

## 基于随机扰动航班时刻的停机位分配

高 阳 夏洪山 梁的达 李 欢

(南京航空航天大学 民航学院 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 由于航班计划时刻构建的停机位调度在航班进离港时间存在扰动,不能很好地达成规划目标。构建一种将航班时刻随机性纳入考量的优化模型,引入航班时刻偏差随机参数,以航班冲突次数期望值最小化和航班靠桥率最大化为优化目标,运用分层序列法和改进的全局人工蜂群算法对随机扰动航班时刻下的停机位进行分配优化,最后利用 MATLAB 运行某机场某时段的实例数据,验证了模型和算法的有效性和优越性。

**关键词:** 随机航班时刻; 停机位分配; 机坪运行安全; 航班靠桥率

中图分类号: V355 文献标识码: A 文章编号: 1671-654X(2019)03-0051-05

## Gate Assignment Based on Random Flight Time

GAO Yang, XIA Hong-shan, LIANG Di-da, LI Huan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The gate allocation based on scheduled flight time cannot achieve the planning goal well when the arrival and departure time of flight are uncertain in practice. Therefore, an optimization model considering the randomness of flight time is proposed and the random parameters of flight time deviation are constructed, aiming at minimizing the expected conflicts of flights and maximizing the bridge-on-board ratio of flights. Sequential optimization technique and global artificial bee colony algorithm is used to optimize the gate allocation based on stochastic flight time. Finally, MATLAB is used to run the actual data of an airport and the validity and superiority of the model and algorithm is verified.

**Key words:** random flight time; gate assignment; safety of apron operation; bridge-on-board ratio of flights

### 引言

近年来,民航运力不断增长,停机位分配中的安全问题愈发不容忽视。现有的国内外停机位研究或着眼于机位预分配<sup>[1]</sup>,或着眼于机位实时调整<sup>[2-4]</sup>,鲜有文献在停机位预分配阶段就考虑实际运行中航班时刻的随机扰动和安全问题<sup>[5-6]</sup>。

基于航班计划的停机位调度是针对给定的航班进离港时刻建立的,但在实际应用中,航班的进离港时间是存在扰动的,依照计划时刻得出的优化方案就不能很好地达成优化目标<sup>[7]</sup>,航班也许不能按时进入计划停机位,产生等待或冲突,从而降低机场的运行安全和服务质量。为了避免这些代价,本文构建一种基于随机扰动航班时刻的机位分配模型,在机位预分配阶段就将实际运行中的潜在风险降到最低,同时将航班靠桥率维持在一个较高的水平。本文用一组有限的场

景集合来表示航班时刻的随机性,其中一个场景表示航班计划场景,其余场景引入一个航班进离港时间扰动的随机变量。

### 1 随机扰动模型

#### 1.1 前提与假设

假设机场的容量能容纳该机场所有航班;假设所有飞机和机位拥有相同的安全时间间隔;假设所有随机场景出现的概率相同。

#### 1.2 符号含义说明

$M$  为停机位集合;  $N$  为航班集合;  $S$  为场景集合,  $s=0$  代表航班计划时刻场景;  $x_{ik}$  为 0-1 变量,若航班  $i$  被分配到机位  $k$  则为 1,否则为 0;  $A_{ij}^s$  为场景  $s$  下航班  $i$  在机位  $k$  的挡轮档时刻;  $D_{ik}^s$  为场景  $s$  下航班  $i$  在机位  $k$  的撤轮挡时刻;  $C_{ijk}$  为 0-1 变量,若航班  $i$  和航班  $j$  被

收稿日期: 2018-12-27 修订日期: 2019-03-30

基金项目: 国家社会科学基金项目资助(15BJL104)

作者简介: 高 阳(1995-),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为停机坪优化调度。

依次连续分配至机位  $k$  则为 1, 否则为 0;  $z_{kl}$  为 0-1 变量, 若机位  $k$  与机位  $l$  相邻则为 1, 否则为 0;  $\alpha$  指同一机位相邻航班的最短安全间隔, 设为 20 min;  $\beta$  指相邻机位航班的最短安全间隔, 设为 3 min;  $C_i$  指航班  $i$  的机型, 分为 A-E 五类, 分别取值 1~5;  $C_k$  指机位  $k$  的最大可停靠机型, 分为 A-E 五类, 分别取值 1~5;  $P_s$  指场景  $s \in S$  出现的概率;  $H_i^s$  为 0-1 变量, 若在场景  $s$  下航班  $i$  与其后续航班产生出入冲突则为 1, 否则为 0;  $L_i^s$  为 0-1 变量, 若在场景  $s$  下航班  $i$  与其相邻机位航班产生出入冲突则为 1, 否则为 0;  $W_i^s$  为 0-1 变量, 若在场景  $s$  下航班  $i$  与其相邻机位航班产生双出冲突则为 1, 否则为 0;  $G_i^s$  为 0-1 变量, 若在场景  $s$  下航班  $i$  与其相邻机位航班产生双入冲突则为 1, 否则为 0;  $Q_i$  为 0-1 变量, 若航班  $i$  被分配到远机位则为 1, 否则为 0。

### 1.3 目标函数

对多目标函数采用分层序列法, 对多个目标函数按照重要性排序, 依次进行优化求解。第一层目标函数如式 (1) 所示, 随机性模型只对计划时刻的场景进行冲突约束, 其他随机场景的安全通过航班冲突次数期望最小化的目标函数来进行控制, 使得机场停机位区域安全稳健运行。第二层目标函数如式 (2) 所示, 求解航班靠桥率最高的机位分配方案, 给乘客更好的出行体验, 提升机场的服务质量。

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} (H_i^s + L_i^s + W_i^s + G_i^s) P_s \quad (1)$$

$$\min \sum_{i \in N} Q_i \quad (2)$$

### 1.4 约束条件

$$H_i^s \in \{0, 1\} \quad (3)$$

$$(C_{ijk} - 1) \Lambda + \alpha - (A_{jk}^s - D_{ik}^s) < H_i^s \alpha \quad (4)$$

$$L_i^s \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$(x_{ik} x_{jl} z_{kl} - 1) \Lambda + \beta - |A_{ik}^s - D_{jl}^s| < L_i^s \beta \quad (6)$$

$$W_i^s \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$(x_{ik} x_{jl} z_{kl} - 1) \Lambda + \beta - |D_{ik}^s - D_{jl}^s| < W_i^s \beta \quad (8)$$

$$G_i^s \in \{0, 1\} \quad (9)$$

$$(x_{ik} x_{jl} z_{kl} - 1) \Lambda + \beta - |A_{ik}^s - A_{jl}^s| < G_i^s \beta \quad (10)$$

式 (3) 表示  $H_i^s$  为 0-1 变量; 式 (4) 中  $\Lambda$  为极大正实数, 该约束条件保证同一机位相邻航班小于安全时间间隔时  $H_i^s$  为 1, 否则为 0。同理, 式 (5) ~ 式 (10) 控制了另外几个冲突次数变量。

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

$$(C_k - C_i) x_{ik} \geq 0 \quad (13)$$

$$C_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N} C_{ijk} \leq x_{ik} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in N} C_{ijk} \leq x_{jk} \quad (16)$$

$$C_{ijk} + C_{jik} \leq 1 \quad (17)$$

式 (11) 表示唯一性约束; 式 (12) 表示  $x_{ik}$  是 0-1 变量; 式 (13) 为机型 - 机位匹配约束; 式 (14) 表示  $C_{ijk}$  为 0-1 变量; 式 (15) 表示航班最多只能有一个同机位后续航班; 式 (16) 表示航班最多只能有一个同机位前驱航班; 式 (17) 保证相邻航班的合理性。式 (3) ~ 式 (17) 对所有  $s \in S$  的场景成立。

$$A_{jk}^s - D_{ik}^s \geq \alpha C_{ijk} \quad s = 0 \quad (18)$$

$$|A_{jk}^s - D_{jl}^s| \geq \beta x_{ik} x_{jl} z_{kl} \quad s = 0 \quad (19)$$

$$|D_{jl}^s - D_{ik}^s| \geq \beta x_{ik} x_{jl} z_{kl} \quad s = 0 \quad (20)$$

$$|A_{jl}^s - A_{ik}^s| \geq \beta x_{ik} x_{jl} z_{kl} \quad s = 0 \quad (21)$$

式 (18) 表示分配至同一机位的相邻航班需大于安全间隔  $\alpha$ ; 式 (19) 表示相邻机位航班出入时需大于安全间隔  $\beta$ ; 式 (20) 表示相邻机位航班双出时需大于安全间隔  $\beta$ ; 式 (21) 表示相邻机位航班双入时需大于安全间隔  $\beta$ 。上述 4 个约束仅针对航班计划场景成立, 其他随机场景不需考虑这些约束。

$$i, j \in N; k, l \in M; s \in S \quad (22)$$

式 (22) 规定了各个变量的集合。

## 2 全局人工蜂群算法

人工蜂群算法是一种基于蜜蜂协同采蜜机理的群体智能优化方法, 它由蜜源、采蜜蜂、观察蜂和侦查蜂组成。蜜源代表解空间内的解; 采蜜蜂包含蜜源的所有信息并与同伴分享, 同时进行邻域搜索; 观察蜂通过采蜜蜂的信息决定是否选择该蜜源采蜜; 侦查蜂负责随机搜索一个新蜜源。

然而人工蜂群算法存在着易陷入局部最优的缺陷, 为了弥补这一缺陷, 将遗传算法的交叉操作应用到蜂群算法中, 生成一个 0 到 1 之间均匀分布的随机值  $rand$ , 若  $rand < cr$  则让邻域搜索后的采蜜蜂/观察蜂与全局最优值进行交叉, 其中  $cr$  为调节交叉概率的系数, 改进后的算法称之为全局人工蜂群算法<sup>[8]</sup>。

### 1) 生成初始种群

蜜源中第  $i$  个元素代表按照时间排序的第  $i$  个航班所分配到的停机位编号。

### 2) 适应度函数

蜂群算法中更高的函数值代表更优质的蜜源, 而目标函数式是求解最小值, 因此令适应度函数为目标函数的负数。将式 (23) 作为第一层适应度函数, 式 (24) 作为第二层适应度函数, 当观察蜂按照适应度大小选择要跟随的采蜜蜂时, 采用双重选择机制, 先以

$fitness_1$  为适应度函数按照贪婪原则进行选择,再以  $fitness_2$  为适应度函数在筛选出的采蜜蜂中按照贪婪原则进行选择。

$$fitness_1 = - \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} (H_i^s + L_i^s + W_i^s + G_i^s) P_s \quad (23)$$

$$fitness_2 = - \sum_{i \in N} Q_i \quad (24)$$

3) 邻域搜索

当采蜜蜂和观察蜂进行邻域搜索时,当且仅当新蜜源的  $fitness_1$  和  $fitness_2$  均优于原蜜源时,根据贪婪原则用新蜜源代替原蜜源,保留优秀蜜源,否则继续在原蜜源附近进行邻域搜索直到达到最大邻域搜索次数为止。对算法邻域检索全过程进行检测和控制,保证算法在可行解区域内搜索。

4) 与全局最优值交叉

由于交叉点不适宜设置得太多以免破坏个体结构,本文采用单点交叉,将邻域搜索后的采蜜蜂/观察蜂与全局最优值以一定概率交叉,随机生成小于蜜源长度的交叉点并将交叉点之后的元素进行交换。然后对交叉后的元素逐一检测,如果元素不在可行解区域则按生成初始种群的办法重新赋值,直到将该蜜源检测完为止。

3 实例验证分析

3.1 实例

本文选取某机场某日 8:00—24:00 的客运航班信息作为算例,一共有 108 个航班对 25 个停机位,其中 19 个是近机位。将所有航班挡/撤轮档时间换算成 8:00 开始计时的分钟并按进港时间排序。航班信息如表 1 所示。

表 1 某机场某日客运航班信息

序号	机型	挡轮档/min	撤轮档/min	序号	机型	挡轮档/min	撤轮档/min
1	3	35	100	15	3	185	250
2	3	40	105	16	3	190	270
3	3	65	145	17	3	200	305
4	3	90	175	18	3	205	270
5	3	95	160	19	3	220	285
6	3	105	170	20	3	225	300
7	3	120	190	21	3	230	295
8	3	130	210	22	3	235	325
9	3	130	200	23	3	235	300
10	3	135	200	24	3	245	310
11	3	145	195	25	3	260	355
12	3	160	225	26	3	265	335
13	3	165	255	27	3	270	335
14	3	175	260	28	3	280	445

续表 1

序号	机型	挡轮档/min	撤轮档/min	序号	机型	挡轮档/min	撤轮档/min
29	3	305	370	69	3	655	730
30	3	335	405	70	3	690	755
31	3	335	400	71	3	690	755
32	3	340	405	72	3	695	760
33	3	350	410	73	3	695	760
34	3	355	425	74	3	700	1 465
35	3	365	430	75	3	705	780
36	3	370	435	76	3	710	775
37	3	380	445	77	3	710	780
38	3	405	470	78	3	710	775
39	3	405	480	79	3	740	805
40	3	410	535	80	3	740	1 420
41	3	415	505	81	3	770	835
42	3	420	485	82	3	780	855
43	3	425	490	83	3	780	845
44	5	425	490	84	3	785	835
45	3	445	510	85	3	785	860
46	3	485	560	86	3	790	855
47	3	490	555	87	3	800	865
48	3	500	600	88	3	810	1 435
49	3	505	570	89	3	815	880
50	3	510	640	90	3	840	1 395
51	3	515	580	91	3	845	1 460
52	3	515	575	92	3	850	900
53	3	540	605	93	3	850	1 450
54	3	540	605	94	3	900	1 500
55	3	540	605	95	3	915	1 380
56	3	560	600	96	3	915	1 430
57	3	575	625	97	3	930	1 380
58	3	575	645	98	3	930	1 390
59	3	575	745	99	3	940	1 500
60	3	595	670	100	3	940	1 385
61	3	600	665	101	3	940	1 395
62	3	610	675	102	3	945	1 765
63	3	620	1 460	103	3	945	1 465
64	3	625	690	104	3	945	1 420
65	3	640	710	105	3	945	1 405
66	3	650	730	106	3	950	1 440
67	3	650	715	107	3	950	1 515
68	3	655	710	108	3	955	1 550

运用 MATLAB 中 Distribution Fitting Tool 工具箱分别拟合该机场本年度的航班实际挡/撤轮档时刻相较于计划挡/撤轮档时刻的偏差数据,拟合结果如图 1、图 2 所示。航班挡/撤轮档时刻的偏差均为广义极值分布,广义极值分布的概率密度函数如式(25)所示:

$$f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1+k\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1+k\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (25)$$

参数估计出的航班挡轮挡时刻偏差的概率密度函数  $f_1(x)$  如式(26)所示, 航班撤轮挡时刻偏差的概率密度函数  $f_2(x)$  如式(27)所示,  $x$  均指实际时刻相较于计划时刻的偏差, 为负代表航班提前到达或起飞, 为正代表航班到达或起飞延误。

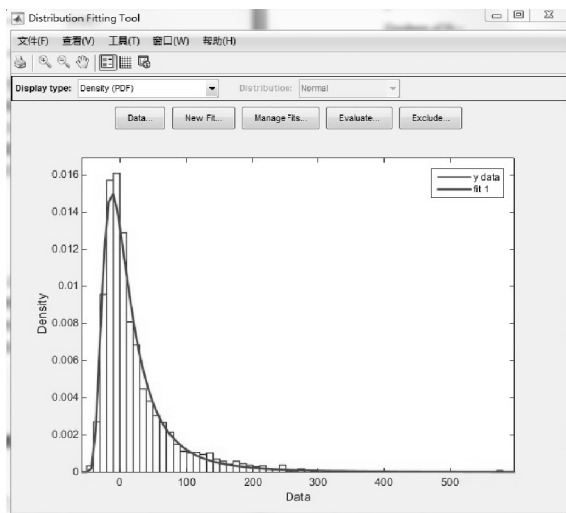


图1 航班挡轮挡时刻偏差分布拟合

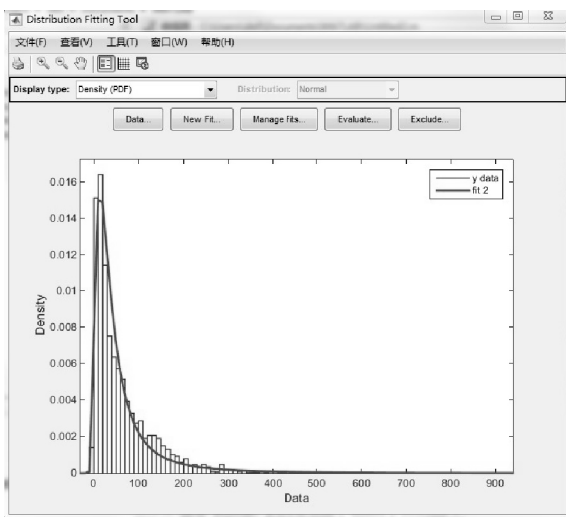


图2 航班撤轮挡时刻偏差分布拟合

$$f_1(x) = \frac{1}{25.8331} \times \exp\left(-\left(1+0.346283\frac{(x+4.65941)}{25.8331}\right)^{-0.346283}\right) \times \left(1+0.346283\frac{(x+4.65941)}{25.8331}\right)^{-1-\frac{1}{0.346283}} \quad (26)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{27.0765} \times \exp\left(-\left(1+0.566194\frac{(x-24.5593)}{27.0765}\right)^{-0.566194}\right) \times \left(1+0.566194\frac{(x-24.5593)}{27.0765}\right)^{-1-\frac{1}{0.566194}} \quad (27)$$

对航班的挡/撤轮挡时刻分别按照其各自的概率分布在 MATLAB 中生成偏离其计划时刻的随机数, 但是对航班时刻作随机扰动之后, 可能存在过站时间小于该机型最短过站时间的情况, 导致机场来不及实施地面作业保障。因此根据表1中的机型类型, 令C类飞机的最短过站时间为45 min, E类飞机的最短过站时间为70 min。如果扰动后的过站时间小于该机型最短过站时间, 则令最短过站时间为该航班的过站时间。在 MATLAB 中进行编程求解, 令种群大小为50, Limit为100, 最大迭代次数为1500次,  $\rho_r$  为0.5, 即采蜜蜂或观察蜂有一半的概率和当前全局最优解产生交叉。

### 3.2 结果与分析

为了进行模型有效性的对比分析, 将基于计划航班时刻求解出的一个机位分配结果放在随机扰动场景中, 分别求出该方案在25个、50个和100个随机场景下的目标函数值, 与随机模型优化出的结果进行对比, 如表2所示。

表2 计划模型和随机模型的对比

随机场景数	计划模型目标函数	随机模型目标函数	提升比/%
25	26.136	21.576	17.45
50	27.160	23.216	14.52
100	27.544	22.696	17.60

从表2可以看出, 无论是25、50还是100个随机场景, 随机模型的目标函数值均优于计划模型。

#### 1) 25个随机扰动场景

计划模型在随机场景中的目标函数值为26.136, 航班靠桥率为82.41%, 航班冲突为27.92次。随机模型的目标函数值为21.576, 航班靠桥率为78.70%, 航班冲突为21.22次。与计划模型相比, 随机模型牺牲了少部分靠桥率, 使得冲突期望下降了6.7次, 提升了机场运行的安全性, 同时保证了航班靠桥率仍维持在一个较高的水平。

#### 2) 50个随机扰动场景

计划模型在随机场景中的目标函数值为27.16, 航班靠桥率为82.41%, 航班冲突为29.2次。随机模型的目标函数值为23.216, 航班靠桥率为76.85%, 航班冲突为22.77次。与计划模型相比, 随机模型的航班靠桥率略微降低, 但冲突期望减少了6.43次, 降低

了实际运行中航班冲突的潜在风险。

### 3) 100 个随机扰动场景

计划模型在随机场景中的目标函数值为 27.544, 航班靠桥率为 82.41%, 航班冲突为 29.68 次。随机模型的目标函数值为 22.696, 航班靠桥率为 77.78%, 航班冲突为 22.37 次。与计划模型相比, 随机模型的航班靠桥率略微降低, 但冲突期望减少了 7.31 次, 降低了实际运行中航班冲突的潜在风险。

## 4 结束语

根据 MATLAB 实例验证结果可知, 基于随机扰动航班时刻的停机位调度模型比基于航班计划的模型有更高的优越性, 在航班偏离计划时刻的实际运行中拥有更好的表现, 在实现停机坪更高安全性的同时保证航班高靠桥率的实现, 模型和算法均被证明有效。建立更有效的多目标机位分配优化模型是未来可行的研究方向。

### 参考文献:

- [1] Jaehwan Lee, Hyeonu Im. Airport Gateassignment for Improvingterminals' Internal Gate Efficiency [J]. International Journal of Industrial Engineering 2016, 23(6): 431–444.
- [2] 罗宇骁, 姜雨, 薛清文. 基于航班延误特性的停机位再指派建模[J]. 航空计算技术 2015, 45(5): 36–40.
- [3] 刘君强, 张马兰, 陈鹏超, 等. 基于协同决策的多航站楼停机位实时分配算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(1): 71–76.
- [4] 冯程, 胡明华, 满青珊. 基于禁忌搜索算法的机场场面联合优化模型[J]. 航空计算技术 2015, 45(1): 56–60.
- [5] 杨子瑜, 唐卫贞, 涂浩. 基于航班延误成本的停机位分配建模仿真优化研究[J]. 科技资讯 2017, 15(21): 216–218.
- [6] 陈前, 乐美龙. 基于安全约束的停机位分配问题的研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版) 2016, 50(1): 55–60.
- [7] Sang Hyun Kim, Eric Feron. Robust Gate Assignment Against Gate Conflicts [J]. Journal of Air Transportation, 2017, 25(3): 87–94.
- [8] Dell Orco Mauro, Marinelli Mario, Altieri Maria Giovanna. Solving the Gate Assignment Problem Through the Fuzzy Bee Colony Optimization [J]. Transportation Research 2017, 80: 424–438.
- [9] Nemeth C, Erik H. FRAM: the Functional Resonance Analysis Method, Modeling Complex Socio-technical Systems [J]. Cognition, Technology and Work 2013, 15(1): 117–118.
- [10] Anvarifar F, Voorendt M Z, Zevenbergen C, et al. An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Analysis of Multifunctional Flood Defences in the Netherlands [J]. Reliability Engineering and System Safety 2017(158): 130–141.
- [11] 张玉虎, 樊宇, 李庆谊. 基于 SHEL 模型的飞行人误差研究[J]. 教练机 2017(3): 6–9.
- [12] Changa Yuhern, Yeh Chunghsing. A New Airline Safety Index [J]. Transportation Research: Part B 2004, 38(4): 369–383.
- [13] Balachandran S, Atkins E. Markov Decision Process Framework for Flight Safety Assessment and Management [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics 2016, 40(4): 1–14.
- [14] 李远. 空管单位安全能力定量评估方法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院 2018.
- [15] 李刚. 基于熵值修正 G1 组合赋权的科技评价模型及实证[J]. 软科学 2010, 24(5): 31–36.
- [1] 倪晓梅, 王华伟, 洪骥宇, 等. 考虑不平衡数据的民航不安全事件分析[J]. 航空计算技术 2017, 47(5): 37–40.
- [2] 王浩锋. 基于 BP 神经网络的航段安全评估研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院 2010.
- [3] 周唯杰, 王华伟, 赵飞. 基于贝叶斯网络的民航安全分析研究[J]. 航空计算技术 2011, 41(1): 44–47.
- [4] 陈帅, 王华伟, 王祥. 基于差错的民航机务系统安全分析[J]. 航空计算技术 2015, 45(2): 88–91.
- [5] 周正柱, 汪祖柱, 孙明贵. 基于熵值修正 G1 法区域商务成本综合评价模型及实证研究[J]. 云南财经大学学报, 2013(1): 45–54.
- [6] 崔建国, 林泽力, 吕瑞, 等. 基于模糊灰色聚类 and 组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法[J]. 航空学报 2014, 35(3): 764–772.
- [7] Fang Chen. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Civil Aviation Safety Supervisor [C]. Hongkong: International Conference on Multimedia Communications 2010: 37–43.
- [8] Hollnagel E. FRAM: the Functional Resonance Analysis Method [M]. Boca Raton, FL: CRC Press 2017.

(上接第 50 页)

### 参考文献:

- [1] 倪晓梅, 王华伟, 洪骥宇, 等. 考虑不平衡数据的民航不安全事件分析[J]. 航空计算技术 2017, 47(5): 37–40.
- [2] 王浩锋. 基于 BP 神经网络的航段安全评估研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院 2010.
- [3] 周唯杰, 王华伟, 赵飞. 基于贝叶斯网络的民航安全分析研究[J]. 航空计算技术 2011, 41(1): 44–47.
- [4] 陈帅, 王华伟, 王祥. 基于差错的民航机务系统安全分析[J]. 航空计算技术 2015, 45(2): 88–91.
- [5] 周正柱, 汪祖柱, 孙明贵. 基于熵值修正 G1 法区域商务成本综合评价模型及实证研究[J]. 云南财经大学学报, 2013(1): 45–54.
- [6] 崔建国, 林泽力, 吕瑞, 等. 基于模糊灰色聚类 and 组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法[J]. 航空学报 2014, 35(3): 764–772.
- [7] Fang Chen. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Civil Aviation Safety Supervisor [C]. Hongkong: International Conference on Multimedia Communications 2010: 37–43.
- [8] Hollnagel E. FRAM: the Functional Resonance Analysis Method [M]. Boca Raton, FL: CRC Press 2017.
- [9] Nemeth C, Erik H. FRAM: the Functional Resonance Analysis Method, Modeling Complex Socio-technical Systems [J]. Cognition, Technology and Work 2013, 15(1): 117–118.
- [10] Anvarifar F, Voorendt M Z, Zevenbergen C, et al. An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Analysis of Multifunctional Flood Defences in the Netherlands [J]. Reliability Engineering and System Safety 2017(158): 130–141.
- [11] 张玉虎, 樊宇, 李庆谊. 基于 SHEL 模型的飞行人误差研究[J]. 教练机 2017(3): 6–9.
- [12] Changa Yuhern, Yeh Chunghsing. A New Airline Safety Index [J]. Transportation Research: Part B 2004, 38(4): 369–383.
- [13] Balachandran S, Atkins E. Markov Decision Process Framework for Flight Safety Assessment and Management [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics 2016, 40(4): 1–14.
- [14] 李远. 空管单位安全能力定量评估方法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院 2018.
- [15] 李刚. 基于熵值修正 G1 组合赋权的科技评价模型及实证[J]. 软科学 2010, 24(5): 31–36.