

科技创新

考虑机组人员疲劳程度的机组排班问题研究

吴思韵, 吴薇薇, 丁程锦

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

摘要: 传统的机组排班研究难以直接衡量机组人员工作时的真实疲劳度。机组人员的疲劳度受到多种现实因素的影响,建立了机组人员疲劳度量化模型以度量机组人员任务环的疲劳,并进一步构建考虑疲劳度的机组排班模型。接着基于列生成框架,结合动态约束聚合方法设计算法求解该模型。最后数值实验证明该算法能够在较短的时间内解决较大规模机组排班问题,建立的模型能够有效降低机组人员疲劳程度。

关键词: 航空运输; 机组排班问题; 列生成算法; 机组疲劳; 航班计划

中图分类号: U268.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0001-10

民航运输作为全球经济的重要参与者,人们越来越倾向于选择航空运输作为出行方式。国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)预测 2015—2045 年全球客运量将以每年 4.1% 的增速增长^[1]。为扩大市场份额、提高竞争力,全世界的航空公司在定价策略、行为分析、运营决策等各个方面都在不断改进^[2]。在运营决策方面,航班计划优化问题尤其关键。它借助运筹学来合理管理飞机、机组、维修资源等各种资源。其中,机组排班问题(crew pairing problem, CPP)即根据航班计划、飞机排班计划、机组人员表等已知数据为每个飞行人员(包括机长、副驾驶、领航员等)、乘务员和空中安保生成相应的任务环,以承担航班的飞行和机上作业。科学、合理的机组排班计划不仅能够提高航空公司整体的运营效率和盈利能力,还可以推动机组人员优化利用、提高资源利用效率。

20 世纪 90 年代以来,大量学者针对机组排班问题进行了研究。马弘等^[3]在机组排班问题中加入人员工作班次和人员过夜城市的一致性的约束,以提高排班结果的合理性。赵沛等^[4]以最小基本操作成本和最大鲁棒性为目标解决机组人员配对问题,并通过实验证明该方法能够避免极端延误的航班。Bahadir 等^[5]将基于得分的自适应贪婪启发式算法和遗传算法相结合,求解大规模的机组排班问题。Ding

等^[6]建立了考虑机组人员过夜成本的机队分配和机组排班的一体化模型,并将闲置时间重新分配与时空图卷积网络相结合以确保机组排班的稳健性,最后基于分解算法和邻域搜索算法进行求解证明该模型能够减少航空公司的成本。传统的 CPP 问题研究都在模型中考虑了航空机构提供的严格规则 and 规定如每日最大飞行时间、最大执勤时间、任务环的时间跨度约束,上述约束都在一定程度上限制工作时间、保证休息时间,从而降低机组疲劳。

但民航业的高速发展对飞行员疲劳管理提出了更高的要求。波音公司预测得出,未来 20 年中国需要 134 000 名新飞行员^[7],这将导致飞行员人力资源紧缺,无形中增加飞行员的航班任务和工作压力。中国民航局于 2011 年建立了疲劳系数模型以监控航空公司飞行员的工作负荷水平^[8]。现有研究已证明部分民航事故与飞行员疲劳有关^[9],其中夜间飞行、早起值班、值班时间长等是飞行员疲劳的主要成因^[10-11],且每个飞行员发生的事故数量与执勤时间长短成正比,并与其疲劳程度直接相关^[12]。因此,加强对飞行员疲劳的管理和监控是航空公司急需解决的问题之一。然而现有研究表明当前的航空规则本身仅考虑机组人员任务环的整体工作量,并未准确有效地度量疲劳值^[13-14]。

近几年,国内外学者开始致力于研究能够降低

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(U2033205);中国民航局安全能力专项(1007-IMH22004);南京航空航天大学科研基金(1007-YAT23021)

作者简介: 吴思韵(2001—),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为交通运输系统建模与优化;通信作者吴薇薇(1972—),女,安徽宣城人,博士,教授,研究方向为交通运输规划与管理;丁程锦(1997—),男,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为交通运输系统建模与优化。

机组人员疲劳程度的机组排班方法。张迪等^[15]研究了飞行时间和高高原航线对机组人员执勤疲劳度的影响,基于研究结果建立了机组排班模型。于蓉等^[16]通过飞行时间早晚班次数建立了机组人员疲劳度量公式,基于该公式建立了机组排班模型并通过遗传算法进行求解。Ingre 等^[17]构建了机组人员觉醒三过程公式(three process model of alertness,TPM),通过睡眠质量反馈来计算机组人员的疲劳程度。在此基础上,Lin 等^[18]通过量化表达飞行员的警觉水平和执勤时间疲劳度改进了 TPM 度量模型,并构建机组排班模型。Guo 等^[19]建立了线性回归模型来预测机组疲劳度,并以飞行员疲劳度均衡建立了机组排班模型。

现有考虑疲劳度的机组排班研究,往往从飞行时长或者早晚班次数等有限角度来度量机组人员的疲劳度^[15-16],而机组排班计划中存在大量会影响机组疲劳度的关键指标,如平均起降次数、平均换机次数、航站楼等待时间、非基地过夜次数等。仅考虑单一指标难以构建降低机组人员疲劳度的排班计划。除此之外,现有对于机组人员疲劳度的量化研究大部分基于飞行疲劳基本理论或者 TPM 公式,主要源自民航局管理者的主观经验,难以体现飞行员在执行航班任务的切身感受。因此,本文首先提取了机组排班计划中所有影响机组疲劳度的关键指标,构建了更加全面的机组疲劳程度量化公

式。接着,结合问卷调查和多元线性回归分析对公式进行分析拟合。接着,基于该公式提出了一个考虑机组人员疲劳的机组排班模型(crew pairing problem with fatigue, CPPF)。然后,利用列生成框架求解该模型,并结合动态约束聚合(dynamic constraint aggregation, DCA)算法对列生成加速。最后,通过数值实验证明该模型可以在大幅度降低机组人员疲劳程度的基础上兼顾运行成本。

1 问题描述和模型

1.1 机组疲劳度指标

近年来,飞行员疲劳问题逐渐成为航空业安全研究的热点,从飞行员的切身体验和机组排班任务环的角度来建立疲劳度量模型。首先,根据机组排班任务环特性,提取出所有任务环中影响飞行员疲劳程度的因素。接着设计问卷调查,让飞行员对提取的因素进行打分并补充。最后利用回归分析方法对结果进行拟合,建立疲劳度量模型。

国内外多数的研究指出睡眠缺失和昼夜生物节律扰乱是造成疲劳的最重要的两个因素^[20-22];同时,连续夜间工作^[15]、工作负荷增强^[15]等因素也对疲劳的产生造成不可忽视的影响。由于不考虑航班跨时区的影响,根据指标提取以及问卷调查的结果,将机组任务环中影响飞行员疲劳的因素分为工作负荷和特殊性航班两类。表 1 展示了不同类别对应的影响因素以及对因素的简要描述。

表 1 飞行员疲劳程度影响因素

类别	影响因素	描述
工作负荷	执勤时长 ^[23]	包括飞行员的飞行时间、准备时间、等待时间以及其他与任务相关的活动时间,上述时间的累积对飞行员的生理和心理状态产生显著影响
	航班数量 ^[23]	航班数量增加意味着飞行员需要在更短的时间内完成更多的飞行任务,使飞行员面临更加紧凑的时间安排,导致休息时间减少、工作压力增加,加剧疲劳感
	连续航班间隔时间 ^[23]	称为“转机时间”或“周转时间”,指完成一个航班后飞行员在执行下一个航班之前所获得的休息时间
	更换飞机次数 ^[23]	飞行员在执行任务环时频繁更换飞机,会增加额外的步行距离,减少飞行员的休息时间
	每日平均起降次数 ^[23]	起降操作对飞行员的身体和心理都有较高的要求,在起飞和降落阶段,飞行员需要高度集中注意力,进行复杂的操作判断和决策
	每日平均飞行小时数 ^[23]	每日长时间的飞行会使飞行员的精神持续紧张,从而导致疲劳的产生;此外,长时间的飞行可能导致飞行员出现焦虑、烦躁、情绪低落等心理问题,影响飞行员的工作效率和航班安全水平
	在航站楼等待换机的时间 ^[24]	长时间的站立、久坐或在嘈杂的航站楼环境中等待导致飞行员出现肌肉疲劳、腰酸背痛等身体不适症状;此外,长时间的等待使飞行员产生负面情绪,影响他们的心理健康和工作表现
	非基地过夜次数 ^[23-24]	非基地机场过夜意味着飞行员需要在陌生环境中适应新的作息时间和休息条件,可能会扰乱飞行员的生物钟和作息规律
特殊性航班	早班航班 ^[23]	执行早班航班的飞行员通常需要在凌晨起床并准备飞行,而执行晚班航班的飞行员需要在深夜工作,直接影响了飞行员的睡眠和休息时间
	晚班航班 ^[25]	
	高原航班 ^[25]	从生理角度来看,高原地区低氧环境会对飞行员的循环系统、呼吸系统和神经系统产生影响;从心理角度来看,高原航班通常伴随着更高的风险和挑战,需要飞行员更加谨慎和专注,以应对可能出现的各种复杂情况

注:早班指 08:00 之前起飞的航班,晚班指 22:00 之后落地的航班;高高原航班指起飞或降落机场包含高高原机场的航班,平原航班指起飞和降落机场均为非高高原机场的航班。

1.2 机组疲劳程度量化公式

基于上述提取出的和航班任务相关的机组疲劳度影响因素,通过问卷调查的方式收集飞行员对这些影响因素的重要程度的评价,并根据飞行员实际任务环的相关数据,回归拟合出机组疲劳程度量化公式。问卷调查相关内容在后面小节详细展示,同时由于篇幅拟合过程不在本文赘述。

本文所改进的机组人员任务环疲劳程度量计算公式为

$$F = DT \times 0.01 + FN \times 0.02 + ST \times 0.02 + AC \times 0.03 + \bar{A} \times 0.02 + \bar{T} \times 0.02 + WT \times 0.03 + N \times 0.02 + (T_1 \times 1.15 + T_2 \times 1.13 + T_3 \times 1.25 + T_4 \times 1.23 + T_5 \times 1.1 + T_6) / (73/30 \times DT) \times 0.81 \quad (1)$$

式中: F 为机组人员的疲劳程度; DT 为任务环总时长, d ; FN 为航班数量, 个; ST 为平均每日连续航班间隔总时间, h ; AC 为平均每日更换飞机次数, 次; $\bar{A}$ 为平均每日起降次数, 次; $\bar{T}$ 为平均每日飞行小时数, h ; WT 为在航站楼等待换机的时间, h ; N 为非基地过夜次数, 次; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 分别为早班-平原航班、晚班-平原航班、早班-高原航班、晚班-高原航班、白班-高原航班、白班-高原航班的月飞行小时数, h ; 73 为飞行员月疲劳临界小时数, 根据飞行员执行白班-平原航班的最大飞行时间所确定^[25]。

1.3 考虑机组疲劳程度的机组排班模型

结合机组人员疲劳程度量化公式, 建立改进的考虑机组人员疲劳程度的机组排班模型 CPPF。

机组排班问题(CPP)是为航空公司生成一组覆盖所有航班且运行成本最低的机组人员排班计划的集合, 这些排班计划需要从基地机场出发并结束, 且要遵循中国民航局《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》等相关规定包括飞行人员飞行时间、值勤时间和休息时间等。但现有的规定限制不能够衡量疲劳度, 造成机组人员执行任务期间疲劳频发的现象。因此, 本文进一步结合疲劳度量模型建立了 CPPF 模型。

在建立模型之前, 首先定义了集合参数和变量, 如表 2 所示。

CPPF 模型如式(3)~式(5)所示。CPPF 的目标函数(3)表示 CPPF 问题的总成本, 由航空公司运行成本和机组人员疲劳系数的加权值计算得出。根据公式(1), 航班串 j 的疲劳度评价如公式(2)所示。

表 2 主问题模型符号说明

变量	含义说明
I	航班集合
J	所有符合规则的排班计划(列)的集合
i	航班的索引
F_j	排班计划(航班串) j 的机组人员疲劳系数
j	排班计划(航班串)
c_j	排班计划(航班串) j 的单位成本
a_{ij}	排班计划(航班串) j 是否包含航班 i , 若包含 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$
x_j	解中是否包括排班计划 j , 若包含 $x_j = 1$; 否则 $x_j = 0$
α	航空公司运行成本和机组人员疲劳系数的权重参数

然后加入权重参数 α 对机组人员疲劳系数进行缩放, 建立本文所解决的 CPPF 问题的目标函数式(3)。权重参数 α 也可被视为机组疲劳度相对于航空公司航班运行成本的重要度。式(4)为航班覆盖约束, 表示所有的航班都会被解中的排班计划集合至少覆盖一次。

$$F_j = DT_j \times 0.01 + FN_j \times 0.02 + ST_j \times 0.02 + AC_j \times 0.03 + \bar{A}_j \times 0.02 + \bar{T}_j \times 0.02 + WT_j \times 0.03 + N_j \times 0.02 + (T_{1j} \times 1.15 + T_{2j} \times 1.13 + T_{3j} \times 1.25 + T_{4j} \times 1.23 + T_{5j} \times 1.1 + T_{6j}) / (73/30 \times DT_j) \times 0.81 \quad (2)$$

$$\min z = \alpha \sum_j F_j x_j + \sum_j c_j x_j \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_j a_{ij} x_j \geq 1, \forall i \in I \quad (4)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \forall j \in J \quad (5)$$

采用列生成方法求解机组排班问题的主要思路是首先构造一个规模较小的主问题和子问题, 主问题是选择最小成本的排班计划, 子问题则为主问题生成新的、满足规范标准的排班计划(列)。子问题模型中参数与变量的含义如表 3 所示。

在解决主问题的基础上, 子问题计算航班的对偶价值, 进而生成满足各项约束条件且能实现成本最小化目标的机组排班计划(列)。子问题的模型如式(6)~式(17)所示。

式(6)为子问题的目标函数, 表示相对应的列的差额降低成本(reduced cost)。式(7)和式(8)表示该任务环(列)有且仅有一个始发航班和一个终止航班。约束(9)为流平衡约束, 若该航班为始发航班则其必然有一个后序航班或一个终止航班; 若该航班为中间航班, 则其必然有一个前序航班和一个后序航班; 若该航班为终止航班, 则其必有一个前序航班或始发航班。约束(10)表示该任务环(列)的出发城市和降落城市为同一个。约束(11)和式(12)为机组最大飞行时间限制, 约束(11)识别出

表 3 子问题模型符号说明

变量	含义说明
I, J	航班集合
T	日期集合
$h(i)$	航班 i 的前序航班集合
$b(i)$	航班 i 的后序航班集合
i, j	航班
t	执勤期间的时间周期
π_i	主问题的对偶解
f_{it}	航班 i 的飞行时长
$tdep_i$	航班 i 的起飞时刻
$tarr_i$	航班 i 的降落时刻
F_{it}	t 日以航班 i 为起始航班的最大飞行时间
D_{it}	t 日以航班 i 为起始航班的最大执勤时间
$Scity_i$	航班 i 的出发城市
$Ecity_i$	航班 i 的到达城市
x_{ijt}	t 日航班 i 是否与航班 j 衔接, 若衔接 $x_{ijt} = 1$; 否则 $x_{ijt} = 0$
y_{ijt}	t 日航班 i 是否与 $t+1$ 日航班 j 衔接, 若衔接 $y_{ijt} = 1$; 否则 $y_{ijt} = 0$
s_{it}	该航班计划是否由 t 日航班 i 开始, 若是, $s_{it} = 1$; 否则 $s_{it} = 0$
e_{it}	该航班计划是否由 t 日航班 i 结束, 若是, $e_{it} = 1$; 否则 $e_{it} = 0$
$maxh_t$	t 日机组的最大飞行时间
$maxdh_t$	t 日机组的最大执勤时间
$maxth$	一个排班计划内机组的最大执勤时间
nf_t	t 日机组执行的航班数
w_{if}	航班 i 是否由机型 f 执行, 若是, $w_{if} = 1$; 否则 $w_{if} = 0$

任务环某日的第一个执勤航班的报到时间,并得出最大飞行时间限制;约束(12)表示该日执勤航班的总飞行时长不得超过民航局及航空公司的限制规定。式(13)~式(15)为执勤时间约束,式(13)识别出任务环某日的第一个执勤航班的报道时间和执行的航班数,得到此任务环最长的执勤时间;式(14)给出执勤期间航班数量的计算公式;式(15)表示某日最长执勤时间的约束。机组不同的报道时间和对应的最大飞行时间、最大飞行执勤限制时长如表 4 所示。式(16)规定任务环的总时长不得超过任务环所允许的最大执勤时间,以确保任务环满足在连续的 7 个执勤日内至少包含 24 h 休息时间的强制性要求。式(17)保证同一天中的航班由同一机型执行,减少了机组更换飞机的次数, w_{if} 为航班 i 是否由机型 f 执行。

$$\min z = 1 - \left(\sum_{t \in T} \sum_{i, j \in I} \pi_i y_{ijt} + \sum_{t \in T} \sum_{i, j \in I} \pi_i e_{it} \right) \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_i \sum_t s_{it} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_t e_{it} = 1 \quad (8)$$

$$s_{it} + \sum_{j \in h(i)} x_{ijt} + \sum_{j \in b(i)} y_{ijt-1} = e_{it} + \sum_{j \in b(i)} x_{ijt} + \sum_{j \in b(i)} y_{ijt}, \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_t Scity_i s_{it} = \sum_i \sum_t Ecity_i e_{it} \quad (10)$$

$$\sum_i F_{it} s_{it} + \sum_i \sum_{j \in e(i)} F_{jt} y_{ijt-1} = \max h_t, \forall t \quad (11)$$

$$\sum_i f_{it} e_{it} + \sum_i \sum_{j \in b(i)} f_{it} x_{ijt} + \sum_i \sum_{j \in e(i)} f_{jt} y_{ijt-1} \leq \max h_t, \forall t \quad (12)$$

$$\sum_i D_{it} s_{it} + \sum_i \sum_{j \in b(i)} D_{jt} y_{ijt-1} - (nf_t - 1) = \max dh_t, \forall t \quad (13)$$

$$\sum_i \sum_t e_{it} + \sum_i \sum_{j \in b(i)} x_{ijt} + \sum_i \sum_{j \in b(i)} y_{ijt} = nf_t, \forall t \quad (14)$$

$$\sum_i \sum_{j \in b(i)} tarr_i y_{ijt} - \sum_i tdep_i s_{it} - \sum_i \sum_{j \in b(i)} tdep_j y_{ijt-1} \leq \max dh_t, \forall t \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_t tarr_i e_{it} - \sum_i \sum_t tdep_i s_{it} \leq \max th \quad (16)$$

$$s_{it} w_{if} + \sum_{j \in h(i)} x_{jit} w_{jf} + \sum_{j \in h(i)} x_{jit-1} w_{jf} = e_{it} w_{if} + \sum_{j \in b(i)} x_{ijt} w_{jf} + \sum_{j \in b(i)} x_{ijt} w_{jf}, \forall i, t \quad (17)$$

表 4 机组最大飞行时间和最大飞行执勤期限制

报到时间段	最大飞行时间/h	根据航班数量确定的机组人员最大飞行执勤期/h			
		1~4个航班	5个航班	6个航班	7个航班及以上
00:00—04:59	8	12	11	10	9
05:00—19:59	9	14	13	12	11
20:00—23:59	8	13	12	11	10

2 模型求解算法

本文设计了一个启发式算法求解 CPPF 模型列生成的子问题,该算法根据等价关系聚合其中一些约束,从而减少主问题集合划分的限制,并在整个求解过程中动态更新这个等价关系以保证求解结果的最优性。

2.1 列生成算法

列生成是解决 CPP 的有效算法。在求解过程中,通常与分枝定价算法相结合以探索最优或近似最优的整数解方案。在 CPP 问题的背景下,列生成算法首先通过构建受限主问题(restricted master problem, RMP)来进行初始化, RMP 中包含所有约

束但仅包括目标函数中的可行任务环的子集。随后,将 RMP 的对偶解传递给子问题,用以调整路径参数并进行求解。子问题的核心目标是找到一条从源节点至汇聚节点的路径(列),在满足飞行时间、执勤时间等约束的同时最小化成本降低幅度。然后通过迭代的方式,将这些新生成的列加入 RMP 中,以逐步改进当前解的质量。最终,求解 RMP 得到的结果若为整数解,则可直接视为最优解;否则增添整数变量约束再次求解。但是列生成子问题的求解通常较慢,因此设计了动态聚合约束的启发式算法来加速列生成子问题的求解。

2.2 基于动态聚合约束的启发式算法

本文设计了基于动态聚合约束的启发式算法来求解列生成的子问题,以代替传统的最短路方法或者分支定界方法,同时保证求解的精确性。

2.2.1 动态约束聚合基本方法

动态聚合约束方法不使用传统的 RMP 进行求解,而使用聚合约束主问题(aggregated restricted master problem, ARMP),ARMP 考虑的变量和约束比 RMP 更小,因此可以降低问题求解规模、提升计算速度。动态聚合约束算法由次要迭代和主要迭代组成。在次要迭代中,ARMP 被优化,子问题生成新的列;在主要迭代中,执行一系列的次要迭代然后调整任务集的任务分区。子问题需要得到完整的对偶解,即主问题中每个集合分区约束[如式(4)]的对偶变量值,从而生成新列。

2.2.2 动态聚合约束算法框架

图 1 展示了动态约束聚合算法的整体框架流程,本节将对其中步骤进行详细介绍。

首先,生成初始解,即一组可行的任务环,初始解的求解过程如图 2 所示。

接着,聚合 RMP 得到 ARMP,使 ARMP 仅包含列生成过程中最新生成的兼容列变量,并用原始单纯形法快速求解。其中,若任务环所覆盖的航班对应一些聚合类的分区,则该变量与分区兼容,否则变量为不兼容。

其次,求解互补问题。互补问题仅包括最新生成的不兼容任务环变量。在求解互补问题时可以找到不相容列的兼容凸集合,同时将航班运行成本降到最低。然后,当互补问题的最小差额成本为负时,对 ARMP 进行修正,修正方法可以分为两类:若 ARMP 的成本迅速降低,则在不改变 ARMP 中的聚合和约束数量的情况下添加兼容性的列;若 ARMP 成本降低出现拖尾效应,则再添加不兼容变量并修饰聚合,同时将 ARMP 解中取正值的变量替换为组成这些组合的列修正分区,以使添加的变量兼容,从而使成本降低幅度增加。当互补问题的最小差额成本为正,则需要求解子问题以生成具有降低成本为负数的列。为了提高计算效率引入如下的动态策略:当差额成本高于负阈值时,为子问题优先生成更容易改变的列,并在每次列生成迭代中将子问题的阈值增加到 0 以达到最优性标准。在求

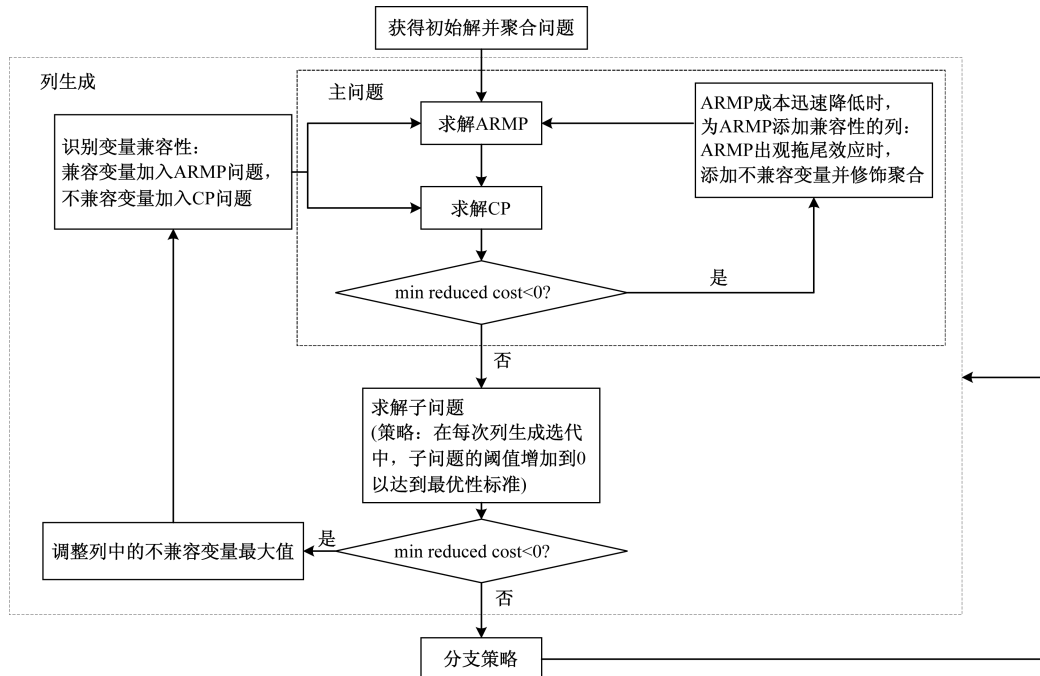


图 1 动态约束聚合算法整体框架流程

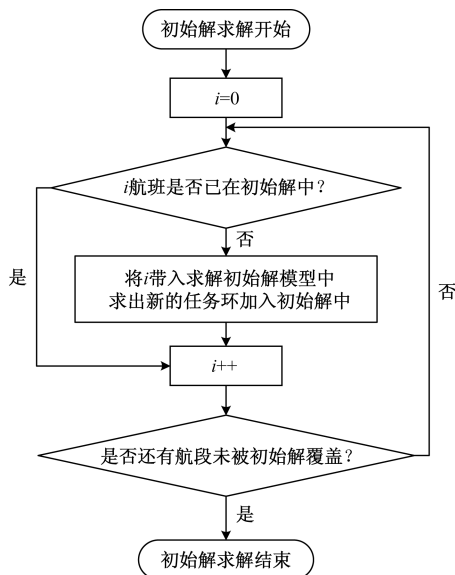


图 2 初始解求解流程

解过程中,每一个机组人员基地和每个任务环的开始日期都有一个子问题,每个子问题都有一个最短路径问题并对资源约束进行建模,以确保生成可行任务环。

再次,调整列中的不兼容变量的最大值。调整的方式参考 Elhallaoui 等^[26]提出的部分定价策略。

基于前述兼容性定义,先识别出兼容和不兼容的变量。在 CPP 问题求解的过程中,可以通过起飞时间对航班进行排序,将与变量对应的路径储存为指向下一个航班的指针序列。接着,根据变量的兼容性,将兼容的变量添加到 ARMP 中,不兼容的变量添加到互补问题中。变量添加后,优先求解 ARMP,这一优先级基于 ARMP 的最小差额成本变量是否小于不兼容变量的最小差额成本。

最后,采用分支树的局部搜索,下界和初始解为有效搜索分枝数提供了有效信息。首先使用列固定算法^[27]:在搜索树的每个节点,选择当前 ARMP 解中数值较小的几列(具有较小值的列增加的下限值较大),并设置它们的值均为 1。增加任务环 p 后,从 ARMP 和互补问题中删除 p 覆盖的航班的所有列,并从子问题网络中删除表示这些航班的所有弧,从而大大减小待求解问题的规模。当出现没有足够大的变量可以修复的情况时,采取弧修复策略和分支回溯策略^[28],该策略无须回溯即可检验并修正先前在搜索分支树中做出的错误决策,且通过实验证明其能够提升 25% 的整数解的最优性。

3 实验分析

首先介绍疲劳问卷的设计思路和模型有效性

验证方法,其次介绍了用于计算的实例和实验环境,然后对比分析了动态约束聚合算法的有效性以及考虑机组人员疲劳程度对于求解 CPP 问题时的影响。

3.1 疲劳问卷调查

3.1.1 问卷设计与调研

采用问卷调查的方式在网上对飞行员的疲劳感受进行调查,问卷包括两部分:疲劳自评和航班任务相关数据收集。航班任务相关数据收集部分将收集执勤时长、晚班航班时长、高原航班时长等飞行数据、飞行员对于上个月飞行任务的疲劳程度判定及飞行员对于疲劳影响因素的影响程度评定。

本次调查共计向包括国航、东航、厦航等航空公司在内的 98 名飞行员进行了调查,并在调查终端收回问卷 98 份。通过对问卷进行质量检验,剔除无效残缺、逻辑不符的问卷之后,共计收到 87 份有效的飞行员疲劳感受调查问卷,有效回复率达到 88.78%。最后,通过 Access 构建一个可靠的飞行员疲劳度数据库,并将有效的调查问卷录入到数据库中。

3.1.2 问卷结果说明

问卷结果表明本文所选取的飞行员疲劳影响因素均较为重要,因此将这些影响因素的相关数据与飞行员疲劳值进行线性拟合,得出各影响因素对应的疲劳影响系数(表 5)。然后将影响系数和影响因素加权,得到本文的机组疲劳程度量化公式[式(1)]。

3.1.3 疲劳模型有效性验证

为了检验调查问卷的准确性,对得到的疲劳量化模型进行有效性验证。首先,根据整理后的小时数和改进后的疲劳系数模型计算新模型的疲劳系数值。然后,根据该系数值,判断飞行员的疲劳程度,再比较该系数值和飞行员回答的疲劳程度是否一致。本文提出的改进的疲劳系数模型所得到的一致性达 95%,相比于民航局给出的简单疲劳系数公式的一致性 36% 有大幅度提升。

表 5 各因素对应的影响系数

影响因素	疲劳系数
任务环长度/d	0.01
航班数量/个	0.02
平均每日连续航班间隔时间/h	0.02
平均每日更换飞机次数/次	0.03
每日平均起降次数/次	0.02
每日平均飞行小时数/h	0.02
在航站楼等待换机的时间/h	0.03
非基地过夜次数/次	0.02
航班任务时长	0.81

3.2 实验数据与环境

将 CPPF 模型和基础的机组排班模型 (crew pairing model, CPM) 进行模型的对比, 并将列生成算法与改进的列生成算法进行算法的对比。实验数据来自我国某大型航空公司的 2021 年 8 月的航班计划进行机组排班规划, 相关航班信息如表 6 所示。表 6 统计了航班数据的基本信息, 包括航班号、航班的起降时间、起降机场、所需的机组配置等。航班计划数据集有两个, 数据一包含有 12 条航线和 206 个航班, 计划周期为 14 d; 数据二包含有 126 条航线和 13 954 个航班, 计划周期为 8 d。根据航班计划的相关数据将这两个数据集分别为 21 名、465 名机组人员生成航班任务环。本实验通过求解上述两个排班计划来检验模型和算法对实际问题的求解能力, 并分别观察加入机组疲劳程度目标后对成本的影响情况。此外, 本实验设置航班最小连接时间为 40 min, 最大执勤飞行时长为 600 min, 最大执勤时长不超过 720 min, 机长和副驾的每小时任务环成本为 640 元和 600 元, 每小时执勤成本为 20 元。实验运行设备为 HUAWEI MateBook X Pro, 采用 Python 进行编程实现。

3.3 实验结果与分析

分别提供了 CPM 和 CPPF 模型的结果 (设定 α 的值为 1 000), 并分别计算两个模型的航班环疲劳度, 统计数据结果如表 7 所示。结果表明, 目前的机组排班规则和条例在减少机组人员疲劳方面并未达到预期的理想情况, 会出现疲劳程度高达 1.24 的航班任务环。而 CPPF 模型则能够有效降低机组任务环的疲劳程度, 减少疲劳系数超过 0.5 的任务环的出现。

通过改变权重参数 α 的值来分别运行两个模型以及数据集, 并通过航班运行成本、机组人员疲劳程度和任务环特性这三方面来比较不同模型提供排班方案的优劣程度。结果如表 8 和表 9 所示, 航班运行成本增加的百分比和机组人员疲劳程度降低的百分比都是相对于 CPP 情况下计算得出的, 即 $\alpha=0$ 。表 8 和表 9 中的其他统计数据分别为生成的任务环数量、每个任务环的平均航班数、任务环平均时长(h)以及航班任务和休息时间上所占任务环总时长的百分比。航班运行成本增加和疲劳系数降低直接的关系如图 3 和图 4 所示。随着 α 的增大, 航班运行成本的小幅提高转化为机组人员任务环疲劳水平的大幅改善, 直至达到某个临界值。如表 8 所示, 当 α 从 0 提升至 400 时, 航班运行成本增加 4.68%, 疲劳程度降低 10.86%; 然而当 α 增加至 10 000, 航班运行成本增加 7.74%, 疲劳程度仅降低 2.94%。同样, 表 9 中 α 的临界值出现在 800。这种现象的出现表明, 当 α 超过临界值时, 疲劳程度的边际减少随着 α 的增加呈现下降趋势。

此外, 随着 α 的增加, 除了机组疲劳度的大幅降低, 求解所得到的任务环结果集合会包含更多的任务环数量以覆盖所有航班, 从而降低每个任务环的航班数, 减少每个任务环中的飞行时间、提高每个任务环的休息时间, 从实际方面证明本文提出的方法能够降低机组人员执飞时的疲劳程度。

表 7 不同疲劳系数统计数据结果

模型	任务环疲劳程度均值	任务环疲劳程度范围	疲劳系数>0.5 的次数
CPP	0.786 5	(0.04, 1.24)	13
CPPF	0.495 8	(0.45, 0.79)	6

表 6 8 月部分航班计划

航班号	出发日期	出发时间	出发机场	到达日期	到达时间	到达机场	所需机组配置
FA2	2021-08-12	10:10	PGX	2021-08-12	11:40	NKX	C1F1
FA3	2021-08-12	10:25	PGX	2021-08-12	11:40	NKX	C1F1
...	...	...	...	...	...	...	...
FA891	2021-08-24	10:30	XGS	2021-08-24	12:50	NKX	C1F1
FA891	2021-08-25	10:30	XGS	2021-08-25	12:50	NKX	C1F1

表 8 数据集一的计算结果及对比

α	成本增加/%	疲劳降低/%	任务环生成数量	任务环平均航班数	任务环平均时长/h	航班任务占比/%	休息时间占比/%
0	—(49.27)	—(0.786 4)	37	5.57	31.28	29.76	70.24
10	0.19	1.14	37	5.57	31.14	29.18	70.82
100	0.39	2.39	38	5.42	22.02	27.42	72.58
200	1.17	5.51	39	5.28	27.19	26.80	73.20

续表

α	成本增加/%	疲劳降低/%	任务环生成数量	任务环平均航班数	任务环平均时长/h	航班任务占比/%	休息时间占比/%
300	2.70	8.30	41	5.02	24.24	26.71	73.29
400	4.68	10.86	43	4.79	25.25	26.36	73.64
500	4.88	11.09	44	4.68	26.42	26.29	73.71
600	5.00	11.49	44	4.68	20.93	26.12	73.88
700	6.38	11.52	45	4.58	28.14	26.07	73.93
800	6.56	11.67	45	4.58	31.12	25.92	74.08
900	7.90	13.24	46	4.48	30.03	25.62	74.38
1 000	10.39	13.35	47	4.38	20.98	25.39	74.61
2 000	11.62	13.37	48	4.29	25.59	25.27	74.73
3 000	11.70	13.38	48	4.29	23.39	25.00	75.00
4 000	11.70	13.38	49	4.20	27.50	23.84	76.16
5 000	12.31	13.66	49	4.20	20.98	23.82	76.18
10 000	12.42	13.80	50	4.12	19.75	23.75	76.25
min	0.19	1.14	37	5.57	19.75	23.75	70.24
max	12.42	13.80	50	4.12	31.28	29.76	78.00
Avg	6.86	10.51	44.12	4.71	25.64	26.08	73.92

注：“—”表示成本或疲劳程度没有变化；括号内数值为初始值。

表 9 数据集二的计算结果及对比

α	成本增加/%	疲劳降低/%	任务环生成数量	任务环平均航班数	任务环平均时长/h	航班任务占比/%	休息时间占比/%
0	—(3 857.635 0)	—(0.638 3)	2 995	4.66	23.37	25.54	74.46
10	0.44	3.28	3 087	4.52	23.28	25.46	74.54
100	0.7	5.24	3 156	4.42	23.18	24.88	75.12
200	0.94	5.50	3 165	4.41	23.16	24.86	75.14
300	1.38	6.30	3 168	4.40	22.56	24.86	75.14
400	1.73	7.76	3 170	4.40	21.45	24.71	75.29
500	2.16	7.81	3 210	4.35	21.39	24.64	75.36
600	2.23	8.02	3 213	4.34	21.37	24.38	75.62
700	2.28	8.03	3 272	4.26	21.17	24.12	75.88
800	2.54	8.16	3 282	4.25	20.95	22.91	77.09
900	2.81	8.24	3 298	4.23	19.01	22.74	77.26
1 000	2.88	8.37	3 327	4.19	18.53	22.47	77.53
2 000	3.34	8.62	3 334	4.19	17.81	22.28	77.72
3 000	3.90	8.95	3 339	4.18	17.72	22.11	77.89
4 000	4.03	9.07	3 406	4.10	17.19	22.10	77.90
5 000	5.12	9.32	3 410	4.09	17.13	22.02	77.98
10 000	5.85	9.86	3 524	3.96	17.08	21.97	78.03
min	0.44	3.28	2 995	3.96	17.08	21.97	74.46
max	5.85	9.86	3 524	4.66	23.37	25.54	78.03
avg	2.65	7.66	3 256.24	4.29	20.37	23.65	76.35

注：“—”表示成本或疲劳程度没有变化；括号内数值为初始值。

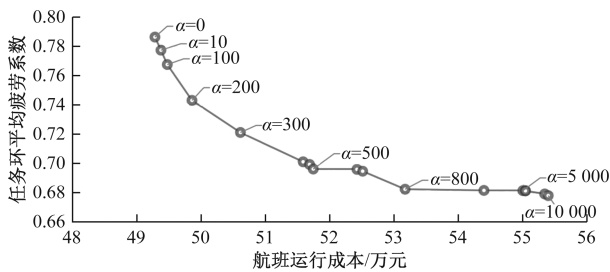


图 3 数据集一的航班运行成本增加和疲劳系数降低直接的关系

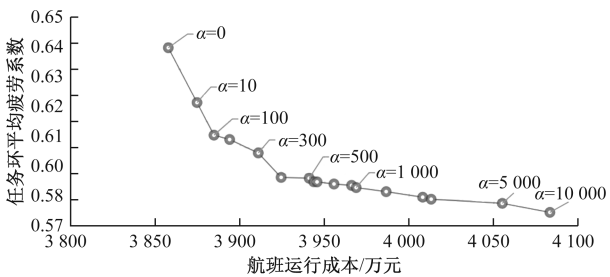


图 4 数据集二的航班运行成本增加和疲劳系数降低直接的关系

对列生成算法、领域搜索算法和设计的改进列生成算法进行比较。表 10 所示是三者分别求解模型 CPP 问题的结果。从表 10 可以看出本文加入动态约束聚合算法的列生成所得到的结果在求解精度和计算速度两方面都远远优于基本列生成算法和领域搜索算法。可见本文所采用的算法在效率与可行性上均表现出色,大幅缩减计算时间的同时保证求解结果的更高质量。

表 10 基本模型算法结果对比

结果指标	数据集二 列生成	数据集二 领域搜索算法	数据集二 改进列生成
不满足机组配置航班数	9 067	1 543	305
满足机组配置航班数	4 818	12 411	13 649
机组人员总体乘机次数	1 820	1 587	1 474
程序运行时间/min	85.800	31.573	12.600

4 结论

本文建立了机组人员疲劳度度量模型,并采用改进的疲劳程度量化公式对机组人员的疲劳进行建模。其次,提出了一个基于动态约束聚合的改进的列生成算法,提高传统列生成的求解速度。最后,通过两个数据集进行了实验验证。结果表明,一方面,在保证经济性的情况下,考虑机组人员疲劳的机组排班模型可以显著降低机组人员疲劳程度;另一方面,所采用的算法在计算精度和速度方面都具有优势。

未来的研究可以在以下几个方向展开:一是综合考虑其他因素,构建更全面的排班模型,以生成更完善的排班计划;二是通过其他方式获取机组人员的疲劳程度,进一步改进疲劳程度量化公式,提高疲劳系数公式的合理性和可靠性;三是将机组排班问题与任务环指派问题结合,形成一体化的机组排班模型,更贴合航空公司需求,使研究结果更具实际意义。

参考文献

[1] ICAO. ICAO long-term traffic forecasts (passenger and cargo)[EB/OL]. [2024-07-01]. https://www.icao.int/sustainability/Documents/LTF_Charts-Results_2018edition.pdf.

[2] ATKINSON S E, RAMDAS K, WILLIAMS J W. Robust scheduling practices in the US airline industry: costs, returns and inefficiencies[J]. *Management Science*, 2016, 62(11): 3372-3391.

[3] 马弘,沈倪,朱靖,等. 带有一致性规范约束的航空机组排班问题研究[J]. *管理工程学报*, 2022, 36(6): 191-204.

[4] 赵沛,曾实,冯君. 考虑飞行时间变化的鲁棒机组人员配对问题研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(6): 165-173.

[5] BAHADIR Z, ÖZCAN E, DEVECI M. An adaptive greedy heuristic for large scale airline crew pairing problems[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2024, 114: 102492.

[6] DING C, CHEN X, WU W, et. al. Game-theoretic analysis of the impact of crew overnight hotel cost on airlines' fleet assignment and crew pairing [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2023, 113: 102491.

[7] BOEING. Pilot and technician outlook 2023—2042[EB/OL]. [2024-07-02]. <https://www.boeing.com/commercial/market/pilot-technician-outlook/>.

[8] 中国民用航空局. 中国民航飞行员发展现状调查报告(2011年)[EB/OL]. (2023-11-29)[2024-07-02]. <http://www.doc88.com/p-0939124591462.html>.

[9] CALDWELL J A. Fatigue in aviation[J]. *Travel medicine and infectious disease*, 2005, 3(2): 85-96.

[10] GRAEBER R C. Aircrew fatigue and circadian rhythmicity:human factors in aviation[M]. Pittsburgh: Academic Press, 1988.

[11] CALDWELL J A, CALDWELL J L. Fatigue in aviation; a guide to staying awake at the stick[J]. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 2004, 75(11): 1012.

[12] GOODE J H. Are pilots at risk of accidents due to fatigue? [J]. *Journal of Safety Research*, 2003, 34(3): 309-313.

[13] DAWSON D, FLETCHER A. A quantitative model of work-related fatigue: background and definition[J]. *Ergonomics*, 2001, 44(2): 144-163.

[14] AHLSTROM C, NYSTRÖM M, HOLMQVIST K, et. al. Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: eye movements improve the sleep/wake predictor [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 20-32.

[15] 张迪,孙宏,张培文. 基于疲劳度均衡的机组指派模型研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(7): 230-234.

[16] 于蓉,郝蓉慧,关欣怡. 考虑公平性的客舱乘务员排班研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(22): 131-135.

[17] INGRE M, VAN LEEUWEN W, KLEMETS T, et al. Validating and extending the three process model of alertness in airline operations[J]. *PloS One*, 2014, 9(10): e108679.

[18] LIN H, GUO C, YOU J, et. al. Research on optimization of flight crew scheduling considering pilot fatigue [J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2024, 15(1): 171-188.

[19] GUO H, DENG B, LI W, et. al. Crew rostering problem with fatigue balance [C]//International Advanced Computing Conference. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 45-63.

- [20] 罗晓利. 疲劳、睡眠缺失以及人体昼夜生物节律扰乱与飞行安全[J]. 西南民族大学学报(人文社科版), 2003(11): 247-249.
- [21] 郭为民, 罗晓利, 杨虎. 民航飞行员疲劳的研究[J]. 民航经济与技术, 1996(3): 31-33.
- [22] 曹雪亮, 孙云峰. 航空环境中睡眠不足的原因及其对抗措施[J]. 中华航空航天医学杂志, 2002, 13(2): 65.
- [23] 韩文强, 胡文东, 文治洪, 等. 飞行疲劳的生理心理因素及对策[J]. 第四军医大学学报, 2008(4): 379-381.
- [24] LEE S, KIM J K. Factors contributing to the risk of airline pilot fatigue[J]. Journal of Air Transport Management, 2018, 67: 197-207.
- [25] 孙震. 航空公司飞行员疲劳系数研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [26] ELHALLAOUI I, METRANE A, SOUMIS F, et al. Multi-phase dynamic constraint aggregation for set partitioning type problems[J]. Mathematical Programming, 2010, 123: 345-370.
- [27] SADDOUNE M, DESAULNIERS G, SOUMIS F. Aircrew pairings with possible repetitions of the same flight number[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(3): 805-814.
- [28] QUESNEL F, DESAULNIERS G, SOUMIS F. A new heuristic branching scheme for the crew pairing problem with base constraints[J]. Computers & Operations Research, 2017, 80: 159-172.

Research on the Crew Pairing Problem Considering Crew Fatigue

WU Siyun, WU Weiwei, DING Chengjin

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Traditional research on crew scheduling problem is difficult to directly measure the real fatigue of crew when working. Crew fatigue is affected by a variety of real-world factors. A quantitative model of crew fatigue was established to measure the fatigue of the crew's task loop, and a crew scheduling model was further constructed. Then an algorithm was designed to solve the model based on the column generation framework combined with the dynamic constraint aggregation method. Finally, numerical experiments demonstrate that the algorithm is able to solve the larger-scale crew scheduling problem in a shorter time, and the model established in this paper is able to effectively reduce crew fatigue.

Keywords: air transportation; crew pairing problem; column generation algorithm; crew fatigue; flight scheduling