

飞机多疲劳结构动态成组维修决策优化方法

罗 斌, 林 琳[†], 钟诗胜

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 以多个疲劳结构组成的飞机为对象, 针对此类系统存在的维护困难、停机成本大等特点, 研究多疲劳结构动态成组维修优化问题. 在充分考虑结构停机维修用时以及多个疲劳结构之间维修相关性对于飞机使用率和维修费用的影响下, 以维修费用和使用率为优化目标, 以可靠度为约束, 建立多疲劳结构动态成组维修决策优化模型. 考虑飞机工作环境的严酷性和动态性, 基于滚动时间轴模型, 提出多疲劳结构动态成组维修决策优化方法. 为了充分利用传感器获得的实时状态信息降低结构服役过程中损伤不确定性对维修计划制定的影响, 并使维修计划能够适应复杂多变的动态环境, 当每执行完一次停机维修活动或出现新的结构状态信息时, 通过将维修决策时间窗口进行不断的滚动, 使维修计划能够自适应地动态调整, 达到无限规划周期的效果.

关键词: 飞机; 疲劳结构; 维修费用; 使用率; 维修决策; 动态成组

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Dynamic grouping maintenance planning for aircraft with multiple fatigue structures

LUO Bin, LIN Lin[†], ZHONG Shi-sheng

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper focuses on handling dynamic grouping maintenance planning problem for the aircraft with multiple fatigue structures, which has been widely studied due to expensive replacement of machinery as well as the high costs of downtime. A dynamic grouping maintenance planning optimization model concentrated on both minimizing the maintenance cost and maximizing the availability of the aircraft and constrained by the maintenance resource is established for the multiple fatigue structures through taking into consideration of the economic dependence among the structures. Then, in terms of the harsh and changing working condition, a dynamic grouping optimization method is further proposed based on the rolling-horizon model. The maintenance decision horizon is rolled and the maintenance plan is self-adaptive when new real-time status is available or the maintenance plan is executed, in order to minimize the affects caused by the uncertainty of structure damage.

Keywords: aircraft; fatigue structure; maintenance cost; availability; maintenance planning; dynamic grouping

0 引 言

由于飞行过程中承受随机动态载荷, 疲劳损伤是飞机结构的典型失效方式之一^[1-3]. 为避免结构疲劳裂纹扩展造成飞机失效的严重后果, 需要对飞机结构进行频繁地检查、探伤、维修. 工况环境、材料生产以及加工制造过程中的不确定性, 导致结构的疲劳寿命无法直接通过精确的数学模型给定, 为降低结构失效率, 在飞机的设计上越来越多的传感器被安装用来采集关键部位的疲劳信息^[4], 以支持视情维修 (Condition-based maintenance, CBM). CBM^[5-7] 由于能够充分利用采集的实时状态信息来减少不必要的定

期停机维修, 其工程应用范围越来越大.

在实际应用中, 由于飞机多采用对称设计, 通常包含许多相同或相似的结构 (部件), 如飞机壁板等, 飞机任意一个结构的故障都会造成停机维修, 如果针对单个结构进行维修计划安排, 则会造成停机频繁, 飞机使用率降低, 维修经济性变差. 现有的针对飞机部件的维修决策优化研究, 多针对单部件, 很少考虑多个相似部件成组维修的经济性, 对于实行多部件维修管理的飞机健康管理系统并不适用^[8]. 基于 CBM 维修理念, 研究飞机多疲劳结构动态成组维修决策优化方法, 可以避免传统数学建模方法由于难于考虑多

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775132).

责任编辑: 刘宝碇.

[†]通讯作者. E-mail: waiwaiyl@hit.edu.cn.

模式数据(可靠性信息、维修性信息、安全性、设备损伤程度等)或获取设备状态信息困难带来的缺陷. 建立疲劳结构的高可靠度评估模型,可根据实时的状态信息,不断地动态更新多部件维修决策优化模型,使得维修规划更为合理,进一步降低维修费用,提高维修效率和单机使用率. 在飞机多部件成组维修决策建模和优化方面,现有的研究成果十分有限. 白芳^[9]针对单台航空发动机维修决策的局限性,建立了基于CBM的面向民航发动机机群的多目标维修决策模型,但该模型采用的是直接成组维修策略,忽略了系统短期的状态信息,且只计算在调度计划期内时寿件的损失成本;蔡景等^[10]以定期检测间隔和各部件维修任务间隔为优化变量,建立了飞机成组维修决策优化模型,并以CRJ200空调系统为例进行了实例验证,该模型的缺陷在于由于采用的是静态成组维修策略,其无法将系统短期的状态信息纳入决策过程,而且采用固定的维修时间间隔,容易出现部件过维修或者欠维修的情况,使维修经济性降低;Feng等^[11]针对多个外场可更换件,建立了一种基于CBM的两层动态维修优化模型,但该模型并没有直接将成组维修的理念引入决策过程,可能造成停机频繁,飞机使用率降低. 在多部件成组维修决策建模和优化方面,Dekker等^[12]、Hai等^[13]和Do等^[14]提出了不同的多部件动态成组维修决策模型,但在建模过程中都不考虑维修用时,以减小模型复杂度;Aizpurua等^[15]、Barron等^[16]和Tian等^[17]在多部件动态成组维修决策建模过程中,不考虑同一个部件在维修决策窗口内可能出现的多次维修,以降低模型求解难度.

综上所述,在飞机多疲劳结构维修决策优化方法上还存在以下难点和待研究的问题:

- 1) 如何处理载荷、工况环境等因素对结构裂纹扩展的影响,建立一个能够反映结构的性能衰退过程不确定性的可靠度模型;
- 2) 现有的维修模型往往将结构的停机维修用时忽略不计,以减小模型的复杂度和求解难度,但会给理论计划维修时间与实际维修时间之间带来误差,且窗口内维修活动越多误差累积越大;
- 3) 现有的维护规划模型普遍专注于设备全寿命优化,这样的建模策略虽然可以获得全局最优的设备维护时间间隔,但其存在决策时间跨度过长、面对设备衰退演化的随机波动反应性弱、制定的维修计划通常无法进行动态的调整以适应复杂多变的使用环境,从而使飞机的安全性和维修经济性降低.

1 飞机多疲劳结构动态成组维修决策建模

1.1 模型描述

考虑一架飞机共有 n 个疲劳结构装有健康监测设备. 针对同一结构在相同或相近区域可能出现多个疲劳裂纹的情况,如果将各裂纹之间可能存在的耦合作用纳入维修决策,则会使建立的成组维修决策模型过于复杂,因此本文对同一结构的多个疲劳裂纹进行独立考虑,结构的维修时间由多个疲劳裂纹中最危险的一个决定(剩余寿命最小). 针对这 n 个疲劳结构的维修,需要根据监测或诊断得到的实时健康状态信息,制定合理的疲劳结构动态成组维修方案,以获得最低的维修成本. 为了方便描述本文建立的飞机疲劳结构动态成组维修决策模型,模型中各参数表达如下:

1) i 表示疲劳结构的序号, a_i 表示疲劳结构 i 的裂纹长度, $a_{i,cr}$ 表示疲劳结构 i 的临界裂纹长度.

2) 疲劳结构的性能衰退过程用疲劳裂纹扩展过程表示疲劳结构之间的裂纹扩展模型(性能衰退过程)不尽相同,当 a_i 扩展到 $a_{i,cr}$ 时,疲劳结构 i 失效.

3) 疲劳结构的实时裂纹长度可以由结构健康监测系统获得, $a_i(t_0)$ 表示当前飞行时刻 t_0 获得的疲劳结构 i 的裂纹长度,疲劳结构 i 在未来飞行时刻 t 时的裂纹长度 $a_i(t)$ 可以根据当前飞行时刻获得的裂纹长度 $a_i(0)$ 以及裂纹扩展模型获得.

4) 疲劳结构的维修费用由维修级别决定,本文疲劳结构的维修级别分为预防性维修和修复性维修两级,疲劳结构 i 的维修费用 cost_repair_i 与维修级别和裂纹长度 a 存在如下关系:

$$\text{i) } \text{cost_repair}_i(a(t)) = Cp_i, \forall a(t) < a_{i,cr}.$$

当 t 时刻疲劳结构裂纹长度 $a(t)$ 小于临界裂纹长度 $a_{i,cr}$ 时进行预防性维修, Cp_i 为疲劳结构 i 的预防性维修成本.

$$\text{ii) } \text{cost_repair}_i(a(t)) = Cc_i, \forall a(t) \geq a_{i,cr}.$$

当 t 时刻疲劳结构裂纹长度 $a(t)$ 大于临界裂纹长度 $a_{i,cr}$ 时进行修复性维修, Cc_i 为疲劳结构 i 的修复性维修成本.

5) 单个疲劳结构的维修资源准备成本为 S . 当多个疲劳结构进行成组维修时,考虑到维修资源可以共享,只需要单个疲劳结构的维修资源准备成本.

6) 维修规划窗口(维修计划优化时间区间)定义为 HP , n 个疲劳结构的维修规划在 HP 内进行.

7) n 个疲劳结构分为 $m(1 \leq m \leq n)$ 个维修组进行成组维修,其包含多个不同的疲劳结构在时间点 $t_{G_u}^*$ 一起进行维修,即 G_u 是疲劳结构集合 $\{1, 2, \dots, n\}$

的一个非空子集, $m = 1$ 表示 n 个疲劳结构通过单次成组进行维修, $m = n$ 表示 n 个疲劳结构单独维修, 不存在成组维修。

8) 将 m 个维修组 $G_u (u = 1, 2, \dots, m)$ 定义为成组维修架构 SG。SG 中维修组的维修时间具有互异性, 即 $t_{G_j}^* \neq t_{G_l}^* (\forall j, l \in \{1, 2, \dots, m\}, j \neq l)$ 。SG 中所有维修组包含 n 个结构的维修计划, 且同一个疲劳结构不能出现在两个不同的维修组中, 即

$$\begin{aligned} & \bigcup_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} G_j = \{1, 2, \dots, n\}, \\ & \bigcap G_j \cap G_l = \emptyset, \forall j, l \in \{1, 2, \dots, m\}, j \neq l. \end{aligned}$$

9) 疲劳结构 i 的预防性维修需要的时间(包括维修资源准备时间、结构修复或者更换等维修活动需要的时间)定义为 d_i 。由于停机维修会使飞机的使用率下降, 本文引入结构维修停机损失成本(生产损失成本) $C_i^d = dc^d$, 其中 c^d 表示飞机单位时间停机损失成本。当多个疲劳结构成组维修时, 认为维修资源充足, 多个疲劳结构可以同时进行维修, 成组维修结构中最大的维修用时即为该次停机维修所需的维修用时, 且停机损伤成本不进行累加, 由最大的维修用时决定, 即

$$\begin{aligned} d_{G_u} &= \max\{d_{u_1}, d_{u_2}, \dots, d_{u_n}\}, u_1, u_2, \dots, u_n \in G_u, \\ C_{G_u}^d &= d_{G_u} c^d. \end{aligned} \quad (1)$$

n 个疲劳结构的维修决策还需要考虑以下几个系统约束:

i) 由于频繁的停机维修, 会降低飞机的使用率, 造成飞机无法保证日常任务的执行, 需要保证两次连续停机维修时间之间保持一个最小的时间间隔 δ ;

ii) 由于各结构的性能衰退速度(疲劳裂纹扩展速率)有很大差异, 可能出现同一个疲劳结构在 HP 内需要进行多次维修的情况, 对于同一个疲劳结构在 HP 内的多个维修活动不能进行合并成组维修。

1.2 飞机多疲劳结构成组维修决策优化模型

成组维修通过在同一时间对多个疲劳结构进行维修, 使维修资源能够共享且停机次数减少, 间接地减少维修资源准备成本和停机损失成本, 从而使飞机多个疲劳结构的维修费用得到优化。

如果 n 个疲劳结构都根据其各自在 HP 内的最优维修时间 θ_i^* 进行维修, 且不存在 $\theta_i^* \neq \theta_j^*, j \neq i$, 则疲劳结构 i 的单独维修费用表示如下

$$C_i^p = \sigma_i(\theta_i^*) + C_i^d + S. \quad (2)$$

其中: $\sigma_i(\theta_i^*)$ 为疲劳结构 i 在时间点 θ_i^* 进行维修的预

期维护成本(详见第 2.2.1 节的式(11)), C_i^d 为停机损失成本。

假设在 HP 内存在一个包含 m 个维修组 $G_u (u = 1, 2, \dots, m)$ 的成组维修架构 SG, 则 n 个疲劳结构的维修费用 J_1 表示如下:

$$J_1 = \sum_{u=1}^m \sum_{i \in G_u} \sigma_i(t_{G_u}^*) + mS + \sum_{u=1}^m C_{G_u}^d. \quad (3)$$

其中: $\sum_{u=1}^m \sum_{i \in G_u} \sigma_i(t_{G_u}^*)$ 表示 m 个维修组的预期维护成本之和; $t_{G_u}^*$ 表示第 u 个维修组的维修时间; mS 表示 m 次停机的维修资源准备成本之和; $\sum_{u=1}^m C_{G_u}^d$ 表示 m 次维修停机损失成本之和。

采用成组维修策略, 维修组 G_u 中的疲劳结构节省的维修成本表示如下:

$$C_{G_u} = (\text{card}(G_u) - 1)S - \sum_{i \in G_u} h_i(\theta_i^*, \Delta t_i^*). \quad (4)$$

其中: $\text{card}(G_u)$ 表示维修组 G_u 中疲劳结构的个数; $\Delta t_i^* = |t_{G_u}^* - \theta_i^*|$ 表示疲劳结构 i 的维修时间调整量; $h_i(\theta_i^*, \Delta t_i^*)$ 表示疲劳结构 i 由于维修时间从 θ_i^* 调整到 $t_{G_u}^*$ 所带来的惩罚成本(详见第 2.2.4 节的式(20)); C_{G_u} 表示维修组 G_u 节省的维修成本。

由式(4)可知, 采用成组维修架构 SG 节省的维修成本 J_2 表示为

$$J_2 = \sum_{u=1}^m C_{G_u}. \quad (5)$$

多结构成组维修优化的目标, 即在 HP 内寻找一个最优的成组维修架构 SG 能够最小化 J_1 或最大化 J_2 。

2 飞机多疲劳结构动态成组维修决策优化

基于滚动时间轴模型, 本文提出了一个动态成组维修决策优化方法求解建立的飞机多疲劳结构成组维修决策优化模型, 以获得最优的成组维修架构 SG。所提出的动态成组维修决策优化方法主要分为以下步骤(如图 1 所示)。

Step 1: 疲劳结构可靠度评估 → 确保各结构在失效之前进行预防性维修。

Step 2: 单个疲劳结构维修决策优化 → 获得在不考虑成组维修情况下各疲劳结构的最优维修时间间隔。

Step 3: 动态成组维修决策优化 → 获得最优的成组维修架构 SG。

Step 4: 维修决策时间窗口滚动 → 达到无限规划周期。

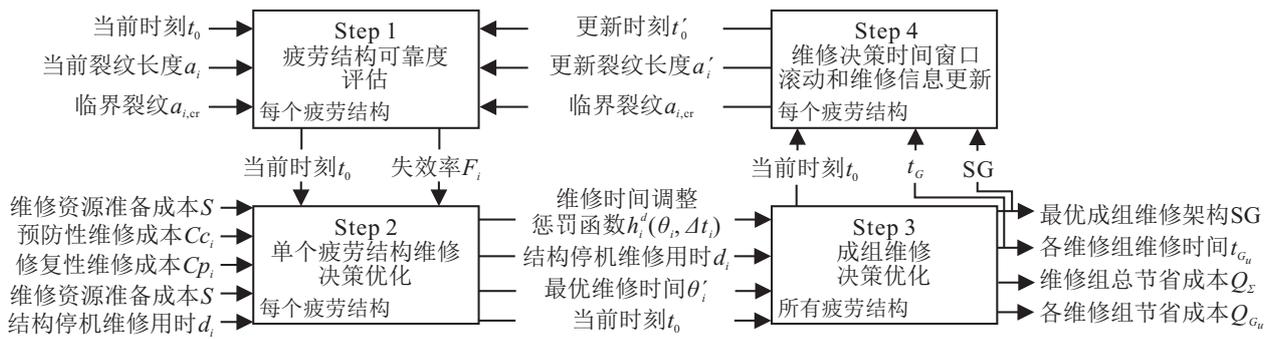


图1 动态成组维修决策优化过程

2.1 基于Gamma过程的疲劳结构可靠度建模

Step 1 通过利用结构健康监测技术获得的当前各疲劳结构的裂纹信息评估结构在HP内的可靠度,以确保各结构在失效之前进行预防性维修。

飞机疲劳结构在实际使用过程中,由于载荷形式多样,以及工况环境复杂多变,结构裂纹扩展存在不同程度的不确定性.如何考虑这些不确定因素是预测疲劳结构剩余寿命和制定结构维修计划中至关重要的一个问题^[18].传统的方法是将影响结构疲劳裂纹扩展的各种因素当作随机变量,并假设其服从给定的概率分布,通过采用蒙特卡洛模拟得到疲劳裂纹的扩展过程.由于在飞机服役过程中,获取影响结构疲劳裂纹扩展各种因素的概率分布及其参数比较困难,通常采用基于随机过程的建模方法来反映载荷、工况环境等因素对结构裂纹扩展的影响,以更真实地反映结构的性能衰退过程.Gamma过程作为一种考虑独立、非负的退化增量的随机过程,适合模拟具有微小增量的累积渐变过程,如疲劳、锈蚀和蠕变^[19].因此,本文将结构的疲劳裂纹扩展过程当作Gamma过程,并假设疲劳结构*i*的裂纹长度 a_i 为满足Gamma分布的随机变量, $a_i(t) \sim \text{Ga}(\alpha(t), \beta)$,其概率密度函数为

$$f_i(a) = \text{Ga}(\alpha(t), \beta) = \frac{\beta^{\alpha(t)}}{\Gamma(\alpha(t))} a^{\alpha(t)-1} \exp(-\beta a) I_{0,+\infty}(a). \quad (6)$$

其中: $\alpha(t)$ 和 β 分别为Gamma分布的形状参数和尺度参数,且 $\alpha(t)$ 表示右连续、单调递增且恒大于零的退化增长方程, $\alpha(t) = 0$;当 $a \in (0, +\infty)$ 时, $I_{0,+\infty}(a) = 1$;当 $a \notin (0, +\infty)$ 时, $I_{0,+\infty}(a) = 0$.考虑到结构疲劳裂纹长度的单调递增非负特性,本文取 $I_{0,+\infty}(a) = 1$. $\Gamma(\alpha(t))$ 为不完全Gamma函数,表示为

$$\Gamma(\alpha(t)) = \int_{z=\beta a_{i,cr}}^{+\infty} z^{\alpha(t)-1} \exp(-z) dz. \quad (7)$$

当疲劳结构*i*($i = 1, 2, \dots, m$)的裂纹扩展到 $a_{i,cr}$ 时,结构失效,由式(6)和当前时刻 t_0 获得的裂纹

长度 $a_i(t_0)$ 可得*t*时刻疲劳结构*i*的失效率为

$$F_i(t|a_i(t_0)) = P\{a_i(t) \geq a_{i,cr}\} = \int_{z=\beta a_{i,cr}}^{+\infty} z^{\alpha(t)-1} \exp(-z) dz = \frac{\Gamma(\alpha_i(t), \beta(a_{i,cr} - a_i(t_0)))}{\Gamma(\alpha_i(t))}. \quad (8)$$

其中: $\alpha(t)$ 与疲劳裂纹长度之间的关系可以表示为 $\alpha(t) = \beta a_i(t)$; $\Gamma(\alpha_i(t), \beta a_{i,cr})$ 为

$$\Gamma(\alpha_i(t), \beta a_{i,cr}) = \int_{z=\beta a_{i,cr}}^{+\infty} z^{\alpha(t)-1} \exp(-z) dz. \quad (9)$$

由于式(7)难以通过积分得到计算结果,一般采用Gamma采样方法进行迭代模拟计算失效率。

2.2 单疲劳结构维修决策优化

在这一步骤中,主要解决以下几个问题:

- 1) 确定各疲劳结构在不考虑经济相关性下的最优维修时间。
- 2) 确定维修规划窗口HP,所有疲劳结构在HP内必须保证完成一次维修活动。
- 3) 确定HP内需要规划的疲劳结构维修活动。
- 4) 建立结构维修成本惩罚模型。

2.2.1 单疲劳结构维修决策优化

利用无限规划周期模型确定各疲劳结构在不考虑经济相关性下单独进行维修的最优时间.根据最小维修策略(维修时间窗口内维修工作量最小)和式(2),疲劳结构*i*在 $[t_0, t]$ 内的期望劣化成本表示如下:

$$E_i(t|a_i(t_0)) = C_{c_i} \int_{t_0}^t f_i(x|a_i(t_0)) dx. \quad (10)$$

其中: $f_i(x|a_i(t_0))$ 为疲劳结构*i*在初始裂纹长度为 $a_i(t_0)$ 下的裂纹长度概率密度函数,且 $f_i(x|a_i(t_0)) = F'_i(x|a_i(t_0))$; $\int_{t_0}^t f_i(x|a_i(t_0)) dx$ 为疲劳结构*i*在 $[t_0, t]$ 内的故障次数期望值; E_i 为疲劳结构*i*的期望劣化成本。

如果在*t*时刻对疲劳结构*i*进行预防性维修,则疲劳结构*i*在 $[t_0, t]$ 内的预期维护成本表示为

$$\sigma_i(t|a_i(t_0)) = C_i^p + E_i(t) =$$

$$C_i^p + Cc_i \int_{t_0}^t f_i(x|a_i(t_0))dx, \quad (11)$$

其中 σ_i 为疲劳结构 i 的期望预期维护成本。

根据更新理论,疲劳结构 i 无限规划周期内工作的平均维护费用表示为

$$\phi_i(t|a_i(t_0)) = \frac{\sigma_i(t)}{t + d_i} = \frac{C_i^p + Cc_i \int_{t_0}^t f_i(x|a_i(t_0))dx}{t + d_i}. \quad (12)$$

其中: d_i 为疲劳结构 i 的维修用时; ϕ_i 为疲劳结构 i 的平均维护费用。

以无限规划周期内的平均维护费用最小为目标,疲劳结构 i 的最优维修时间 θ_i^* 推导如下:

$$\theta_i^* = \arg \min_t \phi_i(t|a_i(t_0)) \Rightarrow \frac{d\phi_i(t|a_i(t_0))}{dt} \Big|_{t=\theta_i^*} = 0. \quad (13)$$

令 $d_i = 0$ (忽略维修用时), 此时疲劳结构 i 的最优维修时间 θ_i^{**} 可以由下式得到:

$$Cc_i f_i(\theta_i^{**}|a_i(t_0))\theta_i^{**} - C_i^p - Cc_i \int_{t_0}^{\theta_i^{**}} f_i(x|a_i(t_0))dx = 0. \quad (14)$$

令

$$g(y) = Cc_i f_i(y|a_i(a_0))(y + d_i) - (C_i^p + Cc_i) \left(\int_{t_0}^y f_i(x|a_i(t_0))dx \right),$$

由 $f_i(x|a_i(t_0)) = 0$ (t_0 时刻疲劳结构的裂纹长度为确定值 $a_i(t_0)$, 所以裂纹长度概率分布密度函数为 0) 可知, $g(t_0) = -C_i^p < 0$. 对 $g(y)$ 求导, 可得

$$g'(y) = Cc_i f_i'(y|a_i(t_0))(y + d_i) > 0, \forall y > t_0.$$

将 θ_i^{**} 和式 (14) 代入 $g(y)$, 可得

$$g(\theta_i^{**}) = Cc_i f_i(\theta_i^{**}|a_i(t_0))(\theta_i^{**} + d_i) - \left(C_i^p + Cc_i \int_{t_0}^{\theta_i^{**}} f_i(x|a_i(t_0))dx \right) = Cc_i f_i(\theta_i^{**}|a_i(t_0))d_i > 0. \quad (15)$$

由 $g(t_0), g'(y) > 0, \forall y > t_0, g(\theta_i^{**}) > 0$ 可知, 式 (13) 在区间 $[t_0, \theta_i^{**}]$ 内存在唯一解 θ_i^* . 由式 (12) 可知, $\phi_i''(t) > 0$, 进一步表明 θ_i^* 存在且唯一。

令 $a_i(t_0) = 0$, 即 t_0 时刻疲劳结构 i 如新, 将此时疲劳结构 i 的名义最优维修时间表示为 o_i^* . 记 $\bar{\phi}_i^* = \phi_i(o_i^*|a_i(t_0) = 0)$ 表示疲劳结构 i 无限规划周期内的最小平均维护费用。

2.2.2 基于最优维修时间间隔的维修窗口 HP 确定

依据动态成组维修的滚动时间轴模型, 将无限规划周期分解成一系列连续的动态短期维修规划窗口. 当前维修规划窗口 $HP = [t_{begin}, t_{end}]$ 是依据当前时刻 t_0 和第 2.2.1 节中获得的各结构最优维修时间 $\{\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*\}$ 确定的, 所有疲劳结构在 HP 内必须保证完成一次维修活动. 将当前时刻 t_0 定义为 HP 的起始时间, 即 $t_{begin} = t_0$. 各疲劳结构从 t_0 时刻开始, 完成第 1 次维修活动的时间表示为

$$\theta_i^1 = t_0 + \theta_i^* + \sum d_i^1, \quad (16)$$

其中 $\sum d_i^1$ 表示疲劳结构 i 在开始第一次维修活动时经历的总维修用时 (停机时间即其他疲劳结构维修用时之和). 通过以上分析, 为了保证 HP 内所有疲劳结构至少完成一次维修活动, 且保持短期维修规划的灵活性, 将 t_{end} 定义为 $t_{end} = \max\{\theta_1^1, \theta_2^1, \dots, \theta_n^1\}$. 图 2 为 3 个疲劳结构的 HP 定义过程.

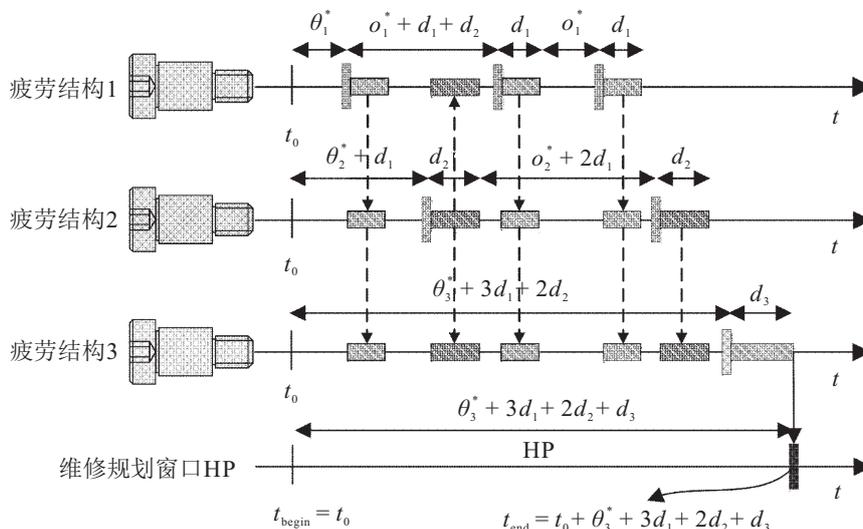


图 2 3 个疲劳结构的 HP 定义过程

取 $\theta_{\max}^* = \max\{\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*\}$ 为 n 个疲劳结构中在 HP 内最大的最优维修时间, 可知各疲劳结构在 HP 内需要进行的维修次数为

$$\text{num}_i = \text{INT}_-\left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta_i^*}{o_i^*}\right) + 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (17)$$

其中 $\text{INT}_-(\cdot)$ 表示向下取整函数, 如 $\text{INT}_-(0.7) = 0$. 由式(16)可知, 各疲劳结构在 HP 内完成最后一次维修活动的时间为

$$\theta_i^{\text{last}} = t_0 + \theta_i^* + (\text{num}_i - 1)o_i^* + \sum d_i^{\text{last}}. \quad (18)$$

其中: $\theta_i^* + (\text{num}_i - 1)o_i^*$ 为疲劳结构 i 在 HP 内正常工作的时间; $\sum d_i^{\text{last}}$ 为疲劳结构 i 在 HP 内经历的总维修用时(停机时间, 包括其他疲劳结构维修用时).

传统的动态成组维修模型维修窗口 HP 定义如图3所示, 一般部件维修用时忽略不计, HP 定义为所有部件中最大的最优维修时间(图3中 θ_3^*), 且在 HP 内各部件只考虑维修一次.

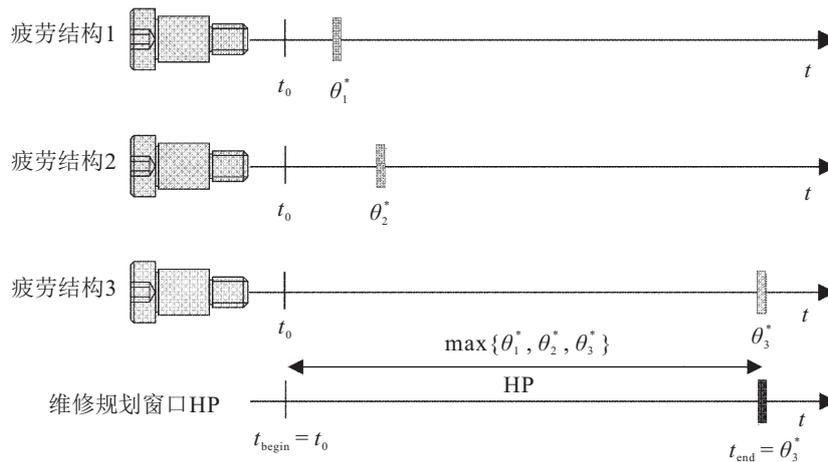


图3 现有方法的动态成组维修模型维修窗口 HP 定义

由图2和图3可知, 与传统 HP 定义方法相比, 本文提出的 HP 定义方法具有以下优点:

1) 避免了传统 HP 内只考虑部件一次维修, 没有将部件之间的性能衰退速率差异性纳入考虑(如图2所示, 由于疲劳结构1和疲劳结构3的性能衰退速度不同, 疲劳结构1在 HP 内需要进行3次维修, 而疲劳结构1只需维修一次)的缺点;

2) 避免了传统 HP 定义忽略维修用时导致的理论计划维修时间与实际维修时间存在误差, 且维修活动越多误差累积越大的缺陷.

2.2.3 HP 内疲劳结构维修活动确定

由于各疲劳结构的性能衰退速度(疲劳裂纹扩展速率)存在差异, 对于衰退速度较快的疲劳结构可能出现在 HP 内需要进行多次维修的情况. 如图2所示, 疲劳结构1需要在 HP 内进行3次维修. 各疲劳结构在 HP 内各次维修活动的最优维修时间表示如下:

$$\theta_i^r = t_0 + \theta_i^* + (r - 1) * o_i^* + \sum d_i^r; \quad \text{s.t. } r \geq 1, \max(\theta_i^r) \leq t_{\text{end}}. \quad (19)$$

其中: $\theta_i^r (r \geq 1)$ 表示疲劳结构 i 在 HP 内第 r 次维修活动的最优维修时间; $\sum d_i^r$ 表示疲劳结构 i 在执行

第 r 次维修活动之前经历的总维修用时. 如图2所示, 疲劳结构1在 HP 内经历了3次维修, 各次维修的最优维修时间分别为 $t_0 + \theta_1^*$, $t_0 + \theta_1^* + o_1^* + d_1 + d_2$ 和 $t_0 + \theta_1^* + 2o_1^* + 2d_1 + d_2$.

2.2.4 HP 内维修活动调整惩罚成本建模

如果各疲劳结构都按上述所得的最优维修时间进行单独维修, 则会造成频繁的停机维修, 使维修经济性降低. 因此需要调整部分疲劳结构的维修时间, 将尽量多的疲劳结构进行科学合理的成组维修, 以减少停机维修次数, 提高维修经济性. 疲劳结构维修时间的调整会带来以下影响:

- 1) 维修时间提前, 造成疲劳结构剩余寿命浪费;
- 2) 维修时间延后, 提高疲劳结构失效风险.

为了找到维修时间调整的最佳平衡点, 使疲劳结构能够在保证安全的前提下达到最优的维修经济性, 建立一个惩罚函数. 假设疲劳结构 i 的第 r 次维修时间由 θ_i^r 调整为 $\theta_i^r + \Delta t_i^r$, 由于调整所带来的额外成本可以通过惩罚函数 $h_i(\theta_i^r, \Delta t_i^r)$ 获得, 有

$$h_i(\theta_i^r, \Delta t_i^r) = \sigma_i(\theta_i^r + \Delta t_i^r | a_i(t_0)) - (\sigma_i(\theta_i^r | a_i(t_0)) + \Delta t_i^r \bar{\phi}_i^*); \quad \text{s.t. } \Delta t_i^r > -(\theta_i^r - \theta_i^{r-1}). \quad (20)$$

其中: $\Delta t_i^r \bar{\phi}_i^*$ 为由于延长或缩减疲劳结构使用寿命带来的成本;约束 $\Delta t_i^r > -(\theta_i^r - \theta_i^{r-1})$ 保证疲劳结构*i*调整后的第*r*次维修活动维修时间不早于第*r*-1次维修活动维修时间。

将式(11)代入(20),可得

$$h_i(\theta_i^r, \Delta t_i^r) = C_{C_i} \left(\int_{t_0}^{\theta_i^r + \Delta t_i^r} f_i(x|a_i(t_0)) dx - \int_{t_0}^{\theta_i^r} f_i(x|a_i(t_0)) dx \right) - \Delta t_i^r \bar{\phi}_i^*; \tag{21}$$

s.t. $\Delta t_i^r > -(\theta_i^r - \theta_i^{r-1})$.

式(21)建立的惩罚函数将在动态成组维修优化过程中用来确定能够得到最优维修费用的成组维修架构SG。

2.3 多疲劳结构动态成组维修决策优化算法

在这一步骤中,对Step2确定的HP内需要规划的疲劳结构维修活动进行动态成组维修,以最小化HP内*n*个疲劳结构的维修费用。

将Step3中确定的HP内所有需要规划的维修活动按照维修时间进行升序排列,记为 t_i^{sort} ($t_i^{\text{sort}} < t_{i+1}^{\text{sort}}, i \in \{1, 2, \dots, k\}$),其中*k*表示HP内需要规划的维修活动个数.假设现有几个维修活动在维修组 G_u 中进行成组维修,维修组 G_u 在*t*时刻维修的惩罚函数表示为 $H_{G_u}(t)$,则维修组 G_u 的最优成组维修时间 t_{G_u} 可以通过最小化 H_{G_u} 获得,表示为

$$H_{G_u}(t_{G_u}) = H_{G_u}^* = \min_t \left(\sum_{i \in G_u} h_i(\theta_i^t, \Delta t_i^t = |t - \theta_i^t|) \right); \tag{22}$$

s.t. $\Delta t_i^t > -(\theta_i^t - \theta_i^{t-1})$.

由于维修组 G_u 中的维修活动都在 t_{G_u} 时刻进行,成组维修带来的效益可以通过节省的维修资源准备成本和由于调整维修时间带来的惩罚成本得到,具体为

$$Q_{G_u}(t_{G_u}) = (\text{card}(G_u) - 1)S - H_{G_u}^*. \tag{23}$$

如果 $Q_{G_u}(t_{G_u}) > 0$,则认为维修组 G_u 是可行的成组维修方案。

对*n*个疲劳结构进行动态成组维修的目标是确定一个最优的成组维修架构SG,使*n*个疲劳结构在HP内的总维修费用最小.成组维修架构SG能够节省的最大维修费用为

$$Q_{\Sigma} = \sum_{G_u \in \text{SG}} Q_{G_u}. \tag{24}$$

为了确定SG, Dekker等^[12]提出了基于滚动时间轴的动态成组维修算法.该算法针对HP内只进行一次维修活动的多部件成组维修,维修架构中进行成组

维修部件的维修时间是连续的.本文对该算法进行了改进,使其能够处理以下约束:

1) 保证两次连续停机维修时间之间保持一个最小的时间间隔,以避免频繁的停机维修,降低飞机的使用率。

2) 对于同一个疲劳结构在HP内的多个维修活动不能够进行合并成组维修。

对于每一个维修活动*i* ($i \in \{1, 2, \dots, k\}$),定义一个维修时间调整区间 I_i ,当维修活动*i*在该区间内执行时,可以通过成组维修达到减少维修成本的目的.调整区间 I_i 具体定义如下:

$$I_i = [t_i^{\text{sort}} - \Delta t_i^-, t_i^{\text{sort}} + \Delta t_i^+], \tag{25}$$

其中 Δt_i^- 和 Δt_i^+ 分别为 $h_i(t_i^{\text{sort}}, \Delta t_i) - S = 0$ 对应的最小解和最大解。

Dekker证明了当维修组 G_u 中的维修活动调整区间的交集 $\bigcap_{i \in G_u} I_i$ 不为空,且 G_u 的最优维修时间属于 $\bigcap_{i \in G_u} I_i$ 时, G_u 能够成为最优成组维修架构SG的一个部分.根据实际工程需要,本文对Dekker论据进行了扩充, G_u 能够成为最优成组维修架构SG的一个部分,当且仅当 G_u 满足以下条件:

- 1) $\bigcap_{i \in G_u} I_i \neq \emptyset$;
- 2) $t_{G_u} \in \bigcap_{i \in G_u} I_i$;
- 3) G_u 中的维修活动必须是针对不同疲劳结构的;
- 4) G_u 中维修活动的维修时间是连续的;
- 5) 假设维修组 $G_u = \{i, \dots, j\}$, $G_{u_1} = \{i + 1, \dots, j\}$, $G_{u_2} = \{i, \dots, j - 1\}$, 存在 $Q_{G_u} < Q_{G_{u_1}}, Q_{G_u} < Q_{G_{u_2}}$, 即 G_u 中不存在一个子集比 G_u 能够节省更多的维修费用。

通过确定在HP内满足以上条件的所有维修组,即可确定最优成组维修架构SG。

2.4 维修决策时间窗口滚动

通过上述步骤,可以获得*n*个疲劳结构在短期维修时间窗口HP内的最优维修计划.为了使维修计划能够适应复杂多变的动态环境,每执行完一次停机维修活动,就开始进行新的维修决策,使维修决策时间窗口不断地滚动,维修计划能够自适应地动态调整,达到无限规划周期的效果.如图4所示,在第1次动态成组优化过程中,HP内最优维修架构SG包含3个维修组 G_1 、 G_2 和 G_3 ,维修时间分别为 $t_{G_1}, t_{G_2}, t_{G_3}$,其中维修组 G_1 中疲劳结构{1, 3, 7}进行成组维修, G_2 中疲劳结构{2, 5, 8, 10}进行成组维修, G_3 中疲劳结构{4, 6, 9}进行成组维修;当飞机累积飞行时间到 t_{G_1}

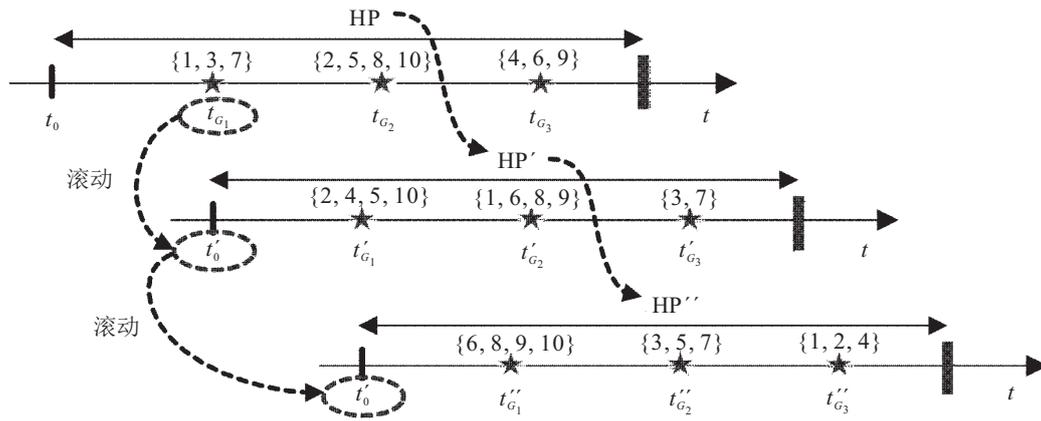


图4 维修决策时间窗口滚动

时,按照成组维修计划对维修组 G_1 中的疲劳结构进行维修,维修活动结束后更新飞机结构的状态信息,将当前维修规划窗口HP滚动到HP'并按照第2.1节~第2.3节重新进行动态成组维修优化,得到新的维修组 G'_1, G'_2, G'_3 .

3 实例验证

3.1 飞机疲劳结构维修参数信息

本文以一架飞机有10个疲劳结构需要进行维修计划安排为例,验证所提出的动态成组维修决策优化方法.将飞行时间离散化,各疲劳结构参数信息如表1所示.由于飞行任务的要求,两次连续维修活动之间的时间间隔 δ 要求大于30飞行小时(以每天飞行5小时计算,为6个工作日).飞机单位时间停机损失成本 c^d 为600元/小时,单个疲劳结构的维修资源准备成本 S 为3400元.将当前时间 t_0 设置为0,以方便计算.

3.2 疲劳结构可靠度评估

将表1中各疲劳结构的损伤参数信息代入式(7),可得各疲劳结构在不同飞行时间下的失效概率.表2为各疲劳结构预测的剩余寿命.其中: RUL_1 表示疲劳结构裂纹长度为表1中 $a_i(t_0)$ 时的剩余寿命, RUL_2

表示疲劳结构裂纹长度为0时的剩余寿命.

3.3 单个疲劳结构维修决策优化结果

3.3.1 各疲劳结构最优维修时间

将表1和表2数据代入式(9)~(12),可得各疲劳结构在裂纹长度为 $a_i(t_0)$ ($i = 1, 2, \dots, 10$) 时对应的最优维修时间 θ_i^* 和短期内的最小平均维护费用,以及裂纹长度为0时对应的名义最优维修时间 o_i^* 和无限规划周期内的最小平均维护费用 $\bar{\phi}_i^*$,结果如表3所示.

3.3.2 HP及疲劳结构维修活动

由表3中的 θ_i^* 数据可得,疲劳结构1在所有结构中最后一个完成第一次维修活动,所以HP的结束时间 t_{end} 取为 θ_1^1 计算如下:

$$\theta_1 = t_0 + \theta_1^* + \sum d_1^1 = 0 + 410 + 522 = 932. \quad (26)$$

其中

$$\sum d_1^1 = 2d_2 + 2d_3 + d_4 + 2d_5 + 2d_6 + d_7 + d_8 + d_9 + d_{10} = 522.$$

将表3数据代入式(19),得到当前维修规划窗口HP内需要进行规划的维修活动信息,结果见图5.

表1 各疲劳结构的参数信息

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	0.42	0.58	0.55	0.38	0.50	0.54	0.41	0.38	0.35	0.32
β	0.12	0.32	0.28	0.22	0.32	0.30	0.21	0.16	0.22	0.18
Cp_i /万元	9.8	1.1	6.5	8.5	8.0	9.2	1.20	1.16	9.6	9.4
Cc_i /万元	2.4	2.3	1.2	1.45	1.38	1.46	2.65	2.56	2.24	2.10
d_i /h	36	36	18	36	54	36	54	54	54	36
$a_i(t_0)$ /mm	5.0	2.2	2.0	8.6	7.4	2.8	3.2	6.5	12.4	16.5
$a_{i,cr}(t_0)$ /mm	28	30	32	34	38	35	37	32	34	30

表2 各疲劳结构剩余寿命

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
失效时间 RUL_1 /h	568	219	274	422	272	279	520	556	400	349
失效时间 RUL_2 /h	705	231	290	542	329	300	561	680	587	688

表3 各疲劳结构的最优维修时间和最小平均维护费用

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ_i^*/h	568	219	274	422	272	279	520	556	400	349
α_i^*/h	705	231	290	542	329	300	561	680	587	688
$\phi_i^*/(\text{元}/\text{小时})$	102.0	228.6	115.4	114.3	202.7	168.6	123.4	115.4	158.8	153.6
$\bar{\phi}_i^*/(\text{元}/\text{小时})$	84.8	215.6	108.4	86.8	167.0	156.6	113.5	93.3	105.4	71.8

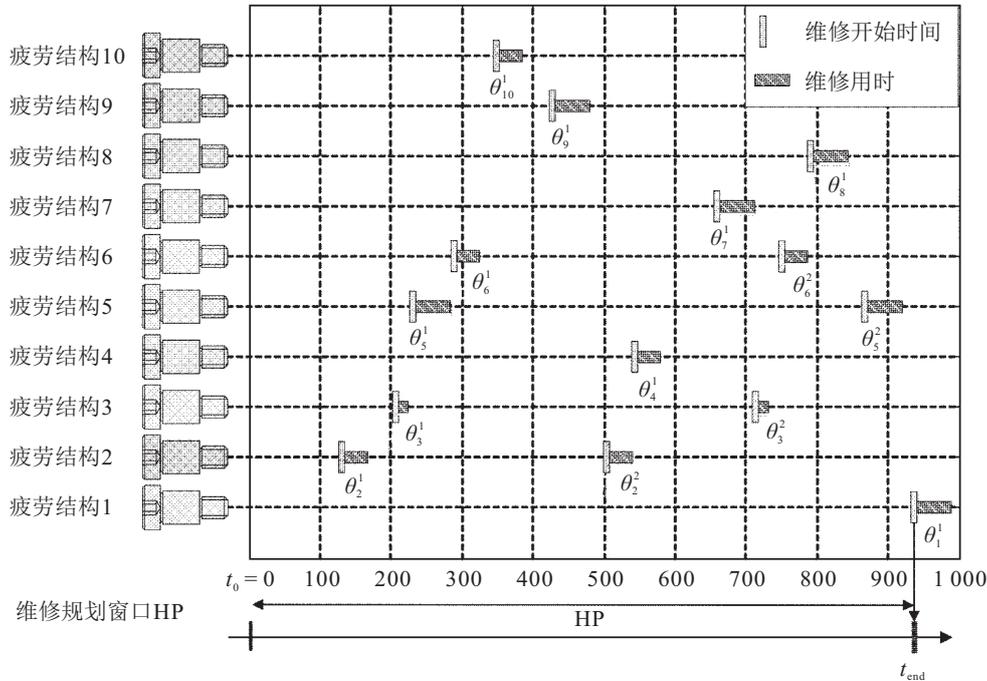


图5 HP内需要进行规划的维修活动

3.4 成组维修优化结果

由图5可见,如果各疲劳结构都按照各自的最优维修时间安排维修活动,则会造成频繁停机,维修经济性下降,飞机使用率降低.因此需要在HP内对14个维修活动进行动态成组,以减少停机维修次数,充分利用各疲劳结构之间维修活动的经济相关性,减少维修资源准备成本.运用Dekker提出的动态成组规划算法,对14个维修活动进行动态成组,整个优化过程如表4所示.

由表4的数据,利用回溯法可得最优成组维修架构 $SG = \{G_1 = \{1\}, G_2 = \{2, 3, 4, 5\}, G_3 = \{6, 7, 8\}, G_4 = \{9, 10, 11, 12, 13\}, G_5 = \{14\}$. 其中维修组 G_1 只包括维修活动1,节省成本为0;维修组 G_2 包括维修活动 $\{2, 3, 4, 5\}$,节省成本为 $Q_{G_2} = 8232.1$;维修组 G_3 包括维修活动 $\{6, 7, 8\}$,节省成本为 $Q_{G_3} = 5476.1$;维修组 G_4 包括维修活动 $\{9, 10, 11, 12, 13\}$,节省成本为 $Q_{G_4} = 9443.3$;维修组 G_5 只包括维修活动 $\{14\}$,节省成本为0;5个维修组总节省成本为 $Q_{\Sigma} = \sum_{u=1}^5 Q_{G_u} = 23151.5$.

表4 14个维修活动动态成组优化过程

迭代次数	获得的最优维修组	维修组节省成本	总节省成本
1	{1}	0	0
2	{1, 2}	51.3	51.3
3	{2, 3}	3365.5	3365.5
4	{2, 3, 4}	6701.7	6701.7
5	{2, 3, 4, 5}	8232.1	8232.1
6	{6}	0	8232.1
7	{6, 7}	2290.8	10522.9
8	{6, 7, 8}	5476.1	13708.2
9	{9}	0	13708.2
10	{9, 10}	3364.2	17072.4
11	{9, 10, 11}	5704.1	19412.3
12	{9, 10, 11, 12}	8695.9	22404.1
13	{9, 10, 11, 12, 13}	9443.3	23151.5
14	{14}	0	23151.5

由以上结果可知,通过对多个疲劳结构的维修活动进行动态成组维修,不仅减少了飞机的停机维修次数,提高了飞机的使用率,而且利用各维修活动之间的经济相关性,节省了维修资源准备成本,使维修经济性得到改善.

4 结论

针对传统多部件维修模型采用静态成组维修策略,不能将系统的实时状态信息纳入决策过程,制定

的维修计划无法进行动态调整以适应复杂多变的使用环境等问题,本文以维修费用和飞机使用率为优化目标,以可靠度为约束,建立了多疲劳结构动态成组维修决策优化模型,并提出了相对应的动态成组维修决策优化方法.该方法能够充分利用实时状态信息降低结构服役过程中损伤不确定性对维修计划制定的影响,实现“按需”维修,并通过对维修决策时间窗口进行不断滚动,使维修计划动态更新,以尽可能反映和跟踪结构健康状态的变化,达到最优的成组维修效果.案例研究表明,采用动态成组维修方法可以有效节省维修成本,减少停机次数,为多疲劳结构的动态维护优化决策提供理论依据.

参考文献(References)

- [1] Miner M A, Monica S. Cumulative-damage in fatigue[J]. *J of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): 159-164.
- [2] Zhang M, Ye Z, Xie M. A condition-based maintenance strategy for heterogeneous populations[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 77: 103-114.
- [3] 宋恩鹏, 陆华, 何刚, 等. 多轴疲劳寿命分析方法在飞机结构上的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(5): 906-911.
(Song E P, Lu H, He G, et al. Application of multi-axial fatigue life estimation methods to aircraft structural components[J]. *J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(5): 906-911.)
- [4] Park C, Peters K. Optimization of embedded sensor placement for structural health monitoring of composite airframes[J]. *AIAA J*, 2012, 50(11): 2536-2545.
- [5] Lin L, Luo B, Zhong S S. Development and application of maintenance decision-making support system for aircraft fleet[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114(C): 192-207.
- [6] Xia T B, Xi L F, Lee J, et al. Condition-base maintenance for intelligent effects and environmental condition[J]. *Int J of Production Research*, 2013, 51(15): 4585-4596.
- [7] 甘婕, 曾建潮. 考虑劣化状态的单机调度与维修决策集成模型[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 513-520.
(Gan J, Zeng J C. Integrated model of single-machine scheduling and maintenance decision for degrading state systems[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 513-520.)
- [8] 李大伟, 张志华, 钟强晖, 等. 复杂退化系统的组合维修策略优化[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 872-880.
(Li D W, Zhang Z H, Zhong Q H, et al. Optimal combination maintenance strategy of deteriorating complex system[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 872-880.)
- [9] 白芳. 民航发动机机群调度优化与视情维修决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学民航学院, 2009: 71-93.
(Bai F. Methods of scheduling and condition based maintenance decision making in civil aero engine fleet[D]. Nanjing: College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 71-93.)
- [10] 蔡景, 李鑫, 肖罗椿. 民用飞机成组维修方案优化模型研究[J]. *南京理工大学学报*, 2015, 39(3): 306-311.
(Cai J, Li X, Xiao L C. Optimization model of group maintenance scheme for civil aircraft[J]. *J of Nanjing University of Science and Technology*, 2015, 39(3): 306-311.)
- [11] Feng Q, Bi X, Zhao X J, et al. Heuristic hybrid game approach for fleet condition-based maintenance planning[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 166-176.
- [12] Wildeman R E, Dekker R, Smit A C J M. A dynamic policy for grouping maintenance activities[J]. *European J of Operational Research*, 1997, 99(3): 530-551.
- [13] Hai C V, Do P, Barros A, et al. Maintenance grouping strategy for multi-component systems with dynamic contexts[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 132(132): 233-249.
- [14] Do P, Hai C V, Barros A, et al. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 142: 56-67.
- [15] Aizpurua J I, Catterson V M, Papadopoulos Y, et al. Supporting group maintenance through prognostics-enhanced dynamic dependability prediction[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 168: 171-188.
- [16] Barron Y. Group maintenance policies for an R-out-of-N system with phase-type distribution[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 261(1/2): 79-105.
- [17] Tian Z, Liao H. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(5): 581-589.
- [18] 孙强, 岳继光. 基于不确定性的故障预测方法综述[J]. *控制与决策*, 2014, 29(5): 769-778.
(Sun Q, Yue J G. Review on fault prognostic methods based on uncertainty[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(5): 769-778.)
- [19] Noortwijk J M V. A survey of the application of gamma processes in maintenance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(1): 2-21.

作者简介

罗斌(1989—),男,博士生,从事故障诊断及维修决策的研究, E-mail: 454278276@qq.com;

林琳(1973—),女,教授,博士,从事人工智能、故障诊断等研究, E-mail: waiwaiyl@hit.edu.cn;

钟诗胜(1964—),男,教授,博士生导师,从事智能制造技术、故障诊断等研究, E-mail: zhongss@hit.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)