

基于限制容差关系的动力舱冷却通风综合评估

张浩

(中国飞行试验研究院发动机所, 西安, 710089)

摘要 为拓展动力装置冷却通风试飞结果评价体系, 定量评估冷却通风系统的综合性能水平, 在试飞过程中发动机舱内温度测量数据存在缺失的情况下, 引入综合舱温裕度的概念, 开展了适用于不完备试飞数据的冷却通风综合性能评估方法研究。使用 K -means 聚类算法将舱温数据离散化, 结合粗糙集理论的限制容差关系确定舱温指标权重, 建立了一种动力舱冷却通风综合性能评估方法, 并在3发构型直升机上进行算法应用, 评估了冷却通风系统综合性能的影响因素。结果表明, 技术状态更改和发动机装机位置对动力舱综合舱温裕度的影响较大, 最大差异分别达到 $65.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $83.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综合舱温裕度能够表征冷却通风综合性能, 该方法具有通用性, 可作为冷却通风试飞传统评估方式的补充。

关键词 限制容差关系; 冷却通风试飞; 数据缺失; 综合舱温裕度; K -means 聚类; 粗糙集理论

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.003

中图分类号 V228.3 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)02-0019-07

A Comprehensive Evaluation of Engine Nacelle Cooling and Ventilation Based on Limited Tolerance Relation

ZHANG Hao

(Engine Department, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract In order to expand the evaluation system of the power plant's cooling and ventilation flight test, and quantitatively assess the comprehensive performance level of the cooling and ventilation system under conditions of missing temperature measurement data in the engine nacelle during flight tests, the concept of integrated nacelle temperature margin is introduced, and research on a comprehensive performance evaluation method for cooling and ventilation suitable for incomplete flight test data is made. The K -means clustering algorithm is utilized for making the discretization of nacelle temperature data, and determining the weight of nacelle temperature indicators in combination with the limited tolerance relation of rough set theory. A comprehensive performance evaluation method for cooling and ventilation of engine nacelle is established and the algorithm is applied to a three-engine helicopter. The factors to influence the comprehensive performance of the cooling and ventilation system are evaluated. The results show that the changes of technical state and the engine position have great influence on the integrated nacelle temperature margin, and the maximum difference reaches $65.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $83.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. The integrated nacelle temperature margin can characterize the comprehensive performance of cooling and ventilation. And this method is universal, and

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 航空工业应用创新项目(6250111)

作者简介: 张浩(1992-), 男, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为航空发动机飞行试验技术。E-mail: 1150430656@qq.com

引用格式: 张浩. 基于限制容差关系的动力舱冷却通风综合评估[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 19-25. ZHANG Hao. A Comprehensive Evaluation of Engine Nacelle Cooling and Ventilation Based on Limited Tolerance Relation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 19-25.

can be used as a supplement to the traditional evaluation method of cooling and ventilation flight tests.

Key words cooling ventilation flight test; data missing; integrated nacelle temperature margin; *K*-means clustering; rough set theory; limited tolerance relation

航空发动机是一种复杂的、精密的,且工作环境恶劣的动力装置,有许多热源对发动机表面和附件的温度状态产生影响。动力舱冷却通风的设计直接关系到发动机炽热部位温度和舱内环境温度的高低,影响动力舱内及其附近的发动机和飞机附件、油箱及有关系统的工作可靠性、耐久性,并直接涉及飞行安全^[1]。近年来,冷却通风试飞问题日益突出,如CH-53K直升机在低空悬停、前飞、俯冲时,1发和2发引射能力不足,动力舱内温度超限,导致异常火警告警,影响任务执行^[2-3];AC313A直升机试验时舱温高导致动力舱部分橡胶件、活动整流罩、线缆和防护网套损坏^[4];某直升机换装大功率涡轴发动机后由于舱温高导致发动机Np、P3传感器工作异常,电调频繁报故,限制直升机使用。对于动力舱冷却通风的试飞评估,目前常规做法是参照《GJB 243A》《CCAR-25部》《CCAR-29部》等标准法规,将所测舱温参数转化为热极限的数值,与限制值进行比较,当关键部位舱温超过限制值时即认为冷却通风设计不合理。这种做法从考核的角度出发,重点关注每个测量位置的温度是否超限,但存在以下不足:一是无法给出整体的冷却通风性能大小,对于冷却通风改进优化设计的支撑作用有限;二是对传感器的可靠性要求较高,在舱温测量参数存在缺失时,无法给出相关结论。随着发动机设计越来越精密复杂,舱温测量参数越来越多,这种评估方法的局限性愈发突出。

目前,综合性能评估方法已经广泛应用于民用航空等领域,在航空发动机的机队管理^[5]、运维管理^[6-7]、性能衰退状态评估^[8-9]、装备效能综合评估、项目管理^[10]等方面发挥着重要作用。借鉴这一思路,动力舱冷却通风也可以将不同测点的舱温进行整合,实现综合性能评估。在实际试飞过程中,由于舱温参数多、试验机频繁维护、工作环境恶劣等原因,常常存在传感器损坏导致的舱温数据部分缺失的现象。由于许多客观赋权法的数据分析算法要求输入的数据必须是完备的,因此在舱温数据存在缺失的情形下,传统的方法就无法直接使用^[11]。需要针对不完备数据进行填补,或探索适用于不完备数据的处理方法。粗糙集理论是由Pawlak在1982年提出的一种处理不确定性和不完整性数据的数学工具^[12],还可以对数据进行分析和推理,从中发现潜在的规律,已经成功应用于机器学习、数据挖掘等领域。经典粗糙集理论是基于完备信息系统这样一个

假设,即所处理的决策表是完备的^[13]。对于不完备信息系统,经典粗糙集理论中的相关概念可以进行适当扩充,一般将完备决策表的等价关系放宽为适用于不完备决策表的二元关系,包括容差关系^[14]、相似关系^[15]、限制容差关系^[16-17]、约束容差关系^[18]、邻域等价容差关系^[19]等。文献[16]的研究表明,限制容差关系吸取了容差关系和非对称相似关系的优点,丢弃了二者的缺陷(极端情况),更加符合客观实际。限制容差关系能够直接对不完备信息系统进行处理,因此可以将原决策表转化为离散化的不完备决策表,然后直接处理获取指标权重,从而进行动力舱冷却通风的综合性能评估。

针对试飞期间舱温参数存在缺失值的现状,本文应用粗糙集理论的限制容差关系,结合数据离散化手段,评估不同舱温参数的重要性程度,建立一种适用于不完备试飞数据的动力舱冷却通风的综合评价方法,定量分析冷却通风性能指标,为动力舱冷却通风设计优化提供参考。

1 方法

1.1 研究对象

研究对象为某型3发构型的直升机,该型机试飞期间冷却通风问题较为突出,主要特点为:

- 1) 17个月内共试飞126架次,其中53架次存在舱温超限问题。
- 2) 舱温测量参数多,3台发动机分别测量30、30、27个舱温参数。
- 3) 3个动力舱的冷却通风能力设计状态差异大,受装机位置因素影响较大。
- 4) 试飞期间影响冷却通风性能的技术状态更改共9次,涉及1发的共2次,不涉及2发,涉及3发的共7次。
- 5) 部分舱温传感器经历了损坏/修补,22个参数存在部分缺失的现象,见表1。

表1 舱温数据缺失总体情况统计

Tab. 1 Overall statistics of missing nacelle temperature data

发动机	1发	2发	3发
舱温参数总数	30	30	27
存在缺失参数数量	8	5	9
决策矩阵规模	126×30	126×30	126×27
缺失值数量	221	253	154
缺失比例/%	5.80	6.70	4.50

1.2 计算方法

冷却通风综合评估,即通过加权求和的方式,以综合指标来表征系统的整体性能。为建立统一评判标准,引入舱温裕度 T_{cmi} 的概念,使用舱温限制值减去实测值,即:

$$T_{cmi} = T_{ci,lim} - T_{ci}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $T_{ci,lim}$ 为第 i 个舱温参数的限制值; T_{ci} 为第 i 个舱温参数的实测值。

然后通过综合评估方法得到每个舱温裕度的权重,加权求和得到综合舱温裕度 T_{cm}^* ,即可表征冷却通风的整体性能,其计算式为:

$$T_{cm}^* = \sum_{i=1}^n \omega_i T_{cmi} \quad (2)$$

式中: ω_i 为第 i 个舱温裕度的权重。

应用粗糙集理论来确定因素权重的方法无需提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,但它一般只适用于决策表是离散的情形,在处理含有连续条件因素的决策表之前,通常须将其离散化。因此对于不完备决策表的综合评价分为 2 个步骤,步骤 1 为数据离散化,步骤 2 为求取权重。

对于不完备决策表的离散化, K -means 聚类算法是一种经典的划分聚类算法^[20-21]。它的主要优点是算法简单、快速,缺点是不同的 K 值可能会导致不同的聚类结果。应用 K -means 聚类算法,必然会造成原决策表信息量的损失, K 值越小,分类越粗,离散化程度越高,粗糙集理论越适用,但是对原决策表造成的信息损失越多; K 值越大,分类越细,离散化程度越低,对原决策表造成的信息损失越少,但是在指标数量过多的情况下粗糙集理论越难以分辨。因此应将不同 K 值的处理结果综合起来,以保证算法的合理性和信息量的完整性。

对于不完备决策表,可以使用限制容差关系来替代经典粗糙集理论的等价关系,对特定空间进行划分。在综合性能评估中,权值反映了不同舱温参数相对于性能综合评判结果重要性程度的差异,而基于限制容差关系确定综合评判权重系数,实际上就是确定构成被评判舱温参数知识库中各个属性集的重要度。

对于信息系统 $S = \langle U, A, V, f \rangle$,至少存在一个属性 $a \in A, V_a$ 包含空值,即 $\exists a \in A, x \in U, f(x, a) = *$,则称此信息系统是不完备的。限制容差关系 L 是论域 U 上的二元关系,定义为:

$$L = \left\{ (x, y) \in U^2 \left| \begin{array}{l} \forall a \in A (a(x) = a(y) = *) \vee \\ \left(P(x) \cap P(y) \neq \emptyset \wedge \right. \\ \left. \forall a \in A (a(x) \neq *) \wedge \right. \\ \left. (a(y) \neq *) \rightarrow \right. \\ \left. (a(x) = a(y)) \right) \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

式中: $P(x) = \{a \in A | a(x) \neq *\}$ 。

$I_L(x) = \{y | y \in U \wedge (x, y) \in L\}$ 表示论域 U 上满足限制容差关系 $L(x, y)$ 的个体对象 y 的集合,称为 x 的限制容差类。

算法的基本思想是,通过 K -means 聚类算法将每个指标的一维数据分别聚类,从而将不完备决策矩阵的连续属性转化为离散属性,形成离散化的不完备决策矩阵,分别对总体指标集和依次删除单一指标后的指标集计算限制容差类,通过限制容差类的差异来确定每个指标的权重,从而加权求得综合指标。图 1 给出了适用于不完备舱温试飞数据的动力舱冷却通风综合性能评估算法流程图。

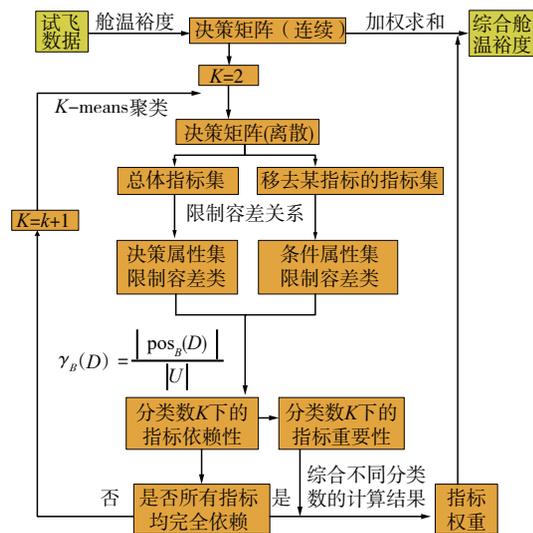


图 1 动力舱冷却通风综合性能评估算法流程

Fig. 1 Flowchart of the comprehensive performance evaluation algorithm for engine nacelle cooling and ventilation

算法求解的主要步骤:

步骤 1 决策矩阵确定。以舱温裕度作为性能指标,建立决策矩阵,设论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 由 m 个样本组成,每个样本又有 n 个指标表示其性状,得到原始决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 2 分类数为 2 时, K -means 聚类。令 $K_1 = 2$,针对每个指标的 m 个样本数据,分别使用 K -means 聚类算法进行分类,合并后形成离散化的不完备决策矩阵。

步骤 3 分类数为 2 时,指标重要度的求取。将总体指标集 C 的限制容差类作为决策属性集,将删除某一指标后的指标集 $C - \{c_i\}$ 作为条件属性集,条件属性集和决策属性集均为不完备矩阵,因此讨论删除各指标后的限制容差类相对于总体指标限制容差类的正域。其本质上是判断 $C - \{c_i\}$ 的限制容差类是 C 的限制容差类的子集的样本集合。

根据粗糙集理论,在某一分类数 K_j 下,某指标

c_i 的重要性可表示为^[22]:

$$\text{sig}^{K_j}(\{c_i\}, C, C) = \gamma_C^{K_j}(C) - \gamma_{C-\{c_i\}}^{K_j}(C) = 1 - \gamma_{C-\{c_i\}}^{K_j}(C) \quad (4)$$

式中: $\gamma_{C-\{c_i\}}^{K_j}(C)$ 为在分类数 K_j 下知识 C 对 $C - \{c_i\}$ 的依赖程度。

$$\gamma_{C-\{c_i\}}^{K_j}(C) = \frac{|\text{pos}_{C-\{c_i\}}(C)|}{m} \quad (5)$$

式中: $\text{pos}_{C-\{c_i\}}(C) = \{x \mid x \in U \wedge I_{C-\{c_i\}}^L(x) \subseteq I_C^L(x)\}$ 为 C 的 $C - \{c_i\}$ 正域。

步骤 4 增加分类数, 依次计算指标重要度。逐渐增加分类数, 令 $K_j = j + 1, j = 2, 3, \dots$, 重复步骤 2 和步骤 3, 依次计算不同分类数条件下各指标的重要性, 直到在某一分类数 K_p 下, 所有指标的重要性均为 0, 则不再增加分类数。

得到不同分类数 $K_j, j = 1, 2, \dots, p$ 下每个指标的重要性, 某指标 c_i 的重要性可表示为 $\text{sig}^{K_j}(\{c_i\}, C, C), j = 1, 2, \dots, p$ 。

步骤 5 指标权重分配。综合不同分类数下的指标重要性, 则得到某指标 c_i 的综合重要性为:

$$\text{sig}(\{c_i\}, C, C) = \sum_{j=1}^p \text{sig}^{K_j}(\{c_i\}, C, C) \quad (6)$$

将各指标的综合重要性进行归一化得到各指标的权重, 即:

$$\omega_i = \frac{\text{sig}(\{c_i\}, C, C)}{\sum_{k=1}^n \text{sig}(\{c_k\}, C, C)} \quad (7)$$

步骤 6 加权平均求取综合指标。将指标权重乘以决策矩阵得到各样本的评估与排队指标, 考虑到决策矩阵为不完备矩阵, 综合指标采用已有数据的加权平均值来计算。去除决策矩阵 \mathbf{X} 的 * 值(若 x_{ij} 为 *, 令 $x_{ij} = \omega_{ij} = 0$), 然后通过下式得到综合指标:

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \omega_{ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (8)$$

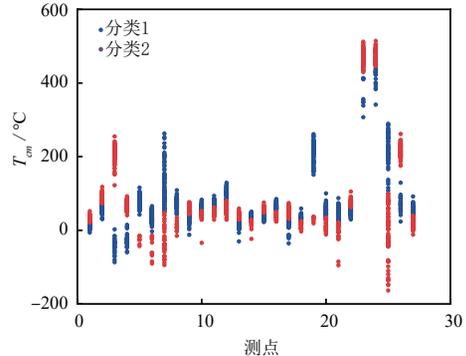
2 结果与讨论

2.1 计算算例

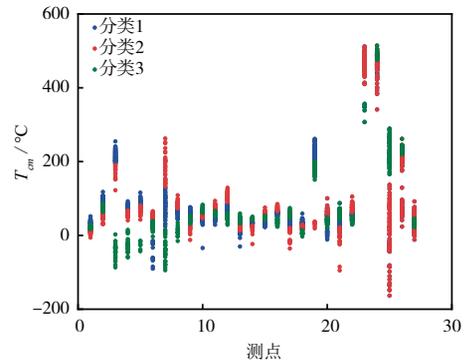
在 3 发构型直升机试飞过程中, 3 发的舱温数据较为典型, 舱温超限次数多, 技术状态变更次数多, 数据缺失比例与 1 发、2 发相当, 重要测点的数据完整度较好, 因此选取 3 发进行基于不完备数据的综合舱温裕度研究。需要说明的是, 本文提出的方法基于加权平均的思想, 因此只适用于舱温测点

分布合理的试验机, 若关键部位未测量, 则最终的评估结果可信度不高。

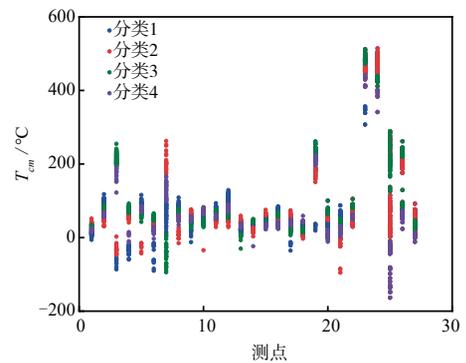
分别计算 126 架次中 3 发的 27 个舱温参数的舱温裕度, 形成不完备决策矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{126 \times 27}$, 逐渐增加分类数 K_j 进行 K -means 聚类, 当分类数 $K_6 = 7$ 时, 所有指标的重要性均为 0, 不再增加分类数。当分类数 $K = 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 时, K -means 聚类结果见图 2。



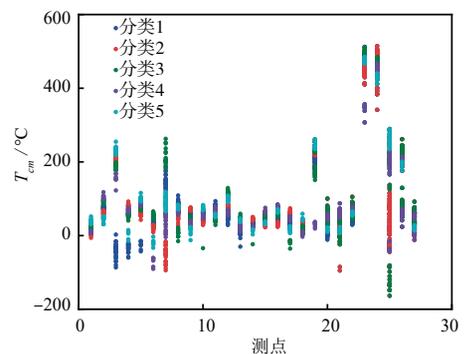
(a) $K = 2$



(b) $K = 3$



(c) $K = 4$



(d) $K = 5$

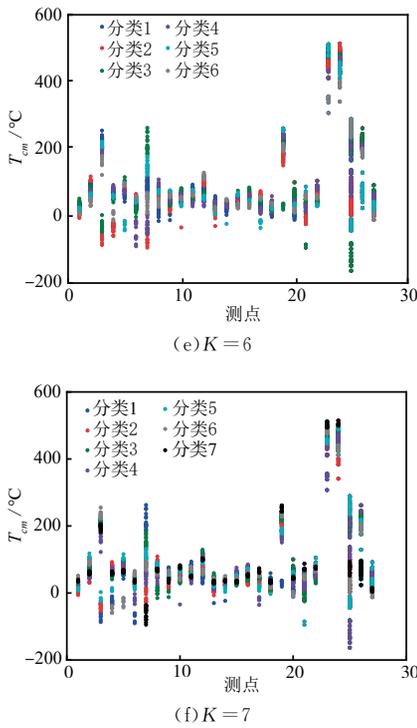


图 2 K-means 聚类结果

Fig. 2 K-means clustering results

将总体指标集 C 作为决策属性集,将删除某一指标后的指标集 $C - \{c_i\}$ 作为条件属性集,使用限制容差关系计算每个指标 c_i 的重要性,各指标权重的累积见图 3。由图 3 可以看到,随着分类数的增加,总体上各舱温指标的重要性数值逐渐减小,仅有个别指标的重要性数值先增大后减小,到分类数 7 时已不可分辨。这说明分类数较少时,对原决策表造成的信息损失较多,从而未能识别部分相对重要的指标。对比分类数 2 和最终的累积结果,各指标的重要性程度基本一致,累积结果弥补了分类数 2 产生的信息损失所造成的误差,从而更为客观。综合每个分类数 K_j 的计算结果并归一化得到每个指标的权重,然后加权平均求得综合指标,即综合舱温裕度。

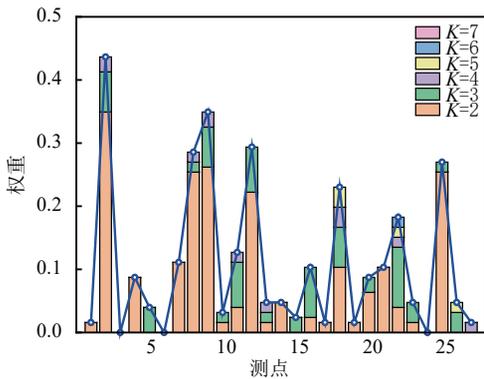


图 3 指标权重累积图

Fig. 3 Cumulative chart of indicator weight

2.2 结果讨论

基于 K-means 聚类算法和粗糙集限制容差关

系对 3 发的不完备舱温试飞数据进行挖掘,获取的各舱温参数权重分布见图 4。试飞期间影响 3 发冷却通风性能的技术状态更改共 7 次,绘制不同技术状态下综合舱温裕度与场温的散点图,见图 5。可以看到综合舱温裕度整体上随大气温度升高而降低,由于冷却通风试飞考核一般关注高温天气条件下的性能表现,筛选出场温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的试飞架次作为比较基准,求取每个技术状态下的综合舱温裕度平均值进行相互比较,确定每次技术状态更改对于冷却通风综合性能的改善程度,见表 2、图 6。

其中,第 2、3、4 个技术状态,在飞行后评估部分关键测点舱温裕度不足,直接否定了技术方案的可行性,因此只有 1 个架次,样本点偏少,计算结果可能具有一定偏差。第 7、8 个技术状态由于采取措施改善了冷却引射气流,并更改了部分关键舱温参数的限制值,使得冷却通风综合舱温裕度大幅提升。这也体现了应用本文所介绍方法,关键测点的舱温裕度对于冷却通风综合性能的影响较大。整体上看,随着多个改进措施的贯彻落实,冷却通风综合性能逐渐优化,第 8 个技术状态性能最好,第 2 个技术状态性能最差,两者之间差异为 $65.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

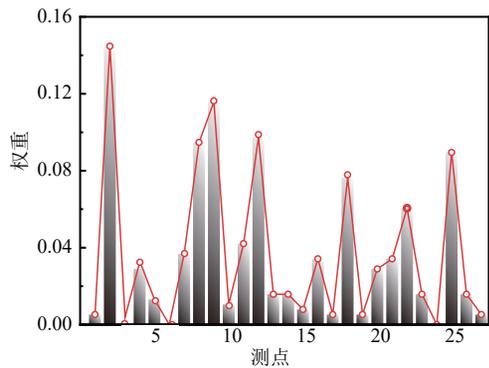


图 4 各舱温参数权重分布

Fig. 4 Weight distribution of temperature parameters of each nacelle

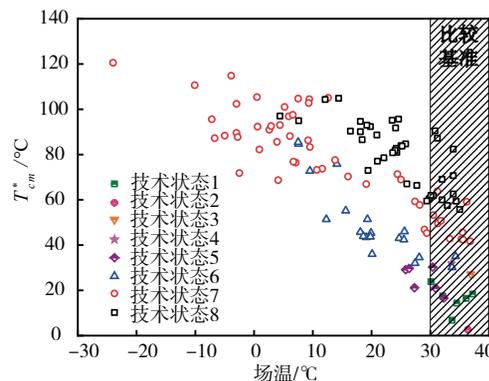


图 5 不同技术状态的综合舱温裕度

Fig. 5 Integrated nacelle temperature margin of different technical states

表 2 综合舱温裕度改善效果评价表

Tab. 2 Evaluation table for improving integrated nacelle temperature margin

技术状态	变更内容	30 °C 以上架次数	平均综合舱温裕度/°C	改善程度/°C
1	初始状态	6	16.2	
2	调整排气管结构 调整排气管结构	1	2.7	-13.5
3	调整引射间隙 整流罩打孔	1	27.1	24.4
4	加装通风管 加装隔热材料	1	31.9	4.8
5	拆除通风管	3	22.6	-9.3
6	整流罩打孔	2	32.6	10
7	调整排气管结构 更改部分限制值	10	49.1	16.5
8	更改部分限制值	12	68.2	19.1

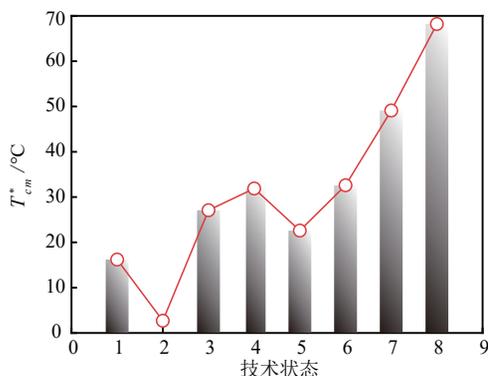


图 6 综合舱温裕度改善图

Fig. 6 Integrated nacelle temperature margin improvement chart

本文建立的冷却通风系统综合性能评估方法属于通用方法,除了能够计算不同技术状态下的综合性能,也能够对不同装机位置或不同机型的冷却通风系统进行综合性能计算和比较。对本文研究对象 3 发构型直升机的 3 个发动机舱分别计算冷却通风综合性能,并绘制 126 架次综合舱温裕度的变化趋势曲线,见图 7。图 7 中描述了涉及冷却通风性能变化的 9 次技术状态更改,可以看到,发动机安装位置对于冷却通风综合性能具有较大影响,1 发和 3 发综合性能的差异最大能够达到 83.2 °C。在第 8 个技术状态下(36~73 架次),1 发和 2 发的冷却通风综合性能最好,3 发最差;其他技术状态下,1 发的冷却通风综合性能最好,2 发次之,3 发的冷却通风综合性能最差。出现该现象,是由于在第 8 个技术状态下,1 发引气管路存在漏气,降低了 1 发的冷却通风性能。

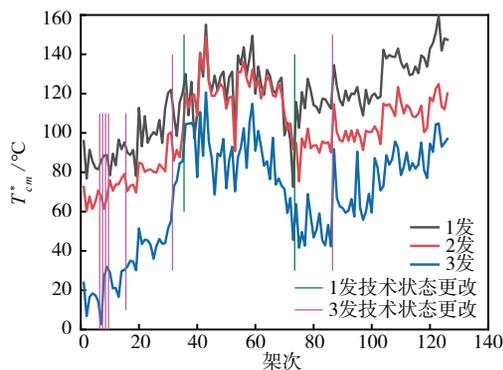


图 7 3 台发动机综合舱温裕度趋势图

Fig. 7 Integrated nacelle temperature margin trend chart of three engines

3 结论

本文针对试飞过程中动力舱温度测量数据存在缺失的现象,开展了动力舱冷却通风系统的综合性能评估方法研究,得到以下结论:

1) 采用 K -means 聚类算法和粗糙集理论的限制容差关系,确定了各舱温指标的权重分布,建立了一种适用于不完备舱温数据的动力舱冷却通风综合性能评估方法。

2) 本文建立的评估方法完全依赖数据本身,具备通用性,能够客观上获取各舱温参数的权重,实现了动力舱冷却通风综合性能的定量评估,是传统冷却通风试飞评估方法的有效补充。

3) 通过本方法定量评估了不同技术状态和不同装机位置对动力舱综合舱温裕度的影响,建议试飞中重点关注技术状态变更产生的影响以及综合舱温裕度最低的安装位置。

参考文献

- [1] KOZACZUK K. Engine Nacelles Design-Problems and Challenges[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2017, 231(12): 2259-2265.
- [2] NEERARAMBAM S, BOWLES P O, MIN B Y, et al. An Overview of the Exhaust Gas Reingestion Challenges on the CH 53K King Stallion[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia: AIAA, 2021: 0028.
- [3] POWERS R W, STRATTON Z, COLLINS C, et al. Engine Bay Cooling and Model Based Design on the CH-53K King Stallion[C]//AIAA Scitech 2021 Forum VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia: AIAA, 2021: 0032.
- [4] 李悦, 刘冲冲, 窦志伟. 直升机发动机舱通风冷却优化

- 设计[J]. 直升机技术, 2023(4): 55-58, 63.
- LI Y, LIU C C, DOU Z W. Optimal Design on the Ventilation and Cooling Capacity of the Helicopter Nacelle[J]. Helicopter Technique, 2023(4): 55-58, 63. (in Chinese)
- [5] ZHOU Y J, FU L Y, GUO J L, et al. Comprehensive Evaluation of Aero-Engine Performance Based on Chaotic Artificial Fish-Swarm Optimization Algorithm [C]//2018 IEEE International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Shenyang: IEEE, 2018: 301-305.
- [6] JIANG W, FU X Y, LIU K Q, et al. Aero-Engine Performance Evaluation Based on Gas Path Parameters and Operating Characteristics [C]//2022 Prognostics and Health Management Conference (PHM-2022 London). London: IEEE, 2022: 337-343.
- [7] ZHU R K, LIANG Q C, ZHAN H Y. Analysis of Aero-Engine Performance and Selection Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 1202-1207.
- [8] CUI Z Q, ZHONG S S, YAN Z Q. Aero-Engine Gas Path Performance Degradation Assessment Based on a Multi-Objective Optimized Discrete Feedback Network [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(6): 2079-2091.
- [9] 周义蛟, 郭基联, 万巍, 等. 基于组合赋权和改进 TOPSIS 法的航空发动机性能综合评估研究 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2018, 35(2): 22-27.
- ZHOU Y J, GUO J L, WAN W, et al. Comprehensive Assessment of Aero-Engine Performance Based on Improving TOPSIS and Combinational Weight [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2018, 35(2): 22-27. (in Chinese)
- [10] QU G X, YANG X, YUAN Q Y, et al. Research on Comprehensive Performance Evaluation Method for Frontier Fundamental Research Project for Future Aircraft Engines [J]. Sustainability, 2024, 16(14): 6205.
- [11] 熊中敏, 郭怀宇, 吴月欣. 缺失数据处理方法研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(14): 27-38.
- XIONG Z M, GUO H Y, WU Y X. Review of Missing Data Processing Methods [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(14): 27-38. (in Chinese)
- [12] PAWLAK Z. Rough Sets [J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [13] 李初宴. 基于不完备信息系统的粗糙集模型的扩展和属性约简算法的研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- LI C Y. Research on Extension of Rough Set Model and Attribute Reduction Algorithm Based on Incomplete Information System [D]. Hefei: Anhui University, 2021. (in Chinese)
- [14] 孙亚超. 基于容差关系的不完备决策信息系统属性约简 [D]. 漳州: 闽南师范大学, 2024.
- SUN Y C. Attribute Reduction of Incomplete Decision Information System Based on Tolerance Relation [D]. Zhangzhou: Minnan Normal University, 2024. (in Chinese)
- [15] 李盛楠. 基于非对称制约相似关系的粗糙集模型研究 [D]. 南宁: 广西民族大学, 2023.
- LI S N. Research on Rough Set Model Based on Asymmetric Constraint Similarity Relation [D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2023. (in Chinese)
- [16] 王国胤. Rough 集理论在不完备信息系统中的扩充 [J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(10): 1238-1243.
- WANG G Y. Extension of Rough Set under Incomplete Information Systems [J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(10): 1238-1243. (in Chinese)
- [17] MAT D M, ABAWAJY J H, TRI R Y I, et al. High Accuracy Data Classification and Feature Selection for Incomplete Information Systems Using Extended Limited Tolerance Relation and Conditional Entropy Approach [J]. IEEE Access, 2025, 13: 27657-27669.
- [18] WAN R X, MIAO D Q, PEDRYCZ W. Constrained Tolerance Rough Set in Incomplete Information Systems [J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2021, 6(4): 440-449.
- [19] WU S Z, WANG L T, GE S Y, et al. Feature Selection Algorithm Using Neighborhood Equivalence Tolerance Relation for Incomplete Decision Systems [J]. Applied Soft Computing, 2024, 157: 111463.
- [20] 王千, 王成, 冯振元, 等. K-means 聚类算法研究综述 [J]. 电子设计工程, 2012, 20(7): 21-24.
- WANG Q, WANG C, FENG Z Y, et al. Review of K-Means Clustering Algorithm [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(7): 21-24. (in Chinese)
- [21] KHAN I K, DAUD H B, ZAINUDDIN N B, et al. Determining the Optimal Number of Clusters by Enhanced Gap Statistic in K-Mean Algorithm [J]. Egyptian Informatics Journal, 2024, 27: 100504.
- [22] 朱琦. 粗糙集属性约简算法及分类器的研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- ZHU Q. Research on Attribute Reduction Algorithm and Classifier of Rough Set [D]. Qingdao: Qingdao University, 2022. (in Chinese)

(编辑: 陈斐)