

民用飞机多级健康状态评估技术研究

王洪¹, 黄远强¹, 任和¹, 熊毅^{2,3,4}

(1. 上海民用飞机健康监控工程技术研究中心, 上海 200241; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;

4. 轨道交通装备全寿命周期状态监测与智能管理技术与应用北京市工程实验室, 北京 100041)

摘要: 保障飞机安全高效地运行, 不断提高飞机派遣可靠度是每一家航空公司需担负的责任和不懈追求的目标; 民用飞机多级健康状态评估技术将充分利用各类工程数据、技术数据和可靠性分析数据, 建立飞机技术派遣量化评估方法, 甄选影响飞机技术派遣的主要参数, 并通过对各参数进行权重分配, 建立综合量化分析模型, 针对专机、VIP 及其他特殊航线运行要求, 精准高效地为飞机的技术派遣提供决策依据, 保证特殊运行航班的安全性以及签派可靠度; 在航空公司机队的实际应用中表明, 基于飞机多级健康状态的评估系统能够有效地提高机队的派遣可靠度和日利用率, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 民用飞机; 派遣决策; 健康评估; 权重分配

Research on Multi-level Health Condition Assessment of Civil Aircraft

Wang Hong¹, Huang Yuanqiang¹, Ren He¹, Xiong Yi^{2,3,4}

(1. Shanghai Engineering Research Center of Civil Aircraft Health Monitoring, Shanghai 200241, China;

2. Beijing Aerospace Measure & Control Corp. Ltd, Beijing 100041, China;

3. Beijing Key Laboratory of High-speed Transport Intelligent Diagnostic and Health Management, Beijing 100041, China;

4. Beijing Engineering Laboratory of Rail Transportation Equipment Life Cycle Condition Monitoring and Intelligent Management Technology and Application, Beijing 100041, China)

Abstract: In order to ensure flights' safeness and efficiency, the airline makes it a target to steadily improve the aircraft's dispatch rate. Civil aircraft multiple level health condition assessment technology will fully utilize different engineering data, technical data and reliability data. It builds quantification assessment method for aircrafts' dispatch and selects major parameters affecting aircraft dispatch rate. It also builds integrated quantification analysis model by weight distribution of flight parameters, provides dispatch decision advice accurately and fast according to operation demand of private planes, VIPs and other special flights whose safety and dispatch reliability will be guaranteed. It is revealed in the practical work that the aircraft multiple level health condition assessment can effectively improve the aircrafts' dispatch reliability and daily utilization rate. It has important engineering utilization value.

Keywords: Civil Aircraft; Dispatch Decision; Health Assessment; Weight Distributi

0 引言

保障飞机安全高效地运行, 不断提高飞机派遣可靠度是每一家航空公司需担负的责任和不懈追求的目标。随着民航飞机维修可靠性管理工作的深入开展, 可靠性数据采集系统和分析方法日趋完善, 对飞机的技术状态和健康状态的量化分析工作不断深入, 如何综合利用现有的各类数据和分析结果, 为飞机技术派遣决策提供科学依据成为了当前面临的新问题^[1]。

飞机数据采集系统起始于 20 世纪 50 年代, 1956 年美国首先研究了用于军事上的测试系统。20 世纪 70 年代中后期, 随着微型机的发展诞生了集采集器、仪表同计算机为一体的数据采集系统。20 世纪 80 年代, 随着计算机的普及应用, 数据采集系统得到了极大的发展, 开始出现了通用的数据采集与自动测试系统。20 世纪 90 年代至今, 数据采集技术已经在军事、航空电子设备、宇航技术以及工业等领域得到广泛应用。

由于集成电路制造技术的不断提高, 出现了高性能、高可靠性的单片数据采集系统^[2]。另外, 随着计算机技术在航空维修工程中的深入应用, 各类逻辑算法及分析方法均可通过计算机软件实现, 减少了人工工作量, 提高了结果的准确度, 可靠性数据采集系统已基本实现电子化, 并形成了完备的数据库系统, 国内各航空公司的可靠性管理水平得到快速提升。但是, 国内很多航空公司的可靠性分析工作, 只是简单地统计和比较平均故障间隔时间或平均寿命等数值, 即使是引入分布模型, 也是在历史经验的基础上直接套用标准分布。这些做法, 虽然能够体现一定的统计规律, 具有一定的参考价值, 但从理论的角度而言, 其结果的准确性值得商榷, 很难直接应用于维修决策^[3-5]。

随着系统工程理论、统计学理论、灰色系统理论的可靠性分析方法逐步完善, 针对影响飞机技术状况的因素可以总结出大量规律性内容^[6-8]。这为飞机技术派遣决策支持系统提供了重要的理论基础。目前, 在决策专机、VIP 及其他特殊航线运行要求的飞机技术派遣时, 国内多数航空公司均采用相关单位提供飞机技术状态数据的方法, 来确定执行任务的飞机, 这种方法缺乏统一的标准, 通常具有较大的主观性, 操作起来较为费时费力。因此, 有必要建立飞机技术派遣量化评估系

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-07-19。

作者简介: 王洪(1985-), 男, 工程师, 主要从事飞机运行实时监控与故障诊断系统研制, 故障预测与健康管理(PHM)技术研究, 飞机可靠性信息管理, 可靠性系统方法研究等工作。

统,充分利用各类工程数据、技术数据和可靠性分析数据,甄选影响飞机技术派遣的主要参数,并通过对各参数进行权重分配^[9-11],建立综合量化分析模型,精准高效地为飞机的技术派遣提供决策依据,保证特殊运行航班的安全性以及签派可靠度^[2,5]。科学的飞机技术派遣决策支持方法,能够帮助航空公司降低运营成本,提高飞机运行的安全性及可靠性,提升航空公司机队的整体可靠性管理水平。

1 飞机技术状态模型的建立

定义新飞机出厂时达到百分之百的设计可靠性水平,处于完全健康的状态,此时飞机的初始技术状态分值为满分 1 000 分;飞机在运行中发现的设计问题或发生的故障、缺陷及各类不正常事件,以及机龄增长带来的性能衰退等因素,将降低飞机的可靠性水平,即减掉相应的分值,飞机总体健康状态分值将降低;而飞机定期检查及相关维护工作的执行,将提高飞机的可靠性水平,即加上相应的分值,飞机总体健康状态分值将增加,但不超过满分。

术语定义:

1) 事件参数:在影响飞机技术状态的因素中,有些数据没有明显的规律可循,属于随机发生的事件,如故障报告、重复性故障等项目^[7],定义此类因素为事件参数。

2) 风险参数:有些数据不直接影响飞机技术状态,但影响故障发生的概率。例如随着飞机机龄的增长,机身结构、线路发生老化、腐蚀的风险将逐渐增加;距上次定期检查的时间越长,相关系统故障的风险越大^[1],定义此类因素为风险参数。

1.1 飞机技术状态量化规则

1) 量化飞机健康状态分值:筛选影响飞机技术状态的数据,按照预定的规则进行评分计算,则可得到表明飞机技术状态的量化分值。

2) 事件参数分值的确定:按事件严重程度对事件参数进行分级,并赋以对应的量化分值(见表 1)。对于重复性故障等累加型事件或保留故障等未完成事件,可视情增加量化分值

表 1 事件参数严重性程度分级及量化分值

严重性等级	等级描述	界定标准(定性)	量化分值
A	灾难性的	可能导致飞行事故、重大航空地面事故以上事件。	9-10
B	特别严重的	1)可能导致一般地面事故、航空运输事故征候; 2)安全运行的影响:安全系数大大下降;身体压力或工作负荷已达到无法靠自身的能力完全履行职责的程度。	7-8
C	严重的	1)安全运行的影响:安全系数较大下降;操作人员因工作负荷增加,或因工作条件影响工作能力下降; 2)对外影响:对空管、机场、其他公司、公众影响大。	5-6
D	轻微的	1)安全运行的影响:操作受限 /运行受到影响 /损失员工时间或生产率降低; 2)对外影响:对空管、机场、其他公司、公众有一定影响。	3-4
E	可忽略的	几乎没有影响。	1-2

(不限于表 1 中单个事件的最高值)。此方法由最底层的事件出发进行定量分析,能够统一不同类型数据的量化标准,无需按数据类型更改权重,计算方法简单可靠,并具有较强的可扩展性。

3) 风险参数分值的确定:根据参数对飞机实际技术状态的影响程度,结合参数自身的规律制定独立的分值计算方法,如发动机的“EGTM(排气温度裕度)”项,即为单台发动机 EGTM 对飞机技术状况的影响情况,定义发动机新出厂时其 EGTM 为 100%,当 EGTM 大于 80%时,其对飞机技术状况的影响值为 3 分;当 EGTM 小于 5%时,其对飞机技术状况的影响值为最大值 48 分;其它情况分值按 $2.4 / (EGTM\%)$ 计算。

1.2 飞机技术状态数据结构

在航空公司实际运营经验的基础上,系统总结影响飞机技术放行的各类因素,包括 ACARS/QAR 实时监控故障数据、维修报告数据、工程管理数据、发动机性能数据、可靠性管理数据及其他数据等 6 大类因素,如图 1 所示,6 大类主要影响因素又由数量不等的下一级影响因素构成,航空公司可根据自己的实际运营情况进行细化分类。

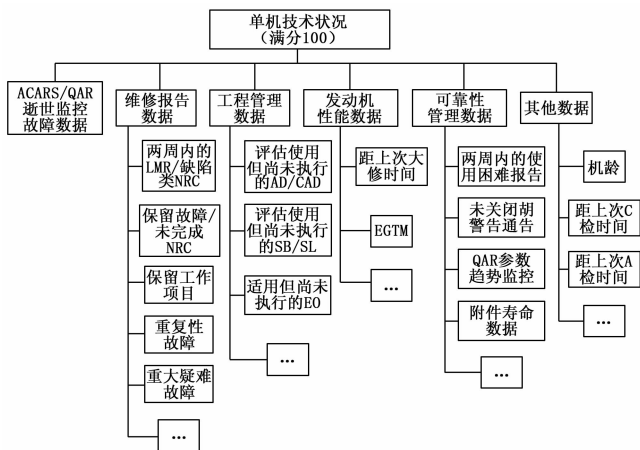


图 1 飞机健康状态评估因素

2 飞机多级健康状态评估方法

2.1 权重分配方法

权重分配方法分为 ATA 初始权重设定和关键附件权重设定。ATA 初始权重设定方法根据各机型 2 位 ATA 及 4 位 ATA 设置初始权重值,用于后续计算,如表 2 所示,当各模块实际计算时出现未列在以上表中的 ATA 章节时,初始权重值默认为 1 分,航空公司可根据自己的实际运营情况进行设置。

关键附件权重设定方法用来设置各机型关键性附件参与飞机技术状况计算的相应权重,如表 3 所示,航空公司用户可根据自身运营情况灵活进行设置。

2.2 健康状态评分规则

基于如图 1 所示的飞机 6 大类实际工程数据、技术数据和可靠性分析数据,分别建立飞机健康状态评分规则如下。

2.2.1 ACARS/QAR 实时监控故障数据

对于监控参数类触发事件,按如下评分标准及计分方法计算:

表 2 ATA 初始权重设置方法

	序号	机型	ATA	系统描述	初始权重	调整权重	调整说明
2 位 ATA	1	737-678	21	空调系统	8		
	2	737-678	22	自动飞行	6		
	3	737-678	23	通信系统	6		

4 位 ATA	1	737-678	2121	引气分配系统	3		
	2	737-678	2911	A 和 B 液压系统	10	9	综合考虑后续评分影响, 定为 9 分
	3	737-678	3200	起落架系统	10	8	3200 故障报告多为安全销或无法确认故障源的故障

表 3 关键附件权重设置方法

序号	项号	机型	ATA	名称	件号	属性类别	权重
1	21-0013	737-678	21	座舱高度控制面板	130502-7	周转件	4
2	21-0057	737-678	21	正压释压活门	103642-3	周转件	3
3	23-0001	737-678	23	甚高频通信控制盒	622-6831-002	周转件	3
4	56-0005	737-678	56	右一号风档	141T4801-50	周转件	5
5	79-0003	737-678	79	滑油温度传感器	1122492	消耗件	2
...

1) 针对每一事件, 确定对应的严重性等级和基础量化分值;

2) 若事件状态为“New (新)”, 则按第一条确定的基础分值加 2 分; “Monitoring (监控)”, 则按基础分值计分; “Closed (关闭)” 则不计分 (通过 LMR 计分)。

计分方法: 未关闭事件次数×量化分值。

2.2.2 维修报告数据

评分标准:

1) 对于 LMR/NRC (航线维修记录本/非例行工卡), 根据其严重性等级和 4 位 ATA 章节号确定基础量化分值;

2) 对于保留故障/未完成 NRC, 计 1 分;

3) 对于保留工作项目, 按 2 位 ATA 章节确定对应的量化分值;

4) 对于重复性故障, 计 2 分;

5) 对于重大疑难故障, 计 2 分。

计分方法: 两周内事件次数×量化分值。

2.2.3 工程管理数据

评分标准:

1) 对于评估适用但尚未执行的 AD/CAD (适航指令/中国适航指令), 适用性评估时, 若确定适用, 则同时确定严重性等级和量化分值;

2) 对于评估适用但尚未执行的 SB/SL (服务通告/服务信函), 适用性评估时, 若确定适用, 则同时确定严重性等级和量化分值;

3) 对于适用但尚未执行的 EO (工程指令), 编制 EO 的同时确定严重性等级和量化分值。

计分方法: 适用但尚未执行的文件份数×对应的量化分值。

2.2.4 发动机性能数据

对于风险类参数, 按如下评分标准及计分方法计算:

评分标准:

1) 对于距上次大修时间项, 定义单台发动机大修对飞机技术状况的最大影响值为 50 分, 根据大修后的使用时间与限制使用循环时间的比值来确定分值;

计分方法: $50 \times (T_0 / LLP)$; (式中: T_0 为大修后使用时间; LLP 为发动机使用时限)

2) 对于 EGT_M, 其值越小, 风险越大, 定义单台发动机 EGT 对飞机技术状况的最大影响值为 48 分, 最小值为 3 分。

计分方法:

$$\begin{cases} 3; EGT_M \% \geq 80 \% \\ \frac{2.4}{EGT_M \%}; 5 \% \leq EGT_M \% < 80 \% \\ 48; EGT_M \% < 5 \% \end{cases} \quad (1)$$

2.2.5 可靠性管理数据

评分标准:

1) 对于使用困难报告, 根据其严重性等级和 4 位 ATA 章节号确定基础量化分值;

计分方法: 两周内的使用困难报告次数×对应的量化分值;

2) 对于未关闭的警告通告, 按 2 位 ATA 章节确定对应的量化分值;

计分方法: 未关闭警告通告次数×对应的量化分值;

3) 对于 QAR 参数趋势监控, 针对每一事件, 确定对应的严重性等级和基础量化分值; 若事件状态为“New (新)”, 则按第一条确定的基础分值加 2 分; “Monitoring (监控)”, 则按基础分值计分; “Closed (关闭)” 则不计分 (通过 LMR 计分);

计分方法: 未关闭事件次数×量化分值;

4) 对于附件寿命数据甄选影响飞机安全性且故障拆换较为频繁的附件, 根据机队历史寿命数据计算在位附件的剩余理论可靠度, 按区间计分。

计分方法: 剩余理论可靠度小于等于 20% 时计 5 分。

2.2.6 其他数据

对于风险类参数, 按如下评分标准及计分方法计算:

评分标准:

1) 对于机龄, 按时间区间分段计分;

计分方法: 机龄小于 10 年取 5 分; 大于等于 10 年小于 15 年取 10 分; 大于等于 15 年取 20 分;

2) 对于距上次 C 检时间, 定义 C 检对飞机技术状况的最大影响值为 30 分, 根据 C 检后使用时间确定分值;

计分方法： $30 \times (T_0 / C \text{ 检间隔})$ ；(式中 T_0 为 C 检后的使用时间)；

3) 对于距上次 A 检时间，定义 A 检对飞机技术状况的最大影响值为 20 分，根据 A 检后使用时间确定分值；

计分方法： $20 \times (T_0 / A \text{ 检间隔})$ ；(式中 T_0 为 A 检后的使用时间)。

2.3 评分算法实现流程

飞机多级健康状态评估算法通过收集已有确定的各类工程数据、技术数据和可靠性分析数据，按照设定的评分规则进行分数累积，得到单架飞机的技术状态分值，并对整个机队飞机的技术状态按分值大小进行排序，精准高效地为飞机技术派遣提供可靠的决策依据，评分算法实现流程如图 2 所示。算法实现步骤：

- 1) 收集机队中所需评估飞机的各类工程数据、技术数据和可靠性分析数据，加载各架飞机的逻辑项配置数据，如图 1、表 2 和表 3 所示；
- 2) 针对各架飞机，按表 1 所示事件参数严重性程度等级和 3.2 节所述评分标准及计分方法进行各逻辑项分值计算；
- 3) 针对各架飞机，按表 2 和表 3 所示权重设定方法赋予各项逻辑项以相应的权重值；
- 4) 单架飞机各项技术状况分值累加；
- 5) 机队技术状况评分结果排序及存储。

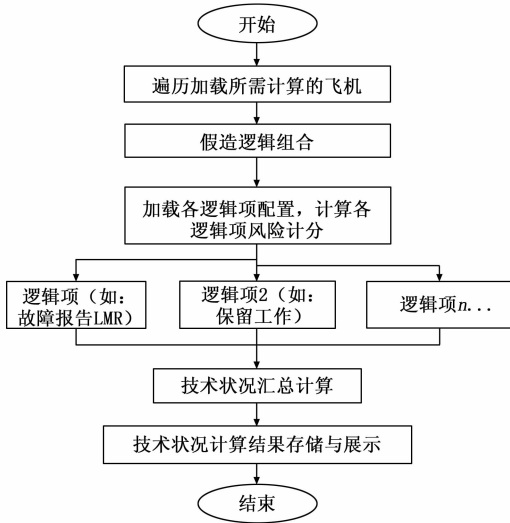


图 2 评分算法实现流程

3 验证分析

利用前述民用飞机多级健康状态评估方法，在某航空公司开展验证与分析工作。利用实际运营的 100 余架飞机运行数据开展了半年的验证试用工作，验证机型主要覆盖波音 B737/B757/B787 等。

应用结果表明，应用健康状态评估技术指导飞机派遣决策工作以来，较好地指导完成了一般派遣 68 次、VIP/VVIP 派遣数十次、专机派遣十余次、寒冷地区派遣数次，有效提升了重要航班保障效率，为飞机日利用率的提升奠定了基础（日利用率的提升虽不主要取决于派遣效率，但应用健康状态评估技术后，飞机日利用率较去年同期有所提升）。

综上，本文提出的民用飞机多级健康状态评估方法，可有效评估飞机健康及技术状态，为飞机健康评定、派遣决策等提供支撑。

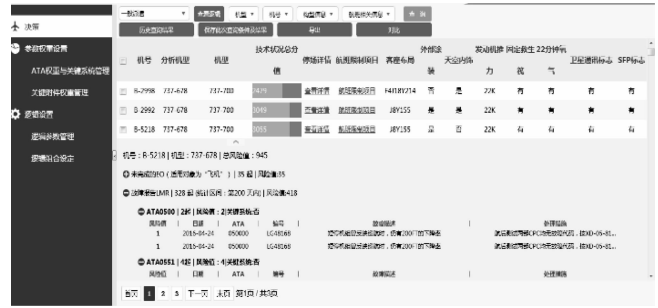


图 3 健康状态评估方法在某航空公司的应用页面

4 结语

以航空公司实际运营经验为基础，系统总结了影响飞机技术放行的各类工程技术因素，提出了基于飞机工程数据、技术数据和可靠性分析数据的多级健康状态评估方法，建立飞机技术状态的量化分析模型，根据不同的技术派遣和营运情况动态设置参数，修正量化分析方法，并设计了相应的软件系统，在航空公司机队的实际应用中表明，基于飞机多级健康状态的评估系统能够有效地提高机队的派遣可靠度和日利用率，帮助航空公司降低运营成本，提升机队的整体可靠性管理水平，具有重要的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 王 洪, 黄加阳. 民用飞机关联性诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3301-3304.
- [2] 严爱军, 钱丽敏, 王 普. 案例推理属性权重的分配模型比较研究 [J]. 自动化学报, 2014, 40 (9): 1896-1901.
- [3] 殷伟丽, 王 洪, 刘 飞. 民机运营可靠性数据采集中的数据质量控制 [J]. 航空维修与工程, 2015, 9: 67-69.
- [4] Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification (the second edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [5] 黄远强, 瞿红春, 赵越超. 基于主成分分析方法的航空发动机性能排队研究 [J]. 航空维修与工程, 2015, 1: 75-77.
- [6] Yan A J, Wang W X, Zhang C X, et al. A fault prediction method that uses improved case - based reasoning to continuously predict the status of a shaft furnace [J]. Information Sciences, 2013, 259 (2014): 269-281.
- [7] 郑 佩. 基于案例推理的故障诊断技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [8] 张佰尚, 向 阳, 王铁男, 等. 集成案例推理综述 [J]. 计算机应用研究, 2015, 33.
- [9] Lee M R. An exception handling of rule - based reasoning using case - based reasoning [J]. Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35: 327-338.
- [10] Deng J L. The primary methods of grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005.
- [11] 李峰刚. 基于案例推理的智能决策技术 [M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2011.