运输针对不同风

险等级的快件采取了不同安检标准。安检标准的不同体现在快件码放间距、安检员判图时间、安检员技能水平 3 方面。其中安检判图员证书等级均在中级及以上,安检员技能水平根据安检员证书等级、安检培训时长、安检员工作经验由低到高划分为 A、B、C 3 个等级。传统航空快件安检模式不区分快件风险等级,快件码放间距为 20 cm,决策时间为 4 s,安检员技能等级为 B 级。全货机航空快件的分类分级安检标准如表 2 所示。

表 2 航空快件分级安检标准

Tab.2 Grading security inspection standards for aviation express

运载方式	快件风险等级	码放距离/cm	决策时间/s	安检员技能
全货机	低风险	5	1.5	A
	中风险	10	2.5	B
	高风险	15	6.0	C

### 3 航空快件分类分级安检系统风险分析

美国国土安全部已建立了风险分析概念框架,将风险定义为威胁性(T,threat)、脆弱性(V,vulnerability)和后果严重性(C,consequence severity)的组合,即风险值  $R = f(T, V, C)$  函数<sup>[13]</sup>,在此基础上可以对全货机航空快件分类分级安检系统进行风险分析。其计算公式为

$$R = P_T \times P_V \times C \quad (1)$$

式中: $P_T$  为威胁性的概率表征值; $P_V$  为脆弱性的概率表征值; $C$  为后果严重性表征值,即经济损失。

#### 3.1 威胁性分析

近年来,快递企业夹带、匿报、谎报危险品等违规事件频发,严重威胁航空运输安全。违禁品包括航空运输违禁品以及未申报的危险品,安检等级  $i = L、M、H、TR$ ,其中:L 代表低风险航空快件安检等级、M 代表中风险航空快件安检等级、H 代表高风险航空快件安检等级、TR 代表传统安检策略的风险等级。本文选取航空快件夹带违禁品的可能性  $P_i$  作为系统中的威胁性指标,根据航空快件开包记录统计结果及快件安检量,对航空快件携带违禁品的概率进行定量估算。

#### 3.2 脆弱性分析

脆弱性被定义为安检系统识别违禁品失败,导致违禁品攻击系统成功的可能性。在航空快件安检系统中,快件分为携带违禁品和未携带违禁品 2 种状态,安检系统决策分为报警和不报警。邮件快件相关标准中明确安检系统错误决策包括以下 2 种<sup>[14]</sup>。

(1) 误检——错误报警(FA, fault alarm): 航空快件

不含有违禁品时,安检系统发出报警。

(2) 漏检——错误放行(FC, fault clear): 航空快件含有违禁品时,安检系统允许通过。

安检系统误检将增加开包员工作量,降低安检环节效率,漏检将造成违禁品进入航空运输系统,威胁全货机运输安全。因此,使用漏检率  $P_{FC}$  衡量安检系统的脆弱性,即  $P_V = P_{FC}$ 。漏检率是系统性指标,安检系统为人机协作系统,涉及人员因素及设备因素。在设备方面需考虑安检设备性能、快件扫描时间等影响。在人员方面需考虑安检员搜索决策准确性、工作表现、决策之间的依赖性等影响。

#### 3.3 后果严重性分析

安检系统漏检后,携带违禁品快件造成民用航空地面事故或航空器飞行事故后果的严重程度即为后果严重性,本文使用经济损失值量化后果严重性。对于航空快递企业,由安检系统漏检造成的后果严重性包含直接经济损失和间接经济损失。使用标准的程序管理估计技术计算经济损失的公式为

$$C = \frac{(C_H + C_L + 4 \cdot C_E)}{6} + C_i \quad (2)$$

式中: $C_H$  为较高估计的成本损失值; $C_L$  为较低估计的成本损失值; $C_E$  为结合以往事故得到的期望成本损失,可以根据对以往事故数据的统计对其进行估算; $C_i$  为间接经济损失值,以企业 2 年内快件运输业务营业额的 5% 进行估算<sup>[15]</sup>。

### 4 航空快件分类分级安检系统脆弱性计算

航空快件分类分级系统中的主要设备为 X 光机, X 光机性能会影响安检员判图时间,从而影响安检员目视搜索及决策准确性。首先,在搜索决策模型基础上对安检员判图时间及准确性进行分析;其次,结合安检员工作表现及安检 2 阶段的依赖性对漏检率进行定量计算。

#### 4.1 搜索决策模型

安检员对 X 光机扫描生成的快件图像进行人工判图,该过程包含安检员目视搜索及决策 2 部分。安检员判图符合文献[16]提出的搜索决策模型,其中安检员判图时的目视搜索与做出决策被认为是 2 个独立的部分。

##### 4.1.1 搜索决策时间

常见的快件安检设备出图方式为“卷轴式”,快件扫描成像后图像在屏幕移动,同时安检员进行人工判

图。此过程包含安检员目视搜索时间  $t_1$  以及决策时间  $t_2$ 。航空快件扫描时间由快件平均长度  $l$ 、快件码放间隔  $l_g$ 、传送带速度  $V$  等因素决定,快件全部进入安检设备后平均 0.3 s 即可成像。 $t_1$  由快件长度间隔距离和传送带速度决定。快件图像在屏幕移动时间上限为  $t_2$ ,考虑工作效率及安检现场实际情况, $t_2 \leq 10$  s。X 光机扫描快件的形式如图 2 所示。

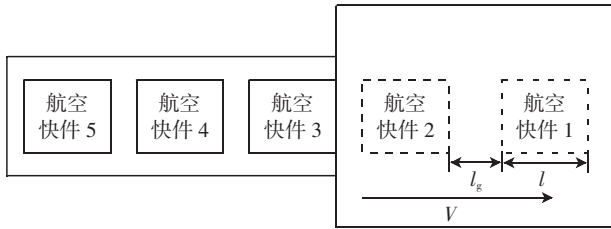


图 2 航空快件扫描流程图

Fig.2 Flow chart of scanning aviation express

安检员目视搜索时间计算公式为

$$t_1 = \frac{l + l_g}{V} + t_c \quad (3)$$

式中, $t_c$  为快件成像时间。

#### 4.1.2 搜索决策时间与准确性关系

目视搜索是在一定区域内移动视觉,由一系列的注视组成。安检员目视搜索图像中是否含有违禁品,依据目视搜索结果及工作技能做出报警或放行的决策。因此,检测到目标的概率会随着对区域内注视的增加而增加。但目视搜索过程中可供完成任务的资源有限,随着搜索时间增加,目视搜索违禁品的概率将趋近临界值,这一随机过程符合文献[17]提出的负指数形式。本文模型假设不同安检等级下安检员发现违禁品的概率  $P_C^i$  与目视搜索时间成指数关系,计算公式可表示为

$$P_C^i = 1 - \exp\left(-\frac{t_1^i}{\bar{t}_1}\right) \quad (4)$$

式中: $t_1^i$  为不同安检等级下安检员目视搜索时间; $\bar{t}_1$  为安检员平均目视搜索时间。根据航空快递企业目前使用的 X 光机性能参数,快件扫描时间通常在 2~6 s,因此取  $\bar{t}_1 = 3$  s,在一般判图时间 0~15 s 内,可得到目视搜索违禁品的概率变化如图 3 所示。

根据逻辑回归模型<sup>[18]</sup>,决策时间与正确决策准确率的关系可表示为

$$P_D^i = \frac{\exp(a)}{\exp(a) + \exp\left[b \cdot (t_2^i - d) + \left(\frac{c}{t_2^i - d}\right)\right]} \quad (5)$$

式中: $P_D^i$  为不同安检等级下安检员决策准确率; $t_2^i$  为不同安检等级下安检员决策时间; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为方程参

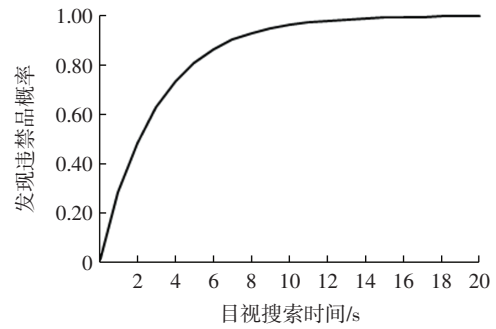


图 3 目视搜索发现违禁品概率随搜索时间变化图

Fig.3 Diagram of the change of probability of detecting contraband through visual search with the search time

数, $a$  决定函数边界的上界, $b$  决定函数边界的斜率, $c$  决定函数初始阶段斜率, $d$  决定函数初始点位置。

根据对安检员决策时间及准确性的相关研究,决策时间越长决策准确率越高<sup>[19]</sup>。结合当前航空快递企业安检实际情况,当  $t_2 = 0$  s 时,未产生决策行为,准确率为 0;当  $t_2 = 10$  s 时,决策准确率为 0.99,被认为是具有高准确率。考虑到决策准确率区间应为[0, 1],将相关参数代入公式(5)后可求解得到  $a = 2$ , $b = 0.05$ , $c = 4.5$ , $d = 4$ ,决策时间与决策准确性的关系如图 4 所示。

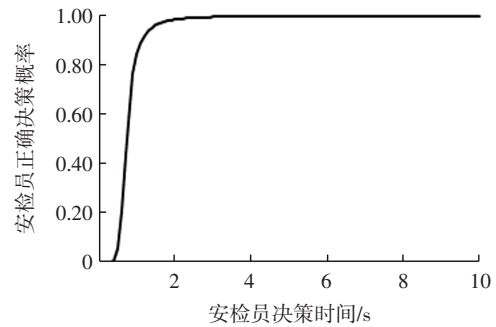


图 4 决策准确性随决策时间变化图

Fig.4 Diagram of decision accuracy varying with decision time

在目视搜索过程中,安检员主观搜索到或未搜索到违禁品时将做出报警或不报警 2 种决策,但按照客观情况分为含违禁品和不含违禁品。由此建立 X 光机安检员搜索决策流程如图 5 所示,其中  $P_{TC}$  为目视搜索过程中发现违禁品且快件携带违禁品的概率; $P_{TNC}$  为目视搜索过程中未发现违禁品但快件携带违禁品的概率。

依据搜索决策流程,安检系统中安检员误检和漏检的概率计算公式可表示为

$$P_{FA}^i = P_{AINT}^i = \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1^i}{\bar{t}_1}\right)\right] \cdot (1 - P_{TC}) \cdot P_D^i + \exp\left(-\frac{t_1^i}{\bar{t}_1}\right) \cdot (1 - P_{TNC}) \cdot (1 - P_D^i) \quad (6)$$

$$P_{FC}^i = P_{NAIT}^i = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_1^i}{t_1}\right) \right] \cdot P_{TIC} \cdot (1 - P_D^i) + \exp\left(-\frac{t_1^i}{t_1}\right) \cdot P_{TINC} \cdot P_D^i \quad (7)$$

式中:  $P_{FA}^i$ 、 $P_{FC}^i$  分别为不同安检等级下的误检率和漏检率;  $P_{NAIT}^i$  为不同安检等级下判图过程中快件未携带违禁品但判图报警的概率;  $P_{NAIT}^i$  不同安检等级下为判图过程中快件携带违禁品但判图未报警的概率。

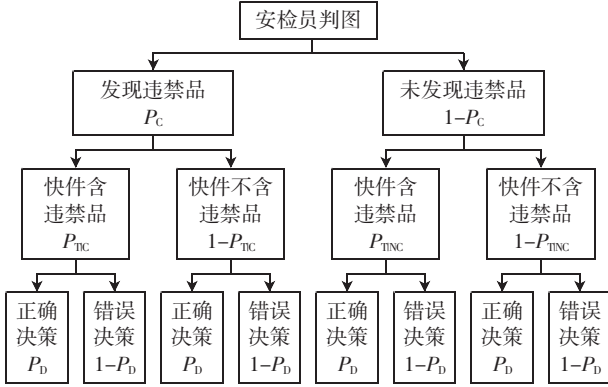


图5 X光机安检员搜索决策流程图

Fig.5 Search-decision flowchart of security inspector for X-ray machine

## 4.2 安检员工作表现模型

安检员是安检系统中的重要影响因素,其在安检判图时的工作表现直接影响安检系统决策的准确性。本文为适应安检员的工作情景,选择安检任务级别、安检员技能级别及安检员对当前工作付出的努力程度等为影响安检员工作质量的因素<sup>[20]</sup>,使用功能状态模型针对安检员的工作表现进行建模。安检任务级别  $T_i^L$  由任务复杂程度以及安检操作技能决定,可表示为

$$T_i^L = \frac{T_i^C}{S_i^L} \quad (8)$$

式中:  $T_i^C$  为不同安检等级任务的复杂程度;  $S_i^L$  为不同安检等级下安检员操作技能。

安检员工作质量可表示为

$$P_i^Q = \frac{P_i^E}{T_i^L} \quad (9)$$

式中:  $P_i^Q$  为不同安检等级下安检员工作质量;  $P_i^E$  为不同安检等级下安检员提供的努力,由初始努力  $G_i^E$  (安检员工作时想要贡献的努力值) 以及克服环境(噪音、温度等)影响的努力  $N^E$  共同决定,计算公式可表示为

$$P_i^E = G_i^E - N^E \quad (10)$$

模型基于安检员开始工作的时间节点进行计算,不考虑时间累积的工作消耗。初始努力  $G_i^E$  计算公式为

$$G_i^E = L^{CP} + (1 - E_i) \times (B^{CA} - L^{CP}) \quad (11)$$

式中:  $L^{CP}$  为最低临界点;  $E_i$  为不同安检等级下安检员完成任务时消耗的努力值;  $B^{CA}$  为不同技能级别安检员的基础认知能力。

综合考虑安检员工作的影响因素后,安检员使用 X 光机人工判图时误检率  $P_{FA}^i$  和漏检率  $P_{FC}^i$  计算公式可表示为

$$P_{FA}^i = 1 - \frac{1 - P_{FA}^i}{P_i^Q} \quad (12)$$

$$P_{FC}^i = 1 - \frac{1 - P_{FC}^i}{P_i^Q} \quad (13)$$

## 4.3 系统误检率与漏检率

综合航空快件分类分级安检系统流程,系统的误检率及漏检率计算公式可表示为

$$P_{FA}^S = P_{NAIT}^S = \sum_{i=L,M,H} [P_{FA}^i - P_{KIAx} \cdot P_{FA}^i \cdot (1 - P(A_K|A_X \cap NT))] \times \frac{N_i}{N_S} \quad (14)$$

$$P_{FC}^S = P_{NAIT}^S = \sum_{i=L,M,H} [P_{FC}^i + P_{KIAx} \cdot (1 - P_{FC}^i) \cdot P(NA_K|A_X \cap T)] \times \frac{N_i}{N_S} \quad (15)$$

式中:  $P_{FA}^S$ 、 $P_{FC}^S$  分别为安检系统误检率和漏检率;  $P_{NAIT}^S$  为安检系统中快件未携带违禁品但判图报警的概率;  $P_{NAIT}^S$  为安检系统中快件携带违禁品但判图未报警的概率;  $P_{KIAx}$  为 X 光机安检员报警后快件被传送到开包检查处且实施开包检查的概率;  $P(A_K|A_X \cap NT)$  为未携带违禁品快件但在安检员报警条件下开包检查也报警的概率; 同理,  $P(NA_K|A_X \cap T)$  为携带违禁品快件但在安检员报警条件下开包检查不报警的概率;  $N_S$  为一段时间内航空快件运输总量;  $N_i$  为一段时间内不同安检等级下航空快件运输量。

航空快件安检系统为两阶段安检模式,开包检查员决策会参考 X 光机安检员判图的决策,因此两阶段安检并非完全独立,具有一定决策依赖性<sup>[21]</sup>。两阶段决策间的依赖关系可表示为

$$\varepsilon_{FIE}^W = P(FID \cap W) - P(FIW) \quad (16)$$

式中:  $D$  为安检系统 X 光机判图时的决策,包含报警  $A$  和放行  $NA$ ;  $F$  为安检系统开包检查时的决策,包含报警  $A$  和放行  $NA$ ;  $W$  为威胁事件,包含携带违禁品  $T$  和未携带违禁品  $NT$ 。结合安检两阶段依赖性关系,将公式(16)代入到公式(14)和(15)后,系统误检率和漏检率可表示为

$$P_{FA}^S = \sum_{i=L,M,H} [P_{FA}^i \cdot P_T^i - (P_{KlAX} \cdot P_{FA}^i \cdot (1 - P_{FA}^K) + P_{KlAX} \cdot P_{FA}^i \cdot \varepsilon_{AKlAX}^T) \cdot P_T^i] \times \frac{N_i}{N_S} \quad (17)$$

$$P_{FC}^S = \sum_{i=L,M,H} [P_{FC}^i \cdot P_T^i - (P_{KlAX} \cdot (1 - P_{FC}^i) \cdot P_{FC}^K) - P_{KlAX} \cdot (1 - P_{FC}^i) \cdot \varepsilon_{AKlAX}^T) \cdot P_T^i] \times \frac{N_i}{N_S} \quad (18)$$

式中:  $\varepsilon_{AKlAX}^T$  为 X 光机报警后开包检查报警的概率;  $P_T^i$  为不同安检等级下威胁性的概率表征值。

### 5 数值分析

#### 5.1 目视搜索时间随码放距离的变化分析

本文模型中,航空快件码放间隔区间为 5~20 cm。根据快递企业快件收运标准及安检设备性能<sup>[22]</sup>,设定航空快件平均长度为 0.7 m,安检设备传送带速度为 0.2 m/s,可得到目视搜索时间随快件码放间距的变化规律如图 6 所示。

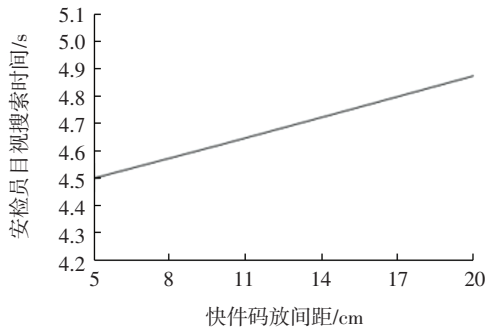


图 6 目视搜索时间随快件码放间距变化图

Fig.6 Diagram of the variation of visual search time with the distance between package stacking

#### 5.2 安检员工作表现分析

设定模型中快件图像的复杂程度分布在[0, 1]之间,随着难度逐渐增加,安检员判图时的消耗与安检任务的复杂程度相关。使用负指数函数表征消耗,即设不进行培训的安检员判图正确概率为 50%。考虑安检员在得到培训后基础认知能力会显著提升,综合安检员违禁品判图相关训练的成绩认知能力值取 0.85,环境影响努力值取 0.05<sup>[23]</sup>。根据安检员的工作经验、安检培训时间、安检考核成绩、专家意见等,将初级、中级、高级安检员的操作技能分别设为 0.6、0.8 和 0.9,得到安检员工作质量变化如图 7 所示。

#### 5.3 航空快件分类分级安检系统风险值计算

针对航空快件分类分级安检系统的参数变量,本文通过调研航空快递企业和运输量较大的机场货站,

并邀请民航安检工作人员及民航安检专家对相关概率进行评估,得到分类分级安检风险评估模型中的实际运行参数设置,相关数据如表 3 所示。

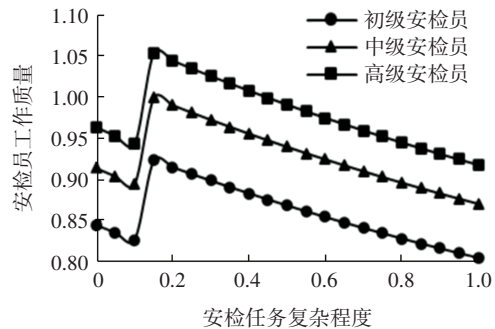


图 7 安检员工作质量随任务复杂程度变化图

Fig.7 Diagram of the variation of work quality of security inspector with task complexity

表 3 航空快件分类分级安检风险评估模型参数设置

Tab.3 Parameter settings of risk assessment model of classification and grading security inspection for aviation express

参数	数值	参数	数值
$P_T^L$	0.01	$N_L$ /万件	120
$P_T^M$	0.03	$N_M$ /万件	105
$P_T^H$	0.05	$N_H$ /万件	75
$P_T^{TR}$	0.035	$C$ /万元	150
$P_{TC}$	0.80	$T_L^C$	0.5
$P_{TNC}$	0.08	$T_M^C$	0.7
$\varepsilon_{AKlAX}^T$	0.98	$T_H^C$	0.9
$P_{KlAX}$	0.95	—	—

以某航空快递企业非高峰期月的快件运输量为基础,在表 3 基础上通过上述公式及航空快件分类分级安检模式的安检标准进行计算可得到安检员操作技能及工作表现相关数值,即为分类分级安检风险评估模型数值计算结果,数据如表 4 所示。

表 4 航空快件分类分级安检风险评估模型数值计算结果

Tab.4 Numerical calculation results of risk assessment model of classification and grading security inspection for aviation express

参数	数值/s	参数	数值(概率)	参数	数值(概率)
$t_1^L$	4.0	$P_C^L$	0.74	$P_{FA}^L$	0.15
$t_1^M$	4.3	$P_C^M$	0.76	$P_{FA}^M$	0.17
$t_1^H$	4.6	$P_C^H$	0.78	$P_{FA}^H$	0.19
$t_1^{TR}$	4.8	$P_C^{TR}$	0.80	$P_{FA}^{TR}$	0.18
$t_2^L$	1.5	$P_D^L$	0.95	$P_{FC}^L$	0.048
$t_2^M$	2.5	$P_D^M$	0.98	$P_{FC}^M$	0.030
$t_2^H$	6.0	$P_D^H$	0.99	$P_{FC}^H$	0.026
$t_2^{TR}$	4.0	$P_D^{TR}$	0.99	$P_{FC}^{TR}$	0.023
—	—	$P_L^Q$	0.99	$P_H^Q$	0.82
—	—	$P_M^Q$ </td <td>0.91</td> <td><math>P_{TR}^Q</math></td> <td>0.91</td>	0.91	$P_{TR}^Q$	0.91

将数据代入上述公式可得到低、中、高风险等级的漏检率分别为 0.009 4、0.028 0 和 0.047 0, 误检率分别为 0.15、0.16 和 0.18。结合非高峰月快件安检量, 得到全货机航空快件安检分类分级安检系统的误检率和漏检率分别为  $P_{FA}^S = 0.160$ 、 $P_{FC}^S = 0.023$ 。传统快件安检系统的漏检率和误检率分别为 0.033、0.170。根据快件运输量及上述公式计算可得到航空快件分类分级安检系统中全货机安检系统的风险值为 0.24, 传统安检系统的风险值为 0.34, 航空快件分类分级安检系统的风险值低于传统快件安检系统。

#### 5.4 系统误检率和漏检率随决策时间变化规律

由上述公式可知, 安检系统误检率和漏检率与安检员决策准确率相关, 其中安检员决策准确率与安检员决策时间相关。由于判图时间有上限, 在安检标准决策时间的基础上以 1 s 为单位逐渐递增至 5 s, 可得到系统误检率和漏检率随安检决策时间增加的变化如图 8 和图 9 所示。当安检决策时间增加到 5 s 后, 系统误检率将减少 1.00%、系统漏检率将减少 0.04%。

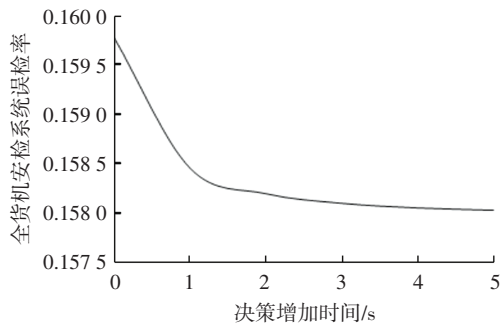


图 8 全货机安检系统误检率随决策时间增加变化图

Fig.8 Change diagram of false detection rate of full cargo aircraft security inspection system with increasing decision time

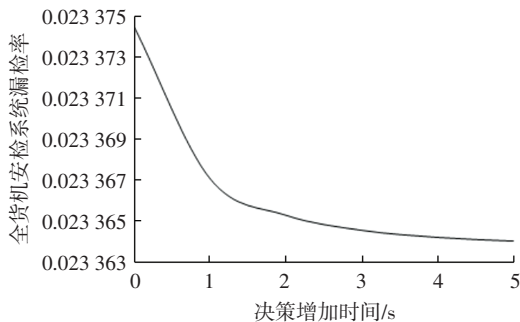


图 9 全货机安检系统漏检率随决策时间增加变化

Fig.9 Changes of missed detection rate of full cargo aircraft security inspection system with increasing decision time

## 6 结语

本文在航空快件分类的基础上, 结合航空快递企

业生产运行特点建立全货机分类分级安检模式, 根据安检员搜索决策模型、安检员工作表现模型对航空快件分类分级系统的漏检率、误检率进行计算和风险评估, 可得到以下结论。

(1)由风险评估计算结果可知, 全货机实施分类分级安检模式后, 其风险值比传统安检系统降低了 29.77%, 其中漏检率降低了 30.30%, 大大提高了安检系统的安全性, 误检率降低了 5.88%, 减少了错误开包率, 有效提升安检效率。

(2)由安检员的工作表现可知, 随着安检任务的复杂程度变化, 安检员的工作质量呈现先减小后增加再减小的趋势, 不同等级安检员工作质量整体持续下降的节点均出现在安检任务复杂程度为 0.15 时, 但下降程度有所区别。为保证航空快件分类分级安检策略中安检员的工作表现, 建议进一步优化安检员与判图任务的匹配度, 这是合理利用安检资源的重要手段之一。

(3)由数值分析的结果可知, 本模型在 15 s 判图时间限制内, 增加决策时间对安检系统误检率的影响较小, 对漏检率基本无影响。建议从加强安检员技能培训, 提升安检员工作质量; 强化快件收运检查规范, 降低航空快件携带违禁品的概率等环节入手, 以持续提升航空快件分类分级安检系统的安全性。

#### 参考文献:

- [1] 梁晓康. 航空货运与快递业的有效合作策略探究[J]. 现代商业, 2021, 14(6): 26-28.
- [2] 顺丰控股股份有限公司. 2022 年顺丰控股股份有限公司年度报告[R]. 深圳: 顺丰控股股份有限公司, 2022.
- [3] DOMINGUES S, MACÁRIO R, PAUWELS T, et al. An assessment of the regulation of air cargo security in Europe: a Belgian case study[J]. Journal of Air Transport Management, 2014, 34: 131-139.
- [4] AMORIM DA CUNHA D, MACÁRIO R, REIS V. Keeping cargo security costs down: a risk-based approach to air cargo airport security in small and medium airports[J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 61: 115-122.
- [5] TRANSPORTATION SECURITY ADMINISTRATION. Air cargo security roadmap[R]. US: Transportation Security Administration, 2021.
- [6] 郁志翔. 从最后一公里重新衡量航空物流企业改革方向[J]. 空运商务, 2020, 16(1): 18-21.
- [7] FENG Q M, SAHIN H, KAPUR K C. Designing airport checked-baggage-screening strategies considering system capability and reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 618-627.
- [8] 赵振武, 邢肖肖. 航空货物分类分级安检模式安全性分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3172-3179.

(下转第 72 页)