

考虑成本、等待时间和安全水平的 分类安检模式研究

陈晓红 徐敏婕 陈武华

【摘要】近年来,随着民航机场旅客吞吐量快速增加,机场安检部门的工作压力正不断加大,旅客等待时间也正在逐渐增加。针对该问题,引入了分类安检模式。然而,分类安检模式通常需要额外的投资成本,可能会产生较大的财务负担。因此,以成本为目标,综合考虑旅客等待时间和安全水平的要求,研究了分类安检模式和传统安检模式的比较以及最优决策性质等相关问题。首先,考虑安全水平和旅客等待时间的约束,分别为传统安检模式和分类安检模式建立了模型,并分析了其最优运营决策性质。其次,从成本的角度,对两种安检模式做了比较研究。研究结果表明,当旅客数量多、安检犯错容忍度较高或旅客等待敏感时,分类安检模式比传统安检模式表现更优;反之,传统安检模式更优。此外,在分类安检模式中,分配到高风险安检通道的旅客比例存在一个最优值,并且其通常在20%到30%之间取到。最后,通过数值分析验证了分类安检模式的最优服务配置。

【关键词】分类安检;等待时间;安全水平;排队系统;成本;旅客风险等级

【作者简介】陈晓红(1963-),女,江西永新人,中国工程院院士,博士,中南大学商学院,两型社会与生态文明协同创新中心(湖南长沙410083),湖南工商大学移动商务智能湖南省重点实验室(湖南长沙410205),研究方向:两型社会、智能决策、决策方法;徐敏婕(1995-),女,湖南娄底人,中南大学商学院硕士,研究方向:排队论;陈武华(通讯作者)(1987-),男,浙江丽水人,中南大学商学院讲师,博士,研究方向:医疗运作管理、电子商务和收益管理(湖南长沙410083)。

【原文出处】《运筹与管理》(合肥),2021.7.35~43

【基金项目】国家自然科学基金重大项目(71790615);国家自然科学基金资助项目(71701214);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3695)。

0 引言

安检是指在机场、车站、地铁、边境口岸等人员流通大的场所对旅客、车辆、货物以及随身携带的物品进行的检查,它在保障人员密集场所安全中起着非常重要的作用。机场安检则是保障民用航空运输安全和空防安全的重要工作。随着民用航空产业的发展,机场旅客吞吐量不断增加。根据近五年“民航机场生产统计公报”,我国机场主要生产指标继续保持平稳较快增长。2014年至2018年期间,全年境内机场旅客吞吐量较上年增长比例分别为10.2%、10.0%、11.1%、12.9%、10.2%。2016年全年旅客吞吐量首次突破10亿人次,2018年全年旅客吞吐量超过12亿人次。机场旅客吞吐量的增加以及旅客结构的多样化给安检工作造成了巨大的压力;现代社会工作生活节奏的加快以及出行方式的多样化,使得旅客对安检等待时间的敏感性越来越强,对安检服务品质的要求也越来越高。换言之,安检排队等待时间延长、安检服务品质不能满足旅客需求等现象成为做好安检服务工作的阻力。

在我国,民用航空安检工作于1992年从公安武警部队移交至民航总局,并在各民航机场组建了安检点,全面负责安检工作的实施。根据民航的组织结构,安检工作在业务层面由民航局统一指导,在组织和财务层面则由分属各地方政府的机场公司或集团管理。根据民航“十三五”规划发展的总体要求以及民航局2019年3月19日“民航系统电视电话会议”,民航对于安检工作提出了新的要求:在零容忍安全隐患的基础上,进一步

探索出能体现民用航空运输效率的方法。因此,在保证安检水平的情况下,提升机场安检工作的服务质量、实现服务资源成本最小化和安检资源使用最大化,是安检管理者亟待解决的重要问题。

一种可能的解决方法是引入分类安检模式。分类安检,是基于旅客相关信息数据对其进行潜在危险程度分析,并根据分析得到旅客风险值,将其分配到安检严格程度不同的安检通道中接受安全检查的一种安检模式。目前,分类安检模式应用最好的国家是以色列。在以色列特拉维夫的本·古里安国际机场,利用分类安检模式协同硬件设备和人员技能,解决了传统安检模式中旅客安检时间过长和潜在风险的问题。从实施效果来看,五十年来以色列机场没有发生较大的安全事故。其次,荷兰的阿姆斯特丹史基浦机场,作为欧洲第五大客运机场,通过分类安检提升了安检效率。此外,在美国边境口岸实施的分类安检,改善了边境口岸的拥塞问题,提高了车辆通行速度。

虽然实施分类安检可以提高安检水平,但从传统安检模式转化为分类安检模式时,通常需要引入新的设备或对工作人员进行培训,这可能产生额外的投资成本,造成较大的财务负担。对于诸如我国这样的发展中国家而言,是否用分类安检模式替代传统安检模式,还需要综合考虑成本问题。例如,以色列航空每年用于安检方面的费用约1亿美元。因此,以成本为目标,综合考虑旅客等待时间和安全水平的要求,研究分类安检模式和传统安检模式的比较,以及最优决策性质等相关问题具有重要的意义。

本文的工作主要与两类文献相关。第一类是利用排队论构建单阶段多层次或多阶段多层次服务器的安全检查模型。El-Taha 和 Maddah^[1]研究了一个两阶段多服务器系统,在第一个阶段服务时间超过阈值的旅客,需要继续使用第二阶段服务。Zhang^[2]在一个动态开关的系统中,研究了一个两阶段多服务器系统最大化真正报警概率的问题。在这个系统中,检查策略决定了旅客类型和进入第二阶段接受检查的旅客比例,安全水平和检查策略共同决定了开放的服务器数量。赵振武和麻建军^[3]在单阶段多层次服务器的基础上引入虚拟排队的概念,对无虚拟排队、部分虚拟排队和全部虚拟排队三种情形进行了数值模拟,表明虚拟排队有助于减少旅客等待时间。Guo 和 Hassin^[4]研究了一个采用 N 策略的单阶段 M/M/1 系统,即当队列长度达到阈值 N 时,服务器才被触发工作。通过研究旅客对 N 策略的反应,他们发现社会最优的到达率可能比利己主义的旅客决定的到达率要高。Dimitrakopoulos 和 Burnetas^[5]研究了一个服务速率在低值和高值之间切换的不可见的单阶段 M/M/1 队列。他们证明此系统中最多存在三个均衡点,并指出在多重均衡点的情形下,社会最优到达率位于极值与均衡值之间。

第二类文献与分类安检模式相关。美国机场海关从 1998 年起开始使用一个带有选择性的计算机预检系统(Computer-Assisted Passenger Prescreening System, CAPPS),通关旅客在出示护照时,个人的数据被传送到预检系统数据库,海关人员根据通关旅客身份背景、有无犯案前科、历史数据等等属性分配每个通关旅客的风险值,作为后续通关安全检查系统的决策参考值^[6]。Huang 等^[7]基于风险将旅客分为高风险、普通和低风险三类,研究不同风险类别组成下分类安检模式的特点。Nie 等^[8]和 Wang^[9]将安全检查站分为常规安检通道和严格安检通道两种等级。构建了严格和非严格两种等级的通关旅客安检站的计算机仿真模型。风险值越高的旅客通过的安检流程越严格。Rajan 和 Colin^[10]根据历史数据中查获违禁品的误报警率和所需安检人员总数,结合旅客分组策略使旅客安检系统更有效。杨淑珍和郭青^[11]在构建旅客风险评价体系的基础上,基于 PSO-BP 神经网络进行了模型的训练。并利用 10 名旅客的信息模拟具体安检流程,证明了排队等待时间缩短。McLay 等^[12]将安全检查系统分为抽检通道和普通通道两类,在约束总预算和指派数量的差异化安检系统中,研究了最大化成功识别危险乘客概率的问题。Nie 等^[8]在限制抽检通道容量的分类安检系统中,把通关旅客的等待时间纳入考虑,在正确警报(True Alarm)和等待时间两目标之间进行取舍,选择相对较佳的分配策略。Papa^[13]整理了美国与欧洲海关的检查策略,主要有均等检查(Uniform Screening)和选择性检查(Selective Screening)两种,指出利用以风险值为依据的分类安检系统,比对所有通关旅客或货物均进行详细检查更有效。郭放等^[14]提出了基于禁忌搜索-改进节约算法的两阶段混合启发式算法 MCWTS 和一种四阶段启发式算法 IGALNS,通过建立整数规划数学模型,解决货物分类需求的策略问题,并从运营成本等方面比较并分析了货物分类对运营策略的影响。Virta 等^[15]考虑了一个安检能力不相同的动态分类安检系统,通关旅客通过安检设备后,系统会动态地更新旅客的风险值。王嘉宏和陈荣庆^[16]采用敏感性分析研究风险值和安检通道设备数量的决策对分类安检系统的平均等待时间和安全水平的影响。

本文针对由于客流量增加,引发的机场旅客等待时间延长、安检服务质量下降的问题,以最小化成本为目标,分析了在满足给定的安全水平和旅客等待时长的要求下,分类安检模式的特点;并传统安检模式进行了比较。与已有研究相比,本文的主要创新之处有如下几点:(1)已有的研究在角度上聚焦于正确警报和等待时间之间的权衡,目标是利用分类安检尽可能提高正确警报率或缩短旅客等待时间;而本文从成本角度出发,重点考虑在给定的安全水平和等待时间要求下,总成本最优时的安检策略。(2)本文研究了分类安检模式的最优服务能力和最优分配比例的决策,而已有的研究通常没有考虑这一方面。(3)已有研究将安全检查系统分为抽检通道和普通通道两类,并且限定了抽检通道的指派数量。本文的研究放开了分类安检系统中指派数量上的限制,当旅客全部被分配到高风险安检通道时,高风险安检通道即转化为普通安检通道。(4)已有的研究在分析分类安检模式时,通常假定安检通道识别危险能力的参数为常数。而在本文研究中,安检通道识别危险的能力与单位安检服务能力成本有关,并且单位安检服务能力成本是一个可决策的变量。

1 模型建立及分析

传统安检模式中,安检通道无差异,各安检通道服务能力、单位安检成本均相等。在分类安检模式中,分为高风险安检通道和普通安检通道,这两类通道在服务能力、单位安检成本、旅客等待时间上具有差异性。本文从成本角度出发,分别研究了传统安检模式和分类安检模式的特点,分析两类模式的最优服务能力;并研究分类安检模式的最优分配比例决策。本文的目标,是在保证安全水平和满足旅客等待时间约束的前提下,最小化安检总成本,并通过数值分析推导出最优的服务配置。换言之,目标是使安全检查的有效性最大化的同时最小化安检总成本。从机场管理者角度来看,安全检查有效性最大化即最小化错误警报的概率。从旅客的角度来看,最大化安检有效性可以通过最小化等待时间来实现。本文采用的符号如表 1 所示。

表 1 符号说明	
符号名称	说明
c	传统安检模式无差异通道单位安全检查成本
c_i	$i = H, L$ 时分别表示分类安检模式高风险、普通安检通道的单位安全检查成本
μ	传统安检模式无差异安检通道的安检通道服务率
μ_i	$i = H, L$ 时分别表示分类安检模式高风险、普通安检通道的安检通道服务率
λ	单位时间旅客到达率
α	分类安检模式中分配到高风险通道的旅客比例
β	安检点的高风险旅客数量占有所有旅客数量的比例
$\gamma_i(c)$	i 通道识别危险旅客时犯错误的概率,是关于单位安全检查成本的函数,其中 $i = H, L$
τ	安全检查犯错概率的上限,通常, $\tau = 0.0005$
ω_0	旅客在排队系统中的平均等待时间上限
$TC_{traditional}$	传统安检模式的总成本
$TC_{classified}$	分类安检模式的总成本

假设旅客服从泊松流,以 λ 速率源源不断地到达机场值机岛,当旅客从不同来源独立地到达时,泊松到达流是合理的。为方便比较,以两条安检通道为例。在传统安检模式中,根据通道服务拥挤程度将旅客随机分配至这两条同质的安检通道,再由安检工作人员对旅客进行无差异安检。在分类安检模式中,值机岛工作人员根据旅客的风险评估等级将旅客分配到不同的安检通道中,再由安检工作人员对旅客实施不同严格程度的安检。

在本文中,队列中高风险旅客的比例为 β 。此外,由于不同严格程度的安检所需要的单位成本不同,因此识别危险旅客的能力也不同。故记 $\gamma(c), \gamma(c_i)$ 分别为传统安检模式无差异安检通道、分类安检模式 $i(i = L, H)$ 通道识别危险旅客的犯错率,是关于单位安检成本 c, c_i 的函数。当单位安全检查成本为 0 时,识别危险旅客的犯错率为 1;随着单位安全检查成本增加,识别危险旅客的犯错率降低。此外, $\gamma(c), \gamma(c_i)$ 的下降速度随着单位安检成本的持续增加而变缓。因此假设 $\gamma(c) = e^{-c}, \gamma(c_i) = e^{-c_i}$ 。根据《民用运输机场服务质量》^[17],假设机场旅客在安检系统的平均逗留时间上限为 w_0 。结合民航总局对安检水平的要求,安检通道犯错误为小概

率事件或不可能事件,即可假设安检通道的犯错率上限 0.05%。

1.1 传统安检模式

在传统安检模式下,根据通道服务拥挤程度旅客被随机分配进入 1 号、2 号这两个同质安检通道口(类似于银行柜台),在这两个同质的安检通道中,对旅客的安全检查流程、所花费的安检时间、单位安全检查成本等均视为一致。流程图如下:

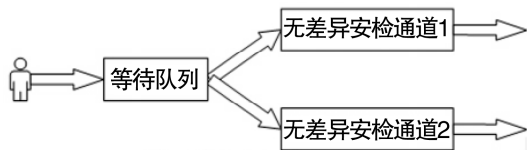


图 1 传统安检模式流程图

这个 $M/M/2/\infty$ 安检排队系统的最优化问题建立如下:

$$\min TC_{\text{traditional}}(c, \mu) = 2c\mu$$

$$\text{s. t. } P_{FC} = \gamma(c)\beta \leq \tau$$

$$w_q + \frac{1}{\mu} = \frac{\rho_2}{\lambda(1-\rho_2)} \times \frac{\rho^2}{2!} \left[\sum_{j=0}^{2-1} \frac{\rho^j}{j!} + \frac{2\rho^2}{(2-\rho)} \right]^{-1} + \frac{1}{\mu} \leq w_0$$

$$2\mu > \lambda$$

其中 $\rho = \lambda/\mu$, $\rho_2 = \lambda/(2\mu)$, $\gamma(c) = e^{-c}$ 。 $\gamma(c)\beta$ 为两个同质安检通道安检犯错率之和, $w_q + \frac{1}{\mu}$ 即旅客在安检系统中的逗留时间,是旅客在等待队列的等待时间与安检通道的服务时间之和。进一步地,上述最优化问题可化简为:

$$\min TC_{\text{traditional}}(c, \mu) = 2c\mu$$

$$\text{s. t. } P_{FC} = e^{-c}\beta \leq \tau$$

$$\frac{4\mu}{4\mu^2 - \lambda^2} \leq w_0$$

$$2\mu > \lambda$$

(1)

可以求得上述最优化问题的解析解,为如下所示。

命题 1 传统安检模式中最优单位安检成本和服务能力决策分别为:

$$c^* = \ln \frac{\beta}{\tau}, \mu^* = \frac{1 + \sqrt{1 + w_0^2 \lambda^2}}{2w_0} \quad (2)$$

根据机场安检往期的历史数据,确定参数值后可以得到传统安检模式的最优决策。此外,分类安检模式高风险安检通道的安检严格程度高于传统安检模式无差异安检通道的安检严格程度,传统安检模式无差异安检通道的安检严格程度高于分类安检模式普通安检通道的安检严格程度。根据假设,安检严格程度越高,单位安检成本越高,因此,可以认为传统安检模式单位安检成本介于分类安检模式两类通道的单位安检成本之间,即 $c_L \leq c \leq c_H$ (当 $\alpha = 0$ 时,等号成立)。因此,命题 1 的最优单位安检成本 $c^* = \ln \frac{\beta}{\tau}$ 可以作为分类安检模式单位安检成本的必要条件,即 $c_L \leq c^* \leq c_H$ 。

1.2 分类安检模式

在分类安检模式中,到达机场安检站的旅客依据个人风险评估等级或安全检查水平要求被分为不同风险类别,即高风险旅客和普通旅客。高风险通道旅客在安检流程中需要经过严格的安全检查,耗费的时间长,花费的单位安检成本高;而普通通道旅客在安检流程中只需进行基本的安全检查,耗费的时间相对较短,所花费的成本低于高风险通道旅客所花费的成本。传统的安全检查模式由于事先对待检旅客没有风险等级的预判,即对高风险旅客和普通旅客实施同一个复杂度的安全检查流程,对旅客进行安全检查时,为保证安全水平,机场安检工作人员更倾向于对待检旅客进行较严格的安检流程。与分类安检模式相比,传统安检模式会增加占比较高的普通旅客的等待时间,从而增加平均等待时间;对机场安检部门而言,传统安检模式会增加普通旅客

的单位安检成本,从而增加机场的安全检查成本。由此,亦体现出引入分类安检的必要性。分类安检模式流程图如图2所示:

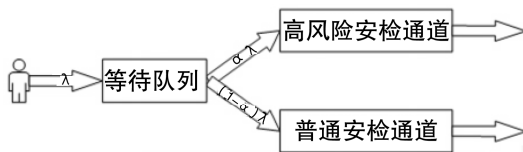


图2 分类安检模式流程图

与传统安检模式中的无差异安检相比,分类安检模式对普通旅客的检查更放松,花费的成本更低,对高风险旅客的检查更严格,花费的成本更高。因此,这三类通道的安全检查流程的严格程度可以排序为,分类情形的高风险安检通道严格程度大于传统安检模式无差异安检通道大于分类情形的普通安检通道。

根据前面的假设,记高风险旅客、普通旅客的单位安全检查成本分别为 c_H, c_L , 高风险旅客、普通旅客安检通道的服务能力分别为 μ_H, μ_L 。到达机场的旅客由机场的风险识别系统根据该旅客个人风险评估等级或当前安全检查水平要求被分为不同风险类别,本文假设这一风险识别系统能够将大部分高风险旅客分配到高风险安检通道中,且分配到高风险安检通道的旅客比例 α 越大,分配到高风险安检通道的高风险旅客越多。故分类安检模式最优优化问题建立如下示:

$$\begin{aligned} \min TC_{classified}(c_{H,L}, \mu_{H,L}) &= c_H \mu_H + c_L \mu_L \\ \text{s. t. } P_{FC} &= \frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05} \beta \gamma(c_H) + (1 - \frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05}) \beta \gamma(c_L) \leq \tau \\ \frac{1}{\lambda} (\frac{\alpha\lambda}{\mu_H - \alpha\lambda} + \frac{(1-\alpha)\lambda}{\mu_L - (1-\alpha)\lambda}) &\leq w_0 \\ \sum \mu &> \lambda \\ \mu_H - \alpha\lambda &> 0 \\ \mu_L - (1-\alpha)\lambda &> 0 \\ c_H - c_L &> 0 \end{aligned}$$

使用旅客风险评估系统,能够将大部分高风险旅客分配到高风险安检通道中,即高风险安检通道中高风险旅客数量随着分配比例 α 的增加而增加,且增速随着 α 的增加而下降。针对这一情况,我们假设分配到高风险安检通道的高风险旅客比例为 $\frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05}$, 显然,当 α 为 0 或 1 时,旅客全部在普通安检通道或高风险安检通道接受安检。 β 为安检点的高风险旅客数量占有所有旅客数量的比例。因此, $\frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05} \beta$ 为高风险安检通道中高风险旅客数量。 $\gamma(c_H)$ 表示高风险安检通道中识别危险旅客时犯错误的概率。 $\frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05} \beta \gamma(c_H)$ 为高风险安检通道的安检犯错误率,同理, $(1 - \frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05}) \beta \gamma(c_L)$ 表示普通安检通道的安检犯错误率。

根据排队论,旅客在普通安检通道和高风险安检通道中的逗留时间分别为 $\frac{1}{\lambda} \times \frac{(1-\alpha)\lambda}{\mu_L - (1-\alpha)\lambda}$, $\frac{1}{\lambda} \times \frac{\alpha\lambda}{\mu_H - \alpha\lambda}$ 。因此, $\frac{1}{\lambda} (\frac{\alpha\lambda}{\mu_H - \alpha\lambda} + \frac{(1-\alpha)\lambda}{\mu_L - (1-\alpha)\lambda})$ 为分类安检模式中旅客在系统中的逗留时间,是旅客在等待队列的等待时间和安检通道的服务时间之和;为保证安检队列的稳定性有 $\sum \mu > \lambda$ 。与传统安检模式相比,分类安检模式由于单位安全检查成本 $c_i (i=L, H)$ 不同,故不同通道识别危险旅客犯错误的概率也不同。根据假设, $\gamma_H = e^{-c_H}$, $\gamma_L = e^{-c_L}$ 。进一步地,上述最优优化问题可化简为:

$$\begin{aligned} \min TC_{classified}(c_L, c_H, \mu_L, \mu_H) &= c_H \mu_H + c_L \mu_L \\ \text{s. t. } \frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05} \beta e^{-c_H} + (1 - \frac{1.05\alpha}{\alpha+0.05}) \beta e^{-c_L} &\leq \tau \\ \frac{\alpha}{\mu_H - \alpha\lambda} + \frac{(1-\alpha)}{\mu_L - (1-\alpha)\lambda} &\leq w_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_H - \alpha\lambda &> 0 \\ \mu_L - (1 - \alpha)\lambda &> 0 \\ c_H - c_L &> 0\end{aligned}\quad (3)$$

可以求得上述最优化问题的最优策略的必要条件,为如下所示。

命题 2 分类安检下最优策略 $(c_L^*, c_H^*, \mu_L^*, \mu_H^*)$ 应该满足:

$$\begin{aligned}\frac{1.05\alpha}{\alpha + 0.05}\beta e^{-c_H} + (1 - \frac{1.05\alpha}{\alpha + 0.05})\beta e^{-c_L} &= \tau \\ \frac{\alpha}{\mu_H^* - \alpha\lambda} + \frac{(1 - \alpha)}{\mu_L^* - (1 - \alpha)\lambda} &= w_0\end{aligned}\quad (4)$$

根据命题 2 可以将原最优化问题转化为关于 α 的新的最优化问题,从而得到命题 3。

命题 3 总成本关于 α 满足凸性。

根据命题 3, $TC_{classified}(c_L, c_H, \mu_L, \mu_H)$ 在 α 上满足凸性,可以得到以下结论:在 α 的定义域中,至少存在一个 α 使得 $TC_{classified}(c_L, c_H, \mu_L, \mu_H)$ 存在最优解。这是因为到达机场安检站的旅客总量是有限且确定的,机场管理人员确定分配到高风险安检通道的旅客比例时,应兼顾安全水平以及高风险安检通道和普通安检通道旅客等待时间的平衡。

进一步地,可以得到传统安检模式和分类安检模式比较关于旅客分类比例 α 的一些性质。

命题 4 (i) $\alpha = 0$ 或 1 时, $TC_{classified}$ 近似于 $TC_{traditional}$, 即有 $TC_{classified} \approx TC_{traditional}$ 成立;

$$(ii) \alpha \geq \frac{0.05\tau e^{c_L} - 0.05\beta}{1.05\tau\mu_H\beta^{1-\frac{2\mu_L}{\mu_H}e^{\frac{c_L}{\mu_H}}} - \tau e^{c_L} - 0.05\beta} \text{ 时, 有 } TC_{classified} \geq TC_{traditional} \text{ 成立。}$$

命题 4 中给出了 α 的取值区间,以判断分类安检模式与传统安检模式总成本之间的差异。当 α 取端点值 0 或 1 时,所有旅客都去普通旅客安检通道或高风险旅客安检通道。此时,普通旅客安检通道或高风险旅客安检通道转变为无差异通道。与传统安检模式相比,分类安检模式在 α 取端点值 0 或 1 时转化为单通道安检模式。此时,分类安检模式的总成本 $TC_{classified}$ 近似等于传统安检模式的总成本 $TC_{traditional}$ 。

由于总成本 $TC_{classified}(c_L, c_H, \mu_L, \mu_H)$ 关于旅客分配比例 α 满足凸性性质,可以预测出分类安检模式存在一个最优的旅客分类比例决策。在数值分析部分,也分析了 α 对总成本 $TC_{classified}$ 的影响,并得到了关于 α 的最优区间。由于模型的复杂性,本文无法从理论上进一步分析两种模式的比较性质和分类安检模式的最优决策性质。因此,在下一节中,将主要采用数值模拟的方法来演示两种安检系统并得到一些有益的管理启示。

2 数值模拟

对于安全检查系统,安检效率高低的两个主要评价指标是,影响旅客满意度的旅客平均等待时间 w_0 和从机场管理者关注的单位安全检查成本 $c(c_L, c_H)$ 。在本节中,对旅客平均等待时间 w_0 ,以及 α 等参数在不同情形下进行了数值研究,并论证了传统安检模式和分类安检模式的适用场景。

根据中国民用航空局 2010 年至 2018 年“民航机场生产统计公报”及相关统计数据(数据来源: <http://www.caac.gov.cn/index.html>)。以长沙黄花国际机场为例,单条通道每日过检旅客达 1800 人次,高峰时过检流速可达 198 人/小时,根据机场各时间段航班分布数量情况,低峰时段旅客到达率 $\lambda = 110$ 人/小时,普通时段旅客到达率 $\lambda = 180$ 人/小时,高峰时段旅客到达率 $\lambda = 260$ 人/小时。在接下来的数值分析中,假设 $\beta = 0.05$ (由 Zhang, 2011 有) $0 < \beta < 0.05$, 符合实际情况。此外,从无差异的普通安检转变为根据旅客风险分类的分类安检时,需要投入额外的投资成本用于设备的更换和职员的培训。因此,在数值模拟部分,将这一固定成本纳入总成本的考虑中,假设固定成本为 m ,则分类安检模式的总成本可表示为

$$TC_{classified}^{**} = TC_{classified}(c_L, c_H, \mu_L, \mu_H) + m \quad (5)$$

从无差异的普通安检转变为根据旅客风险分类的分类安检,分配到高风险安检通道的旅客比例 α 是影响单位安检成本 c_L, c_H 和通道服务率 μ_L, μ_H 的重要指标,也是影响分类安检总成本 $TC_{classified}^{**}$ 的重要因素。因此,首先讨论了 α 对分类安检成本 $TC_{classified}$ 的影响。

2.1 高风险安检通道旅客分配比例 α 的灵敏度分析

在传统安检模式中,旅客被随机分配到两个无差异的通道中,各个通道的服务流程一致,且服务率相等,

因此总成本 $TC_{tradotomal}$ 不受 α 的影响。分类安检模式中, α 是唯一一个同时影响单位安检成本 c_L, c_H 和安检通道服务率 μ_L, μ_H 的参数。机场安检部门依据旅客风险等级、安全水平 τ 和高风险旅客占有所有旅客的比例 β (由以往的数据决定) 分配 α 比例的旅客到高风险安检通道中。为方便比较, 假设旅客到达率 $\lambda = 200$, 旅客等待时间上限 $w_0 = 0.1$, 安检犯错误率 $\tau = 0.0005$, 高风险旅客占旅客总数的比例 $\beta = 0.05$, 取固定成本 $m = 120$, $\alpha = [0, 1]$ 时, 可以得到以下图 3。

如图 3 示, 由于传统安检模式不受 α 的影响, 故 $TC_{tradotomal}$ 为一条水平线; 在分类安检模式中, 总成本 $TC_{classified}^{**}$ 随着 α 的增加先下降, 到达极小值后增加。这是由于普通安检转变为分类安检模式后, 当 α 较小时, 如图 4 示, 分配到高风险安检通道的旅客数量极少, 普通安检通道的旅客数量较多, 此时, 为了维持安全水平, 对普通安检通道的旅客必须进行较严格的安检流程, 故普通安检通道单位成本 c_L 较高, 因此, 总成本 $TC_{classified}^{**}$ 较高。随着分配比例 α 的增加, 普通安检通道旅客数量减少, 危险旅客数量减少, 单位安检成本 c_L 下降, 分类安检通道的旅客数量增加, 单位安检成本 c_H 下降, 因此, 总成本 $TC_{classified}^{**}$ 随着 α 的增加而减小。当分配比例 α 较大时, 分配到高风险安检通道的旅客数量增多, c_H 下降速度减缓, 且 c_H 下降幅度小于 c_L 下降幅度, 从而造成总成本 $TC_{classified}^{**}$ 上升。特别地, 当分配比例 α 为 1 时, 高风险安检通道转变为普通安检通道, 分类安检模式转变为单通道安检。

根据图 3, 可以得到以下管理见解: 当管理者采用分类安检模式时, 分配到高风险安检通道的旅客比例 α 存在一个最优值, 并且通常在 20% 到 30% 之间取到。

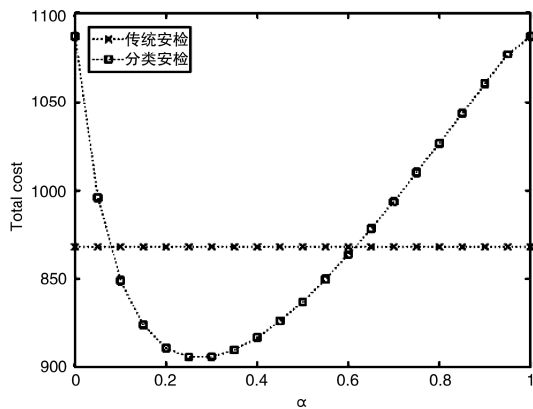


图 3 分配比例 α 对总成本 TC 的影响

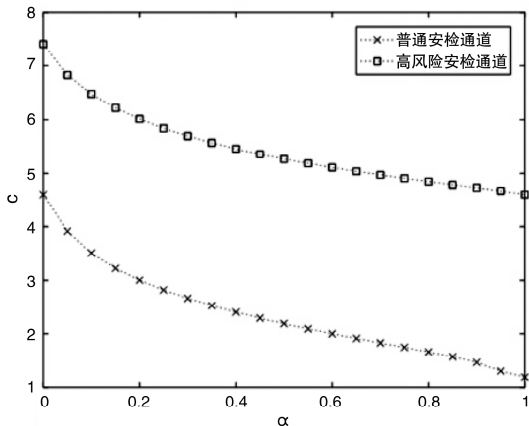


图 4 分配比例 α 对单位安检成本 c 的影响

2.2 旅客安检平均等待时间 w_0 的灵敏度分析

在安全检查中, 旅客安检平均等待时间 w_0 是影响旅客安检满意度的重要因素, 也是决定安检通道服务率 μ 的重要参数之一。根据《民用运输机场服务质量》^[17] 可知, 旅客安检平均等待时间依据国内航班与国际航班、机场年流量划分了不同的等待时间上限。国际航班 I、II、III、IV 类机场的等待时间上限分别为 5、6、8、10min, 国内航班 I、II、III、IV 类机场的等待时间上限分别为 6、8、10、12min。这里以国内航班 I 类机场为例, 取 $\lambda = 200$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.05$, $\tau = 0.0005$, 固定成本 $m = 170$, $w_0 = [0.04, 0.2]$, 步长 0.02 为例, 探讨传统安检模式和分类安检模式下, 总成本 TC 与等待时间 w_0 的关系, 如图 5 示。

如图 5 示, 分类安检模式与传统安检模式总成本 TC 在 w_0 上的变化趋势一致, 但传统安检模式的总成本 $TC_{traditional}$ 随 w_0 的变化下降速度比分类安检模式的总成本 $TC_{classified}^{**}$ 随 w_0 的变化下降速度更快, 即增加旅客平均等待时间会使得传统安检的总成本 $TC_{classified}^{**}$ 显著下降。记 $TC_{classified}^{**} = TC_{traditional}$ 时的点为 w_0^* 。 $w_0 < w_0^*$, 即旅客平均等待时间较短时, 分类安检模式的总成本 $TC_{classified}^{**}$ 低于传统安检模式的总成本 $TC_{traditional}$; 而 $w_0 > w_0^*$ 时, 分类安检模式总成本高于传统安检模式总成本。

由图 5 可知, 当旅客对等待敏感时, 采用分类安检模式更优; 换言之, 当旅客到达率处于一般状态或高到达率状态时, 采用分类安检模式更能降低旅客等待时间。反之, 采用传统安检模式更优。这一结论在讨论 λ 的灵敏度时也得到了验证。因此, 图 5 的一个主要管理启示是, 旅客等待时间要求短时, 采用分类安检模式比

传统安检模式表现更优;反之,传统安检模式更优。

2.3 高风险旅客比例 β 的灵敏度分析

高风险旅客占旅客总数的比例 β 是决定单位安检成本 c 的重要参数之一, β 越大意味着高风险旅客数量越多, 为保证安全水平, 此时对旅客进行的安检也越严格。此处以 $\lambda = 160, \alpha = 0.3, w_0 = 0.08, \tau = 0.0005$, 固定成本 $m = 140, \beta = [0.01, 0.1]$, 步长 0.01 为例, 分析 β 变化对总成本 TC 的影响。总成本 TC 与等待时间 β 的关系如图 6 示。

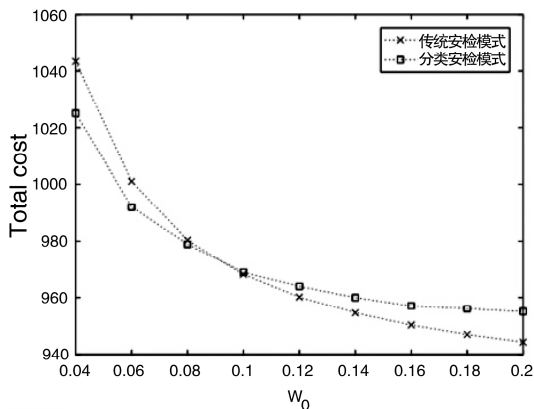


图5 旅客等待时间上限 w_0 对总成本 TC 的影响

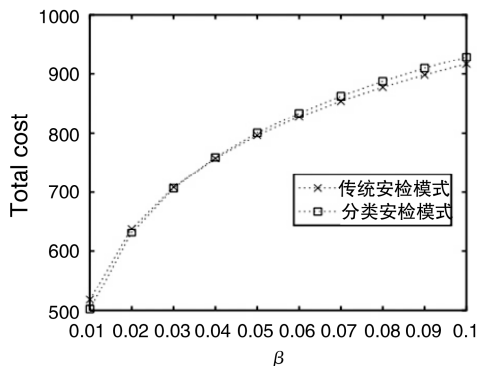


图6 高风险旅客比例 β 对总成本 TC 的影响

根据图 6 可知, 分类安检模式和传统安检模式下, 总成本 TC 均随着高风险旅客占所有旅客的比例 β 的增加而增加。记 $TC_{classified}^{**} = TC_{traditional}$ 处为 $\beta^{(1)}$, 在 $\beta^{(1)}$ 左侧, 有 $TC_{classified}^{**} < TC_{traditional}$, 即高风险旅客数量低于 $\beta^{(1)}$ 时, 选择分类安检模式的总成本 TC 更低。随着 β 增加, 队列中高风险旅客数量增加, $TC_{classified}^{**}$ 超过 $TC_{traditional}$, 此时采用无差异的传统安检模式更优。

2.4 安全水平参数 τ 的灵敏度分析

安全检查犯错误容忍率 τ 指的是安检过程中犯错的概率。在安检过程中, 对旅客的识别结果有以下四种: 旅客有危险且正确识别出危险, 旅客有危险但未识别出危险, 旅客没有危险且正确识别出无危险, 旅客没有危险但识别出有危险。本文只考虑第二种结果为安检犯错的情况, 即旅客有危险但未识别出危险。在安检过程中, 安检的严格程度越低, 犯错的可能性 τ 越大, 反之, 安检的严格程度越高, 犯错的可能性 τ 越小。换言之, τ 通过影响单位安检成本来影响总成本 TC 。取 $\lambda = 200, \beta = 0.05, \alpha = 0.25, w_0 = 0.1$, 固定成本 $m = 110, \tau = [0.0001, 0.003]$ 。研究 τ 的变化对总成本 TC 的影响方向、程度及可能的原因。

由图 7 可知, 传统安检模式和分类安检模式的总成本 TC 均与 τ 呈反向变动, 即随着 τ 的增加而降低。换言之, 安检可容忍的犯错率越高, 安检严格程度越低, 影响安检严格程度的单位安检成本随着 τ 的增加而降低, 从而总成本 TC 降低。在 τ 较小时, 安检严格程度较高, 分类安检模式的高风险安检通道和普通安检通道成本均较高, 此时, 分类安检模式的总成本 $TC_{classified}^{**}$ 高于传统安检模式的总成本 $TC_{traditional}$; 随着 τ 的增加, 安检犯错误容忍度增加, 传统安检模式总成本 $TC_{traditional}$ 超过了分类安检模式总成本 $TC_{classified}^{**}$ 。

安检等级较低或机场对安检犯错误容忍度较高时, 采用分类安检模式比传统安检模式更优。此时分类安检模式总成本 $TC_{classified}^{**}$ 更低。反之, 安检等级较高或对安检犯错误容忍度较低时, 采用传统安检模式更优。这是因为, 安检等级提高, 机场对普通安检通道旅客的安检严格程度大幅提升, 旅客数量较多的普通安检通道的单位安检成本 c_l 显著增加, 且 c_l 的上升速度高于高风险安检通道单位安检成本 c_H 的上升速度。此时, 传统安检模式优于分类安检模式。由此得到以下管理见解: 重要时期或重大事件发生时, 安检等级随之提高, 此时采用传统安检模式更能保障安全水平, 且总成本 $TC_{traditional} < TC_{classified}^{**}$ 。反之, 在普通时期采用分类安检模式最优, 总成本较传统安检模式也有所降低。

2.5 旅客总数 λ 的灵敏度分析

根据中国民用航空局 2010 年至 2018 年“民航机场生产统计公报”及相关统计数据 (数据来源: <http://www.caac.gov.cn/index.html>)。将旅客到达率 λ 分为高、中、低三个层次, 根据机场各时间段航班分布数量情

况,令低峰时段旅客到达率 $\lambda = 110$ 人/小时,普通时段旅客到达率 $\lambda = 180$ 人/小时,高峰时段旅客到达率 $\lambda = 300$ 人/小时。取 $\beta = 0.05, \alpha = 0.3, \tau = 0.0005, w_0 = 0.08$,固定成本 $m = 150, \lambda = [50, 300]$ 。

如图8示,分类安检模式和传统安检模式的总成本 TC 均与 λ 同向变动;即安检总成本随着旅客数量的增加而增加。随着 λ 的增加,传统安检模式总成本超过了分类安检模式的总成本。显然,与传统安检模式相比,分类安检模式更适用于大型机场或高峰时期的队列情形中。

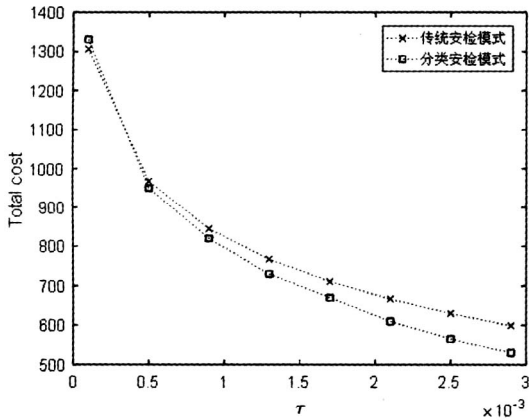


图7 安检犯错容忍率 τ 对总成本 TC 的影响

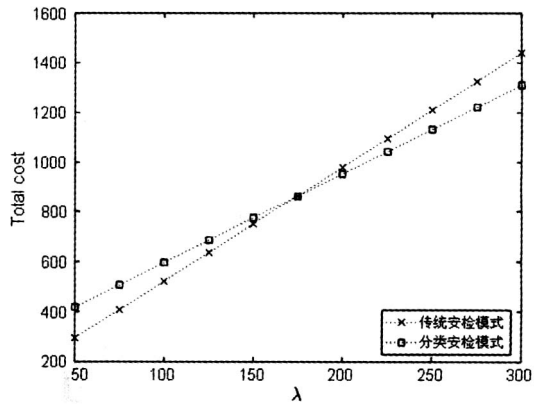


图8 旅客到达人数 λ 对总成本 TC 的影响

3 结束语

本文针对机场安检排队时间逐渐增加的问题,研究了分类安检模式的运营决策性质和系统性能。在考虑安全水平和旅客等待时间约束的基础上,分别为传统安检模式和分类安检模式建立了模型,分析了其最优运营决策性质,并从成本的角度对两种安检模式做了比较研究。本文的主要管理启示可以归纳如下:

(1)当管理者从传统安检模式转变为采用分类安检模式时,高风险安检通道的旅客分配比例 α 存在一个最优值,并且通常在20%到30%之间取到。

(2)当旅客吞吐量较大、机场对安全犯错容忍度较高或旅客等待敏感时,分类安检模式比传统安检模式表现得更优;反之,传统安检模式更优。因此,分类安检模式更适用于旅客吞吐量较大,旅客对等待敏感的大、中型机场。

上述结论可为我国机场安检管理的决策制定提供有益参考。

在我国等发展中国家中,成本通常是安检运营需要考虑的重要因素。因此,本文在考虑安全水平和旅客等待时间约束的基础上,主要从成本的角度研究了分类安检模式的运营决策性质和系统性能相关问题。在未来,研究对成本、旅客等待时间和安全水平三个目标进行集成下的分类安检模式运营决策性质和系统性能是后续值得探讨的问题。

参考文献:

- [1] El - Taha M, Maddah B. Allocation of service time in a multiserver system[J]. Management Science, 2006, 52(4): 623 - 637.
- [2] Zhang Z G, Luh H P, Wang C H. Modeling security - check queues[J]. Management Science, 2011, 57(11): 1979 - 1995.
- [3] 赵振武, 麻建军. 民航机场安检排队系统的发展趋势与研究[J]. 综合运输, 2016(10): 64 - 69.
- [4] Guo P, Hassin R. Strategic behavior and social optimization in Markovian vacation queues[J]. Operations research, 2011, 59(4): 986 - 997.
- [5] Dimitrakopoulos Y, Burnetas A N. Customer equilibrium and optimal strategies in an M/M/1 queue with dynamic service control[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 477 - 486.
- [6] 王嘉宏. 通关安全检查系统的运作模式与仿真研究综述[J]. 计算机科学与应用, 2017, 07(11): 1067 - 1078.
- [7] Huang P, Luh H, Zhang Z G. A queueing model for tiered inspection lines in airports[J]. International Journal of Informa-

tion and Management Sciences,2016,27(2):147-177.

- [8] Nie X, Parab G, Batta R, et al. Simulation-based selectee lane queueing design for passenger checkpoint screening[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 219(1): 146-155.
- [9] Wang C H. Arena simulation for aviation passenger security-check systems[J]. 2016.
- [10] Rajan Batta, Colin G. Drury. Passenger grouping with risk levels in an airport security system[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(2): 574-584.
- [11] 杨淑珍, 郭青. 基于旅客分类的机场快速安检系统研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(09): 46-49.
- [12] McLay L A, Jacobson S H, Kobza J E. Integer programming models and analysis for a multilevel passenger screening problem[J]. IIE Transactions, 2007, 39(1): 73-81.
- [13] Papa P. US and EU strategies for maritime transport security: a comparative perspective[J]. Transport policy, 2013, 28: 75-85.
- [14] 郭放, 杨珺, 杨超. 基于货物分类配送的电动汽车路径优化与换电策略研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(9): 33-44.
- [15] Varta J L, Jacobson S H, Kobza J E. Analyzing the cost of screening selectee and non-selectee baggage[J]. Risk Analysis: An International Journal, 2003, 23(5): 897-908.
- [16] 王嘉宏, 陈荣庆. 基于旅客风险分类的机场安检排队仿真分析[J]. 管理科学与工程, 2018, 7(2): 110-124.
- [17] MH/T5104-2013, 民用运输机场服务质量[S].

Research on Classified Security Inspection Mode Considering Cost, Waiting Time and Security Level

Chen Xiaohong Xu Minjie Chen Wuhua

Abstract: Over the years, the passenger throughput of civil airports has been increasing rapidly. Meanwhile, also increasing are the working pressure of airport security departments and waiting time of passengers. One of the possible solutions to the problem is introducing classified security inspection mode. However, classified security inspection mode usually requires additional investment costs, which may generate a large financial burden. Therefore, this paper studies the comparison between classified and traditional security inspection mode, considering the cost as the target, the requirements of waiting time of passengers and security level comprehensively. We also solve the issues about the optimal decision-making nature and other related issues. Firstly, considering the constraints of security level and waiting time of passengers, the models of two security inspection modes are established respectively, and the properties of the optimal operation decision are analyzed. Secondly, from the perspective of cost, it is compared between the two security inspection modes. The results show that when the number of passengers is large, the tolerance for security mistakes is high or the passengers are sensitive to waiting, and the classified security inspection mode performs better than the traditional one. On the contrary, the traditional security inspection mode is much better. In addition, in the classified security inspection mode, the optimal proportion of passengers assigned to high-risk security inspection channels is usually between 20% and 30%. Finally, the optimal service configuration of classified security inspection mode is verified by numerical analysis.

Key words: classified security inspection; waiting time; security level; queueing theory; cost; passenger risk classes