

一种多寿命件机会更换策略启发式搜索算法

付旭云¹, 田亚鹏¹, 钟诗胜¹, 林龙祥²
(1. 哈尔滨工业大学(威海)机械工程系, 山东 威海 264209;
2. 中国国际航空股份有限公司 工程技术分公司, 北京 101312)

摘 要: 针对多寿命件机会更换问题缺乏快速有效求解算法的难题,提出了一种启发式搜索算法。以全生命周期寿命件总成本最低为优化目标,建立了多寿命件机会更换问题优化模型,将问题解空间表达为树结构;为了提高搜索算法的效率,提出了子节点生成方法和单层节点数量控制方法;在此基础上,提出了启发式搜索算法;最后,采用数值实验和应用案例对提出算法进行了评估和验证。结果表明:算法的消耗时间、求解效果与子节点生成系数 α 、单层节点最大数量 β 存在关系;当选取合适的 α 和 β 时,算法能够在较短时间内取得较好的效果;算法能够适用于设备总寿命为 200000 时间单位、包含 100 个寿命件的较大规模的多寿命件机会更换问题。

关 键 词: 机会更换; 启发式搜索; 维修时机; 寿命件更换; 航空发动机

中图分类号: V23; TH17 **文献标志码:** A

Heuristic search algorithm for opportunistic replacement strategy of multiple life-limited parts

FU Xuyun¹, TIAN Yapeng¹, ZHONG Shisheng¹, LIN Longxiang²
(1. Department of Mechanical Engineering,
Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai Shandong 264209, China;
2. Air China Technics, Air China Limited, Beijing 101312, China)

Abstract: A heuristic search algorithm was proposed to solve the lack of fast and effective problem-solving algorithm of opportunistic replacement of multiple life-limited parts (LLPs). At first, an optimization model of the opportunistic replacement problem of multiple LLPs was established to minimize the total LLP cost in the whole life cycle, and the solution space was expressed as a tree structure. To improve the efficiency of the search algorithm, a child node generation method and a node number control method in single layer were proposed. Based on these, a heuristic search algorithm was proposed. Finally, the proposed algorithm was evaluated and validated by numerical experiments and an actual application case. The results show that there is a relationship between the consumed time, the solving effect and the generating coefficient of child node α as well as the maximum number of single layer node β ; when selecting the appropriate α and β , the proposed algorithm can achieve good results in a relatively short period of time; the proposed algorithm can be applied to large-scale opportunistic replacement of multiple LLPs with the equipment total life of

收稿日期:2015-11-16

基金项目:国家自然科学基金(51305096); 山东省自主创新及成果转化专项资助项目(2014CGZH1101); 民航科技项目

作者简介:付旭云(1981—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要从事航空发动机健康管理与维修决策研究。

引用格式:付旭云,田亚鹏,钟诗胜,等.一种多寿命件机会更换策略启发式搜索算法[J].航空动力学报,2017,32(8):1971-1977.
FU Xuyun, TIAN Yapeng, ZHONG Shisheng, et al. Heuristic search algorithm for opportunistic replacement strategy of multiple life-limited parts[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1971-1977.

200 000 time units and including 100 LLPs.

Key words: opportunistic replacement; heuristic search; maintenance occasion; replacement of life-limited parts; aero-engine

飞机、航空发动机等复杂装备的某些组件一旦发生失效,可能会造成灾难性后果。为了保证它们不发生失效,这类组件经常被定义为寿命件。寿命件是具有使用时间限制的组件,此使用时间限制也称作寿命限制。当使用时间不超过寿命限制时,寿命件不会发生失效。当使用时间达到寿命限制时,寿命件必须进行更换。寿命件成本是复杂装备维修成本的重要组成部分。以 CFM56-5B 航空发动机为例,更换全套寿命件的成本约为 260 万美元。从全寿命周期看,寿命件成本会更高。对于具有多个寿命件的复杂装备,如果寿命件提前进行更换,则会造成寿命件的浪费;如果所有寿命件都是达到寿命限制时才进行送修,那么会大大增加送修次数^[1-2]。如何在送修次数与寿命件浪费之间取得平衡,就是多寿命件机会更换问题的目标。

多寿命件机会更换问题是机会维修问题的变种^[3-6]。预防维修和事后维修是目前广泛使用的两种维修策略。预防维修是在故障发生前使设备保持规定状态的各种维修活动。事后维修是在故障发生后再进行维修。机会维修将预防维修和事后维修结合起来。设备一旦因发生故障或者其他原因引起停机,则将其视为一个“机会”,即使此时没有计划的预防维修活动,也可以将某些预防维修活动提前在此执行。机会维修能够有效减少设备送修次数,进而节约装拆成本^[7]。对机会维修问题,目前已经在模型构建、求解算法、工程应用等方面取得了很多研究成果^[8-11]。

多寿命件机会更换问题最早由 George 等提出^[12-13]。George 等首先对 2 个寿命件机会更换问题进行了研究。当其中 1 个寿命件到寿更换时,检查另 1 个寿命件的剩余寿命是否低于某一阈值,如果是,则另一个寿命件也需要更换,如果否,则不进行更换。文中给出了此阈值的求解方法。对于多寿命件机会更换问题,仍旧采用类似于 2 个寿命件机会更换问题的更换策略。对于 2 寿命件机会更换问题,Epstein 等进一步给出了最优更换策略的计算量最小的求解算法^[14]。Dickman 等将多寿命件机会更换问题形式化为非线性的 0-1 整数规划模型和线性的混合整数规划模

型^[15],指出有限时间跨度比无限时间跨度条件下问题的求解难度更大,研究了有限时间跨度条件下的 2 寿命件机会更换问题的整数规划模型及其求解算法^[16]。Andréasson 扩展了 Dickman 等的模型,研究了有限时间跨度条件下的多寿命件机会更换问题,建立了该问题的动态规划模型和线性整数规划模型,研究了线性整数规划模型可行解的凸包,指出一般情况下此凸包是满维的^[17]。Almgren 等进一步从理论上证明了多寿命件机会更换问题属于 NP(non-deterministic polynomial) 难问题,提出一类新面的获取方法^[18]。针对成本随时间单调的问题,增加了仅有必要更换至少一个寿命件时才进行送修的约束,此约束能够减少最优解求解时间;对维修时机固定的问题,采用一种贪婪算法进行了解。

综上,目前还没有一种快速有效的求解算法能够适应于多寿命件机会更换策略的求解。本文从问题解空间入手,提出一种快速的多寿命件机会更换策略启发式搜索算法,然后采用数值实验对提出算法的求解效率和效果进行了评价,最后采用一个实际应用案例对提出算法进行了验证。

1 问题描述

考虑设备总寿命为 T_{lim} , 包含 $n(n \geq 2)$ 个寿命件的机会更换问题。更换寿命件所需装拆成本为 c_b , 其独立于更换的寿命件数量。各寿命件记为 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 寿命限制为 $t_{\text{lim}, i}$, 成本为 c_i 。设备使用时间记为 T , A_i 使用时间记为 $t_{\text{use}, i}(T)$, 剩余寿命记为 $t_{\text{res}, i}(T)$ 。显然, $t_{\text{res}, i}(T) = t_{\text{lim}, i} - t_{\text{use}, i}(T)$ 。为了方便, 记所有寿命件的最低剩余寿命为 $t_{\text{res}, \min}(T)$, 即 $t_{\text{res}, \min}(T) = \min\{t_{\text{res}, i}(T) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。随着 T 的增加, $t_{\text{use}, i}(T)$ 相应增加, $t_{\text{res}, i}(T)$ 相应减少。当 $t_{\text{res}, i}(T) = 0$ 时, A_i 必须进行更换, 发生的成本为 $c_b + c_i$ 。 A_i 更换后, $t_{\text{use}, i}(T)$ 归零, 重新开始累积。为了减少全生命周期内的设备送修次数, A_i 也可以在更换其他寿命件时进行更换, 这样能够节约装拆成本, 但会造成一定的寿命件浪费。设备在 T_{lim} 内发生的送修次数记为 m , 历次维修时机记为 $T_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 。 m 不同, T_j 不同, 每次送修时更换的寿命件不同,

设备全生命周期的寿命件总成本 C 就不同。

多寿命件机会更换问题的目标是确定寿命件机会更换策略,即确定 m, T_j 、每次送修时更换的寿命件,使得 C 最小,其可以形式化表示为式(1)。

$$\begin{aligned} \min C(s) &= c_b \cdot m + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e_{i,j} \cdot c_i \\ \text{s. t. } &\begin{cases} 0 \leq T_1 < T_2 < \dots < T_m < T_{\lim} \\ T_m + t_{\text{res},\min}(T_m) \geq T_{\lim} \\ t_{\text{use},i}(T) \leq t_{\lim,i} \quad i = 1, 2, \dots, n \\ s \in \Omega \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $s = (m, T_1, T_2, \dots, T_m, e_{1,1}, e_{1,2}, \dots, e_{n,m})$ 为决策变量构成的解向量; $\Omega = \{s \mid m \in \mathbf{N} \cap [0, T_{\lim}], T_j \in \mathbf{N} \cap [0, T_{\lim}), e_{i,j} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m\}$ 为所有解向量构成的解空间; $\mathbf{N}$ 为自然数; $e_{i,j}$ 为第 j 次送修时 A_i 是否更换,更换取值为 1, 否则为 0; $t_{\text{use},i}(T)$ 的计算如式(2)所示。

$$\begin{aligned} t_{\text{use},i}(T) &= \\ &\begin{cases} t_{\text{use},i}(T_{j-1}) + T - T_{j-1}, & T \in \mathbf{N} \cap (T_{j-1}, T_j) \\ j = 1, 2, \dots, m \\ t_{\text{use},i}(T_m) + T - T_m, & T \in \mathbf{N} \cap (T_m, T_{\lim}] \\ [t_{\text{use},i}(T_{j-1}) + T - T_{j-1}] \cdot (1 - e_{i,j}) \\ & T \in \{T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_m\} \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $T_0 = 0, t_{\text{use},i}(T_0)$ 为 A_i 的初始使用时间。

多寿命件机会更换问题属于组合优化问题。根据各决策变量的定义域,不难求出该问题的解空间规模,如式(3)所示。

$$\sum_{m=0}^{T_{\lim}} T_{\lim}^m \cdot 2^{n \cdot m} = \frac{1 - (2^n \cdot T_{\lim})^{T_{\lim}+1}}{1 - 2^n \cdot T_{\lim}} \approx (2^n \cdot T_{\lim})^{T_{\lim}} \quad (3)$$

可以看出,问题解空间规模极其庞大,主要影响因素为寿命件数量 n 以及设备总寿命 $T_{\lim}$ 。即使当设备总寿命和寿命件数量不太大时,通过完全遍历式方法遍历解空间获得最优解也几乎是不可能的。

不难发现,设备历次送修具有天然的时间顺序。因此,问题解空间能够自然的表达为树,如图 1 所示。树的根节点表示初始状态($T = T_0 = 0$),记为 N_0 ; N_0 的任一子节点表示第 1 次送修($T = T_1$),记为 N_1 ;以此类推。问题解空间树除 N_0 之外的每个节点均表示一次送修。第 j 次送修对应的任一节点 N_j 包含的决策变量为维修时机 T_j 以及所有寿命件更换情况 $e_{i,j} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。 m 对应于从 N_0 到叶节点的路径的长度。从 N_0 到

任一叶节点的路径对应于该问题的一个解。

因此,可以采用搜索算法对该问题进行求解。对解空间树进行搜索的过程,就是根据根节点逐步构建解空间树的过程。考虑到解空间规模极其庞大,如果构建完整的解空间树,必然会消耗大量的时间。因此,本文拟根据一定的规则构建部分解空间树以获取问题的较优解,即采用启发式搜索算法对该问题进行求解。

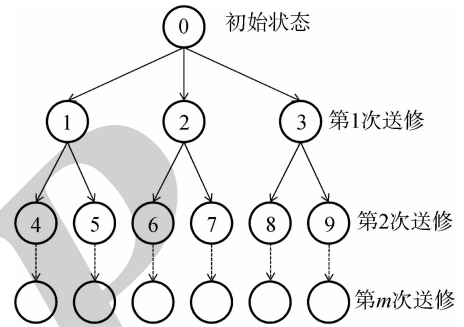


图 1 问题解空间树
Fig. 1 Problem solution space tree

2 启发式搜索算法

为了提高搜索算法的效率,一方面要在保证质量的前提下尽量减少各节点的子节点的数量,另一方面要控制各层节点的数量。

2.1 子节点生成

确定解空间树某节点的子节点本质上是根据该节点的寿命件状态确定下次维修时机以及更换的寿命件,每种不同的方案都对应一个子节点。

根据式(1)中的约束条件,下次维修时机只要保证寿命件不超寿即可,因此,下次维修时机的取值范围一般比较大。容易有这样一种直观的认识:如果送修时没有寿命件到寿,那么必然会增加送修次数或者造成寿命件无谓的浪费。基于此,给出如下的维修时机确定规则。

维修时机确定规则 设 N_j 是多寿命件机会更换问题解空间树的任一节点,其对应的维修时机为 T_j 。如果 N_j 存在子节点 N_{j+1} ,则令 N_{j+1} 的维修时机 $T_{j+1} = T_j + t_{\text{res},\min}(T_j)$ 能够保证获得不劣于 $T_{j+1} < T_j + t_{\text{res},\min}(T_j)$ 时的解。

维修时机确定规则类似于文献[18]中的命题 3,其证明也可参考文献[18]。

根据维修时机确定规则,即可将下次维修时机的取值范围缩小为一个值。

下次维修时机确定后,还需确定更换的寿命

件。除到寿的寿命件必须更换外,其他寿命件都可以选择更换或不更换。如果未到寿的寿命件数量为 n_{ntl} ,则寿命件更换的方案有 $2^{n_{ntl}}$ 。可见,寿命件更换的方案也很多。寿命件最优更换方案与 c_b 有关。当 $c_b=0$ 时,最优更换方案为仅更换到寿的寿命件;当 $c_b>0$ 时,未到寿的寿命件可以进行机会更换, c_b 越大,可以进行机会更换的寿命件越多,考虑到从全生命周期角度难以确定究竟更换哪些寿命件是最优更换方案,下面先给出仅考虑单次送修时的局部最优更换方案确定方法。确定任一节点 N_j 的子节点 N_{j+1} 的寿命件局部最优更换方案步骤如下(N_{j+1} 的维修时机按照维修时机确定规则确定,即 $T_{j+1}=T_j+t_{res,min}(T_j)$):

步骤 1 令 $S_{res}=\{r| r=t_{res,i}(T_j), i=1, 2, \cdots, n\}$,其元素数量为 p ,考虑到可能存在相同剩余寿命的寿命件, $p \leq n$ 。将 S_{res} 的元素按照从小到大顺序排成 1 列,分别记为 $r_1, r_2, \cdots, r_p$,并按照此顺序进行遍历。初始化 $l=1$,第 l 个元素记为 r_l 。

步骤 2 按照式(4)计算更换剩余寿命不大于 r_l 的寿命件时的寿命件浪费 W_l 。

$$W_l = \sum_{k=1}^l w_k = \sum_{k=1}^l \sum_{t_{res,i}(T_j)=r_k} [t_{res,i}(T_j) - t_{res,min}(T_j)] \cdot \frac{c_i}{t_{lim,i}} \quad (4)$$

式中 w_k 为更换剩余寿命等于 r_k 的寿命件时产生的寿命件浪费。

步骤 3 判断是否 $W_l \geq c_b$ 。如果是,则更换的寿命件为所有剩余寿命小于等于 r_{l-1} 的寿命件,算法结束;如果否,继续。

步骤 4 判断是否 $l=p$ 。如果是,则更换的寿命件为所有剩余寿命小于等于 r_l 的寿命件,算法结束;如果否, $l=l+1$,返回步骤 2。

为了能够尽可能获得寿命件全局最优更换方案或者较优更换方案,需要基于局部最优更换方案产生多种寿命件更换方案。为了控制寿命件更换方案的数量,引进子节点生成系数 $\alpha (\frac{1}{n} \leq \alpha \leq 1.0)$,控制寿命件更换方案数量不大于 $[\alpha \cdot n]$ 。多种寿命件更换方案的确定方法如下:

其步骤 1 和步骤 2 同局部最优更换方案确定方法,故略去。

步骤 3 判断是否 $W_l \geq c_b$ 。如果是,令 $r^* = r_{l-1}$,转到步骤 5;如果否,继续。

步骤 4 判断是否 $l=p$ 。如果是,令 $r^* = r_l$;如果否, $l=l+1$,返回步骤 2。

步骤 5 以 r^* 为中心,从 $r_1, r_2, \cdots, r_p$ 中按照位置就近、小值优先的原则,选择 $\min\{[\alpha \cdot n], p\}$ 个元素,每个元素均对应一种寿命件更换方案,即更换的寿命件为所有剩余寿命小于等于该元素的寿命件。

以图 2 为例说明提出的子节点生成方法。某设备共有 6 个寿命件,图中所示为 $T=T_j$ 时该设备各寿命件的剩余寿命情况。根据维修时机确定规则,此设备的下次维修时机 $T_{j+1}=T_j+t_{res,min}(T_j)$,即 $T_{j+1}=T_j+r_1$ 。因为 $W_3 < c_b$ 且 $W_4 \geq c_b$,所以确定以 r_3 为中心从 $r_1, r_2, \cdots, r_5$ 中选择一定量的元素。图中的①,②,③,⋯,表示 $r_1, r_2, \cdots, r_5$ 的选取顺序。按照位置就近、小值优先的原则,当 $[\alpha \cdot n]=1$ 时,选择 r_3 ;当 $[\alpha \cdot n]=2$ 时,选择 r_3 和 r_2 ;当 $[\alpha \cdot n]=3$ 时,选择 r_3, r_2, r_4 。 r_3 对应的寿命件更换方案为对 A_2, A_4, A_1 进行更换; r_2 对应的方案为对 A_2 和 A_4 进行更换;以此类推。

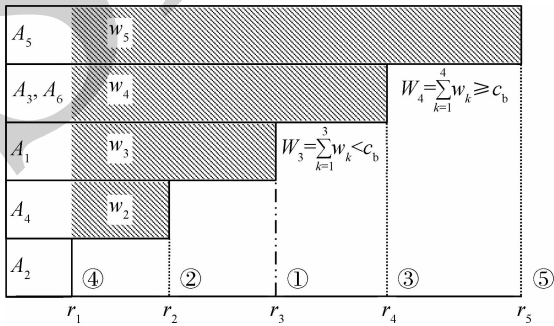


图 2 子节点生成方法

Fig. 2 Child node generation method

不难知道,对于解空间树中的任意节点,采用提出的子节点生成方法生成的子节点数量最大为 $[\alpha \cdot n]$ 。

2.2 单层节点数量控制

子节点生成方法已经将各节点的子节点数量控制在 $[\alpha \cdot n]$ 范围内。即使如此,解空间树中节点数量的增长仍旧为指数级的,如第 m 次送修相应的节点数量为 $[\alpha \cdot n]^m$ 。为了对单层节点数量进行控制,引进单层节点最大数量 β 。当单层节点数量超过 β 时,对该层各节点进行评价,仅保留评价结果较好的 β 个节点。

采用单位时间成本 C_c 对各节点进行评价。对于第 a 次送修的任意节点 N_a ,其维修时机为 T_a ,则其 C_c 可以根据式(5)进行计算。

$$C_e(N_a) = \frac{c_b \cdot a + \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^n e_{i,j} \cdot c_i - \sum_{i=1}^n \frac{[t_{res,i}(T_a) - t_{res,min}(T_a)] \cdot c_i}{t_{lim,i}}}{T_a + t_{res,min}(T_a)} \quad (5)$$

将单层节点数量控制在 β 内后,各层节点生成的子节点数量将不超过 $[\alpha \cdot n] \cdot \beta$ 。

2.3 算法流程

根据子节点生成方法以及单层节点数量控制方法,提出多寿命件机会更换策略启发式搜索算法,具体步骤如下:

步骤 1 设置 α 和 β 。初始化最优值 C_{min} ,最优叶节点集合 S_{min} ,活节点列表 S_l ,根节点 N_0 。 C_{min} 设为 1 个较大的数, S_{min} 为空, S_l 为空。

步骤 2 判断是否 $t_{res,min}(T_0) \geq T_{lim}$ 。如果是, $C_{min}=0, S_{min}=\{N_0\}$,算法结束;如果否,将 N_0 加入 S_l 。

步骤 3 判断 S_l 是否为空。如果是,算法结束;如果否,采用子节点生成方法分别生成 S_l 各元素的子节点,这些子节点构成集合 S_s 。

步骤 4 依次判断 S_s 中各元素的所有寿命件是否能够使用到 T_{lim} 。如果是,根据式(1)计算该元素对应的目标函数值,根据目标函数值与 C_{min} 的比较结果,更新 C_{min} 和 S_{min} ,并从 S_s 中去掉该元素。

步骤 5 判断 S_s 元素数量是否超过 β 。如果是,采用单层节点数量控制方法对其进行约简。

步骤 6 令 $S_l=S_s$,返回步骤 3。

搜索算法结束后,从 N_0 到 S_{min} 中任一元素的路径即为寻找到的较优解, C_{min} 为相应的较优值。

3 数值实验

采用随机生成的多寿命件机会更换问题对提出算法进行评估。令 $T_{lim}=60\,000$ 飞行循环, $n=10, c_b$ 服从区间(100 000,300 000)美元上的均匀分布, $t_{lim,i}$ 服从区间(15 000,30 000)飞行循环上的均匀分布, c_i 服从区间(30 000,300 000)美元上的均匀分布, $t_{usc,i}$ 服从区间(0, $t_{lim,i}$)上的均匀分布,随机生成 20 个问题。算法采用 Java 实现,算法参数 $(\alpha, \beta) \in \{0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\} \cdot \{10+30 \cdot k | k=0,1,\cdots,33\}$ 。在普通计算机(CPU: Intel(R)Core(TM)i7-4700MQ,内存为 4GB)上分别采用每组 (α, β) 对各个问题进行求解。记录下算法求解的平均消耗时间 t 、取得最优解的比例 p 、与最优解的平均相对偏差 r 、与最优解的最大相对偏差 R 。表 1 为 $(\alpha, \beta) \in \{0.5, 1.0\} \cdot \{10, 160, 310, 460, 610, 760, 910, 1\,000\}$ 时

的实验结果。

从表 1 可以看出,算法的消耗时间、求解效果与 α 和 β 存在一定的关系。当选取合适的 α 和 β 时,算法能取得较好的效果,例如当 $\alpha=0.5, \beta=460$ 时, $t=31.7\text{ ms}, p=30\%, r=1.63\%, R=8.29\%$,能够满足工程应用。总的来说, α 和 β 越大,算法的消耗时间越长,求解效果越好。

表 1 部分实验结果
Table 1 Partial experimental results

α	β	t/ms	$p/\%$	$r/\%$	$R/\%$
0.5	10	0.95	0	6.78	15.31
0.5	160	15.05	30	1.77	10.05
0.5	310	19.25	30	1.72	10.05
0.5	460	31.70	30	1.63	8.29
0.5	610	54.10	30	1.63	8.29
0.5	760	61.15	30	1.52	6.06
0.5	910	60.40	30	1.52	6.06
0.5	1000	58.95	30	1.52	6.06
1.0	10	2.25	0	11.30	19.71
1.0	160	34.00	15	4.39	13.08
1.0	310	77.05	25	3.53	11.32
1.0	460	116.45	30	2.69	11.32
1.0	610	163.75	35	2.16	11.32
1.0	760	209.10	35	1.79	11.32
1.0	910	247.05	60	1.29	10.53
1.0	1000	303.10	60	1.18	10.53

为了进一步观察 α, β 与 r 的关系,将实验结果用图 3 表示。

从图 3 可以看出,对于某一 α ,一般情况下, β 越大, r 越小;当 β 增大到一定程度时, r 将保持不变,如当 $\alpha=0.2, \beta \geq 730$ 时, r 保持 3.63% 不变。这说明对于某一 α, r 有一极限值,也就是说, α 决定了算法能取得的最好效果, α 越大,算法能取得的最好效果就越好。从图 3 还可以看出, α 越大,一般情况下取得同样效果所需要的 β 就越大,如当 $\alpha=0.4, \beta=130$ 时, $r < 2\%$,而当 $\alpha=0.8, \beta=430$ 时, $r < 2\%$ 。

当问题规模增大时,算法求解的消耗时间也会增大。为了评估问题规模与算法求解消耗时间的关系,再进行 1 组实验。 $(T_{lim}, n) \in \{60\,000 +$

$20\,000k|k=0,1,\cdots,7\}\cdot\{10+10k|k=0,1,\cdots,9\}$; $c_b, t_{lim,i}, c_i, t_{use,i}(0)$ 的取值同前面实验。对于每组 (T_{lim}, n) 均随机生成 20 个问题。令 $\alpha=0.5$, $\beta=600$, 采用提出算法对各个问题进行求解, 记录下算法求解的平均消耗时间 t , 如图 4 所示。

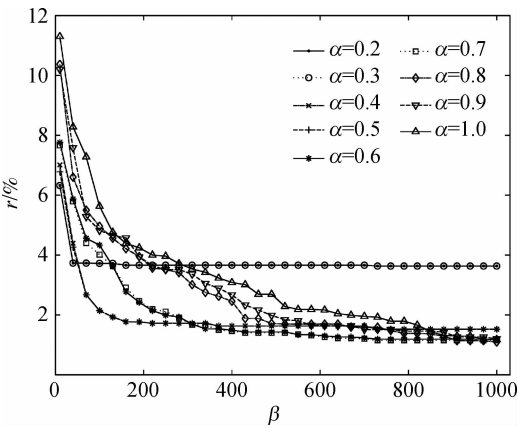


图 3 α, β 与 r 的关系
Fig. 3 Relationship of α, β and r

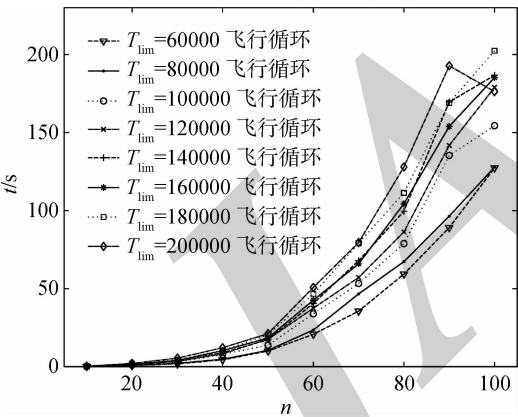


图 4 T_{lim}, n 与 t 的关系
Fig. 4 Relationship of T_{lim}, n and t

从图 4 可以看出, 随着 T_{lim} 和 n 的增大, t 也在增大。当 $T_{lim}=180\,000$ 飞行循环, $n=100$ 时, t 取得最大值, 约为 202 s, 说明对于较大规模的多寿命件机会更换问题, 提出算法也是适用的。

4 应用案例

航空发动机是典型的具有多个寿命件的可修系统。航空公司发动机工程师经常面临着确定全寿命期内寿命件更换策略的难题。下面以某台航空发动机为例, 采用提出算法搜索该航空发动机的机会更换策略。表 2 为该航空发动机寿命件清单。设 $c_b=160\,000$ 美元, $T_{lim}=60\,000$ 飞行循环。

表 2 寿命件清单

Table 2 Life-limited parts list				
i	$t_{lim,i}/$ 飞行循环	$t_{use,i}(0)/$ 飞行循环	$t_{res,i}(0)/$ 飞行循环	$c_i/$ 美元
1	30 000	28 717	1 283	152 200
2	30 000	7 326	22 674	221 700
3	30 000	7 326	22 674	110 200
4	20 000	19 927	73	48 320
5	20 000	19 927	73	79 880
6	20 000	19 927	73	114 000
7	20 000	9 252	10 748	254 500
8	20 000	19 927	73	35 360
9	20 000	9 252	10 748	212 500
10	20 000	19 717	283	192 100
11	20 000	9 252	10 748	67 900
12	20 000	10 727	9 273	91 920
13	20 000	15 727	4 273	288 900
14	20 000	14 927	5 073	156 700
15	25 000	10 727	14 273	104 600
16	25 000	10 727	14 273	88 410
17	25 000	19 927	5 073	78 600
18	25 000	23 717	1 283	89 960
19	25 000	10 727	14 273	77 610
20	25 000	10 727	14 273	159 400

搜索消耗时间为 1 175 ms, 取得了 2 个较优解, 相应的目标函数值为 7 912 360 美元。与遍历式方法获得的最优解相比可知, 提出算法获得的较优解即为最优解。表 3 为求解结果。

表 3 寿命件更换策略求解结果

Table 3 Solutions for life-limited parts replacement strategy			
最优解 1		最优解 2	
$T_j/$ 飞行 循环	更换的寿命件 编号	$T_j/$ 飞行 循环	更换的寿命件 编号
73	1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18	73	1, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 14, 17, 18
14 273	15, 16, 19, 20	10 748	7, 9, 11, 15, 16, 19, 20
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,
20 073	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18	20 073	9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18
39 273	15, 16, 19, 20	35 748	15, 16, 19, 20
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,
40 073	9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18	40 073	9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18

从表 3 可以看出,两个最优解的全寿命期内的送修次数均为 5 次,第 1 个最优解的历次维修时机分别为第 73,14 273,20 073,39 273,40 073 飞行循环,第 2 个最优解的历次维修时机分别为第 73,10 748,20 073,35 748,40 073 飞行循环,两个最优解历次维修更换的寿命件也不尽一致。工程师可参考这两个最优解,并结合该台航空发动机的性能衰退、部件故障等因素,规划航空发动机的维修时机及寿命件更换情况。

5 结 论

为了快速有效的对多寿命件机会更换问题进行求解,提出了一种基于子节点生成方法和单层节点数量控制方法的启发式搜索算法,并采用数值实验对提出算法进行了评估。实验结果表明:当选取合适的算法参数时,提出算法能取得较好的效果,同时提出算法也能适用于较大规模的多寿命件机会更换问题。最后以某航空发动机的实际数据对提出算法进行了验证。验证结果表明:提出算法能够适应于航空发动机多寿命件机会更换问题求解的工程应用场合。

多寿命件机会更换问题中维修时机仅受到寿命件的影响。在实际工程应用中,维修时机还会受到设备性能衰退、部件故障等多种因素的影响。因此,面向全生命周期的基于多影响因素的设备维修时机优化问题是一个研究方向。

参考文献:

[1] GHOBBAR A A,CATOR E,MAYORDOMO A F. A decision support tool for strategic engine maintenance planning and life limited parts[R]. London: Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment,2013:449-461.

[2] 付旭云,陈银,钟诗胜. 基于寿命件的民航发动机送修目标确定方法[J]. 航空动力学报,2014,29(7):1556-1561.

FU Xuyun, CHEN Yin, ZHONG Shisheng. Approach for civil aero-engine repair objective determination based on life limited parts[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(7):1556-1561. (in Chinese)

[3] DEKKER R. Applications of maintenance optimization models;a review and analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety,1996,51(3):229-240.

[4] NOWAKOWSKI T,WERBINKA S. On problems of multicomponent system maintenance modelling[J]. International Journal of Automation and Computing,2009,6(4):364-378.

[5] DEKKER R,WILDEMAN R E,SCHOUTEN F A V D D. A review of multi-component maintenance models with

economic dependence[J]. Mathematical Methods of Operations Research,1997,45(3):411-435.

[6] CHO D I,PARLAR M. A survey of maintenance models for multi-unit systems[J]. Journal of Operational Research,51(1):1-23.

[7] AB-SAMAT H,KAMARUDDIN S. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches;a review[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering,2014,20(2):98-121.

[8] ZHANG Xiaohong,ZENG Jianchao. A general modeling method for opportunistic maintenance modeling of multi-unit systems[J]. Reliability Engineering and System Safety,2015,140:176-190.

[9] BEDFORD T,DEWAN I,MEILIJSON I,et al. The signal model;a model for competing risks of opportunistic maintenance[J]. Journal of Operational Research,2011,214(3):665-673.

[10] 程志君,杨征,谭林. 基于机会策略的复杂系统视情维修决策模型[J]. 机械工程学报,2012,48(6):168-174.

CHENG Zhijun,YANG Zheng,TAN Lin. Condition-based maintenance model of deteriorating complex system based on opportunistic policy[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(6):168-174. (in Chinese)

[11] 涂国煜,陆宝森,赵千川. 联合更换策略的机会性 Lagrangian 松弛方法[J]. 自动化学报,2013,39(3):263-271.

TU Guoyu,LU Baosen,ZHAO Qianchuan. Opportunistic Lagrangian relaxation for joint replacement policy[J]. Acta Automatica Sinica,2013,39(3):263-271. (in Chinese)

[12] GEORGE L L,LO Y H. An opportunistic look-ahead replacement policy[J]. Journal of the Society of Logistics Engineers,1980,14(4):51-55.

[13] DAY J A,GEORGE L L. Opportunistic replacement of fusion power system parts[R]. Los Angeles:Reliability and Maintainability Symposium,1982.

[14] EPSTEIN S,WILAMOWSKY Y. Opportunistic replacement in a deterministic environment[J]. Computers and Operations Research,1985,12(3):311-322.

[15] DICKMAN B,EPSTEIN S,WILAMOWSKY Y. A mixed integer linear programming formulation for multi-component deterministic opportunistic replacement[J]. Journal of the Operational Research Society of India,1991,28(3):165-175.

[16] DICKMAN B,WILAMOWSKY Y,EPSTEIN S. Modeling deterministic opportunistic replacement as an integer programming problem[J]. Journal of Mathematical and Management Sciences,1990,10(3):323-339.

[17] ANDRÉASSON N. Optimization of opportunistic replacement activities in deterministic and stochastic multi-component systems[D]. Göteborg,Sweden:Chalmers University of Technology and Göteborg University,2004.

[18] ALMGREN T,ANDRÉASSON N,PATRIKSSON M,et al. The opportunistic replacement problem;theoretical analyses and numerical tests[J]. Mathematical Methods of Operations Research,2012,76(3):289-319.