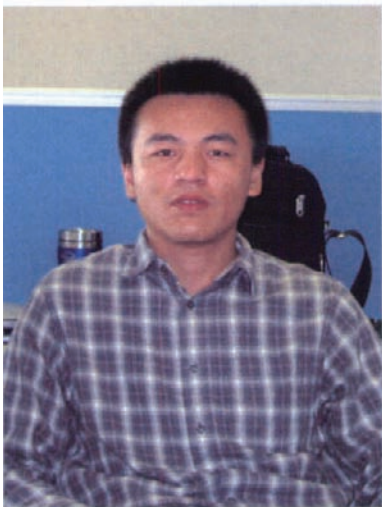


# 基于AHP的航空发动机在翼寿命预测

Life Forecast of On-Wing Aeroengine Based on AHP

北京飞机维修工程有限公司 于文武 康力平



于文武

毕业于中国民航大学航空发动机专业, 硕士, 现为北京飞机维修工程有限公司工程处系统工程师, 研究方向为民航发动机使用可靠性和发动机机队管理。曾参加了民航总局的“中国民航民用发动机全寿命管理系统研究”项目, 此项目获得 2006 年中国民航科学技术二等奖。目前正在参与中国国际航空股份有限公司的“AHM 飞机健康管理系统”项目, 此项目已获中国国际航空股份有限公司科技一等奖。

航空发动机作为飞机的“心脏”, 其健康状态直接影响着飞机的安全飞行和可靠工作。能否对发动机机队进行科学的管理, 对航空公司的运营状况起着极其重要的作用。因此, 需要有一套科学完善的航空发动机在翼寿命预测系统对机队进行评估预测, 来帮助工程师及时了解机队当前的整体运行状况, 及时制定出合理的

航空发动机作为飞机的“心脏”, 其健康状态直接影响着飞机的安全飞行和可靠工作。能否对发动机机队进行科学的管理, 对航空公司的运营状况起着极其重要的作用。因此, 需要有一套科学完善的航空发动机在翼寿命预测系统对机队进行评估预测, 来帮助工程师及时了解机队当前的整体运行状况, 及时制定出合理的更换发动机和维修计划, 从而降低发动机的使用和维修成本, 提高发动机可靠性。

更换发动机和维修计划, 从而降低发动机的使用和维修成本, 提高发动机可靠性。

现行的发动机在翼寿命预测方法主要有 2 种。一种是根据限寿件 (LLP) 的到寿日期, 限寿件时限是发动机制造厂规定给出的, 在发动机限寿件到寿前, 发动机必须从装机位拆下进厂分解, 更换限寿件, 它对于发动机来说是硬时限。全部限寿件中最小的到寿使用日期即为发动机的在翼寿命。另一种方法是根据 EGT 裕度推算到 0 的时间, EGT 裕度越小, 表明 EGT 衰退率比较高, 发动机性能衰退比较严重, 发动机的在翼寿命就越短<sup>[1-2]</sup>。

以上 2 种寿命预测方法的缺点是只考虑了发动机性能方面的因素, 没有考虑其他方面因素, 参与考虑的指标较少, 不能有效利用发动机监控软件、试车台数据、车间数据、航线

维护记录等信息, 无法反映各种指标的相对重要性, 从而很难预测出发动机的真实状况。

## 层次分析法

### 1 层次分析法 (AHP) 模型

发动机在翼寿命预测是多目标决策问题, 需要系统工程理论的综合预测法。因此, 必须将影响发动机寿命的因素进行分类考虑, 最后综合比较得出预测结果。层次分析法是美国著名的运筹学家 T. L. Saaty 在 20 世纪 70 年代中期创立的一种多目标决策方法。

层次分析法本质是试图使人的思维条理化、层次化, 它充分利用人的经验和判断, 对决策方案优劣进行排序。该方法具有实用性、系统性、简洁性等优点, 是处理某些难以完全用定量方法分析的复杂问题的有力手段。该方法广泛应用于工程、经济、

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<sup>[3-4]</sup>。

层次分析法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

提供依据<sup>[5-6]</sup>。

影响发动机在翼寿命因素的数据主要来自于航线、车间、试车台这3个数据源,同时考虑了其他一些因素影响,如发动机的适航性、服务通告等,如图1所示。所有的这些数据可以归纳为以下4个方面:故障信息、时间信息、性能信息以及初始信息。

运用层次分析法综合考虑以上信息,建立发动机在翼寿命预测指标体系,共划分了3个层次(目标层、

准则层、指标层)和4个状态(故障状态、时间状态、性能状态、初始状态),如图2所示,并且同一层次中各个指标是线性无关的。这样的划分充分体现了影响发动机在翼寿命的因素类别,可以综合考虑这4个方面进行预测来确定发动机的到寿时间,在保证飞行安全的同时,避免人力物力的浪费<sup>[7]</sup>。

## 2 在翼寿命预测

(1) 各分测

评值的计算。

运用指标层中的各个因子的权值来计算相对应的准则层中的状态的分测

评值,运用插值计算的方法,故障分测评值的计算模型如下:

$$C_g = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} Q_i^2}{\sum_{i=1}^{n=3} Q_i}, \quad (1)$$

式中,  $C_g$  为故障分测评值,  $Q_1$  为孔探

权值,  $Q_2$  为滑耗权值,  $Q_3$  为振动权值。

同理利用模型公式(1)可求得时间分测评值  $C_s$ , 性能分测评值  $C_x$ , 性, 初始分测评值  $C_c$ 。

(2) 各分测评值预测寿命。

利用故障分测评值预测寿命公式如下:

$$D_g = D_d + \frac{5000 \times (1 - C_g)}{93.5} \times 30, \quad (2)$$

式中,  $D_d$  为发动机数据采集的日期,  $D_g$  为故障分测评值预测后的到寿日期(日历日), 5000 为发动机软时限值, 93.5 为发动机月利用率, 30 为每个月按 30 天计算。

同理利用公式(2)可求得时间分测评值预测的到寿日期  $D_s$ , 性能分测评值预测的到寿日期  $D_x$  和初始分测评值预测的到寿日期  $D_c$ 。

(3) 在翼寿命计算。

当用 4 个分测评值预测出相应的到寿日期后, 发动机的在翼寿命  $D$  就可以得出了, 它是上述 4 个分测评值预测寿命中的最小值, 即为:

$$D = \text{Min}\{D_g, D_s, D_x, D_c\}。 \quad (3)$$

## 应用实例计算与分析

以中国国际航空公司 B777-200 飞机机队现有的 20 台 PW4077D 发动机为例来说明发动机在翼寿命预测方法的应用与实现。数据采集时间为 2006 年 5 月 15 日。首先运用

公式(1)计算出 4 个分测评值, 每台发动机对应的分测评值如图 3 所示; 然后运用公式(2)计算出 4 个分测评值对应的到寿日期, 如图 4 所示。

序号为 P222147 发动机的 4 个分测评值均为机队中最大的, 说明此发动机整体状况最差, 衰退最严重, 从而导致其在翼寿命变小。此外, 序号为 P222076 发动机的 4 个分测评值在机队中也比较大, 说明此发动机整体状况也比较差, 衰退也比较严重, 从而导致其在翼寿命变小。

从图 4 中可以看出, 在翼寿命最

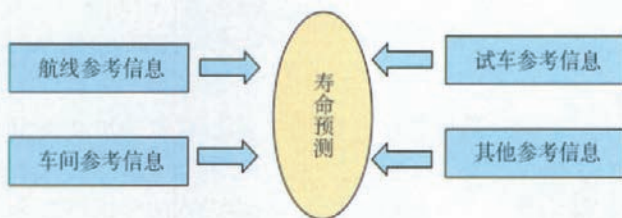


图1 发动机寿命预测数据来源

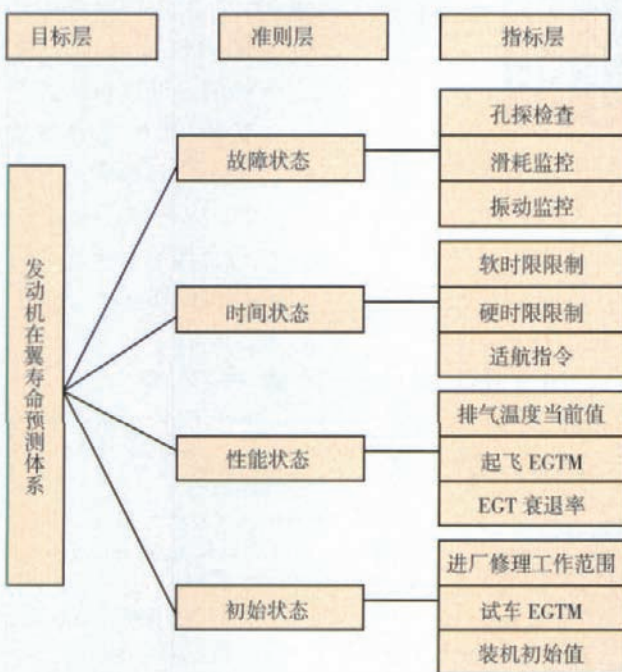


图2 发动机在翼寿命预测指标体系

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

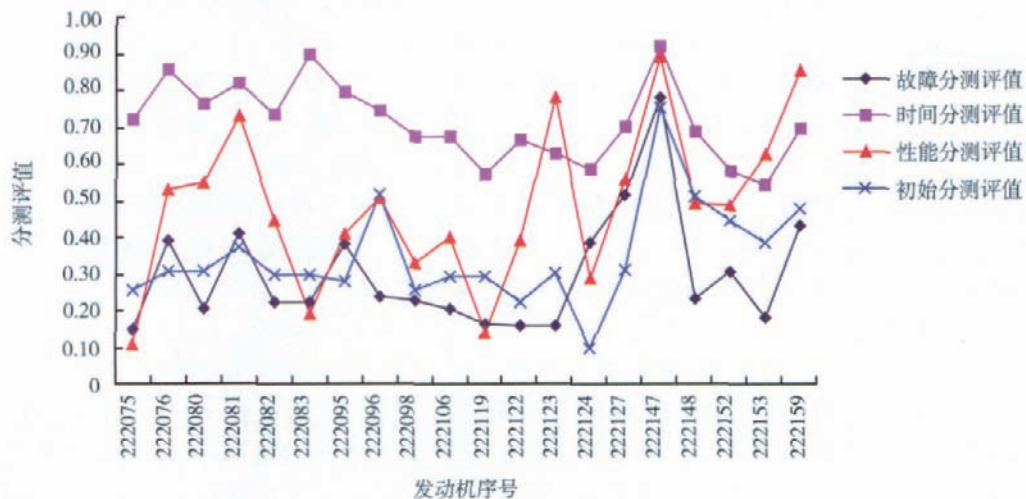


图3 各分测评估折线图

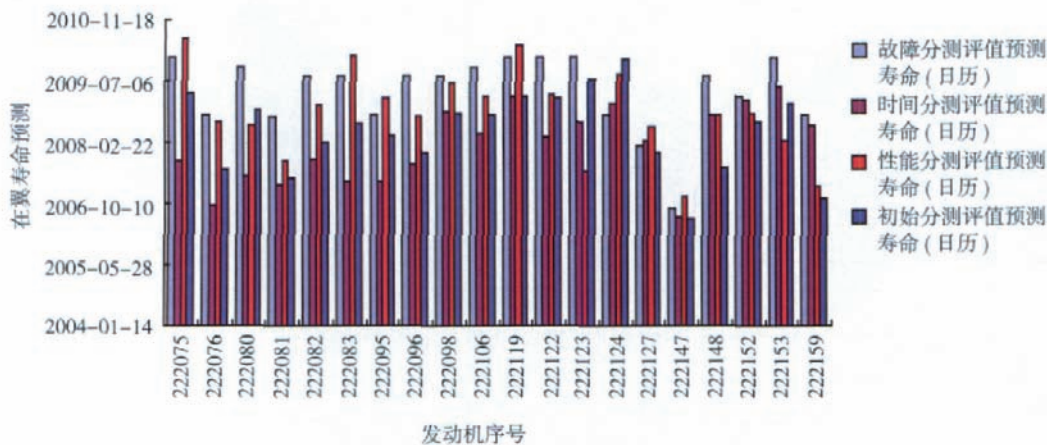


图4 各分测评估预测的发动机在翼寿命

小的是序号为 P222147 的发动机，决定其到寿日期的是 4 个分测评估预测寿命中最小的那个：初始分测评估值预测的寿命 (2006-06-12)。此时应将工作重点放到对此台发动机的检查和监控上，由于到寿日期是由初始分测评估值预测的结果决定的，应重点检查由初始状态对应的指标层中的 3 个因素 (进厂修理工作范围、试车 EGT<sub>M</sub>、装机初始值)。序号为 P222076 的发动机在翼寿命也比较小，决定它到寿日期的是 4 个分测评估值预测寿命中最小的那个：时间分测评估值预测的寿命 (2006-09-20)。此时也应重点对此台发动机进行检查和监控，由于到寿日期是由时间分测评估值预测的结果决定的，应重点检查由时间状态对应的指标层中的 3

个因素 (软时限限制、硬时限限制、适航指令)。对预测得到的在翼寿命比较小的发动机，应制定相应维修方案，并在必要时拆换发动机，保证机队正常的运行。

通过上述分析，工程师制定了换发计划，序号为 P222147 的发动机于 2006 年 6 月 17 日进行了下发修理，通过分析发现上次进厂修理工作范围过小是导致它下发的直接原因，与预测的下发日期相差 5 天。

序号为 P222076 的发动机则于 2006 年 10 月 3 日进行了下发修理，通过分析发现软时限到限是导致它下发的直接原因，与预测的下发日期相差 13 天。上述 2 台发动机的下发分析进一步验证了此方法的准确性和实用性。

同样可以逐一分析机队其他发动机的状况，由此完成了对该机队发动机的在翼寿命预测，并找出其影响因素，及时制定拆发和维修计划。

## 结束语

运用层次分析法将影响发动机寿命的因素分为 4 个方面 (故障信息、时间信息、性能信息和初始信息)，计算了各个分测评估值然后对发动机在翼寿命进行预测，结果表明该方法考虑因素全面，预测结果准确。

采用层次分析法可以纵向地对同型号的发动机机队进行比较，找出在翼寿命最小的和最大的发动机，从而便于航空公司合理地安排发动机梯次计划。

## 参考文献

- [1] Irem Y, Anupa B. A survey of aircraft engine health monitoring systems. AIAA,1999, 24(12): 2528-2532.
- [2] Sylvain L, Fazel F. Data mining to predict aircraft component replacement. IEEE,1999,18(6):1094-1100.
- [3] 邱档. 多指标综合评价方法的系统分析. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [4] 张维全. 层次分析法与模糊理论在科研成果评价中的应用. 宁夏大学学报, 2002, 23(3): 230-233.
- [5] 高扬, 牟德一. 航空安全评估中的层次分析法 -AHP. 中国民航大学学报, 2000, 10(3): 38-41.
- [6] 吕永波, 胡天军, 雷黎. 系统工程. 北京: 北方交通大学出版社, 2003.
- [7] 王帅, 许春生. 发动机机队状态排序技术. 航空维修与工程, 2004, 22(2): 33-35.

(责编 良辰)