

基于鲁棒性提高的航班计划优化模型

高 谦, 王世瑞, 高 强

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 为了减少由于各种原因导致的航班延误情况, 提高航班计划的鲁棒性, 在对某航空公司冬春航班的某月 10 d 航班延误数据进行分析的基础上, 建立了基于鲁棒性提高的航班计划优化模型。该模型在制订航班计划时考虑鲁棒性因素, 并且通过约束成本控制航班运营成本的增加。为了验证模型的准确性, 通过 Lingo 进行建模, 并代入 10 d 的航班数据进行验证。实验结果表明, 当航班成本增加比率为 0 时鲁棒性为 0, 当航班成本增加比率为 0.2 时鲁棒性有最大解, 10 d 之中 8 d 结果正常, 仅有 2 d 因为数据缺失产生较小解, 初步完成了模型的验证。

关键词: 航班计划; 鲁棒性; 成本; Lingo

中图分类号: [U8]; F562

文献标志码: A

本文引用格式: 高谦, 王世瑞, 高强. 基于鲁棒性提高的航班计划优化模型[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 73-78.

Flight Planning Optimization Model Based on Improved Robustness

Gao Qian, Wang Shirui, Gao Qiang

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

Abstract: In order to reduce flight delays caused by various reasons and improve the robustness of flight plans, based on the analysis of the flight delay data of a certain airline in winter and spring flights for a certain month and ten days, an optimization model of flight plan based on the improvement of robustness is established. The model considers robustness factors when formulating flight plans, and controls the increase in flight operating costs by constraining costs. In order to verify the accuracy of the model, this paper uses Lingo to perform modeling and brings in ten-day flight data for verification. The experimental results show that the robustness is 0 when the flight cost increase rate is 0, and the robustness has the maximum solution when the flight cost increase rate is 0.2. The results are normal on the eighth day of ten days, and only two days are due to missing data. Smaller solution, preliminary verification of the model has been completed.

Key words: flight planning; robustness; operating cost; lingo

Citation format: GAO Q, WANG S R, GAO Q. Flight planning optimization model based on improved robustness[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 73-78.

2004年 Rosenberger^[1]为了减少航班链上的延误和波及延误, 通过采取了减少航班链长度和降低枢纽机场连通性的方法建立了鲁棒性优化模型, 并且成功增加了航班计划的鲁棒性且减少了运营成本。Claudine^[2]以增加非枢纽机场航班计划鲁棒性为目标, 通过区别非枢纽机场的种类, 建立了机组排班和机型指派的鲁棒性优化模型, 并且成功增加了

非枢纽机场航班计划的鲁棒性。Lan 等^[3]提出了站在航空公司和旅客角度两种新的方法提高航班计划鲁棒性, 分别以减少航班链长度和最小化延误影响的旅客数量为目标建立模型, 两种方法都不同程度的减少了延误带来的成本增加。Dunbar M^[4]为了减少延误的总时间和延误总成本, 提出了一种合并了飞机路线和机组规划鲁棒性的增强模型, 并且有效

收稿日期: 2020-10-27

作者简介: 高谦(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航班计划鲁棒性。E-mail: 2046740606@qq.com。

通信作者: 高强(1973—), 男, 副教授, 研究方向为航空规划。E-mail: gaoqiang@nuaa.edu.cn。

的减少了延误成本。Lee L H^[5]为了解决鲁棒性求解问题,采用了多目标遗传算法对其通过仿真建立的多目标航班计划的鲁棒性优化模型进行求解,这种方法的优势在于可以在多重标准的情况下都可以求出最优解,但这个最优解并不完全符合实际意义。目前,国内学者朱新辉^[6]提出了基于飞机排班的一体化鲁棒优化模型,通过设置双目标分别量化了整体航班计划的鲁棒性和运营成本,但是其模型并未考虑航班更改而产生的成本。针对现有模型的不足,在这些模型的基础上建立基于鲁棒性提高的航班计划优化模型。

1 鲁棒性及运营成本计算

1.1 鲁棒性的定义及计算

鲁棒性(Robustness)是指当系统处于外界干扰时可以保持原系统状态的不变的能力和当系统状态改变时可以快速恢复系统状态的能力的综合能力。针对航班计划来说,如果在制订航班计划时考虑到抵御航班延误和在已产生延误的基础上恢复航班状态,这就是提高航班计划的鲁棒性。目前提高航班计划的鲁棒性的方法主要有:增加过站松弛时间、提高机型纯度、减少航班链长度。由于提高机型纯度这种方法相对于航空公司来说短期实行成本巨大,故仅针对增加过站松弛时间和减少航班链来设计模型。鲁棒性直接挂钩的变量为航班的起飞延误和到达延误,故可以将鲁棒性的计算公式(1)进行定义^[7]

$$R_f = \frac{IDD_f + IDA_f}{TDD_f + TDA_f}, f \in F \quad (1)$$

式中: R_f 表示某个航班 f 的鲁棒性; IDD_f 代表航班 f 的固有起飞延误; IDA_f 代表航班 f 的固有到达延误; TDD_f 代表航班 f 的实际起飞延误; TDA_f 代表航班 f 的实际到达延误; F 代表航班集合。具体含义如图1所示^[7]。

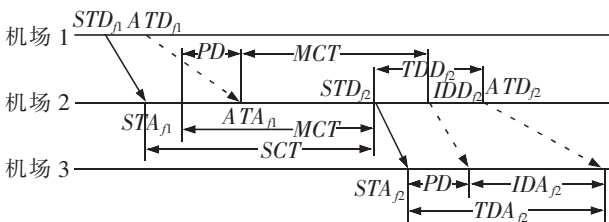


图1 航班延误示意图

Fig.1 Schematic diagram of flight delays

图1中 STD 为计划起飞时间; SCT 为计划过站时间; TDD 为实际起飞延误; STA 为计划到达时间; MCT 为最小过站时间; TDA 为实际到达延误; ATD 为实际起飞时间; IDD 为固有起飞延误; ATA 为实际到达时间; PD 为波及延误; IDA 为固有到达延误。

由于不考虑波及延误,故可将鲁棒性定义公式改为

$$R_f = \frac{TDD_f + TDA_f}{CDD_f + CDA_f}, f \in F \quad (2)$$

式中: CDD_f 代表航班 f 的更改起飞延误; CDA_f 代表航班 f 的更改到达延误。具体含义如图2所示。

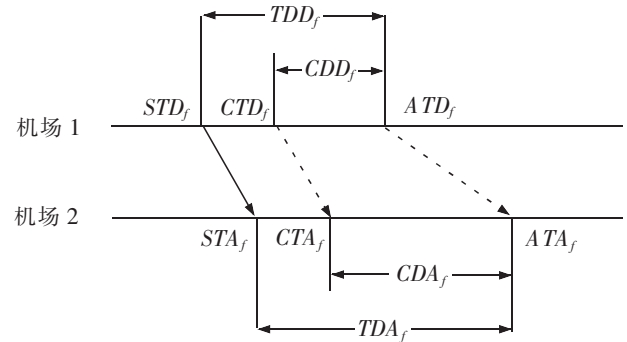


图2 更改航班计划示意图

Fig.2 Sketch map of changing flight schedule

更改起飞延误为当更改起飞延误和更改到达延误的总和小于实际起飞延误和实际到达延误的总和时,总延误减少, R_f 的值为正,航班 f 鲁棒性增加;反之,总延误增加, R_f 为负,航班 f 鲁棒性减少。

1.2 航班计划运营成本的计算

航班计划运营成本分为计划运行成本和航班恢复成本两个部分。计划运行成本为航班运行时所产生的固有成本,包括燃油成本、机组成本、折旧成本、维修成本、起降成本和航路成本等。

不同的机型每小时消耗的燃油体积不等,通过查阅资料得知目标航司的机型为波音737-800、波音737-300和ERJ-145的耗油量分别为2650、2800、1200 L/h,并且设置当下航空燃油成本为6元/L,就可以得出所有航班的燃油成本,计算公式如

$$C_f^{fuel} = t_f \times FC_f^k \times 6, k \in K \quad (3)$$

式中: C_f^{fuel} 为航班 f 的耗油成本; t_f 为航班 f 的飞行时间; h ; FC_f^k 为航班 f 在 k 机型下每小时的耗油量; k 为机型, K 为机型的集合。

机组成本通过查阅相关资料可知该公司目标

机型波音 737-800、波音 737-300 和 ERJ-145 的机组人员数量分别为 6,6,5 人。根据机组人员每小时的工资可知,波音 737-800 和波音 737-300 每小时机组花费 730 元,ERJ-145 每小时机组花费 670 元。机组成本计算公式如

$$C_f^{\text{crew}}=t_f \times CC_f^k, k \in K \quad (4)$$

式中: C_f^{crew} 为航班 f 的机组成本; t_f 为航班 f 的飞行时间, h ; CC_f^k 为航班 f 在 k 机型下每小时的机组成本。

折旧成本与维修成本都与飞机的购买成本和飞机的发动机成本相关。折旧成本就是飞机航材所消耗的成本,飞机每次执行航班任务都会对机身造成一定程度的磨损。维修成本又分为维修工时费和航材消耗费两个部分。其计算公式如(5)和(6)所示

$$C_f^{\text{depreciation}}=\frac{(1.1P_{\text{airplane}}+0.3P_{\text{engine}})(1-R_j)}{Y_{\text{year}}U} \quad (5)$$

式中: P_{airplane} 为购买飞机价格; Y_{year} 为折旧年限; P_{engine} 为单台发动机价格; R_j 为机型 j 的残值率,一般按飞机售价的 5% 计算; U 为年轮挡小时数。

通过查阅相关资料可知该公司目标机型波音 737-800,波音 737-300 和 ERJ-145 的每小时的折旧成本分别为 11 083,10 298,3 314 元。

$$C_f^{\text{labor}}=\frac{\begin{cases} 4(W_{\text{emp}}+1.2 \times 10^5)(1+0.59t_{\text{flight}}) \\ [(5 \times 10^{-5}W_{\text{emp}}+6)(W_{\text{emp}}+1.2 \times 10^5)-6.3 \times 10^5] \\ +4*[0.6t_{\text{flight}}+0.3+3 \times 10^{-5}W_{\text{max}}(0.9t_{\text{flight}}+1)] \end{cases}}{t_{\text{block}}} \quad (6)$$

式中: W_{emp} 为飞机空重; t_{flight} 为飞机飞行小时数; W_{max} 为最大起飞重量。

通过查阅相关资料可知该公司目标机型波音 737-800,波音 737-300 和 ERJ-145 的每小时维修成本为 3 180,3 360,1 440 元。

其余的成本包括飞机起降成本和航路成本。通过查阅相关资料可知该公司目标机型波音 737-800,波音 737-300 和 ERJ-145 的每架次起降成本为 3 360,2 200,2 000 元;每公里航路成本为 0.39,0.23,0.11 元。

由以上推算可知航班计划运营成本为如式(7)所示。其中定值 a 为航班起降成本与航路成本的和,具体到每一个航班来说为定值。

$$C_f^{\text{opr}}=C_f^{\text{fuel}}+C_f^{\text{crew}}+C_f^{\text{depreciation}}+C_f^{\text{labor}}+a \quad (7)$$

1.3 航班恢复成本的计算

航班计划恢复成本由延误成本,取消成本,换

机成本和调机成本组成^[7],由于换机和调机的成本过高,发生条件比较苛刻,故发生概率较低,暂不对换机成本和调机成本进行计算。

1.3.1 延误成本

延误成本是航班运行成本里一项占比较大的成本,由于将延误等非正常航班情况单独作为一项进行计算,故将延误成本归纳为航班恢复成本中进行计算。不同的航班延误成本不相同,这取决于机型航线等因素,是一个复杂的变量,为了便于计算,用 UC 来表示单位时间内平均每旅客延误成本,每个航班的延误成本可表示为^[8]

$$C^{\text{delay}}=UC^{\text{delay}} \times N \times T \quad (8)$$

式中: N 为机型载客量; T 为延误时间;延误成本 UC^{delay} 设定为每延误一分钟亏损 1 200 元; N 基于不同机型而不同。

1.3.2 取消成本

通常情况下航空公司不会轻易取消航班,因为取消航班的成本巨大,并且后续航班很难得到有效的执行,还降低了航空公司的声誉,航班取消的成本表示方法如

$$C^{\text{cancellation}}=N \times P \quad (9)$$

式中: N 为机型载客量; P 为综合票价。 N 和 P 均可以通过机型求出。

1.3.3 航班的期望恢复成本计算

航班的期望恢复成本由上文的两个成本组成,如

$$C^{\text{rec}}=p^{\text{delay}} \times C^{\text{delay}}+p^{\text{cancellation}} \times C^{\text{cancellation}} \quad (10)$$

式中: p^{delay} 为延误发生的概率; $p^{\text{cancellation}}$ 为航班取消发生的概率。其中由于不考虑换机和调机的情况,则认为换机和调机发生的概率为 0^[9],由此可总结为式(11),其中 p^{regular} 为正常航班的概率。

$$p^{\text{delay}}+p^{\text{cancellation}}+p^{\text{regular}}=1 \quad (11)$$

2 基于鲁棒性提高的航班计划优化模型

本模型在时空网络模型的基础上进行了变换,以整体航班计划的鲁棒性最大化为目标,模型参数和变量的含义为: R_f 代表航班 f 的鲁棒性; F 代表航班集合, $f \in F$; K 代表机型集合, $k \in K$; S 代表航班链集合, $s \in S$; C_f^{opr} 代表计划运行成本; C_f^{rec} 代表期望恢复成本; r 代表航班成本增加比率; C_{min} 为不考虑鲁棒性的情况下航班计划运行成本最小值; x_f 为决策变量,当航班被执行时取值为 1,反之为 0; a_k 为指

示变量,当航班 f 在航班链 s 上时, a_{fs} 为 1,反之为 0; x_{sk} 为决策变量,当航班链 s 被选中并且由机型 k 所执飞时, x_{sk} 为 1,反之为 0; y_{dk-} 和 y_{dk+} 分别代表在整个航班计划中任意时刻前后起飞的机型 k 的数量; y_{ak-} 和 y_{ak+} 分别代表在整个航班计划中任意时刻前后到达的机型 k 的数量^[9]。

根据以上参数以及变量,建立以下基于鲁棒性提高的航班计划优化模型

$$\max \sum_{f \in F} R_f x_f \quad (12)$$

$$\min \sum_{f \in F} (C_f^{opr} + C_f^{rec}) \quad (13)$$

$$\text{s.t. : } \sum_{s \in S} a_{fs} x_{sk} = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S^+} x_{sk} - y_{dk-} + y_{dk+} = 0 \quad (15)$$

$$\forall f \in F + \forall k \in K \quad (16)$$

$$-\sum_{s \in S^-} x_{sk} - y_{ak-} + y_{ak+} = 0 \quad (17)$$

$$\forall f \in F - \forall k \in K \quad (18)$$

$$y_{dk-} \geq 0; y_{dk+} \geq 0; y_{ak-} \geq 0; y_{ak+} \geq 0 \quad (19)$$

$$x_{sk} \in \{0, 1\}; a_{fs} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

该模型中,式(12)目标函数表示使得整个航班计划鲁棒性最大化;式(13)为航班计划运行成本与期望恢复成本之和最小化;式(14)为航班覆盖约束;式(15)和式(17)为航班网络模型的节点流平衡约束;式(19)和式(20)为变量约束^[11]。

3 基于十日航班数据的模型求解

由于模型是双目标函数,在求解过程中有一定的困难,故通过将模型简化为单目标函数来进行计算^[12]。求解思路如图 3 所示。

3.1 将双目标函数模型转换为单目标函数模型

由于调整完航班计划后会减少延误的时长,但是变相增加了航班调整和取消的次数,导致了 C_f^{rec} 的增加,所以为了防止一味的增加鲁棒性而忽视航班计划成本的增加,将成本的目标函数转为约束以限制成本的无限制增长^[13]。转换后成本目标函数变为以下约束

$$\sum_{f \in F} (C_f^{opr} + C_f^{rec}) \leq (1+r)C_{\min} \quad (21)$$

式中:可以发现计算结果与 r 的取值直接相关,在理想状态下 $r=0$ 时式子无解,即不增加成本而提高航班计划鲁棒性的结果不存在,同时通过航班经验得知航空延误成本一般是总成本的 20%~28%,这里通过取下限 20%来约束 r 的取值范围为[0,0.2]。

3.2 通过原数据求解 C_{\min} 与 $C_{\text{cancellation}}$

由于已知某航司在冬春航班上某月十天的航

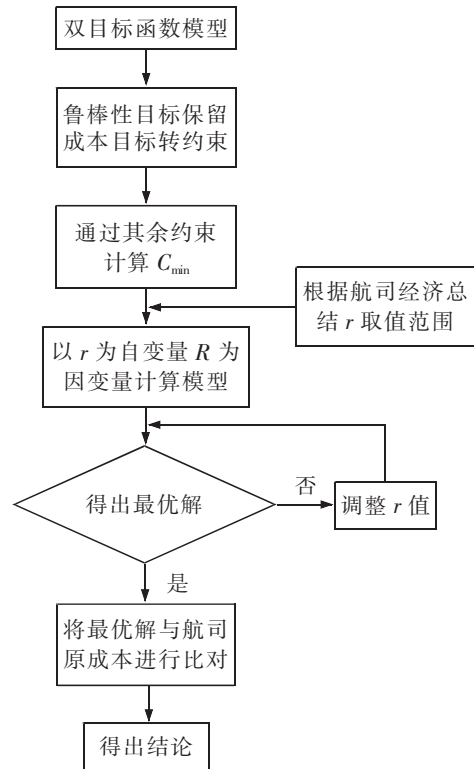


图 3 模型求解思路
Fig.3 Model solution idea

班数据,可以通过第一节里面介绍的方法对每一天的航班运营成本进行计算,因为航司在不计算延误的情况下航班计划是按照最小运营成本制订的,所以可以认为 C_{\min} 即为每一天的运营成本^[14]。计算结果如表 1 所示。

表 1 每日最小运营成本
Tab.1 Minimum daily operating costs

日期	运行成本/元
Day1	4 982 740.1
Day2	4 437 942.7
Day3	4 698 147.7
Day4	4 756 309.1
Day5	4 238 902
Day6	4 444 020.3
Day7	4 140 824.6
Day8	4 275 531.2
Day9	4 081 236.4
Day10	4 587 686.9

求出 C_{\min} 以后便可以通过 C_{\min} 对单目标模型进行求解,目标函数为 $\max \sum_{f \in F} R_f$ 。

由于已知航班计划的情况下,当前航班计划不考虑延误成本即为航司运营实际最小成本。故约束式(21)可以简化为式(22)

$$\sum_{f \in F} C_f^{\text{rec}} \leq r C_{\min} \quad (22)$$

将约束式(22)带入原模型,即可得到化简之后的模型。模型如下

$$\max \sum_{f \in F} \left(\frac{TDD_f + TDA_f}{CDD_f + CDA_f} - 1 \right) x_f \quad (23)$$

$$\text{s.t.} : \sum_{f \in F} C_f^{\text{rec}} \leq r C_{\min} \quad (22)$$

$$\sum_{s \in S} a_{fs} x_{sk} = 1 \quad (14)$$

$$x_{sk} \in \{0, 1\}; a_{fs} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

式(23)中的 R_f 通过第一章里面的公式进行替换;式(14)为航班覆盖约束;式(20)为变量约束。

通过上文的求解 C_{\min} 可以发现这 10 天之内的航班数量并不相同,这也是导致每天运营成本差距较大的原因,对此可以推算出航司已经将所有不适合运行的航班进行了取消,对此约束式(22)里面的 C_f^{rec} 由原式(10)可知 $C_f^{\text{rec}} = p^{\text{delay}} \times C^{\text{delay}} + p^{\text{cancellation}} \times C^{\text{cancellation}}$ 。由于在这 10 天中第 1 天的运营成本最大,并且航班数量最多,假定第 1 天的航班计划为没有航班取消的情况,通过观察航班数据得知第 4 天也

表 2 每日航班取消成本
Tab.2 Daily flight cancellation costs

日期	取消航班数	航班取消成本/元
Day1	0	0
Day2	14	357 432.4
Day3	7	168 966.4
Day4	0	0
Day5	8	203 062.1
Day6	4	94 587.8
Day7	14	428 943.5
Day8	5	116 980.9
Day9	13	397 862.7
Day10	5	100 896.2

没有产生航班取消情况,其余时间的航班计划均产生了不同程度的取消。通过式(9)可以计算出 $C^{\text{cancellation}}$,如表 2 所示。其中波音 737-800,波音 737-300 和 ERJ-145 载客量分别为 164,149 人和 50 人^[15],综合票价取各个航班票价。 $p^{\text{cancellation}}$ 为这十天内该航班取消的概率。

3.3 通过 Lingo 软件求鲁棒性最大值

在已知上述条件下,通过 Lingo 进行建模对航班计划鲁棒性进行求解。

通过对 Lingo 的求解结果描点作图,可得到鲁棒性 R 随着比率 r 变化的曲线图,这里采用 Day1 的数据进行作图。实验结果如图 4 所示。

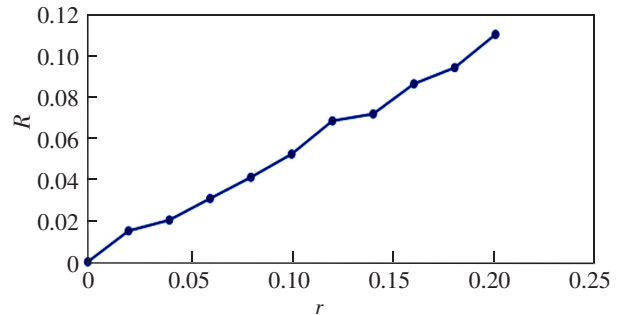


图 4 实验结果

Fig.4 Experimental results

从图 4 可知随着 r 的增长,航班计划的鲁棒性随之增长,并且在 $r=0.2$ 时到达最高点。

通过 Lingo 计算得到当 $r=0.2$ 时 10 天的鲁棒性如表 3 所示。

表 3 每日鲁棒性
Tab.3 Daily robustness

日期	R
Day1	0.11
Day2	0.13
Day3	0.85
Day4	0.94
Day5	0.67
Day6	1.28
Day7	0.10
Day8	0.61
Day9	0.15
Day10	0.32

根据表3的结果可以发现在模型优化这10天中的八天鲁棒性都得到了不同程度的提高。而day7与Day9的鲁棒性为0.10和0.15,结果相较于其他天数较小,通过对数据的观察发现缺少部分航班计划延误时间,导致产生了一定程度的异常。Day1和Day6都没有数据缺失,但是结果差值较大,通过数据观察发现由于Day1的延误时间最长,而Day6的延误时间最短,由此可见该模型在较短时间内的延误下可以极大的增加航班计划鲁棒性。

4 结论

1) 航班计划遭遇延误的情况是无法避免的,通过设置模型,将航班计划的鲁棒性最大化,并且通过十日的航班数据来验证模型的正确性。该模型可以帮助航空公司在制订航班计划时考虑鲁棒性这个因素,从而在设计之初增加过站裕度时间以减少航班延误的发生。

2) 通过功能强大的Lingo软件建模求解,并将结果绘图,得到了当 $r=0.2$ 时鲁棒性最大的结论。

3) 本模型的不足在于没有考虑调机和飞机交换的成本,导致在计算时会产生鲁棒性偏高的结果,综合考虑所有期望恢复成本并进行建模计算是接下来研究的重点。

参考文献:

- [1] ROSENBERGER J M. A Robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles[J]. Transportation Science, 2004, 38(3): 357-368.
- [2] CLAUDINE B A. Robust airline schedule planning: review and development of optimization approaches[D]. Massachusetts: USA MIT, 2004.
- [3] LAN S, CLARKE J P, BARNHART C. Planning for robust airline operations: Optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions [J]. Transportation Science, 2006, 40(1): 15-28.
- [4] DUNBAR M. Robust airline schedule planning: minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework[J]. Transportation Science, 2012, 46(2): 204-216.
- [5] LEE L H, LEE C U, TAN Y P. A multi-objective genetic algorithm for robust flight scheduling using simulation [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 1948-1968.
- [6] 朱星辉, 吴薇薇, 戚彦龙. 基于延误传播的飞机排班一体化鲁棒优化模型[J]. 西南交通大学学报, 2015, 62(2): 375-381.
- [7] 陶蕾, 彭怡. 考虑不正常航班恢复成本的飞机排班计划的鲁棒性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [8] 李福娟. 基于航线决策的航班计划优化研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [9] 李哲. 南方航空公司武汉客运市场发展策略研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [10] 牟德一, 张宗贤. 基于航班延误概率的鲁棒性飞机排班模型[J]. 中国民航学院学报, 2010(6): 35-39.
- [11] 牟德一, 王志新, 夏群. 基于机组延误概率的鲁棒性机组配对问题[J]. 系统管理学报, 2011, 20(2).
- [12] 朱星辉, 朱金福, 高强. 基于航班纯度的鲁棒性机型指派问题研究[J]. 预测, 2011, 30(1): 71-74.
- [13] 孙宏, 张培文, 汪瑜. 基于航线网络运力优化分配的机队规划方法[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 111-115.
- [14] 唐小卫, 高强, 朱金福. 不正常航班恢复模型的贪婪模拟退火算法研究[J]. 预测, 2010, 29(1): 66-70.
- [15] 白凤, 朱金福, 高强. 基于列生成法的不正常航班调度[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 2036-2045.