

考虑飞行时间变化的鲁棒机组人员配对问题研究

赵 沛, 曾 实, 冯 君

(中国民用航空飞行学院 机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要:考虑飞行时间变化是基于巡航速度变化而产生,从战术计划阶段研究飞行人员配对问题。以最小基本操作成本和最大鲁棒性为目标,对成本计算进行改进,进而建立基于数字度量的鲁棒船员配对模型(RCPN),以受偏离航班和不受偏离航班数量为鲁棒指标进行评价,使用列生成方法进行求解。将手算结果与 RCPN 改进模型结果对比,结果表明:RCPN 改进模型的平均运营成本相对于其他平均运营成本减少 3.9%。在增加运营成本 3.9%的情况下,模型可提高解决方案 21%的鲁棒性,且该模型可以避免极端延迟航班。可为航空公司排班人员提供参考和决策支持。

关键词:机组排班;鲁棒调度;飞行时间可变性;列生成

中图分类号:V35 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0165-09

机组人员成本是仅次于航空燃油成本的第二大成本,这种高运营成本也是学术界和航空界对机组配对方面关注的原因。据美国联邦航空局报道,在 2018 年和 2019 年,直接运营成本(即机组人员、燃料、维护等),由航班延误引起的费用分别达到 77 亿美元和 83 亿美元。但机组配对问题存在问题规模大和问题复杂性高的特点。

Antunes 等开发了一个两种类型鲁棒船员配对模型:第一种可以捕捉到全部 pay and credit 机组人员工资结构和由于顺延延误(propagated delays)导致的航班延误成本,但没有捕捉到执勤和配对运行时间的潜在增加的影响;第二种模型包含了全部 pay and credit 机组人员工资结构,由于顺延延误(propagated delays)造成的航班延误成本,以及执勤和配对运行时间潜在增加的影响^[1]。Chung 等讨论了两个连接航班之间的缓冲时间分配和机组人员配对的后备机组人员数量,以减轻由于航班到达延误造成的飞行中断。根据预期的飞行到达延迟,可以确定缓冲时间,然后可以使用一种新的动态后备机组人员策略来确定所需的后备机组人员数量^[2]。受 Chung 等^[2]研究结果启发,Sun 等^[3]进一步研究了飞行时间的特征,验证了出发时间和到达时间的相互依赖性。对于超过 23%的航班,预期飞行时间受到其实际起飞时间的显著影响。Chung

等^[4]研究表示,预先机组调度计划是基于成本最小化的目标制定的,这种计划相对脆弱,很容易引起中断(disruption)。此外,这种预先计划与真实的计划之间的差距将会给航空公司(如安排酒店入住、配餐)和乘客(不方便)带来不良影响。因此,在预先机组配对时,需要将中断提前考虑在内。

关于中断(disruption),航空公司每年的延误和中断给航空公司、乘客和经济带来数十亿美元的额外成本。对航空公司来说,维持航班时间表的可行性和降低中断成本至关重要。航班飞行时间可变性(flying time variability)是一个重要的中断,通常会导致航班起飞或到达时间偏离计划时间表,但是在巡航速度提高的情形下,也可补偿运行新航班所需的时间。针对这一特点,提出两种解决方案:第一种是考虑到巡航阶段可调整飞机速度,以补偿新航班的阻塞时间,因此可在现有配对中插入一个额外的航班;第二种是在现有配对中将部分任务环交换为两个现有配对,以覆盖额外的航班。航空公司有两种不同类型的机组人员:驾驶舱机组人员和机组人员。这两种机组类型在运行特性上差异很大,极大地影响了相应的调度问题。例如,驾驶舱机组人员是单一合格的,而机舱机组人员是混合合格的。根据计划阶段,航空公司机组人员调度问题可分为战术计划问题(在实际行动前几周或几个月进

收稿日期:2022-10-29

基金项目:大学生创新创业大赛项目(S202210624248)。

作者简介:赵沛(2000—),男,河南南阳人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为民航运输管理;曾实(1997—),男,重庆人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为机场管理与工程;冯君(1987—),男,四川绵阳人,中国民用航空飞行学院机场学院,高级工程师,博士研究生,研究方向岩土工程。

行的)和作战计划问题。传统上,成本最小化是战术规划问题的焦点。近年来,由于运营环境的高度波动,航空公司正从成本最小化调度转向稳健调度,目的是增强解决方案的鲁棒性,以更好地对冲实际运营中的潜在中断。但鲁棒调度问题比传统的调度问题相对更复杂。因此,鲁棒性的机组人员调度研究主要是基于驾驶舱机组人员进行^[5-8]。

1 问题描述

在建立基于数字度量的鲁棒船员配对模型(robust crew pairing model with number-based measure, RCPN)时,将以全面的方式将鲁棒性纳入机组配对问题,以应对此问题的复杂性。在上述场景的基础上,针对飞行时间可变性,根据历史数据预测,在机组配对规划阶段,对提出的不同场景下(包括上述场景)的受偏离影响航班和不受偏离影响航班进行惩罚和鼓励,并提出以受偏离航班和不受偏离航班数量为鲁棒指标进行评价。建立稳健机组配对模型,该模型基于飞行起飞-到达时间的相互依赖以及 Sun 等开发的起飞依赖飞行时间变化,提出了鲁棒性概念,能够抵抗潜在的航班延误。延误航班类型图例说明和增强鲁棒性的策略如下。

图 1 显示了一个典型的执勤任务,包括城市 1 和城市 2 之间的两个航班。F2 的预定起飞时间落在其直接的前一次飞行(F1)(即[Minsit, Maxsit])

的法定停留时间范围内。根据时间安排,一名机组人员将在 F1 上执勤完毕后执行 F2。

然而,航班的实际飞行时间会根据实际起飞时间和许多其他因素而发生变化。因此,实际到达的航班可能会偏离预定的时间点,这将进一步影响下一个航班的起飞。如图 2 所示,F1 在城市 2 到达很晚,下一次航班(即飞机起飞时间)的预定起飞时间不在实际飞机 F1 的法定起飞时间范围内。因此,F2 将遇到出发延迟,F2 最早的出发时间是实际 F1 的法定闲置时间范围的开始。如图 2 所示,如果不考虑航班飞行时间的可变性,所构建的机组人员配对是脆弱的,以前飞行的偏差很容易导致以后航班的起飞延误。

由于航空业的不确定性和波动性,很难预测未来每一个航班的真实起飞时间、飞行时间和到达时间。但是,通过数据分析,飞行的预期到达时间可以通过考虑飞行时间的变化进行数学计算,在此基础上,可在一定程度上提高机组人员配对的稳健性。主要的策略是:①鼓励不受前一个航班的预期到达延误影响的航班,如图 3 所示;②阻止将受到前一个航班的预期到达延误影响的航班,如图 4 所示。

图 3 展示了策略①的一个简单例子。在本例中,F1 预计会遇到到达延迟。在 F1 之后,机组人员将操作的下一次飞行是 F3,其预定起飞时间正好位于预定 F1 和预期到达-延迟 F1 的法定停留时间范

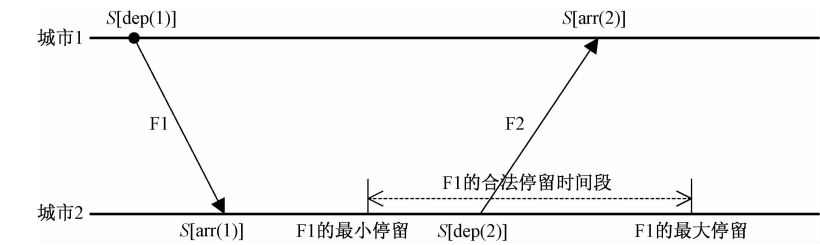


图 1 典型执勤任务

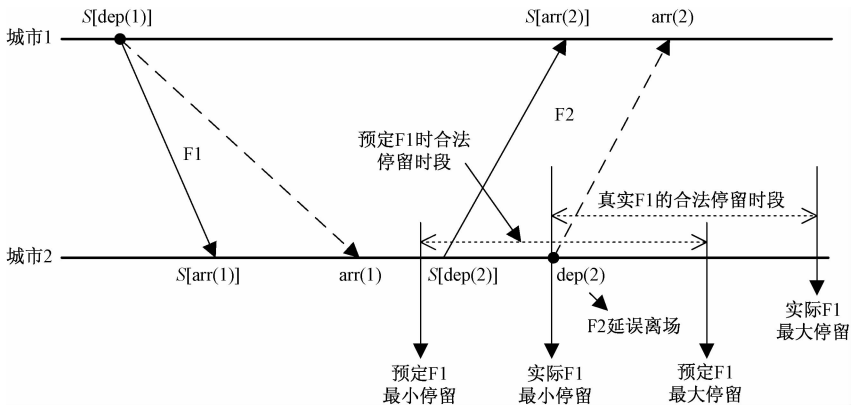


图 2 延误 F1 和干扰 F2

围的重叠位置。因此,即使 F3 的前一次航班(即 F1)预计会晚点,F1 也可以如期准点起飞。通过构建更多的航班,如图 3 所示,构建的机组人员配对计划可以更有效地抵御干扰。像这个例子中的 F3 这样的航班被称为无偏差影响的航班。 j 航班预定和预期到达的法定停留时间范围重叠的长度由式(4)计算。

策略②可以用图 4 来解释。在这个例子中,F1 预计会延迟到达目的地,然后是 F4。F4 的预定出发时间不在 F1 预期到达的法定停留时间范围内。因此,在 F4 到达之前,F4 不得离开。也就是说,F4 由于前一次航班的到达延误而遭遇起飞延误。像 F4 这样的航班被称为受偏差影响的航班。

对于图中未显示的剩余值班航班。图 3 和图 4 中同样规则将适用于判断飞行是无偏差影响还是受偏差影响的飞行。同时利用图 5 考虑飞行时间变化,包括两类飞行,即无偏差影响的飞行和受偏差影响的飞行。

值得注意的是,如果航班预期到达的法定停留时间范围和该航班预定到达的时间范围没有重叠。也就是说,该航班预计将到达目的地的延迟超过 210 min(如 $\text{Maxsit}-\text{Minsit}=210$),则认为这是一个极端延迟的情况。图 6 的例子中,预期到达-延迟 F1 的最小法定停留时间超过了预定 F1 的法定停留

时间范围。因此,F5 的预期最早出发时间是在预期到达延迟 F1 的法定停留时间范围内开始。如果发生这种极端情况,将产生非常大的惩罚代价(2)。实际上,这种极端情况发生的可能性非常小。因为超过 3 h 的延迟被认为是一种严重的中断,不能通过主动规划来解决^[5]。

由于飞行(航班)的状态取决于其前一次飞行(即起飞时间以及与起飞相关的飞行时间),飞行的预期到达时间可能因不同的潜在配对而变化,这应与配对构建过程一起计算。一次飞行可能是一个配对中不受偏差影响的飞行,而如果它被另一个配对覆盖,则是受偏差影响的飞行。为了提高机组人员配对解决方案的稳健性,重要的是防止受偏差影响的航班的发生,同时构建更多的无偏差影响的航班。

假设所有航班准时离场,换句话说,航班预定离场时间等同于预计离场时间。每一个航班都有可供选择的飞机,并且不受飞机扰动的影响。在预定时间前到达属于准时达到。图 7 显示了航班飞行时间变化对机组人员配对影响的一个例子,当中执勤包括 3 次连续飞行,即 F1、F2 和 F3。F1 的实际出发时间是其预定的出发时间,即 $\text{dep}(1) = \text{dep}^*(1)$ 。由于飞行时间的变化,F1 的预期到达时间晚于预定时间,即 $E[\text{arr}(1)] = \text{dep}^*(1) + \mu_1[\text{dep}^*(1)] > \text{arr}^*(1)$,基于 $E[\text{arr}(1)]$,根据等式(3),

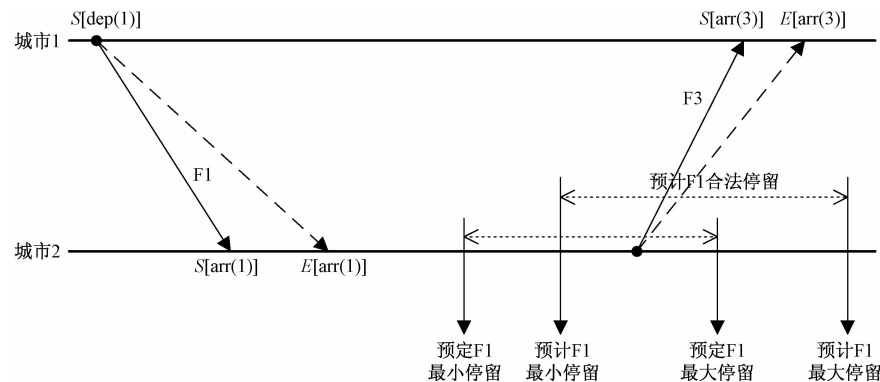


图 3 策略①鲁棒性

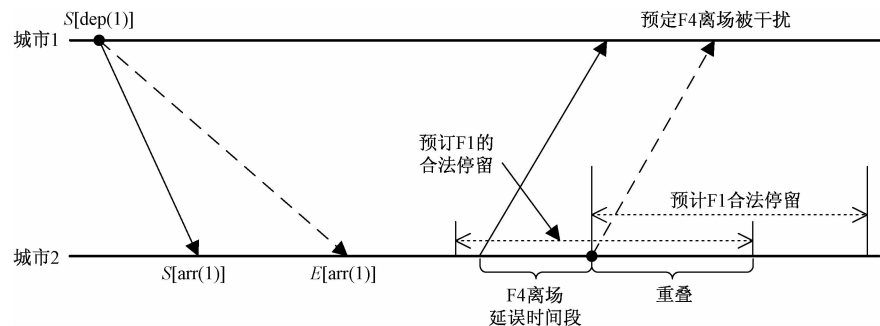


图 4 策略②鲁棒性

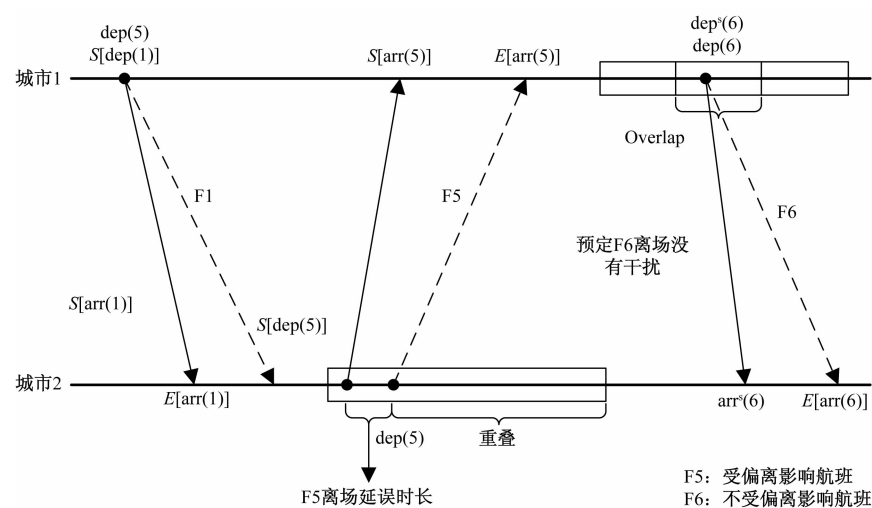


图 5 考虑飞行时间变化的完整执勤示例

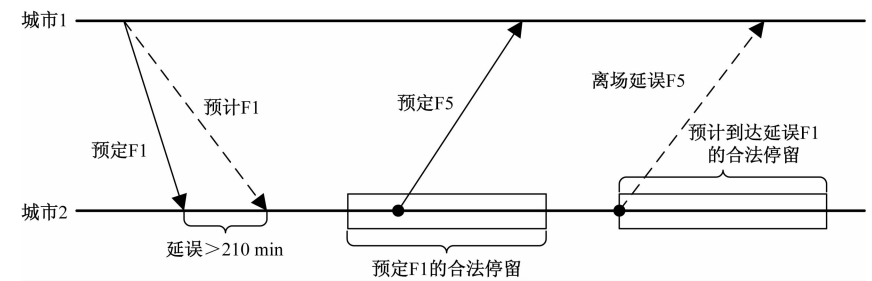


图 6 极端延误示例

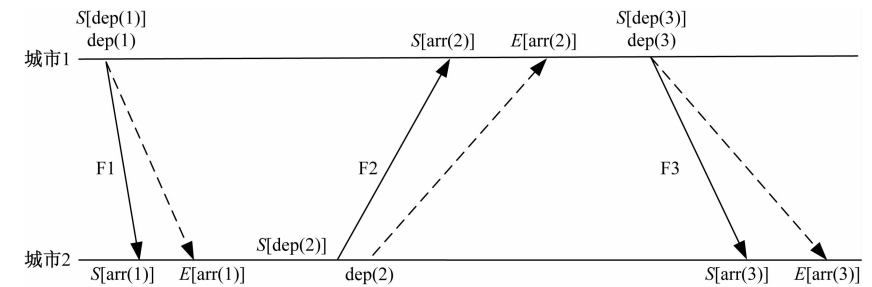


图 7 飞行时间变化对机组人员配对影响示例

可发现 F2 的离开被延迟 ($E[arr(1)] + Minsit > dep^*(2), dep(2) > dep^*(2)$)。然后,应用式(2),发现 F2 的预期到达也比计划的要晚。对于 F3,虽然它的前一次飞行(F2)遇到了起飞和到达的延迟,但它可以按照等式(3)的计算准时起飞 ($E[arr(2)] + Minsit \leq dep^*(3), dep(3) = dep^*(3)$)。然而,由于飞行时间的变化,F3 也预计会延迟到达目的地。从图 3 中可以看出,如果只应用预定航班的预定起飞/到达时间,而不考虑配对生成过程中的飞行时间变化,机组人员很容易遇到航班延误。

2 鲁棒机组配对模型建立

为了使问题易于处理,假设航班(起飞相关的)飞行时间可变性对紧邻后续飞行的预期到达时间产生的影响,而没有对配对中其他后续飞行的传播

产生影响;假设所有航班准时离场,即航班预定离场时间等同于预计离场时间。

公式中的符号及其含义见表 1。

$$arr(j) = dep(j) + FT_j[dep(j)] \tag{1}$$

$$E[arr(j)] = E[dep(j)] + \mu_j(E[dep(j)]) \tag{2}$$

$$dep(j+1) = \text{Max}\{dep^*(j+1), arr(j) + Minsit\} \tag{3}$$

$$Overlap(j) = arr^*(j) + Maxsit - E[arr(j)] - Minsit \tag{4}$$

$$\min \sum_{p \in P} c_p x_p, \tag{5}$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P} a_{pj} x_p \geq 1, \forall j \in F, \tag{6}$$

$$x_p \in \{0,1\}, \forall p \in P \tag{7}$$

表 1 符号及其含义说明

符号	含义
s	网络图中起始节点
k	网络图中沉没节点
F	预定航班集合,由 j 编号
P	潜在配对集合,由 p 编号
G	基于执勤的航班网络图
N	该网络图中节点集合
A	该网络图中弧集合
SA_d	执勤 d 中过站弧集合
F_d	包含在执勤 d 中的航班集合
F_p	包含在任务环 p 中的航班集合
A_s	起始弧集合
A_e	结束弧集合
A_{ds}	空机开始弧集合
A_{de}	空机结束弧集合
A_p	包含在任务环中的所有弧的集合
F_{daf}	任务环 p 中不受偏差影响的航班集合
F_{da}	任务环 p 中受偏差影响的航班集合
$\text{arr}(j)$	航班 j 的真实到达时间
$\text{dep}(j)$	航班 j 的真实离场时间
$\text{arr}^s(j)$	航班 j 的预定到达时间
$\text{dep}^s(j)$	航班 j 的预定离场时间
$\text{FT}_j[\text{dep}(j)]$	航班 j 的真实飞行时间
c_p	任务环 p 的成本
c_p^o	任务环 p 基本运营成本
c_p^{rb}	任务环 p 的鲁棒相关成本
$t_{d^-,d}, t_{s,d}, t_{d,k}$	弧相关成本
$c_{d^-,d}^w, c_{s,d}^w$	等待成本
$c_{d^-,d}^r$	执勤间休息成本
$c_{d^-,d}^D, c_{s,d}^D$	任务环最小执勤保障成本(PMDG)
$c_{s,d}^h, c_{d,k}^h$	空机成本
$\delta_{j^-,j}$	航班衔接时间
v_d	执勤保障飞行时间
lm_p^{rb}	任务环非延误奖励
dc_p^{rb}	任务环 p 延误成本
c_p^{rb}	鲁棒性相关成本
ϑ	对于极端延迟的情况,这是一个非常大的惩罚代价
w_1, w_2	分别表示基本运营成本和稳健性相关成本的权重
$\text{Buffer}(j)$	任务环 p 的总偏差缓冲时间
$\text{Devdelay}(j)$	任务环 p 的总偏差延迟时间
T_p	任务环 p 的持续时间(TAFB)
e_d	任务环 d 持续时长
θ	每个执勤 d 最小保障机组薪酬
α, λ	描述机组薪酬工资方案中的一个固定百分数
v	单位飞行时间需支付费用
v_d	执勤最低保障时间标准(名义飞行时间,通常为:飞行时间+50%空机飞行时间)
$V_{\min}$	支付给每次执勤最低保证飞行时间(测试为 4h)
Maxfly	最大飞行时间
Minsit	最小过站时间
ϖ	每个任务环 p 最小保障机组薪酬
b_d	执勤 d 中所有航班全程时间总和
x_p	0-1 决策变量
Ω_p	表示任务环 p 是否涉及极端延迟情况
a_{pj}	航班覆盖系数

式(1)~式(7)为定义约束。式(1)和式(2)为 $\text{arr}(j)$ 和 $E[\text{arr}(j)]$, $\text{FT}_j[\text{dep}(j)]$ 取决于 $\text{dep}(j)$ 的实际起飞时间。 $\text{arr}^s(j)$ 和 $\text{dep}^s(j)$ 分别为 j 航班的预定到达时间和起飞时间。 $E[(\cdot)]$ 为期望值。 $\text{Minsit}/\text{Maxsit}$ 为连续两个航班之间的最小/最大法定闲置时间。根据 Sun 等^[3]的研究,大多数飞行规则的不确定性可以用正态分布来近似。因此,将飞行时间建模为正态分布,其均值为 $\mu_j[\text{dep}(j)]$, $\sigma_j[\text{dep}(j)]$ 依赖于航班实际起飞时间 $\text{dep}(j)$ 。式(2)可以通过考虑航班飞行时间的变化来得到飞行 j 的预期到达时间。式(3)下一个航班的实际起飞时间(即 $j+1$ 航班)取决于前一个航班(即 j 航班)的到达, $\text{dep}^s(j+1)$ 为 $j+1$ 航班的预定起飞时间, $\text{arr}(j) + \text{Minsit}$ 为 $j+1$ 航班实际上一次航班(即 j 航班)最早合法起飞时间。因此,使用 $E[\text{arr}(j)]$, 可以判断接下来的航班(即航班 $j+1$)是否预计会准时起飞。也就是说,一个航班的状态会受到其上次航班的影响。

$$t_{d^-,d} = c_{d^-,d}^w + c_{d^-,d}^r + c_{d^-,d}^D,$$
$$\forall (d^-,d) \in \{A - A_e - A_{de} - A_s - A_{ds}\} \quad (8)$$

$$t_{s,d} = c_{s,d}^w + c_{s,d}^D + c_{s,d}^h, \forall (s,d) \in \{A_s + A_{ds}\}$$
$$(9)$$

$$t_{d,k} = c_{d,k}^h, \forall (d,k) \in \{A_e + A_{de}\} \quad (10)$$

$$c_{d^-,d}^w = \sum_{(j^-,j) \in SA_d} g_{j^-}(\delta_{j^-,j}),$$
$$\forall (d^-,d) \in \{A - A_e - A_{de} - A_s - A_{ds}\} \quad (11)$$
$$c_{s,d}^w = \sum_{(j^-,j) \in SA_d} g_{j^-}(\delta_{j^-,j}), \forall (s,d) \in \{A_s + A_{ds}\} \quad (12)$$

$$c_{d^-,d}^r = l_{d^-}(\delta_{d^-,d}),$$
$$\forall (d^-,d) \in \{A - A_e - A_{de} - A_s - A_{ds}\} \quad (13)$$

$$c_{d^-,d}^D = v * \max\{0, (V_{\min} - v_d)\},$$
$$\forall (d^-,d) \in \{A - A_e - A_{de} - A_s - A_{ds}\} \quad (14)$$

$$c_{s,d}^D = v * \max\{0, (V_{\min} - v_d)\},$$
$$\forall (s,d) \in \{A_s + A_{ds}\} \quad (15)$$

$$c_{s,d}^h = \beta, \forall (s,d) \in A_{ds} \quad (16)$$

$$c_{s,d}^h = 0, \forall (s,d) \in A_s \quad (17)$$

$$c_{d,k}^h = \beta, \forall (d,k) \in A_{de} \quad (18)$$

$$c_{d,k}^h = 0, \forall (d,k) \in A_e \quad (19)$$

式(8)~式(19)定义了费用,首先引进基本运营成本 c_p^o 。式(8)~式(10)为与弧相关基本运营费用,分别指执勤弧、开始弧和结束弧;式(11)、式(12)为等待费用;式(13)为休息费用;式(14)、式(15)为任务环中执勤最低保障费用;式(16)~式(19)为空机费用/置位费用。

总之,通过 $(n_p^-, n_p) \in A_p$ 表示任务环中的弧,其中包括(空机)开始弧,执勤弧和(空机)结束弧。任务环 c_p° 总基本运营费用可由式(20)表示:

$$c_p^\circ = K + \sum_{(n_p^-, n_p) \in A_p} t_{n_p^-, n_p} \quad (20)$$

$$c_d = \max\left\{\lambda e_d, \left[b_d = \sum_{j \in F_D} \text{arr}(j) - \text{dep}(j)\right], \theta\right\} \text{ 和}$$

$$c_p^\circ = \max\left(c_p^\circ, \sum_{d \in F_p} c_d, \alpha T_p, \varpi\right) \text{。是对基本运营成本进行改进, } b_d \text{ 是飞机从原机场登机口起飞的时间到飞机到达目的地机场登机口的时间之间的时间间隔的长度。这个间隔包括飞行时间 } FT_j[\text{dep}(j)] \text{、起飞时间、着陆时间、滑出时间和滑入时间。即将一个航班全程时间转化为 } \text{arr}(j) - \text{dep}(j) \text{。}$$

其次,计算鲁棒相关成本 c_p^{rb} 。在本节中,根据提出的两种策略,提出了新的鲁棒性目标。具体来说,沿着配对构造,根据飞行时间的变化性计算预期的飞行到达时间,然后得到下一次飞行的起飞时间。因此,可以制定无延迟奖励成本(bn_p^{rb})和延迟成本(dc_p^{rb}),并且鲁棒性相关成本(c_p^{rb})等于延迟成本(dc_p^{rb})减去无延迟奖励成本(bn_p^{rb})。

下面依次介绍策略①和策略②的成本制定^[11]。

策略①:目的是鼓励不受偏离影响航班的产生。因此,如果任务环 p 中包含有非延误航班,则任务环会得到一个非延误奖励。 F^p 表示包含在任务环 p 中的航班集合, F_{daf}^p 表示包含在任务环 p 中的不受偏离影响的航班集合。如果 $E[\text{arr}(j^-)] + \text{Minsit} \leq \text{dep}^s(j) \leq \text{arr}^s(j^-) + \text{Maxsit}$, 那么航班 $j(j \in F^p)$ 属于 F_{daf}^p 。

此处提出两种提高不受偏离影响航班的出现度量:①扩大不受偏离影响航班数量(基于数量度量);②扩大不受偏离影响航班的总偏离缓冲时间长度(基于时间度量),任务环 p 中不受偏离影响航班的总数等于 $|F_{\text{daf}}^p|$ 。注意此处 $||$ 代表集合大小。偏离缓冲时间 $[\text{Buffer}(j)]$ 指的是航班预定离场时间与前序航班预计到达时间和最小转场时间连两者和之差,等同于式(21)。因此,任务环的总偏离缓冲时间是 $\sum_{j \in F_{\text{daf}}^p} \text{Buffer}(j)$ 。简言之,如果基于数量度量被采用, bn_p^{rb} 如式(22)所示,如果基于时间度量被采用, bn_p^{rb} 如(23)所示。

Buffer(j) = $\text{dep}^s(j) - E[\text{arr}(j^-)] - \text{Minsit}$

$$(21)$$

$$bn_p^{\text{rb}} = |F_{\text{daf}}^p| \quad (22)$$

$$bn_p^{\text{rb}} = \sum_{j \in F_{\text{daf}}^p} \text{Buffer}(j) \quad (23)$$

策略②:此处目的是不鼓励任务环中受偏离影响航班的产生。因此,如果任务环 p 中包含有延误航班,则任务环会得到一个延误惩罚。 F_{da}^p 表示任务环 p 中受偏离影响的航班集合。如果 $\text{arr}^s(j^-) + \text{Minsit} \leq \text{dep}^s(j) < E[\text{arr}(j^-)] + \text{Minsit}$, 航班 $j(j \in F^p)$ 属于 F_{da}^p 。此处同策略①,提出两种方法来不鼓励此类航班的出现:①减少受偏离影响航班数量(基于数量度量);②减少受偏离影响航班的总偏离延误时间长度(基于时间度量)。任务环 p 中受偏离影响航班总数等同于 F_{da}^p 。对于偏离影响航班 j ,偏离延误时长 $[\text{Devdelay}(j)]$ 等于前序航班预计到达时间和最小过站时间之和与航班 j 的预定离场时间之差,其等同于式(24)。因此,任务环 p 总偏离延误时长是 $\sum_{j \in F_{\text{da}}^p} \text{Devdelay}(j)$ 。

$$\sum_{j \in F_{\text{da}}^p} \text{Devdelay}(j) = E[\text{arr}(j^-)] + \text{Minsit} - \text{dep}^s(j) \quad (24)$$

$$dc_p^{\text{rb}} = |F_{\text{da}}^p| \quad (25)$$

$$dc_p^{\text{rb}} = \sum_{j \in F_{\text{da}}^p} \text{Devdelay}(j) \quad (26)$$

简言之,如果基于数量度量被采用, dc_p^{rb} 如式(25)所示,如果基于时间度量被采用, dc_p^{rb} 如式(26)所示。因此,任务环 p 总鲁棒相关成本用 c_p^{rb} , 等同于延迟成本(dc_p^{rb})减去非延误奖励(bn_p^{rb}),如式(27)所示。

$$c_p^{\text{rb}} = dc_p^{\text{rb}} - bn_p^{\text{rb}} \quad (27)$$

利用所构造的费用函数,可以推导出鲁棒机组配对问题的数学模型。值得注意的是,基本运营成本和鲁棒性相关成本的单位并不相同。因此,有必要将这两个成本标准化。使用下标“ Δ ”来表示标准化的值。归一化函数是 $z_{\Delta} = \frac{z^- - z}{z^- - z^+}$, z^- 表示 z 的最大值, z^+ 表示 z 的最小值。需要注意的是,任何已经构建的任务环 p , 如果 $E[\text{arr}(j)] + \text{Minsit} > \text{arr}^s(j) + \text{Maxsit} (\forall j \in F^p)$, 则一种极端延误情况将会出现。一个巨大的惩罚值 ϑ 将会分配给此任务环。那么 $\Omega_p = 1$ 代表任务环 p 涉及极端延误情况,反之 $\Omega_p = 0$ 。因此,极端延误惩罚值为 $\Omega_p \vartheta$ 。任务环 $p(c_p)$ 总费用等于标准化基本运营费用($c_{p\Delta}^\circ$)加上标准化鲁棒相关费用($c_{p\Delta}^{\text{rb}}$)加上极端延误费用($\Omega_p \vartheta$),如式(28)所示。使用 w_1 和 w_2 ($w_1 + w_2 = 1$) 来分别代表基本运营费用和鲁棒相关费用的权重。

$$c_p = w_1 c_{p\Delta}^\circ + w_2 c_{p\Delta}^{\text{rb}} + \Omega_p \vartheta \quad (28)$$

因此,如果应用基于数量度量的鲁棒性度量,考虑基本运营成本 c_p^o 的最小化和鲁棒相关成本 c_p^{rh} 的最小化,则可以在等式中建立具有基于数量度量的鲁棒机组配对模型(RCPN)[式(29)~式(31)]。

$$\text{RCPN min} \sum_{p \in P} \left\{ \omega_1 (K + \sum_{(n_p^-, n_p^+) \in A_p} t_{n_p^-, n_p^+}^-) + \omega_2 (|F_{daf}^p| - |F_{daf}^p|)_{\Delta} + \Omega_p \vartheta \right\} x_p \quad (29)$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P} a_{pj} x_p \geq 1, \forall j \in F \quad (30)$$

$$x_p \in \{0, 1\}, \forall p \in P \quad (31)$$

3 列生成算法

主问题:限制主问题(RMP)是在有限数量的可行配对条件下 CPP 的线性松弛。通过为每个任务形成一个配对来初始化解方案池(如果任务不是从基地开始或结束,则使用空机弧)。将 RMP 迭代求解到最优性,并将每次迭代得到的双价转移到子问题上,以识别出更好的配对,可用于更新 RMP 的配对池。如果找不到更好的配对,整个列生成将终止。然后利用混合整数规划技术得到整数解。

子问题:子问题通常表示为资源约束的最短路径问题,以从整个解池中识别有满足约束的配对。满足约束的配对指的是那些具负的降低成本,可以进一步降低稳健的机组配对模型的客观价值。因此,子问题的目的是识别具有最负成本(即降低成本)的配对。此外,机组人员配对问题中的资源通常与规章制度有关,比如离开基地的最大时间和配对中的最大飞行次数。只有当满足了所有的规则 and 规定时,配对才是可行的。接着,将识别出的更好的配对添加到 RMP 的解方案池中,并开始下一次迭代。如果不能识别更好的配对(即没有路径是负代价的),算法结束。设 π_j 表示航班覆盖约束

的第 j 行。决策变量 x_p (配对或路径 p) 的降低成本在以下等式中表示。 c_p 代表 x_p 的降低成本, c_p 定义在等式(28)中。在模型 RCPN: $c_p = \omega_1 (K + \sum_{(n_p^-, n_p^+) \in A_p} t_{n_p^-, n_p^+}^-)_{\Delta} + \omega_2 (|F_{daf}^p| - |F_{daf}^p|)_{\Delta} + \Omega_p \vartheta, \bar{c}_p = c_p - \sum_{j \in F} a_{pj} \pi_j$ 。

4 算例实验

本文选取 6 个示例来进行试验,通过小规模算例来说明改进模型的可行性。示例选取 10 位机长(Captain),15 位副机长(First officer),共有 6 个离港站点或者到达站点,分别是 NKX、PGX、PDX、CTH、PXB、XGS、PLM,各机组在执行完任务后,回到基地 NKX(Base)。

由于 RCPN 的目标是通过基于数字的度量来提高配对的鲁棒性,因此可以直观地看到,从 RCPN 获得的解决方案的受偏差影响的飞行次数大幅减少(平均 88.7%)。值得注意的是,RCPN 的表现比原始模型更差,因为此模型产生了更少的无偏差影响的航班(平均减少了 8.6%)。因此,即使应用基于数字的度量来判断,RCPN 模型更稳健。在将所提出的模型与基础模型进行比较之后,将讨论原始模型和 RCPN 的性能比较如下。

参考图 2,示例如表 2 中编号 1 的航班,航班 FA680 预定到达机场时间为 9:30,但由于不可抗力因素导致到达延误,从而干扰到下一个 FA681 航班的运行。参考图 4,示例如表 2 中编号 2 的航班,航班 FA812 存在到达延误的情况,进而航班 FA813 会出现离场延误的情况,预计延误就会发生,此航班属于受偏离影响航班,因为在前序航班延误的扰动下,其离场出现延误,并且预计到达时间和预定到达时间出现偏差。对于航班 FA854,它预定离场

表 2 原始模型部分分配

日期	编号	任务环	执勤时间/h	分配机组
08-11	1	FA680(8:00—9:30)→FA681(10:10—11:40)	3.67	a1b1
	2	FA812(12:20—14:10)→FA813(14:50—16:40)→FA854(17:20—19:00)→FA855(19:45—21:30)	9.00	a2b2
	3	FA884(11:30—13:50)→FA885(14:30—16:50)→FA864(17:30—19:15)→FA865(20:00—21:45)	10.17	a3b3
08-12	4	FA680(8:00—9:30)→FA681(10:10—11:40)	3.67	a4b4
	5	FA812(12:20—14:10)→FA813(14:50—16:40)→FA854(17:20—19:00)→FA855(19:45—21:30)	9.00	a5b5
	6	FA864(17:30—19:15)→FA865(20:00—21:45)	4.17	a6b6
	7	FA872(7:55—9:00)→FA873(9:40—10:50)→FA884(11:30—13:50)→FA885(14:30—16:50)	8.92	a7b7

注:a1b1 表示一个正机长搭配一个副机长。

时间真实离场时间一致,因两者时间段存在重叠区域,所以并不受前序航班 FA813 的影响。因此,FA854 属于不受偏离影响的航班。表 2 和表 3 给出手算和模型两种方式下的航班环分配结果。表 4 给出模型得出的详细结果,表 5 为将原始手算成本与模型得出的成本进行对比。

表 3 基于 RCPN 改进模型部分分配

日期	编号	任务环	执勤时间/h	分配机组
08-11	1	FA680(8:00—9:30)→FA681(10:10—11:40)→FA812(12:20—14:10)→FA813(14:50—16:40)	5.00	a1b1
	2	FA854(17:20—19:00)→FA855(19:45—21:30)→FA680(8:00—9:30)→FA681(10:10—11:40)	9.00	a2b2
	3	FA884(11:30—13:50)→FA885(14:30—16:50)→FA864(17:30—19:15)→FA865(20:00—21:45)	10.17	a3b3
08-12	4	FA812(12:20—14:10)→FA813(14:50—16:40)→FA854(17:20—19:00)→FA855(19:45—21:30)	9.00	a4b4
	5	FA864(17:30—19:15)→FA865(20:00—21:45)→FA680(8:00—9:30)→FA681(10:10—11:40)	12.33	a5b5
	6	FA872(7:55—9:00)→FA873(9:40—10:50)→FA884(11:30—13:50)→FA885(14:30—16:50)	8.92	a6b6

表 4 详细结果

示例	单次飞行执勤 中航班数量	不受偏离影响 航班数量	受偏离影响航班 数量(无极端延误)	极端延误 航班数量	总偏离影响 航班数量	基本运营 成本/元
1	10	5	0	0	0	233 000
	12	4	0	0	0	279 500
	12	8	1	0	1	279 500
2	12	3	1	0	1	279 500
	14	6	0	1	0	326 000
	14	10	1	0	3	326 000
3	12	10	0	1	1	279 500
	14	8	0	0	1	326 000
	16	9	1	2	0	372 700
4	14	6	1	1	1	326 000
	14	7	0	1	2	326 000
	14	6	0	0	5	326 000
5	14	10	1	1	0	326 000
	14	12	1	0	1	326 000
	14	10	0	1	0	326 000

表 5 示例结果对比

示例	基本运营成本		不受偏离影响航班数量		总偏离影响航班数量	
	RCPN	BASE(原始)	RCPN	BASE(原始)	RCPN	BASE(原始)
1	233 000	237 000	5	4	0	1
	279 500	282 500	4	3	0	1
2	279 500	282 500	8	8	1	1
	279 500	283 500	3	3	1	1
3	326 000	341 000	6	6	0	0
	326 000	341 000	10	9	3	4
4	279 500	283 500	10	9	1	2
	326 000	334 000	8	9	1	2
5	372 700	376 700	9	9	0	1
	326 000	350 000	6	6	1	1
6	326 000	360 000	7	7	2	2
	326 000	360 000	6	6	5	5

注:对比结果不考虑鲁棒成本,此处列举基本运营成本。计算只考虑延误成本和极端延误成本。每延误 1 min,延误成本增加 197 元^[6]。

5 结论与展望

原始模型中不考虑飞行时间的变化,但是产生了许多极端延迟的飞行。RCPN 改进模型可以完全避免极端延迟的情况。极端延误的航班对航空公司的形象造成重大损害。因此,RCPN 改进模型可以使航空公司受益很多。RCPN 改进模型得到的结果对飞行时间变化的干扰具有较高的抵抗力。

由于每次飞行可能需要每个机组人员级别的不同数量的机组人员,探索如何将驾驶舱人员配对的鲁棒性增强策略(如机组人员交换)应用于机组人员是一个很有前途的未来研究方向。此外,机组人员恢复操作需要有效的解决方案算法,以尽快减少中断的负面影响。更重要的是,先进信息技术(如大数据和智能交通系统)的快速发展为航空公司改善机组人员恢复决策带来了新的机会。例如,当采用机组人员交换策略时,航空公司可以通过分析大量的实时数据,评估其预定航班的延迟概率,从而选择最合适的机组人员进行交换。

参考文献

[1] ANTUNES D,VAZE V,ANTUNES A P. A robust pairing model for airline crew scheduling[J]. Transportation Science,2019,53(6):1751-1771.

[2] CHUNG S H,MA H L,CHAN H K. Cascading delay risk of airline workforce deployments with crew pairing and schedule optimization[J]. Risk Analysis, 2017, 37 (8):

1443-1458.

[3] SUN X,CHUNG S H,MA H L. Operational risk in airline crew scheduling:do features of flight delays matter? [J]. Decision Sciences,2020:12426.

[4] CHUNG S H,TSE Y K,CHOI T M. Managing disruption risk in express logistics via proactive planning[J]. Industrial Management & Data Systems, 2015, 115 (8): 1481-1509.

[5] IONESCU L,GWIGNER C,KLIEWER N. Data analysis of delays in airline networks[J]. Wirtschaftsinformatik,2016,58(2):119-133.

[6] DUNBAR M,FROYLAND,WU C L. Robust airline schedule planning:minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework[J]. Transportation Science,2012,46(2):204-216.

[7] DUNBAR M,FROYLAND G,WU C L. An integrated scenario-based approach for robust aircraft routing,crew pairing and re-timing[J]. Computers & Operations Research,2014,45:68-86.

[8] AKTÜRK M S,ATAMTÜRK A,GUREL S. Aircraft re-scheduling with cruise speed control[J]. Operations Research,2014,62(4):829-845.

[9] 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则:CCAR-121-R7[S]. 北京:中国民用航空局,2017.

[10] FERGUSON J,KARA A Q,HOFFMAN K,et al. Estimating domestic US airline cost of delay based on European model[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2013,33:311-323.

[11] WEN X,MA H L,CHUNG S H,et al. Robust airline crew scheduling with flight flying time variability[J]. Transportation Research Part E,2020,144:102132.

Robust Airline Crew Scheduling with Flight Flying Time Variability

ZHAO Pei, ZENG Shi, FENG Jun

(School of Airport,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: The flying time variability considered is based on the change of cruise speed, and the flight personnel pairing problem is studied from the tactical planning stage. Taking the minimum basic operation cost and maximum robustness as the goal and improving costing, the robust crew pairing model with number-based measure(RCPN) improved model is established, the number of deviated flights and non-deviated flights is proposed as the robust index for evaluation, and the column generation method is used to solve it. Comparing the manual calculation results with the RCPN model results, the results show that the average operating cost of the RCPN model is reduced by 3.9% compared with other average operating costs. This model can improve the robustness of the solution by 21% while increasing operating costs by 3.9%, and the model can avoid extreme flight delays. It can provide reference and decision support for airline scheduling personnel.

Keywords: crew scheduling;robust scheduling;flying time variability;column generation