

# 基于视情维修的涡轴发动机维修保障 辅助决策体系研究

李俊杰<sup>1</sup>, 王尧<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 胡民民<sup>1</sup>, 闫旭东<sup>2,3</sup>

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100076;  
3. 天津航天瑞莱科技有限公司, 天津 300462)

**摘要:** 复杂装备科学的维修保障策略是保证装备合理使用与适时修理的基础, 是有效实施复杂装备全寿命保障的前提, 关系着装备任务效能的有效发挥; 文中立足于航空装备的视情维修策略, 以直升机中广泛采用的涡轴发动机为研究对象, 首先基于装备维修过程的大量信息提出了构建涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库的方法、策略; 其后结合涡轴发动机循环寿命统计法与基于 K 均值聚类算法等各类使用条件下的寿命损耗研究方法, 阐明了涡轴发动机不同应用条件下的备件量化分析策略; 更进一步地, 以涡轴发动机关键部件典型故障模式梳理与成因分析 (FMECA) 与考虑故障概率的发动机核心备件的量化分析为基础, 给出了涡轴发动机关键部件量化方法与策略; 最后基于上述方法的研究成果, 阐述了涡轴发动机维修保障辅助决策软件平台的体系架构; 文中的相关研究成果可被用于航空发动机等复杂装备系统的维修保障策略构建与工程化应用。

**关键词:** 涡轴发动机; 视情维修; 维修保障策略; 备件

## Research on Auxiliary Decision-making System of Turboshaft Engine Maintenance Support Based on Condition-based Maintenance

Li Junjie<sup>1</sup>, Wang Yao<sup>1</sup>, Zhang Qiang<sup>1</sup>, Hu Minmin<sup>1</sup>, Yan Xudong<sup>2,3</sup>

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., CASIC, Beijing 100041, China;  
2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;  
3. Tianjin Aerospace Reliability Technology Co., Ltd., Tianjin 300462, China)

**Abstract:** The scientific maintenance support strategy for complex equipment is the basis for ensuring the reasonable use and on-condition repair of equipment, and is the prerequisite for the effective lifetime support of complex equipment, and is related to the effective performance of equipment tasks. Based on the condition-based maintenance strategy of aviation equipment, the turboshaft engine which is widely used in helicopters is the research object in this paper. First, based on the massive information of the maintenance process of equipment, the methods are raised to construct the life and health management of knowledge of the turboshaft engine and its key components; Then, combined with the cycle life statistics method and the K-means clustering algorithm of turboshaft engine, the quantitative analysis strategy of spare parts of turboshaft engines applied in different conditions is explained in this paper; Further, based on the typical failure mode analysis and cause analysis (FMECA) of key components and quantitative analysis of engine core spare parts considering failure probability, the quantitative analysis strategy of spare parts of the key components of turboshaft engine are raised. Finally, based on the above research results, the system architecture of the auxiliary decision-making platform for turboshaft engine maintenance support is described. The relevant research results in this paper can be used to construct the maintenance support strategy for complex equipment systems such as aero engine and its engineering application.

**Keywords:** turboshaft engine; conditional maintenance; maintenance support strategy; spare parts

## 0 引言

涡轮发动机由于其体积小、高功重比、重量轻等特点, 在高功率、高可靠性装备中得到了广泛应用。

装备涡轴发动机的现代直升机装备具备极佳的飞行机动性, 这对于发动机整机的性能提出了极高的要求。此外, 涡轴发动机的设计还需满足复杂运用环境的苛刻要求。涡轮发动机在我国正式开展研制仅有 30 年的时间,

收稿日期: 2020-12-23; 修回日期: 2020-12-28。

作者简介: 李俊杰(1986-), 女, 河南周口人, 硕士, 工程师, 主要从事测试与诊断、维修决策等方向的研究。

引用格式: 李俊杰, 王尧, 张强, 等. 基于视情维修的涡轴发动机维修保障辅助决策体系研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 205-211.

基础理论、应用研究均不充分，整体性能与国外相比有较大差距，这些差距也体现在了涡轴发动机的运用和维修工作之上。

伴随着技术的发展与研究的进步，工业领域的巨大变革也带来了维修思想的变化，同时也促进了维修策略的发展。

复杂装备科学的维修保障策略可以有效地降低保障成本和故障风险，关系装备任务效能的有效发挥。维修思想经历了三个发展阶段：故障后维修、以预防为主的维修，和以可靠性为中心的维修。目前应用于工业领域的一般性维修理论（如图 1 所示）是先进航空发动机维修保障决策的基础。航空发动机最常使用的三种维修策略分别是定时维修、事后维修以及视情维修<sup>[1-4]</sup>。

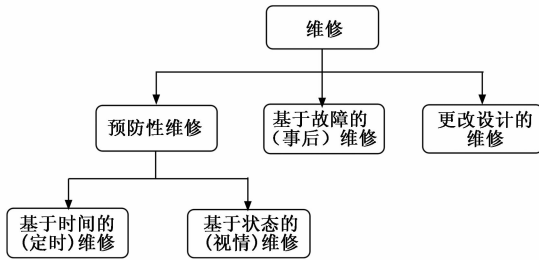


图 1 复杂装备一般维修策略

现阶段已有不少学者从定期计划维修<sup>[5]</sup>、隐故障维修<sup>[6]</sup>、成批更换策略<sup>[7]</sup>等维修策略以及订货次数<sup>[8]</sup>、连续检查型<sup>[9]</sup>、定期检查型<sup>[10]</sup>等备件存储策略的角度开展了研究。近年来，随着复杂机械设备状态监测技术的迅速发展，视情维修<sup>[11]</sup>已成为一类广泛研究和应用的先进维修方式，有关视情维修与备件库存联合研究问题正成为新的研究热点<sup>[12-13]</sup>。

从简单的单一部件分析到较为复杂的多部件系统，大量学者基于各类统计学分布、可靠性模型、遗传算法、蒙特卡洛法等理论方法，结合计算机模拟仿真、各类试验等研究手段，给出了各种基于视情维修的机械系统的维修保障建议与备件库存策略<sup>[14-19]</sup>。综合上述调研成果可以看出，前人针对视情维修的相关研究其对象多为单一设备或者部件较少的简单系统，针对多部件系统的库存优化模型也仅采用数值仿真的解法得到了最优结果的近似值，并未给出故障联合概率分布表达式，无法给出最优值的精确结果。总之，基于视情维修的复杂装备维修保障决策类研究还处于其发展的初期阶段，还未形成较为成熟的技术、理论体系。

本文基于复杂装备系统的视情维修策略，以涡轴发动机系统全寿命周期健康管理为出发点，结合基层保障单位周期性维修装备检测工作实际，基于构建出的涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库，提出了基于视情维修的涡轴发动机系统的备发、备件的维修保障策略；同时，有效地整合上述研究成果进而提出了基于开放式、

多接口的涡轴发动机通用维修保障辅助决策软件平台的整体架构。

## 1 总体结构与关键技术路线

### 1.1 总体结构

基于视情维修的涡轴发动机维修辅助决策体系研究的总体结构如图 2 所示。

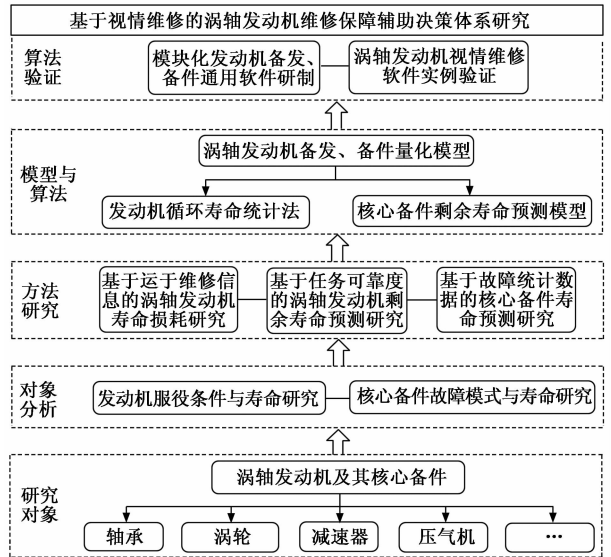


图 2 研究总体结构

项目研究总体方案中涉及的主要研究内容包括涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库构建、涡轴发动机不同服役工况下的寿命损耗规律研究、通用化涡轴发动机备发量化分析方法、不同故障模式组合工况下涡轴发动机备件需求量化分析方法、具备通用型开放接口的涡轴发动机备发、备件维修辅助保障决策平台的开发。

### 1.2 关键技术路线

基于视情维修的涡轴发动机维修辅助决策体系研究的关键技术路线如图 3 所示。

项目研究总体方案中涉及的主要研究内容包括涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库构建、涡轴发动机不同服役工况下的寿命损耗规律研究、通用化涡轴发动机备发量化分析方法、不同故障模式组合工况下涡轴发动机备件需求量化分析方法、具备通用型开放接口的涡轴发动机备发、备件维修辅助保障决策平台的开发。

## 2 涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库

涡轴发动机是非常典型且复杂的机械系统，工作在高旋转速度、高温度和负荷比较大的环境下，这些因素都能导致它在工作的过程中频繁的出现故障进而影响其寿命。为涡轴发动机构建一套完备、科学的寿命评估与健康综合知识库是针对多种条件、不同工况开展涡轴发动机备发、备件相关研究的先决条件与关键步骤。

涡轴发动机及其关键部件寿命评估与健康综合知

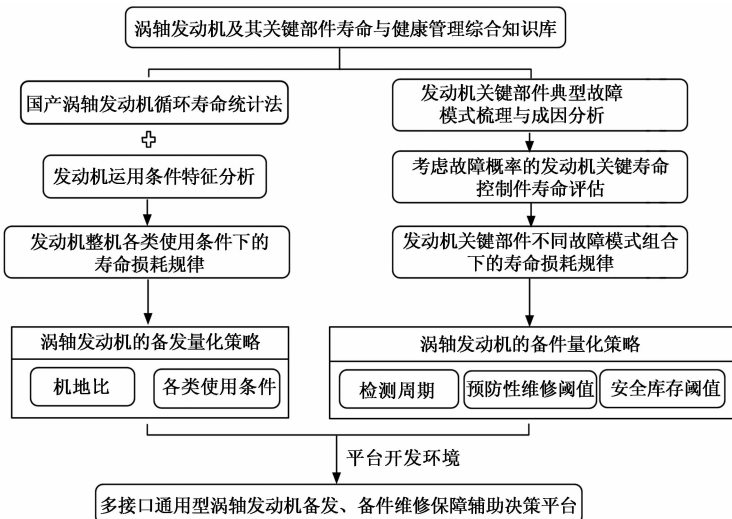


图 3 研究关键技术路线

识库的构建可以分为三部分 (如图 4 所示): 知识收集与获取、知识分类与搭建以及知识库管理与扩充。首先, 获取涡轴发动机运用与维修相关数据, 包括发动机装载平台服役记录、发动机装载平台工作环境与工况、维修保障记录以及故障记录等。其次, 以故障记录为主体, 利用故障树结构将上述信息组织起来, 根据相关知识在故障树中的表现形式对知识进行分类, 其后依据影响故障的参数将发动机正常运行时的参数与故障的区间值分成不同的等级, 依据不同等级参数对故障的影响程度, 实现整个知识体系的构建。最后, 依据知识库知识冗余循环检测算法, 开发涡轴发动机知识库的管理系统, 实现知识库的更新与日常管理。

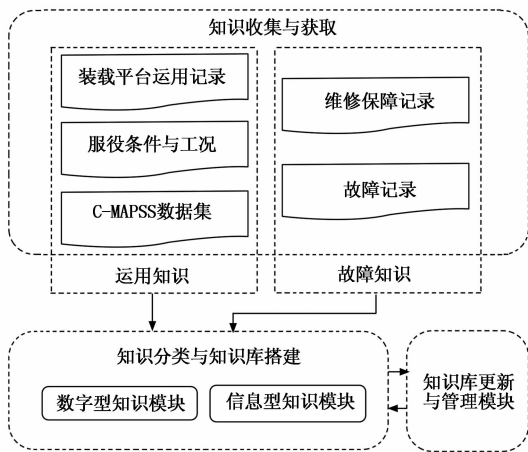


图 4 涡轴发动机及其关键部件寿命评估与健康综合知识库结构图

### 3 涡轴发动机备发量化策略

#### 3.1 涡轴发动机的循环寿命统计法

基于循环寿命统计法的航空发动机的寿命控制是保证其运用安全的有效手段之一, 相关统计法中占主导的是美

制涡轴发动机循环寿命统计法及法制涡轴发动机循环寿命统计法。

美制涡轴发动机循环寿命统计算法源自于我国针对 20 世纪 80 年代引进的美国黑鹰直升机发动机历史记录仪的反推研究。其具体换算公司可表示为:

$$TAC = LCF + \frac{FTC}{4} + \frac{PTC}{40} \quad (1)$$

式中,  $TAC$  为循环寿命;  $LCF$  为完整循环, 即启动—中间—停车;  $FTC$  为部分循环 (全节流循环), 即慢车一起飞—慢车;  $PTC$  为部分循环 (部分节流循环), 即低功率—最大功率—低功率。

上式中, 完整循环中“中间”环节表示发动机燃气涡轮转速达到 95% 以上; 全节流循环中“慢车一起飞—慢车”表示发动机燃气涡轮转速低于 75% 的次数; 部分节流循环中“低功率—最大功率—低功率”表示发动机燃气涡轮转速进入 75%~86% 范围内的次数。

法制涡轴发动机循环寿命统计算法基于透博梅卡公司的相关标准, 其表达式为:

$$N = K_1 + nK_2 \quad (2)$$

式中,  $N$  为循环寿命;  $n$  为各类部分循环次数出现的次数;  $K_1$  为与最大转速有关的完整循环次数计算系数, 完整循环最大转速确定为发动机额定功率 100% 时的转速;  $K_2$  为与最小转速有关的部分循环次数计算系数, 部分循环为发动机减速至 85% 而不停车在加速的工作过程;  $K_1$  和  $K_2$  取值见表 1 和表 2。

表 1 法制涡轴发动机循环寿命统计法—完整循环系数  $K_1$

$N_g$ (r/min)	$\geq 100\%$	99%	98%	97%	96%	95%	94%	$\geq 90\%$
$K_1$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5

表 2 法制涡轴发动机循环寿命统计法—部分循环系数  $K_2$

$N_g$ (r/min)	81%~85%	76%~80%	$\leq 75\%$
$K_2$	0.05	0.10	0.15

上述两种算法都可以根据发动机的完整循环寿命和部分循环寿命统计发动机的循环寿命, 且它们对发动机循环寿命监控的分析机理相同。但特别值得注意的是, 美制算法和法制算法对于完整循环和部分循环界限数量、大小的定义存在着较大的区别。

本文研究体系选取法制涡轴发动机循环寿命计算方法进行发动机寿命层面的解算, 以期更加细致地考虑低循环应力对涡轴发动机循环寿命的影响, 进而结合涡轴发动机及其关键部件运用与故障综合知识库中的发动机转速信号数据, 得到更加准确的发动机循环寿命统计数据。

#### 3.2 涡轴发动机运用条件特征分析

装备涡轴发动机的直升机运用过程极为复杂, 整体设计需满足测试、训练以及运用过程中的各类情况, 因此成

熟的基于视情维修的涡轴发动机维修保证智能辅助管理决策系统应全面细致地考虑对象运用过程中的各类条件。

整个运用条件特征分析的技术路径如图 5 所示。运用条件特征分析基于装载平台——直升机的运用工况，具体体现为直升机运用过程中涉及的各类常规动作和特殊动作。首先，依据直升机飞行动作难度等级表所列内容，选择最常出现的一、二、三级动作作为备选工况库；其次，结合涡轴发动机及其核心备件寿命与健康知识库中收录的直升机运用过程多源信号数据集，进行工况的选取与匹配，考虑到工况识别的精度与可操作性，从中筛选出具备较强可识别性的若干工况；最后，基于知识库中关于所选取的运用环境和服役条件，引入影响涡轴发动机服役循环寿命的环境影响因子，最终共同构建出具备明确特征的基于多源数据的涡轴发动机典型工况数据库，相关内容可并入涡轴发动机及其关键部件运用与故障综合知识库。

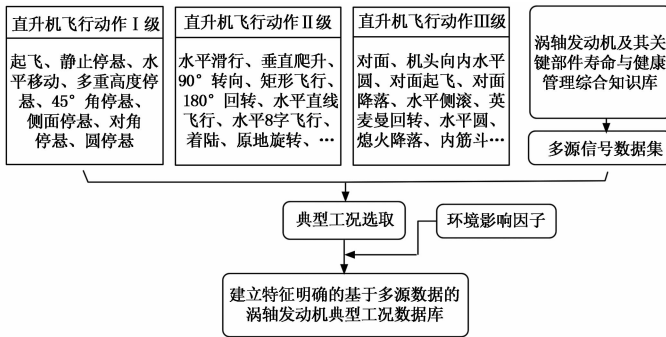


图 5 涡轴发动机运用条件特征分析技术路径

### 3.3 涡轴发动机各类使用条件下的寿命损耗研究与备发量化策略

航空发动机的寿命控制是保证其运用安全的有效手段之一。进行涡轴发动不同使用条件下的寿命损耗研究就是其中重要的一环。综合前述内容包括涡轴发动机及其关键部件寿命评估与健康知识库、涡轴发动机循环寿命统计法及发动机典型运用条件特征分析，便可进行涡轴发动机各种使用条件下的寿命损耗规律研究方法构建；更进一步地，结合装机备件和地面备件比例（机地比）等运用单位实际备发需求，构建涡轴发动机备发量化策略。

具体实施过程依照图 6 所示的技术路径展开：首先依据涡轴发动机及其关键部件寿命与健康知识库建立基于涡轴发动机实际运用典型工况的参考数据集，具体的手段为利用完备数据集内容通过数据标准化处理及维度约减手段，基于聚类算法得到涡轴发动机服役典型工况的聚类中心及其聚类半径；其后，基于待测发动机监测过程收集的多维数据经过分类提取、数据标准化处理及维度约减等数据处理手段，得到待确定工况与参考数据集典型工况的聚类半径距离，针对每组数据以最小半径取值为导向确定待定工况；之后，结合基于相似性匹配方法来分析待测发动机与参考数据集的性能退化曲线，进而得到二者服役寿命（剩余）的相似性距离，最终基于相似性距离分析的相

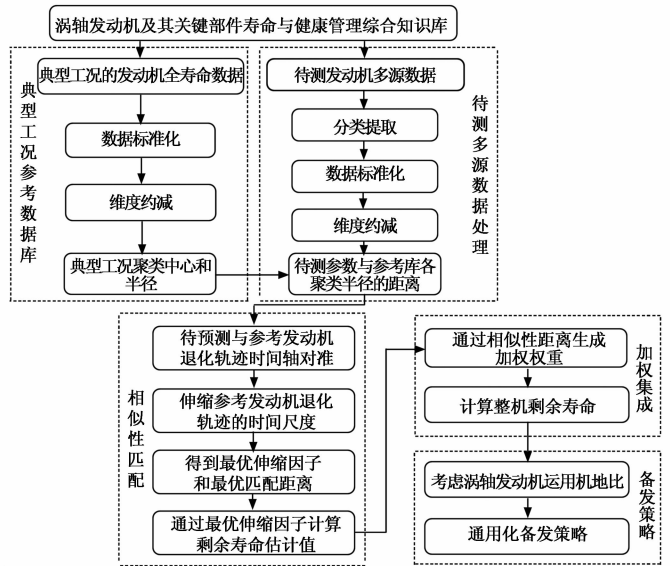


图 6 涡轴发动机各类使用条件下的寿命损耗研究技术路径

关结果得到各数据信息间的加权重，同时考虑涡轴发动机服役过程中的机地比等运用需求，得到涡轴发动机通用化备发策略。

K 均值聚类算法的基本原理如下<sup>[15]</sup>：设  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$  是个对象并且每个数据对象都是  $N$  维的，即  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in}\}$ 。K 均值聚类算法就是要找到含有  $K$  个聚类中心的集合（按下式）：

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_K\} = \{(C_{11}, C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1N}), (C_{21}, C_{22}, C_{23}, \dots, C_{2N}), \dots, (C_{K1}, C_{K2}, C_{K3}, \dots, C_{KN})\}$$

使得目标函数：

$$J(X, C) = \min \left( \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} d(C_i + X_j) \right) \quad (3)$$

其中： $n_i$  被归类为类  $C_i$  的数据对象点数， $d(C_i + X_j)$  表示聚类中心与数据对象的欧里几德距离，其定义如下：

$$d(C_i + X_j) = \sqrt{(C_{i1} - X_{j1})^2 + (C_{i2} - X_{j2})^2 + \dots + (C_{iN} - X_{jN})^2} \quad (4)$$

K 均值聚类算法的核心就是把数据集划分成使目标函数达到其最小值得  $K$  个类别。整个算法的操作步骤如图 7 所示。

综上所述，利用基于 K 均值聚类算法的工况识别以及相似性匹配等手段，可以较好地解决复合工况下发动机剩余寿命的预测问题。其后，考虑机地比等备发需求（参考值为 1 : 0.5, 1 : 0.33, 1 : 0.25），利用广义更新过程（GRP）修正的改进型比例危险模型建立反映寿命、性能参数、环境的视情维修涡轴发动机备发量化模型，具体施行过程如图 8 所示。

## 4 涡轴发动机关键部件备件量化策略

### 4.1 涡轴发动机关键部件典型故障模式梳理与成因分析

涡轴发动机作为多部件组成的复杂机械系统（其结构如图 9 所示），每个部件的工况都与整个系统的运行状况密

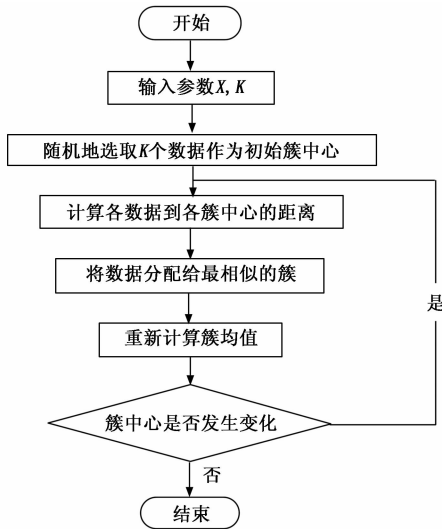


图 7 K 均值聚类算法步骤流程图

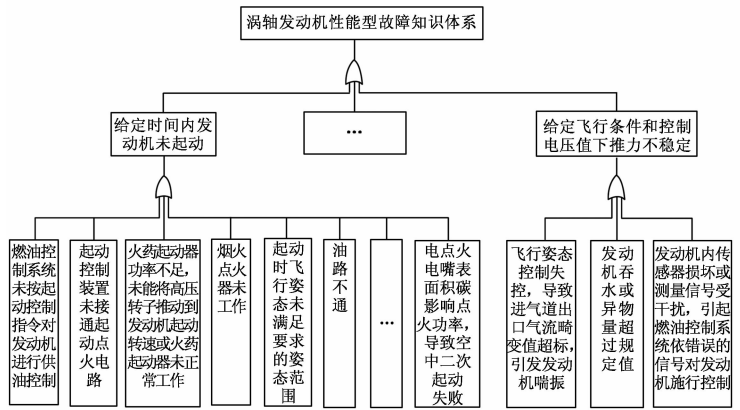


图 10 涡轴发动机性能型故障模式知识体系

发动机功能型故障相比, 结构型故障的发生率要高出 6~10 倍, 其最常出现在诸如轴承、涡轮叶片、压气机等部位。涡轴发动机结构型故障的知识体系如图 11 所示。

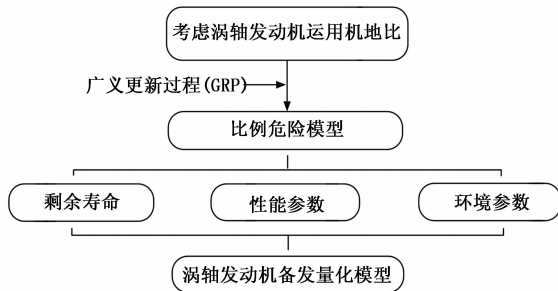


图 8 考虑机地比的涡轴发动机备发量化分析流程

切相关, 因此从关键部件角度入手, 判定相关工作件运行状况的优劣对于评价涡轴发动机的健康状况至关重要。涡轴发动机故障知识可以分为三种类型: 性能型故障、结构型故障以及附件系统故障。

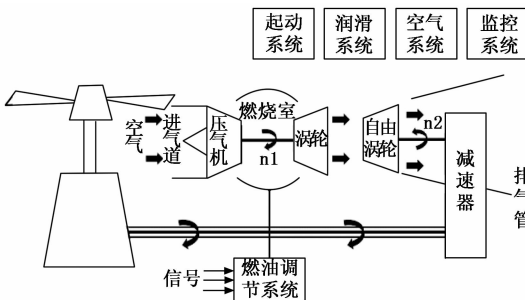


图 9 涡轴发动机结构示意图

涡轴发动机性能故障的知识体系如图 10 所示。性能型故障在涡轴发动机故障体系中出现的比例不高, 大约占各类发动机故障的 10%~20%。发动机不能在规定时间内启动以及给定飞行条件和控制电压下推力不稳定是航空发动机性能故障中最常见的两类。

涡轴发动机是多个部件组成的复杂机械系统, 因此出现机械结构类故障的概率极高。多方面、多类型、后果严重是涡轴发动机结构型故障的 3 个重要特征。与前述涡轴

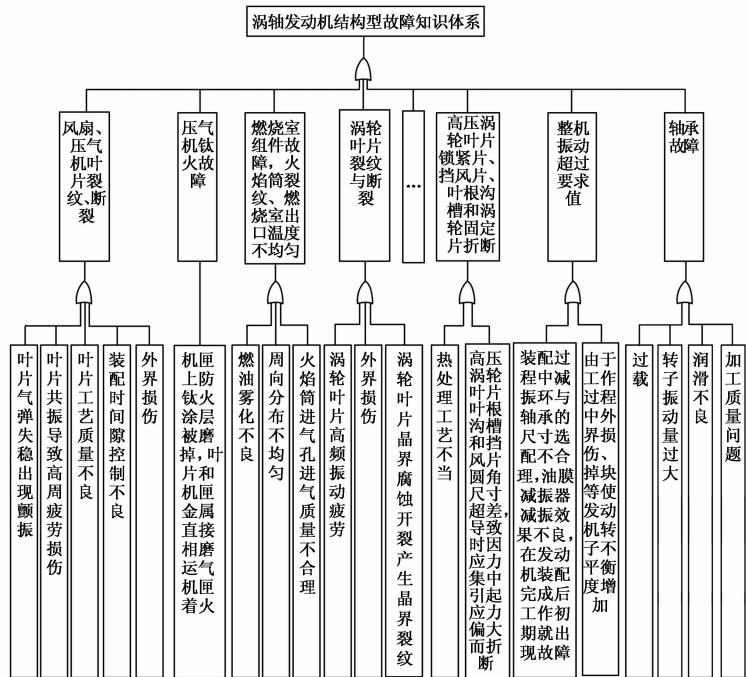


图 11 涡轴发动机结构型故障模式知识体系

涡轴发动机除实现动力转化、输出功能的本体机械结构外, 还有为保证其正常工作必不可少的附加系统。起动系统、传动系统、润滑系统、供电系统以及燃油系统共同组成了涡轴发动机的附加系统。涡轴发动机附加系统故障知识体系如图 12 所示。

### 4.2 考虑故障概率的发动机核心备件的量化分析

为实现涡轴发动机备件的最优维保策略与整机健康管理, 需对发动机关键部件进行单一故障概故障下的寿命评估。本节研究结合主机厂现有型号飞机的典型故障进行信息的分类与选取, 对所选取的部件参照故障模式、影响及危害度分析 (FMECA) 的关键步骤对涡轴发动机关键部件

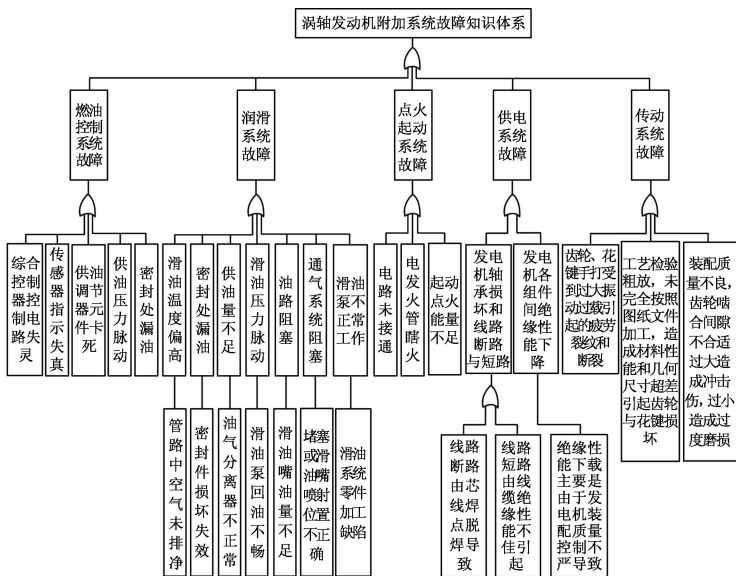


图 12 涡轴发动机附加系统故障模式知识体系

的典型故障进行故障率曲线的详细归纳；基于涡轴发动机相关关键寿命控制件的疲劳寿命分布函数，推导发动机相关核心备件的备件需求量公式，最终实现涡轴发动机关键部件备件量化分析方法的构建。本节研究遵循图 13 所示的流程进行展开。

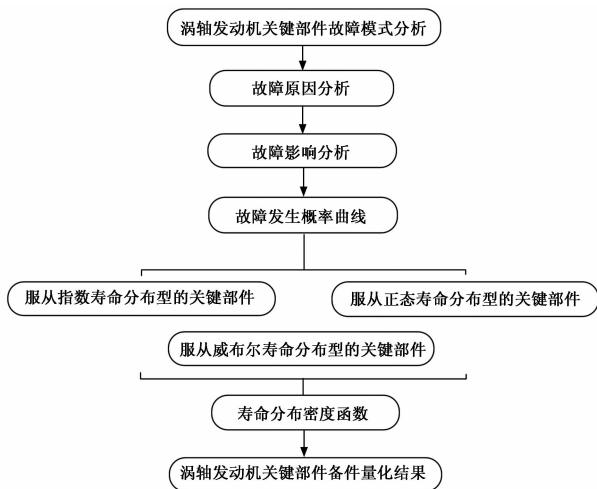


图 13 涡轴发动机核心备件量化分析流程

整体施行可以分为以下三步：基于现有型号直升机相关故障数据，统计典型故障模式下的故障概率；依据前述故障概率统计分析，绘制核心备件的故障率曲线同时将其与典型故障的数据特点分析相结合，将相关核心备件分为三种类型：分别是服从指数寿命分布型备件、服从威布尔寿命分布型备件以及服从正态寿命分布型备件；依据不同寿命分布性备件得到其寿命分布函数，进而推导出对应的备件需求量表达式，从而实现涡轴发动机核心备件的量化分析。以上述三步为进行展开，可以得到：

1) 服从指数寿命分布型备件。寿命服从指数分布的核

心备件，其寿命分布密度可以表示为：

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5)$$

式 (5) 中， $\lambda$  为失效率，其为平均故障间隔时间的倒数。基于上述关系经推导可得备件保障概率的表达式，如式 (6) 所示：

$$P = \sum_i^S \frac{(N\lambda t)^i}{i!} e^{-N\lambda t} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, S) \quad (6)$$

式 (6) 中， $S$  为装备中备件的需求量， $t$  为累计工作时间。当  $N\lambda t > 5$  时，备件需求量可用正态分布近似估计计算：

$$S = N\lambda t + u_p \sqrt{N\lambda t} \quad (7)$$

式 (7) 中， $u_p$  为正态分布分位数（详细数值详见 GB/T 4086.1）。

2) 服从正态寿命分布型备件。寿命服从正态分布的核心备件，其寿命分布密度可以表示为：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-E)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

进而可得服从正态分布的核心备件的需求量基本表达式：

$$S = \frac{t}{E} + u_p \sqrt{\frac{\sigma^2 t}{E^3}} \quad (9)$$

式中， $E$  为对象寿命均值， $\sigma$  为寿命统计标准差， $t$  为核心备件更换周期。

3) 服从威布尔寿命分布型备件。寿命服从威布尔分布的核心备件，其寿命分布密度可以表示为：

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{(t-r)}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left[ \frac{(t-r)}{\eta} \right]^\beta} \quad (10)$$

式中， $t$  为随机变量， $\beta$  为形状参数， $\eta$  为尺度参数， $r$  为位置参数。这里假设，则可以得到平均寿命表达式：

$$E = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (11)$$

进而得到备件需求量表达式：

$$S = \left[ \frac{u_p k}{2} + \sqrt{\left( \frac{u_p k}{2} \right)^2 + \frac{t}{E}} \right]^2 \quad (12)$$

式 (12) 中， $K$  为变异系数，可以由下式确定：

$$k = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/\beta)}{\Gamma(1+1/\beta)} - 1} \quad (13)$$

式 (13) 中各个变量的详细信息可查阅国际电工委员会标准 IEC 61649。

### 4.3 多接口通用型涡轴发动机备发、备件维修保障辅助决策平台架构

基于视情维修的涡轴发动机维修保障辅助决策软件平台的整体构架如图 14 所示。整套软件采用开放式、多模块的框架结构，基于计算机、网络硬件设备与装载平台操作系统条件进行维修辅助决策平台样机的开发，将前端开发、核心算法、数据库及参数结构等元素有效地整合至平台样机，进而实现涡轴发动机备发、备件核心算法的工程化实践。更进一步地，开放式、多模块平台架构能够实现基于特定对象参数体系的多型涡轴发动机实践与应用。

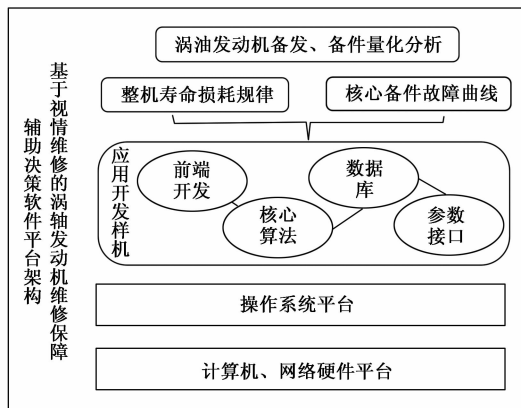


图 14 维修保障辅助决策平台架构图

## 5 结束语

本文以实现涡轴发动机的视情维修为研究目标, 系统地阐述了其维修保障辅助决策技术体系: 首先以构建涡轴发动机及其关键部件寿命与健康综合知识库为目标, 阐述了如何有效整合诸如运用知识、故障知识等信息的方法与策略; 其次以涡轴发动机循环寿命统计法、涡轴发动机运用条件特征分析及基于 K 均值聚类算法的不同工况备发量化方法为依托, 阐明了涡轴发动机各类使用条件下的整机备发量化策略; 更进一步地, 基于涡轴发动机关键部件典型故障模式梳理与成因分析及基于故障统计的涡轴发动机可靠性数据, 构建出涡轴发动机关键部件备件量化分析策略; 最后, 结合上述基于视情维修的涡轴发动机维修保障知识库与备发、备件策略, 提出基于工程化实践的涡轴发动机维修保障辅助决策软件平台的架构体系。本文提出的相关维修保障辅助决策体系能够用于涡轴发动机的复杂装备系统综合性维修、保障技术的工程实践。

## 参考文献:

- [1] 王南松, 王 凌. S4000P 规范下装备预防性维修分析方法的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 162-168.
- [2] 顾 艺, 车兵辉, 曹 宇, 等. 面向风洞群的装备自主式维修保障系统框架设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 171-175.
- [3] 谷亚辉, 程中华, 白旭华. 合成旅战时装备维修保障效能评估指标研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 258-261.
- [4] 侯立峰. 车载超短波电台维修数字化训练系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 155-158.
- [5] Wang W. A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimization [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 216 (1): 127-139.
- [6] Panagiotidou S. Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures [J]. Operations Research, 2015, 55 (5/6): 537-538.
- [7] Huang R, Meng L, Xi L, et al. Modeling and analyzing a joint optimization policy of block-replacement and spare inventory

with random-leadtime [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57 (1): 113-124.

- [8] 陈晓慧, 盛天文, 易树平. 等周期预防维修下多部件系统的备件订货策略 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (4): 95-99.
- [9] Xie J, Wang H. Joint optimization of condition-based preventive maintenance and spare ordering policy [A]. Proc. of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing [C]. 2008; 1-5.
- [10] Louit D, Pascual R, Banjevic D, et al. Condition-based spares ordering for critical components [J]. Mechanical systems and signal processing, 2011, 25 (5): 1837-1848.
- [11] Caballé N, Castro I, Pérez, C, et al. A condition-based maintenance of a dependent degradation-threshold-shock model in a system with multiple degradation processes [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 134: 98-109.
- [12] Wang Z, Hu C, Wang W, et al. A prognostics-based spare part ordering and system replacement policy for a deteriorating system subjected to a random lead time [J]. International Journal of Production Research, 2015, 53 (15/16): 4511-4527.
- [13] 蔡 景, 肖罗椿, 李 鑫. 基于维纳过程的维修决策和备件库存联合优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38 (8): 1854-1859.
- [14] 张晓红, 曾建潮. 设备视情预防维修与备件订购策略的联合优化 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (11): 150-158.
- [15] Zhang X, Zeng J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262 (2): 479-498.
- [16] Wang L, Chu J, Mao W. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2008, 14 (4): 387-401.
- [17] Nguyen K, Do P, Grall A. Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using Birnbaum's structural importance [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168 (12): 249-261.
- [18] Keizer M, Teunter R, Veldman J. Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 257 (1): 209-222.
- [19] 马小博, 王 芳, 陈 益, 等. 基于健康管理技术的机载计算机智能故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 43-47.
- [20] 谢 娜, 雷江妮. 民机故障预测与健康管理系统顶层架构设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 19-22.
- [21] 胡雷刚, 肖明清, 轩永波, 等. 预测与健康管理系统不确定性产生与传播机理研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 22-27.