

中文引用格式:赵振武,潘益莹.考虑安全性和成本的机场安检通道设备配置[J].中国安全科学学报,2025,35(6):148-156.

英文引用格式:ZHAO Zhenwu, Pan Yiyang. Research on equipment configuration of airport security screening channel considering safety and cost[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 148-156.

考虑安全性和成本的机场安检通道设备配置*

赵振武 副教授, 潘益莹**

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0787

资助项目:交通运输部标准规范研究制(修)订经费项目(2023-01-001);民航安全能力建设项目(14002500000019J013)。

【摘要】 为优化机场安检通道,对比研究传统安检通道设备配置和新型安检通道设备配置,在同时满足节约安检资源和安全性的要求下,分析2类通道的成本;通过正态分布模拟安检设备响应值,以设备阈值来控制错误报警率和错误放行率,利用二叉决策树模型表征2类错误概率公式;针对2类通道设备配置,以2类错误的概率为约束条件,分别建立最小化安检成本的非线性规划模型,并利用蒙特卡罗模拟算法求解。结果表明:当新型通道不进行抽检时,使用新型通道的安检成本较传统而言可节省约24%;当新型通道以传统通道比例进行抽检时,使用新型通道安检成本较传统而言可节省约18%;当每日单通道旅客平均数量 $N_1 \in [1\ 000, 2\ 000]$,可将传统安检通道设备更换为新型安检通道设备,其人均安检成本比传统通道低;当 $N_1 \in [500, 1\ 000)$,考虑前期固定成本投入问题,可维持使用传统通道设备。

【关键词】 机场安检通道; 设备配置; 安全性; 成本模型; 设备阈值; 2类错误

Research on equipment configuration of airport security screening channel considering safety and cost

ZHAO Zhenwu, PAN Yiyang

(School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to optimize the airport security screening channel, the comparison of traditional security channel equipment configuration and new security channel equipment configuration, the cost of the two types of channels was analyzed under the requirements of saving security resources and security. The response value of security screening equipment was simulated by normal distribution, and the false alarm rate and false clear rate were controlled by equipment threshold. The binary decision tree model was used to characterize two types of error probability formulas. For the two types of channel equipment configuration, a nonlinear programming model was established to minimize the security screening cost with the probability of two types of errors as the constraint condition, and the Monte Carlo simulation algorithm was used to solve the problem. The results show that when the new channel is not sampled, the security screening cost of using the new channel can be saved by about 24% compared with the traditional method.

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0148-09; 收稿日期:2025-02-17; 修稿日期:2025-04-23

** 通信作者:潘益莹(1999—),女,重庆人,硕士研究生,研究方向为民航旅客安检、货运安保。E-mail: panny070308@163.com。

When the new channel is sampled at the traditional channel ratio, the cost of using the new channel security screening can be saved by about 18% compared with the traditional one. When the average number of daily single-channel passengers N_1 is between 1 000 and 2 000, the traditional security screening channel equipment can be replaced by a new type of security screening channel equipment, as the per capita security cost is lower than that of the traditional channel. when N_1 is between 500 and 1000, considering the previous fixed cost input problem, the use of traditional channel equipment can be maintained.

Keywords: airport security screening channel; equipment configuration; safety; cost model; equipment threshold; two types of error

0 引言

民航机场安检事关航空安全^[1],是空防安全的重要组成部分,亦是防止违禁品进入航空器的第一道防线。科技发展在推动人类社会进步的同时^[2],恐怖分子的技术也在不断更新,传统机场安检通道(简称安全通道)设备技术越来越不能满足当前的安检需求。国内许多机场开始革新新型安检通道设备,其可以弥补传统的不足和空白。新型安检通道设备检查准确性较高,但其成本昂贵。因此,对比分析传统安检通和新型安检通道设备配置的性能和成本差异,对未来民航安检技术发展创新具有重要意义。

现有研究主要集中在2方面,第一类是安检设备方面的研究,WELLS等^[3]通过介绍行李检查的X射线成像技术,并结合该技术在安检系统中面临的挑战,提出可使用更先进成像技术的设备,提高检查准确度。CORDOVA^[4]通过研究机场安检随身行李通道使用的新兴技术设备指出,当设备检测行李中携带违禁品时新兴技术设备可以发出自动报警,使用新兴技术设备可以提高安检的准确性。赵振武等^[5]提出将通过式金属门与毫米波人体成像技术双设备并联使用,得到当旅客携带违禁品时,将旅客分配至毫米波人体成像设备通道安检,可提高机场安检系统安全性。朱涛涛等^[6]以随身行李安检流程智能化为研究对象,提出使用新的计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)安检技术检查随身行李,结果表明:该模式在提升安检通道智能化水平的同时安全性亦得以保障。第二类是安检设备成本模型方面的研究。SAHIN等^[7]针对旅客和托运行李安检通道,以安检成本为约束条件,最小化错误放行率为目标构建模型,结果得到安检通道最佳的设备组合和阈值参数设定。NIE Xiaofeng^[8]提出一个双设备安检系统,以最小化期望安检成本为目标,通过

改变设备阈值使设备检查性能发生变化,结果表明设备检查性能变化同时期望成本亦发生变化。姚加林等^[9]建立最小化成本费用模型,通过设备运行情况与实时客流匹配约束通道的开放数量,求解得到不同客流下安检设备最优开放数量。陈晓红等^[10]对旅客安检的分类安检模式和传统安检模式进行对比研究,通过考虑安全水平和旅客等待时间的约束,以最小化安检成本为目标建立数学模型,研究表明旅客数量较多时,分类安检模式比传统安检模式成本更低。现有研究还存在以下不足:①单一化的研究人身检查设备或行李检查设备,未考虑其结合研究;②未考虑旅客进入人身检查通道和随身行李检查通道实际抽检率的影响;③目前的研究建模未同时考虑2类错误对于成本的影响。

基于此,文中针对传统和新型安检通道设备配置,以2类通道设备配置最小化安检成本为目标函数。在满足安全性和节约安检资源的条件下,对比2类通道不同设备配置的安检成本,并根据机场旅客吞吐量,分析其通道设备配置情况。

1 机场安检通道设备配置

1.1 传统安检通道设备配置

目前,国内大多数机场使用传统安检通道设备配置的旅客人身检查为通过式金属检测门。随身行李使用检查设备^[11]为单、双视角X光机。传统安检通道设备配置安检流程如图1所示。

1.2 新型安检通道设备配置

为实现民航安检提质增效的工作目标,国内各大机场开始在革新安检设备配置方面进行探索和尝试。结合上海虹桥机场、深圳宝安机场对新型安检通道的探究,提出新型安检通道设备配置,即旅客进入毫米波人体成像设备进行人身检查,旅客随身行李进入CT设备进行检查。新型安检通道设备配置

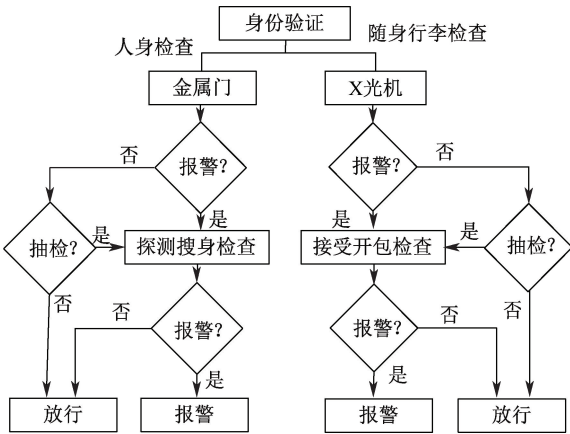


图1 传统安检通道设备配置安检流程

Fig. 1 Security screening flow of traditional security screening channel equipment configuration

安检流程如图2所示。

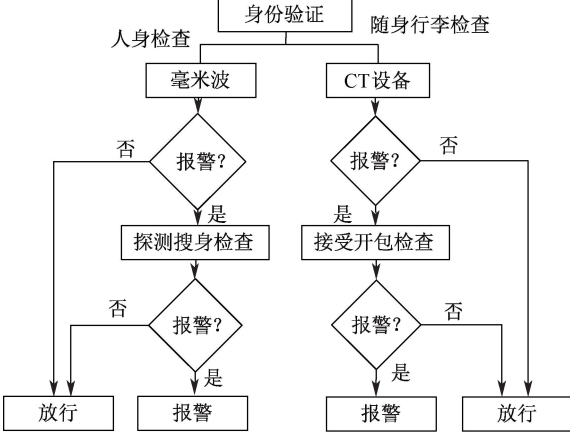


图2 新型安检通道设备配置安检流程

Fig. 2 Security screening flow of new security screening channel equipment configuration

2 机场安检设备检查策略

2.1 基于安检设备检测能力的违禁品分类

2类安检设备配置下,设 $j=\{1,2\}$ 为安检通道,其中, $j=1$ 为人身检查通道, $j=2$ 为随身行李检查通道。不同安检设备可以检测出不同类别的违禁品,如金属门和手持金属探测设备能检测出金属违禁品,毫米波人体成像设备能检测出金属违禁品和非金属违禁品。将携带违禁品种类设为 k 。其中,携带金属违禁品为 $k=1$,携带非金属违禁品为 $k=2$,同时携带金属违禁品和非金属违禁品为 $k=3$ 。由图1、图2设备配置情况,设安检设备为 $d=\{1,2,3,4\}$, $j=1$ 时, $d=1$ 为通过式金属门, $d=2$ 为手持金属探测器, $d=3$ 为毫米波人体成像设备, $d=4$ 为手持金属探测器; $j=2$ 时, $d=1$ 为X光机, $d=3$ 为CT设

备。安检通道设备检测出 k 类违禁品的二进制变量为 x_{jd}^k ,如下式:

$$x_{jd}^k = \begin{cases} 1 & j \text{ 通道 } d \text{ 设备能检测出 } k \text{ 类违禁品} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 安检性能指标

旅客及随身行李进入安检通道是否携带违禁品状态(设为 Z)通常为二元随机变量:携带($Z=1$)和未携带($Z=0$)。安检设备检测结果通常为2种状态:报警(设为 A)和放行(设为 C)。安检设备在运行时会产生错误报警和错误放行2类错误^[12]。假设安检设备对是否携带违禁品的响应值服从正态分布, $f_0(t_{jd})$ 、 $f_1(t_{jd})$ 分别为未携带违禁品和携带违禁品时响应值概率密度函数,如以下2式,其响应分布如图3所示。

$$f_0(t_{jd}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{jd}^0} \exp\left(-\frac{(t_{jd} - \mu_{jd}^0)^2}{2(\sigma_{jd}^0)^2}\right) \quad (2)$$

$$f_1(t_{jd}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{jd}^1} \exp\left(-\frac{(t_{jd} - \mu_{jd}^1)^2}{2(\sigma_{jd}^1)^2}\right) \quad (3)$$

式中: t_{jd} 为 j 通道 d 设备的报警阈值; μ_{jd}^0 、 μ_{jd}^1 分别为通过 j 通道 d 设备未携带和携带违禁品时,设备响应值的均值; σ_{jd}^0 、 σ_{jd}^1 分别为通过 j 通道 d 设备未携带和携带违禁品时,设备响应值的标准差。

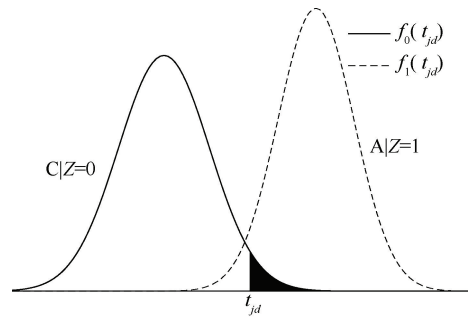


图3 安检设备响应值的概率密度曲线

Fig. 3 Probability density curve of security screening device response value

可通过调节 t_{jd} 判断旅客和随身行李是否携带威胁。设备响应值大于 t_{jd} 报警,反之放行。2条曲线相交的部分为错误报警和错误放行,面积越小则设备性能越好^[8]。由图3及条件概率公式,推导安检设备性能的指标, Φ 为发生的概率。正确报警(True Alarm,TA)、正确放行(True Clear,TC)、错误报警(Flase Alarm,FA)和错误放行(Flase Clear,FC)如以下4式。将错误报警率和错误放行率控制在可接受的范围,对平衡安检流程具有重要意义。

$$P(TC) = P(C \mid Z = 0) = \Phi_{jd}^0(t_{jd}) \quad (4)$$

$$P(FA) = P(A \mid Z = 0) = 1 - P(TC) = 1 - \Phi_{jd}^0(t_{jd}) \quad (5)$$

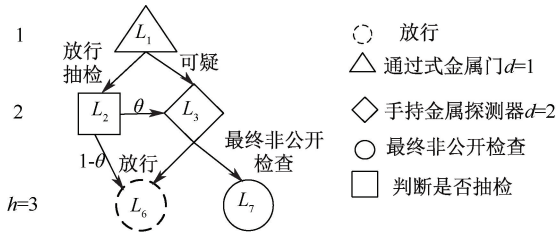
$$P(TA) = P(A \mid Z = 1) = \Phi_{jd}^1(t_{jd}) \quad (6)$$

$$P(FC) = P(C \mid Z = 1) = 1 - P(TA) = 1 - \Phi_{jd}^1(t_{jd}) \quad (7)$$

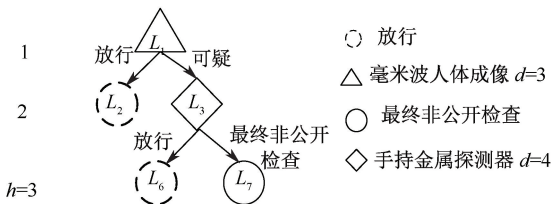
2.3 二叉决策树模型

二叉决策树结构可用于机场安检设备检查策略,决策树节点可产生设备响应值。假设安检设备检查策略满足二叉决策树结构 $L = (L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_{2^h-1}^h)$, i 为决策树节点, h 为节点的总阶数^[13]。每个决策节点对应分配 1 个安检设备 ($L_i = d$), 设备检查时, 根据 t_{jd} 和响应值, 决策放行或报警。决策结果对应以下 3 种情况: ①接受下一个阶段设备检查; ②放行; ③执行最终的搜身或开包。最终的搜身或开包为整个安检流程结束后, 将被检查对象单独安排检查。

根据 2 类通道的设备配置情况, 建立传统和新型通道人身检查设备的二叉决策树如图 4 所示, 随身行李通道同理。传统安检通道人身设备二叉决策树模型 (图 4a), 不同点在 L_2 处, 对旅客实施比例为 θ 的抽检, 抽检旅客需进入 L_3 进行检查。



(a) 传统通道设备模型



(b) 新型通道设备模型

图 4 人身检查设备二叉决策树

Fig. 4 Binary decision tree of personal screening equipment

2.4 建立决策树表达式

以新型安检通道人身检查设备为例。 $Q_{k,i}$ 为决策树中每个节点 i 上携带 k 类违禁品的旅客数量, 则 $Q_{0,i}$ 为决策树中每个节点 i 未携带违禁品旅客数

量, P_k 为旅客携带 k 类违禁品的概率。设在节点 1 处有 M 名旅客进入通道进行安检, 在节点 1 处携带 k 类违禁品旅客数量和未携带违禁品旅客数量如以下 2 式:

$$Q_{k,1} = MP_k \quad (8)$$

$$Q_{0,1} = M - \sum_{k=1}^3 Q_{k,1} \quad (9)$$

根据二叉决策树特点, 剩余节点 i 携带 k 类违禁品旅客数量和剩余节点 i 未携带违禁品旅客数量如以下 2 式:

$$Q_{k,i} = \begin{cases} Q_{k,\Omega(i)} \left[\frac{(1-I_i)\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^1(t_{1,L_{\Omega(i)}}) + I_i(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^1(t_{1,L_{\Omega(i)}}))}{I_i(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^1(t_{1,L_{\Omega(i)}}))} \right], & x_{1,L_{\Omega(i)}}^k = 1 \\ Q_{k,\Omega(i)} \left[\frac{I_i\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}) + (1-I_i)(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}))}{(1-I_i)(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}))} \right], & x_{1,L_{\Omega(i)}}^k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_{0,i} = Q_{0,\Omega(i)} \left[\frac{(1-I_i)\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}) + I_i(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}))}{(1-I_i)(1-\Phi_{1,L_{\Omega(i)}}^0(t_{1,L_{\Omega(i)}}))} \right] \quad (11)$$

式中: $\Omega(i)$ 为节点 i 的前端节点; I_i 为二元变量, 可表示为:

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{当前端节点 } \Omega(i) \text{ 与节点 } i \text{ 为放行关系} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

当前端节点为放行或接受非公开检查时, 将不对旅客进行下一步的处置, 可表示为:

$$Q_{k,i} = \begin{cases} Q_{k,\Omega(i)} L_i = L_{\Omega(i)} & k = \{0, 1, 2, 3\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

3 2 类机场安检通道模型建立

3.1 以设备阈值建立 2 类安检通道的安全性模型

根据民航局的相关规定, 目前传统安检通道设备配置, 需按照比例 θ 进行抽检或开包。传统通道安检设备配置检测违禁品能力为 $x_{jd} = (1, 0, 1)$ 。因此, 结合抽检比例, 式 (10)、式 (11) 可表示为:

$$Q_{k,i} = \begin{cases} Q_{k,\Omega(i)} \left[\frac{(1-I_i)\Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^1(t_{j,L_{\Omega(i)}}) + \theta Q_{k,2}}{I_i(1-\Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^1(t_{j,L_{\Omega(i)}}))} \right] + \theta Q_{k,2}, & x_{j,L_{\Omega(i)}}^k = 1 \\ Q_{k,\Omega(i)} \left[\frac{(1-I_i)\Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^0(t_{j,L_{\Omega(i)}}) + \theta Q_{k,2}}{I_i(1-\Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^0(t_{j,L_{\Omega(i)}}))} \right] + \theta Q_{k,2}, & x_{j,L_{\Omega(i)}}^k = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$Q_{0,i} = Q_{0,\Omega(i)} \left[\frac{(1 - I_i) \Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^0(t_{j,L_{\Omega(i)}})}{+ I_i(1 - \Phi_{j,L_{\Omega(i)}}^0(t_{j,L_{\Omega(i)}}))} \right] + \theta Q_{0,2} \quad (15)$$

新型安检通道设备配置由于设备的先进性,没有抽检要求,新型通道安检设备配置检测违禁品能力为 $x_{jd} = (1, 1, 1)$ 。其节点 i 旅客及随身行李携带和未携带违禁品数量与式(10)、式(11)相同。

因此,错误报警率为未携带违禁品旅客或随身行李到达最终非公开检查与所有到达最终非公开检查的数量比例,其表达式如下:

$$P_j(\text{FA}) = \frac{\sum_{m=0}^{2^{h-2}-1} Q_{0,2^{h-1}+2m-1}}{\sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^{2^{h-2}-1} Q_{k,2^{h-1}+2m-1}} \quad j = \{1, 2\} \quad (16)$$

式中 m 为指标变量。

正确报警率为携带违禁品到达最终非公开检查与携带违禁品进行安全检查的数量比例,可表示为:

$$P_j(\text{TA}) = \frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{m=0}^{2^{h-2}-1} Q_{k,2^{h-1}+2m-1}}{\sum_{k=1}^3 Q_{k,1}} \quad (17)$$

根据全概率公式,错误放行率可表示为:

$$P_j(\text{FC}) = 1 - P_j(\text{TA}) \quad (18)$$

3.2 2类设备配置安检通道成本模型

根据2类设备配置安检通道,因设备使用不同的技术,其特性不同,研究分析各配置下系统成本模型。将系统成本模型分为2部分:其中一部分为固定成本包括设备购买成本、维护成本、运营成本和检查旅客时间成本;另一部分为可变成本包括4种情况即错误报警、错误放行、正确报警和正确放行所导致的成本^[14]。

整合固定成本 C_f (元) 包括设备购买成本 C^B (元), 设备维护成本 C^M (元), 设备运营成本 C^R (元) 和时间成本 C^0 (元)。固定成本可计算为:

$$C_f = C^B + C^M + C^R + C^{01} + C^{02} = \sum_{j=1}^2 \sum_{d=1}^4 \frac{C_{jd}^B}{S_{jd}^B} + \sum_{j=1}^2 \sum_{d=1}^4 \frac{C_{jd}^M}{S_{jd}^M} + \sum_{j=1}^2 \sum_{d=1}^4 N_j C_{jd}^R + \sum_{j=1}^2 \sum_{d=1}^4 O_{jd}^1 N_j + G \sum_{j=1}^2 \sum_{d=1}^4 O_{jd}^2 \quad (19)$$

式中: C^{01} 和 C^{02} 分别为旅客和安检人员的时间成本,元; C_{jd}^B 为通道 j 设备 d 的购买成本,元; S_{jd}^B 为通道 j 设备 d 使用的平均寿命,天; C_{jd}^M 为通道 j 设备 d 的维护成本,元; S_{jd}^M 为通道 j 设备 d 每次维护使用的

平均天数,天; C_{jd}^R 为通道 j 设备 d 的运营成本,元; N_j 为通过旅客或随身行李的平均数量; O_{jd}^1 为旅客在通道 j 设备 d 的时间成本,元; O_{jd}^2 为安检人员在通道 j 设备 d 的工作时间成本,表示单位工作费用与通道工作时间的乘积,元; G 为通道需要的安检人员人数。

整合可变成本 C_v 包括错误报警导致的费用为 C^{FA} , 错误放行导致的费用 C^{FC} , 正确报警导致的费用 C^{TA} , 正确放行导致的费用 C^{TC} 。其中, p 为携带违禁品的概率, $p = \sum_{k=1}^3 P_k$ 。可变成本可计算为:

$$C_v = \sum_{j=1}^2 (C^{\text{FA}} P_j(\text{FA}) (1 - p) N_j + C^{\text{FC}} P_j(\text{FC}) p N_j + C^{\text{TA}} (1 - P_j(\text{TA})) p N_j + C^{\text{TC}} (1 - P_j(\text{TC})) (1 - p) N_j) \quad (20)$$

根据设备配置情况,传统和新型安检通道设备配置下成本计算如下2式:

$$C_T = C_f + C_v d = \{1, 2\} \quad (21)$$

$$C_N = C_f + C_v d = \{3, 4\} \quad (22)$$

式中: C_T 为传统安检通道设备配置下安检成本,元; C_N 为新型安检通道设备配置下的安检成本,元。

3.3 构建非线性规划模型

以通道安检设备配置下安检系统的2类错误为约束条件,最小化安检成本为目标构建非线性规划模型如下式:

$$\begin{aligned} \min \quad & C_T(t_{jd|1,2|}) \\ \min \quad & C_N(t_{jd|3,4|}) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} P_j(\text{FA}) \leq \zeta \\ P_j(\text{FC}) \leq \delta \\ t_{jd} \in [\eta_{jd}, \chi_{jd}] \\ j = \{1, 2\}, d = \{1, 2, 3, 4\} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: ζ 为错误报警率上限值; δ 为错误放行率上限值; η_{jd} 为设备报警阈值的下限值; χ_{jd} 为设备报警阈值的上限值。

4 机场安检通道成本模型求解

4.1 2类通道成本模型参数设置

基于深圳宝安国际机场调研数据,各安检设备成本参数见表1。已考虑设备运营成本,因此,不考虑正确放行造成的费用,即 $C^{\text{TC}} = 0$ 。结合旅客在安检设备所花费的时间,旅客单位时间成本根据人均国民生产总值除以人均劳动时长,计算结果约为35.4元/h^[15]。传统通道检查时间设为2min,新型

通道检查时间 3 min。安检人员工作成本为 17 元/h,通道工作时间为 18 小时/天。 $j=1$ 时,2 阶段 L_1 和 L_3 涉及安检设备; $j=2$,第二阶段为安检人员开包,不涉及安检设备,由于涉及国家安全,对部分数据进行适当调整假设,使得 $\Phi_{2d}^0(t_{2d})\{d=2,4\}=0.98, \Phi_{2d}^1(t_{2d})\{d=2,4\}=0.99, P(k=1)=0.08, P(k=2)=0.005, P(k=3)=0.001, \theta=0.2,$

$\zeta=0.08, \delta=0.05$;人身通道平均每天通过旅客数量 $N_1=2000$ (此时 $M=N_1$),随身行李通道数量 $N_2=4\,000$ 。根据安检设备配置情况,新型通道设备配置下安检通道较传统需增加 1~2 人,配备毫米波设备判图人员。因此,通道安检人员数量为 $G=6\{d=1,2\}, G=7\{d=3,4\}$ 。其他设置参数见表 2。

表 1 成本参数设置

Table 1 Cost parameter settings

通道类型	C_{jd}^B	C_{jd}^M	C_{jd}^R	C^{FA}	C^{FC}	C^{TA}
传统通道 $d=\{1,2\}$	50 000,8 000,500 000,0	5 000,800,20 000,0	1,0.6,0.5,0	10	800	15
新型通道 $d=\{3,4\}$	500 000,8 000,1 500 000,0	50 000,800,100 000,0	2,0.6,1,0	10	800	15

表 2 其他参数设置

Table 2 Other parameter settings

通道类型	S_{jd}^B/d	S_{jd}^M/d	μ_{jd}^1	μ_{jd}^0	σ_{jd}^1	σ_{jd}^0	η_{jd}	χ_{jd}
传统通道 $d=\{1,2\}$	3 650,960, 4 380,0	180,120, 180,0	7.5,6, 10,0	5,3, 6,0	0.8,0.6, 1,0	1,0.8, 2,0	5,5, 7,0	8,7, 10,0
新型通道 $d=\{3,4\}$	4 380,960, 5 100,0	360,120, 360,0	8,6, 11,0	4,3, 5,0	1,0.6, 1,0	1.2,0.8, 1.5,0	4,5, 7.5,0	6,7, 9.5,0

4.2 蒙特卡罗算法求解流程

针对构建的非线性规划模型,通过 Matlab 编写蒙特卡罗算法求解。根据蒙特卡罗算法的求解思路确定此模型的基本步骤:①根据数学模型,进行初始化设置,根据模型约束条件初步求解出变量的大致范围;②通过 Matlab 中 unifrnd 函数生成若干组变量数组;③验证生成变量是否所有的约束条件,若不满足,舍弃;若满足,得到一组可行解,在所有可行解组中找到对应函数的最大值或最小值,输出结果。

4.3 2 类通道成本模型结果分析

根据 Matlab 编程,以模拟次数 $n=1\,000$ 求解,得到 2 类通道成本模型的结果见表 3。由表 3 可

知:新型安检通道设备配置尽管固定成本高,但总安检成本比传统通道低。传统通道安检成本为平均每天 38 756 元,人均安检成本为 19.38 元;新型通道安检成本为平均每天 29 469 元,人均安检成本为 14.73 元。传统通道成本是新型通道的 1.32 倍,使用新型通道设备配置成本较传统而言可节省约 24%。传统通道设备最佳报警阈值为 $t_{11}=7.69, t_{12}=6.89, t_{21}=7.16$ 。新型通道设备最佳报警阈值为 $t_{13}=5.37, t_{14}=4.34, t_{23}=7.89$ 。传统通道设备配置下人身通道错误报警率较小,但其代价是错误放行率较大,接近上限值;新型通道 2 类错误与约束值之间尚有裕度,人身通道错误放行率低,但其错误报警较高,与现实相符。新型通道设备能检测更多违禁品,更为敏感,因此,错误报警率较高。

表 3 模型模拟结果

Table 3 Model simulation results

通道类型	t_{11}	t_{12}	t_{21}	$P_1(FA)$	$P_1(FC)$	$P_2(FA)$	$P_2(FC)$	安检成本/元	人均安检成本/元
传统通道	7.694 2	6.894 8	7.167 9	0.000 32	0.034 3	0.077 1	0.047 7	38 756	19.38
通道类型	t_{13}	t_{14}	t_{23}	$P_1(FA)$	$P_1(FC)$	$P_2(FA)$	$P_2(FC)$	安检成本/元	人均安检成本/元
新型通道	5.375 8	4.346 2	7.890 6	0.058 6	0.007 3	0.035 6	0.010 9	29 469	14.73

4.3.1 模拟次数变化

根据表 3 模拟结果可知:2 类通道在错误报警和错误放行约束下得到最小的安检成本,且新型通道设备配置成本低于传统通道。因此,研究新型通道设备配置模型,增大模拟次数 n ,得到结果见表 4。随着 n 增大,设备阈值、错误报警率、错误放行率以

及安检成本趋于稳定,模型得到的结果接近于最优解。即每天单条通道的期望安检成本最小约为 29 432 元,人均安检成本约为 14.72 元,错误报警率在约束范围内增大时,错误放行率降低,两者呈此消彼长趋势。

表 4 n 变化时新型通道设备模拟结果

Table 4 Simulation results of new channel equipment when n changing

模拟次数	t_{13}	t_{14}	t_{23}	$P_1(\text{FA})$	$P_1(\text{FC})$	$P_2(\text{FA})$	$P_2(\text{FC})$	安检成本/元	人均安检成本/元
$n = 5\ 000$	5.274 8	4.421 0	7.861 2	0.055 1	0.007 4	0.036 4	0.010 8	29 436	14.72
$n = 10\ 000$	5.262 8	4.412 6	7.875 7	0.057 2	0.007 2	0.036 0	0.010 9	29 433	14.72
$n = 15\ 000$	5.275 2	4.412 1	7.873 3	0.056 4	0.007 3	0.036 1	0.010 9	29 433	14.72
$n = 20\ 000$	5.250 6	4.419 4	7.890 3	0.057 0	0.007 2	0.035 6	0.010 9	29 432	14.72

4.3.2 增加抽检概率

为进一步增强新型安检通道安全性,增加抽检流程,流程与传统通道相同。因此,对新型通道增加 θ ,取 $\theta \in [0, 0.2]$,变化梯度 $\text{grad} = 0.02$ 。增加 θ 初期安检成本增长速率较大;随着 θ 增大,安检成本增长速率较稳定,如图 5 所示。增加 θ 造成安检成本增加,当新型通道 θ 增加至 0.2 时,与传统通道抽检率相同,且其安检成本仍较传统通道节省约 18%。随着 θ 的增大设备最佳报警阈值变化,毫米波人体成像设备报警阈值变化较其他 2 类设备而言波动较大,如图 6 所示。

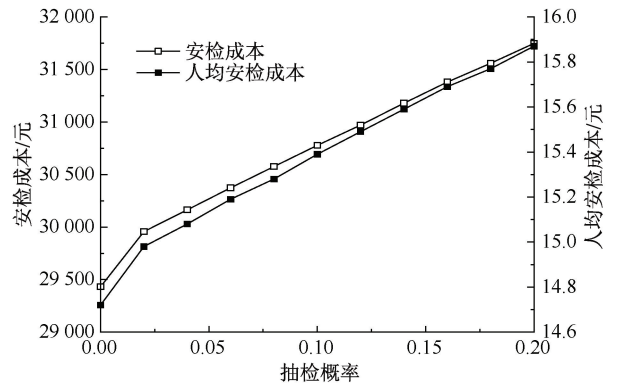


图 5 增加 θ 时新型通道设备安检成本变化

Fig. 5 Change in security screening cost of new channel equipment when θ is added

随着 θ 的变化,人身检查通道错误报警率呈先上升,当上升至接近上限值时,稳定于上限值附近,错误放行率变化趋势较小;随身行李检查通道错误报警率逐渐上升,错误放行率变化趋势较小,且错误放行率变化趋势与 CT 设备最佳阈值变化相似,如图 7 所示。因此, θ 的变化对毫米波设备和人身检查通道错误报警率影响较大。 θ 的增加导致旅客通过安检设备的数量增加,新型通道安检设备较敏感,导致错误报警率上升接近上限值,与事实相符。新型通道设备配置下能够在保证节约安检资源和安全性的前提下,安检成本亦比传统通道低。

4.3.3 改变旅客吞吐量

机场安检每日单通道旅客数量能较为直接反映机场旅客吞吐量。深圳机场旅客吞吐量常年位居前

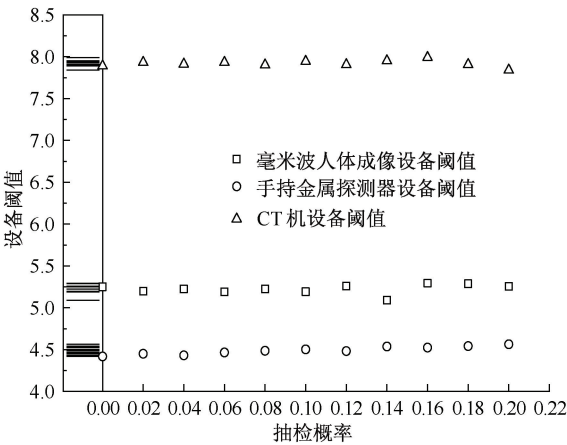


图 6 增加 θ 时新型通道设备最佳阈值变化

Fig. 6 Changes in optimal threshold of new channel equipment when θ is added

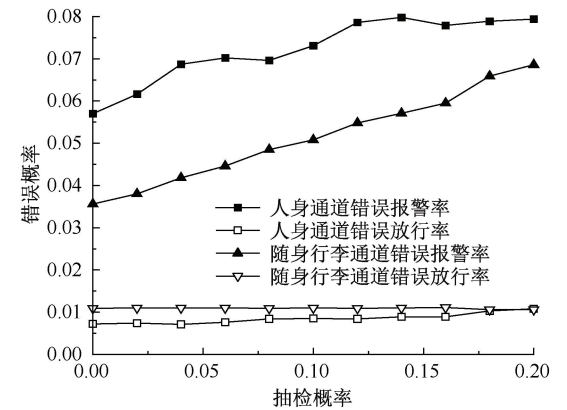


图 7 增加 θ 时新型通道 2 类错误变化

Fig. 7 Changes in two types of error in new channel when θ is added

列,为增强模型的适用性,选取四川宜宾机场人身通道平均每天通过旅客数量 $N_1 = 500$ (此时 $M = N_1$)。以 $N_1 \in [500, 2\ 000]$,变化梯度 $\text{grad} = 150$,对不同旅客吞吐量机场进行灵敏度分析,如图 8 所示。随着 N_1 的减少,2 类安检通道设备配置的人均安检成本均呈上升趋势,传统通道设备较新型通道设备上升较为缓慢; N_1 变化对于新型通道设备影响比传统更明显,且在 $N_1 \in [500, 1\ 000)$ 内,新型通道设备曲线斜率较高,与传统通道设备曲线逼近。随着 N_1 的减少,各设备最佳报警阈值均较稳定,如图 9 所示。传

统通道设备通过式金属门与 X 光机设备波动较强烈,与人身检查错误放行率波动对应错误放行率接近上限值,如图 10 所示;新型通道设备最佳报警阈值变化幅度较小,同时 2 类错误的变化波动也较小,如图 11 所示。因此,基于成本曲线增长速率,当单通道数量 $N_1 \in [500, 1\,000]$ 时使用传统通道设备, $N_1 \in [1\,000, 2\,000]$ 使用新型通道设备;新型通道设备对于旅客吞吐量变化时,设备最佳报警阈值、2 类错误均影响较小。传统通道设备最佳报警阈值变化波动较大,但 2 类错误相对较稳定。

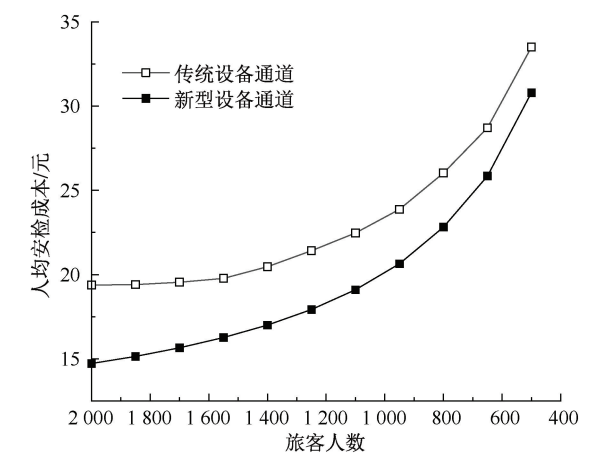


图 8 减少 N_1 时通道人均安检成本变化

Fig. 8 Changes in the per capita security screening cost of channel when N_1 is reduced

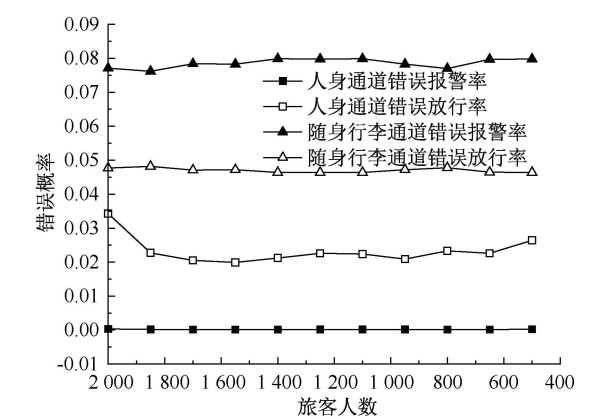


图 10 减少 N_1 时传统通道 2 类错误变化

Fig. 10 Changes in two types of error in traditional channel when N_1 is reduced

5 结 论

1) 针对旅客吞吐量较大的机场,在错误报警率和错误放行率可接受的范围内,使用新型安检通道可节省约 24% 成本。新型安检通道增加抽检概率,其成本仍比传统通道低。因此,对于吞吐量较大的

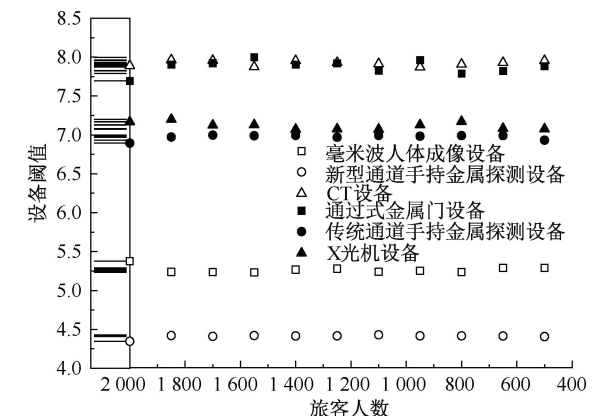


图 9 减少 N_1 时安检通道设备最佳阈值变化

Fig. 9 Changes in optimal threshold of the security screening channel equipment when N_1 is reduced

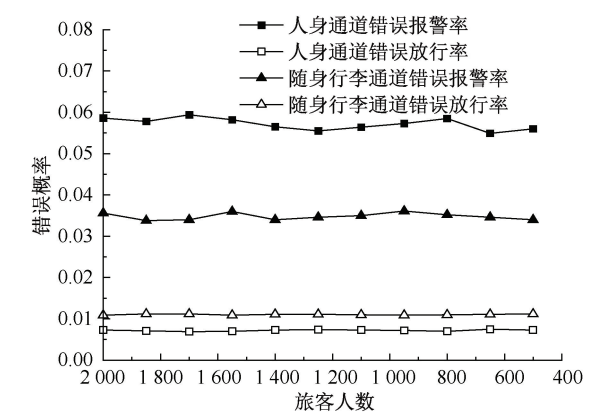


图 11 减少 N_1 时新型通道 2 类错误变化

Fig. 11 Changes in two types of error in new channel when N_1 is reduced

机场及单通道旅客人数 $N_1 \in [1\,000, 2\,000]$, 可以将传统安检通道设备更换为新型安检通道设备,尽管前期投入较大,但总成本比传统通道低。而针对吞吐量较小机场及 $N_1 \in [500, 1\,000]$, 如一些支线机场,考虑前期固定成本投入问题,使用传统通道设备可以有效减少前期的投入。

2) 在新型通道设备配置下,设备安检性能增强,2 类错误发生概率降低,对于旅客吞吐量较大的机场其旅客过检率亦提升。传统通道设备导致较大错误放行率,因此,在充分保证安全性的角度,建议采用新型通道设备保证较小的错误放行率。

3) 为使 2 类安检通道配置的成本模型更加符合实际情况,文中假设 2 类配置错误报警率和错误放行率导致的成本相同,但现实中由于通道内设备情况不同可能不同。同时可将旅客动态情况考虑其中,如旅客到达率、航班延误导致成本等都是未来研究的问题。

参考文献

- [1] 王永刚, 李赵钰. 基于 DBN 的机场飞行保障运行系统可靠性研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 998-1 005.
WANG Yonggang, LI Zhaoyu. Research on the reliability of airport flight support operation system based on DBN[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 998-1 005.
- [2] 王欣, 干镛锐, 许雅玺, 等. 基于字词向量融合的民航智慧监管短文本分类[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 37-44.
WANG Xin, GAN Zurui, XU Yaxi, etc. Short text classification of civil aviation intelligent supervision based on character-word fusion [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 37-44.
- [3] WELLS K, BRADLEY D A. A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2012, 70(8): 1 729-1 746.
- [4] CORDOVA A. Technologies for primary screening in aviation security[J]. Journal of Transportation Security, 2022, 15(3/4): 141-159.
- [5] 赵振武, 王军杰, 张怡. 机场旅客安检系统可靠性优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 182-189.
ZHAO Zhenwu, WANG Junjie, ZHANG Yi. Research on reliability optimization of airport passenger security system[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 182-189.
- [6] 朱涛涛, 王立军. 基于 CT 安检技术的机场智能旅检通道新探索[J]. CT 理论与应用研究, 2020, 29(4): 447-455.
ZHU Taotao, WANG Lijun. New exploration of airport intelligent passenger inspection channel based on CT security screening technology[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2020, 29(4): 447-455.
- [7] SAHIN H, FENG Qianmei. A mathematical framework for sequential passenger and baggage screening to enhance aviation security[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(1): 148-155.
- [8] NIE Xiaofeng. The impact of conditional dependence on checked baggage screening[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 278(3): 883-893.
- [9] 姚加林, 潘学成. 基于排队论的高铁车站安检设备运用优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1 919-1 925.
YAO Jialin, PAN Xuecheng. Research on application by optimization of security inspection equipment in high-speed railway stations based on queuing theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 1 919-1 925.
- [10] 陈晓红, 徐敏婕, 陈武华. 考虑成本, 等待时间和安全水平的分类安检模式研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(7): 35-43.
CHEN Xiaohong, XU Minjie, CHEN Wuhua. Research on classified security inspection mode considering cost, waiting time and security level [J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(7): 35-43.
- [11] 赵振武, 张沉沉. 机场旅客随身行李安检系统性能研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 2 149-2 154.
ZHAO Zhenwu, ZHANG Chenchen. Performance of airport passenger carry-on baggage security screening system[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 2 149-2 154.
- [12] KOBZA J E, JACOBSON S H. Addressing the dependency problem in access security system architecture design[J]. Risk Analysis, 1996, 16(6): 801-812.
- [13] CONCHO A L, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A mathematical framework for passenger screening optimization via a multi-objective evolutionary approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(4): 839-850.
- [14] JACOBSON S H, KARNANI T, KOBZA J E, et al. A cost-benefit analysis of alternative device configurations for aviation-checked baggage security screening[J]. Risk Analysis, 2006, 26(2): 297-310.
- [15] 张亚文. 空铁联运枢纽航线网络优化研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
ZHANG Yawen. Research on optimization of air rail intermodal hub route network [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.



作者简介: 赵振武 (1977—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事机场安全、民航旅客安检、航空货运安保等方面的研究。E-mail: zzw218@163.com。