

文章编号: 1000-8055(2008)10-1821-08

航空发动机拆换率平滑方法研究

白 芳¹, 左洪福¹, 任淑红¹, 沈石松¹, 耿端阳²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016; 2. 山东理工大学 轻工学院, 淄博 255049)

摘 要: 结合发动机视情维修策略的特点, 建立起基于发动机剩余在翼时间预测方法的以飞机为对象的发动机群总保障成本的混合整数非线性规划模型, 并提出了一种启发式拆换率平滑方法——SSPT 算法, 并以 CF6 型发动机的使用数据为例与其它三种算法进行分析比较. 研究结果表明应用 SSPT 算法制定维修调度计划, 能够使总保障成本最低、保障率最高、平均拆换率下降, 并得到较好的拆换率平滑效果.

关 键 词: 民航发动机; 视情维修; 预测与健康状态管理; 拆换率; 调度

中图分类号: V37

文献标识码: A

Research on a smoothing method for engine removal rate

BAI Fang¹, ZUO Hong-fu¹, REN Shu-hong¹, SHEN Shi-song¹, GENG Duan-yang²

(1. Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Light Industry and Agricultural School,
Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Considering the characteristics of condition based on maintenance policy, a mixed integer nonlinear programming model for the cost of aero-engine fleet was formulated. At the same time, a new method was proposed to smooth the engine removal rate named shifted shortest procession time (SSPT) algorithm, which was compared with other three algorithms by using the data of CF6 engine as an example for the case study. The results show that the scheduling made by SSPT algorithm can gain lowest cost, highest support level, lower average removal rate and better effect of peek smoothing.

Key words: aero-engine; condition based maintenance; prognostic and health management (PHM); removal rate; scheduling

航空发动机拆换率是指由统计得到的单位时间内发动机拆换次数, 是确定备用发动机数量关键参数, 也是衡量航空公司发动机健康情况的重要指标. 均值和峰值是拆换率通常被考察的两个特征量.

目前, 大多数发动机故障预测与健康状态管理的研究都集中在状态检测、故障诊断、维修排故等方面^[1-3], 以达到提高发动机安全性、延长发动机在翼使用时间、降低拆换率均值、节约维修成本的目的. 少数文献研究发动机的拆换率峰值平滑

收稿日期: 2007-09-28; 修订日期: 2008-01-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助项目 (60672164); 国家“863”高技术研究发展计划项目 (2006AA04Z427)

作者简介: 白芳 (1979 -), 女, 辽宁义县人, 博士生, 研究方向: 航空发动机维修管理与调度计划.

Tel: 13951970205, 025-84895772-803, E-mail: baifang1126@163.com

左洪福 (1959 -), 男, 湖南茶陵人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 发动机故障检测等.

Tel: 025-84891098, E-mail: rms@nuaa.edu.cn

问题,文献[4]采用专家经验方法定性地描述了发动机群拆换率不均衡问题,研究指出该问题是引发高维修成本的一个关键因素,但没有给出具体可操作性的方法,在实践中难以实施。

本文结合发动机视情维修策略的特点,建立起基于发动机剩余在翼时间预测方法的以飞机为对象的发动机群总保障成本(以下简称总保障成本)数学模型,在此基础上研究拆换率平滑方法。

1 发动机群总保障成本的数学建模

1.1 基本假设:

- 1) 航空发动机维修使用视情维修策略;
- 2) 在视情维修策略下基于航空发动机状态监控技术,可以实现在翼剩余时间的预测^[5];
- 3) 各个发动机之间是独立的,一台故障不影响另一台的在翼时间;
- 4) 缺少发动机时,随时可以租赁到发动机。

1.2 符号说明

C_{leet} ——发动机群总保障成本;
 C_{own} ——发动机群的总拥有成本;
 C_{m} ——发动机群的送修成本;
 C_{reml} ——发动机总拆装费用;
 C_{ost} ——发动机因提前下发引起的在翼使用时间损失成本;
 C_{add} ——通过水洗等手段可以增加发动机的在翼时间,维护附加费用;
 C_{rent} ——缺少发动机备件(简称缺发)情况下,租赁发动机的费用;
 N ——发动机群拥有的发动机总台数;
 Q ——计划期长度;
 C_{FH} ——发动机单位飞行小时拥有成本;
 M ——飞机机队安装发动机机位总数;
 N_{spare} ——机队拥有的备用发动机数量;
 C_{buy} ——发动机购买费用;
 L_{e} ——发动机经济寿命;
 M' ——飞机机队规模;
 N_{match} ——该型号飞机按照装配要求需要装配的发动机数量;
 G ——航空公司与发动机修理厂商合同签订的成本;
 E ——发动机集合, $E = \{1, 2, \dots, N\}$;
 k ——发动机号, $\forall k \in E$;
 V_k ——第 k 台发动机在 Q 计划期内最大送修次数;

l ——第 k 台发动机的送修次数, $l = 0, 1, 2, \dots, V_k$;
 γ_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修费用;
 B ——拆换一次发动机的费用,主要是人工时费;
 H_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后的最大梯次使用次数;
 η_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后提前下发的单位时间损失成本,与下发原因和维修工作范围相关;
 α_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后最大可提前下发的时间段;
 D ——水洗一次的费用;
 β_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后水洗次数, $\{\beta_k^l | 0 \leq \beta_k^l \leq 3 \text{ 且 } \beta_k^l \in \mathbb{Z}\}$;
 Z ——租用发动机的日租金;
 Z^T ——租用发动机的运输费用;
 A_{ij} ——第 i 个机位上第 j 次安排发动机前出现的缺发时间;
 I ——飞机机位集合, $I = \{1, 2, \dots, M\}$;
 i ——飞机机位号, $\forall i \in I$;
 U_i ——在计划期 Q 内第 i 个机位上安排发动机的最大次数;
 j ——机位 i 上安装发动机次数, $j = 1, 2, \dots, U_i$;
 h ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后的梯次使用次数, $h = 0, 1, 2, \dots, H_k^l$;
 $X_{i,j,k}^{l,h} = \begin{cases} 1, & \text{如果在第 } i \text{ 个机位第 } j \text{ 次安排} \\ & \text{发动机时,选用第 } k \text{ 台发动机第 } l \\ & \text{次送修返回后的第 } h \text{ 次梯次在翼} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$
 $S_{i,j,k}^{l,h}$ ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后第 h 次梯次使用,在第 i 个机位上第 j 次安装的在翼开始时刻;
 $F_{i,j,k}^{l,h}$ ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后第 h 次梯次使用,在第 i 个机位上第 j 次安装的在翼结束时刻,即下发时刻;
 $W_{i,j,k}^{l,h}$ ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后,在第 i 个机位上第 j 次安装的第 h 次梯次使用在翼时间;
 P_k^l ——第 k 台发动机第 l 次送修返回后的许用在翼时间,根据送修返回和使用过程中的状态参数可实现剩余在翼时间预测^[5];
 P' ——水洗一次增加的在翼时间,假设为常数;

y_i ——寿命转化系数,与发动机被安装的飞机的航段比、日用率相关;

$r_k^{l,h}$ ——第 k 台发动机第 l 次送修返回第 h 梯次使用时的就绪时刻;

T_k^l ——第 k 台发动机第 l 次维修的维修时间,等于拆换、大修、运输和海关停留时间之和,在送修时间不可知的情况下可选取送修平均时间 T 作为输入参数,国外大修的总时间约为 45 d,国内送修时间约为 60~90 d;

λ ——为该次生成的维修计划的发动机备件保障率;

λ_0 ——发动机备件保障率要求的门槛值。

1.3 总保障成本的构成及数学建模

以飞机为对象的航空发动机群总保障成本是指在一定时间内为保证规模为 N 架飞机机队正常运营所需要的全部费用,包括:发动机拥有成本、送修成本、发动机拆装费用、维护附加费用、发动机因提前下发引起的在翼使用时间损失成本和因为缺少发动机时的租赁损失成本。

根据发动机群总保障成本的构成,可以建立

$$\begin{cases} W_{i,j,k}^{l,h} \in [0, P_k^l], h = 0; \\ W_{i,j,k}^{l,h} \in \left[0, P_k^l - \sum_{a=0}^{h-1} W_{i,j,k}^{l,a} \right], 1 \leq h < H_k^l; \\ W_{i,j,k}^{l,h} \in \left[P_k^l - \alpha_k - \sum_{a=0}^{h-1} W_{i,j,k}^{l,a}, P_k^l + \beta_k P_k^l - \sum_{a=0}^{h-1} W_{i,j,k}^{l,a} \right], h = H_k^l; \end{cases} \quad (9)$$

$$C_{\text{rent}} = Z \left[\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} A_{ij} + \Delta_i \right] + Z^T h = Z \left[\sum_{i=1}^U \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} X_{i,1,k}^{l,h} S_{i,1,k}^{l,h} + \sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} (X_{i,j+1,k}^{l,h} F_{i,j+1,k}^{l,h} - X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h}) + \sum_{i=1}^U \Delta_i \right] + Z^T h \quad (10)$$

其中

$$\Delta_i = \begin{cases} 0, & \text{当 } \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} X_{i,1,k}^{l,h} F_{i,1,k}^{l,h} \geq Q \\ \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} (Q - X_{i,1,k}^{l,h} F_{i,1,k}^{l,h}), & \text{否则} \end{cases}$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3$$

$$h_1 = \sum_{i=1}^U \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} X_{i,1,k}^{l,h}, \text{当 } S_{i,1,k}^{l,h} \neq 0 \text{ 时};$$

$$h_2 = \sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} X_{i,j+1,k}^{l,h},$$

$$\text{当 } X_{i,j+1,k}^{l,h} F_{i,j+1,k}^{l,h} - X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h} \neq 0;$$

$$h_3 = \sum_{i=1}^U \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} X_{i,1,k}^{l,h},$$

$$\text{当 } Q - X_{i,1,k}^{l,h} F_{i,1,k}^{l,h} < 0 \text{ 时}.$$

优化函数为如下:

$$\min C_{\text{fleet}} = \min \{ C_{\text{own}} + C_M + C_{\text{rent}} + C_{\text{ost}} + C_{\text{add}} + C_{\text{rent}} \} \quad (1)$$

其中

$$C_{\text{own}} = N Q C_{\text{FH}} = \frac{(M + N_{\text{spar}}) Q C_{\text{buy}}}{L_e} = \frac{(M N_{\text{match}} + N_{\text{spar}}) Q C_{\text{buy}}}{L_e} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{CQ}{365} \quad (3)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} \gamma_k^l \quad (4)$$

$$C_{\text{rent}} = B \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} (H_k^l + 1) \quad (5)$$

$$C_{\text{ost}} = \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} \eta_k^l \alpha_k^l \quad (6)$$

$$C_{\text{add}} = D \sum_{k=1}^{V_k} \sum_{l=1}^{H_k^l} \beta_k^l \quad (7)$$

$$W_{i,j,k}^{l,h} \in [P_k^l - \alpha_k^l, P_k^l + \beta_k^l P_k^l],$$

$$h \in \{0, 1, 2, \dots, H_k^l\} = \{0\} \quad (8)$$

目标函数(1)追求航空发动机群总保障成本最低。式(2)表示发动机群的总拥有成本计算方法,与机队规模、备用发动机数量成正比。航空公司对于发动机的送修主要包括两种模式,一种是包修模式,另一种送修方式是传统模式。式(3)表示包修模式下的发动机送修成本计算方法,是维修厂商考虑飞机机型、发动机台数、发动机健康状况、发动机使用年限等综合因素,与航空公司签订的发动机送修合同,不计发动机送修次数,按年收取修理费用。式(4)表示传统送修模式下的发动机送修成本计算方法,是一种按次送修计费的方式,航空公司每次进行故障分析并评估维修等级、确定送修范围、预测修理成本,再按修理方的实际修理情况修订修理范围和成本,该维修方式的修理成本与发动机送修前状态相关。在该送修模型下,针对由于性能原因导

致的下发,单次修理成本可以用回归模型^[6]、灰色理论^[7]、神经网络方法^[8]和统计粗集模型^[9]等方法作预测,此时修理费用是发动机性能状态参数、送修间隔时间、总飞行小时和单次送修的部件拆换累计次数的函数;如果是 AD/ SB/ EO (适航指令、服务通告、工程指令)等原因导致下发送修,与相应规定的修理内容相关;如果发动机是由于 LLP (时限件)到寿,则与 LLP 费用相关;由于调度计划只做计划修理工作,因而对于 FOD (意外损伤)情况则不予考虑.式(5)表示发动机拆装费用计算方法.式(6)是发动机因提前下发引起的在翼使用时间损失成本计算方法.式(7)表示发动机维护附加费用计算公式,主要是水洗费用.式(8)当 $H_k^l = 0$ 时,即没有梯次使用的情况下, $W_{i,j,k}^{l,h}$ 的取值范围.式(9)当 $H_k^l \geq 1$ 时,使用梯次的情况下, $W_{i,j,k}^{l,h}$ 的取值范围

(见图 1).式(10)是租用发动机费用计算公式,是租赁运输费用和租赁时间长度的函数.发动机租赁费用与具体维修调度操作密切相关,根据发动机群调度计划图(图 2)和单台发动机的调度计划图(图 3)可以看出发动机对飞机机位的匹配关系以及发动机使用、维修、库存的周期特点,从而可以得到缺发的时间和租用发动机费用计算的方法.

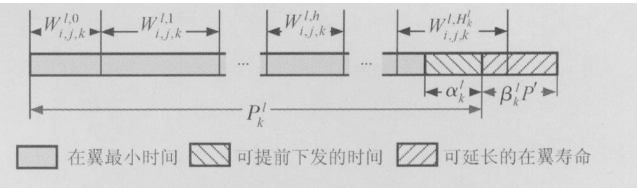


图 1 第 k 台发动机第 l 次送修返回后的梯次使用示意图
Fig. 1 Sketch map for the k -th engine usage after the l -th shop visit

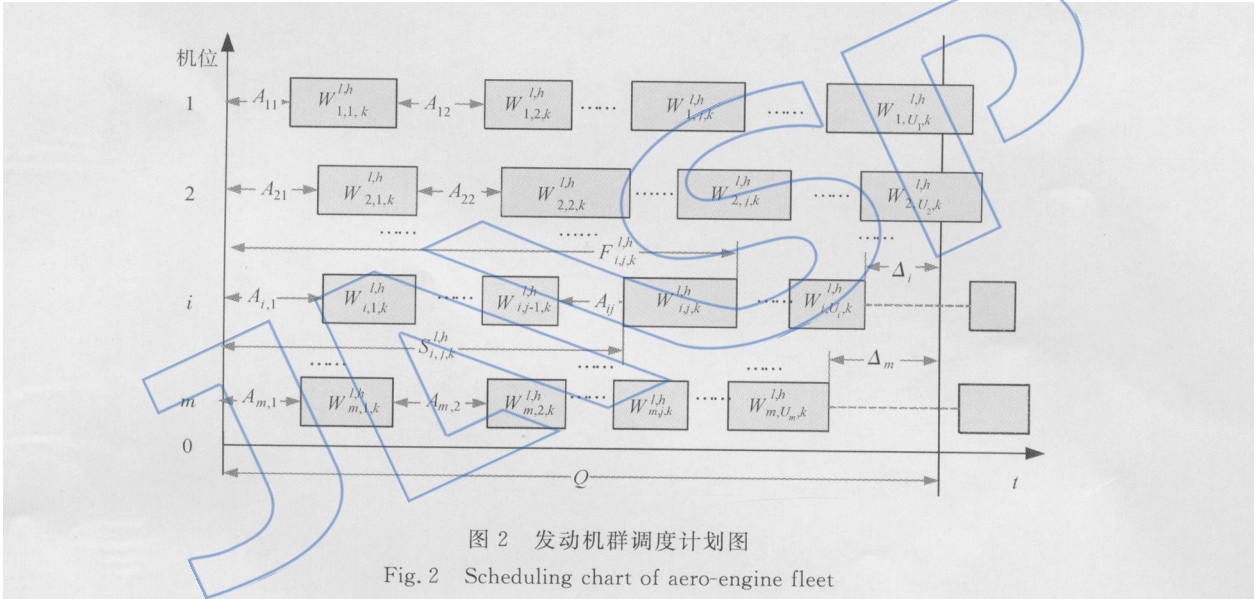


图 2 发动机群调度计划图
Fig. 2 Scheduling chart of aero-engine fleet

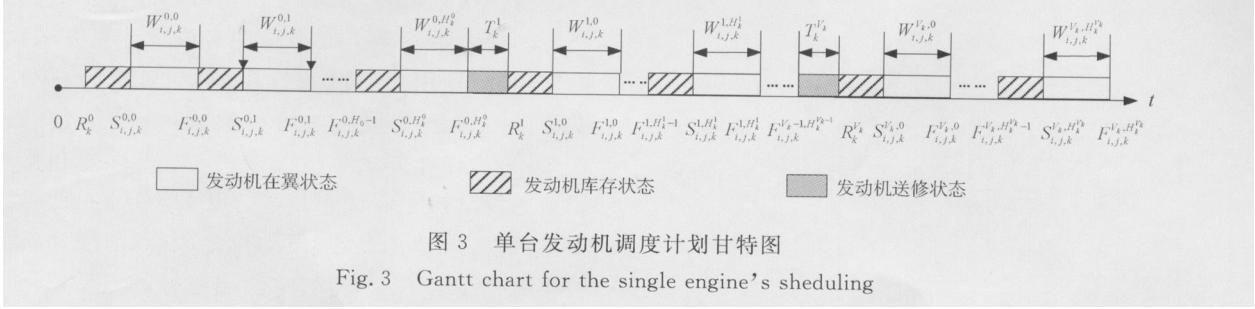


图 3 单台发动机调度计划甘特图
Fig. 3 Gantt chart for the single engine's scheduling

1.4 模型简化

航空发动机拆换率的高低直接受到发动机调度计划的影响,因此,可以从优化调度计划的角度出发平滑拆换率和降低成本.与调度计划直接相关的成本是拆换成本、租赁成本,其它成本是常数或费用金额太小可以忽略不计.所以增加以下假设条件:

- 1) 拥有成本为常量;
- 2) 发动机维修采用包修模式,此时发动机维修成本为常量;
- 3) 发动机在翼时间预测准确,并不调整的情况下,发动机寿命损失忽略不计;
- 4) 维修附加费用金额太小可以忽略不计.

假设: $f = C_{\text{fleet}} - C_{\text{own}} - C_M - C_{\text{lost}} - C_{\text{add}}$

根据以上假设,公式(1)可以简化为

$$\min f = \min\{C_{\text{rem}} + C_{\text{rent}}\} \quad (11)$$

针对发动机可重复维修使用的特点,发动机群对飞机群的调度计划的数学表示还需满足以下约束条件

$$\sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} F_{i,j,k}^{l,h} = \sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h} + \sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} W_{i,j,k}^{l,h}, \quad \forall i \in I, \forall j \in \{1, 2, \dots, U_i\} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} F_{i,j,k}^{l,h} + \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} T_k^l = r_k^{l+1,0}, \quad \forall k \in E, \forall l \in \{0, 1, 2, \dots, V_k\} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} F_{i,j,k}^{l,h} = r_k^{l,h+1}, \quad \forall k \in E, \forall l \in \{0, 1, 2, \dots, V_k\}, \forall h \in \{0, 1, 2, \dots, H_k^l - 1\} \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} r_k^{l,h} \leq \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h}, \quad \forall k \in E, \forall l \in \{0, 1, 2, \dots, V_k\}, \forall h \in \{0, 1, 2, \dots, H_k^l\} \quad (15)$$

$$\sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} F_{i,j,k}^{l,h} \leq \sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j+1,k}^{l,h} S_{i,j+1,k}^{l,h}, \quad \forall i \in I, \forall j \in \{1, 2, \dots, U_i - 1\} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} - 1 = V_k, \quad \forall k \in E \quad (17)$$

$$\sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} = U_i, \quad \forall i \in I \quad (18)$$

$$0 \leq \sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h} < Q, \quad \forall i \in I, \forall j \in \{1, 2, \dots, U_i\} \quad (19)$$

$$\sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,j,k}^{l,h} = 1, \quad \forall i \in I, \forall j \in \{1, 2, \dots, U_i\} \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} X_{i,j,k}^{l,h} \leq 1, \quad \forall k \in E, \forall l \in \{0, 1, 2, \dots, V_k\}, \forall h \in \{0, 1, 2, \dots, H_k^l\} \quad (21)$$

$$\lambda \geq \lambda_0 \quad (22)$$

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i \in I} (\sum_{j=1}^{U_i} A_{ij} + \Delta_i)}{MQ} = 1 - \frac{\sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} X_{i,1,k}^{l,h} S_{i,1,k}^{l,h} - \sum_{i \in I} \Delta_i}{MQ}$$

$$\frac{\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^{U_i} \sum_{k \in E} \sum_{l=0}^{V_k} \sum_{h=0}^{H_k^l} (X_{i,j+1,k}^{l,h} F_{i,j+1,k}^{l,h} - X_{i,j,k}^{l,h} S_{i,j,k}^{l,h})}{MQ} \quad (23)$$

约束(12)表示发动机的下发时刻等于开始在翼时刻与该次服役时间之和.约束(13)和约束(14)是发动机就绪时刻的计算方法,约束(13)针对下发的目的是送修的情况,其送修返回时刻就是发动机就绪时刻,等于下发时刻再加上送修时间.约束(14)针对下发的目的是梯次使用的情况,发动机的就绪时刻是发动机的下发时刻.约束(15)表示发动机的开始在翼时刻总是大于其送修返回的就绪时刻.约束(16)表示在该机位上,后一个需要安排的发动机只能在前一台发动机服役完毕后才能开始在翼.约束(17) V_k 计算公式, $V_k = -1$ 表示第 k 台发动机在计划期内没有服役.约束(18) U_i 计算公式.约束(19)表示送修计划编制限制在计划期 Q 内.约束(20)表示机位 i 在第 j 次需要发动机时,只能由一台发动机在某次送修返回后服役.约束(21)表示如果发动机 k 第 l 次送修返回后第 h 次梯次使用是在第 i 号机位上服役,则只能为一个机位的某次需求服务,其数值为 1;如果没有服役,其数值为 0.约束(22)表示该次生成的送修计划要满足规定的备件保障率要求.式(23)为发动机对飞机的备件保障率计算公式.

2 模型的求解

从模型中不难看出发动机群总保障成本事实上是排序规则、梯次使用、发动机在翼使用时间、备用发动机数量、计划期长度和保障率相关的函数.由于本文所建的数学模型属于多变量、非线性的 NP 难解问题,模型规模庞大,很难得到最优解,只能开发针对问题的启发式算法.常用的启发式方法有 FCFS (First come first serve), SPT (Shortest processing time), LPT (Longest processing time).航空公司目前使用的是 FCFS 规则.

由于无论哪种启发式算法都或多或少的存在拆换率不均衡情况,本文基于 SPT 算法提出一种 SSPT (Shifted shortest processing time) 算法解决发动机拆换率的平滑问题.事实上,当发动机拆换率出现高峰时,必然备用发动机数量为零,即出现缺发情况.因此,针对出现缺发情况的前一个位置进行调节,使高峰向后推移从而可以达到拆换率平滑的目的. SPT 描述为:当发动机个数小于等于飞机机位个数且机位缺少发动机时,从已到达的发

动机中选取在翼时间最短的发动机安排服役,如果备用发动机库存为零则等待.

SSPT 算法描述如下:对要调节的发动机的送修返回时刻重新赋值,使 r_k^h 是区间 $[\max\{r_k^h, S_{i,j,k}^{l,h}\}, r_k^h + W_{i,j,k}^{l,h}]$ 中的任意值,在任意时刻,只要有机位需要发动机,就从备用发动机中选取在翼时间最短的发动机安排服役.

由于缺发位置不只一个,所以对所有的要调节的发动机都使用 SSPT 算法,从中评价出最好的调度方案;再针对新方案重复使用 SSPT 算法,迭代至满意结果.该算法的优点是针对初始方案中的“问题点”进行改进,即保证了方案的多样性,为寻优提供了更为广阔的解空间;又能有效控制解的有效性.

航空发动机调度优化问题的 SSPT 算法具体流程(图 4)描述如下:

- Step1. 使用 SPT 算法生成初始调度方案 Level-0;
- Step2. 寻找 Level-0 中的所有产生缺发现象的前一台发动机,分别将其就绪时刻 r_k^h 重新赋值为开始在翼时刻 $S_{i,j,k}^{l,h}$ 加 1,每次只改动一台发动机,产生 Level-1 的调度方案 S_0 个;
- Step3. 重复 Step2 直到设定的迭代次数 x ,生成 Level-3,Level-4...Level- x 的到调度方案;

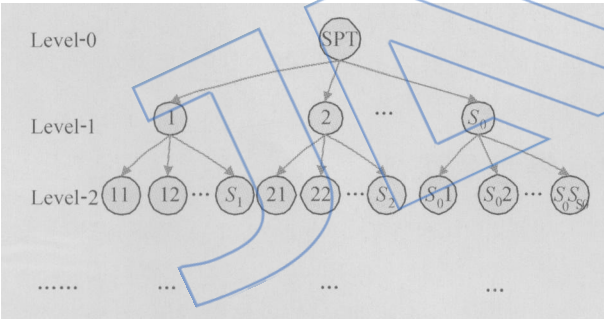


图 4 SSPT 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of SSPT algorithm

Step4. 以总保障成本为评价函数,比较所有调度方案,选取最优调度方案.

3 实例分析

选用某航空公司 CF6 型发动机机队为研究对象,该机队拥有 10 架双发飞机,20 个机位,25 台发动机,其中 20 台在翼,5 台为备用发动机,采用包修模式,不计水洗费用.计划期截取 2000 年 01 月至 2006 年 03 月,共 $Q=2\,250$ 个工作日,平均送修时间 $T=60\text{ d}$,发动机缺件损失(日租金)每天 2 500 美元,发动机租赁运输成本为 20 000 美元,拆换成本每次 5 000 美元,备件保障率要求大于 98%,生成在翼使用时间矩阵如表 1 所示.

SSPT 算法的迭代次数设定为 5 代,由表 2 可以看出 SSPT 算法的各级平滑结果:第五次平滑与 SPT 初始方案比,换发次数变化不大,由 86 次降低到 84 次,但缺发次数与缺发时间明显减少,由 8 次缺发 81 d 降低到 1 次缺发 6 d,从而使拆换成本和租赁成本大幅度降低,从 430 000 美元和 362 500 美元降低到 420 000 和 35 000 美元,保障率由 99.746 上升到 99.981.

表 3 是 4 种算法的计算结果,比较显示:LPT 算法比实际情况(先到先服务 FCFS 规则)增加了缺发时间 72 d,增加租赁成本 240 000 美元和拆换费用 50 000 美元,总保障成本增加 290 000 美元,降低了备件保障率 0.226 个百分点. SPT 算法和 SSPT 算法与 FCFS 算法相比,缺发时间分别减少了 111 d 和 186 d,租赁成本分别降低了 317 500 和 645 000 美元,拆换费用分别增加了 60 000,50 000 美元,节约总保障成本分别为 257 500 和 595 000 美元,使备件保障率分别升高了 0.349 和 0.584 个百分点.

表 1 在翼使用时间矩阵

Table 1 On-wing time matrix

发动机编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
第 1 次在翼使用时间/ d	218	1 069	271	366	152	713	592	151	420	487	117	681	
第 2 次在翼使用时间/ d	1 069	139	530	900	243	216	718	90	860	491	373	437	
第 3 次在翼使用时间/ d	495	495	414	495	157	808	495	191	495	241	769	495	
第 4 次在翼使用时间/ d	495	495	495	495	640	141	495	648	495	495	495	495	
发动机编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
第 1 次在翼使用时间/ d	300	118	49	151	216	674	321	205	537	411	205	186	98
第 2 次在翼使用时间/ d	705	188	684	281	664	553	698	214	741	378	858	971	352
第 3 次在翼使用时间/ d	465	607	544	441	165	495	262	443	495/ 7	345	103	495	766
第 4 次在翼使用时间/ d	495	332	495	551	495	495	495	242	495	495	495	495	495

由发动机季度拆换率直方图(图 5)中可以直观的比较 4 种算法的拆换率情况.图 6 是拆换率高峰的缺发状态图,可以换发高峰出现的位置、次数以及相对缺发数量图,可以明显看出,通过各级平滑,出现高峰向后推移,且出现高峰的次数依次递减.

表 2 SSPT算法计算结果
Table 2 Result of SSPT algorithm

算法名称	拆换次数	缺发次数	总缺发时间/d	$C_{reml}/ \$$	$C_{rent}/ \$$	$\lambda/ \%$
SPT (Level-0)	86	8	81	430 000	362 500	99.746
SSPT (Level-1)	85	4	47	425 000	197 500	99.852
SSPT (Level-2)	85	4	47	425 000	197 500	99.852
SSPT (Level-3)	85	3	37	425 000	152 500	99.884
SSPT (Level-4)	85	2	17	425 000	82 500	99.947
SSPT (Level-5)	84	1	6	420 000	35 000	99.981

表 3 计算结果比较
Table 3 Comparison of computation results

算法名称	拆换次数	缺发次数	总缺发 时间/d	$C_{reml}/ \$$	$C_{rent}/ \$$	$\lambda/ \%$	与 FCFS 算法比较			
							$\Delta C_{reml}/ \$$	$\Delta C_{rent}/ \$$	$\Delta C_{fleet}/ \$$	$\Delta \lambda/ \%$
FCFS 算法	74	10	192	370 000	680 000	99.397	-	-	-	-
LPT 算法	84	13	264	420 000	920 000	99.171	+ 50 000	+ 240 000	+ 290 000	- 0.226
SPT 算法	86	8	81	430 000	362 500	99.746	+ 60 000	- 3 175 000	- 257 500	+ 0.349
SSPT(Level-5)	84	1	6	420 000	35 000	99.981	+ 50 000	- 645 000	- 595 000	+ 0.584

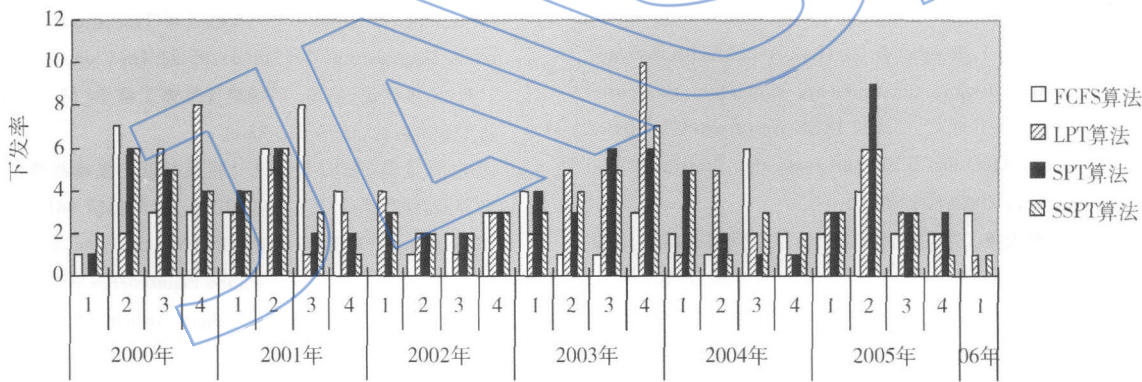
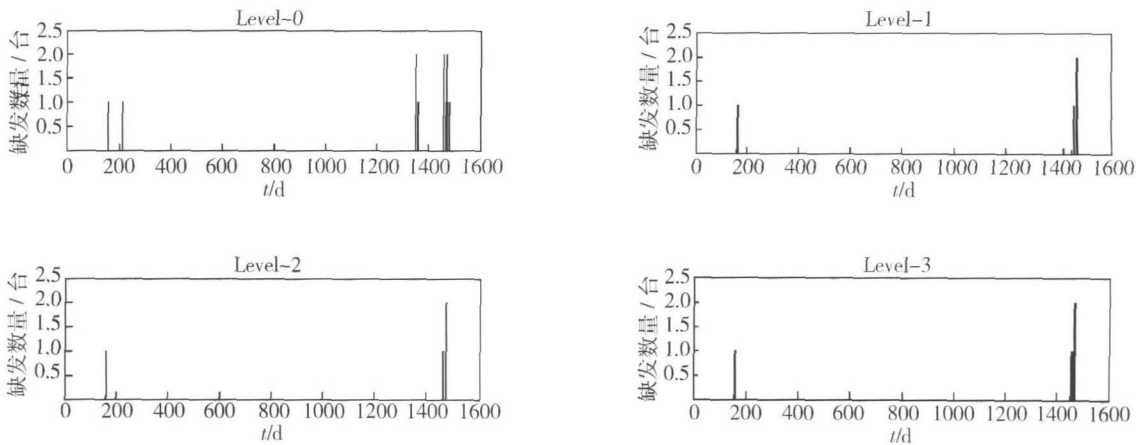


图 5 发动机群季度拆换率直方图
Fig.5 Removal rate histogram of aero-engines



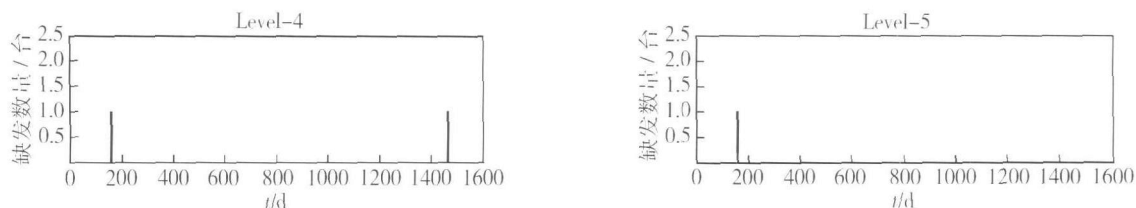


图6 拆换率高峰出现的缺发数量图

Fig. 6 Chart of lack engine number at removal peak

4 结 论

1) 发动机维修费用昂贵,而拆换率是影响总保障成本的重要参数,有必要对其进行控制与平滑。

2) 比较由各种算法得到的调度方案,由 SPT 算法得到的机队拆换率的平滑特性明显优于 FCFS 算法,SSPT 算法又好于 SPT 算法,LPT 算法最差。

3) 本文在 SPT 算法基础上提出的 SSPT 算法可以有效平滑换发高峰、解决拆换率不均衡问题,从而使修理成本最低,保障率最高,是有效的发动机调度方案的制定方法。

参考文献:

- [1] Kacprzynski G J, Roemer M J, Hess A J. Health management system design: development, simulation and cost/benefit optimization [C] //2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana: IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, 2002:3065-3072.
- [2] 张宝珍,曾天翔. 先进的故障预测与状态管理技术[J]. 测控技术,2003,22(11):4-6.
ZHANG Baozhen, ZENG Tianxiang. Advanced prognostics and health management technology [J]. Measurement and Control Technology, 2003, 22(11): 4-6. (in Chinese)
- [3] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [C] //2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana: IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, 2002:3021-3026.
- [4] Matson R, Halsmer R. Smoothing CFM56 engine removal rate at USAir utilizing ADEPT [R]. AIAA 92-3928, 1992.
- [5] 左洪福,张海军,戎翔. 基于比例风险模型的航空发动机视情维修决策[J]. 航空动力学报,2006,21(4):716-721.
ZUO Hongfu, ZHANG Haijun, RONG Xiang. Condition based aero-engine maintenance decision method using proportional hazards model [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 716-721. (in Chinese)
- [6] DoD. Use of cost estimating relationship versus accounting models for estimating maintenance and repair costs: A methodology demonstration [R]. Washington: AD-A186923.
- [7] 梁剑,左洪福. 民用飞机维修成本评估[J]. 交通运输工程学报,2002,2(4):95-98.
LIANG Jian, ZUO Hongfu. Evaluation of maintenance cost for commercial aircraft [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 95-98. (in Chinese)
- [8] 甘茂治,康建设,高琦. 军用装备维修工程学 [M]. 北京:国防工业出版社,1999:238-250.
- [9] 谢庆华,梁剑,张琦. 基于统计粗集的航空发动机维修成本组合预测模型[J]. 兵工学报,2006,27(5):857-861.
XIE Qinghua, LIANG Jian, ZHANG Qi. The combination forecasting model of aero-engine maintenance cost based on statistic rough set theory [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(5): 857-861. (in Chinese)