

文章编号:1674-8190(2020)01-037-09

面向军用飞机任务能力的健康评估方法

房冠成,王海峰,官霆,贾大鹏,刘海涛

(航空工业成都飞机设计研究所,成都 610091)

摘要: 军用飞机健康评估在工程实际中存在应用困难的问题。以军用飞机为研究对象,开展包括面向任务的能力分析、基于故障劣化的功能分析以及参数化的健康评估等研究,得到基于任务分析的“飞机—任务功能—影响参数”两级映射作为健康评估的对象;综合利用劣化度、严酷度及极大熵改进区间层次分析法等多种方法,得到飞机健康状态评估结果。结合具体实例及参数分析结果,表明该评估方法可信度高,具有较高的工程实用价值。

关键词: 健康评估;健康管理;军用飞机;任务;决策

中图分类号: V328.3; F562.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Health Assessment Method for Military Aircraft Based on Mission Capabilities

FANG Guancheng, WANG Haifeng, GUAN Ting, JIA Dapeng, LIU Haitao

(AVIC Chengdu Aircraft Design Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: The military aircraft health assessment has the problem of difficult application in engineering practice. The military aircraft is taken as the research object of health assessment, including task-oriented capability analysis, function analysis based on fault degradation and parametric health assessment. The two-level mapping of “aircraft-mission function-impact parameters” based on mission analysis is obtained as the object of health assessment. The degradation, severity and maximum entropy modification are comprehensively utilized. The results of aircraft health assessment are obtained by interval analytic hierarchy process and other methods. In combination with the specific example object and parameter analysis results, this assessment method has high reliability, and high engineering practical value.

Key words: health assessment; health management; military aircraft; mission; decision making

0 引言

随着武器装备的发展,其复杂程度和综合程度急剧增加,对保障效能及经济可承受性提出了严峻

的考验,预测与健康管理(Prognostic and Health Management,简称 PHM)技术是解决该问题的关键,健康评估是 PHM 技术的核心内容之一^[1]。

目前,国内外在健康评估方法层面的研究有:

收稿日期:2019-03-11; 修回日期:2019-06-09

基金项目:国防科工局项目(JCKY 2016205A004);航空科学基金(ASFC-2017ZD11009)

通信作者:房冠成, chixinlong@126.com

引用格式:房冠成,王海峰,官霆,等. 面向军用飞机任务能力的健康评估方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 37-45.

FANG Guancheng, WANG Haifeng, GUAN Ting, et al. Health assessment method for military aircraft based on mission capabilities[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 37-45. (in Chinese)

黄云程等^[2]提出改进的层次分析法,结合灰色关联分析,对电力变压器油纸绝缘老化状态进行了综合评估;周永林等^[3]提出一种基于云模型理论的多层次模糊综合评价法的改进方法;崔建国^[4]构建了一个基于灰色聚类法和组合赋权法相结合的飞机液压系统两级健康状态综合评估模型,利用灰色聚类法对两级模型进行综合评估;张帅林等^[5]建立了商用飞机维修保障系统能力评估指标体系,并采用主成分分析法对商用飞机维修保障能力进行了定量评价;马海英等^[6]引入劣化度概念,运用变权模糊理论,建立了基于劣化度的装备健康状态变权模糊综合评估模型,并对地空导弹进行了实例分析;Li Feng 等^[7]利用局部切线空间对准和最优监督模糊均值聚类方法对旋转机械进行分等级的寿命评估;S. Ferreiro 等^[8]利用贝叶斯网络对汽车健康状态进行了综合评价。此外,还有基于支持向量机分类^[9]、马尔科夫链^[10]等健康评估方法。

相比于方法层面的研究,健康评估技术在航空

航天的工程应用方面较为滞后。李俨等^[11]对某型无人机部分分系统发生故障及采取修复措施后的健康状态分别进行了评估;胡清忠等^[12]利用设备测数据构建隐马尔可夫健康状态评估模型,并对航天发射场供气系统进行健康评估应用。一方面,对于飞机系统级的健康评估方法研究较少,制约了健康评估技术的工程化应用;另一方面,多数健康评估方法得到的结果为健康评估数值或健康等级,难以进行任务能力分析,也难以用于维修决策分析。因此,本文从军用飞机健康管理的实际需求和使用寿命出发,开展面向军用飞机任务能力的健康评估方法研究。

1 基于任务的“飞机—任务功能—影响参数”分析

本文以军用飞机为研究对象,开展面向任务能力的健康评估方法研究,流程如图 1 所示。

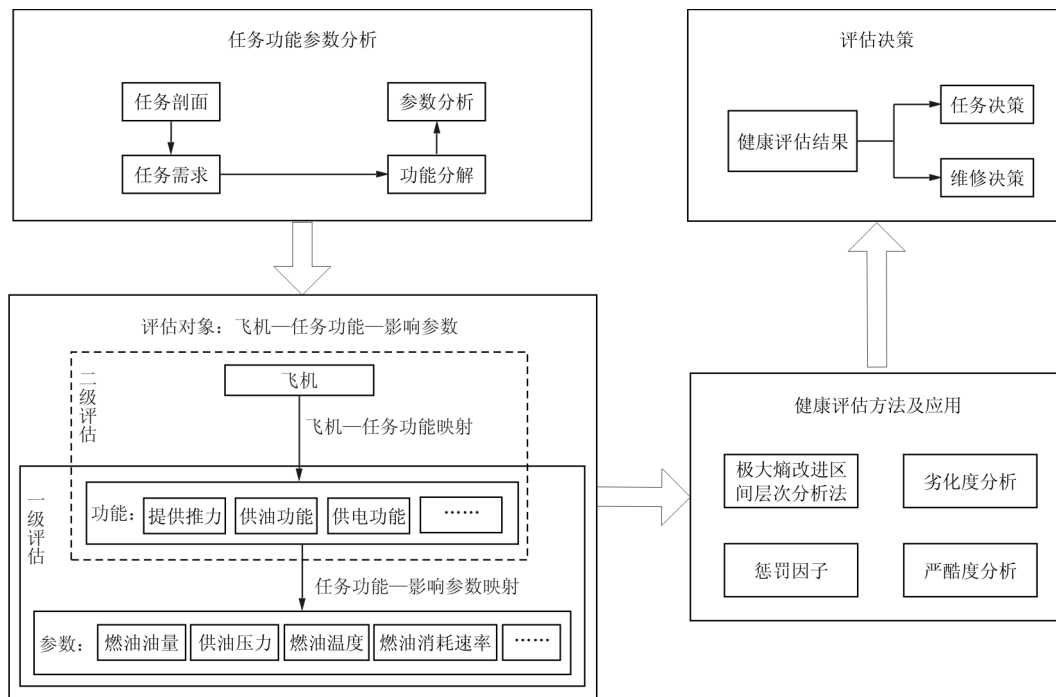


图 1 面向军用飞机任务能力的健康评估方法流程

Fig.1 Health assessment method flow oriented to military aircraft mission capability

1.1 飞机—任务功能

在飞机下达任务后,为了得到飞机的功能需求,进行任务剖面分析,首先根据任务类型(日常训练、性能试飞、空空作战、空地作战、电子战、巡逻、侦察等),确定需要的任务载荷(航炮、导弹、雷达、电子战、红外搜索、副油箱、液冷设备等);然后根据任务需求,得到飞机执行本次任务所需要的功能清单。典型军用飞机一次飞行任务剖面如图 2 所示。

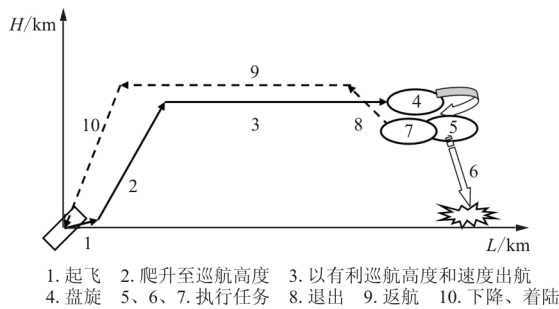


图 2 军用飞机典型任务剖面

Fig. 2 Typical mission profile of military aircraft

飞机功能可分为“基本功能”和“任务功能”,其中,“基本功能”为保障飞行安全而必备的功能,“任务功能”与执行的任务类型相关。

1.2 任务功能—影响参数

对完成各功能相关的参数进行梳理,如表 1 所

示。得到“飞机—任务功能—影响参数”二级映射,一般地,军用飞机可建立的健康评估架构如图 3 所示。

表 1 军用飞机健康评估列表

Table 1 Military aircraft health assessment list

飞机功能需求	功能类型	相关关键参数
提供推力	基本	发动机进口压力、进口温度、压气机出口压力、发动机转速等
供油功能	基本	燃油油量、供油压力、燃油温度、燃油消耗速率等
供电功能	基本	汇流条电压、汇流条电流、发电机工作状态等
供压功能	基本	泵出口压力信号、油滤污染信号、油液温度参数等
飞行控制功能	基本	速度、高度、航向角、俯仰角、副翼偏转角等
起降功能	基本	起落架工作状态、刹车压力、左右轮速等
通信导航功能	基本	惯性参考信号、电台信号等
安全防护功能	基本	座舱压力、座舱温度、供氧浓度、设备冷却状态等
指挥控制功能	任务	任务链指挥、反馈信号等
空中加油功能	任务	受油口角度、供压压力、供油油量等
感知侦察功能	任务	雷达、电子战、红外搜索信号等
武器火控功能	任务	悬挂物管理、武器舱门驱动状态、火控信号等
其他任务功能	任务	...

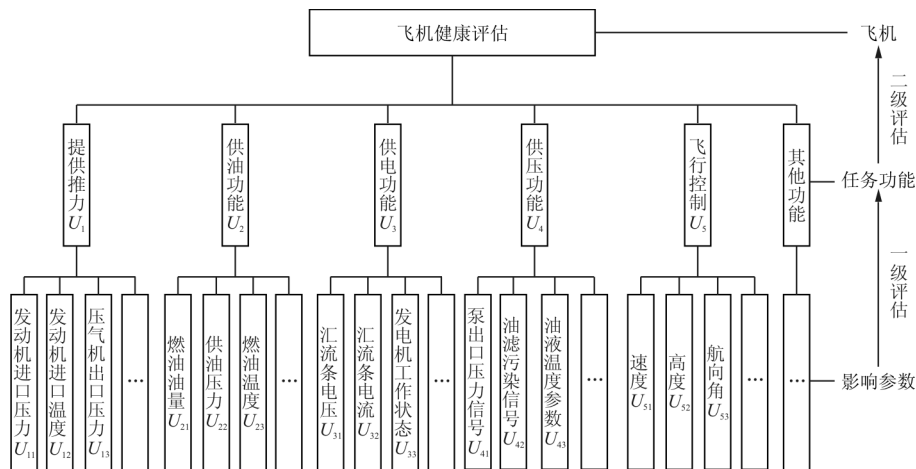


图 3 典型军用飞机健康评估架构

Fig. 3 Typical military aircraft health assessment architecture

2 基于劣化度及严酷度分析的功能评估(一级评估)

飞机的健康状态一般是逐渐退化的,一旦功能退化超出允许的范围,飞机出现故障,无法完成相应的功能。功能的退化,用与该功能相关的参数数值变化进行表征。本文采用劣化度结合严酷度分析,对“功能”进行一级评估。

2.1 劣化度分析

飞机监控参数蕴含大量的飞机状态信息,一般采用阈值法对参数进行故障监控,但是阈值监控并不能全面反映参数的退化状态。因此,引入劣化度方法,评价参数状态的优劣。

机载监控参数是时间的函数,可记为 $X(t)$ 。飞机某个功能正常,该功能共有 n 个相关参数,可认为这 n 个参数所确定的正常工作状态的集合 $G(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。若某个参数超出正常状态,则认为发生故障,而有时正常工作中的飞机状态在一定程度上偏离了良好状态,但未超过极限状态,是一个中间状态。劣化度可定义为飞机某项功能状态偏离了良好状态向极限状态偏离发展的程度^[6],其取值范围为 $[0, 1]$, 当值为 1 时,表明发生故障;当值为 0 时,表明健康,用式(1)表示:

$$L = (l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n) \quad (1)$$

式中: l_i 为对应功能的第 i 个参数的劣化度,即偏离正常状态 X_i 的程度。

对于故障阈值为上限或下限的参数,其劣化度计算为

$$l_i = [(x_i - x_0)/(x_{\max} - x_0)]^k \quad (x_0 \leq x_i \leq x_{\max}) \quad (2)$$

下限:

$$l_i = [(x_0 - x_i)/(x_0 - x_{\min})]^k \quad (x_{\min} \leq x_i < x_0) \quad (3)$$

式中: x_0 为飞机参数正常值; x_{\max}, x_{\min} 为该功能失效时的参数阈值; x_i 为该功能参数的实际测量值; k 为劣化度与对应功能健康状态的关系,一般情况下,取 k 值为 1,表明状态与劣化值之间呈线性关系,即劣化值越大,健康状态越差。

对于参数故障阈值为某变化范围的情况,其劣化度可按式(4)计算:

$$l_i = \begin{cases} 1 & (x_i \leq x_0) \\ |(x_i - x_1)/(x_0 - x_1)|^k & (x_0 < x_i < x_1) \\ 0 & (x_1 \leq x_i \leq x_2) \\ |(x_i - x_2)/(x_3 - x_2)|^k & (x_2 < x_i < x_3) \\ 1 & (x_i \geq x_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1, x_2 为参数正常值的下限和上限; x_0, x_3 为表征参数故障的下限和上限。

对于离散量参数,如开关类、通信状态类,若该参数发生故障,则取其劣化度为 1;若未发生故障,则劣化度为 0。

如果在系统设计逻辑中,某个参数设定了故障的报故逻辑和条件,则按报故逻辑和条件计算,当参数发生故障时,劣化度为 1。

2.2 严酷度分析

故障模式、影响和危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis,简称 FMECA)是故障影响传播分析的基本手段和方法,得到了广泛的应用。其由相对独立的两部分组成,第一部分为故障模式及影响分析(FMEA),第二部分为危害性分析(CA)^[13]。

FMEA 分析每一个可能的故障模式的影响,并将每一故障模式按其严酷度分类。严酷度是度量故障模式对系统造成后果的严重程度,而严酷度类别是给故障造成最坏潜在后果规定的一个度量,当初始约定层次是飞机时,故障模式可以分为以下 4 类:第 I 类:灾难性的;第 II 类:严重的;第 III 类:比较严重的;第 IV 类:轻微的。具体的分析过程和方法,本文不再赘述。

传统的 CA 分析是综合考虑每一种故障模式的严酷度类别及故障模式出现概率所产生的影响,并对其进行划等分类的分析方法。这是在飞机没有发生故障情况下的一个静态预测公式,用于指导前期设计分析,一旦飞机发生故障,故障率和故障模式频数比等都将不再适用。李严等^[11]认为在没有发生故障前,飞机一直处于健康状态,发生故障后才需要对故障的危害度进行分析,本文借鉴这种思路,根据不同的故障模式,按照严酷度类别分别计算危害度,即:

$$c = \begin{cases} 100\% & (r \in \text{I}) \\ 80\% & (r \in \text{II}) \\ 40\% & (r \in \text{III}) \\ 20\% & (r \in \text{IV}) \end{cases}$$

2.3 功能评估

第 j 个功能的健康状态 F_j 的计算公式为

$$F_j = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^n c_i \times l_i & (1 - \sum_{i=1}^n c_i \times l_i \geq 0) \\ 0 & (1 - \sum_{i=1}^n c_i \times l_i < 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为第 j 个功能对应的参数数量; c_i 为该功能第 i 个参数对应故障模式的严酷度; l_i 为第 i 个参数的劣化度; F_j 取值范围为 $[0, 1)$, 越接近 0, 表明该功能距离失效状态更近。

3 基于改进层次分析法和惩罚因子的飞机评估(二级评估)

3.1 极大熵改进区间层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是一种将定性和定量相结合的多准则决策方法, 得到了广泛应用。但是, 该方法存在忽略决策者主观倾向的缺点, 区间层次分析法充分考虑专家对于指标比对主观因素判断的不确定因素, 能改善层次分析法主观性强的劣势^[14]。

区间层次分析法首先得到一个权重取值区间, 权重区间传递给决策者部分权重信息, 依据极大熵准则, 在已知各指标部分权重信息的情况下, 满足约束条件的所有指标的权重熵值总和达到最大时, 权重值的可能性最大, 此时指标权重的配置最为合理^[15]。计算公式^[14]如下:

$$\begin{cases} \max F = - \sum_j^m \omega_j \ln \omega_j \\ \text{s. t. } \sum_j^m \omega_j = 1 \\ \omega_j \in [\underline{\omega}_j, \bar{\omega}_j] \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $[\underline{\omega}_j, \bar{\omega}_j]$ 为区间层次分析法计算得到的第 j 个指标的权重区间。

3.2 飞机健康评估

飞机的健康状态用 H 表示, 其计算公式为

$$\begin{cases} H = \sum_j^m \omega_j F_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \\ \sum_j^m \omega_j = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (7)$$

式中: H 为飞机的健康评估结果, $H \in [0, 1)$, $H = 0$ 表示飞机失效, 无法继续执行任务; ω_j 为第 j 个功能的组合权重; F_j 为第 j 个功能的健康评估结果; m 为飞机功能的个数。

对于军用飞机, 根据执行任务的不同, 不同系统的关键性不同, 同一系统执行不同任务时, 其作用和关键性也不同。某个关键功能失效可能导致整个任务失败, 而某个功能失效, 可能不影响最终任务完成。因此, 定义惩罚因子 P , 在该任务下, 某个关键功能失效时 (对应 $F_j < 0.5$), 乘以惩罚因子, 其定义为

$$\begin{cases} P_j = \frac{1}{m^2} & (\text{对应的某个关键功能的 } F_j < 0.5) \\ P_j = 1 & (\text{对应的功能非关键功能或} \\ & \text{关键功能但是其 } F_j \geq 0.5) \end{cases} \quad (8)$$

由于关键功能的权重可能较大, 而惩罚因子为功能个数乘积的倒数, 一般为较小的数值, 因此关键功能的失效, 可能导致飞机整体健康状态评估分值较低, 判定飞机无法完成任务。关键功能需要因任务不同, 进行分析后单独定义。因此得到如式 (9) 所示的飞机健康评估公式:

$$\begin{cases} H = \sum_j^m \omega_j F_j P_j \\ \sum_j^m \omega_j = 1 \end{cases} \quad (9)$$

4 评估决策

一般将系统健康状态划分为多个等级, 但是对于等级的划分目前没有形成统一, 综合国内外大量研究, 健康状态分级从二级到五级不等。

本文从飞机实际保障需求出发, 三级健康评估等级如表 2 所示, 并对各等级进行了任务与维修决策分析。

表 2 飞机健康等级与任务、维修决策表

Table 2 Decision table of aircraft health grade, task and maintenance

健康等级	描 述	任务决策	维修决策
健康 $H > 0.8$	飞机健康处于非常良好的状态, 没有出现性能衰退或性能衰退不显著	执行任务	无需维修
降级 $0.5 \leq H \leq 0.8$	飞机出现了潜在故障, 性能出现降级, 但仍能正常使用	<ol style="list-style-type: none"> 1. 任务完成能力评估 2. 评估后能够支持完成任务, 则无需维修, 继续执行本次任务, 任务完成后再进行维修作业 3. 评估后无法完成任务, 则进行任务切换, 若切换任务, 则重复进行新任务下的飞机健康评估流程 4. 若评估后不进行任务切换, 则进行排故作业 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 任务决策后不需要进行维修的, 则无需维修决策 2. 任务决策后确定需要进行维修的, 进行维修策略分析, 包括原位/离位维修、维修工时、人力、备件等, 完成维修作业
失效 $H < 0.5$	飞机已经发生的故障, 导致功能失效, 丧失完成任务的能力, 处于失效状态	放弃执行任务	进行维修

各等级对应的任务及维修决策分析流程如图 4 所示。

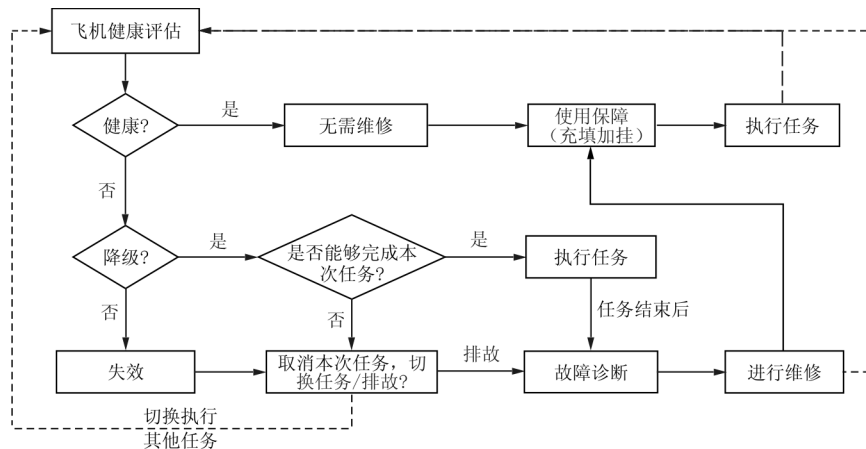


图 4 军用飞机健康评估与任务、维修决策流程

Fig. 4 Military aircraft health assessment and task, maintenance decision-making process

从图 4 可以看出, 健康评估与决策流程, 充分利用了健康评估的结果, 使任务决策更加准确、维修策略更为高效, 能够节省人力物力, 提高出动架次率, 提高保障效能。

5 案例应用

某型军用飞机计划执行侦察任务, 经分析, 得到本次侦察任务的飞机功能及参数列表, 如表 3 所示。限于篇幅, 本文仅列出感知侦察功能的分析过程。针对感知侦察功能, 其相关参数信息如表 4 所示。提取本机上一次飞行时各系统的状态数据, 作为健康评估的原始参数数据, 部分参数样本数据如

表 5 所示。

按照 2.1 节方法, 对原始参数样本的进行劣化度及严酷度分析, 并对劣化度结果取均值, 以减轻极值点的影响, 结果如表 6 所示。

将表 6 数据带入式(6), 对“感知侦察”功能进行一级评估, 得到 $F_9 = 0.674$ 。

使用同样的方法, 得到表 3 中其他功能的评价结果, 如表 7 所示。

利用区间层次分析法计算得到各指标的权重区间, 并采用式(7)得到极大熵改进优化的权重取值, 限于篇幅, 此处省略计算过程, 得到权重计算结果如表 8 所示。

表 3 某型军用飞机健康评估列表

Table 3 Health assessment list for a military aircraft

序号	飞机功能需求	类型	相关关键参数
1	提供推力	基本	发动机进口压力、进口温度、压气机出口压力、发动机转速等
2	供油功能	基本	燃油油量、供油压力、燃油温度、燃油消耗速率等
3	供电功能	基本	汇流条电压、汇流条电流、发电机工作状态等
4	供压功能	基本	泵出口压力信号、油滤污染信号、油液温度参数等
5	飞行控制功能	基本	速度、高度、航向角、俯仰角、副翼偏转角等
6	起降功能	基本	起落架工作状态、刹车压力、左右轮速等
7	通信导航功能	基本	惯性参考信号、电台信号等
8	安全防护功能	基本	座舱压力、座舱温度、供氧浓度、设备冷却状态等
9	感知侦察功能	任务	液冷压力值(入口)、液冷温度值(入口)、液冷压力值(出口)、液冷温度值(出口)、低温泵转速、高温泵转速、油箱燃油温度, 供电电压、供电电流

表 4 感知侦察功能相关参数信息

Table 4 Information of parameters related to perceptual reconnaissance function

序号	参 数	正常范围	所属系统
1	液冷压力值(入口)/kPa	400~700	环控系统
2	液冷温度值(入口)/℃	0~30	环控系统
3	液冷压力值(出口)/kPa	150~350	环控系统
4	液冷温度值(出口)/℃	5~40	环控系统
5	低温泵转速/(r·min ⁻¹)	7 000~10 000	环控系统
6	高温泵转速/(r·min ⁻¹)	7 500~10 500	环控系统
7	油箱燃油温度/℃	-5~45	燃油系统
8	供电电压/V	260~280	供电系统
9	供电电流/A	0~60	供电系统

表 5 原始参数样本

Table 5 Samples of original parameters

参 数	数 值		
	样本 1	样本 2	样本 3
液冷压力值(入口)/kPa	461	439	448
液冷温度值(入口)/℃	16.5	17.1	18.4
液冷压力值(出口)/kPa	205	198	201
液冷温度值(出口)/℃	19.8	22.1	20.3
低温泵转速/(r·min ⁻¹)	8 350	8 536	8 417
高温泵转速/(r·min ⁻¹)	8 625	8 770	8 655
油箱燃油温度/℃	19.9	21.5	22.8
供电电压/V	271	271	272
供电电流/A	5.7	12.5	15.4

表 6 劣化度及严酷度分析结果

Table 6 Analysis results of deterioration and severity

序号	数据名称	劣化度	严酷度
1	液冷压力值(入口)	0.29	IV
2	液冷温度值(入口)	0.08	III
3	液冷压力值(出口)	0.31	IV
4	液冷温度值(出口)	0.10	III
5	低温泵转速	0.08	IV
6	高温泵转速	0.07	IV
7	油箱燃油温度	0.14	IV
8	雷达供电电压	0.02	III
9	雷达供电电流	0.10	III

表 7 一级评估结果

Table 7 Level 1 assessment results

功能类别	评估结果
提供推力	0.748
供油功能	0.719
供电功能	0.856
供压功能	0.782
飞行控制功能	0.918
起降功能	0.932
通信导航功能	0.685
安全防护功能	0.917
感知侦察功能	0.674

表 8 “功能”权重计算结果

Table 8 Calculation results of “function” weight

序号	功能	权重区间 (区间层次分析法)	极大熵优化后的权重
1	提供推力	[0.131,0.146]	0.141
2	供油功能	[0.075,0.103]	0.088
3	供电功能	[0.119,0.156]	0.136
4	供压功能	[0.101,0.135]	0.116
5	飞行控制功能	[0.106,0.130]	0.126
6	起降功能	[0.068,0.098]	0.075
7	通信导航功能	[0.096,0.115]	0.100
8	安全防护功能	[0.033,0.047]	0.043
9	感知侦察功能	[0.146,0.179]	0.172

对于本例,关键功能为“提供推力”“供电功能”“飞行控制功能”以及“感知侦察功能”。从表 7 可以看出:以上关键功能均不属于失效状态,因此无需叠加惩罚因子。将表 7 和表 8 代入式(10),对飞机进行二级评估,得到 $H=0.784$,飞机健康评估

结果为:降级。

按照图 4 的流程,开展任务能力评估,由于需要执行侦察任务,而感知侦察的评估结果仅为 0.674,功能处于“降级”状态,存在潜在故障,可能导致任务失败,因此,结束本次任务。进行任务切换后,对巡航、空中加油等任务分析,重新进行健康评估的流程分析,得到本架飞机在新任务下的健康评估结果均为“健康”,可以执行巡航、空中加油等任务。若不执行新任务,则进入排故作业,后经排故分析,发现低温泵出口液冷导管处有冷却液渗漏,该故障是导致表 5 中液冷入口和出口压力低于正常值、参数劣化度评价较差的原因,经过维修换件后,飞机达到健康状态。

6 结束语

本文提出了面向军用飞机任务能力的健康评估方法,将军用飞机进行“飞机—任务功能—参数”层级划分,综合利用劣化度分析、严酷度分析、改进层次分析法等多种方法,并以某军用飞机一次飞行任务为典型对象,进行了应用分析。所提方法能够在军用飞机实际任务中,对军用飞机任务能力的健康状态有效评估,具有重要的工程实用价值。

参考文献

- [1] 吕琛, 马剑, 王自力. PHM 技术国内外发展情况综述[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 1-4.
LÜ Chen, MA Jian, WANG Zili. A review of the development of PHM technology at home and abroad[J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(9): 1-4. (in Chinese)
- [2] 黄云程, 蔡金锭. 融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2083-2090.
HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Fusion improved hierarchical analysis and grey correlation method for evaluating oil-paper insulation state[J]. Journal of Instruments and Instruments, 2015, 36(9): 2083-2090. (in Chinese)
- [3] 周永林, 王磊. 基于云模型理论的多层次模糊综合评价法[J]. 计算机仿真, 2016, 33(12): 390-395.
ZHOU Yonglin, WANG Lei. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation method based on cloud model theory[J]. Computer Simulation, 2016, 33(12): 390-395. (in Chinese)
- [4] 崔建国. 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.
CUI Jianguo. Comprehensive evaluation method of aircraft health status based on fuzzy grey clustering and combined weighting method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 764-772. (in Chinese)
- [5] 张帅林, 陈志雄, 潘佑, 等. 商用飞机机务维修保障能力评价方法[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 544-550.
ZHANG Shuailin, CHEN Zhixiong, PAN You, et al. Evaluation method of maintenance support capability of commercial aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 544-550. (in Chinese)
- [6] 马海英, 周林, 王亮. 基于劣化度的装备健康评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 66-69.
MA Haiying, ZHOU Lin, WANG Liang. Equipment health assessment model based on deterioration degree[J]. Firepower and command control, 2014, 39(10): 66-69. (in Chinese)
- [7] LI Feng, CHYU M K, WANG Jiayu, et al. Life grade recognition of rotating machinery based on supervised orthogonal linear local tangent space alignment and optimal supervised fuzzy C-Means clustering[J]. Measurement, 2015, 73: 384-400.
- [8] FERREIRO S, ARNAIZ A, SIERRA B, et al. Application of Bayesian networks in prognostics for a new integrated vehicle health management concept[J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(7): 6402-6418.
- [9] CHENG Shengjun, SHI Meili, YANG Yu, et al. A roller bearing fault diagnosis method based on improved LMD and SVM[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2011, 2(1): 1-5.
- [10] LI Zhinong, HE Yongyong, CHU Fulei, et al. Fault recognition method for speed-up and speed-down process of rotating machinery based on independent component analysis and factorial hidden markov model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 291(1): 60-71.
- [11] 李俨, 陈海, 张清江, 等. 无人机系统健康状态评估方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 562-567.
LI Yan, CHEN Hai, ZHANG Qingjiang, et al. Assessment method of health condition for UAV systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(3): 562-567. (in Chinese)
- [12] 胡清忠, 褚福磊. 航天发射场供气系统健康管理技术[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(1): 78-82.
HU Qingzhong, CHU Fulei. Aerospace launch site gas supply system health management technology[J]. Journal of Vibration Measurement and Diagnosis, 2019, 39(1): 78-82. (in Chinese)
- [13] 薛海红, 严控航, 王瑶, 等. 一种基于 FMEA 的故障诊断贝叶斯网络快速构建方法[J]. 航空工程进展, 2016, 7(3): 316-324.
XUE Haihong, YAN Shuanhang, WANG Yao, et al. Fast construction method of Bayesian network for fault diagnosis based on FMEA[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(3): 316-324. (in Chinese)
- [14] 马丽叶, 丁荣荣, 卢志刚, 等. 基于可拓云模型的配电网经

济运行综合评价及灵敏度分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(7): 8-16.

MA Liye, DING Rongrong, LU Zhigang, et al. Comprehensive evaluation and sensitivity analysis of economic operation of distribution network based on extension cloud model[J]. New Technology of Electrical Power, 2016, 35(7): 8-16. (in Chinese)

- [15] 汪群峰, 金佳佳, 米传民, 等. 基于灰色关联深度系数的评价指数客观权重极大熵配置模型[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 235-240.

WANG Qunfeng, JIN Jiajia, MI Chuanmin, et al. Evaluation index objective weight maximum entropy allocation model based on grey relational depth coefficient[J]. Control and Decision-making, 2013, 28(2): 235-240. (in Chinese)

作者简介:

房冠成(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机健康管理。

王海峰(1964—),男,博士,研究员,总设计师。主要研究方向:飞机设计。

官 霆(1966—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞机综合保障设计、健康管理。

贾大鹏(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机健康管理。

刘海涛(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机健康管理。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 26 页)

- [30] FRENDA S J, FENN K M. Sleep less, think worse: the effect of sleep deprivation on working memory[J]. Journal of Applied Research in Memory and Cognition, 2016, 5(4): 463-469.

- [31] WICKENS C D, HUTCHINS S D, LAUX L, et al. The impact of sleep disruption on complex cognitive tasks: a meta-analysis[J]. Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2015, 56(6): 1935-1941.

- [32] 吕长超. 大学生视觉空间认知能力与工作记忆广度的实验研究[D]. 西安:西北大学, 2008.

LÜ Changchao. An experiment study on the relationships between visuospatial ability and working memory span of college students[D]. Xi'an: Northwest University, 2008. (in Chinese)

作者简介:

初建杰(1981—),男,博士,副教授。主要研究方向:工业设计与人机工效。

俱雅芳(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:人机工效与情感化设计。

王 磊(1979—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:工业设计与人机工效,复材制造技术。

陈彦蒿(1990—),男,博士研究生。主要研究方向:视觉工效,色彩与光环境。

(编辑:丛艳娟)