

基于遗传算法的民用航空发动机 送修方案决策研究

赵洪利¹, 陈铎文¹, 张智华²

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300)

摘 要: 为了给航空发动机在整个使用周期内送修方案的制定提供支持,降低发动机使用周期内的大修成本,针对单元体结构的民用航空发动机,基于制造商的发动机维修管理大纲,同时考虑时寿件寿命和单元体超出软时限导致性能衰退而造成发动机送修的情况,设定大修间隔不超过最大送修间隔,建立了一种以送修时间间隔为优化变量,以单位飞行小时送修成本最小为优化目标的发动机大修成本优化模型。采用遗传算法对模型进行求解,并以 V2500 发动机为例,对其 25 年里多次返厂送修方案进行了优化,表明当送修次数为 6 次时返厂大修成本最低,并给出了相应的各单元体的修理级别,该方法可为航空公司制定发动机送修方案提供参考。

关 键 词: 大修成本优化; 单元体; 时寿件; 送修时间间隔; 大修范围; 遗传算法

中图分类号: V239

文献标志码: A

Research of civil aviation engine overhaul workscope based on genetic algorithm

ZHAO Hongli¹, CHEN Duowen¹, ZHANG Zhihua²

(1. College of Aviation Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Sino-European Institute of Aviation Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To support the creation of engine overhaul workscope during its life cycle, and reduce the overhaul cost in its life cycle, based on the engine maintenance management program provided by manufactures, by setting the overhaul interval which is less than the maximum overhaul interval, and taking account of the life of life limited parts and soft time of modules, an engine overhaul cost optimization model was presented in the paper for a modular engine, which took the overhaul interval as the variable and the least shop visit cost per flight hour as a target, the genetic algorithm was used to solve this optimization problem. Taking V2500 as an example, its shop visit workscope was optimized, it gave that 6 shop visits in 25 years have the lowest cost, and the repair levels of each module were also created for each shop visit. It can provide a reference method for airlines to make engine workscope for shop visit.

收稿日期: 2016-07-06

作者简介: 赵洪利(1967—),男,副教授、硕士生导师,硕士,研究方向为航空发动机维修与维修管理。

引用格式: 赵洪利,陈铎文,张智华. 基于遗传算法的民用航空发动机送修方案决策研究[J]. 航空动力学报,2017,32(8):1962-1970. ZHAO Hongli, CHEN Duowen, ZHANG Zhihua. Research of civil aviation engine overhaul workscope based on genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 1962-1970.

Key words: overhaul cost optimization; module; life limit part; overhaul time interval; workscope; genetic algorithm

发动机在翼运行一段时间后,由于性能衰退和内部损伤等原因,都会返厂修理,以保障发动机运行的可靠性和经济性。发动机送修方案即修理范围不但会影响修后发动机的性能和机队可靠性,而且也会直接影响发动机的大修成本,进而影响航空公司的运营成本。有统计表明,在航空公司的运营成本中,飞机的维修成本约占 10%~15%,而在飞机维修成本中,发动机的维修成本大约可以占 35%~40%^[1],因此,航空公司关注的重点是发动机何时返厂送修以及如何制定合理的大修范围,从而达到降低大修成本,提高经济效益的目的。

现代民用航空发动机基本都采用单元体式结构设计,发动机返厂大修时,各单元体的修理范围直接影响整台发动机的大修成本以及修后性能,一旦确定了各单元体的大修范围,也就确定了发动机的大修范围,即发动机大修方案。航空公司在制定发动机送修方案时,一般会参考制造商提供的维修范围指导手册(workscope planning guide, WPG)或发动机维修管理大纲(engine maintenance program, EMP)。该技术文档会给出发动机各单元体的建议在翼时间,即软时限。软时限软是根据零部件的可靠性并考虑机会维修策略确定的^[2],是控制单元体修理范围的一个重要参数。尽管它不是一个强制性的时间限制,但如果单元体的在翼飞行时间超出规定的软时限后,该单元体的性能会更快下降,运行可靠性也会降低。在 EMP 中基于单元体的在翼时间和软时限的对比,给出了各单元体的修理范围。另一个影响发动机返厂修理的因素是时寿件,时寿件价格十分昂贵,发动机中所有时寿件的费用约占发动机总成本的 20%以上^[2-3]。且时寿件有最大使用时间的限制,当其到寿时,不管其状态如何都要更换。通常时寿件不可能完全用完规定的寿命,都会在到达规定寿命前一段时间更换;另外,各单元体可能包含多个时寿件,且各时寿件的寿命也会各不相同,因此,在制定维修工作计划和大修方案时,需要平衡各时寿件的使用情况,并把时寿件的寿命与发动机的平均在翼时间进行协调,避免只是由于时寿件到寿而返厂增加大修成本。因此,合理确定单元体的修理范围和时寿件的更换策略是制定发动机大修方案的核心。

虽然在 WPG 中对单元体的送修等级和大修范围都制定了详细的说明,但如何优化单元体的

在翼时间以及时寿件的更换时间,更多地是依赖于大修方案制定人员的分析判断,因此,很有必要开展送修方案决策研究。目前这方面的研究主要采用了经典粗糙集理论^[4]或变精度粗糙集理论^[5],运用航空发动机的性能监控数据和历史送修记录,从发动机性能的角度确定单元体的送修等级,而对大修成本优化的研究较少。本文研究的主要问题是保证发动机可靠性和经济性的前提下,如何合理地确定返厂送修时间间隔和大修方案,使发动机在整个使用寿命周期内的大修成本最低。

1 问题介绍

发动机大修成本取决于大修方案,因此,要进行成本优化,首先是确定发动机送修级别,和每个单元体的修理范围^[6]。发动机返厂大修最主要的两个原因是时寿件更换和性能恢复,时寿件更换时需要对相应的单元体或部件进行完全分解,通常的做法是对单元体中的其他部件也做一次全面彻底的检修,即高级别的修理,避免仅仅是由于时寿件到寿这种单一情况而导致的发动机送修;对于单元体来说,只有当进行深度维修时,其软时限才会恢复,即修后重新计算在翼时间。另外,由于外来物损伤等也会造成发动机返厂修理,但这种偶然故障有一定的不确定性,发生概率不大,本文不予考虑。因此,可以设定 3 种送修级别,如表 1 所示。

表 1 发动机送修级别分类表
Table 1 Categories of engine repair levels

送修 级别	送修级别 相应等级	软时限 是否恢复	时寿件 是否更换
一般检查	1	否	否
性能 低级别	2	否	否
恢复 高级别	3	否	是
深度维修	4	是	是

一般检查:单元体不用分解,只做简单的目视检查,适用于在翼时间较短且没有明显损伤的发动机。

性能恢复:单元体需要部分或完全分解,检查内部损伤情况,进行气路恢复,提高发动机排气温度裕度,降低燃油消耗率。其中高级别的性能恢复需要更换时寿件。

深度维修:单元体需要完全分解,对单元体的零部件进行彻底的检查和修理,并更换寿命件。此时,单元体软时限才会恢复。

当一台发动机返厂维修时,单元体是否需要分解,取决于是否需要更换时寿件和发动机在翼时间的长短。如果更换时寿件,那么单元体需要分解,同时进行性能恢复;如果不更换时寿件,但发动机运行了很长时间,性能已经衰退,此时单元体也需要分解^[7]。因此,针对这种情况,可以设定一个临界值(critical value),如果在翼时间超过临界值,那么单元体需要分解,进行性能恢复,但软时限不恢复;反之,则进行一般检查。

设定好送修级别后,需要再对发动机送修时执行的工作内容进行研究^[8]。一般情况下,发动机可以分为热端部件和非热端部件,热端部件指的是发动机燃烧室与低压涡轮之间的部分,可以分为4个部件(燃烧室、轴承组件、第1级导向静叶和高压涡轮)。在发动机的运行过程中,热端部件的损伤是很普遍且十分严重的,为避免由于热端部件的损伤而造成频繁下发的情况,通常需要在其规定寿命之前设定一个警戒值,一旦超过警戒值(alert value),无论其实际工作状况如何,都需要进行热端部件翻新(hot section refurbishment, HSR),即深度维修,使其软时限完全恢复^[9]。

除了热端部件,其他非热端部件的送修级别的判定主要从单元体在翼时间和时寿件寿命两方面来考虑。对于时寿件,其不能超过规定的最大寿命,即需要满足式(1)。

$$T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i,j}}} \leq T_{l_{t_{i,j}}} \quad (1)$$

其中 i 表示送修次序, j 表示时寿件的编号, $T_{l_{i,j}}$ 表示时寿件的已使用时间, $T_{l_{g_{i,j}}}$ 表示当次送修到下一次送修的时间间隔,可以理解为发动机的目标在翼时间, $T_{l_{t_{i,j}}}$ 表示时寿件的最大使用寿命。

基于机会维修策略,提前更换其他即将到寿的时寿件而“浪费”掉的寿命会增加发动机的大修成本。因此,如何协调时寿件寿命与发动机在翼时间的关系,不但影响了发动机的返厂率,而且也会影响大修成本^[10]。根据大修范围计划指导手册和航空公司的维修经验,对于不同的时寿件都会设定一个残余寿命余度的参考值,即当次维修时,时寿件的残余寿命与规定最大寿命的比值,如式(2)所示。

$$k_{l_{r_{i,j}}} = \frac{T_{l_{r_{i,j}}}}{T_{l_{t_{i,j}}}} \quad (2)$$

其中 $T_{l_{r_{i,j}}}$ 表示时寿件的残余寿命, $T_{l_{t_{i,j}}}$ 表示时寿件的最大使用寿命。

同样地,对于单元体来说,虽然软时限并不是强制性的限制使用时间,但若超出软时限,则发动机性能会加快下降,相应的单元体发生故障的概率也会增加。为了处理该问题,也可设置一个单元体剩余软时限余度参考值 $k_{\text{mod}_{r_{i,j}}}$,即当次维修时,单元体剩余使用时间与软时限的比值,如式(3)所示

$$k_{\text{mod}_{r_{i,j}}} = \frac{T_{\text{mod}_{r_{i,j}}}}{T_{\text{mod}_{t_{i,j}}}} \quad (3)$$

其中 $T_{\text{mod}_{r_{i,j}}}$ 表示单元体的剩余使用时间,可以理解为单元体软时限与在翼时间的差值; $T_{\text{mod}_{t_{i,j}}}$ 表示单元体的软时限。

为了保证发动机的可靠性,在确定发动机送修级别和工作范围时,通过比较时寿件残余寿命余度(单元体剩余软时限余度)的实际值与参考值的大小,来判定各时寿件(单元体)符合的送修级别^[11]。如果时寿件残余寿命余度(单元体剩余软时限余度)的实际值小于参考值,则该次送修级别为深度维修,使用时间恢复清零;反之,则保留该部分至下次送修。

除了上述判断依据,在确定当次送修的送修级别和大修范围时,除了要考虑发动机的当前状态,还要针对其目标在翼时间(target time on wing, TTOW)进行分析。

对于时寿件来说,如果当次送修时使用时间较短,按照上述判断依据,并不需要进行更换,但其残余寿命小于目标在翼时间,那么,本次也需要更换该时寿件,使用寿命恢复清零^[12];对于单元体来说,其目标在翼时间可以超过软时限,但根据航空公司的历史维修记录,通常还会设定一个单元体超出软时限额度参考值 $k_{\text{mod}_{e_{i,j}}}$,即下次维修前,单元体超出软时限的使用时间与软时限的比值,如式(4)所示。如果发动机当次送修时,单元体使用时间较短,根据上述判断依据,并不需要进行深度维修,但下次大修之前会超出软时限,且超出软时限额度的实际值大于参考值,则本次送修级别同样为深度维修,使用寿命恢复清零,反之,则可以保留该部分至下次送修。

$$k_{\text{mod}_{e_{i,j}}} = \frac{T_{\text{mod}_{e_{i,j}}}}{T_{\text{mod}_{t_{i,j}}}} \quad (4)$$

其中 $T_{\text{mod}_{e_{i,j}}}$ 表示单元体的在翼超出软时限的时间; $T_{\text{mod}_{t_{i,j}}}$ 表示单元体的软时限。

除此之外,还需要对发动机的送修时间间隔做一个限制。根据历史送修数据,理论上可以确定一个最小送修时间间隔和最大送修时间间隔,合理的送修间隔应该处在两者之间,实际上,设定

不能超过最大送修时间间隔即可^[13]。

综上,可以将该问题描述为基于单元体和时寿件的送修目标优化问题,即在发动机的使用寿命周期内,针对不同的送修次数,如何合理地规划送修时间间隔和大修范围,使其单位飞行小时送修成本最小。

2 模型建立

为了建立发动机大修成本优化模型,需要进

$$\sigma_{i,j} = \begin{cases} 1 & T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i,j}}} \geq T_{l_{t_{i,j}}} \cdot k_{l_{r_{i,j}}} \quad \text{or} \quad T_{\text{mod}_{i,j}} + T_{\text{mod}_{g_{i,j}}} \geq T_{\text{mod}_{t_{i,j}}} \cdot k_{\text{mod}_{r_{i,j}}} \\ 1 & T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i,j}}} < T_{l_{t_{i,j}}} \cdot k_{l_{r_{i,j}}} \quad \text{and} \quad T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i+1,j}}} \geq T_{l_{t_{i+1,j}}} \\ 1 & T_{\text{mod}_{i,j}} + T_{\text{mod}_{g_{i,j}}} < T_{\text{mod}_{t_{i,j}}} \cdot k_{\text{mod}_{r_{i,j}}} \quad \text{and} \quad T_{\text{mod}_{i,j}} + T_{\text{mod}_{g_{i+1,j}}} \geq T_{\text{mod}_{t_{i+1,j}}} \cdot (1 + k_{\text{mod}_{e_{i+1,j}}}) \\ 0 & T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i,j}}} < T_{l_{t_{i,j}}} \cdot k_{l_{r_{i,j}}} \quad \text{and} \quad T_{l_{i,j}} + T_{l_{g_{i+1,j}}} < T_{l_{t_{i+1,j}}} \\ 0 & T_{\text{mod}_{i,j}} + T_{\text{mod}_{g_{i,j}}} < T_{\text{mod}_{t_{i,j}}} \cdot k_{\text{mod}_{r_{i,j}}} \quad \text{and} \quad T_{\text{mod}_{i,j}} + T_{\text{mod}_{g_{i+1,j}}} < T_{\text{mod}_{t_{i+1,j}}} \cdot (1 + k_{\text{mod}_{e_{i+1,j}}}) \end{cases}$$

(5)

其中 $\sigma_{i,j}$ 是时寿件(单元体)是否需要深度维修的判断系数。当 $\sigma_{i,j}$ 为 1 时,表示时寿件(单元体)需要进行深度维修,使用时间恢复清零;当 $\sigma_{i,j}$ 为 0 时,表示时寿件(单元体)进行一般检查或性能恢复,使用时间不恢复。

根据以上内容,可以建立一个以不同送修次数下的送修时间间隔为优化变量,以单位飞行小时送修成本最小为优化目标的发动机大修成本优化模型,如式(6)所示

$$\min c_{\text{pfh}} = \sum_i^n \sum_j^m \sigma_{i,j} \cdot C_{i,j} / \sum_i^n T_{g_i}$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} T_{i,j} + T_{g_{i,j}} \leq T_{t_{i,j}} \\ T_{g_i} \leq T_{\max} \\ \sum_i^n T_{g_i} \leq T_{\text{total}} \\ m, n \in N^+ \end{cases}$$

(6)

其中 c_{pfh} 表示单位飞行小时送修成本(cost per flight hour), $C_{i,j}$ 表示第 j 个时寿件(单元体)第 i 次送修的维修成本, $T_{i,j}$ 表示第 j 个时寿件(单元体)第 i 次送修时的在翼时间, T_{g_i} 表示第 i 次送修的时间间隔, $T_{\max}$ 表示最大送修间隔, T_{total} 表示发动机的拥有周期, m 表示时寿件(单元体)的总数量, n 表示送修的总次数。

考虑到模型的复杂性,用遗传算法求解该问题^[15]。遗传算法(genetic algorithm)是受生物学中的进化学说和遗传学理论的影响,而逐渐发展起来的一种随机搜索算法,其基本原理是模拟自然环境中的生物,采用比较简单的编码技术来代表各种复杂的结构,并通过“优胜劣汰”的自然选

行以下假设:①在发动机使用寿命周期内,每次进行深度维修后,单元体和时寿件的使用时间都能够恢复清零;②单元体的软时限、时寿件的最大寿命和不同级别的维修成本是固定的,不随送修次数的增加而变化^[14]。

如上文所述,通过比较时寿件残余寿命余度、单元体剩余软时限余度以及单元体超出软时限额度实际值与参考值的大小,可以给出时寿件(单元体)的维修函数公式,如式(5)所示

择法则来指导学习和确定搜索的方向^[16]。

遗传算法主要分为 4 个步骤,分别是编码、杂交、变异和选择。编码指的是将送修时间间隔和送修级别分别采用 10 进制编码和 2 进制编码,转化成个体染色体上的基因,随机初始化种群,如表 2 所示,初始种群的数量一般大于 100 个。

表 2 随机初始化种群(6 次送修)

Table 2 Random initial population (6 shop visits)

送修间隔/h	14380	11090	12360	9320	13750	11130
送修级别	3	2	1	4	2	3

杂交指的是送修时间间隔的重新随机分配,一般将杂交概率设为 0.8,即系统对各个基因产生一个对应的随机数,当该随机数小于 0.8 时,则两个不同位置上的送修时间间隔进行互换;当随机数大于 0.8 时,则不进行交换。变异指的是由于突发情况而导致的送修时间间隔的非计划缩短或送修级别的突然提高,由于本文不考虑偶然情况导致的发动机送修,因此将变异概率设为 0。杂交后得到的子代中,适应环境的个体得以存活,不适应环境的个体将会淘汰,但在计算机编程过程中,带有不良基因的个体并不会自动淘汰掉,需要构造一个送修方案的适应度函数,可以定义为单位飞行小时送修成本的倒数,则个体的适应度越大,则表示单位飞行小时送修成本越小,该送修方案保留的可能性就越大,如式(7)所示。再计算出各个子代的适应度,将适应度较小的个体逐步淘汰掉,进而保留住优良的基因,增大得到优化结果的可能性。

$$\max F = \frac{1}{c_{pth}} \tag{7}$$

在随机初始化种群时,可以将生成的送修时间间隔取整,这是由于一方面航空公司为了安全性的考虑,一般会提前下发送修;另一方面也提高了算法的收敛速度,节约了运算时间^[17]。同时,为了尽可能地保留优良个体,快速收敛到稳定状态,在每一次进行选择后,可以将适应度最高的前 10 个子代进行加倍,取代适应度最低的后 10 个子代,再进行下一次的模拟循环,直到迭代到最优子代为止。

3 模型数据

以一台 V2500 发动机为例,先设定发动机的拥有周期为 25 年,共 4×10^4 个循环,循环飞行小时比为 2,即每个循环为 2 h(2 个飞行小时),一共 8×10^4 h,最大送修时间间隔为 2×10^4 h,则最小送修次数为 4 次,因此本文考虑针对送修次数为 4~9 次的维修方案进行优化。

然后,根据发动机制造商提供的大修范围计划指导手册,选取了 12 个主要单元体的软时限和时寿件的使用寿命等数据,如表 3 所示,同时参考 V2500 世界机队的发动机大修费用,给出了不同送修级别下的成本,如表 4 所示。

最后,设定在翼时间临界值、热端部件警戒值、时寿件残余寿命余度、单元体剩余软时限余度和单元体超出软时限额度等影响参数,如表 5 所示。

表 3 12 个单元体软时限及时寿件寿命数据

Table 3 Soft times and time limits of 12 modules

单元体种类	单元体软时限/h	时寿件寿命/h
风扇机匣	25 000	40 000
低压压气机	30 000	40 000
前轴承组件	25 000	
高压压气机	25 000	30 000
扩压机匣组件	22 000	
燃烧室	20 000	
第 4 轴承组件	20 000	
第 1 级导向静叶	20 000	
高压涡轮	25 000	30 000
低压涡轮	30 000	35 000
涡轮排气机匣	30 000	40 000
外部附件齿轮箱	32 000	

表 4 12 个单元体不同送修级别的成本

Table 4 Costs for different repair levels of 12 modules

千美元

单元体 种类	一般 检查	性能恢复 (低)	性能恢复 (高)	深度 维修
风扇机匣	45	86	162	253
低压压气机	78	107	159	297
前轴承组件	57	83	83	114
高压压气机	288	625	1 084	1 588
扩压机匣组件	66	111	111	176
燃烧室	42	96	96	164
第 4 轴承组件	60	75	75	116
第 1 级导向静叶	59	92	92	150
高压涡轮	408	983	1 297	1 733
低压涡轮	257	527	863	1 188
涡轮排气机匣	29	48	87	129
附件齿轮箱	59	70	70	117

表 5 各影响参数

Table 5 Influence parameters

%

k_{mod_r}	k_{mod_e}	k_{L_r}	临界值	警戒值
20	20	10	75	50

4 仿真结果及分析

按照以上发动机的实际数据进行模拟仿真,考虑 4~9 次送修情况,得到了不同送修时间间隔下的求解结果,如表 6 所示。

表 6 送修方案求解结果

Table 6 Results of shop visit schedules

送修 次数	送修间隔/h	单次平均送修 成本/万美元	c_{pth} / 美元
4	17 860 18 050 17 270 17 710	336.7	190
5	13 560 15 020 14 870 14 250 13 840	249.0	174
6	12 730 11 850 12 170 11 730 12 690 12 240	205.5	168
7	11 170 10 590 10 840 10 310 10 730 10 640 11 050	189.4	176
8	10 320 9 760 9 510 9 370 10 030 9 640 9 850 9 290 9 120 8 810 8 560 9 150	189.3	195
9	8 680 8 420 9 040 9 200	196.4	223
8 290			

根据结果,利用 Matlab 拟合 c_{pft} 随送修次数变化的回归表达式及曲线图,如式(8)及图 1 所示,其中 x 表示送修次数。由图可知,当送修次数为 6 次时,单位飞行小时送修成本最小,为 168 美元/h,与之前的送修成本分析相吻合。

$$c_{\text{pft}}(x) = -0.1296x^3 + 8.242x^2 - 83.32x + 399.9$$

(8)

在该发动机 6 次送修的情况下,研究发动机的低压压气机、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮 5 个主要单元体的送修情况,基于单元体和时寿件的发动机大修方案流程如图 2 所示,计算得出送修级别如表 7 所示。

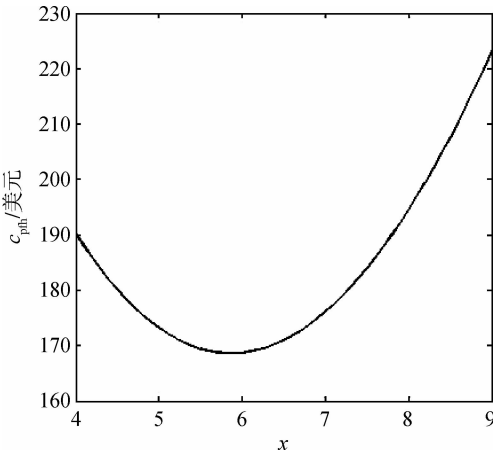


图 1 c_{pft} 随送修次数的变化图

Fig. 1 Relationship of c_{pft} with numbers of shop visit

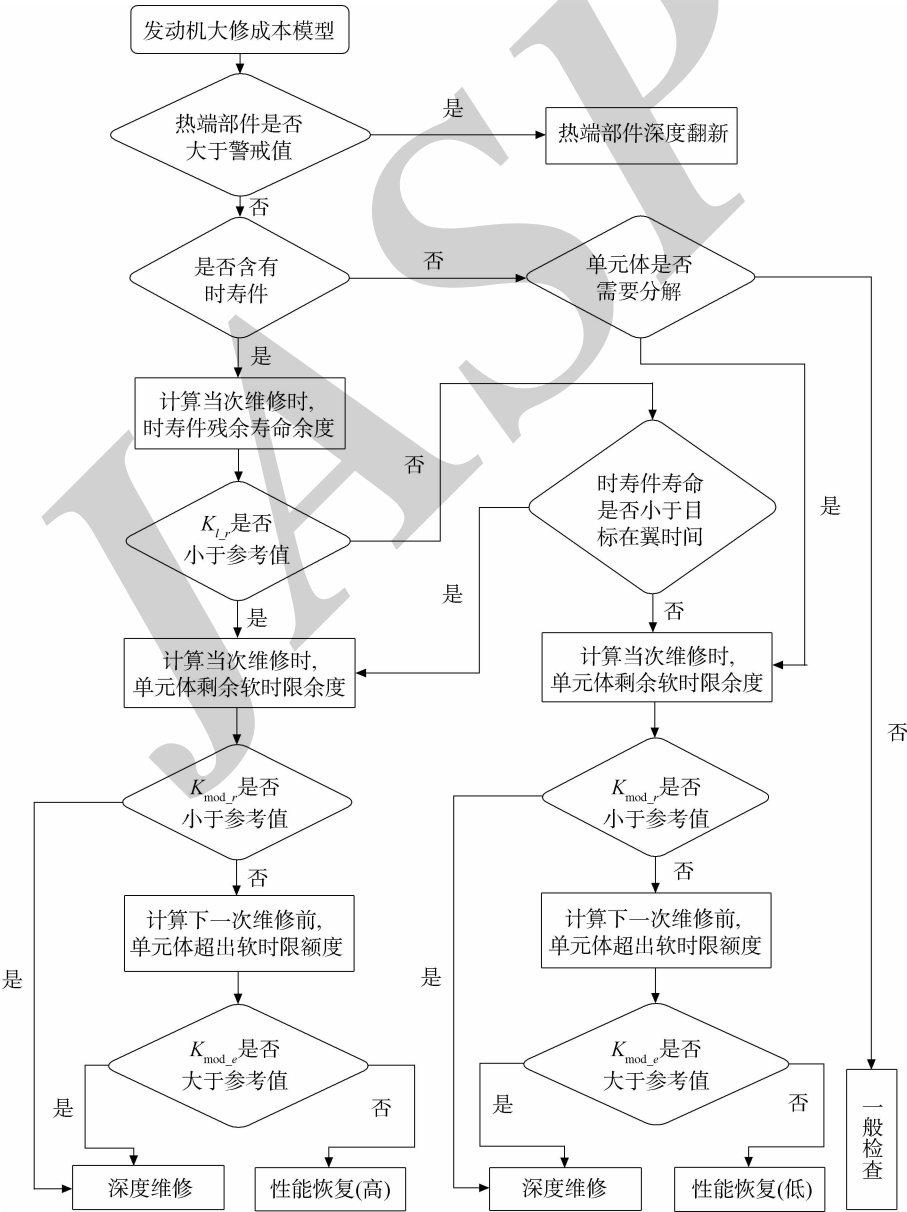


图 2 基于单元体和时寿件的发动机大修方案流程图

Fig. 2 Flow chart of engine shop visit schedule based on modules and time limit parts

表 7 发动机主要单元体的送修级别
Table 7 Repair levels of engine main modules

维修次序	低压压气机	高压压气机	燃烧室	高压涡轮	低压涡轮
1	一般检查	性能恢复(低)	深度维修	性能恢复(低)	一般检查
2	深度维修	深度维修	深度维修	深度维修	深度维修
3	一般检查	一般检查	深度维修	一般检查	一般检查
4	深度维修	深度维修	深度维修	深度维修	深度维修
5	一般检查	性能恢复(低)	深度维修	性能恢复(低)	一般检查
6	性能恢复(高)	深度维修	深度维修	深度维修	性能恢复(高)

除了送修时间间隔的影响之外,各优化参数的变化也会对优化结果产生影响。由于有的单元体中不包含时寿件,因此,这里只研究单元体剩余软时限余度和超出软时限额度参考值的变化对优化结果的影响,如表 8、表 9 和图 3、图 4 所示。

表 8 不同单元体剩余软时限余度参考值下的 c_{pfh} 值
Table 8 c_{pfh} for modules on-wing time shorter than their soft time

送修次数	$c_{pfh}/\text{美元}$				
	$k_{\text{mod},r_{i,j}}$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
6	166.5	167.1	168	169.3	171.5
7	173.3	174.3	176	178.4	181.9
8	190.7	192.5	195	198.1	202.7

表 9 不同单元体超出软时限额度参考值下的 c_{pfh} 值
Table 9 c_{pfh} for module on-wing time over their soft time

送修次数	$c_{pfh}/\text{美元}$				
	$k_{\text{mod},e_{i,j}}$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
6	173.2	170.5	168	166.3	164.9
7	185.1	179.8	176	173.6	171.7
8	209.6	201.4	195	191.3	188.5

由此可知,单元体剩余软时限余度的参考值越小,单位飞行小时送修成本越少,这说明其设定值越小,则单元体维修前可使用的时间越多;而对单元体超出软时限额度参考值来说,其设定值越大,则表明单元体可允许超出软时限的在翼时间越多,则单位飞行小时送修成本越少,且送修次数越多,其影响效果越明显。

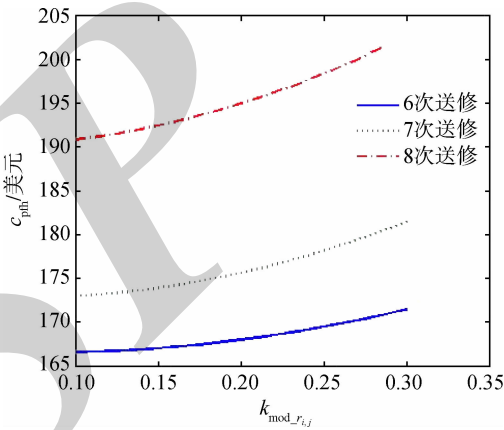


图 3 单元体剩余软时限余度参考值对 c_{pfh} 的影响图
Fig. 3 Effect on c_{pfh} for modules on-wing time shorter than their soft time

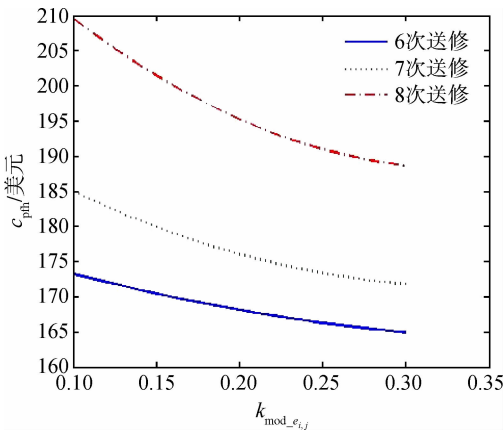


图 4 单元体超出软时限额度参考值对 c_{pfh} 的影响图
Fig. 4 Effect on c_{pfh} for modules on-wing time over their soft time

实际上,对于超出软时限越多,维修成本越低的结论,这对冷端部件是成立的,但对热端部件不一定成立,对热端部件(燃烧室、高压涡轮等)来说,超出软时限越多,则部件损伤也越厉害,每次

维修的材料成本也会增加。另外,超出软时限越多,发动机出现故障的几率就越高,相应的故障风险也就越大,就会带来排故难度增大、排故时间增加、航班延误等问题,进而导致间接运营成本的增加。

5 结 论

为了对发动机送修方案的制定提供相关决策支持,本文主要考虑了单元体超出软时限导致的性能衰退和时寿件到寿两种造成发动机送修的情况,构建了一种以送修时间间隔为优化变量,以单位飞行小时送修成本最小为优化目标的发动机大修成本优化模型。本文采用遗传算法对模型进行了求解,得到了最优的送修方案,即送修次数为 6 次时,单位飞行小时送修成本最小,为 168 美元/h。同时又研究了单元体剩余软时限余度和超出软时限额度的变化对优化结果的影响,得到了剩余软时限余度越少,超出软时限额度越多,则单位飞行小时送修成本越小的结论。该问题仍有进一步研究的地方,主要为以下两点:

1) 随着发动机运行时间的增加,发动机的某些零部件不可避免地会受到一些不可逆的损伤,即使是送修级别相同,但执行具体维修工作的难易程度却不同,进而造成修理费、维修材料费的增加,从而导致维修成本的增加。

2) 在发动机的送修原因中,除了文中研究的两种外,EGTM、燃油消耗量、滑油消耗量、发动机振动值都是可监控的性能指标,在判断发动机何时下发送修和采取哪种送修级别时也会经常使用到。在建立完整的发动机大修成本优化模型时,需要兼顾各个参数的变化,使模型更符合实际情况。

因此,如何综合考虑各个影响因素,合理地确定送修时间间隔和大修范围是一个需要继续深入的研究方向。

参考文献:

[1] 蔡景,左洪福,王华伟. 基于成本的民用航空发动机维修方案优化研究[J]. 机械科学与技术,2007,26(2):167-171.
CAI Jing, ZUO Hongfu, WANG Huawei. Aviation engine maintenance program optimization based on maintenance cost[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 167-171. (in Chinese)

[2] SARANGA H. Opportunistic maintenance using genetic algorithms[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2004, 10(1): 66-74.

[3] 孙有朝,左洪福,倪凯,等. 民用航空发动机维修成本[J]. 交通运输工程学报,2003,3(1):93-96.
SUN Youzhao, ZUO Hongfu, NI Kai, et al. Aero-engine maintenance cost[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(1): 93-96. (in Chinese)

[4] 梁剑,左洪福,常继百,等. 基于统计粗集模型的航空发动机维修等级预测方法研究[J]. 应用科学学报,2005,23(2):196-199.
LIANG Jian, ZUO Hongfu, CHANG Jibai, et al. A research on aero-engine maintenance level prediction based on statistical-rough sets theory[J]. Journal of Applied Sciences, 2005, 23(2): 196-199. (in Chinese)

[5] 谢庆华,梁剑,左洪福. 基于变精度粗糙集的航空发动机送修等级决策[J]. 系统工程理论方法应用,2006,15(4):380-384.
XIE Qinghua, LIANG Jian, ZUO Hongfu. Studies on maintenance level decision of aero-engine based on variable precision rough sets theory[J]. Systems Engineering-Theory Methodology Applications, 2006, 15(4): 380-384. (in Chinese)

[6] 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,2010,10(25):2195-2200.
FU Xuyun, ZHONG Shisheng, DING Gang. Civil aero-engine module workscope decision-making [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 10(25): 2195-2200. (in Chinese)

[7] 许可君. 基于单元体的军用航空发动机寿命控制和管理[J]. 海军航空工程学院学报,2007,22(5):541-547.
XU Kejun. Life control and management for military aero engine based on modular unit[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(5): 541-547. (in Chinese)

[8] YILMAZ O, GINDY N, GAO J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 190-201.

[9] SWAMINATHAN V P, LOWDEN P. Gas turbine blade life and assessment repair guide[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute EPRI GS-6544, 1989.

[10] 于文武. 发动机综合状态评估与在翼使用时间预测[D]. 天津:中国民航大学,2008.
YU Wenwu. The integrated state assessment and usage time forecast of on-wing engines[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008. (in Chinese)

[11] JOO S J. Scheduling preventive maintenance for modular designed components: a dynamic approach [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(2): 512-520.

[12] 王悦. CFM56-7B 发动机送修时机选择[J]. 航空维修与工程, 2012(2): 94-96.
WANG Yue. CFM56-7B shop visit schedule management [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2012(2): 94-96. (in Chinese)

[13] 张海军,左洪福,梁剑. 基于信息熵属性约简的航空发动机送修等级决策[J]. 系统工程, 2005, 23(7): 105-108.

ZHANG Haijun,ZUO Hongfu,LIANG Jian. Maintenance level decision of civil aviation engine based on comntropy attribute reduction[J]. Systems Engineering,2005,23(7): 105-108. (in Chinese)

[14] GOH S,COLEMAN C P. Sustainment of commercial aircraft gas turbine engines: an organizational and cognitive engineering approach[R]. AIAA-2003-6816,2003.

[15] 王小平,曹立明. 遗传算法:理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[16] 张安英. 遗传算法在多目标优化中的应用[D]. 辽宁,阜新: 辽宁工程技术大学,2008.

ZHANG Anying. Study on multi-objective optimization for genetic algorithm[D]. Fuxin,Liaoning:Liaoning Technical University,2008. (in Chinese)

[17] HSU C L,WAN T,CHEN S H. The Study of optimum engine shop visit scheduling via genetic algorithm method [J]. Journal of Aeronautics Astronautics and Aviation, 2010,42(2):141-148.

(编辑:王碧珺)