

基于疲劳度均衡的机组指派模型研究

张 迪¹, 孙 宏², 张培文²

(1. 青岛恒星科技学院 旅游管理学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国民用航空飞行学院 科研基地, 四川 广汉 618307)

摘要:针对国内小型航空公司生产运行中的单基地线性航线结构特点,首次把飞行员疲劳问题与机组排班问题相结合,以周航班计划为基础,对传统机组排班指派模型进一步改进创新,研究基于疲劳度均衡的飞行机组排班指派模型。一是对机组飞行疲劳进行量化,确定飞行员疲劳程度计算模型;二是构建基于疲劳度均衡的机组排班指派模型;三是采取遗传算法求解;四是以现有航空公司的航班计划进行实例研究,并与原排班中当天飞行员的疲劳程度进行比较分析。结果证明,飞行员的疲劳程度得到了大量改善,且每名飞行员的疲劳程度与当天疲劳度均值的差异较小,飞行员的疲劳程度较稳定,故基于疲劳度均衡的机组指派模型研究是真实且有效的。

关键词:飞行疲劳;机组排班;疲劳均衡;遗传算法

中图分类号:[U8] **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)07-0230-05

目前,机组排班依然是航空领域的热点和难点^[1]。机组排班不仅是航空运营管理中至关重要的一部分,也是控制飞行员疲劳程度的关键环节^[2]。美国国家航空航天局(NASA)航空安全委员会报道,飞行疲劳导致的操作失误是造成事故的重要原因之一^[3]。排班不均衡导致机组疲劳度过高会严重威胁飞行员安全操纵航空器,对飞行安全非常不利,从其发布的航空安全报告系统中有 52 000 起被列为是由疲劳因素引起的,占总数的 20%^[3],所以控制飞行员的疲劳程度对于确保安全十分重要。

机组排班包括两个子问题,一是机组任务配对,二是机组指派。传统的机组排班模型优化目标主要考虑机组成本最小化,但是机组排班不能只考虑经济成本,安全才是民航的重中之重。《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121R5)中修订的一个重要内容就是进一步强化对飞行机组的疲劳管理,科学细化机组的飞行值勤、休息规定,避免出现连续 5 天飞行的情况。从修订内容可以看出,局方更加重视了机组的疲劳与风险管理。但是,目前已经有航空公司对机组排班提出了更高的要求,以期进一步缓解机组人员的工作疲劳,如降低早晚班的数量,提高排班计划的规律性和稳定度等^[4]。近年来,国外学者如 Novak

等^[5]提出疲劳风险管理对机组人员的影响;Pca 和 Ka^[6]提出平衡机组人员(特指飞行员)的工作量的模型,以求最大化高级飞行员的优先要求、最小化单个飞行员重复飞行的次数。这充分说明学者们不只是把机组排班问题集中在成本最优的研究中,而是把机组安全放在首位,追求更加合理公平的机组排班目标,飞行疲劳问题成为机组排班研究新方向^[7]。虽说机组排班是控制飞行员疲劳程度的关键环节,但由于身体素质、个人习惯等原因,不同机组人员对疲劳的表现和程度会存在一定的差异,所以在进行机组排班指派时,应更多考虑机组疲劳度的均衡问题,并将其作为机组排班的优化目标。综合考虑,本文鉴于国内现行的飞行员报酬分配方法,在航班就好不变的条件,航空公司支付的机组总成本部分基本不变的情况下,由于不同性质航班导致的机组疲劳程度是有差异的,无法有效解决机组疲劳度的均衡问题,从而可能导致部分机组疲劳度过高,影响飞行安全。

1 机组飞行疲劳问题量化表达

2020 年,民航西南地区管理局根据民航局和管理局安全工作会议精神,并结合 CCAR-121R5 部令实施后的实际运行情况,发布了《关于持续监控西南地区飞行人员疲劳系数的通知》^[8],文件中提到的

收稿日期:2022-09-29

基金项目:中国民用航空飞行学院科研基地开放基金项目(F2019KF03)。

作者简介:张迪(1996—),女,山东聊城人,青岛恒星科技学院旅游管理学院,助教,工程硕士,研究方向为民航运输管理;孙宏(1966—),男(满族),陕西西安人,中国民用航空飞行学院科研基地,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理;张培文(1985—),男,安徽太和人,中国民用航空飞行学院科研基地,副教授,博士,研究方向为管理学。

计算模型为

$$\text{疲劳系数} = \frac{\text{月总飞行小时} + \text{月高原航线运输飞行小时}}{\text{可用机组数} \times 64} \quad (1)$$

该模型中只考虑到航空公司整体的平均疲劳水平,并没有体现出每个飞行员的差异。为预防机组人为因素造成的航空安全事故的发生,加之飞行员疲劳是主要的人为因素^[9],而机组排班的工作负荷高低是飞行疲劳的主要诱因,为保证机组排班对飞行员工作负荷的公平性,可根据不同航班性质的分类,如早班-平原、白班-平原、晚班-平原、早班-高原、白班-高原、晚班-高原等,分别计算每个飞行员个体执飞不同类型的航班任务的疲劳系数^[10],将飞行员的疲劳系数与飞行小时数结合,以此反映飞行员的疲劳程度。

2021年,孙震^[10]改进了飞行员疲劳系数计算公式,通过采用给不同类型航班飞行时间加权的方法,对飞行员每个月的飞行总时间进行调整和修正,进而实现对上述模型的改进。主要从航班的起飞落地时刻(即确定早班或是晚班。航班起飞时间在0:00—7:00时段的航班任务为早班,航班落地时间在22:00至次日5:00点时段的航班任务为晚班)以及是否涉及高原机场两个方面来进行飞行员疲劳系数模型改进。首先设计了两个调查问卷,一个是根据飞行员疲劳调查量表(MFI-16量表)设计的飞行员疲劳量表问卷,另一个是飞行员疲劳感受调查问卷。在回收疲劳量表数据后,分析了参与调查的飞行员的基本信息,通过信度检验和效度检验方法证明问卷所获取数据是真实可靠的并可用于飞行员的疲劳评定,最后做出统计分析得出飞行员的疲劳状况。在此基础上对飞行员的疲劳感受调查问卷进行分析。一是对执飞不同类型航班的飞行员的疲劳感受进行了多因素方差分析,得出不同时段和是否涉及高原航班对飞行员的疲劳感受有着显著影响;二是对执飞不同类型航班的飞行员的疲劳感受进行了多元线性回归分析,得出参与执飞不同类型航班的任务时的疲劳系数值^[9],早班—平原、晚班—平原、早班—高原、晚班—高原、白班—高原、白班—平原的疲劳系数值分别为1.15、1.13、1.25、1.23、1.1、1。

根据飞行员执飞白班—平原时不疲劳最大飞行时间临界值和严重疲劳飞行时间临界值的数据确定了月疲劳临界小时数为73 h^[10],最终根据疲劳

系数以及疲劳临界小时的分析结果对疲劳系数模型进行了改进。改进后的飞行员疲劳程度计算模型^[9]为

$$f = \frac{1.15T_1 + 1.13T_2 + 1.25T_3 + 1.23T_4 + 1.1T_5 + T_6}{73} \quad (2)$$

式中: f 为飞行员的疲劳程度; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 分别为执飞早班-平原、晚班-平原、早班-高原、晚班-高原、白班-高原、白班-平原的月飞行小时数^[9]。

模型(2)表示飞行员一个月的疲劳感受,由于本文考虑的是一周的排班计划,将一个月分为4个周末考虑,故周疲劳临界小时为 $73/4=18.25$ h。对国内某小型航空公司一周排班计划中的所有飞行员(本文研究均为机长的疲劳程度,以下均表述为飞行员)的疲劳程度进行量化分析,采用如下模型:

$$f = \frac{1.15T_1 + 1.13T_2 + 1.25T_3 + 1.23T_4 + 1.1T_5 + T_6}{18.25} \quad (3)$$

2 机组指派模型

2.1 传统机组指派模型

对于机组排班指派问题,大部分研究者考虑的是飞机使用效率最大或者机组利用率最大等,也有小部分研究者是从提高航空公司计算效率的角度出发并构建模型,但都是从航空公司运营角度出发,如张硕^[11]提出以飞行机组使用效率最大为目标的模型:

$$f = \max \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} B_i V_j, \quad \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (4)$$

式中: M 为勤务的数量; i 为勤务; N 为机组的数量; j 为机组,且 $N < M$; B_i 为机组执行任务串 i 的效率指标; V_j 为使用机组 j 的效率基数; x_{ij} 为0-1决策变量,即是否将 i 指派给 j ,若是则等于1,若不是则等于0。

在模型(4)中,在其满足各项规章制度的同时以机组“能者多劳”分配任务,从未实际考虑飞行机组中飞行员的疲劳感受问题,进而造成了飞行员疲劳感受的差异,最终导致每名飞行员疲劳程度不均衡。

2.2 构建基于疲劳度均衡的机组指派模型

与传统机组排班模型一样,约束条件均需要考虑航班全覆盖,要求每个航班有且只能由一个航班环执行,而本文所设计航班环指派问题的基本方式是以实现所有飞行员连续7 d的平均疲劳度均衡为

目标。其假设条件为：①不考虑机组成本；②双人制机组；③单基地；④航班计划周期为 7 d。在上述 4 种假设条件下，构建基于疲劳度均衡的机组指派线性规划模型，使得模型在调度员已知飞行员前 6 d 的航班安排情况下制定第 7 天的航班环指派计划，并保证本周第 7 天航班任务的飞行员疲劳度均衡。具体模型为

$$\min Z = \sum_{k=1}^n \left| (f_{0k} + \sum_j f_j x_{jk}) - \frac{\sum_{k=1}^n (f_{0k} + \sum_j f_j x_{jk})}{n} \right| \tag{5}$$

$$\text{s. t} \quad \sum_j \sum_k a_{ij} x_{jk} = 1, \forall i \tag{6}$$

$$\sum_j x_{jk} \leq 1, \forall k \tag{7}$$

式中： Z 为目标函数； k 为飞行员的集合， $k=1, 2, \dots, n$ ， n 为航空公司飞行员的总数量； f_j 为航班环 j 的疲劳程度， f_j 参考式 (3)； f_{0k} 为飞行员 k 前 6 天排班计划所求得的疲劳程度； a_{ij} 为 $i \times j$ 维矩阵中的元素，表示航班环与航班的联系矩阵，即 a_{ij} 的 0-1 取值表示航班环 j 是否包含 i 航班，若航班环 j 包含航班 i 时则等于 1，否则等于 0； x_{jk} 为决策变量， x_{jk} 的 0-1 取值表示是否选取航班环 j ，若是选取航班环 j 则等于 1，否则等于 0。

该模型将复杂的机组排班问题转化成线性优化模型，在进行指派时不违反任何有关限制条件。其实现目标为：①在众多航班环分配方案中选取最优的组环方案；②将选择好的航班组环方案分配给飞行员，并能保证第 7 天的飞行员的疲劳程度均衡。其中，式 (6) 表示飞行员应选择哪个组环方案，且航班环中的每一个航班有且只能选择一次；式 (7) 则表示飞行员 k 是否选择航班环 j 。

3 遗传算法设计

遗传算法^[12]是一种基于现代生物学进化机制中“适者生存，不适者淘汰”的自然选择以及遗传变异的全局概率性的自适应搜索算法，在搜索过程中可以自动获取搜索空间，然后不断指导和积累有关搜索空间的知识，并可自适应地控制搜索方向，所以在解决组合优化问题尤其是机组排班指派问题时具有相当强的优越性。

在利用遗传算法求解某个问题时，问题的任一可能解都会被编码表示为“染色体(chromosome)”，而每一个“染色体(chromosome)”就是一个个体(individual)，并由若干个个体(individual)组成群体

(fitness)，即所有可能解。当算法开始时，会随机产生一些初始解(即个体)，然后根据预定的目标函数对每个个体进行评估，并被赋予一个适应度值(个体对环境的适应程度)，其中符合条件的个体被用来产生下一代，不符合条件的个体终将被淘汰。这些选择出来的“好”的个体(即符合条件的个体)构成群体，群体继而又经过选择(selection)、交叉(crossover)、变异(mutation)等遗传操作不断进化，群体在每一代进化过程中不断产生适应度值更大的个体，因为新生成的个体继承了上一代个体的优良性状，所以新生成的个体在性能上要优于上一代，在遗传算法自适应搜索作用下，群体不断进化，最终收敛到该问题的最优解。

遗传算法基本原理如图 1 所示。

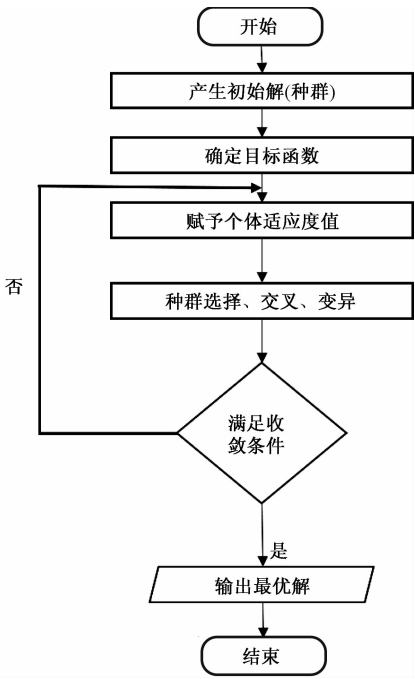


图 1 遗传算法基本原理

本文在遗传算法参数的选择上，由于涉及多种参数和运算类型的选择，如种群大小、个体选择方式、交叉方式、交叉率、个体变异率等，在实际演算测试中，以遗传演算过程的参数如交叉、变异率优先决定，再考虑个体选择方式、交叉方式。

遗传算法参数设定：①种群大小为 50；②演算代数 250；③最大评估次数为 25 000；④选择方式为基于精英的轮盘赌选择；⑤交叉方式为两点交叉；⑥交叉率为 0.8；⑦个体变异率为 0.1；⑧基因变异率为 0.1。

4 案例分析

为保证模型的真实有效性，特选取国内某小型

航空公司周航班计划,开展实例研究。

现有某航空公司为期一周的航班计划,该航班计划共有 113 个航班,涉及 17 名飞行员,且飞机机型一致,均为 E190 机型,机场 ZBSJ 为基地机场。根据周一到周六的航班计划,将周日航班计划重新分配,使得分配到任务的飞行员疲劳程度均衡。

第 1 步:根据飞行员疲劳程度计算模型(3)计算一周航班计划中所有飞行员以及原周天航班计划中飞行员的疲劳程度值,其值均保留 4 位小数,结果见表 1、表 2。

第 2 步:将周日的航班计划按照《航空运输规划》^[13]中航班连接网络的方法进行组环。周日航班计划见表 3。

按照上述方法组环,路径如下。

- S₁:2→1
- S₂:2→1→3→4
- S₃:3→4
- S₄:5→4
- S₅:5→6

- S₆:5→6→2→1
- S₇:5→6→3→4
- S₈:10→7
- S₉:10→9→8→7

其中,组环配对方案有以下 4 种情况。

- 1)S₁:2→1; S₃:3→4; S₅:5→6; S₉:10→9→8→7。
- 2)S₁:2→1; S₇:5→6→3→4; S₉:10→9→8→7。
- 3)S₃:3→4; S₆:5→6→2→1; S₉:10→9→8→7。
- 4)S₅:5→6; S₂:2→1→3→4; S₉:10→9→8→7。

第 3 步:将周天组环配对方案重新分配给飞行员,并利用遗传算法求解。优化曲线、结果如图 2、图 3 所示。

优化结果显示,周天航班任务的分配情况为第 4 种方案(S₅:5→6;S₂:2→1→3→4;S₉:10→9→8→7),并将 3 个任务分配给了 3 名飞行员,S₅分配给飞行员 C13,S₂分配给飞行员 C6,S₉分配给飞行员 C17。

第 4 步:结果对比。按照上述计算机输出结果,将周天原有飞行员的疲劳程度与优化后被选择的飞行员的疲劳程度做比较,看优化后的疲劳程度是否较之前更均衡。在概率论和统计学中,常用方差来衡量随机变量或者一组数据的离散程度,在研究

表 1 周航班计划所有飞行员疲劳程度

飞行员编号	疲劳程度	飞行员编号	疲劳程度	飞行员编号	疲劳程度
C1	1.426 8	C7	0.477 3	C13	0.271 8
C2	0.452 2	C8	0.752 4	C14	0.716 9
C3	0.527 1	C9	0.271 8	C15	0.646 0
C4	0.618 1	C10	0.716 9	C16	0.737 5
C5	0.602 2	C11	0.646 0	C17	0.218 1
C6	0.047 7	C12	0.737 5		

表 2 周天航班计划原飞行员疲劳程度

飞行员编号	疲劳程度
C6	0.047 7
C13	0.271 8
C16	0.737 5
C17	0.218 1

表 3 周日航班计划

航班号	出发机场	到达机场	出发时间	到达时间
1	ZSAM	ZBSJ	15:01	17:28
2	ZBSJ	ZSAM	11:12	13:41
3	ZBSJ	ZBZJ	18:52	19:36
4	ZBZJ	ZBSJ	20:39	21:18
5	ZBSJ	ZBZJ	7:18	8:32
6	ZBZJ	ZBSJ	9:15	10:18
7	ZUZY	ZBSJ	15:55	18:08
8	ZJHK	ZUZY	13:30	15:09
9	ZUZY	ZJHK	10:38	12:13
10	ZBSJ	ZUZY	7:11	9:35

注:机场名称均为国际民用航空组织机场四字代码。

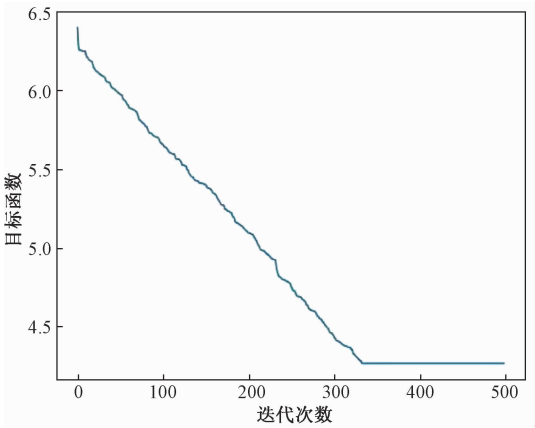


图 2 优化曲线

每名飞行员的疲劳程度:
[1.4268, 0.4522, 0.5271, 0.6181, 0.6022, 0.3935, 0.4773, 0.7524, 0.8522, 0.3556, 1.2416, 0.9655, 0.3967, 0.7169, 0.646, 0, 0.4301]

所有飞行员疲劳程度均值:
0.6384823529411764

最终任务分配选择情况: 4
情况4中的第1个任务 → 飞行员13
情况4中的第2个任务 → 飞行员6
情况4中的第3个任务 → 飞行员17

图 3 优化结果

实际问题时,方差有着重要意义。借用统计学中方差的概念:一组数据与平均值(或数学期望)的偏离程度,用此来衡量优化后与优化前两组数据之间飞行员疲劳程度的差异,即方差(或偏离程度)越小,表明这组数据越稳定,飞行员的疲劳程度越均衡。周天优化前后飞行员疲劳程度见表 4。

利用优化前与优化后的周天飞行员疲劳程度的平均值和方差,最终计算出优化率即每组数据的平均值之差与优化前数据的平均值比值,见表 5。

表 4 周天优化前后飞行员的疲劳程度

优化前		优化后	
飞行员编号	疲劳程度	飞行员编号	疲劳程度
C6	0.047 7	C6	0.393 5
C13	0.271 8	C13	0.396 7
C16	0.737 5	C16	0
C17	0.218 1	C17	0.430 1

表 5 周天飞行员疲劳程度优化结果

参数	优化前	优化后
疲劳程度均值	0.477 8	0.406 8
方差	0.042 5	0.000 3
优化率/%	15	

5 结论

本文把飞行员疲劳问题与机组排班问题相结合,将航空公司一周内某天的航班任务组环并给定分配方案,建立了基于疲劳均衡的机组指派模型,最后利用遗传算法将航班任务重新分配给飞行员,使得安排到当天航班任务的飞行员疲劳程度均衡。计算结果显示,当天飞行员的疲劳程度得到了较大改善,且每名飞行员的疲劳程度与当天疲劳度均值

的差异较小,这表示飞行员的疲劳程度较稳定,以此反映该模型基于疲劳度均衡的机组排班方法真实且有效。

参考文献

[1] 张广伟. 航空公司机组排班问题算法研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2021.

[2] 游婧怡. 基于飞行疲劳角度探究民航飞行员飞行安全策略[J]. 湖北农机化,2020(4):140.

[3] 乔立民,甄会朋,曹德金. 飞行疲劳的危害及预防[C]//航空安全与装备维修技术学术研讨会论文集. 北京:国防工业出版社,2014:206-208.

[4] YILDIZ B C,GZARA F,ELHEDHLI S. Airline crew pairing with fatigue: modeling and analysis[J]. Transportation Research Part C,2017,74:99-112.

[5] NOVAK A,BADANIK B,BREZONAKOVA A, et. al. Implications of crew rostering on airline operations[J]. Transportation Research Procedia,2020,44:2-7.

[6] PCA A,KA A. Many-objective low-cost airline cockpit crew rostering optimization[J]. Computers & Industrial engineering,2020,150:1-12.

[7] 张迪. 基于疲劳度均衡的飞行机组排班方法研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2022.

[8] 民航西南地区管理局. 关于持续监控西南地区飞行人员疲劳系数的通知[Z]. 成都:民航西南地区管理局,2020.

[9] 龙翔. 飞行员疲劳的影响因素及克服方法研究[J]. 科技资讯,2013(24):190-193.

[10] 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,2021.

[11] 张硕. 航空公司飞行机组指派问题研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2013.

[12] 唐成. 运输优化问题中常见启发式算法比较与研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.

[13] 朱金福. 航空运输规划[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

Research on Crew Assignment Model Based on Fatigue Equilibrium

ZHANG Di¹, SUN Hong², ZHANG Peiwen²

(1. School of Tourism Management,Qingdao Hengxing University,Qingdao 266100,Shandong,China;
2. School of Scientific Research Base,China Civil Aviation Flight College,Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: According to the characteristics of the single base linear route structure in the production and operation of domestic small airlines, It is the first time to combine pilot fatigue with crew scheduling,based on the weekly flight plan, the traditional crew scheduling assignment model is further improved and innovated, and the flight crew scheduling assignment model based on fatigue equilibrium is studied. First, quantify the flight fatigue of the crew and determine the calculation model of pilot fatigue. The second is to build a crew scheduling and assignment model based on fatigue equilibrium. Thirdly, genetic algorithm is adopted to solve the problem. Fourth, take the flight plan of existing airlines as an example, and compare and analyze the fatigue degree of pilots on that day with the original scheduling. The results show that the fatigue degree of pilots has been greatly improved, and the difference between the fatigue degree of each pilot and the average fatigue degree of the day is small, and the fatigue degree of pilots is relatively stable, so the study of crew assignment model based on fatigue equilibrium is true and effective.

Keywords: flight fatigue;unit scheduling;fatigue equilibrium;genetic algorithm