

文章编号:1674-8190(2015)03-347-07

# 民用航空发动机水洗效果量化评价方法

付旭云<sup>1</sup>, 钟诗胜<sup>1,2</sup>, 姜海波<sup>2</sup>, 毛浩权<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 船舶与海洋工程学院, 威海 264209)

(2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

(3. 中国国际航空股份有限公司 工程技术分公司, 北京 101312)

**摘要:** 为了掌握水洗对民用航空发动机性能的改善效果, 实现从定时水洗向视情水洗的转变, 并为航空公司评估节能减排工作成效提供支持, 提出一种发动机水洗效果量化评价方法。该方法选择延长在翼时间和节省燃油量作为评价发动机水洗效果的两个主要指标, 给出评价指标的计算方法; 建立基于成本的发动机水洗效果评价模型, 基于该模型对水洗效果进行评价; 采用某台水洗后发动机的实际数据对所提出的方法进行验证。最后, 基于所提方法开发发动机水洗管理系统。结果表明: 所提方法能够实现发动机水洗效果的定量评价, 为视情水洗的实现和航空公司评估节能减排工作成效提供支持。

**关键词:** 民用航空发动机; 水洗; 在翼时间; 燃油量; 效果评价

**中图分类号:** TH17

**文献标识码:** A

## Quantitative Evaluation Method of Civil Aero-engine Water Wash

Fu Xuyun<sup>1</sup>, Zhong Shisheng<sup>1,2</sup>, Jiang Haibo<sup>2</sup>, Mao Haoquan<sup>3</sup>

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

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

(3. Engineering Technology Branch, Air China Limited, Beijing 101312, China)

**Abstract:** To obtain the effect of water wash on improving civil aero-engine performance, realize the transition from a fixed time water wash to on condition water wash, and provide support for assessing the effectiveness of energy saving for an airline, an effect evaluation method of aero-engine water wash is proposed. In the method, the extending time on wing and the saving fuel quantity are chosen as main evaluation indicators of evaluating the effect of aero-engine water wash, and calculation methods of evaluation indicators are put forward. The effect evaluation model based on cost of aero-engine water wash is established, and water wash effect can be evaluated based on the model. The proposed method is varified by the actual data from an aero-engine after water wash. Finally, an aero-engine water wash management system is developed based on the proposed method. Results show that the proposed method can achieve a quantitative evaluation of the effect of aero-engine water wash. This study can provide support for the implementation of on condition water wash, and also provide support for assessing the effectiveness of energy saving for an airline.

**Key words:** civil aero-engine; water wash; time on wing; fuel quantity; effect evaluation

收稿日期:2015-05-19; 修回日期:2015-06-21

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

通信作者:付旭云, fuxy@hitwh.edu.cn

## 0 引言

航空发动机结构复杂, 由压气机、燃烧室、涡轮等重要部件组成。这些部件的性能随着发动机工作时间的积累而逐渐衰退, 并对发动机整体性能产生影响, 致使发动机在工作过程中出现推力减小、

燃油消耗增加、排气温度升高、热端部件寿命缩短等现象,直接影响发动机的运行可靠性与经济性<sup>[1]</sup>。

导致发动机性能衰退的因素复杂多样,例如机械部件磨损、内部污垢堆积等,其中污垢堆积是一个普遍存在的因素。发动机在工作时始终暴露在空气中,随着工作时间的积累,空气中的灰尘、悬浮颗粒等污染物会进入发动机内部并附着在进气道、压气机叶片等零部件上,使其表面粗糙度以及几何形状产生变化,导致诸如压气机空气流量、工作效率降低,散热性能恶化等问题,严重时还会引起喘振。如果空气中盐雾含量较大、湿度大,叶片上会附着盐渍,长久下来会对叶片产生腐蚀,降低叶片强度,缩短发动机使用寿命。由此可见,污垢堆积对发动机的危害很大,不容忽视,必须及时清理。根据航空公司和发动机生产厂家的经验,对发动机进行水洗已成为一种经济有效的改善此问题的手段。

发动机水洗是指无需对发动机进行拆卸而对其气路通道进行清洗,通过清除掉内部堆积的污垢来实现部分恢复发动机的性能。目前各大航空公司已广泛采用定时水洗的方法来适度提升发动机性能,但由于水洗时发动机状态各不相同,采用的水洗设备和水洗工艺也不尽相同,导致发动机每次水洗的效果均有所差异。为了实现视情水洗,即根据发动机状态合理安排发动机水洗,必须首先对发动机水洗效果进行评价。此外,发动机水洗属于航空公司节能减排方面的工作之一,为了评估航空公司节能减排工作的成效,也必须对发动机水洗效果进行评价。因此,能够准确评价水洗效果具有非常重要的现实意义,有必要对其展开研究。

目前,关于发动机水洗相关内容的研究工作多见于水洗所用清洗剂和水洗工艺方法的研究,也有部分关于污垢沉积对发动机性能影响的研究<sup>[1-4]</sup>。而对于发动机水洗效果评价的研究,多是简单地介绍水洗能够起到延长在翼时间、降低燃油消耗等作用,具体的量化评价方法却少有研究。关于发动机在翼时间预测和燃油流量预测已有很多研究。发动机在翼时间受多种因素影响,主要有性能衰退、寿命件到寿、适航指令/服务通告、硬件损伤等<sup>[5]</sup>。富涛等<sup>[6]</sup>从性能衰退角度预测发动机的在翼时间,

选取排气温度偏差值来表征发动机的性能状态,通过其衰退率来预测发动机剩余寿命,但该文研究的是整个机队的平均衰退率,而现实中各发动机会存在一定差异。Gary R. Weckman 等<sup>[7]</sup>将影响发动机送修的因素进行分类,并针对不同因素建立了在翼时间预测模型,提高了预测精度。在燃油流量预测方面,罗罗公司提出了一种计算方法,假设燃油流量偏差值随时间呈线性增加,通过计算水洗前后燃油流量偏差值曲线间的面积来估算水洗节省的燃油量,但实际中燃油流量偏差值短期内波动较大,因此该算法并不准确。张金柱等<sup>[8]</sup>分析了发动机状态参数与燃油流量之间的关系,利用回归分析建立了燃油流量模型。曹惠玲等<sup>[9]</sup>则利用 QAR (Quick Access Recorder) 数据建立了爬升阶段的燃油流量回归模型。Glenn D. Schilling<sup>[10]</sup>通过神经网络对阻力、推力、燃油流量间的关系进行了建模,但模型中考虑的因素过少,与实际情况差距较大。刘婧<sup>[11]</sup>利用神经网络结合飞行参数对整个飞行过程的燃油流量进行预测,但其输入的飞行参数中没有表征发动机性能的参数,未考虑性能衰退对燃油流量的影响。上述方法均难以适用于水洗节省燃油量的计算。

综上,目前关于发动机水洗效果评价的研究还不成熟,但相关问题的研究可以提供一定的参考。发动机经过一次有效的水洗后,能够在一定程度上恢复部分性能,例如由于发动机积垢造成的性能衰退,主要表现为排气温度裕度(Exhaust Gas Temperature Margin, 简称 EGTM)有所提高,燃油消耗率下降。EGTM 提高意味着在翼时间的延长,燃油消耗率降低意味着燃油量的节省。因此,本文提出一种发动机水洗效果量化评价方法,选择延长在翼时间、节省燃油量作为发动机水洗效果的评价指标,首先研究评价指标的计算方法,然后建立基于成本的发动机水洗效果评价模型,最后结合应用实例对本文提出的方法进行验证,并基于该方法设计开发发动机水洗管理系统。

## 1 量化评价方法

### 1.1 延长在翼时间计算

EGTM 是监控发动机性能衰退的重要指标。

EGTM 是指标准状态下,发动机采用全功率起飞时排气温度与红线值的差值,红线值取决于发动机部件材料所能承受的温度负荷。如果排气温度高于红线温度,将会对发动机部件造成损伤,影响发动机的使用寿命。因此,对于不同型号的发动机,制造商都给出了其相应的 EGTM 警戒值,当发动机 EGTM 达到警戒值时,就需要送修。通过分析 EGTM 的长期变化趋势,得到 EGTM 衰退率,将 EGTM 警戒值作为限制条件,即可计算出发动机的剩余寿命。发动机进行水洗后,其 EGTM 将会有一定升高,EGTM 衰退率也可能会发生一定的变化。根据 EGTM 警戒值、水洗前后 EGTM 数据及其衰退率,便可估算出 EGTM 达到警戒值时所需的时间,即发动机的剩余寿命,两者的差值即为本次水洗可延长的在翼时间。影响发动机在翼时间的因素很多,性能衰退只是其中之一,其他因素还包括寿命件、硬件损伤等,由于水洗主要改善发动机的性能,不会对其他因素造成影响,因此,本文只基于 EGTM 数据从性能衰退角度来判断发动机的剩余寿命。

EGTM 数据属于时间序列。EGTM 原始数据中通常包含粗大误差和噪声,在短期内数据存在较大波动,但从长期看具有明显的下降趋势。为了提高发动机剩余寿命预测的精度,首先对 EGTM 原始数据进行粗大误差剔除和平滑处理,然后进行趋势项提取,最后基于提取出的趋势项计算 EGTM 衰退率,进而预测发动机剩余寿命。

基于 EGTM 数据计算水洗可延长的在翼时间的具体步骤如下:

**步骤 1** 收集水洗前 EGTM 原始数据和水洗后 EGTM 原始数据。

**步骤 2** 分别剔除水洗前 EGTM 原始数据、水洗后 EGTM 原始数据中的粗大误差,可以采用拉依达准则、罗曼诺夫准则、肖维勒准则、箱形图法等<sup>[12]</sup>。

**步骤 3** 对剔除了粗大误差的水洗前 EGTM 数据、水洗后 EGTM 数据进行平滑处理,可以采用移动平均平滑法或者指数平滑法。

**步骤 4** 基于平滑处理后的水洗前 EGTM 数据、水洗后 EGTM 数据提取水洗前后 EGTM 时间序列趋势项。奇异值分解能够对信号进行重构,提

取信号中的主要特征,在信号分离与滤波降噪中有着广泛的应用,本文采用该方法对 EGTM 时间序列的趋势项进行提取。

**步骤 5** 根据从水洗前 EGTM 时间序列和水洗后 EGTM 时间序列中提取出的趋势项,应用一元线性回归分析水洗前和水洗后 EGTM 衰退模式,建立 EGTM 衰退模型如下:

$$y_i = k_1 x_i + k_2 + \varepsilon(x_i) \quad (1)$$

$$y'_i = k'_1 x'_i + k'_2 + \varepsilon'(x'_i) \quad (2)$$

式中: $y_i$ 、 $y'_i$  分别为从水洗前 EGTM 时间序列和水洗后 EGTM 时间序列中提取出的趋势项; $x_i$ 、 $x'_i$  为在翼时间; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k'_1$ 、 $k'_2$  为回归系数,其中  $k_1$ 、 $k'_1$  分别为水洗前和水洗后的 EGTM 衰退率; $\varepsilon(x_i)$ 、 $\varepsilon'(x'_i)$  为随机干扰项。

采用最小二乘法求解出回归系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k'_1$ 、 $k'_2$ 。

**步骤 6** 根据式(3)~式(4)分别计算发动机水洗前和水洗后衰退到警戒值的在翼时间。

$$x_R = (y_R - k_2) / k_1 \quad (3)$$

$$x'_R = (y'_R - k'_2) / k'_1 \quad (4)$$

式中: $y_R$  为 EGTM 警戒值; $x_R$  为水洗前发动机从装机衰退到警戒值的在翼时间; $x'_R$  为水洗后发动机从水洗开始衰退到警戒值的在翼时间。

**步骤 7** 采用式(5)计算水洗延长的在翼时间。

$$L_D = x'_R - (x_R - x_w) \quad (5)$$

式中: $x_w$  为水洗时的发动机在翼时间; $L_D$  为水洗延长的在翼时间。

## 1.2 节省燃油量计算

发动机水洗能够提高发动机的工作效率,降低发动机的燃油消耗率,进而减少发动机消耗的燃油量。飞机整个飞行过程主要由起飞、爬升、巡航、降落四个阶段组成,其中巡航阶段发动机工作状态稳定,持续时间最长,其消耗的燃油量所占比重最大,而且巡航阶段发动机状态参数容易获取,故本文仅针对巡航阶段进行研究。

如果能够分别获取到发动机水洗后和不水洗两种条件下某一段时间内的燃油流量(Fuel Flow, 简称 FF),则容易估算出在该时间段内节省的燃油量。实际上,如果发动机进行了水洗,则其不水洗

条件下的 FF 不可能获得。另外,FF 与飞行环境、飞行状态密切相关,因此,脱离了一定飞行环境、飞行状态下计算得出的节省燃油量并不具有太大的参考性。一般情况下,通过发动机制造厂家的性能监控软件获取到的 FF 相关参数只有 FF 实际测量值及 FF 偏差值(Delta Fuel Flow,简称 DFF)。FF 实际测量值与飞行环境、飞行状态密切相关;DFF 是 FF 标准化值偏离 FF 基线值的百分比,即发动机在标准飞行环境下与相同飞行状态的健康发动机相比,其 FF 偏离的百分比,如式(6)所示。本文基于发动机 DFF 进行节省燃油量的计算。

$$f_d = \frac{f_s - f_b}{f_b} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $f_d$  为 DFF; $f_s$  为 FF 标准化值(kg/h); $f_b$  为 FF 基线值(kg/h)。

正常情况下,发动机水洗后 DFF 会有所降低,随着发动机的继续使用, DFF 将逐渐升高,如图 1 所示,阴影部分表示通过水洗带来的燃油消耗量的减少水平,其纵向反映发动机经过水洗后性能恢复的程度,横向表示水洗效果的持续时间。

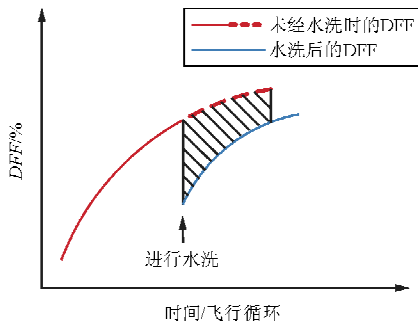


图 1 水洗前后 DFF 变化

Fig. 1 The change of DFF before and after water wash

发动机水洗后的节省燃油量可以按照式(7)近似计算。

$$F_D = f_B \cdot \sum_{i=1}^N [T_i \cdot (f_{d1,i} - f_{d2,i})] \quad (7)$$

式中: $F_D$  为发动机水洗后的节省燃油量(kg); $f_B$  为在标准飞行环境下某飞行状态下的 FF 基线值(kg/h),可以采用机队中健康发动机的 FF 平均值代替该值进行  $F_D$  的估算; $N$  为水洗效果持续循环数,可将水洗后 EGTM 恢复到水洗前水平时发动机所经历的飞行循环作为该值; $T_i$  为水洗后第  $i$  个飞行循环对应的飞行小时数(h); $f_{d1,i}$  为水洗后

第  $i$  个飞行循环对应的如果不水洗时的 DFF,可以根据历史数据采用过程神经网络进行预测<sup>[13]</sup>; $f_{d2,i}$  为水洗后第  $i$  个飞行循环对应的 DFF。

### 1.3 评价模型建立

发动机水洗能够延长在翼时间,节省燃油量。延长在翼时间意味着降低了发动机维修成本,节省燃油量意味着降低了燃油成本。为了能够对发动机每次水洗的效果进行评价,建立基于成本的发动机水洗效果评价模型:

$$C = L_D \cdot C_L + F_D \cdot C_F \quad (8)$$

式中: $C$  为发动机水洗后节约的总成本(元); $L_D$  为发动机水洗后延长的在翼时间(飞行循环); $C_L$  为发动机单位飞行循环成本(元/飞行循环); $C_F$  为发动机燃油价格(元/kg)。

## 2 应用案例

对水洗后的某台 CFM56-5B 发动机进行水洗效果评价。该台发动机的小时循环比约为 1.42,其 EGTM 数据、DFF 数据来源于 GE 航空的 RD (Remote Diagnostics) 系统。

首先计算延长的在翼时间。该发动机水洗前后 EGTM 时间序列如图 2 所示,发动机在第 870 个采样点之后进行水洗。

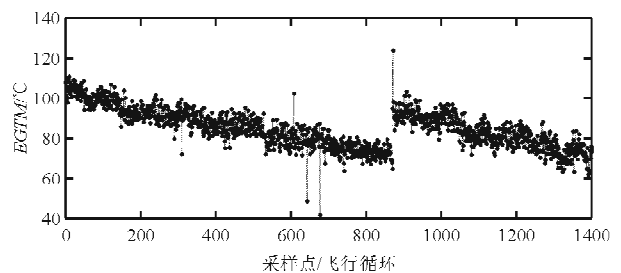


图 2 发动机水洗前后 EGTM 序列

Fig. 2 The EGTM data before and after water wash

从图 2 可以看出,发动机经过水洗后 EGTM 明显提高,表明该发动机经过水洗后其性能得到了一定恢复。

首先采用箱形图法对 EGTM 时间序列进行粗大误差剔除,然后利用指数平滑法进行平滑,最后采用奇异值分解方法分别提取水洗前后 EGTM 时间序列的趋势项。提取的趋势项如图 3 所示。

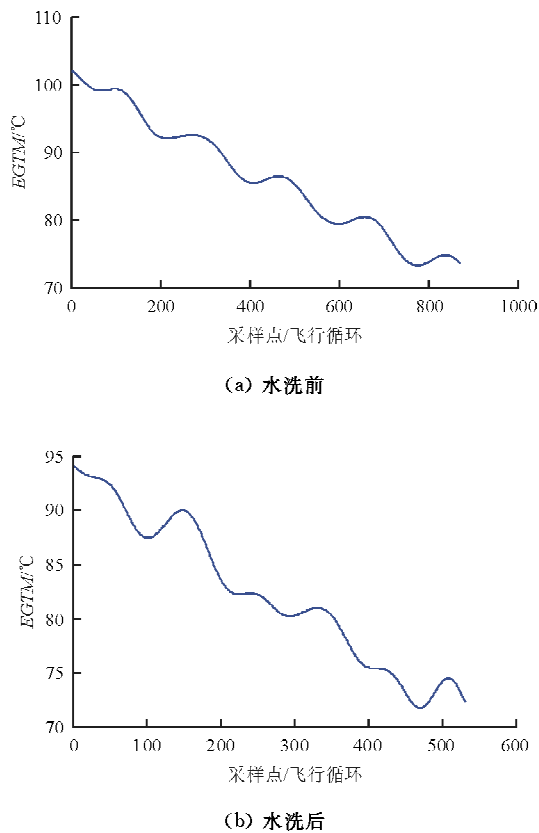


图3 发动机水洗前后EGTM时间序列趋势项

Fig. 3 Trend term of EGTM time series before and after water wash

采用提取的EGTM趋势项,通过一元线性回归分别计算水洗前后EGTM衰退率。

水洗前EGTM的回归方程为

$$y = -0.0343x + 101.3724 \quad (9)$$

式中: $y$ 为EGTM值; $x$ 为飞行循环数。

理论上,当EGTM降到 $0^{\circ}\text{C}$ 时,发动机则应该拆下送修。实际上,由于EGTM短期内具有一定波动,为了确保EGTM不超限,通常需设有一定余量。设该发动机EGTM阈值为 $20^{\circ}\text{C}$ ,则根据式(9)计算得出,如果此发动机不进行水洗操作,经过1502飞行循环后,EGTM将衰退到 $20^{\circ}\text{C}$ 。

水洗后EGTM的回归方程为

$$y' = -0.0386x' + 92.6429 \quad (10)$$

根据式(10)计算得出,此发动机水洗后,EGTM有所提升,再经过1881个飞行循环,EGTM将衰退到 $20^{\circ}\text{C}$ 。因此,该发动机通过本次水洗延长的在翼时间为379飞行循环。

根据式(7)计算节省的燃油量。该型发动机机

队中健康发动机的FF平均值约为 $1600\text{ kg/h}$ ,故取 $f_B = 1600\text{ kg/h}$ 。根据式(9)~式(10)计算得出 $N = 547$ 飞行循环。 $T_i$ 和 $f_{d1,i}$ 能够直接获得, $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )取自飞机的飞行时间记录; $f_{d1,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )取自发动机制造厂家的性能监控系统。 $f_{d2,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )采用过程神经网络预测得到。经过计算,该发动机水洗后节省的燃油量 $F_D = 3632.1\text{ kg}$ 。

如果单位飞行循环成本按 $1000$ 元/飞行循环计算,发动机燃油价格按 $6.8$ 元/kg计算,则根据式(8),该台发动机本次水洗后节约的总成本为 $403698.28$ 元。

综上所述,该台发动机本次水洗效果显著。当然,并不是每次水洗都能取得很好的效果。通过收集大量的发动机水洗原始数据,进行水洗效果评价,分析影响水洗效果的因素,并据此确定发动机的水洗时机,对航空公司具有重要的意义。

### 3 发动机水洗管理系统的开发及应用

发动机水洗是发动机日常维护工作中常用的有效手段之一。为了对发动机水洗数据进行管理,对发动机每次水洗后的效果进行评价,并为合理安排水洗时机提供数据支持,开发发动机水洗管理系统,该系统的功能模型如图4所示。具体功能描述如下:

#### (1) 水洗执行单位信息管理

对水洗执行单位信息进行维护,包括水洗设备、工艺等信息。

#### (2) 水洗历史信息管理

对每台发动机的水洗历史信息进行维护,包括每次进行水洗的发动机序号、飞机注册号、水洗日期、水洗执行单位等。

#### (3) 水洗后参数恢复值可视化

根据水洗日期计算出水洗前后性能参数的变化,以图形形式展示给工程师,可对多台发动机水洗效果进行对比,并对不同水洗执行单位整体水洗效果进行对比。

#### (4) 水洗效果评估

水洗效果的具体量化评估,主要从延长在翼时间和节省燃油量两方面进行评估。利用本文提出的方法,根据从性能数据接口得到的水洗前后的发动机状态参数来计算各发动机各次水洗延长的在

翼时间和节省的燃油量。

(5) 自动报警

对水洗间隔进行报警,由工程师设定水洗间隔阈值,系统根据记录的水洗历史信息中的水洗日期数据,来判断水洗间隔是否超过阈值,如果超过阈

值,系统将进行自动报警。

(6) 报告生成

系统将发动机的水洗信息以固定格式文件输出,包括每次水洗的日期、水洗执行单位、水洗效果等详细信息。

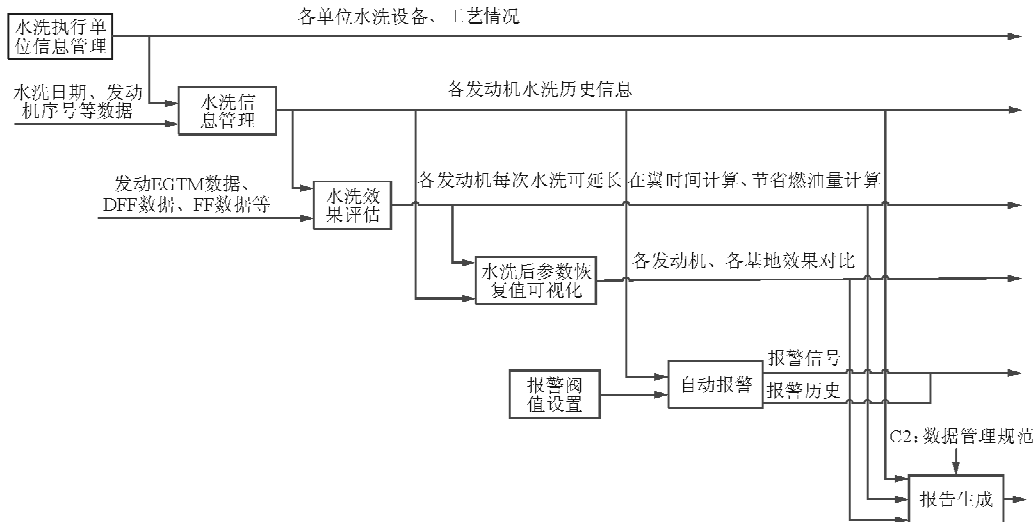


图 4 系统功能模型

Fig. 4 System function model

系统水洗记录维护界面如图 5 所示。

操作	水洗日期	飞机注册号	发位	发动机序号	发动机系列	发动机型号	水洗单位	水洗前EGTM平均值	水洗后EGTM平均值	EGTM恢复值
✖	2014-03-02	T-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.777	▲	5.0
✖	2014-03-03	D-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.607	▲	21.11
✖	2014-03-06	B-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.607	▲	3.0
✖	2014-03-06	B-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.607	▲	22.13
✖	2014-03-09	B-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.607	▲	13.0
✖	2014-03-12	B-2060	1	222082	FW407TD	FW407TD		54.607	▲	10.0
✖	2011-04-13	B-8422	1	802151	CFM56-7B	CFM56-7B26A	Aneco	64.838	▲	3.7
✖	2011-03-21	B-8422	1	802151	CFM56-7B	CFM56-7B26A	Aneco	64.838	▲	-20.582
✖	2014-03-28	B-8431	1	802311	CFM56-7B	CFM56-7B26A	Aneco	43.638	▲	-8.638
✖	2011-04-14	B-8311	1	802352	CFM56-7B	CFM56-7B24A	Aneco	61.712	▲	3.5

图 5 水洗信息管理界面

Fig. 5 Management interface of water wash information

该发动机水洗管理系统已在我国某航空公司进行了应用,实现了该航空公司的水洗记录管理以及水洗效果评估。应用表明,系统给出的水洗效果评估结果具有较高的可信度,能够为航空公司评估节能减排工作成效提供支持。

4 结 论

(1) 发动机水洗是部分恢复发动机性能的一种经济有效的手段,本文提出了一种发动机水洗效果量化评价方法,实际应用表明,该方法对发动机

的水洗效果显著,能够为发动机视情水洗的实现和航空公司评估节能减排工作成效提供支持。

(2) 在本文研究的基础上,还可以进一步开展如下研究:①由于数据的限制,本文只对巡航阶段能够节省的燃油量计算方法进行了研究,在收集起飞、爬升等阶段的大量数据后,才能提出整个飞行阶段的节省燃油量计算方法;②发动机水洗时机是发动机水洗效果的重要影响因素,为了实现视情水洗,需要开展发动机水洗时机确定方法的研究。

### 参考文献

- [1] 石硕. 民用航空发动机性能维持清洗方法研究[J]. 科技信息, 2013(15): 84-85.  
Shi Shuo. On-wing compressor washing investigation for civil aero-engine performance enhancement[J]. Science & Technology Information, 2013(15): 84-85. (in Chinese)
- [2] Iljerpe C.J. System for washing an aero gas turbine engine; US, No. 20080040872[P]. 2008-02-21.
- [3] 李本威, 李东, 李姜华, 等. 单级压气机性能衰退定量研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1588-1594.  
Li Benwei, Li Dong, Li Jianghua, et al. Quantitative research on performance degradation of single-stage compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1588-1594. (in Chinese)
- [4] 王冠超, 李冬, 刘晓东. 基于数学模型的压气机叶片积垢研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(2): 24-27.  
Wang Guanchao, Li Dong, Liu Xiaodong. Research of compressor blade fouling based on mathematical model[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012, 25(2): 24-27. (in Chinese)
- [5] 雷达. 计及硬件损伤的航空发动机拆发预测方法及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
Lei Da. Study on the forecasting methods and its application for aeroengine removal considering hardware damage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 富涛, 许春生. 在翼航空发动机剩余寿命预测[J]. 中国民航飞行学院学报, 2006, 17(3): 18-21.  
Fu Tao, Xu Chunsheng. On-wing aero-engine residual life prediction[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2006, 17(3): 18-21. (in Chinese)
- [7] Gary R Weckman, Jon H Marvel, Richard L Shell. Decision support approach to fleet maintenance requirements in the aviation industry[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(5): 1352-1359.
- [8] 张金柱, 张榕. 发动机燃油流量研究[J]. 航空维修与工程, 2013(3): 50-54.  
Zhang Jinzhu, Zhang Rong. A study of engine fuel flow [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2013(3): 50-54. (in Chinese)
- [9] 曹惠玲, 贾超. 基于 QAR 的飞机爬升阶段燃油流量回归模型研究[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(3): 31-35.  
Cao Huiling, Jia Chao. Research of fuel flow regression model of aircraft climb phase based on QAR[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(3): 31-35. (in Chinese)
- [10] Glenn D Schilling. Modeling aircraft fuel consumption with a neural network[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [11] 刘婧. 基于飞行数据分析的飞机燃油估计模型[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
Liu Jing. The aircraft fuel estimation model based on flight data analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [12] 陈立军, 张亚红, 海冉冉. 一种新型融合离群点的稳态检测方法[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(5): 582-586.  
Chen Lijun, Zhang Yahong, Hai Ranran. A new steady-state detection method for fusing outliers[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(5): 582-586. (in Chinese)
- [13] 丁刚, 付旭云, 钟诗胜. 基于过程神经网络的航空发动机性能参数预测[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 198-207.  
Ding Gang, Fu Xuyun, Zhong Shisheng. Aeroengine performance parameters prediction based on process neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(1): 198-207. (in Chinese)

### 作者简介:

- 付旭云(1981—),男,副教授,硕导。主要研究方向:航空发动机全寿命数据管理、状态监控、故障诊断及维修决策支持。
- 钟诗胜(1964—),男,教授,博导。主要研究方向:人工智能及其应用、产品数字化设计与制造、故障诊断等。
- 姜海波(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机水洗效果评价与决策支持。
- 毛浩权(1979—),男,工程师。主要研究方向:航空发动机维修管理。

(编辑:马文静)