

机场任务指派问题的优化方案研究

田倩南 李昆鹏 李文莉 徐东洋

【摘 要】本文研究了机场任务指派问题,该问题是指将具有特殊属性的任务指派给有限数量的班次。由于机场任务和班次属性的多样性,机场任务指派问题是一个复杂的组合优化问题,属于 NP - 完全问题。本文以任务完成产生的效益总和最大化为目标建立数学优化模型,提出有效不等式,应用 CPLEX 软件对实际数据进行求解,结果表明,CPLEX 可以在较短时间内对一定规模的算例求得最优解。同时对影响目标函数的四个因素:任务数量、班次数量、班次工作时长和任务属性分别进行分析,通过实际算例测试对比,得出具有指导意义的结论,即根据机场特征分别调整四个因素不仅能够提高机场资源的有效利用率,而且能够提高机场的运行效率和服务水平。

【关键词】机场任务指派;NP - 完全问题;地勤服务;有效不等式

【作者简介】田倩南(1989 -),女,河南驻马店人,华中科技大学管理学院博士研究生,研究方向:航线优化问题、车辆路径问题;;李昆鹏(1978 -),男,湖北武汉人,华中科技大学管理学院教授,博士,研究方向:物流与供应链与管理、生产运作管理;李文莉(1992 -),女,河南周口人,华中科技大学管理学院博士研究生,研究方向:物流路径优化(湖北 武汉 430074);徐东洋(1988 -),男,河南驻马店人,河南大学商学院讲师,博士,研究方向:物流与供应链管理、生产运作管理(河南 开封 475004)。

【原文出处】《运筹与管理》(合肥),2019.11.1~8

【基金项目】国家自然科学基金面上项目(71372133)。

0 引言

随着经济的快速全球化发展,航空工业在社会和经济体系中扮演着越来越重要的角色(参见 Beritella 等^[1])。机场作为航空运输过程的重要组成部分,它是人类在地面上操作的最复杂系统之一,其中,机场地面服务工作在保证飞机安全着陆和正常操作方面起着重要作用。机场地面服务工作包含了很多方面,比如,机器维修和清理、行李卸载或装载、餐饮服务以及咨询服务等,这些服务通常需要专业人员,或者特殊装备,或者两者兼备。任务指派问题是一个复杂的组合优化问题,对较大规模任务指派模型的求解具有很大的难度,当任务和班次的数量很大时,问题变得很复杂,是一个 NP - complete problem(Savelsbergh),并且这些任务要求在飞机到达时间和下次起飞时间之间被执行完毕,那么任务的推迟将会引起航班的推迟,因此,机场地面任务调度对航班的正常操作起着重要作用^[2]。

Baker^[3]提出了几个基于员工工作负荷排班的数学模型,并将模型应用于多个工种类型的领域。Nagraj 和 Richard^[4]运用网络流技术,研究了基于工作负荷的员工排班问题。Chu 和 Chan^[5]研究了机组人员弹性排班的问题,排班模型是整数规划模型,其目标是在排班结果维持一定员工富余量的基础上最小化需要加班的员工人数。Luca 等^[6]提出了最少班次排班模型,其目标在满足员工负荷与实际需求负荷之差在一定可接受范围内的情况下,最小化员工的班次数和最小化员工的使用数。Detienne 等^[7]由于地面服务调度复杂性的原因,把解决员工调度问题分解为三步骤去求解。Tommy^[8]研究了多任务需求的排班问题,每一项任务都需要有特定的资格才能完成,而每一名员工都会拥有若干项资格,因而每一名员工的人力资源成本也不相同,文中建立了模型的目标约束规则库,使用带有对偶松弛参量的模拟退火算法进行求解,并验证了算法的效率和鲁棒性。这

些算法对于小规模算例可以求得问题的最优解,当问题规模变大时,变量个数和约束条件都成指数增加,不能给出最优解,只能给出近似解。Soukour 等^[9]、Ip 等^[10]、Jiang 等^[11]和 Ascó 等^[12]分别提出的文化基因算法(Memetic Algorithm, MA)、遗传算法、改进的基因算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)和构建启发式算法来求解大规模问题的近似解。用 CPLEX 软件对模型进行精确求解的研究很少,如 Zou 等^[13]因为模型中缺乏有效不等式,即使是对小规模算例精确求解也会需要很长时间。

国内关于机场地勤服务任务指派问题的研究较少,主要集中在机场地面作业调度问题^[14]、地勤服务车辆优化调度问题^[15,16]以及进离港航班排序优化问题上^[17,18]。付晓微等^[19]研究了每个人承担的工作数不受限制,但每项工作只能由一人承担的情况。唐非等^[20]针对保障航班离港无延误的地勤服务调度优化问题,建立了以特种车辆数最小化、无效服务时间比率最小化和特种车辆服务时间方差最小化的多目标函数,提出了一种新的多阶段启发式算法。

表 1 有 5 个任务和三个班次的指派问题

$TaskNo$	TT^*	TE	TS	TP	TQ	$Tpro$
T_1	TT_1	245	380	3	1586	2
T_2	TT_2	250	670	3	1275	0
T_3	TT_3	270	390	5	1355	3
T_4	TT_4	295	325	1	1286	0
T_5	TT_5	325	355	4	1286	1

$ShiftNo$	SS	SE	SQ	$Spro$
S1	240	750	1200	3
			1358	1
			1586	3
			1282	1
			1585	3
S2	270	780	1605	0
			1745	0
			1585	0
			1605	3
S ₃	SS ₃	SE ₃	1586	1

表 1 给出五个任务和三个班次任务指派问题,左边给出的是任务及其属性:任务编号 (TaskNo)、类型 (TT)、任务的开始 (TS) 和结束 (TE) 时间、任务的优先级 (TP)、执行任务要求人员所具有的资格 (TQ) 以及要求相应资格的精通程度 (Tpro); 右边给出了是班次及其属性:班次编号 (Shift No)、工作时间 (SE - SS)、资格集合 (SQ) 以及其分别对应的精通程度 (Spro)。每个班次有多种资格,每种资格分别对应相应的精通程度。当一个任务被班次所完成时会产生相应的效益((TE - TS) × TP)。要满足一定的约束才能执行该任务,比如:对于表 1 中任务 T₁,要求时间长度上满足 135 (TE - TS),资格为 1586 (TQ₁) 和其资格对应的精通程度为 2 (TQ₁); 而对于班次 S₁,工作时长 510 (SE - SS),拥有多种资格 1200、1358、1586 以及对对应资格的精通程度分别为 3、1、3。基于表 1 的数据,任务的开始和结束时间包含在班次 S₁ 的开始和结束时间内,并且也满足资格和熟练程度的要求,因此任务可以指派给班次 S₁,产生的效益是 405 ((T₃ - TS) × TP)。

本文研究的机场任务指派问题由一定数量的任务和班次组成,这些任务和班次都具有多种属性,每个任务的完成会产生一定的效益,而完成这些任务需要满足一定的约束条件,由于班次个数有限,这些班次在满足相应的约束条件下尽可能多的完成这些任务,使产生的效益最大化。我们知道对于机场的地勤人员来说,每天需要完成大量的任务,但是地勤人员的数量有限,大多数情况下不可能完成所有的任务,这就需要根据任务的特性和机场地勤人员的排班计划去安排执行哪些任务,放弃执行或者推迟执行哪些任务。本文根据研究问题的特征建立了数学优化模型并提出了有效不等式,应用 CPLEX 软件可以在短时间内获得问题的最优解,并

且通过不同的实验数据对任务和班次的不同性质进行了探讨,不仅对机场服务能力和资源利用效率的提高产生影响,而且对机场的运营效率和成本也有着显著影响。

1 问题模型构建

集合:

T :任务集合; S :班次集合; D :任务所属的日期或者班次中工作人员值班的日期;本文只考虑一天中的任务指派问题,所以 $d \in D$ 是固定的,即只考虑同一天的任务集合和工作人员集合。

集合变量:

N :任务的数量, $N = |T|$; M :班次的数量, $M = |S|$; TS_i :任务 i 的开始时间, $i \in T$; TE_i :任务 i 的结束时间, $i \in T$; TT_i :任务 i 的类型, $i \in T$; TP_i :任务 i 的优先级, $i \in T$; TQ_i :执行任务 i 的资格要求, $i \in T$; $Tpro_i$:执行任务 i 所需最低的资格精通程度, $i \in T$; SS_s :班次 s 的开始时间, $s \in S$; SE_s :班次 s 的结束时间, $s \in S$; SQ :标记,本文的取值范围是 $1 \sim 9$,意思是每个班次最多拥有 9 个 SSQ ; SSQ_m :班次 s 拥有的第 n 个资格,其中, $s \in S, n \in SQ$; $Spro$:整数标记,本文的取值范围是 $1 \sim 9$; $SSpro_{sm}$:班次 s 所拥有第 m 个资格的精通程度,其中, $s \in S, m \in Spro$ 。

变量:

d_{ij} :任务 i 和 j 任务之间的距离,其中, $i, j \in T$ 。这里的距离用时间表示; c_{ijs} :任务 i, j 被班次 s 执行所产生的效益,其中, $i, j \in T \cup \{0\}, s \in S$, 即 $(c_{ijs} = (TE_i - TS_i) \times TP_i + (TE_j - TS_j) \times TP_j)$; r_s :班次 s 完成的任务集合,这个任务集合用 r 表示, $s \in S$; c_s :班次 s 在满足一定条件下完成任务集合 r_s 产生的效益, $s \in S$, 即, $c_s = \sum_{i \in r_s} ((T_i - TS_i) \times TP_i)$; $\bar{M}$:一个较大的非负常数; H :非负变量,代表最后完成的任务数。

决策变量:

x_{ijs} :如果班次 s 执行了任务 i, j 取值为 1, 否则为 0, 其中, $s \in S, i, j \in T \cup \{0\}$ 。

根据上面变量的定义,建立如下整数规划模型:

$$\max \frac{1}{2} \times \left(\sum_{s \in S} \sum_{i \in T \cup \{0\}} \sum_{j \in T \cup \{0\}} c_{ijs} x_{ijs} \right) \quad (1)$$

$$s. t. \sum_{i \in T} x_{0is} = 1, s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T} x_{i0s} = 1, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} x_{ijs} \leq 1, i, j \in T \cup \{0\} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in T, i \neq h} x_{ih} - \sum_{j \in T, i \neq h} x_{hj} = 0, h \in T, h \neq 0, s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i \in T, i \neq 0} x_{iis} = 0, s \in S \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} SSQ_{s,n} \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = TQ_i \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, n \in Spro \\ Tpro_i \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} \leq SSpro_{s,m} \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, m \in SQ, m = n \\ \prod_{m \in SQ} (TQ_i - SSQ_{s,m}) \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = 0, i \in T, s \in S \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} SSQ_{s,n} \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = TQ_i \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, n \in Spro \\ Tpro_i \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} \leq SSpro_{s,m} \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, m \in SQ, m = n \\ \prod_{m \in SQ} (TQ_i - SSQ_{s,m}) \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = 0, i \in T, s \in S \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} SSQ_{s,n} \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = TQ_i \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, n \in Spro \\ Tpro_i \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} \leq SSpro_{s,m} \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, m \in SQ, m = n \\ \prod_{m \in SQ} (TQ_i - SSQ_{s,m}) \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} = 0, i \in T, s \in S \end{array} \right. \quad (9)$$

$$SS_s - TS_i \leq (1 - x_{ijs}) M, i \in T, i \neq 0, j \in T, j \neq i, s \in S \quad (10)$$

$$TE_i - SE_s \leq (1 - x_{ijs}) M, i \in T, i \neq 0, j \in T, j \neq i, s \in S \quad (11)$$

$$TE_i + d_{ij} - TS_j (1 - x_{ijs}) \bar{M}, i \in T, i \neq 0, j \in T, j \neq 0, j \neq i, s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{i \in T \cup \{0\}} \sum_{j \in T \cup \{0\}} \sum_{s \in S} x_{ijs} = H + M, H \leq N \quad (13)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{s \in S} x_{0is} \leq M \quad (14)$$

$$x_{ijs} \in \{0, 1\}, i, j \in T \cup \{0\}, s \in S \quad (15)$$

式(1)表示目标函数,最大化任务指派所产生的效益,其值等于由班次所完成任务产生的效益,由于每一个被完成的任务在 $\sum_{s \in S_i} \sum_{t \in T \cup \{0\}} \sum_{j \in T \cup \{0\}} c_{ijs} x_{ijs}$ 这里都被计算了两次,所以系数要乘以1/2;式(2)表示每一个班次都从任务0开始(这里任务0表示空任务);式(3)表示每一个班次最后都回到任务0;式(4)表示每一个任务最多由一个班次去完成,由于通常情况下班次数量有限,而任务的数量会多于班次数量,所以会有一部分任务没有被完成;式(5)表示流量守恒约束;式(6)表示每一个任务不允许被多次完成;式(7~9)表示一个任务如果被一个班次执行,那么就要满足资格要求以及相应资格精通程度相匹配的要求,同时,资格和精通程度在一个维度上,即 $n=m$;式(10)表示在同一天里,当班次去完成一个任务时,班次开始的上班时间不能大于这个任务的开始执行时间;式(11)表示在同一天里,当班次去完成一个任务时,班次的下班时间不能小于这个任务的结束时间;式(12)表示当两个任务被同一个班次去完成时,那么要满足距离上的要求,文中所涉及到的所有距离矩阵严格满足三角不等式;式(13)表示给定一定数量的班次之后,由这些班次总共完成的任务的数量;式(14)表示完成任务的班次个数不能超过已知的班次数量;式(15)表示决策变量 x_{ijs} 属于0-1变量。

2 模型分析与有效不等式

不等式(4)表示每个任务最多由一个班次去执行,这里使用关联矩阵 A 解释说明。设矩阵 A 是 $N \times M$ 维,任务 t 和班次 s 的关联矩阵如下所示:

$$T \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & \cdots & S \\ t_1 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ t_2 & 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ t_3 & 1 & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \uparrow & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \text{任务} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{班次} \\ \\ \\ \leftarrow \text{关联矩阵} \\ \\ \end{matrix}$$

矩阵的行表示任务(N 个),列表示班次(M 个),矩阵中的元素:“0”表示因为不满足约束条件,该任务不能分配给对应列的班次去执行,“1”表示满足一定约束条件任务可以分配给对应列上的班次去执行。不等式(4)表示每行的值相加不大于1,即不是所有的任务都能被班次执行(班次的个数有限,远少于任务的个数)。

变量 $Tpro_i$ 表示执行任务 i 所需资格的最低精通程度, $i \in T$, 由不等式 (8) 可知班次 s 在满足资格要求的条件下, 还要求相应资格的精通程度不低于 $Tpro_i$, 为了避免资源浪费, 尽量安排精通程度相近的班次去执行该任务, 即不等式 (8) 可以变成下面的有效不等式:

$$Tpro_i \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} \leq SSpro_{s,m} \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs} \leq (Tpro_i + \theta) \times \sum_{j \in T, j \neq i} x_{ijs}, i \in T, i \neq 0, s \in S, m \in SQ, m = n \quad (16)$$

其中, θ 根据测试数据的值来设定。

不同的任务类型之间的距离 $d_{ij}, i, j \in T$ 且 $i \neq j$ 是不同的, 而距离的值越大说明花费在两个任务之间路上的时间越多, 造成时间浪费, 这个不利于提高班次的利用率, 因此在对数据进行处理随机选取测试算例时, 添加如下不等式:

$$d_{ii} \leq D, i, j \in T \text{ 且 } i \neq j \quad (17)$$

其中, D 机场数据的实际情况进行设定。

另外,由不等式(10)可知当任务被班次执行时,班次开始的上班时间不能大于这个任务的开始执行时间,对于该班次执行的所有任务都要满足,但是对于该班次执行的第一个任务,除了满足不等式(10)以外,还应该限制班次的等待时间,添加如下不等式:

$$(TS_i - SS_s)x_{0is} \leq 1/3(SE_s - SS_s), i \in T, i \neq 0, s \in S \quad (18)$$

即,班次的等待时间不大于其上班总时间的三分之一。

3 实验结果

3.1 算例生成与数据分析

本文所有测试是在 3.7GHz CPU 和 2GB RAM 计算机上进行,使用 12.2 版的 CPLEX 优化软件,利用实际数据对模型进行验证分析。实际数据中任务属性包括:“任务编号”、“任务类型”、“任务的开始时间”、“任务的结束时间”、“任务的优先级”和“任务的资格要求/相应资格的熟练程度”,班次属性包括:“班次编号”、“班次的开始时间”、“班次的结束时间”和“班次的资格集合/分别对应的精通程度”,并且通过对公司的实际数据进行分析,发现每天大概有四百多个任务和一百多个班次,任务和班次比例是 3.3:1,但是根据实际数据的分析发现,不同任务类型之间的“ d_{ij} ”不同,为了减少不必要的时间花费,根据机场数据的实际情况设置 $D = 14$ 比较合适,即同一算例中任务之间的“ d_{ij} ”的值被控制在一定范围内,对原始数据处理之后,最大规模的算例中包含的任务量不超过 200 个。本文测试的算例是从公司实际数据中随机生成的。我们用“ $T_{xx} - s_{xx}$ ”代表一个算例,其中 T 代表任务, s 代表班次。比如:“T10 - s3”表示该算例中有 10 个任务和 3 个班次。由实际数据可知,设置 $\theta = 2$ 比较合适,运算时间限制在 3600s 内。

首先对小规模算例进行测试,测试结果见表 2。第一列“算例”表示算例规模,“最优解”表示算例的最优解,“用时(s)”表示 CPLEX 求解所用的时间(秒),最后一行分别给出了“最优解”和“用时(s)”的均值。数据结果表明利用 CPLEX 软件可以在短时间内求出小规模算例的最优解。随着算例规模的增加,时间复杂度和空间复杂度成指数增加,CPLEX 求解软件在求解大规模算例时,其运算时间相应增加,在规定时间内可以对规模“T200 - 360”的算例求得最优解,大规模算例的测试结果见表 3。

表 2 CPLEX 对小规模算例的测试结果

算例	CPLEX	
	最优解	用时(s)
T10 - s3	570.0	3.62
T17 - s5	1170.0	4.03
T23 - s7	1025.0	6.96
T30 - s9	3450.0	11.25
T36 - s11	5540.0	18.63
T43 - s13	4895.0	20.12
T50 - s15	8670.0	37.56
T56 - s17	9705.0	41.73
T63 - s19	8525.0	42.05
T69 - s21	13580.0	56.49
T76 - s23	14635.0	78.05
T83 - s25	15780.0	125.27
Average	7295.4	37.15

表 3 CPLEX 对大规模算例的测试结果

算例	CPLEX	
	最优解	用时(s)
T100 - s30	16895.0	201.56
T110 - s33	21620.0	936.04
T120 - s36	22675.0	849.70
T130 - s39	26320.0	1302.41
T140 - s42	24095.0	1793.05
T150 - s45	29675.0	1820.73
T160 - s48	35390.0	1908.48
T170 - s51	36325.0	2024.59
T180 - s54	33295.0	2596.01
T190 - s57	34745.0	3018.30
T200 - s60	43145.0	3492.56
Average	29470.9	1813.04

3.2 分析四种因素对目标函数的影响

3.2.1 任务数量对目标函数的影响

表 4 中第一、四和七列给出了不同规模的算例,分别选 $s = 10, 20$ 和 30 时, $T = 10, 20, 30, \dots, 110$, 三组算例,并且每组中下一行的算例都是在上一行算例的基础上只随机增加 10 个任务(保持其他属性不变),比如算例“T10 - s10”和“T20 - s10”中的班次相同,后一个算例中的任务是在前一个算例的基础上随机增加了 10 个。测试结果显示,每组中,在保持其他三种因素相同的情况下,只增加任务个数时,目标函数值呈非减形式增加,这就表明当班次一定时,适当增加任务数量,可以提高班次的利用率。

表 4

任务数量对目标函数影响

算例	CPLEX		算例	CPLEX		算例	CPLEX	
	最优解	用时(s)		最优解	用时(s)		最优解	用时(s)
T10 - s10	950.0	4.63	T10 - s20	1535.0	7.12	T10 - s30	1865.0	9.47
T20 - s10	2750.0	8.74	T20 - s20	3335.0	11.04	T20 - s30	3905.0	15.85
T30 - s10	3360.0	15.04	T30 - s20	4610.0	21.16	T30 - s30	5765.0	31.06
T40 - s10	4835.0	28.25	T40 - s20	6650.0	38.39	T40 - s30	7925.0	50.25
T50 - s10	5675.0	30.17	T50 - s20	8195.0	47.52	T50 - s30	10310.0	61.63
T60 - s10	5675.0	32.86	T60 - s20	8390.0	55.30	T60 - s30	11540.0	86.71
T70 - s10	5675.0	47.23	T70 - s20	8420.0	63.17	T70 - s30	12155.0	107.39
T80 - s10	5870.0	57.16	T80 - s20	9485.0	86.20	T80 - s30	13820.0	148.67
T90 - s10	5940.0	68.61	T90 - s20	9680.0	97.52	T90 - s30	14645.0	179.90
T100 - s10	7650.0	74.23	T100 - s20	11765.0	118.20	T100 - s30	16895.0	201.56
T110 - s10	7650.0	77.69	T110 - s20	12425.0	124.06	T110 - s30	17995.0	234.51
Average	5093.6	40.42	Average	7680.9	61.43	Average	10620.0	102.45

3.2.2 班次数量对目标函数的影响

同理,表 5 检验保持任务不变,增加班次数量对目标函数值的影响。表 5 中第一、四和七列中分别选择 $T = 80, 100$ 和 $120, s = 10, 15, 20, \dots, 60$, 三组算例,即每组中下一行的算例都是在上一行算例的基础上只随机增加 5 个班次(保持其他属性不变),比如算例“T80 - s10”和“T80 - s15”中的任务相同,后一个算例中的班次是在前一个算例的基础上随机增加了 5 个。测试结果表明,每组中,在保持其他三种因素相同的情况下,只增加班次个数时,目标函数呈非减形式增加。另外,虽然每组中班次的数量按公差 5 增加,但是目标函数的增加相对于表 4(任务数量按公差 10 增加)的增加效果更加明显。这是因为,在实际的数据中本来任务的数量就远远大于班次的数量,当班次数量增加时,将会有更多的任务被执行,所以目标函数值随之增加。这就表明当任务数量一定时,适当增加班次数量,可以提高任务的被执行率。

表 5

班次数量对目标函数影响

算例	CPLEX		算例	CPLEX		算例	CPLEX	
	最优解	用时(s)		最优解	用时(s)		最优解	用时(s)
T80 - s10	5870.0	57.16	T100 - s10	7650.0	74.23	T120 - s10	7770.0	80.21
T80 - s15	8015.0	70.12	T100 - s15	9795.0	107.79	T120 - s15	9915.0	119.37
T80 - s20	9485.0	86.20	T100 - s20	11765.0	118.20	T120 - s20	12620.0	134.81
T80 - s25	11800.0	115.03	T100 - s25	14195.0	167.11	T120 - s25	15865.0	251.02
T80 - s30	13820.0	148.67	T100 - s30	16895.0	201.56	T120 - s30	18635.0	271.28
T80 - s35	14330.0	186.73	T100 - s35	17960.0	313.71	T120 - s35	20135.0	421.48
T80 - s40	14465.0	249.36	T100 - s40	18260.0	416.03	T120 - s40	20840.0	657.10
T80 - s45	14705.0	411.96	T100 - s45	18640.0	661.08	T120 - s45	21475.0	801.81
T80 - s50	14705.0	489.45	T100 - s50	18640.0	714.62	T120 - s50	21615.0	919.24
T80 - s55	14705.0	512.63	T100 - s55	18640.0	771.56	T120 - s55	22050.0	1020.67
T80 - s60	15365.0	684.90	T100 - s60	19585.0	819.73	T120 - s60	23145.0	1122.70
Average	12478.6	273.84	Average	15638.6	396.87	Average	17642.3	527.24

3.2.3 班次工作时长对目标函数的影响

通过对实际数据的检验发现,部分任务的任务时长是 30 分钟(“TE - TS = 30”),存在着一些班次满足资格和精通程度等的要求,然而由于这些班次没有足够的工作时长(“SE - SS”),导致这些任务不能被完成。在实际情况中,为了完成一些当天的任务而延长半个小时的工作时长是很普遍的现象。表 6 给出了改变班次的工作时长对目标函数值的影响,这里以表 2 中的小规模算例作为一组对比算例放在第四列中(称为“原算例”),其中,第一列是在“原算例”的基础上把每个算例中班次的工作时长减少 30 分钟(其他属性保持不变)得到的,第七列是在“原算例”的基础上把每个算例中班次的工作时长增加 30 分钟(其他属性保持不变)得到的。测试结果显示,在保持其它三种因素相同的情况下,只改变班次的工作时长时,“最优解”的均值随着班次工作时长的降低从“7295.4”降低到“6999.6”,而随着班次工作时长的增加从“7295.4”增加到“7491.7”,然而平均计算时间上却变化不大,这表明适当增加班次的工作时长,对机场的任务完成率以及班次的工作效率都有所提高,同时对目标函数值有显著提高。

表 6 班次工作时长对目标函数影响

CPLEX(减少 30 分钟)			CPLEX(原算例)			CPLEX(增加 30 分钟)		
算例	最优解	用时(s)	算例	最优解	用时(s)	算例	最优解	用时(s)
T10 - s3	570.0	3.62	T10 - s3	570.0	3.62	T10 - s3	570.0	3.62
T17 - s5	1170.0	4.03	T17 - s5	1170.0	4.03	T17 - s5	1170.0	4.03
I23 - s7	890.0	7.09	T23 - s7	1025.0	6.96	T23 - s7	1525.0	7.45
T30 - s9	3450.0	11.31	T30 - s9	3450.0	11.25	T30 - s9	3950.0	13.52
T36 - s11	4880.0	18.49	T36 - s11	5540.0	18.63	T36 - s11	5600.0	18.82
T43 - s13	4340.0	19.89	T43 - s13	4895.0	20.12	T43 - s13	5165.0	24.07
T50 - s15	8240.0	38.56	T50 - s15	8670.0	37.56	T50 - s15	8835.0	40.20
T56 - s17	9275.0	40.95	T56 - s17	9705.0	41.73	T56 - s17	9870.0	44.23
T63 - s19	8125.0	41.30	T63 - s19	8525.0	42.05	T63 - s19	8645.0	45.07
T69 - s21	13365.0	55.67	T69 - s21	13580.0	56.49	T69 - s21	13975.0	60.87
T76 - s23	14050.0	77.40	T76 - s23	14635.0	78.05	T76 - s23	14635.0	78.08
T83 - s25	15640.0	118.45	T83 - s25	15780.0	125.27	T83 - s25	15960.0	130.41
Average	6999.6	36.40	Average	7295.4	37.15	Average	7491.7	39.20

3.2.4 降低任务要求对目标函数的影响

由于任务的数量远大于班次数量,根据目标函数值的设定,被执行任务数量越多,对目标函数越有利,(班次数量有限)。所以对任务进行分类,任务要求较低的分成一类,验证降低任务要求对目标函数值的影响。表 7 给出了降低任务要求(资格)对目标函数值的影响,这里以表 2 中的小规模算例作为一组对比算例放在第一列中(称为“原算例”),其中,第四列是在“原算例”的基础上把每个算例中任务的资格要求降低 25%(其他属性保持不变)得到的,第七列是在“原算例”的基础上把每个算例中任务的资格要求降低 50%(其他属性保持不变)得到的。

表 7 的测试结果显示,在保持其它三种因素相同的情况下,随着任务要求的降低,目标函数值增加,最后,当任务的资格要求降低 50%时,“最优解”的均值从“7295.4”增加到“9190.0”,增加了“26.0%”。通过均值的变化发现,降低任务对资格的要求会对目标函数产生很大程度的影响,从而对机场任务完成率影响更直观。因此,当班次给定时,降低任务的资格要求可以增加任务的完成率,使收益更大,即选择降低任务对资格的要求对目标函数的影响更显著。

表 7 降低任务要求对目标函数影响

算例	CPLEX(原算例)		算例	CPLEX(降低 TQ(25%))		算例	CPLEX(降低 TQ(25%))	
	最优解	用时(s)		最优解	用时(s)		最优解	用时(s)
T10 - s3	570.0	3.62	T10 - s3	1120.0	3.79	T10 - s3	1770.0	4.06
T17 - s5	1170.0	4.03	T17 - s5	1260.0	5.53	T17 - s5	3570.0	6.32
123 - s7	1025.0	6.96	T23 - s7	1820.0	7.72	T23 - s7	2020.0	7.88
T30 - s9	3450.0	11.25	T30 - s9	3870.0	12.58	T30 - s9	4200.0	13.10
T36 - s11	5540.0	18.63	T36 - s11	6600.0	20.43	T36 - s11	8760.0	21.04
T43 - s13	4895.0	20.12	T43 - s13	5180.0	22.14	T43 - s13	5720.0	24.26
T50 - s15	8670.0	37.56	T50 - s15	9825.0	39.47	T50 - s15	10545.0	40.45
T56 - s17	9705.0	41.73	T56 - s17	11460.0	43.22	T56 - s17	12630.0	44.58
T63 - s19	8525.0	42.05	T63 - s19	10360.0	44.06	T63 - s19	11685.0	45.30
T69 - s21	13580.0	56.49	T69 - s21	14170.0	59.82	T69 - s21	15025.0	61.07
T76 - s23	14635.0	78.05	T76 - s23	15170.0	85.27	T76 - s23	15440.0	86.12
T83 - s25	15780.0	125.27	T83 - s25	16360.0	133.96	T83 - s25	18915.0	140.07
Average	7295.4	37.15	Average	8099.6	39.83	Average	9190.0	41.19

4 总结

本文研究了机场任务指派问题,并建立了整数线性规划模型。机场方面的任务指派问题研究较少,大部分研究集中在机场车辆调度方面。本文针对机场任务指派问题进行了建模分析,提出了适合问题特征的有效不等式,结合公司的实际数据,调用 CPLEX 优化软件对线性规划模型进行求解,运行结果显示,在可接受的时间范围内可以求得较大规模问题的精确解。同时对影响目标函数的四个因素:任务数量、班次数量、班次工作时长和任务属性分别进行分析,通过实际算例测试对比,得出具有指导意义的结论,即根据问题特征分别调整四个因素不仅能够提高机场资源的有效利用率,而且能够提高机场的运行效率和服务水平。

本文的目标函数值是由完成的任务直接产生的,和任务的完成有关系,当班次能够完全执行完这个任务,才会把任务指派给这个班次,否则不会考虑。除了本文给出的目标函数,此外,还可以考虑满足“部分任务覆盖率”所产生的目标函数,因为对于有些任务,它们的工作时长可以灵活调整,只要达到所要求的任务覆盖率的最小百分比即可,也就是说一个任务可以在规定时间点过早或者过晚开始执行,只要完成程度(执行任务的连续时长)达到“部分任务覆盖率”就算此任务可以被执行。因而可根据各机场任务特性,为各机场考虑不同的目标函数结构。

参考文献:

[1] Berritella M, Franca L L, Zito P. An analytic hierarchy process for ranking operating costs of low cost and full service airlines[J]. Journal of Air Transport Management, 2009, 15(5): 249 - 255.

[2] Cheung A, Ip W H, Lu D. Expert system for aircraft maintenance services industry[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2005, 9(4): 348 - 358.

[3] Baker K R. Workforce allocation in cyclical scheduling problems[J]. Journal of the Operational Research Society, 1976, 27(1): 155 - 167.

[4] Nagraj B, Richard T W. A network model for the rotating workforce scheduling problem[J]. Networks, 1990, 20(1): 25 - 42.

[5] Chu C K, Chan C H. Crew scheduling of flight rail transit in Hong Kong: from modeling to implementation[J]. Computer & Operations Research, 1998, 25(11): 887 - 894.

- [6] Luca D G, Johannes G, Guy K. The minimum shift design problem[J]. Annals of Operations Research, 2003, 155(1): 79 – 105.
- [7] Detienne B, Péridy L, Éric P, Rivreau D. Cut generation for an employee timetabling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(3): 1178 – 1184.
- [8] Tommy C. A Rule – based local search algorithm for general shift design problems in airport ground handling[J]. Transportation Engineering Journal, 2010, 35(6): 189 – 199.
- [9] Soukour A A, Devendeville L, Lucet C, Moukrim A. A memetic algorithm for staff scheduling problem in airport security service[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(18): 7504 – 7512.
- [10] Ip W H, Wang D, Cho V. Aircraft ground service scheduling problems and their genetic algorithm with hybrid assignment and sequence encoding scheme[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 649 – 657.
- [11] Jiang Y, Xu X, Zhang H, Luo Y. Taxiing route scheduling between taxiway and runway in hub airport[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(1): 1 – 14.
- [12] Ascó A, Atkin J A D, Burke E K. An analysis of constructive algorithms for the airport baggage sorting station assignment problem[J]. Journal of Scheduling, 2014, 17(6): 601 – 619.
- [13] Zou X, Liu L, Li K, Li W. A coordinated algorithm for integrated production scheduling and vehicle routing problem[J]. International Journal of Production Research, 2017(1): 1 – 20.
- [14] 吕虹, 秦永彬, 罗聪. 基于 Memetic 算法的飞机地面作业调度问题研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 145 – 150.
- [15] 樊琳. 大型机场地勤服务中的车辆调度问题的初步研究[D]. 东北大学, 2009 年.
- [16] 樊玮, 吴建波, 衡红军. 基于多 Agent 的机场地面服务车辆调度方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2015(10): 256 – 259.
- [17] 王来军, 史忠科. 航班离场排序问题的遗传算法设计[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(9): 119 – 125.
- [18] 张建同, 杨文娟. 基于优先级的进离港飞机排序优化问题研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(6): 115 – 121.
- [19] 付晓薇, 郭强, 马芹芹. 一类非确定型多目标指派问题及其算法研究[J]. 运筹与管理, 2013(6): 34 – 38.
- [20] 唐非, 刘树安, 董昕禹. 多阶段启发式算法求解机场地勤服务优化问题[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(6): 664 – 669.

A Study on the Optimization Program of Airport Task Assignment

Tian Qiannan Li Kunpeng Li Wenli Xu Dongyang

Abstract: Airports are one of the biggest complexes we humans operate on the earth. For aircraft to land and take off safely and yet on schedule, there are so many tasks to perform by ground staffs. Luckily, most of the tasks can be pre – defined ahead of times, according to the flight schedules and aircraft types. Airport ground staffs work in shifts to perform the tasks. In this paper, an airport task assignment problem is explored, which comes from a domestic airline. The problem is to assign tasks with special properties to a limited number of shifts. Due to the diversity of the properties of airport tasks and shifts, the problem of airport task assignment is a very complicated combinatorial optimization problem, which belongs to NP – complete problem. A mathematical optimization model is established and the objective is to maximize the total benefit by completing tasks, put forward effective inequality and apply software CPLEX to solve the actual data. The results show that the optimal solution of given size instances can be obtained in a short of time by CPLEX. Moreover, the impacts of various properties of tasks and shifts are explored via computational experiment as well. Through the practical data test comparison, we gain the conclusion that, according to the characteristics of the problem, adjusting appropriately different factors can not only improve the effective utilization rate of airport resources, but also the efficiency and service level of the airport.

Key words: airport task assignment; optimization model; ground service; valid inequalities