

无人机健康状态综合评估技术研究

谷泽阳, 李小民

(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 无人机健康状态综合评估技术是以无人机视情维修体系为背景发展起来的, 已成为先进的无人机核心技术之一, 现已发展成为一门新兴的科学技术; 国外的许多军用无人机由于采用健康状态评估技术, 极大降低无人机的使用和维修成本、提高无人机的使用可靠性; 结合某型无人侦察机的典型部件, 阐述了无人机健康状态评估技术的提出、实现方法和发展趋势, 并以无人机的动力分系统为例, 验证了所提方法的可行性, 为实现无人机状态即时评估提供科学依据。

关键词: 无人机健康状态; 综合评估; 可靠性; 视情维修

Research on Technology of Health Assessment of UAV

Gu Zeyang, Li Xiaomin

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: With the rapid development of information technology and the application of managerial technique of the health for UAV, the maintenance mode of UAV has changed greatly. Nowadays, the new maintenance mode which maintains UAV according to the real-time is coming for its advantage both in economy and time, and now it has become one of the core technologies of advanced unmanned aerial vehicles, has become an emerging science and technology. Many foreign military UAV technology thanks to evaluate health status, greatly reducing the use and maintenance costs, improving the reliability of the use of UAV. Combine with a type of UAV, this paper described the proposed assessment of the health status of UAV technology, implementation methods and trends. By using the methods that this paper put forward, we can efficiently integrate all valuable information of a UAV to an index which embodies the health state of the UAV. The result of the health of UAV according to the health index will be very helpful for engineers to manage the UAV more conveniently and efficiently.

Keywords: healthy of UAV; comprehensive; reliability; reliability; condition-based maintenance

0 引言

传统的武器装备系统维修决策模型主要针对计划维修(或称定期维修), 其中设备寿命周期只分为正常工作 and 故障两种状态。随着传感技术和计算机技术的迅猛发展, 视情维修技术得到较为广泛的应用。该方法通过对装备进行定期或不定期的状态监测, 根据监测资料评估装备劣化状况及健康水平, 从而给出合理的维修决策^[1]。因此, 自20世纪90年代以来, 对装备从全新状态到故障状态的中间状态进行了分析和建模, 使视情维修的建模和优化技术获得了初步发展。

无人机健康状态评估技术是一个采集无人机典型部件关键性能参数, 并对其进行处理分析, 从而监视无人机系统的健康状况的方法。无人机健康状况综合评估技术通过对无人机典型部件的有关性能参数监测、处理、分析, 可以完成以下功能:

1) 检查无人机系统各状态下的技术参数, 确保无人机的可靠性与安全性。只有在技术性能参数都在健康范围, 无人机综合健康状况良好的情况下, 才允许无人机执行作战任务。若发现存在参数不符合规定或综合评估结果不达标, 则提示操作人员对无人机进行维护与检修。

2) 对无人机的综合健康状况做出一定的预测。通过分析已监测得到的各性能参数随时间而变化的趋势, 预测无人机故障出现的可能性和时间, 判断无人机完成下次任务的可能性和

更换或维修其部件的最有利时间, 为无人机的管理和后勤保障提供一定的依据。

3) 对无人机的寿命监控。记录无人机的基本使用情况, 如发动机循环次数、起动次数、舵机的故障历史等, 对比无人机的全寿命资料, 判断无人机现在所处的寿命阶段, 为安排无人机的维修保障或任务提供依据。

随着计算机技术的快速发展, 以及装备的故障预测技术的进步, 事前维修技术的应用开始逐步成熟。但是当前我军无人机装备的维修制度仍主要采用事后维修、定期维修的形式, 其中事后维修仅在无人机出现故障后才进行维修保障, 对于无人机这种价格昂贵的新装备而言, 事后维修成本较高; 定期维修按照预先规定的维修周期, 忽略装备实际状态, 不可避免地出现维修过剩和维修不足等情况。这两种维修方式无法根据无人机的具体状态, 提早采取措施, 降低维修成本, 而事前维修则可以解决上述问题。事前维修是以设备的当前实际工况作为依据, 通过一定的状态监测手段、可靠的评价理论及故障预测方式, 对故障的早期征兆加以识别, 对故障部位、严重程度、发展趋势等做出判断, 并根据诊断结果对无人机采取适合的维修方式。

1 无人机健康状态综合评估技术的原理与实现

视情维修技术的核心在于准确地对装备的健康状态进行评估, 确定其健康状态, 而后实施相应的维修保障。故障预测与健康管理体系(PHM)系统就是以事前维修技术为中心而建立的。美国主导研制的F-35是一种先进战斗机, 为了实现高性能、低成本, 尽量降低后续的维护使用成本, 在F-35的设计中体现并贯穿了许多先进的理念和技术方法, 故障预测与健康管理体系便是最重要的技术方法之一^[2]。

收稿日期:2013-11-26; 修回日期:2014-03-12。

作者简介:谷泽阳(1989-),男,河北石家庄人,在读硕士研究生,主要从事无人机健康状态评估与维修决策方向的研究。

无人机采用健康状态评估技术，在使用中可以及早发现无人机的故障和危及飞行安全的隐患，可极大提高无人机的可靠性，同时缩短了维修时间、节约了人力、物力。准确地状态评估可以使无人机的维修从盲目的定期维修过渡到更科学、更有针对性的视情维修。

无人机系统的任何一种状态，都取决于一系列的状态参数，这些参数可以是无人机各部件和系统的工作过程参数、整机性能参数和控制参数等。监测参数选择合理与否，对数据采集、处理和故障分析的精度有着极大的影响。根据监测的数据，利用层次分析法、主成分分析法等数据统计分析方法，对无人机整体做出一个综合评估，给出评分或健康等级。

无人机各典型部件均是一个复杂的分系统，影响其健康状况的因素繁多并且复杂，许多因素无法通过定量的函数关系来进行量化评估。利用系统工程中的层次分析思想将众多影响无人机典型部件健康状况的参数条理化、层次化，进而进行无人机健康状况的评估是比较合适的。基于此，本文拟采用动态权重值层次分析法来举例说明无人机健康评估的流程，其评估流程如图 1 所示。

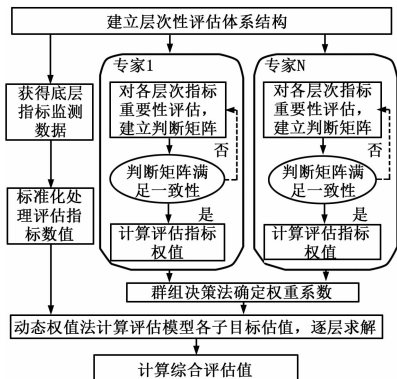


图 1 无人机健康状态综合评估流程

该方法可以根据各因素所处的状态，动态调整各指标的权重系数，使评估更趋科学化。首先，根据无人机典型部件各组成设备之间的关系确立健康状况层次评估体系结构，确定具体的评估指标，并对评估指标进行标准化处理；然后，由不同专家给定各评估指标的权重，利用群组决策法综合计算各指标的权重系数；引入动态变权因子，变权因子越小，评价体系对指标出现状态变化的敏感度越强；利用动态权重值评估法计算评估模型各层子目标评估值，逐层求解。最后计算得到无人机健康状况综合评估值，确定其健康状况。

整个评估的过程中，最关键的是建立无人机的评价指标体系，对各层次指标重要性评估，建立判断矩阵，并且判断矩阵是否满足一致性。可以采用层次分析法中求解指针权重的方法。其中，层次分析法是一种灵活、简便的多目标、多准则的决策分析方法。该方法广泛应用于工程、经济及军事等领域，解决了诸如系统评价、资源分配、价格预测、项目选择等许多重要问题，是一种定量与定性分析相结合的有效方法。它把一个复杂的问题按一定原则分而治之，即根据问题的性质和要达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的相互影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个具有支配关系的、多层次的分析结构模型。对同一层的各元素进行两两比较，并用矩阵运算确定出该元素对上一层支配元素

的相对重要性，进而确定出每个子问题对总目标的重要性。最终把系统分析归结为最低层（如指标层）相对于最高层（目标层）的相对重要性权值的确定或相对优劣次序的排序问题，从而为决策方案的选择提供依据^[4]。

下面说明求解各层次指标权重的方法，图 2 给出了具体分析步骤。

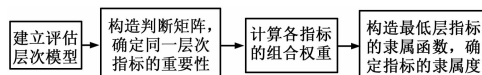


图 2 层次分析法实施步骤

根据层次分析法的具体实施步骤，我们可以建立相应的无人机健康评估指标体系。然后，根据监测的无人机性能参数，对无人机进行较为精确地健康评估。以某型无人侦察机系统为例，根据其特征，可以将系统划分为两个个层次（目标层、指标层）和 10 个典型分系统（动力系统、结构系统、电子系统等），每个分系统通过监测其具体的指标参数，来对无人机的健康状况进行评估，如图 3 所示。^[3]

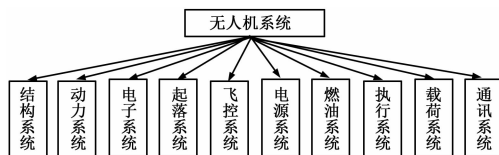


图 3 无人机健康评估指标体系

根据评估内容的不同，分别采取实时监测、定期监测及人工检查的方式获得数据评估指标^[5]。实时监测即利用在无人机结构中预设的传感器的方法，在软件的控制下，自动采集无人机飞行时温度、速度、高度、发动机转速等方面的数据，经网络系统传输至服务器处理系统，实现数据的自动采集、存储、分析工作。定期监测即是用相应仪器定期对无人机有关状态性能指标进行采集，数据以人工方式输入服务器中。人工检查主要以肉眼或便携式仪器对无人机系统表现状态进行经常性的检查，取得可量化数据或状态程度描述信息。

这样采集的综合参数信息可充分体现影响无人机健康状态的因素类别，可以综合考虑这些方面因素，进行状态评估并对无人机的健康状况进行评估，从而确定应当重点维护的无人机部件，及时做出无人机的使用和维修计划。

2 评估实例

以无人机的动力系统为例，验证基于关键参数监测的层次分析法的可行性。发动机性能评估所采用的指标为排气温度（EGT），燃油流量（FF）和起飞 EGT 裕度（EGTM）。这 3 个指标为反映发动机气动性能的最重要的 3 个指标，也是一般的发动机监控软件重点监控的 3 个数据量。这 3 个指标均是采用实时监测的方法获取数据。

EGT 的高低反映了发动机中最重要的、最关键的参数——涡轮前燃气总温的高低，同时它决定了发动机性能的优劣和变化，决定了涡轮导向器工作的安全和寿命，对压气机和涡轮效率的下降极为敏感，对引气系统的故障也有很明显的反应。一般随着这些故障的出现，EGT 均有不同程度的升高。当发动机工作状态参数和飞行状态参数出现问题时，EGT 随之而变化。因此，EGT 是一个极为重要的监控参数。

燃油流量是作为发动机的一个经济性能指标而被监控的。它

与 EGT 一样, 随着发动机各部件效率的下降而增加, 当发动机工作状态参数和飞行参数发生变化时, 燃油流量也随之而变化。

起飞 EGT 裕度表明了发动机起飞时 EGT 距离稳定工作边界的距离, 其值越大, 表明发动机的工作状态越稳定。

首先构造判断矩阵, 本文采用 1~9 的比例标度, 构造判断矩阵。其中, b_{ij} 是对于 A_k 而言, B_i 对 B_j 的相对重要性的数值表示, 通常 b_{ij} 取 1, 3, 5, ..., 9 及它们的倒数。 b_{ij} 的数值越大, B_i 相对 B_j 于越重要。构造动力系统判断矩阵如表 1。

表 1 动力系统指标层权重判断矩阵

	EGT 漂移	FF 漂移	起飞 EGT 裕度	指标权重	一致性检验
EGT 漂移	1.000	1.20	1.0	0.353	判断矩阵具有满意一致性
FF 漂移	0.833	1.00	0.8	0.290	
起飞 EGT 裕度	1.000	1.25	1.0	0.357	

而后采用直线递增型无量纲化方法, 求监测参数的隶属度。

若 EGT 漂移量的下限为 -10, 上限为 19, 某一时刻 EGT 相对基准的漂移量为 7.5, 那么通过隶属函数, 我们可以计算得到此时 EGT 数据的隶属度为

$$\mu(7.5) = \frac{7.5 + 10}{10 + 19} \approx 0.6$$

求出每个最底层指标的隶属度, 并计算出相应指标的组合同权重后, 就可以对发动机状态进行综合评估了。具体指标隶属度如表 2。

表 2 动力系统评估指标隶属度

指标	实测值	隶属区间	隶属函数	隶属度
EGT 漂移量	7.50	[-10, 19]	直线递增性	0.60
FF 漂移量	0.12	[-2, 2]	直线递增性	0.53
起飞 EGT 裕度	12.00	[0, 20]	直线递增性	0.40

因此, 可求得无人机动力系统的健康评分 H 为

$$H = 0.6 \times 0.353 + 0.53 \times 0.29 + 0.4 \times 0.357 = 0.5038$$

根据每个分系统的权重和健康评分, 可以得到最终的无人机系统健康评分。

3 评估报告的组成

在进行无人机系统的健康状态综合评估之后, 应生成一份评估报告, 其内容应包括评估结论、监测 (检查) 数据结果显示、养护维修指导建议等。评估结论部分, 根据层次划分原则, 逐级给出评估结论及分值。首先根据评估系统的计算分析给出无人机系统的总体评估结论及数值, 再给出各个分系统的评估结论及分值, 然后列出每一分系统的安全性、使用性的评估结论及分值, 而后是各个监测指标的监测值。各层次评估分值除以文档形式给出外, 也可以图形的方式表现, 以便直观看出无人机健康状态发展趋势。若以某温度参数随时间变化的监测结果举例, 示意图见图 4。

随着开车时间的延续, 温度会逐渐升高, 到达某一温度后会达到平稳状态。若处于健康状态, 则温度会在稳定状态浮动; 一旦温度有较大互动或偏差, 则综合评估系统应及时判断, 并给出警示。

1) 监测结果部分。包含各种监测 (检查) 项目的详细内

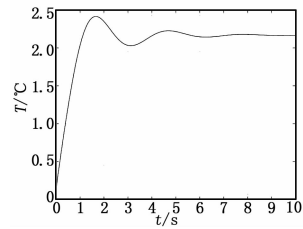


图 4 无人机系统某温度参数随时间变化监测的曲线

容, 如各监测项目的数值曲线图、人工检查可量化的趋势曲线、图表照片及状态程度描述等。实时监测项目数值曲线基于数据预处理、二次处理结果, 根据采集频率的不同, 数据结果曲线包括每小时、每天、每周、每月的均值、最大值、最小值及标准差等。

2) 使用维修指导建议。根据评估项目及评估分值的不同, 分别给出每一项评估内容的使用维修指导建议。如某一监测项目结论为恶劣, 重点给出其具体劣化结果描述, 以便后勤保障人员重点关注, 并进一步采取必要的维护措施。

4 结束语

无人机健康状况评估技术在降低无人机的使用维修成本、提高维修速度和无人机执行任务的可靠性方面起到了很重要的作用, 因此需要引起无人机设计和制造厂商的重视。通过分析, 采用层次分析法对无人机进行健康状态综合评估是可行的, 可有效地解决无人机健康监测数据采集数据量庞大, 难以及时处理的问题。同时, 也为无人机日常维护提供了即时健康状态信息, 可以及早发现灾难性故障隐患, 以便采取措施加以消除或最低程度对其进行控制或延缓, 做到评估式、预测式的无人机健康管理。

同时, 健康状况评估技术的发展仍具有相当广大的空间, 未来的发展趋势可以归纳为以下几个方面:

1) 功能不断提高, 评估更准确。通过改进、增强加载监测系统, 获取更为准确详细的监测数据发展地面综合评估技术, 拓展数据处理方法和评估算法, 使健康评估的功能更强、评估结论更精确。

2) 结合无人机的故障历史, 有效利用机载监控资源, 使无人机控制系统能对无人机故障做出及时响应。

3) 进一步提高评估的实时性, 并具有一定的人工智能, 能够自主进行决策和调整。应用先进的数字化通讯技术, 使空中和地面评估实现实时数据传输, 提高监测和评估的实时性。

参考文献:

[1] 黄建新, 边亚琴. 状态可靠性的装备视情维修决策分析 [J]. 火力与指挥控制, 2011 (10): 134-137.
 [2] 赵 鉴, 梁志君. 从 F-35 项目来看 PHM 的应用与效益 [J]. 价值工程, 2012, (6).
 [3] 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 (3): 562-567.
 [4] 王伟岩, 马 野, 邱楚楚. 基于改进层次分析模型的舰载无人机系统修理级别分析研究 [J]. 舰船电子工程, 2011 (4): 143-146.
 [5] 杨述明, 邱 静, 刘冠军. 面向装备健康管理的监测参数选择与健康评估方法研究 [J]. 中国机械工程, 2012 (7): 1513-1517.
 [6] 吴 波. 健康状态评估方法及应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2345-2347.