

# 基于混杂系统的航空发动机性能退化行为建模及分析

陈盼盼<sup>1</sup>, 文振华<sup>1</sup>, 冯俊杰<sup>1</sup>, 任淑红<sup>1</sup>, 陈蔚蔚<sup>2</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 郑州 450046;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘要:** 航空发动机起飞时的排气温度裕度 (EGTM) 除受本身部件特性的影响外, 发动机水洗、鸟击以及维修等离散事件也均能引起其突变。首先建立了发动机部件特性模型, 分析了部件性能退化对 EGTM 的影响; 然后引入支持向量回归机方法, 预测了水洗事件对 EGTM 的影响; 最后基于混杂系统模型, 综合考虑了部件特性和水洗事件对 EGTM 的影响。通过仿真建模分析得出: 与仅考虑部件性能退化相比, 考虑水洗事件的发动机性能退化过程, 预计可延长发动机在翼时间约 1 000 飞行循环。基于此, 可以为发动机下决策提供参考依据。

**关键词:** 航空发动机; 混杂系统建模; 性能退化分析; 水洗间隔预测; 支持向量回归机

中图分类号: V235.13 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2023) 02-0022-06

## Modeling and performance degradation analysis of aero-engine hybrid system

CHEN Panpan<sup>1</sup>, WEN Zhenhua<sup>1</sup>, FENG Junjie<sup>1</sup>, REN Shuhong<sup>1</sup>, CHEN Weiwei<sup>2</sup>

(1. School of Aero-engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The performance degradation degree of aero-engine is usually described by the exhaust gas temperature margin (EGTM) at take-off. In addition to the influence of the performance of the engine itself, the discrete events such as engine washing, bird strike and maintenance can cause the mutation of the parameter. A characteristic model for engine components was established and effects of component performance degradation on EGTM were analyzed. The support vector regression machine approach was then presented to forecast how water washing events affect EGTM. Finally, a thorough analysis of the impact of component properties and water washing events on EGTM was performed using the hybrid system model. The simulation modeling analysis results show that compared with only considering component performance degradation, considering the engine performance degradation process of the washing event is expected to extend the engine's on-wing time by about 1000 flight cycles which can provide a reference for the decision-making of the engine removal.

**Key words:** aero-engine; hybrid system modeling; performance degradation analysis; washing interval prediction; support vector regression (SVR)

### 1 引言

航空发动机是一个典型的非线性可修复系统<sup>[1]</sup>, 其性能退化过程<sup>[2]</sup>既有部件性能衰退等连续动态事件产生的影响, 也有维修、鸟击等离散事件的影响。航空发动机起飞时的排气温度裕度 (EGTM), 是用

于描述航空发动机性能退化的重要参数。通常飞机在服役初期阶段由于积垢、结冰等问题会造成发动机性能衰退, 表现为 EGTM 降低, 燃油消耗率增加, 此时可以通过水洗的方法对发动机表面进行清洗, 提高排气温度裕度。

收稿日期: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51975539); 航空科学基金 (2018ZD55008)

作者简介: 陈盼盼 (1998-), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机系统建模及故障诊断与寿命预测。

目前有很多方法对航空发动机性能退化过程进行建模分析,可以实现发动机 EGTM 的预测。如杜方舟等<sup>[3]</sup>基于 ACARS(飞机通讯寻址与报告系统)数据和发动机基本数据,对发动机 EGTM 进行了预测;李晓白等<sup>[4]</sup>利用线性模型自回归移动平均模型(ARMA),对 EGTM 数据进行了预测分析;刘洋等<sup>[5-6]</sup>基于改进 ARIMA 模型和无迹粒子滤波算法,分别预测 EGTM 和航空发动机排气温度。但上述研究大多通过民航客机历史飞行数据进行拟合分析,在发动机全寿命周期中并未充分考虑水洗、维修等事件对 EGTM 产生的影响,因此需要建立一个能综合考虑多种影响因素的模型,实现对发动机性能退化过程的研究。

混杂系统(Hybrid System)是指在一个复杂的非线性系统性能退化过程中,既有连续动态事件与离散动态事件对其产生的影响,同时又考虑二者相互作用产生的影响。自 1979 年 Cellier<sup>[7]</sup>第一次提出混杂系统结构的概念后,研究人员就在计算机科学、控制科学等领域逐渐开展了相关方面的研究。Golli 在计算机磁盘驱动器模型中应用了混杂系统概念<sup>[8]</sup>;周东华等<sup>[9]</sup>提出基于混杂系统的故障诊断是一个新兴的研究领域,后续有很多问题值得深入研究。由于航空发动机的复杂结构决定了其性能退化过程具有典型的混杂特性,因此混杂系统理论对建立发动机的性能退化模型具有良好的适用性。

本文对发动机气路部件特性进行仿真分析,采用支持向量回归机方法预测 EGTM 恢复值,探讨离散事件水洗对 EGTM 的影响。并在综合考虑部件连续退化特性以及水洗事件的基础上,构建发动机性能退化过程的混杂系统模型,对发动机部件混杂特性展开初步研究。

## 2 发动机气路系统部件特性对 EGTM 的影响

### 2.1 发动机气路系统部件特性建模

民用航空发动机的核心是气路系统部件<sup>[10]</sup>,包括压气机、燃烧室、涡轮等。因其结构复杂,同时工作环境多变,难以对其整体结构建立完整的部件性能退化模型。现阶段,大多数民用航空客机发动机属于喷气式发动机。对于喷气式发动机,在起飞阶段其推力大小主要取决于入口总温  $T_2$ ,其次取决于起飞时的马赫数。由于  $T_2$  与环境温度  $T_{0A}$  有  $T_2 = C \times T_{0A}$  的关系( $C$  为常数),因此根据飞机起飞的真实环境温度,可近似得出  $T_2$  的温度范围在 228.15~347.15 K。

假设飞机在起飞阶段以恒定的马赫数起飞,保证其他参数为默认值,则利用 GasTurb 软件 modifier 模块设置不同的压气机效率损失值模拟不同退化程度,可得出低压涡轮出口温度(EGT)与发动机进口温度的关系,如图 1 所示。可见,EGT 随  $T_2$  的升高而升高。但是受材料的限制,EGT 不能无限度升高。当  $T_2 > 318.15$  K 时,为保护发动机整体结构,通过降低燃油消耗量来减小发动机的额定推力,使 EGT 不再增加,此时的  $T_2$  被称为拐点温度。拐点处的 EGT 在一定程度上也反映出性能衰退的程度,会随着性能衰退而升高。为避免超温损坏发动机部件,设置了 EGT 红线温度,拐点处 EGT 与红线温度之间的差值称为发动机的 EGTM,每台新发动机的 EGTM 大约为 100 °C。基于喷气式发动机的机理模型,在不考虑其他部件性能衰退及外界环境影响的情况下,对压气机效率损失由 0%(0% 表示发动机处于出厂阶段,还未发生效率衰退)变化到 3% 的过程进行仿真模拟,得出如图 1 所示的结果。每当部件性能损失 1% 时,排气温度增加约 30 °C,也即 EGTM 降低 30 °C。

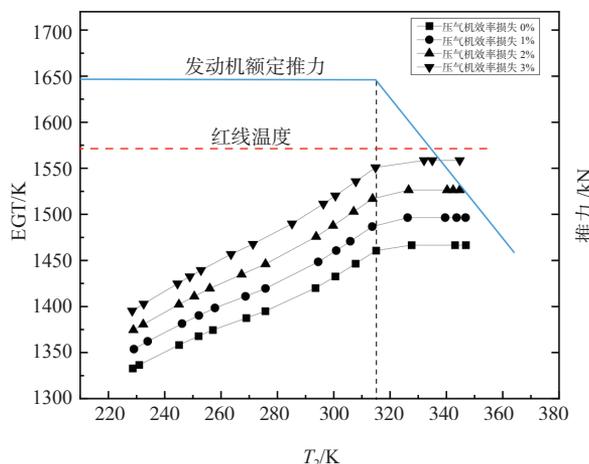


图 1 低压涡轮出口温度与发动机进口温度的关系  
Fig.1 Relationship between engine inlet temperature and low pressure turbine outlet temperature

### 2.2 发动机气路部件性能退化对 EGTM 的影响

20 世纪 70 年代, NASA 联合 5 家航空公司、2 家飞机机身制造商和美国普惠发动机公司,开展了 JT9D 发动机性能下降及其原因的研究<sup>[11]</sup>。记录了飞机从 1973 年初到 1976 年末整个期间的历史退化数据,得出各部件效率损失与飞行循环之间的变化关系(图 2)。根据图中各部件效率损失的变化趋势,利用 GasTurb 进行计算<sup>[12]</sup>,得出各部件效率损失对 EGTM 的影响,实现对风扇、压气机、涡

轮退化过程的模拟,结果如图 3 所示。由图 2 和图 3 可知,随着发动机飞行循环数的增加,风扇和涡轮部件的效率损失较小,压气机部件的损失范围较大,风扇的效率损失几乎不影响 EGTM 性能退化,压气机和涡轮性能衰退量与 EGTM 值呈线性关系。根据发动机整体结构分析<sup>[13]</sup>,水洗能除去压气机和风扇部件的表面污垢,进而影响发动机性能衰退,因此,在后续分析中只研究压气机性能变化结合水洗对 EGTM 产生的影响。

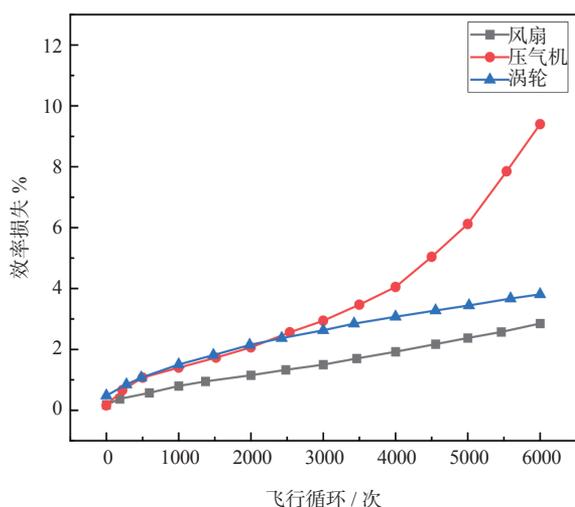


图 2 发动机部件性能损失随飞行循环变化曲线  
Fig.2 Performance loss curve of each component with flight cycle

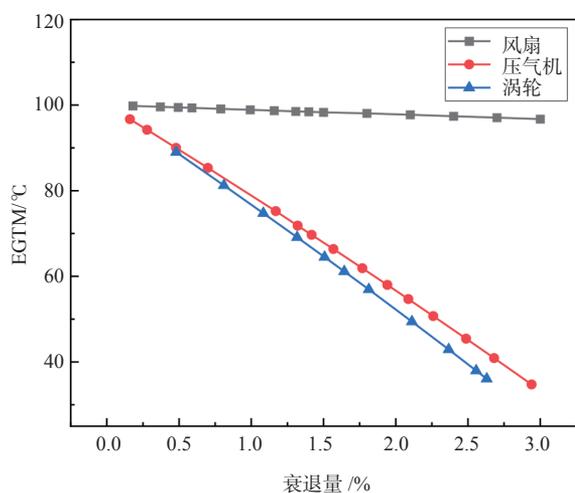


图 3 EGTM 随部件性能退化曲线  
Fig.3 Performance degradation curve of EGTM with components

### 3 水洗事件对 EGTM 的影响

发动机在完成多次工作循环后,进气道管壁会积聚一定的污垢<sup>[1]</sup>,造成压气机效率<sup>[13]</sup>以及推力

下降。飞机在服役初期可采取水洗方法清洁污垢,使得压气机效率及 EGTM 在一定程度上得以恢复。水洗恢复 EGTM 的范围大多是根据水洗经验以及厂家提供的资料给出,无标准手册可查询。本文采取主成分分析-支持向量回归机的方法,就水洗事件对 EGTM 的影响进行预测分析,建立发动机水洗前典型参数状态和水洗后性能恢复效果之间的映射关系<sup>[14]</sup>,实现水洗对 EGTM 的影响分析。整体的建模流程如图 4 所示。

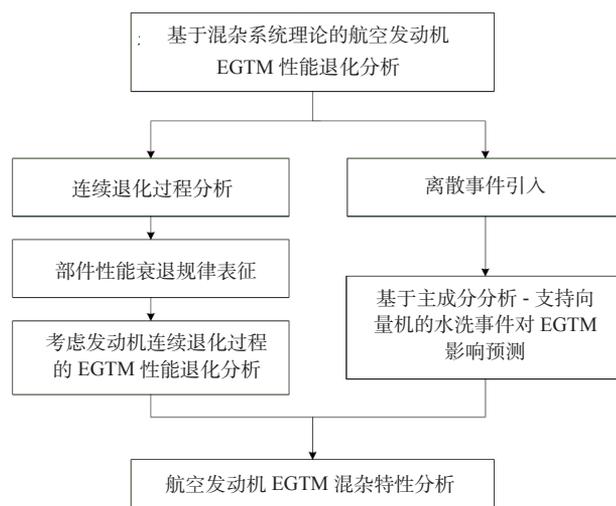


图 4 基于混杂系统的发动机性能退化过程建模流程  
Fig.4 Modeling process of engine performance degradation process based on hybrid system

#### 3.1 主成分分析-支持向量回归机原理

主成分分析法 (PCA)<sup>[15]</sup> 可对存在着复杂的线性、非线性关系的发动机性能参数进行降维,将多个性能参量融合成为几个包含绝大部分信息的主要成分。支持向量机 (SVM) 是基于结构风险最小化原则的机器学习模型,在处理小样本问题上具有一定的优越性<sup>[13, 16]</sup>。应用支持向量机预测水洗效果时不仅降低了模型复杂度,减少了运算量,同时也保证了预测的正确性。解决水洗前主要参数和水洗后性能恢复效果之间关系的核心类似于多元线性回归问题,支持向量机中的支持向量回归机 (SVR) 可以实现水洗效果的回归分析。

基于主成分分析-支持向量回归机实现水洗事件对 EGTM 影响分析的步骤为:①数据整理。将采集的数据如发动机进气温度、排气温度、转子转速、压力、燃油消耗量等进行处理,去除粗大误差。②主成分提取。基于主成分分析方法对自变量进行降维处理,提取累计贡献率达到 90% 以上的主要成分,并获取标准化后的各参数值。③ SVR 预测。

将提取的主成分参数进行训练,使用高斯核函数对样本进行计算以及回归分析,寻求最优的 SVR 预测模型。④水洗恢复预测。利用训练出的预测模型,输入发动机的相关参数,可以预测水洗后的 EGTM 恢复值。

### 3.2 水洗事件对 EGTM 的影响预测

研究水洗事件对 EGTM 的影响时,选取国内某航空公司 CFM-56 发动机水洗监测参数<sup>[7]</sup>如排气温度偏差 (DEGT)、高压转子转速偏差 (DN<sub>2</sub>)、水洗时间间隔 (TSW)、燃油流量偏差 (DFF) 以及 EGTM 作为原始参量。利用 PCA 提取主要信息,并基于 PCA 对以上参数进行降维处理,得到如图 5 所示的各参数及累计占比。根据图 5 选取累计占比超过 95% 的前 4 个参数即 DEGT、DN<sub>2</sub>、TSW 和 DFF 作为主要成分,经过标准化后的参数值依次为 Z-TSW、Z-DEGT、Z-DFF 和 Z-DN<sub>2</sub>,如表 1 所示。

采用支持向量回归机建立发动机水洗效果预测

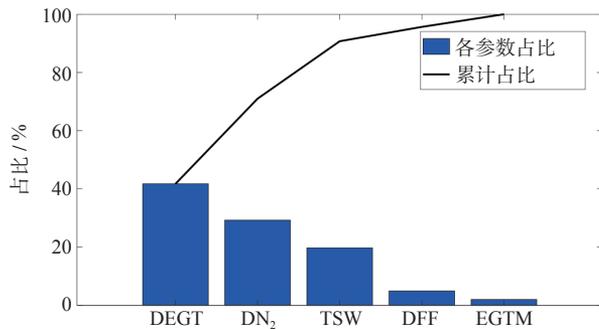


图 5 各性能参数占比

Fig.5 Proportion of each component parameter

模型,模型输入为利用主成分分析法获得的主成分,输出为水洗后的 EGTM 恢复值 DEGTM。选取样本水洗前后的 EGTM 变化量作为对比,基于支持向量回归机得出的 DEGTM 的预测值与原始值的对比如图 6 所示。可看出,水洗后的 EGTM 恢复范围在 5~14 °C,均值为 8.57 °C,对比原始数据平均误差为 0.626,标准差为 3.769。根据上述分析,可将每次水洗恢复的期望值设为 8.57 °C,并基于此开展考虑水洗和部件性能退化对发动机 EGTM 的影响研究。

## 4 基于混杂系统的发动机部件性能退化分析

### 4.1 基于混杂系统的 EGTM 的影响分析

航空发动机性能退化过程建模既要包含连续退化过程,又要在非平稳运行情况下考虑离散事件对此产生的影响,因此发动机(部件性能)退化过程是一个典型的混杂过程。状态空间模型是基于时间序列建立输出状态量与系统内部状态之间的关系,基于此,可引入状态空间模型对发动机性能退化的混杂过程进行建模分析,则发动机混杂退化过程描述为:

$$\begin{cases} x_{t+1} = f(x_t) + v_t \\ y_t = g(x_t, u) + w_t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_t$  是系统处于  $t$  时刻的状态量,  $y_t$  是  $t$  时刻的观测值,  $u$  是对连续过程产生影响的控制量,  $v_t$ 、 $w_t$  分别是测量噪声和过程噪声。

根据图 2 可知,压气机部件效率损失与飞行循环数之间呈指数变化,在连续退化过程中考虑离散

表 1 CFM-56 发动机水洗数据  
Table 1 CFM-56 engine washing data

序号	TSW/飞行循环	DEGT/°C	DFF/%	DN <sub>2</sub> /%	EGTM/°C	Z-TSW	Z-DEGT	Z-DFF	Z-DN <sub>2</sub>
1	187	13.33	-0.16	0.65	34.280	1.53	0.14	-0.05	-0.93
2	168	15.41	-0.25	-0.35	37.452	1.06	0.50	-0.19	0.84
3	94	11.26	-0.50	-0.47	23.803	-0.77	-0.22	-0.58	0.11
4	102	13.97	-0.20	-0.66	29.390	-0.57	0.25	-0.10	-1.01
5	89	-0.33	0.15	-0.16	25.419	-0.89	-2.25	0.45	2.01
6	108	3.42	0.64	-0.43	22.236	-0.42	-1.59	1.24	0.38
7	95	9.86	0.69	-0.38	23.584	-0.74	-0.47	1.32	0.64
8	89	6.01	-1.55	-0.22	32.304	-0.89	-1.14	-2.28	1.60
9	108	18.58	0.24	-0.72	24.424	-0.42	1.06	0.60	-1.37
10	95	13.90	0.96	-0.52	23.525	-0.74	0.24	1.75	-0.19
11	186	15.20	-0.61	-0.67	35.566	1.51	0.47	-0.76	-1.09
12	171	14.37	-0.47	-0.43	42.762	1.14	0.32	-0.54	0.37
13	96	16.60	-0.62	-0.49	25.945	-0.72	0.71	-0.79	-0.01
14	102	15.22	-0.17	-0.64	23.196	-0.57	0.47	-0.05	-0.89
15	185	21.21	-0.14	-0.57	34.037	1.48	1.52	-0.02	-0.45

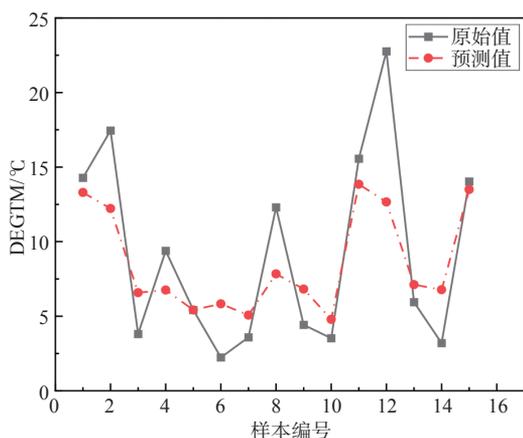


图 6 基于支持向量回归机的水洗效果对比图  
Fig.6 Comparison of washing effect based on SVR

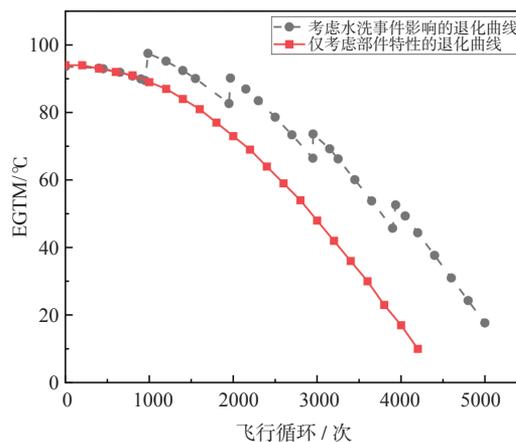


图 7 不同退化过程 EGTM 的变化曲线  
Fig.7 Variation curves of EGTM in different degradation process

状态量的影响,发动机部件混杂系统模型建立如下:

$$\begin{cases} x_t = f(t) \\ y_t = g(t) + u_t \end{cases} \quad (2)$$

在本文构建的航空发动机混杂系统模型中,公式(2)中  $x$  为发动机部件退化率,  $y$  为 EGTM,  $u$  为水洗对输出产生的影响。

离散事件  $u$  的表达式为:

$$u_t = u_0 + \Delta u_t \quad (3)$$

式中:  $\Delta u_t$  为离散事件;  $u_0$  表示初始状态时离散事件对系统产生的影响;  $\Delta u_t$  是在  $0, T_1, T_2, \dots, T_n$  时间点产生的冲激响应。

#### 4.2 发动机性能退化过程仿真分析

在压气机性能退化过程中引入水洗事件,基于性能衰退过程构建发动机混杂系统模型,根据 4.1 节建立的混杂系统模型,压气机性能退化过程的状态空间方程为:

$$\begin{cases} x = 0.8384e^{0.0004023t} \\ y = 93.65\sin(0.000358t + 1.53) + u_t \end{cases} \quad (4)$$

航空公司为提高发动机效率,一般采用定时水洗的方式,但对于水洗时间间隔没有固定的方案。如 CFM56 发动机,厂方推荐的水洗时间间隔大概在 800~2 000 次飞行循环之间。根据文献 [18] 中水洗间隔频数分布可知,水洗时间间隔近似服从高斯分布,即  $u \sim N(1022, 393.6^2)$ 。结合公式(3)和公式(4)对压气机性能退化的混杂过程进行仿真,得出水洗事件与部件性能退化对 EGTM 的影响,如图 7 所示。对比 2 条曲线,在到达发动机预警温度时,预计可以延长发动机在翼时间约 1 000 次飞行循环,为发动机的下发决策提供了参考依据。

## 5 结论

以发动机机理研究为基础,分析了等间隔的水洗事件对发动机 EGTM 的影响,主要得出以下结论:

(1) 利用仿真软件,以压气机部件为例,对发动机性能退化过程进行建模,通过 EGTM 变化趋势表征了部件特性对 EGTM 的影响。

(2) 基于主成分分析-支持向量回归机的分析方法,预测了水洗事件对 EGTM 恢复值的影响。通过计算可得每次水洗恢复的期望值为 8.57 °C,后续可将其作为考虑水洗对 EGTM 影响的参考依据。

(3) 基于混杂系统理论综合考虑发动机 EGTM 退化过程中部件特性和水洗的影响,对比建模分析部件特性退化规律,可以更加准确地把握发动机健康状态及实现早期故障预警,为发动机的下发决策提供重要参考依据。

(4) 在上述研究的基础上,后续将继续开展部件性能与非等间隔离散事件(如鸟击、大修等)对 EGTM 的影响分析,为发动机剩余寿命预测提供更准确的决策参考。

## 参考文献:

- [1] 黄金泉,王启航,鲁峰.航空发动机气路故障诊断研究现状与展望[J].南京航空航天大学学报,2020,52(4):507—522.
- [2] 王博,刘媛,洪其麟,等.对军用航空发动机可靠性参数体系选择和指标确定的探讨[J].燃气涡轮试验与研究,2003,16(2):38—42.
- [3] 杜方舟,孙有朝,郭媛媛,等.基于数据的航空发动机排气温度裕度及剩余寿命计算方法[J].航空动力学

- 报, 2020, 35(11): 2456—2464.
- [4] 李晓白, 崔秀伶, 郎荣玲. 航空发动机性能参数预测方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 253—256.
- [5] 刘洋. 航空发动机排气温度裕度预测研究 [D]. 福建厦门: 厦门大学, 2020.
- [6] 余臻, 刘洋, 魏芳, 等. 基于无迹粒子滤波算法的航空发动机排气温度预测 [J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 1—6.
- [7] Cellier F E. Combined continuous/discrete system simulation by use of digital computer: techniques and tools[D]. Zurich Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1979.
- [8] Golli A, Varaiya P. Hybrid dynamical systems[C]// Proc. of the 28th IEEE conference on decision and control. Florida, USA, 1989.
- [9] 王文辉, 刘帅, 周东华. 混杂系统故障诊断方法综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(12): 1853—1857.
- [10] 左洪福, 孙见忠, 李鑫, 等. 民用飞机预测维修建模方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [11] Sallee G P. Performance deterioration based on existing (historical) data-JT9D jet engine diagnostics program[R]. NASA-CR-135448, 1980.
- [12] 高翔. 基于综合参数的无加力混排涡扇发动机飞行推力确定方法 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(1): 52 - 57.
- [13] 付旭云, 钟诗胜, 姜海波, 等. 民用航空发动机水洗效果量化评价方法 [J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 347 - 353.
- [14] 强艳, 陈云永, 李游, 等. 压气机效率计算方法的探讨 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(6): 26 - 30.
- [15] Jolliffe I T. Principal component analysis[M]. New York: Springer Press, 2002.
- [16] 启华, 师军. 基于支持向量机的航空发动机故障诊断 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 298 - 302.
- [17] 姜海波. 民航发动机水洗效果评价及系统实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [18] 蔡峻青. 新型水洗设备下航空发动机水洗可靠性研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2019.