

现代民机航线运行安全态势风险算法模型研究

刘素娟, 李 喆, 黄爱军

(中国商飞上海飞机客户服务有限公司运行支持部, 上海 200241)

摘要: 本文结合影响航空公司安全运营和客户关注的因素, 提出航线运行安全态势风险算法模型。首先, 从事故症候严重/一般、不安全事件、故障千时率、使用困难报告等级、航班不正常情况、持续适航事件风险等级、商业运行放行条件指数、重要类级别以上的服务通告(SB, service bulletin)未贯彻风险8个方面, 计算航空运输协会(ATA, Air Transport Association)各章节风险指数; 然后, 根据单架机风险指数组成的机队风险指数清单, 获悉航司各架飞机的风险点; 最后, 在此基础上分析症候节点, 提供减缓风险的措施。验证表明, 该算法模型可提升机队运营效率和经济性, 从而保证飞机安全、通畅运营。

关键词: 民机; 航线运行; 态势分析; 持续适航; 事故症候; 风险计算

中图分类号: V328.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-5590(2024)05-0022-06

Research on the risk algorithm model of safety situation for modern civil aircraft route operation

LIU Sujuan, LI Zhe, HUANG Aijun

(Operations Support Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co. Ltd., COMAC, Shanghai 200241, China)

Abstract: A risk algorithm model of route operation safety situation is proposed in this paper, by combining factors that affect airline safety operations and customer concerns. Firstly, the risk index of each chapter of the Air Transport Association (ATA) is calculated from eight aspects including severe/general accident symptoms, unsafe incidents, failure rate per thousand hours, reporting level of operational difficulty, abnormal flight conditions, risk level of continuous airworthiness incidents, index of commercial operation release conditions and the risk of failure to implement service bulletin (SB) above the important category level. Then, based on the fleet risk index list composed of individual aircraft risk index, the risk points of each aircraft of the airline are obtained. Finally, the symptom nodes are analyzed on this basis, and provide measures to mitigate risks. The verification shows that the proposed algorithm model can improve the efficiency and economy of fleet operation, thereby ensuring the safe and smooth operation of aircraft.

Key words: civil aircraft; route operation; situation analysis; continuous airworthiness; accident symptoms; risk calculation

民用飞机运行支持是民机产业链中的关键环节, 是民机制造业与民航运输业之间的纽带与桥梁, 其对飞机设计、制造、维修、运行等航空产业链的上下游环节发展具有重要的带动作用, 对促进民机产业技术升级、产业壮大具有重要意义^[1]。航线运行态势是航线飞机运营状态最直观的表征, 根据航空器主制造商航线运行态势的行业经验, 航线运行态势主要指标包含事故症候严重/一般、不安全事件、故障千时率、使用困难报告等级、航班不正常情况、持续适航事件风险等级、商业运行放行条件指数、重要类级别以上的服务通告(SB, service bulletin)未贯彻风险(简称SB未贯彻风

险)8个方面, 基于此有关学者对航线运行安全态势风险算法模型展开研究。

近年来, 关于航线运行风险的研究层出不穷。文献[2-3]建立了民用运输类飞机持续适航阶段的风险评估方法, 对事件的风险类型进行了分类, 通过风险矩阵确定事件的风险水平, 给出了相应的纠正措施及其实施时间的确定方法。这种方法可以计算出航线运行飞机持续适航事件风险指数, 但该方法无法表征航线运行态势其他指标, 如不安全事件、故障千时率等。文献[4]给出故障模式影响分析方法(FMEA, failure mode and effects analysis)和故障树分析方法(FTA, fault

tree analysis)相结合的单机风险评估方法,结合算例给出计算流程,建立基于历史数据的机队风险计算方法,该方法是基于民航设计体系的一套风险指数计算方法,用于系统故障失效的判断和计算,但无法计算出航线运行态势相关指标。由此可见,这些风险计算方法或是针对航线运行飞机的某一指标进行研究,或是将研究方向聚焦民航设计阶段,而站位民航制造商运行支持体系研究航线运行态势风险的相关研究较少。

本文在已有成果的基础上,将航线运行态势的主要影响因素全部罗列,包含事故症候严重/一般、不安全事件、故障千时率、使用困难报告等级、航班不正常情况、持续适航事件风险等级、商业运行放行条件指数、重要类级别以上 SB 未贯彻风险 8 个方面,从持续适航事件出发,结合航线运行指标以及持续适航事件导致的 SB 未贯彻风险情况,统筹考虑现代民航航线运行态势风险,从而获知机队、单架次、航空运输协会(ATA, Air Transport Association)各章节的风险指数状态,为减缓航线运行风险提供依据。

1 航线运行安全态势风险算法模型

航线运行安全态势风险算法模型思路如下。

首先,确定影响因素,如图 1 所示。然后,计算单架机各章节风险,如图 2 所示。

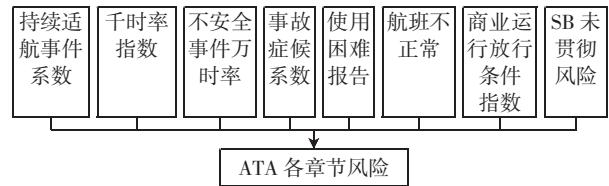


图 1 航线运行安全态势风险影响因素

Fig.1 The affecting factors of safety situation risk for route operation

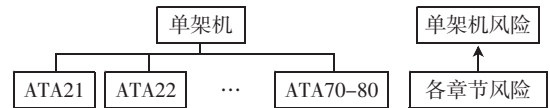


图 2 航线运行安全态势单架机各章节风险算法模型概图

Fig.2 Overview of risk algorithm model of route operation safety situation for each chapter of single aircraft

2 ATA 各章节风险

2.1 持续适航事件风险系数

持续适航事件风险等级在持续适航阶段的风险评估方法的基础上,通过不同颜色等级之间不同加权赋值,以及同一颜色不同级别之间不同赋值,达到更加清晰化、层次化计算持续适航风险指数的目的。

运行安全风险等级评估依据如表 1 所示,根据风险发生后果的严重性等级及风险发生概率确认风险等级。其中, p 表示持续适航事件风险发生概率。举例:[红]<3>对应的风险数值是 W_3 , [绿]<21>对应的风

表 1 风险评估矩阵

Tab.1 The risk assessment matrix

| 发生概率 | 无安全影响 | 较小的 | 较大的 | 危险的 | 灾难的 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 频繁的($p > 10^{-3}$) | [绿]<15> | [黄]<13> | [橙]<8> | [红]<3> | [红]<1> |
| 不经常的($10^{-5} < p \leq 10^{-3}$) | [绿]<19> | [黄]<14> | [橙]<9> | [红]<5> | [红]<2> |
| 微小的($10^{-7} < p \leq 10^{-5}$) | [绿]<22> | [绿]<18> | [黄]<12> | [橙]<7> | [红]<4> |
| 极微小的($10^{-9} < p \leq 10^{-7}$) | [绿]<24> | [绿]<21> | [绿]<17> | [黄]<11> | [橙]<6> |
| 极不可能的($p \leq 10^{-9}$) | [绿]<25> | [绿]<23> | [绿]<20> | [绿]<16> | [黄]<10> |

险数值是 W_{21} 。

持续适航事件系数表示为

$$W = 10^{-4} \times \sum_{k=1}^{25} N_k W_k \quad (1)$$

式中: k 表示对应事件风险等级编号, $k = 1, 2, \dots, 25$; N_k 表示 ATA 某一章节内风险等级编号为 k 的事件数量, $N_k \leq m$, m 表示某一章节内所有事件的数量(下同); W_k 表示风险等级 k 对应的风险数值,具体如下

$$W_k = \begin{cases} (6 - k) \times 10^6 & k \in [1, 5] \\ (10 - k) \times 10^4 & k \in [6, 9] \\ (15 - k) \times 10^2 & k \in [10, 14] \\ 26 - k & k \in [15, 25] \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)计算出各章节持续适航事件系数 W 。

2.2 故障千时率指数

ATA 各章节 12 个月故障千时率平均数与目标值差值可表示为

$$\Delta_y = G - \bar{F} \quad y = 1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

式中: \bar{F} 表示 ATA 各章节 12 个月故障千时率平均数; G 表示故障千时率目标值,即波音、空客的故障千时率均值,则故障千时率指数为

$$Fr = \begin{cases} 2 & \Delta_y \in (-\infty, 0] \\ 1 & \Delta_y \in (0, 0.68] \\ 0.5 & \Delta_y \in (0.68, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

式中:0.68 是 ATA 各章节 Δ_y 的平均值。根据计算出的 Δ_y 实际结果,按需将 Δ_y 分为不同范围对应取值 Fr。根据式(3)和式(4)计算出各章节的 Fr 值。

2.3 不安全事件万时率

不安全事件万时率 U_s 包含 2 种状态,对应取值规则为:确定不安全事件取“1”;否则取“0”。

ATA 各章节的不安全事件万时率 U_s 等于某一章节内所有事件 U_{s_i} 的和,即

$$U_s = \sum_{i=1}^m U_{s_i} \tag{5}$$

2.4 事故症候系数

事故症候系数 A_s 包含 3 种状态,对应取值规则为:确定事故症候(严重)取“3”;确定事故症候(一般)取“1”;不是事故症候取“0”。

ATA 各章节的事故症候系数 A_s 等于某一章节内所有事件 A_{s_i} 的和,即

$$A_s = \sum_{i=1}^m A_{s_i} \tag{6}$$

2.5 使用困难报告等级

使用困难报告等级 SDR 包含 2 种状态,对应取值规则为:确定使用困难问题取“1”;否则取“0”。

ATA 各章节的使用困难报告 SDR 等于某一章节内所有事件 SDR_i 的和,即

$$SDR = \sum_{i=1}^m SDR_i \tag{7}$$

2.6 航班不正常情况

航班不正常情况 A_b 包含 2 种状态,对应取值规则为:确定航班不正常问题取“1”;否则取“0”。

ATA 各章节的航班不正常 A_b 等于某一章节内所有事件 A_{b_i} 的和,即

$$A_b = \sum_{i=1}^m A_{b_i} \tag{8}$$

2.7 商业运行放行条件指数

商业运行放行条件指数 Re_i 取值如表 2 所示。

表 2 Re_i 取值表

Tab.2 The value of Re_i

| 商业运行放行条件分类 | Re_i | 商业运行放行条件分类 | Re_i |
|------------|--------|------------|--------|
| 不适用 | 0 | 检查后可放行 | 1.5 |
| 机组决定 | 0.5 | 带限制保留 | 2.0 |
| 可保留 | 1.0 | 不可保留 | 3.0 |

ATA 各章节的商业运行放行条件指数 Re 等于某一章节内所有事件 Re_i 的和,即

$$Re = \sum_{i=1}^m Re_i \tag{9}$$

2.8 SB 未贯彻风险

SB 未贯彻风险从预计发生次数以及可能导致后果两方面进行风险计算^[5-6]。

根据文献[5],事件引起的第 i 个 SB 未贯彻风险的预计发生次数表示为

$$N_{ci} = F \times U \times T \tag{10}$$

式中: F 为事件频率; U 为一年内日利用率,若运营时间小于 1 年,则按初始运营当日到计算日时间段计算; T 为不同时间段,例如事件发生后 30 d、60 d 等。

根据文献[5-6]以及风险矩阵模型,应用于 SB 未贯彻风险,新建算法模型如下

$$Un_i = L \times C \tag{11}$$

式中: Un_i 为单个事件引起的 SB 未贯彻风险的值; L 为持续适航事件发生可能性,取值如表 3 所示; C 为持续适航事件发生严重性,取值如表 4 所示。

表 3 L 值的定义数值

Tab.3 The definition value of L

| 持续适航事件发生可能性 | L 数值 |
|---------------------------------------|--------|
| 完全可以预料: $N_{ci} \in [0.6, +\infty)$ | 10.0 |
| 相当可能: $N_{ci} \in [0.3, 0.6)$ | 6.0 |
| 可能,但不经常: $N_{ci} \in [0.1, 0.3)$ | 3.0 |
| 可能性小,完全意外: $N_{ci} \in [0.05, 0.1)$ | 1.0 |
| 很不可能,可以设想: $N_{ci} \in [0.001, 0.05)$ | 0.5 |
| 极不可能: $N_{ci} \in [0.000\ 01, 0.001)$ | 0.2 |
| 实际不可能: $N_{ci} \in (0, 0.000\ 01)$ | 0.1 |

表 4 C 值的定义数值

Tab.4 The definition value of C

| 持续适航事件发生严重性 | C 数值 |
|---------------------------------|--------|
| 灾难的:[红]<1>、[红]<2>、[红]<4>、[橙]<6> | 100 |
| 危险的:[红]<3>、[红]<5>、[橙]<7> | 7 |
| 较大的:[橙]<8>、[橙]<9> | 1 |

ATA 各章节的各个事件引起的 SB 未贯彻风险总值 Un 等于某一 ATA 章节内单个事件引起的 SB 未贯彻风险值 Un_i 的和,即

$$Un = \sum_{i=1}^m Un_i \tag{12}$$

Un 值在风险矩阵中的划分如表 5 所示。

表 5 Un 值在风险矩阵中的划分

Tab.5 The division of Un in the risk matrix

| Un 值 | 风险程度 | 风险等级 | 风险矩阵区域 |
|---------------------|-------|------|--------|
| $Un \geq 320$ | 极高度风险 | 5 | 红色区域 |
| $160 \leq Un < 320$ | 高度危险 | 4 | 橙色区域 |
| $70 \leq Un < 160$ | 显著风险 | 3 | 黄色区域 |
| $20 \leq Un < 70$ | 一般风险 | 2 | 蓝色区域 |
| $Un < 20$ | 稍有风险 | 1 | 绿色区域 |

综上所述,将以上 8 个因素代入以下公式,可算出各章节风险指标

$$R = W + Fr + Us + As + SDR + Ab + Re + Un \quad (13)$$

3 单架机风险指数

单架机风险指数表示为

$$Sa = \sum_{i=1}^t R_i \quad (14)$$

式中: R_i 为单架机 ATA 第 i 章节风险指数; t 为 ATA 章节数目,从 21 章开始,到 70~80 章,共分为 30 个章节, $t = 1, 2, \dots, 30$ 。Sa 值风险等级划分如表 6 所示。

表 6 Sa 值风险等级划分

Tab.6 Classification of risk level of Sa

| Sa 值 | 颜色等级 | 风险程度 |
|---------------------|------|-----------|
| $Sa \geq 600$ | 红色 | 高风险,紧急关注 |
| $500 \leq Sa < 600$ | 橙色 | 中风险,重要关注 |
| $Sa < 500$ | 绿色 | 一般风险,普通关注 |

表 7 某航司某特定机型 19 架运营飞机风险指数排序表

Tab.7 The risk index sort for 19 operating aircrafts of certain aircraft type from an airline

| 架次序号 | 单架机风险指数 Sa | 排名 | 持续适航事件系数 W | 故障千时率指数 Fr | 综合指数 | 商业运行放行条件指数 Re | SB 未贯彻风险 Un |
|------|------------|----|------------|------------|------|---------------|-------------|
| 1 | 819.0 | 1 | 47.0 | 20.0 | 87 | 255.5 | 409.5 |
| 2 | 715.5 | 2 | 47.0 | 27.5 | 83 | 244.5 | 313.5 |
| 3 | 709.5 | 3 | 44.0 | 24.5 | 83 | 244.5 | 313.5 |
| 4 | 697.1 | 4 | 47.0 | 16.5 | 83 | 244.5 | 306.0 |
| 5 | 688.5 | 5 | 42.0 | 22.0 | 83 | 241.5 | 300.0 |
| 6 | 676.5 | 6 | 43.0 | 12.0 | 83 | 238.5 | 300.0 |
| 7 | 623.0 | 7 | 48.0 | 29.0 | 87 | 255.5 | 203.5 |
| 8 | 546.5 | 8 | 75.0 | 28.5 | 87 | 252.5 | 103.5 |
| 9 | 543.1 | 9 | 44.1 | 26.0 | 87 | 252.5 | 133.5 |
| 10 | 530.7 | 10 | 47.2 | 30.5 | 87 | 252.5 | 113.5 |
| 11 | 527.3 | 11 | 46.3 | 29.0 | 87 | 255.5 | 109.5 |
| 12 | 517.1 | 12 | 44.1 | 24.0 | 87 | 252.5 | 109.5 |
| 13 | 518.1 | 13 | 47.1 | 30.0 | 83 | 244.5 | 113.5 |
| 14 | 515.0 | 14 | 41.0 | 29.0 | 87 | 252.5 | 105.5 |
| 15 | 511.6 | 15 | 47.1 | 21.5 | 83 | 244.5 | 115.5 |
| 16 | 508.6 | 16 | 44.1 | 27.5 | 83 | 250.5 | 103.5 |
| 17 | 507.6 | 17 | 47.1 | 19.5 | 83 | 244.5 | 113.5 |
| 18 | 412.1 | 18 | 43.1 | 27.0 | 85 | 247.5 | 9.5 |
| 19 | 403.6 | 19 | 43.1 | 29.0 | 83 | 238.5 | 10.0 |

注:综合指数 = $Us + As + SDR + Ab$ 。

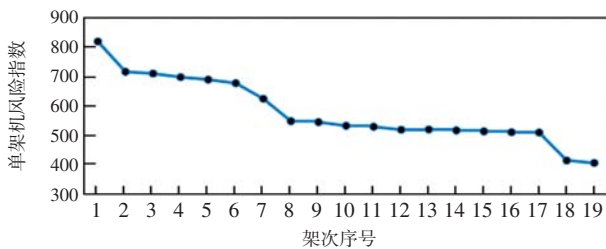


图 3 某航司某特定机型 19 架运营飞机风险指数概图

Fig.3 Overview of risk index for 19 operating aircrafts of certain aircraft type from an airline

4 商业运营飞机算法模型验证测试

截至 2021 年 9 月,某机型未关闭航线飞机持续适航事件 128 起。选取某航司 19 架机,梳理相关数据,完善事故症候严重/一般、不安全事件、故障千时率、使用困难报告等级、航班不正常情况、持续适航事件风险等级、商业运行放行条件指数、SB 未贯彻风险 8 个方面表格信息。

本算法模型验证测试的数据有效时间截止于 2021 年 10 月,不能代表当下 19 架机运行状态。

4.1 风险指数计算

某航司某特定机型 19 架运营飞机风险指数及各项指标明细状态如表 7 及图 3—图 4 所示。

4.2 分析及结论

4.2.1 持续适航事件风险系数分析

本文单架机持续适航事件系数 W 根据某一事件受影响架次范围判定,例如 2 号液压系统漏油事件受影响架次是 120+(从生产序列号 120 开始的所有架次),那么 120+架次各架机应包含该事件。一般情况下,持续适航事件受影响范围几乎覆盖整个机队,差异性较小,主要差别可能是飞机构型等因素影响,某航司 19 架机该数据区间为(40,50),这种差异相对于

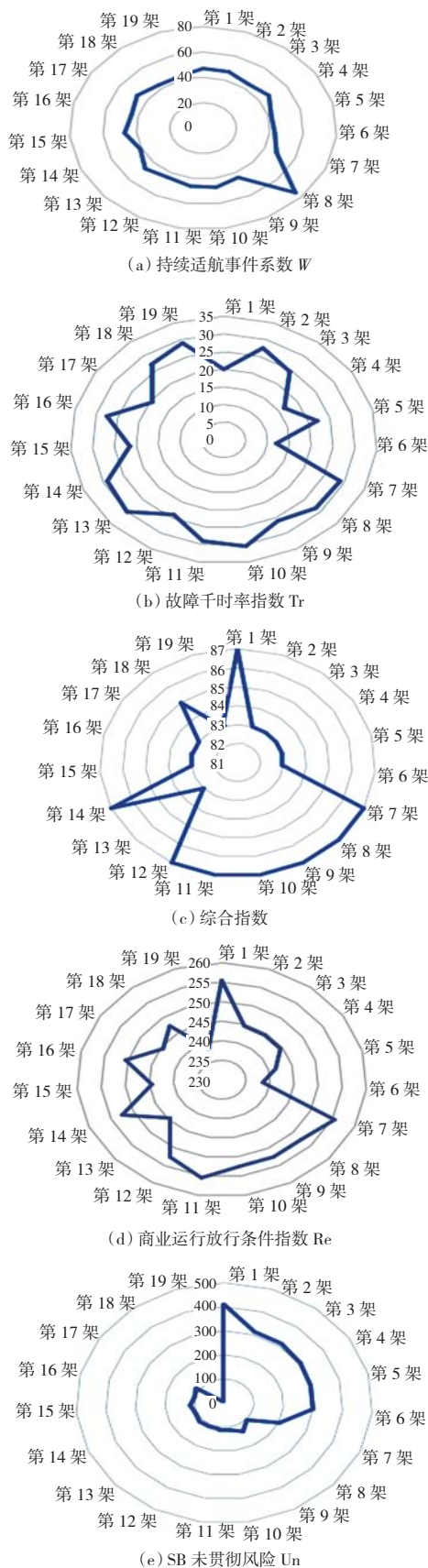


图 4 某航司某特定机型 19 架运营飞机相关指标雷达图
 Fig.4 The radar chart of the related index for 19 operating aircrafts of certain aircraft type from an airline

单架机风险(400,900)影响作用不大,但单项分析该指标,能判断出单架机受该指标影响程度。

4.2.2 故障千时率指数分析

故障千时率指数是 12 个月故障千时率平均数与目标值差值的分段函数取值,越接近目标值,甚至超出目标值,风险值越低;相反,与目标值差距越大,风险值越高。某航司 19 架机该数据区间为(10,35),这种差异相对于单架机风险(400,900)影响作用不大,但单项分析该指标,能判断出单架机受该指标影响程度。

4.2.3 综合指数分析

在算法模型实现时,计算工程师将不安全事件万时率 Us 、事故症候系数 As 、使用困难报告 SDR、航班不正常 Ab 总输出以“综合指数”命名,从结果来看,某航司 19 架机该数据区间为(83,87),是几个指标里各架机数据差异最小的一项。该指标对单架机风险指数影响不大,但单项分析该指标,能判断出单架机受该指标影响程度。

4.2.4 商业运行放行条件指数分析

商业运行放行条件指数越高,代表放行条件越差;反之,代表放行条件越好。某航司 19 架机该数据区间为(230,260),这种差异相对于单架机风险(400,900)有一定影响作用,单项分析该指标,能判断出单架机受该指标影响程度。

4.2.5 SB 未贯彻风险分析

通过考虑 SB 未贯彻风险预计发生次数以及可能导致后果两方面来计算未执行红橙色事件对应 SB 未贯彻风险指数。从计算结果来看,某航司 19 架机无紧急类 SB 未贯彻风险,但有 7 份重要类 SB 未贯彻风险,其中有 3 份 SB 未贯彻风险(25-0078、28-0028、29-0030)的事件等级是[橙]<6>,其可能发生后果是灾难级的,因此 SB 未贯彻风险对应较大。如, $N+10$ 架机 SB-29-30 的预计发生次数超过 0.1,预计发生风险值为 3,后果风险对应最高级别 100,所以 $N+10$ 架机未贯彻 SB-29-30 的风险值是 300,相对于单架机风险(400,900)几乎起决定性作用。

本文算法模型该风险值设定与平台提醒航司贯彻红橙色事件 SB 未贯彻风险的功能是契合的。

4.2.6 单架机风险指数

某航司某特定机型 19 架机单架机风险指数影响因素从高到底的顺序:SB 未贯彻风险、商业运行放行条件指数、故障千时率指数、持续适航事件风险系数、综合指数($Us+As+SDR+Ab$)。对于高风险状态的架次(19 架机中前 7)几乎取决于 SB 未贯彻风险影响;对于

低风险状态的架次(19架机中后2),这几类指标均处于较低水平,受几类指标影响较均衡;对于中等风险状态的架次(19架机靠中间排名的10架),主要也是受SB未贯彻风险影响,其他指标部分可能较高,也可能较低。

单架机风险值可以用于某航司下该机队不同架次风险值比较分析,从而作为排班、定检、日常维护、SB贯彻等决策的依据;用于同一机队不同架次风险值比较分析,航司可知晓其所有架次在整个机队的风险水平,对航司机队的风险管理起到一定提醒、警示作用;同时,与主流机型机队间进行比较分析,对于主制造商的研制、运行起到一定支持,对品牌树立、战略规划也能直接或间接起到一定作用。

综上,由于算法模型是一个持续优化过程,可根据需求,适当调整这些指标占比或者执行其他优化措施。

5 结语

本文综合考虑航线运行态势8项因素,计算ATA各章节风险、单架机风险、机队风险,分别提出减缓风险建议、措施。然而,航线运行安全态势风险算法模型在

国内是首推,未来将按需持续优化,本文算法模型将在与之对应的信息化平台(航线运行态势风险管控平台)上运行,根据实际运行数据、效果等方面分析评估,按需考虑各指标加权等问题,从而实现算法模型升级迭代。现阶段民机主制造商关于运行风险计算的研究较少,中国民机主制造商有责任肩负起开展民机运行风险计算系列工作,为保障民机安全、顺畅、高效运行添砖加瓦、保驾护航。

参考文献:

- [1] 杨王锋. 国产民机运行支持管理规范体系研究[J]. 航空维修与工程, 2016(12): 34-37.
- [2] 王冠茹, 孙有朝, 李龙彪, 等. 民机持续适航事件风险评估流程研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(3): 29-32, 72.
- [3] 李龙彪, 徐庆宏, 孙有朝. 民机持续适航阶段事件风险评估方法研究[J]. 飞机设计, 2015, 35(5): 59-62.
- [4] 郭媛媛, 李龙彪, 胡宇群, 等. 民用飞机运行风险评估方法[J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 253-258.
- [5] 张文涛. 民航运输飞机风险评估及可控因素分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [6] 倪峰. 基于民航飞机运行安全的A航空公司风险管理研究[D]. 上海: 复旦大学, 2010.

(责任编辑: 明月)

(上接第13页)

- [5] 李海岩, 李健, 崔世海, 等. 儿童安全座椅中填充吸能泡沫对头部的保护效果分析[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 228-233.
- [6] 吕孟宽, 杨欣, 许述财, 等. 儿童安全座椅侧面碰撞头部保护研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(9): 1360-1366.
- [7] 千年妃, 王多华, 冯亚楠, 等. 聚氨酯泡沫填充的碳纤维增强复合材料锥管吸能性能数值模拟及试验验证[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5): 609-615.
- [8] BOUAZARA M, RICHARD M J, RAKHEJA S. Safety and comfort analysis of a 3-D vehicle model with optimal non-linear active seat suspension[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(2): 97-118.
- [9] SINGH R, DAVIES P, BAJAJ A K. Identification of nonlinear and viscoelastic properties of flexible polyurethane foam[J]. Nonlinear Dynamics, 2003, 34(3): 319-346.
- [10] DENG R, DAVIES P, BAJAJ A K. A nonlinear fractional derivative

- model for large uni-axial deformation behavior of polyurethane foam[J]. Signal Processing, 2006, 86(10): 2728-2743.
- [11] IPPILI R K, DAVIES P, BAJAJ A K, et al. Nonlinear multi-body dynamic modeling of seat-occupant system with polyurethane seat and H-point prediction[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38(5/6): 368-383.
- [12] 陈娜娜, 吕振华. 汽车座椅聚合物泡沫座垫非线性弹性-阻尼特性建模研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 402-409.
- [13] 陈娜娜, 吕振华. 聚合物泡沫座垫的多滞回环型动力学特性的一种建模方法[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 210-216.
- [14] 冯涛, 苏彬, 刘斌, 等. 泡沫材料厚度对其刚度及阻尼系数的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 37-40.

(责任编辑: 刘智勇)