

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.010

## 考虑预测与健康管理的民机维修成本效益仿真评估方法

闫洪胜, 左洪福, 孙见忠

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 211106)

**摘要:** 航空维修是飞机运营支持的重要工作之一, 是航空公司保障安全飞行和控制运营成本的关键途径。目前应用实时故障预测与健康管理(Prognostic and health management, PHM)于航空维修领域还处于研究阶段, 缺少工程实践数据和案例。针对缺乏应用 PHM 技术的飞机维修相关验证与评估数据的问题, 本文基于 PHM 的维修模式概念, 建立 PHM 维修模式下的计划维修优化、非计划维修可控和 PHM 错误影响分析模型。借助计算机仿真技术, 由不同的系统 PHM 性能参数输入, 根据所建立的模型进行实施 PHM 前后的维修工时、维修成本和非计划维修事件数的仿真模拟计算, 验证与评估基于 PHM 的维修模式在减少维修工时、节约维修成本和控制非计划维修事件方面的优势。选取空调系统作为验证评估对象进行了大量的仿真试验分析, 在单一系统的理想状态下(即性能参数设置为最佳), 基于 PHM 的维修模式相比于传统的预防性维修可以减少 56% 的维修工时, 节约 60% 的维修成本, 并且避免了 88% 的非计划维修事件。

**关键词:** 航空维修; 故障预测与健康管理; 维修模式; 仿真模拟; 预防性维修

**中图分类号:** V219

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2020)06-0912-11

## Cost-Benefit Evaluation for Aircraft Maintenance Based on Prognostic and Health Management

YAN Hongsheng, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** Aviation maintenance is one of the important supports for aircraft operation and a way to ensure safe flight and control operating costs of airlines. Current use of real-time online fault prognostic and health management (PHM) has been far from full-fledged in aviation maintenance, and practical data and cases are in need. This paper puts forward a concept of maintenance mode based on PHM, and then establishes the models of optimization of maintenance plan, controlling unscheduled maintenance and error impact analysis. In the simulation, different parameters are input into the PHM system. The maintenance, the cost of maintenance and unscheduled maintenance events before and after the implementation of PHM are simulated, and the advantages of the PHM maintenance mode for reduction in maintenance hours, cost and control of unscheduled maintenance events are validated. The air conditioners system is selected as the verification object, and the results show that, for the single system with the ideal condition that the parameter of PHM is best, compared to the traditional preventive maintenance, the proposed approach can reduce 56% maintenance hours, save 60% maintenance cost, and avoid 88% unscheduled maintenance events based on PHM maintenance mode.

**基金项目:** 国家自然科学基金(91860139)资助项目; 装备预研基金(61400020501)资助项目; 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX17\_0274)资助项目。

**收稿日期:** 2019-11-27; **修订日期:** 2020-07-25

**通信作者:** 左洪福, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: rms@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 闫洪胜, 左洪福, 孙见忠. 考虑预测与健康管理的民机维修成本效益仿真评估方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 912-922. YAN Hongsheng, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong. Cost-benefit evaluation for aircraft maintenance based on prognostic and health management[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 912-922.

**Key words:** aviation maintenance; prognostic and health management (PHM); maintenance mode; simulation analysis; preventive maintenance

航空公司作为民用飞机承运者正面临着持续性保持飞机可用度和均衡运营成本与效益最大化的压力,通过有效的运营管理手段或先进的技术来实现这些目标已成为民用航空领域重点关注课题。减少飞机维修停场时间,降低维修费用,以及最大化控制非计划维修引起的任务取消可以帮助实现这个目标<sup>[1]</sup>。

目前航空公司一般采用的是预防性维修策略,即根据制造商提供的维修计划文件(Maintenance planning document, MPD)推荐的飞机维修中各个项目的检查、拆换和报废间隔,按照保证安全性和提高经济性目标制定维修计划并对飞机进行维护工作<sup>[2]</sup>。国内外学者展开了有关预防性维修优化策略研究。文献[3]将预防性维修策略与传统的事后维修(即发生故障后修理)相结合,从而分摊系统的固定维修费用,实现节约维修费用的目的。文献[4]以维修成本、生产任务的最大完成时间、加权总完工时间及加权总延迟时间作为优化目标,采用了多目标遗传算法,同时对预防性维修计划和生产调度进行优化,并实例验证优化之后的预防性维修计划在保证任务完成度、节约工时与成本方面更有优势。

随着传感器技术发展,复杂系统或结构可被监测能力在提高,维修工作不只是可以从预防角度出发,而且可以进行状态监测和故障预测,并基于此信息开展维修工作,产生了视情维修(Condition-based maintenance, CBM)的概念<sup>[5]</sup>。由于发动机系统可监测性能较好,而且送修成本较高,出现意外失效的可能影响比较严重,因此维修工程领域最早开始研究针对发动机系统的视情维修策略。文献[6]建立了民用发动机视情维修决策方法。

国外对于基于监测与状态的维修策略研究起步较早。文献[7]针对CBM在机械系统故障诊断与状态检修方面的应用,回顾该领域的研究和发展,总结数据处理和维修决策的算法和技术,提出CBM维修策略的2个关键点:诊断和预测;3个主要步骤:数据采集、数据处理和维护决策。文献[8]基于案例进行了民用飞机加载综合结构监测与健康管理系统(Structure health management, SHM)研究,评估其保障可用度和降低运营成本的优势。文献[9]基于元件状态和部件可靠性的贝叶斯更新过程,针对复杂系统提出最小费用率下的状态检修模型,通过最小化单位时间的期望费用率,得到系

统的成本最优替换时刻,且能保证系统的可靠度。

国内有关故障预测与健康管理的(Prognostic and health management, PHM)应用于航空维修领域研究主要是考虑视情维修与预防性维修相结合的优化策略。文献[10-11]分别针对多发性重复性故障较多的系统和不完全维修劣化系统进行视情维修策略优化,考虑设备实际运行期间内不同的故障或失效情况,在预防性维修基础上,开展部分维修任务的维修阈值优化。

总结现有的研究和工业案例,在PHM技术快速发展和应用的航空领域,缺少从维修模式角度考虑引入PHM后,针对维修工作成本与效益评估研究。本文基于PHM的维修模式概念,建立PHM维修模式下的计划维修优化、非计划事件可控和PHM错误影响分析模型,并提出实施PHM前后维修工时、成本和非计划维修事件数的评估模型。选取飞机空调系统作为案例研究对象,通过仿真模拟分析验证PHM维修模式优势,为PHM实际应用于航空维修提供理论基础。仿真模型中定义不同的PHM性能参数输入,结果也可以作为PHM系统设计阶段的借鉴指标,为PHM系统设计提供成本效益计算的可参考工具。本文研究的创新性在于提出一种工程可用的考虑PHM的维修模式的效益评估方法,为这一空白领域提供一个可行性研究案例。

## 1 基于PHM维修模式的建模分析

### 1.1 基于PHM连续监测的综合维修流程

PHM技术应用于维修关键在于:诊断与预测,而实现基础是状态监测。文献[12-16]基于状态监控与可用剩余寿命预测角度开展综合维修决策与任务组合优化方法研究。

本文提出基于PHM的维修模式,综合维修流程如图1所示。其中, $t$ 表示系统部件寿命周期; $T$ 表示MPD规定的定时计划维修周期; $T_{\text{end}}$ 表示系统部件的使用寿命。

如图1所示,基于PHM连续监测的综合维修流程是对系统全寿命周期内健康状态进行监控、评估、预测与维修管理的全过程,并且实现通过PHM连续监测对于异常进行早期的评估,提早安排预防性维修工作,避免或减少非计划维修事件。

### 1.2 MPD计划维修工作

MPD给出的计划维修是基于时间间隔的离散事件,设计制造方根据维修要求、系统监测能力等

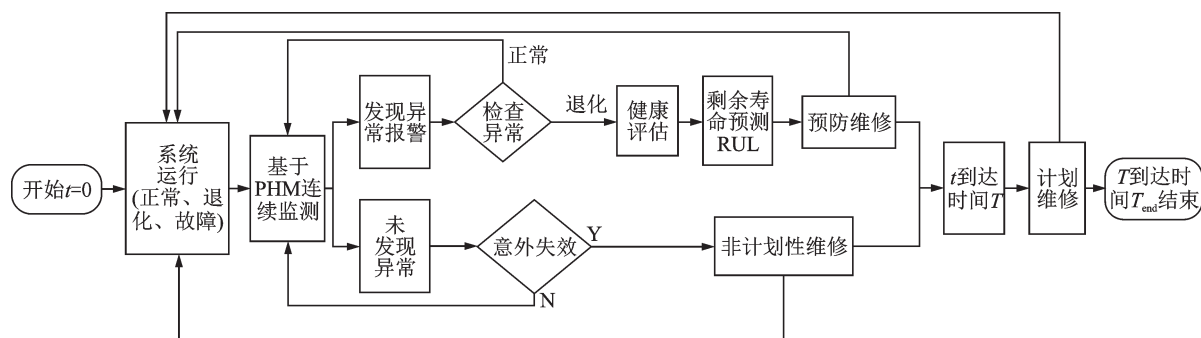


图 1 基于 PHM 连续监测的综合维修流程

Fig.1 Flow chart of integrated maintenance process based on PHM continuous monitoring

信息制定的长期的维修计划。间隔由飞行小时 (Flight hour, FH)、飞行周期 (Flight cycle, FC)、和日历时间 (年, 月, 日) 来表示。每一个 MPD 任务可能会给出几个参考的维修间隔, 一般考虑选取最小的时间间隔以保证安全飞行的要求。计划维修事件都需要有一个特定的地面停放时间。在此期间, 航空公司的航班时刻表需要作相应调整, 从而导致飞机利用率变化和延误等问题, 产生离散时间成本。MPD 计划维修的主要任务及工作描述如表 1 所示。

表 1 维修任务类型及工作描述

Table 1 Maintenance task type and description

任务代码	工作描述
BSI	孔探检查
CHK	常规检查 (电路检查、指示器检查、液面检查、压力指标检查等)
DI	详细检查
DS	报废
FC	功能检查/测试
GVI	一般目视检查
LU	润滑工作/勤务
OP	操作检查/测试
RS	拆除更换
SDI	特殊详细检查
SV	排水/服务/补给
TPS	临时保护系统
VC	目视检查

维修工时和成本是航空公司重点关心的对象, 也是评估维修计划制定是否合理的重要依据, MPD 计划维修成本计算公式为

$$c_{MPD} = k_0 h_{MPD} + c_f + c_m + c_g \quad (1)$$

式中:  $c_{MPD}$ 、 $k_0 \times h_{MPD}$ 、 $c_f$ 、 $c_m$ 、 $c_g$  分别表示 MPD 计划维修总成本、单次维修直接费用、单次维修固定费用、单次维修材料费用、维修所需停放时间折算费用。其中维修直接费用是指 MPD 计划维修工时 ( $h_{MPD}$ ) 与平均人工小时费率 ( $k_0$ ) 的乘积, 固定费

用<sup>[17]</sup>通常是指维修工具使用费用、航材折旧费用、调度运输管理费用等的综合值, 材料费用是由维修项目确定的, 与具体维修策略和任务组合方式无关。

### 1.3 关键部件失效分析

飞机是由大量的复杂系统和结构组成的, 而系统又是由若干影响运行状态的关键部件构成的, 关键部件的可靠性以及失效分析对于研究系统可用度和非计划故障与维修工作有着重要意义。文献[18-19]提出, 部件失效时间服从其分布规律。已知可靠性数据和分布规律情况下, 在飞机服役期间进行随机失效模拟, 仿真得到各关键部件在服役时间内失效时间分布和次数, 并根据此来仿真非计划拆换和维修的停放时间、成本和平均送修率。关键部件的累积失效与非计划维修仿真模拟流程如图 2 所示。

关键部件意外失效引起的非计划维修所需要维修成本等于非计划拆换费用、部件送修固定费用和停放时间折算费用总和, 计算公式如下

$$c_{un} = k_1 \times h_{un} + k_2 \times N + k_3 \times t_g \quad (2)$$

式中:  $c_{un}$  为单部件全周期内非计划拆换维修总成本;  $k_1$  为非计划拆换人工小时费率;  $h_{un}$  为非计划拆换人工时;  $k_2$  为送修固定费用;  $N$  为送修次数;  $k_3$  为停放折算小时费率;  $t_g$  为停放时间。

### 1.4 PHM 性能参数

文献[20]从建立可靠模型角度定义了 PHM 系统的性能指标, 文献[21]从维修计划编排角度提出 PHM 系统可用信息和相关概念定义, 本文研究考虑成本和效益的 PHM 维修模式评估模型, 参考目前行业定义的系统性能参数包括:

覆盖率  $P_{cov}$  (Coverage rate): PHM 系统可以监测到的维修项目占有所有项目的比例;

任务冗余率  $P_{tr}$  (Redundancy rate): PHM 系统监测到的维修项目中可被替代的比例;

区间间隔延长参数  $P_{ie}$  (Interval extension pa-



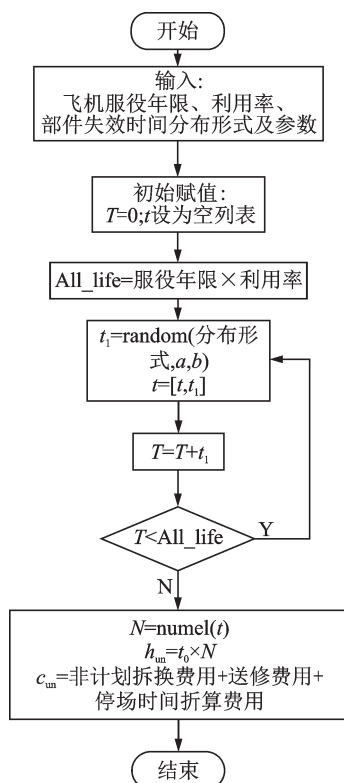


图2 关键部件累积失效仿真模拟流程图

Fig.2 Flow chart of the simulation of cumulative failure of key components

parameter): PHM系统监测到不可替代的维修项目通过监测来调整维修间隔, 相比较原有MPD内给出的维修间隔平均延长的比例;

故障检测率  $P_{ue}$  (Fault detection rate): 该参数是表征PHM系统能够提前检测到监测覆盖的关键部件故障和失效的能力, 是指在规定时间内PHM系统正确检测出的故障数与该时间内PHM系统覆盖到的所有故障总数之比;

虚警率  $P_{fa}$  (False alarm rate): PHM监测系统的第一类错误(虚假报警)发生概率, 即飞机处于正常飞行状态但PHM系统发出报告故障, 该参数定义为每飞行小时虚假报警发生概率;

漏警率  $P_{mf}$  (Missing alarm rate): PHM监测系统的第二类错误(漏警事件)发生概率, 即飞机发生故障但PHM系统监测为正常状态, 该参数定义为漏报故障事件次数与PHM监测系统覆盖的故障比值, 且  $P_{mf} = 1 - P_{ue}$ 。

### 1.5 PHM的影响分析

PHM技术应用到飞机结构或系统的健康监测与维修活动管理方面主要作用表现在:(1)基于PHM的MPD计划维修任务冗余替代和维修间隔延长;(2)基于PHM的状态监测而提前检测出关键部件故障或失效, 开展提前维修避免非计划拆换

和送修;(3)PHM的2类错误(虚警和漏警)的影响性分析。接下来接通过这3个方面具体介绍基于PHM的维修模式在维修工时、维修费用以及结构或系统可用度的影响, 通过评估方法进行实施PHM前后对比分析。

#### 1.5.1 MPD计划维修任务优化分析

应用PHM技术于飞机结构或系统的监测与健康维护工作上。对于MPD的计划维修影响表现在PHM监测覆盖的部分维修任务是冗余课被替代的, 另外一部分维修任务可以通过监测来调整维修间隔, 从全运营周期角度考虑延长了平均维修间隔。

文献[22]提出应用监测系统参数是否异常代替定时检查工作, 如启动机内自检、连续机内自检等工作。

如图3所示, 研究基于PHM连续监测的预警与维修工作流程, 应用PHM监测可能的影响:

(1)任务冗余, 取消。MPD中定时的检查类任务目的是通过定期的检查发现系统或关键部件是否发生故障。而应用PHM监测关键参数也可以表征系统或关键部件的运行状况, 检测参数是否超出阈值来进行报警或提前维修工作, 在功能上可以代替传统检查工作, 即可以将冗余的传统检查类工作在维修计划中取消。

(2)已发生功能退化的部件修复/报废类维修

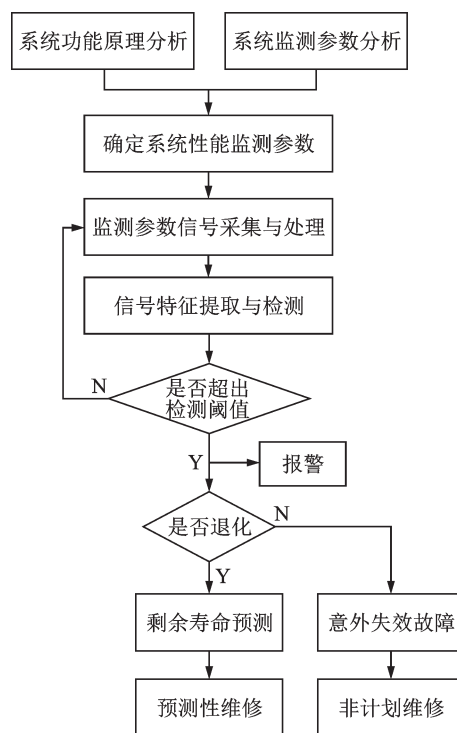


图3 基于系统监测的预警与维修工作流程

Fig.3 Flow chart of early warning and maintenance based on system monitoring

工作时间间隔延长。应用 PHM 监测技术并基于此开展维修工作的平均时间间隔相比较传统定时维修时间间隔比值,以此来表征 PHM 系统覆盖到的关键部件剩余寿命管理过程。

根据工作任务的相似性,将表 1 维修工作项目分成 6 组任务组,并根据各组工作特点分析 PHM 可能的影响(任务被替代而取消、间隔延长、无影响),结果如表 2 所示。

表 2 任务分组与 PHM 可能影响

Table 2 Task code groups and potential PHM impact

任务分组(TCG)	任务代码	PHM 可能的影响
TCG1	CHK, FC, OP	任务取消
TCG2	GVI, VC	任务取消
TCG3	BSI, LU, DI, SDI	任务取消/间隔延长
TCG4	DS, RS, SV	间隔延长
TCG5	非常规任务	间隔延长
TCG6	非常规任务/其他任务	无影响

由表 2 可知,实施 PHM 监测系统可以使得部分 MPD 计划维修任务取消或者维修间隔延长,假设系统 MPD 计划维修总工时为  $h_{MPD}$ ,各组维修任务总数为  $n_{taski}$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ),执行维修任务平均工时为  $t_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ),PHM 系统性能参数为  $P_{cov}$ 、 $P_{tr}$ 、 $P_{ie}$ 。

根据如下公式,可以计算实施 PHM 后 MPD 计划维修的总工时和成本变化。

$$h_1 = P_{cov} P_{tr} \frac{n_{taski}}{\sum_{k=1}^6 n_{taskk}} t_i \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

$$h_2 = h_{MPD} \{1 - P_{cov} (1 - P_{tr}) [1/(1 + P_{ie})]\} \quad (4)$$

$$h_{newMPD} = h_{MPD} - h_1 - h_2 \quad (5)$$

$$c_{newMPD} = c_{MPD} \frac{h_{newMPD}}{h_{MPD}} \quad (6)$$

### 1.5.2 非计划维修事件可控分析

实施 PHM 可以提前检测出关键部件故障或失效的时间,而根据实际条件提前开展维修避免非计划拆换和送修工作。假设系统关键部件数目为  $n_{MSI}$ ,已知各类部件的失效分布参数: $k_1$  表示非计划拆换人工小时费率,  $h_{unj}$  ( $j=1, \dots, n_{MSI}$ ) 表示非计划拆换人工时,  $k_{2j}$  表示部件  $j$  送修固定费用,  $N_j$  ( $j=1, \dots, n_{MSI}$ ) 表示部件  $j$  未实施 PHM 时送修次数(参考 2.2 节失效仿真模拟),  $k_3$  表示停场折算小时费率,  $t_{gj}$  ( $j=1, \dots, n_{MSI}$ ) 表示部件  $j$  失效导致的平均停场时间。

定义  $n_{un}$  表示实施 PHM 后因部件失效导致的非计划维修次数,其数值上等于各关键部件在仿真周期内实施 PHM 后模拟失效次数累加和,如式(7)所示。 $c_{unMSI}$  表示不考虑实施 PHM 情况下关键部件失效导致的非计划维修累计费用。这是一个组合费用,包括非计划拆换工时费用、部件送修费用

和停场折算费用,如式(8)所示。 $c_{newun}$  表示实施 PHM 后的非计划维修累计费用,因为在本文评估模型中考虑非计划维修费用为组合费用,与非计划维修次数有关,因此该数值计算如式(9)所示

$$n_{un} = \sum_{j=1}^{n_{MSI}} N_j (1 - P_{cov} P_{ue}) \quad j=1, \dots, n_{MSI} \quad (7)$$

$$c_{unMSI} = (k_1 \sum h_{unj} + \sum k_{2j} N_j + k_3 \sum t_{gj}) \quad j=1, \dots, n_{MSI} \quad (8)$$

$$c_{newun} = c_{unMSI} \frac{n_{un}}{\sum_{j=1}^{n_{MSI}} N_j} \quad j=1, \dots, n_{MSI} \quad (9)$$

### 1.5.3 PHM 的两类错误分析

虚警和漏警事件次数取决于 PHM 系统的性能参数,假设固定常数的虚警率和漏警率作为模型中 PHM 性能参数。设系统关键部件数目为  $n_{MSI}$ ,飞机服役时间为  $all\_life$ ,PHM 系统虚警率为  $p_{fa}$ ,漏警率为  $P_{mf}$ ,部件平均失效率为  $r_f$ 。根据如下公式可以计算服役周期内实施 PHM 导致的虚警事件数 NFF 和漏警事件数 MF

$$NFF = all\_life \times P_{cov} \times n_{MSI} \times P_{fa} \quad (10)$$

$$MF = P_{mf} \times P_{cov} \times n_{MSI} \times r_f \times all\_life \quad (11)$$

虚警和漏警事件,这两类事件都被视作实施 PHM 监测系统带来的额外维修工作,不同的是虚警事件只需要进行检查和排故工作,而漏警事件就需要进行非计划的拆换与送修。假设单次非计划检查人工时  $t_0$ ,单部件车间维修人工时  $t_1$ ,根据如下公式,可以计算虚警和漏警事件导致的维修工时和维修成本

$$h_{NFF} = t_0 \times NFF \quad (12)$$

$$c_{\text{NFF}} = k_0 \times h_{\text{NFF}} \times (1 + k) \quad (13)$$

$$h_{\text{MF}} = (t_0 + t_1) \text{MF} \quad (14)$$

$$c_{\text{MF}} = k_0 \times t_0 \times \text{MF} + k_2 \times \text{MF} + k_3 \times t_g \quad (15)$$

虚警事件只引起非计划的检查工作,所以计算虚警事件成本时,考虑航线检查、排故等费用(等于工时与人工费率乘积)与间接费用(工具、设备及停场或延误折算费用,取系数 $k$ 表示间接费用与直接费用比值)总和。

## 2 维修模式评估分析

基于PHM的维修模式在减少维修工时、节约维修费用和控制非计划维修的优越性需要通过实际的应用评估。考虑到PHM技术正在逐步应用到飞机监测与维护方面,还缺少实际的运行数据,所以应用计算机仿真技术来进行基于PHM的维修模式工时、成本的评估。评估算法流程如图4所示。

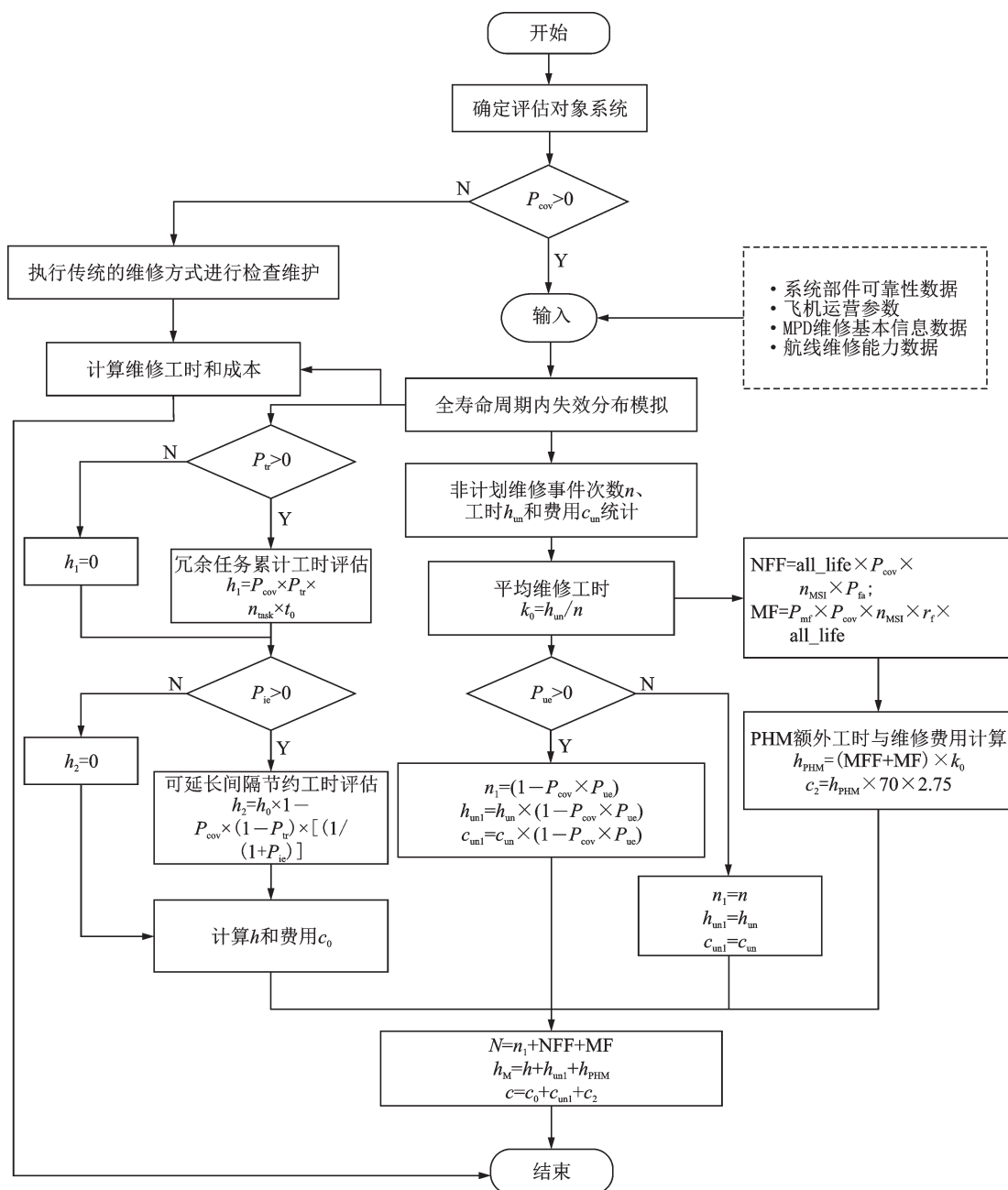


图4 评估算法流程图

Fig.4 Flow chart of evaluation algorithm

如图4所示,成本效益评估算法流程包括4个模块:PHM监测覆盖率 $P_{\text{cov}}=0$ 时,传统维修模式工时与成本计算模块;实施PHM维修模式下计划维修工时与成本计算模块;实施PHM维修模式下

非计划维修工时与成本模块;实施PHM维修模式虚漏警模块。图4中 $c_2$ 表示实施PHM维修后额外导致的维修任务所需要的成本。根据航空公司经验可知,PHM两类错误所导致的维修工作属于非

计划的,假设一般的维修人工小时费为70\$;由1.5.2节可知由于PHM两类错误所导致的维修费用为 $70 \times (1 + 1.75) \times h_{\text{PHM}}$ 。

根据式(1)和(2),可以计算未实施PHM的维修工时和成本

$$h_{M0} = h_{\text{MPD}} + h_{\text{un}} \quad (16)$$

$$C_0 = c_{\text{MPD}} + c_{\text{un}} \quad (17)$$

根据式(3)~(15),可以计算实施PHM之后的维修工时 $h_{\text{MPHM}}$ 、成本 $C_{\text{PHM}}$ 和非计划维修次数 $N_{\text{UPHM}}$

$$h_{\text{MPHM}} = h_{\text{newMPD}} + h_{\text{unnew}} + h_{\text{NFF}} + h_{\text{MF}} \quad (18)$$

$$C_{\text{PHM}} = c_{\text{newMPD}} + c_{\text{unnew}} + c_{\text{NFF}} + c_{\text{MF}} \quad (19)$$

$$N_{\text{UPHM}} = n_{\text{un}} + \text{NFF} + \text{MF} \quad (20)$$

### 3 案例分析

#### 3.1 机型选定与周转时间

选取单通道双发中短途运输类飞机作为研究与评估对象,参考一般的服役时间为25 a,飞机利用率为2 500飞行循环小时/年(FH/a)。飞机的具体周转时间数据<sup>[23]</sup>如表3所示。

表3 飞机周转时间

Table 3 Aircraft turnaround time

参数	数值
每周飞行天数/d	7
宵禁时间/h	7
每天飞行循环/FC	6
每次飞行平均时间(FH/FC)/h	1.25
滑行时间(起飞准备时间)/h	0.3
转场时间/h	0.75
燃油量(满载)/kg	4 000

在选择的研究对象服役周期25 a内,Nico等<sup>[23]</sup>将25 a内划分包括80次短区间间隔维检(等效传统的A检)和12次中区间间隔维检(等效传统的C检),短区间任务间隔在80~1 000 FH之间,中区间任务间隔在2 000~14 000 FH之间。根据MPD内维修任务统计与分组,不同间隔和任务组的任务量比重如表4所示。

#### 3.2 评估系统数据与假设

空调系统是调节和控制驾驶舱、客舱和货舱压力与温度的重要子系统,是舱室稳定的工作和生活环境的重要保障,也是航空公司监测重点关心对象之一。同时,空调系统中布设多种类型的传感器,可以监测表征系统或关键部件运行状态的参数,为开展基于参数监测的状态评估与维修工作提供基础。因此,本文选取空调系统作为应用实施

表4 计划维修任务分组情况

Table 4 Grouping and proportion of planned maintenance tasks

任务分类	TCG	短区间间隔		中区间间隔	
		维修工时/h	百分比/%	维修工时/h	百分比/%
常规任务组	1	1 898	8.4	3 311	11.0
	2	2 451	10.9	2 350	7.8
	3	1 193	5.3	2 446	8.2
	4	8 798	39.1	3 770	12.6
非常规任务组	5	3 568	15.9	8 251	27.5
	6	4 597	20.4	9 840	32.8
总计		22 505	100	29 968	100

PHM监测开展维修管理的对象,评估实施PHM后在维修工时、成本以及非计划事件控制方面的表现。

##### 3.2.1 空调系统的MPD维修任务数据

参考该类飞机MPD文件<sup>[24]</sup>,关于ATA21章空调这部分的计划维修任务一共包括17项,并给出首检时间和设定的维修间隔,以及相应工作的人工时间,具体如表5所示。

根据2008年航空维修的平均费用统计,MPD计划维修的直接人工小时费率是70\$/人工小时。而单次维修固定费用、单次维修材料费用、维修所需停场时间折算费用等间接维修,则是考虑到不同的维修要求及熟练度而转化成额外附加的直接费用。工程经验表明,间接费用是直接费用的1.5~2倍。本文研究设定间接费用是直接费用的1.75倍。

##### 3.2.2 空调系统关键部件可靠性数据

空调系统由左右两个制冷系统PACK组成,单PACK的关键部件包括:空气循环机ACM、热交换器(主次)、TCV活门、冲压空气作动筒、回热器、冷凝器、除水过滤装置、过热电门OVHT(3个)、温度传感器(3个),根据文献<sup>[25-28]</sup>和航空公司非计划拆换记录,拟合关键部件的可靠性数据,如表6所示。

如表6所示,已知空调系统关键部件可靠性数据,根据1.2提出的累积失效与非计划维修模拟方法,在飞机服役全寿命周期内仿真空调系统的失效时间分布和非计划维修次数。仿真结果如下:空调系统(左右两个PACK)在服役25 a内关键部件累积失效88次,平均拆换时间3.5 h,平均停场时间8.9 h。

非计划维修两部分工作:(1)是由故障检查、隔离排故与拆换等工作组成的航线维修工作,比一般



表 5 空调系统 MPD 维修任务数据汇总表

Table 5 Data of MPD maintenance task in air conditioning system

MPD 维修任务 编号	维修间隔	首检时间/FH	全寿命计划检修 次数	人工数/人	工时/ (人·h <sup>-1</sup> )	累积工时/ (人·h)
1	4C	12 000	4	1	0.30	1.20
2	4A	2 000	80	1	3.00	240.00
3	1C	3 000	16	1	4.00	64.00
4	2C	6 000	8	1	0.30	2.40
5	3C	9 000	6	2	1.00	12.00
6	1C	3 000	16	2	0.42	13.44
7	4C	12 000	4	1	0.75	3.00
8	3C	9 000	6	1	0.42	2.52
9	2C	6 000	8	1	5.00	40.00
10	3C	9 000	6	1	0.50	3.00
11	2C	6 000	8	1	0.10	0.80
12	2C	6 000	8	1	0.10	0.80
13	4C	12 000	4	2	0.50	4.00
14	1C	3 000	16	1	0.30	4.80
15	1C	3 000	16	1	0.10	1.60
16	4C	12 000	4	1	0.20	0.80
17	2C	6 000	8	1	0.20	1.60

表 6 空调系统可靠性数据

Table 6 Reliability data of air conditioning system

编号	维修项目	数量	分布形式	分布参数	工时/ (人·h <sup>-1</sup> )	停机 时间/h
1	ACM	1	Weibull	$m=2.562, \eta=19\ 700$	5.80	14.50
2	热交换器	2	Weibull	$m=1.624, \eta=12\ 562$	5.30	13.25
3	TCV	1	对数正态	$Mu=9.683, Sigma=0.629$	0.50	1.25
4	冲压空气作动筒	1	对数正态	$Mu=8.962, Sigma=0.735$	3.50	8.75
5	回热器	1	Weibull	$m=1.842, \eta=18\ 820$	6.00	15.00
6	冷凝器	1	Weibull	$m=1.842, \eta=18\ 820$	6.00	15.00
7	除水过滤装置	1	Weibull	$m=2.359, \eta=12\ 248$	5.00	12.50
8	OVHT	3	指数分布	$\lambda=6.96 \times 10^{-5}$	0.42	1.05
9	温度传感器	3	指数分布	$\lambda=3.59 \times 10^{-5}$	0.30	0.75

计划维修工作复杂且耗时;(2)车间送修工作。单次送修成本与修复度有关。本文研究认为每次送修都是恢复如新的,而假设单次送修成本等于航线维修成本的 3 倍。根据工程经验,停场时间  $t_g$  一般是维修时间的 2~3 倍,本文假定停场时间是维修时间的 2.5 倍,而停场时间折算成本小时费率一般参考延误时间折算标准,0.63 \$/min。

3.3 PHM 参数确定

如 1.4 节所示的 PHM 系统性能参数,考虑包括:PHM 系统覆盖率  $P_{cov}$ ,任务冗余率  $P_{tr}$ ,区间间隔延长参数  $P_{ie}$ ,故障检测率  $P_{ue}$ ,虚警率  $P_{fa}$ ,漏警率  $P_{mf}$ ,而  $P_{ue}+P_{mf}=1$ 。评估模型内参数及其变化区间如表 7 所示。

本文研究的是一架飞机服役期间实施 PHM

表 7 PHM 参数变化区间

Table 7 Variation range of PHM parameter

性能参数	变化区间				
$P_{cov}/\%$	10	20	40	60	80
$P_{ue}/\%$	80	85	90	95	100
$P_{fa}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
$P_{tr}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$P_{ie}$	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20

监测系统的维修模式和工时成本变化,而对于更为复杂的机队(存在相互约束或维修资源竞争等关系)不在研究之内。考虑到不同 PHM 性能参数对于维修工时和成本的影响,评估算法开始时固定其他参数,只改变一个或同时改变几个参数输入来进行仿真分析,对比实施 PHM 前后维修工时、成本



和非计划维修拆换次数。

### 3.4 分析结果

基于PHM的维修模式评估主要是通过对不同PHM性能参数下的维修工时、成本和非计划维修事件的仿真分析,结果描述单一的飞机服役周期内的相关指标。本文研究包括504个独立的服役周期仿真分析,服役时间25 a,年利用率2 500 FH,并根据不同的参数变化表现出不同的指标影响,仿真分析结果如图5—7所示。

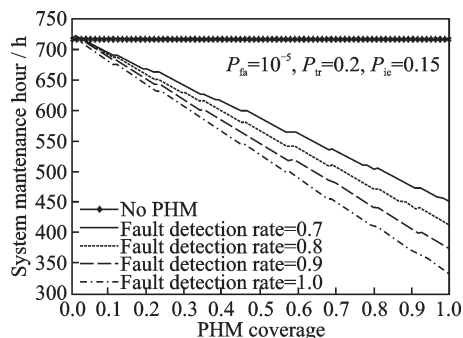


图5 系统维修总工时与覆盖率和检测率关系图

Fig.5 Relations between total maintenance hours of system, coverage percentage and fault detection rate

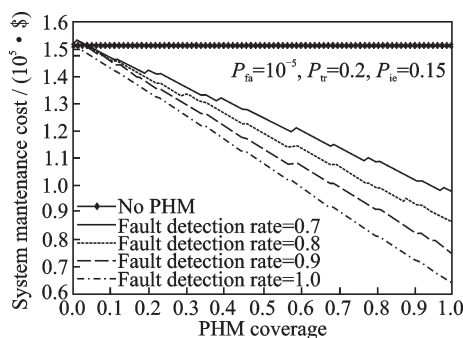


图6 系统维修总成本与覆盖率和检测率关系图

Fig.6 Relations between total maintenance cost of system, coverage percentage and fault detection rate

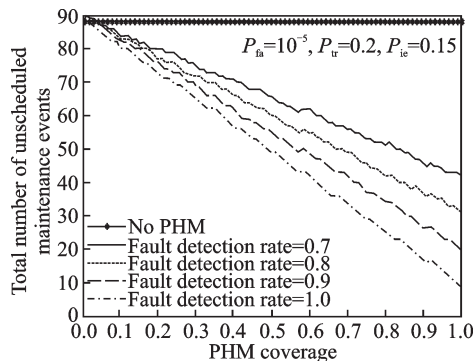


图7 非计划维修事件总数与覆盖率和检测率关系图

Fig.7 Relations between total number of unscheduled maintenance event, coverage percentage and fault detection rate

假设虚警率  $P_{fa}=10^{-5}$ 、冗余率  $P_{tr}=0.2$  和区间间隔延长参数  $P_{ic}=0.15$  情况下,实施PHM的维修

模式相比于传统的预防性维修可以减少维修总工时、节约维修成本和减少非计划维修事件次数,从而提高经济效益。PHM维修模式的优越性与性能参数覆盖率和故障检测率有关。理想状态下(覆盖率  $P_{cov}=100\%$ ,故障检测率  $P_{ue}=100\%$ ),系统维修总工时相比于传统预防性维修模式减少了大约400人工小时(约占原总工时56%),节约9 000\$维修成本(约占原总成本60%),减少了78起非计划维修事件(约占原总次数88%)。

如图5—7中所示,实施了PHM之后,总的维修工时、成本和非计划维修事件数随着覆盖率增加而减少。而当PHM覆盖率较低时,由于虚警和漏警两类错误存在,有可能导致系统维修工时、成本和非计划维修事件数相比于传统的预防性维修模式有所增加。

如图5—7所示,相同覆盖率情况下,故障检测率越高对应的维修工时、成本和非计划维修事件数量越少。这一结果表明,故障检测率越高对应着PHM系统监测准确性越高,系统的漏警率越低,PHM的二类错误越少,相应的维修工时、成本和非计划维修事件数越少。

应用PHM监测系统之后的维修模式可以部分替代传统MPD计划维修任务或延长维修间隔,而任务冗余或任务间隔延长与非计划事件控制无关。评估PHM系统冗余率与区间间隔延长参数对于维修工时、成本,包括100个独立的服役周期仿真分析,服役时间25 a,利用率2 500 FH/a,仿真分析结果如图8,9所示。

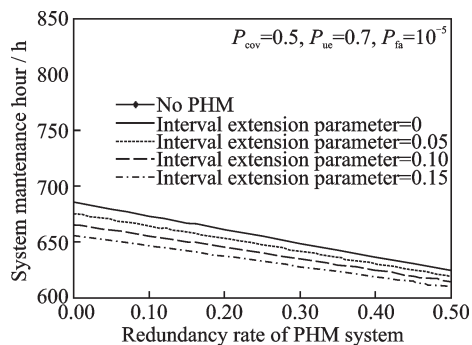


图8 系统维修总工时与冗余率和间隔延长率关系图

Fig.8 Relations between total maintenance hours of system, redundancy rate and interval extension rate

由图8和图9可知,在设定覆盖率  $P_{cov}=0.5$ ,检测率  $P_{ue}=0.7$ ,虚警率  $P_{fa}=10^{-5}$ ,提高PHM系统冗余率和区间间隔延长参数,系统总的维修工时和成本会相应减少。当PHM系统不考虑任务冗余或任务间隔延长时,由于系统监测关键部件状态避免了部分非计划维修,所以维修总工时和成本也相比

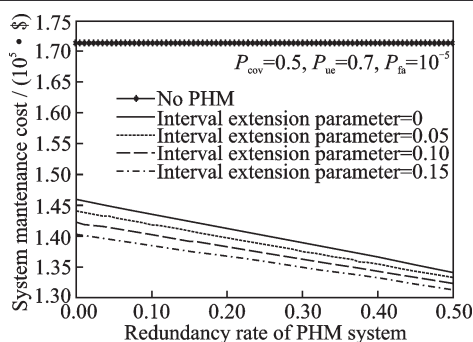


图9 系统维修总成本与冗余率和间隔延长率关系图

Fig.9 Relations between total maintenance cost of system, redundancy rate and interval extension rate

于传统维修方式低。

## 4 结 论

本文在传统维修基础上,基于PHM的维修模式概念,建立PHM维修模式下的计划维修优化、非计划维修可控以及PHM错误影响分析成本模型。建立PHM维修模式下的维修工时、维修成本和非计划维修事件数计算方法。并通过空调系统的实际案例验证PHM维修模式在节约工时、减少成本和控制非计划事件方面的优势,为进一步PHM技术应用到航空维修领域工程验证提供理论基础,在工程上为积极推动PHM技术应用提供理论支持。

本文的案例中,仿真结论是基于理想条件(即PHM性能参数假设覆盖率和检测率都是100%)下数值得到结果。这是为了最大化表征应用PHM的维修模式相比较传统维修的效益,在实际工程应用中应该代入具体的参数如覆盖率和检测率。

在未来研究中,不仅要考虑在单一系统上评估实施PHM维修的效益,要从多系统构建评估模型,并且将效益评估延伸到安全性方面。

## 参考文献:

- [1] BANKS J, REICHARD K, CROW E. How engineers can conduct cost-benefit analysis for PHM systems [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2005: 1109.
- [2] 左洪福,蔡景,吴昊,等.航空维修工程学[M].1版.北京:科学出版社,2011: 283.  
ZUO Hongfu, CAI Jing, WU Hao, et al. Aviation maintenance engineering [M]. 1st Edition. Beijing: Science Press, 2011: 283.
- [3] 蔡景,左洪福,王华伟.多部件系统的预防性维修优化模型研究[J].系统工程理论与实践,2007(2): 133-138.  
CAI Jing, ZUO Hongfu, WANG Huawei. A study

on preventive maintenance optimization model for multi-unit system [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007(2): 133-138.

- [4] 金玉兰,蒋祖华.预防性维修计划和生产调度的多目标优化[J].哈尔滨工程大学学报,2011,31(9): 1205-1209.  
JIN Yulan, JIANG Zuhua. Multi-objective optimization research on preventive maintenance planning and production scheduling [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 31(9): 1205-1209.
- [5] 李大伟,张志华,刘天华,等.基于定期维护的产品维修策略研究[J].航空学报,2013,34(5): 1101-1107.  
LI Dawei, ZHANG Zhihua, LIU Tianhua, et al. Product maintenance strategy research based on scheduled servicing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1101-1107.
- [6] RONG X, ZUO H F. The CBM decision method of the civil aviation engine [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 25(3): 201-207.
- [7] JARDINE A K S, LIN D, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 20(7): 1483-1510.
- [8] JOHNSON S B, GORMLEY T J, KESSLER S S, et al. The business case for SHM (system health management): With aerospace applications [M]. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2011: 77-91.
- [9] WALTER G, FLAPPER S D. Condition-based maintenance for complex systems based on current component status and Bayesian updating of component reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168: 227-239.
- [10] 葛恩顺,李庆民,彭英武,等.多重故障并发下单部件系统视情维修建模与优化[J].航空学报,2013,34(3): 580-587.  
GE Enshun, LI Qingmin, PENG Yingwu, et al. Condition-based maintenance modeling and optimization for single-unit system with multiple competing processes [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 580-587.
- [11] 葛恩顺,李庆民,张光宇,等.考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略[J].航空学报,2013,34(2): 316-324.  
GE Enshun, LI Qingmin, ZHANG Guangyu, et al. Optimization of condition-based maintenance for degradation systems under imperfect maintenance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 316-324.
- [12] HÖLZEL N B, SCHILLING T, GOLLNICK V. An

- aircraft lifecycle approach for the cost-benefit analysis of prognostics and condition-based maintenance based on discrete-event simulation[C]//Proceedings of Annual Conference of the Prognostics And Health Management Society. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-16.
- [13] WANG W. A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance[J]. International Journal of Production Research, 2000, 38(6): 1425-1436.
- [14] GRALL A, BÉRENGUER C, DIEULLE L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 76(2): 167-180.
- [15] HU J, JIANG Z, LIAO H. Preventive maintenance of a single machine system working under piecewise constant operating condition[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168(3): 105-115.
- [16] BERRADE M D, SCARF P A, CAVALCANTE C A V. A study of postponed replacement in a delay time model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168(3): 70-79.
- [17] 吴静敏, 左洪福. 基于案例推理的直接维修成本预计方法[J]. 航空学报, 2005, 26(2): 190-194.  
WU Jingmin, ZUO Hongfu. New method for direct maintenance cost estimating by using CBR[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(2): 190-194.
- [18] ZHANG Z, ZHU J, PAN F. Fault detection and diagnosis for data incomplete industrial systems with new Bayesian network approach[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(3): 500-511.
- [19] 李石磊, 梁加红, 吴冰. 可靠性仿真在模糊故障诊断中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(10): 1609-1612.  
LI Shilei, LIANG Jiahong, WU Bing. Application of the reliability simulation in fuzzy fault diagnosis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(10): 1609-1612.
- [20] COMPARE M, BELLANI L, ZIO E. Reliability model of a component equipped with PHM capabilities[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168(1): 4-11.
- [21] RODRIGUES L R, GOMES J P P, FERRI F A S, et al. Use of PHM information and system architecture for optimized aircraft maintenance planning[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1197-1207.
- [22] HUNTER G W, LEKKI J D, SIMON D L, et al. Concept of operations for an integrated vehicle health assurance system[M]. USA: NASA, 2013.
- [23] NICO B H, THOMAS S, VOLKER G. Cost-benefit analysis of prognostics and condition-based maintenance concepts for commercial aircraft considering prognostic errors[C]//Proceedings of Annual Conference of the Prognostics And Health Management Society. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [24] Airbus. A318/A319/A320/A321 maintenance planning document[M]. Germany: Airbus, 2007.
- [25] 侯学东. 飞机环境控制系统的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
HOU Xuedong. The simulation and research of aircraft environmental control system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [26] SILVA A, NAJJAR N, GUPTA S, et al. Wavelet-based fouling diagnosis of the heat exchanger in the aircraft environmental control system[C]//Proceedings of SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. Seattle, USA: SAE, 2015: 30-36.
- [27] LI H, ZUO H, LEI D, et al. Optimal combination of aircraft maintenance tasks by a novel simplex optimization method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1): 1-19.
- [28] LI Huaiyuan, ZUO Hongfu, LIANG Kun, et al. Optimizing combination of aircraft maintenance tasks by adaptive genetic algorithm based on cluster search[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(1): 140-156.

(编辑:张蓓)