

基于寿命件的民航发动机送修目标 确定方法

付旭云¹, 陈 银², 钟诗胜²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 机械工程系, 山东 威海 264209;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了科学合理地制定维修工作范围, 提出了一种面向全寿命周期的基于寿命件的民航发动机送修目标确定方法. 首先以全寿命周期内送修次数最少、寿命件总成本最低、目标在翼总循环最长为优化目标, 建立了多目标优化模型; 在分析各优化目标的基础上, 提出了一种基于分步求解策略的模型求解方法; 最后, 采用某航空公司一台航发动机的实际数据对提出的送修目标确定方法进行了验证. 结果表明提出的方法能够基于妥协系数和各优化目标权重实现全寿命周期内送修次数和寿命件总成本的平衡, 能够为发动机送修目标的确定提供决策支持, 避免了送修目标确定的随意性.

关 键 词: 民航发动机; 维修工作范围; 送修目标; 寿命件; 全寿命周期

中图分类号: V231.9; TH17

文献标志码: A

Approach for civil aero-engine repair objective determination based on life limited parts

FU Xu-yun¹, CHEN Yin², ZHONG Shi-sheng²

(1. Department of Mechanical Engineering,
Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai Shandong 264209, China;

2. School of Mechatronics Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To make a scientific and reasonable maintenance workscope, an approach for civil aero-engine repair objective determination oriented towards the life cycle based on life limited parts was proposed. At first, a multi-objective optimization model was established to minimize shop visit times and total life limited parts cost, and maximize total objective time on wing in the life cycle. On the basis of the analysis of every optimization objective, a solution based on the step-by-step strategy was put forward. Finally, the approach for repair objective determination was validated by the actual data of a civil aero-engine from an airline. Validation results show that the proposed approach can achieve a balance between shop visit times and total life limited parts cost in the life cycle, based on a compromise coefficient and every weight of optimization objectives. The approach can provide decision support for aero-engine repair objective determination and avoid the randomness of making repair objective.

Key words: civil aero-engine; maintenance workscope; repair objective;
life limited parts; life cycle

收稿日期: 2013-04-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA040911); 民航科技项目(MHRD201122)

作者简介: 付旭云(1981—), 男, 山西忻州人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机全寿命数据管理、状态监控、故障诊断及维修决策支持研究.

民航发动机维修费用高昂. 一般情况下, 发动机的维修成本约占飞机直接维修成本的 55%^[1]. 以 PW4000 发动机为例, 平均每次送修费用就可达到约 150 万美元. 发动机维修工作范围直接影响着发动机的维修成本以及修后性能. 如何制定合理的发动机维修工作范围, 是航空公司面临的一个重要问题.

在制定发动机维修工作范围时, 航空公司往往会参考发动机制造厂家提供的工作范围计划指导文件(workscape planning guide, WPG). WPG 对发动机各单元体维修级别的制定都有详细说明, 但并未考虑各航空公司的机队实际运营情况. 因此, 在具体制定维修工作范围时, 还需借助于发动机工程师的经验^[2]. 该项工作往往需要耗费大量的时间和精力^[3]. 为了对维修工作范围制定提供决策支持, 国内外研究学者做了大量工作, 主要研究方法有: ①基于遍历的发动机维修工作范围优化方法^[4-6]. 该类研究存在的主要问题是需要遍历所有的发动机维修工作范围方案, 需要花费大量时间才能完成优化工作, 因而在实际应用中存在一定的不适应性. ②基于规则的发动机维修工作范围优化^[7-9]. 该类研究存在的主要问题是发动机维修工作范围的合理性取决于建立的规则库, 当发动机送修样本较少时, 往往难以建立有效的规则库. ③基于模型的发动机维修工作范围优化. 这类研究将发动机维修工作范围优化问题抽象为一个函数优化问题, 通过对模型的求解获得发动机维修工作范围^[10-11]. 送修目标是发动机维修工作范围制定的依据. 因此, 文献[12]提出了送修目标导向的发动机维修工作范围决策方法, 并成功应用于某航空公司的维修工程管理中. 但该方法中的送修目标由工程师主观确定, 影响了模型的应用效果.

为了提高送修目标导向的发动机维修工作范围决策方法的应用效果, 本文提出了一种面向全寿命周期的基于寿命件的发动机送修目标确定方法. 首先建立了基于寿命件的发动机送修目标多目标优化模型, 然后对模型的求解方法进行了研究, 最后采用一台发动机的实际数据对提出方法进行了验证, 证明了提出方法的有效性.

1 问题描述

寿命件是指有使用循环限制, 并且其故障可能危及飞行安全的零部件. 在某次送修时, 寿命件如果满足式(1), 则必须进行更换.

$$C_j + C_g > C_{\text{lim},j} \quad (1)$$

式中 j 表示寿命件编号, C_j 表示寿命件已使用的总循环; $C_{\text{lim},j}$ 表示寿命件的限制循环, 其值由发动机制造厂家给定; C_g 表示目标在翼循环, 具体为本次送修后到下次送修时能服役的总循环次数, 也就是本次的送修目标.

寿命件价格昂贵, 且寿命件到寿是发动机送修最常见的原因之一. 发动机具有多个寿命件, 各寿命件的限制循环往往不一致. 送修目标越小, 会引起全寿命周期内送修次数的增加, 进而引起发动机全寿命周期内维修成本的增加; 送修目标越大, 则更换的寿命件数量越多, 由此造成的寿命件浪费就越大. 如何确定合理的送修目标, 在全寿命周期内送修次数和寿命件总成本之间取得平衡, 是本文研究的主要问题.

发动机送修间隔取决于多种因素, 如寿命件到寿、性能衰退、部件损伤、偶发故障、适航指令/服务通告要求等. 对于每一种机型, 发动机送修间隔存在一个范围. 根据历史送修数据, 可以确定一个最小送修间隔和最大送修间隔. 合理的送修目标应该处于最小送修间隔与最大送修间隔之间.

综上, 可以将面向全寿命周期基于寿命件的送修目标优化问题描述为: 对发动机全寿命周期内的送修进行规划, 确定送修次数以及各次送修对应的送修目标. 约束条件是全寿命周期内任一个寿命件的使用总循环均不能超过限制循环, 各次送修对应的送修目标在最小送修间隔与最大送修间隔之间, 各次送修对应的送修目标之和不小于发动机全寿命周期内能使用的总循环. 主要优化目标是全寿命周期内送修次数最少和寿命件总成本最低. 为了优化方便, 增加一个次要目标, 即目标在翼总循环最大.

可以看出, 面向全寿命周期基于寿命件的送修目标优化问题具有如下特点:

1) 决策变量数量不确定. 决策变量的数量取决于送修次数. 如果发动机全寿命周期内送修次数为 m , 则决策变量数量为 $m+1$.

2) 多目标. 各个优化目标之间相互制约且存在着矛盾, 难以找到各个优化目标同时达到最优的“绝对”最优解.

2 数学模型

为了建立面向全寿命周期的基于寿命件的送修目标优化模型, 在此假设: 在全寿命周期内, 发动机各寿命件均在同一推力下工作, 每次更换的

寿命件均为新件,且寿命件限制循环、价格均保持不变。

为了便于模型表达,下面给出寿命件更换函数和使用总循环函数的定义。

定义1 将判断某次送修时寿命件是否更换的函数称作寿命件更换函数,如式(2)所示。

$$r_{i,j} = \begin{cases} 0 & C_{i,j} + C_g^i \leq C_{\lim,j} \\ 1 & C_{i,j} + C_g^i > C_{\lim,j} \end{cases} \quad (2)$$

式中 i 表示发动机送修次序, $i \in \{i | 1 \leq i \leq m, \text{且 } i \in \mathbf{N}^+\}$, m 表示发动机全寿命周期内送修次数; $j \in \{j | 1 \leq j \leq n, \text{且 } j \in \mathbf{N}^+\}$, n 表示发动机包含的寿命件总数; $r_{i,j}$ 表示第 i 次送修时第 j 个寿命件是否发生更换,当 $r_{i,j} = 0$ 时,表示不需更换;当 $r_{i,j} = 1$ 时,表示需要进行更换; $C_{i,j}$ 表示第 i 次送修时第 j 个寿命件的使用总循环; C_g^i 表示第 i 次送修时的目标在翼循环。

定义2 将计算某次送修时寿命件的使用总循环的函数称作寿命件使用总循环函数,如式(3)所示。

$$C_{i,j} = \begin{cases} C_{1,j} & i = 1 \\ (1 - r_{i-1,j})(C_{i-1,j} + C_g^{i-1}) & i > 1 \end{cases} \quad (3)$$

由问题描述,并基于寿命件更换函数和使用总循环函数,建立优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min f_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot p_j \\ \max f_3 &= \sum_{i=1}^m C_g^i \\ \text{s. t. } &\begin{cases} C_{i,j} \leq C_{\lim,j} \\ C_{\text{ri,min}} \leq C_g^i \leq C_{\text{ri,max}} \\ \sum_{i=1}^m C_g^i \geq L \\ m \in \mathbf{N}^+ \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 f_2 表示发动机全寿命周期内寿命件总成本; f_3 表示发动机全寿命周期内目标在翼总循环; p_j 表示第 j 个寿命件的价格; $C_{\text{ri,min}}$ 表示发动机最小送修间隔,其值可以通过送修历史统计确定或者根据经验确定; $C_{\text{ri,max}}$ 表示发动机最大送修间隔,其值确定方法同 $C_{\text{ri,min}}$; L 表示发动机全寿命周期内能使用的总循环。

3 模型求解

求解多目标优化问题的常用方法有:主要目标法、线性加权和法、平方和加权法、理想点法、功

效系数法、分层序列法^[13]等。为了找到适合于建立的送修目标优化模型的求解方法,首先对模型的优化目标进行分析。

优化目标1 发动机全寿命周期内送修次数 m 最少。该目标是一个主要目标,同时也是决策变量之一。根据优化目标2和优化目标3,可以看出, m 的取值范围可以由式(5)确定,其局限在一个比较小的范围内。比如,当发动机全寿命周期内能使用的总循环 L 为80000次,最小送修间隔 $C_{\text{ri,min}}$ 为6000次,最大送修间隔 $C_{\text{ri,max}}$ 为12000次时, m 的取值为7~13之间的正整数,共有7个值。

$$\frac{L}{C_{\text{ri,max}}} \leq m \leq \frac{L}{C_{\text{ri,min}}} \quad (5)$$

优化目标2 发动机全寿命周期内寿命件总成本 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot p_j$ 最低。该目标是一个主要目标。对于每组可行解,该目标值需要根据式(3)和式(2)递推计算得到。

优化目标3 目标在翼总循环 $\sum_{i=1}^m C_g^i$ 最大。该目标是一个次要目标。

综上,考虑到 m 取值范围较小,可以对该决策变量采取遍历的策略;对于优化目标2和优化目标3,采用线性加权和法将其转化为单个目标。具体地,采用如下的分步求解策略对优化模型进行求解:

步骤1 根据式(5)确定 m 的取值范围。

步骤2 对 m 进行遍历。对于 m 的每一个取值,优化模型就转化为如式(6)所示的模型了。该模型的决策变量是发动机全寿命周期内各次送修对应的送修目标。

$$\begin{aligned} \min f_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot p_j \\ \max f_3 &= \sum_{i=1}^m C_g^i \\ \text{s. t. } &\begin{cases} C_{i,j} \leq C_{\lim,j} \\ C_{\text{ri,min}} \leq C_g^i \leq C_{\text{ri,max}} \\ \sum_{i=1}^m C_g^i \geq L \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

步骤3 采用线性加权和法将式(6)所示的模型转化为单目标优化模型,如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \min f &= f_2 - \alpha f_3 = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot p_j - \alpha \cdot \sum_{i=1}^m C_g^i \end{aligned}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} C_{i,j} \leq C_{\text{lim},j} \\ C_{\text{ri},\min} \leq C_{\text{g}}^i \leq C_{\text{ri},\max} \\ \sum_{i=1}^m C_{\text{g}}^i \geq L \end{cases} \quad (7)$$

式中 α 是一个非负数,表示优化目标 3 的妥协系数,根据优化目标 3 的重要程度进行取值.优化目标 3 越重要, α 取值越大.

步骤 4 对式(7)所示的模型进行求解.考虑到该模型的复杂性,采用粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法进行求解^[14-15].适应度函数的计算需借助于式(2)和式(3).

m 遍历完后,就获得了优化模型的多个方案.

步骤 5 对多个方案进行评估,根据评估结果选择优化模型的最终方案.方案评估属于多属性决策问题,可以采用简单加权法进行评估.

4 应用验证

以某航空公司一台 CFM56-5B 发动机对提

出的送修目标确定方法进行验证.

假设 CFM56-5B 发动机全寿命周期内能使用的总循环 L 为 80 000 次,最小送修间隔 $C_{\text{ri},\min}$ 为 6 000 次,最大送修间隔 $C_{\text{ri},\max}$ 为 12 000 次.进行验证的发动机序号为 **9288. 该民航发动机于 2005 年 7 月 13 日送修时,自新总循环(cycle since new,CSN)为 13 843 次,由假设可知该发动机还能使用 66 157 次.该民航发动机送修时的寿命件清单如表 1 所示.

首先确定送修次数的取值范围.**9288 发动机在剩余寿命期内的最小送修次数 $m_{\min}$ 为 $66\,157/12\,000 \approx 6$ 次,最大送修次数 $m_{\max}$ 为 $66\,157/6\,000 \approx 11$ 次.

其次对 m 进行遍历.采用粒子群优化算法对式(7)进行求解.式(7)中的妥协系数 $\alpha=1.0$.粒子群优化算法的群体大小 $K=20$,学习因子 $c_1=2$, $c_2=2$,最大迭代次数 $T=4\,000$.表 2 为求解结果.

表 1 **9288 民航发动机送修时寿命件清单
Table 1 List of life-limited parts of repairing **9288 civil aero-engine

寿命件件号	寿命件名称	限制循环/次	已使用总循环/次	剩余循环/次	价格/美元
338-001-504-0	风扇盘	30 000	28 717	1 283	152 200
338-001-906-0	增压机转子	30 000	7 326	22 674	221 700
338-010-601-0	风扇轴	30 000	7 326	22 674	110 200
2116M25P01	后空气密封	20 000	19 927	73	48320
1386M56P03	输入轴	20 000	19 927	73	79 880
1558M31G07	高压压气机 1~2 级转子	20 000	19 927	73	114 000
2048M20G03	高压压气机 4~9 级转子	20 000	9 252	10 748	254 500
2116M23P01	高压压气机 3 级盘	20 000	19 927	73	35 360
1498M43P07	高压涡轮盘	20 000	9 252	10 748	212 500
2116M20P02	前空气密封	20 000	19 717	283	192 100
1864M90P04	后轴	20 000	9 252	10 748	67 900
2048M21P03	前轴	20 000	10 727	9 273	91 920
338-171-707-0	涡轮后内框架	20 000	15 727	4 273	288 900
338-117-407-0	低压涡轮机匣	20 000	14 927	5 073	156 700
338-077-502-0	锥形支持	25 000	10 727	14 273	104 600
336-002-006-0	低压涡轮 3 级盘	25 000	10 727	14 273	88 410
336-002-105-0	低压涡轮 4 级盘	25 000	19 927	5 073	78 600
336-001-909-0	低压涡轮 2 级盘	25 000	23 717	1 283	89 960
336-001-804-0	低压涡轮 1 级盘	25 000	10 727	14 273	77 610
338-010-005-0	低压涡轮轴	25 000	10 727	14 273	159 400

表 2 优化模型的求解结果

Table 2 Solution results of optimization model

方案	各次送修的目标在翼循环/次	m /次	f_2 /美元	f_3 /次
1	7910, 11907, 11680, 11812, 11790, 11614	6	10626540	66713
2	9953, 11084, 7666, 8419, 10705, 9482, 9957	7	8718120	67266
3	6955, 7096, 9285, 6551, 10063, 8243, 7979, 10564	8	9084460	66736
4	7580, 6526, 8127, 8008, 11226, 10135, 9620, 7533, 10552	9	10598300	79307
5	6488, 6035, 6168, 11937, 6561, 9019, 6406, 6153, 6784, 8001	10	10795100	73552
6	9677, 6028, 7131, 8192, 7197, 7157, 8345, 8221, 8266, 7512, 6370	11	12716400	84096

最后,采用简单加权法对表 2 中的 6 个方案进行评估.优化目标 m_1, f_2, f_3 各权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为 0.45, 0.45, 0.10, 评分准则分别为式(8)~式(10).

$$x_{1,i} = \frac{m_{\max} - m_i}{m_{\max} - m_{\min}} \quad (8)$$

$$x_{2,i} = \frac{f_{2,\max} - f_{2,i}}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} \quad (9)$$

$$x_{3,i} = \frac{f_{3,i} - f_{3,\min}}{f_{3,\max} - f_{3,\min}} \quad (10)$$

式中 $x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i}$ 分别表示第 i 个方案各优化目标的得分, $m_{1,\min}, f_{2,\min}, f_{3,\min}$ 分别表示所有方案中各优化目标的最小值, $m_{1,\max}, f_{2,\max}, f_{3,\max}$ 分别表示所有方案中各优化目标的最大值, $m_{1,i}, f_{2,i}, f_{3,i}$ 分别表示第 i 个方案各优化目标的值.

根据评分准则对各方案的优化目标进行评分后,再按下式计算各方案的总分,如表 3 所示.

$$A_i = \sum_{j=1}^3 \omega_j \cdot x_{j,i} \quad (11)$$

表 3 评分结果

Table 3 Evaluation results

方案	各优化目标得分			总分
	优化目标 1	优化目标 2	优化目标 3	
1	1.0	0.5227	0	0.6852
2	0.8	1.0000	0.0318	0.8132
3	0.6	0.9084	0.0013	0.6789
4	0.4	0.5298	0.7245	0.4909
5	0.2	0.4805	0.3934	0.3456
6	0	0	1.0000	0.1000

从表 2 和表 3 可以看出,总分最高的是方案 2,因此,选择方案 2 作为最终方案.方案 2 的送修次数为 7 次,本次送修目标在翼循环为 9953 次,

全寿命周期内寿命件总成本约为 871 万美元.根据表 1,本次送修需要更换的寿命件为 338-001-504-0, 2116M25P01, 1386M56P03, 1558M31G07, 2116M23P01, 2116M20P02, 2048M21P03, 338-171-707-0, 338-117-407-0, 336-002-105-0, 336-001-909-0, 共 11 个寿命件.实际送修时更换的寿命件除上述 11 个件外,还包括了 1498M43P07. 这是因为发动机工程师在确定更换的寿命件清单时,还会综合考虑寿命件旧件的再次利用.可以看出,本文确定的目标在翼循环与发动机工程师确定的目标在翼循环基本一致,能够为发动机送修目标确定提供决策支持.

5 结 论

为了对发动机维修工作范围制定提供决策支持,建立了面向全寿命周期的基于寿命件的送修目标优化模型,并提出了模型的求解策略.

以某航空公司一台 CFM56-5B 发动机的实际数据对提出方法进行了验证.验证结果表明:提出方法能够在减少全寿命周期内送修次数的同时降低寿命件总成本,实现送修次数和寿命件总成本的平衡,为发动机送修目标的确定提供决策支持,避免了送修目标确定的随意性.

航空公司在实际制定送修目标时,除考虑寿命件因素外,还会考虑性能衰退、重要件报废、退租条件等因素.如何综合各方面因素,面向全寿命周期确定合理的发动机送修目标是一个研究方向.

参考文献:

- [1] 冉隆吉. 飞机维修成本标准化控制初探[J]. 航空维修与工程, 2009(6):44-45.
RAN Longji. A probe into maintenance cost solution on a standardized basis[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2009(6):44-45. (in Chinese)

- [2] 付旭云. 机队航空发动机维修规划及其关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
FU Xuyun. Aeroengines in a fleet oriented maintenance programming and its key technologies[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010. (in Chinese)
- [3] Goh S, Coleman C P. Sustainment of commercial aircraft gas turbine engines: an organizational and cognitive engineering approach[R]. AIAA-2003-6816,2003.
- [4] Air Force Research Laboratory. Work scope optimization tool contributes to lower maintenance costs and higher reliability in aircraft engines[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.afsirsttr.com/Publications/Documents/Advantage2&3Q2009.pdf>.
- [5] National Center for Manufacturing Sciences. Engine workscope optimization for improved reliability and reduced fuel consumption[EB/OL]. [2013-04-20]. http://ctmaideas.ncms.org/ideas/project_detail.asp?Project_ID=181.
- [6] AerData Group. IT systems to manage and optimise engine maintenance[J]. Aircraft Commerce,2011(76):45-51.
- [7] ZHANG Haijun,ZUO Hongfu,LIANG Jian. Maintenance level decision of aero-engine based on VPRS theory[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2005,22(4):281-284.
- [8] 雍成喜. 民航发动机送修方案制定及其应用系统开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
YONG Chengxi. Research and development of civil aero engine shop visit planning system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008. (in Chinese)
- [9] 汤新民. 基于 Petri 网的航空发动机车间维修过程建模及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
TANG Xinmin. Aero-engine workshop maintenance procedure modeling based on Petri nets and its application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2007. (in Chinese)
- [10] WANG Jianrong,YU Tianbiao,WANG Wanshan. Integrating analytic hierarchy process and genetic algorithm for aircraft engine maintenance scheduling problem[C]// Advances in Intelligent and Soft Computing. Berlin:Springer-Verlag,2010:897-915.
- [11] 索海波. CFM56 发动机送修等级决策分析模型研究[D]. 四川,广汉:中国民用航空飞行学院,2012.
SUO Haibo. Analysis model studies on maintenance level decision of CFM56 engine[D]. Guanghan, Sichuan: Civil Aviation Flight University of China,2012. (in Chinese)
- [12] 付旭云,钟诗胜,丁刚. 民用航空发动机单元体送修工作范围决策[J]. 航空动力学报,2010,25(10):2195-2200.
FU Xuyun,ZHONG Shisheng,DING Gang. Civil aero-engine module workscope decision-making[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(10):2195-2200. (in Chinese)
- [13] 郭科,陈聆,魏友华. 最优化方法及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [14] 沈林成,霍霄华,牛轶峰. 离散粒子群优化算法研究现状综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(10):1986-1990.
SHEN Lincheng,HUO Xiaohua,NIU Yifeng. Survey of discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics,2008,30(10):1986-1990. (in Chinese)
- [15] 汪定伟,王俊伟,王洪峰,等. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,2007.