

团 体 标 准

T/GAMC 0014—2025

低空装备故障预测与健康管理的通用  
技术要求

General Technical Requirements for Fault Prediction and Health  
Management of Low-Altitude Equipment

征求意见稿

202X-XX-12 发布

202X-XX-12 实施

中国计算机自动测量与控制技术协会 发布



## 目 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 技术架构设计.....	2
4.1 系统架构设计原则.....	2
4.1.1 分层协同.....	2
4.1.2 动态适应性.....	2
4.1.3 安全可信.....	2
4.2 核心功能模块.....	2
5 核心技术要求.....	2
5.1 数据采集与处理.....	2
5.1.1 传感器选型.....	2
5.1.2 多源异构数据融合.....	3
5.2 故障预测算法.....	3
5.2.1 模型多样性.....	3
5.2.2 性能要求.....	3
5.3 健康管理技术.....	3
5.3.1 健康评估.....	4
5.3.2 剩余寿命预测.....	4
6 测试与验证要求.....	4
6.1 测试环境.....	4
6.2 验证指标.....	4
6.2.1 算法鲁棒性.....	4
6.2.2 系统可靠性.....	4
6.3 认证流程.....	5
7 安全与合规要求.....	5
7.1 数据安全.....	5
7.2 合规管理.....	5
7.2.1 系统需全面符合国家级法规的要求.....	5
7.2.2 系统需严格遵守地方低空管理规范.....	5
7.2.3 系统需主动预留接口.....	6
8 实施与运维要求.....	6
8.1 建设路径.....	6
8.1.1 试点验证.....	6
8.1.2 动态迭代.....	6

8.2 运维管理.....7

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计算机自动测量与控制技术协会提出并归口。

本文件起草单位：中国飞行试验研究院、工业和信息化部电子第五研究所、珠海科技学院、西安西测测试技术股份有限公司、国防科技大学系统工程学院装备管理工程系、中航沈飞民用飞机有限责任公司、北京国科标研科技有限公司

本文件主要起草人：祁圣君、陈平、黄景德、李泽新、刘四平、李继成、吕欣、孟凡力、于敏、杨亚楠、尚尔钧



# 低空装备故障预测与健康管理的通用技术要求

## 1 范围

本文件规定了低空装备故障预测与健康管理的通用技术要求的术语和定义、技术架构设计、核心技术要求、测试与验证要求、安全与合规要求、实施与运维要求等。

本文件适用于低空飞行器（含无人机、eVTOL、通用航空器等）及其关键部件的故障预测与健康管理系统（PHM）设计、开发、部署与验证，覆盖全生命周期设计验证、生产测试、在役监测、退役评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 33780.1 基于云计算的电子政务公共平台技术规范 第 1 部分：系统架构
- GB/T 39612 低空数字航摄与数据处理规范
- GB/T 44662 健康管理终端设备数据采集与传输协议
- MH/T 2015 低空飞行服务系统技术要求
- MH/T 4055.1 低空飞行服务系统技术规范 第 1 部分：架构与配置
- MH/T 4055.2 低空飞行服务系统技术规范 第 2 部分：技术要求
- MH/T 4055.3 低空飞行服务系统技术规范 第 3 部分：测试方法
- YD/T 4324 低空物联网通信安全技术要求
- YD/T 4406 云边协同的承载网控制系统架构及技术要求
- YDB 162 云服务保护管理技术要求
- T/CSTE 0672 健康管理大数据技术综合服务平台建设与应用规范
- T/CITS 411 低空空域智能管控系统建设指南
- T/CIET 828 低空空域数字孪生系统技术规范
- T/TDIA 00013 面向低空空域的集群通信平台建设技术规范
- T/GITIF 007 面向复杂装备运行维护需求的故障预测技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **剩余使用寿命 Remaining useful life**

是指低空设备、部件或系统从当前时刻起，能够维持正常功能并完成预定任务，直至发生故障或性能下降到不可接受水平前的预计剩余运行时间或循环次数，RUL 的精准预测有助于提前制定维护计划，减少非计划停机。

## 3.2

**健康状态指标 Health status indicator**

用于评估设备、系统或实体当前功能完好程度与运行稳定性的量化或定性参数，通常结合关键性能参数、故障预警信号、损耗程度等维度，反映其能否持续满足预定任务需求的状态特征。

## 3.3

**多源异构数据融合 Multi source heterogeneous data fusion**

针对来自不同数据源（如传感器、数据库、系统平台等）、具有不同数据格式（结构化、非结构化、半结构化）、不同采集频率或不同精度特征的数据，通过一系列技术手段进行清洗、转换、对齐与整合的过程。

## 3.4

**研发过程健康管理 R&D process health management**

指在装备研发设计、研制与验证阶段，对关键部件、系统模型和验证数据开展基于模型的健康状态评估与预测，实现研发活动中设计合理性、系统集成一致性及性能演化规律的智能化监测与优化。

## 4 技术架构设计

## 4.1 系统架构设计原则

## 4.1.1 分层协同

系统采用分层架构设计的原则，构建“感知层-传输层-分析层-决策层”四级架构，还应考虑数据、业务等协同化，支持边缘计算与云端协同，可支持多平台级联等。

## 4.1.2 动态适应性

系统采用动态适应性原则，可基于数字孪生技术实现虚实映射，支持实时状态同步与预测模型迭代。

## 4.1.3 安全可靠

系统遵循安全可靠的原则，应符合等保 2.0 三级标准，可实现数据全生命周期加密与访问控制。

## 4.2 核心功能模块

系统的核心功能模块如下表所示：

表 1 核心功能表

模块名称	核心功能	技术指标
数据采集模块	多源传感器数据融合（振动、温度、压力等）、数据预处理与特征提取、数据卸载。	采样率应满足 $\geq 1\text{kHz}$ ，噪声抑制比应满足 $\geq 40\text{dB}$ ，数据完整率控制在 $\geq 99.9\%$ 。
状态监测模块	实时健康状态评估、故障模式识别、关键参数趋势分析。	故障检测率控制在 $\geq 95\%$ ，误报率应控制在 $\leq 0.1\%$ 。
预测模型模块	基于机器学习/深度学习的剩余寿命预测、退化轨迹建模。	预测误差应控制在 $\leq 10\%$ （RUL），模型更新周期应满足 $\leq 24$ 小时。
决策支持模块	维修策略生成、备件需求预测、应急响应预案制定。	决策响应时间应控制在 $\leq 5$ 秒，维修方案优化率应控制在 $\geq 30\%$ 。

## 5 核心技术要求

### 5.1 数据采集与处理

#### 5.1.1 传感器选型

传感器选型需以严苛的环境适应性与稳定运行能力为核心标准，重点满足三大关键性能要求，详细内容如下所示：

- a) 抗振动性能，需确保传感器在 5-2000Hz 的宽频振动环境下保持数据采集精度，如飞行器引擎振动、机械运转冲击、飞行中的颠簸晃动等，都能有效过滤振动干扰，避免因机械共振导致的测量偏差或硬件损坏；
- b) 宽温域适应能力，需耐受-50℃~+85℃的极端温度波动，在高空低温、沙漠高温或昼夜温差剧烈的户外环境中，可保障电路稳定性与传感元件灵敏度，确保数据采集不受温度漂移影响；
- c) 低功耗特性，尤其对于无人机、偏远监测站等依赖电池供电的场景，低功耗设计能延长设备续航时间，减少频繁充电或换电对监测连续性的影响。

#### 5.1.2 多源异构数据融合

在多源异构数据的处理流程中，数据融合通过科学方法消除数据差异与噪声干扰，实现信息的深度整合，具体要求如下：

- a) 对于装备物理状态数据，可采用卡尔曼滤波、D-S证据理论等技术。卡尔曼滤波，借助递归估算特性，能够动态修正数据偏差，在时序维度上实现多源数据的精准时空对齐，例如将不同频率采集的飞行器位置数据、气象监测数据校准至统一时间轴与空间坐标系，确保数据在时空维度上的一致性；D-S 证据理论，通过对多源信息的可信度评估与合成推理，有效完成冗余校验，能基于证据权重分配剔除异常值、融合有效信息，减少数据冗余的同时提升信息可靠性。
- b) 对于研发过程与管理数据，应支持对文档、模型、流程节点、资源状态等非物理信号数据的融合处理。可采用本体建模、知识图谱等技术，构建研发要素间的语义关联，实现跨阶段、跨学科、跨组织的数据-信息-知识贯通与统一理解，为研发过程的智能调控提供决策依据。

## 5.2 故障预测算法

### 5.2.1 模型多样性

多类型模型的协同应用，能适应不同场景下的建模需求，更能通过交叉验证提升模型的鲁棒性与泛化能力，为系统分析、风险预警与智能决策提供多层次的技术支撑。系统可支持的模型包括但不限于如下所示：

- a) 物理模型，以有限元分析为典型代表，基于力学、热力学等基础原理构建数学方程，能够精准模拟结构应力、流体运动等物理过程，适用于低空设备性能评估、故障机理分析等需要深度解析内在规律的场景；
- b) 数据驱动模型，依托海量数据挖掘潜在规律，LSTM 模型擅长捕捉时序数据中的长期依赖关系，在低空设备剩余寿命预测、空域流量趋势预判等时间序列分析任务中表现突出；
- c) 数据驱动模型（LSTM、Transformer），模型凭借自注意力机制，能有效处理高维度、多模态数据，在复杂场景下的态势感知与行为预测中发挥优势；
- d) 混合模型，融合物理模型的机理解释力与数据驱动模型的预测精度，通过互补优势弥补单一模型的局限性，例如在飞行器动态仿真中，可利用物理方程描述气动特性，通过数据驱动模型修正实际运行中的非线性误差。

### 5.2.2 性能要求

- a) 预测准确率，针对电机、电池、飞控系统等关键部件，预测准确率需控制在 $\geq 85\%$ ，通过建模分析

对部件故障风险、剩余寿命等状态的预判结果，与实际运行情况的吻合度偏差需控制在 5%以内；

b) 长周期预测稳定性，要求应控制在 $\leq 5\%$ 漂移，即随着预测周期延长，模型输出结果与实际状态的偏差需控制在5%以内。

### 5.3 健康管理技

#### 5.3.1 健康评估

健康评估可通过建立多维度评估体系，实现对设备整体状态的全面、精准研判，为运维决策提供科学依据，主要涵盖结构完整性、动力性能与控制系统可靠性三大核心维度：

a) 结构完整性评估，聚焦低空设备主体框架、关键连接件等结构部件，通过检测裂纹、变形、腐蚀等损伤情况，判断其是否满足强度与稳定性要求，避免因结构失效引发安全事故；

b) 动力性能评估，针对电机、发动机、电池等动力核心部件，监测输出功率、能耗效率、续航能力等关键参数，衡量其动力供给的持续性与稳定性，确保设备任务执行的动力支撑；

c) 控制系统可靠性评估，则围绕飞控系统、传感器、执行机构等控制组件，检验指令响应速度、控制精度、抗干扰能力等性能指标，以及故障诊断能力，保障设备操作指令的准确执行与运行状态的稳定调控。

#### 5.3.2 剩余寿命预测

剩余寿命预测可通过数据支撑与试验验证，为低空设备维护规划与风险防控提供关键依据。

a) 加速寿命试验（ALT），退化数据通过持续监测设备性能参数的衰减趋势，如电机转速波动等，捕捉低空设备从正常运行到性能失效的渐进过程，为低空设备寿命预测提供真实的运行状态依据，在短时间内获取大量寿命相关数据，弥补长期自然老化数据采集周期长的不足；

b) 支持置信区间计算，系统支持95%置信区间计算，通过统计学方法量化预测结果的可靠范围，实际剩余寿命有 95%的概率落在该区间内，可有效降低预测不确定性带来的决策风险。

## 6 测试与验证要求

### 6.1 测试环境

测试环境的科学搭建可通过构建以数字孪生试验场为代表的仿真测试平台，能够精准复现低空设备在实际运行中的复杂工况与动态场景。测试环境还需全面覆盖传感器失效、通信中断等典型故障场景。

### 6.2 验证指标

#### 6.2.1 算法鲁棒性

算法鲁棒性作为核心验证指标，可直接衡量算法在复杂数据环境下的稳定性与实用价值，尤其在低空设备状态预测、故障预警等关键场景中至关重要。

a) 指标要求算法在面临噪声干扰（ $SNR \leq 10dB$ ）与数据缺失（ $\leq 20\%$ ）的极端条件时，仍能保持预测结果的有效性；

b) 针对传感器、通信链路引入的低信噪比噪声，算法需具备强大的噪声过滤与特征提取能力，即使在  $SNR \leq 10dB$  的强干扰环境中，也能从杂乱数据中捕捉关键趋势，避免噪声导致的预测失真；

c) 面对数据采集中断、传输丢包等问题造成的 $\leq 20\%$ 数据缺失，需通过插值补全、上下文推理等机制填补数据缺口，确保时序连续性与特征完整性，不因部分数据缺失而丧失核心预测能力。

#### 6.2.2 系统可靠性

系统可靠性是衡量其长期稳定运行能力的核心指标，通过量化标准，为系统在实际应用中的风险防控提供关键依据，主要体现在以下两个维度：

a) 平均无故障运行时间，需满足 $\geq 10,000$ 小时，充分保障系统的可持续服务能力，减少因频繁故障导致的停机维护成本；

b) 容错切换时间，当系统出现局部故障或异常时，冗余备份机制需在100ms内完成故障检测与资源切换，当系统出现严重故障或异常时，冗余备份机制需在1s内完成故障检测与资源切换，确保用户操作、数据传输等核心功能不受明显影响，避免因故障扩散引发系统性瘫痪。

### 6.3 认证流程

分阶段认证通过层层递进的验证环节，全面把控系统的性能合规性与运行可靠性，遵循“实验室验证→外场测试→适航认证”的递进路径。

a) 实验室验证，作为基础环节，在可控环境中对设备核心功能、性能指标进行精细化测试，通过模拟各类工况验证算法准确性、硬件稳定性等基础特性，为后续测试奠定技术基础；

b) 外场测试，将系统置于真实运行场景中，在复杂多变的自然环境与实际工况下检验系统的环境适应性、任务执行能力，暴露实验室环境中难以发现的潜在问题；

c) 适航认证，作为最终环节，依据行业安全标准对系统的整体安全性、可靠性进行全面评估，确保其满足低空运行等特殊场景的严苛要求。

## 7 安全与合规要求

### 7.1 数据安全

数据安全是维护系统运行安全与用户权益的核心防线，通过技术手段对敏感数据实施全生命周期保护。

a) 国密算法加密，针对飞行轨迹、故障日志等包含核心运行信息与隐私内容的敏感数据，可采用国密算法进行加密处理，依托SM4、SM9等国家自主可控的加密标准对数据传输、存储过程进行高强度加密；

b) 系统支持区块链存证功能，将加密后的敏感数据哈希值写入区块链分布式账本，利用区块链不可篡改、可追溯的特性，完整记录数据的生成、修改、访问轨迹，既防止数据被恶意篡改或伪造，又能通过链式存储实现数据溯源，为数据完整性与真实性提供可信证明。

### 7.2 合规管理

#### 7.2.1 系统合规性要求

a) 在具体实践中，系统需从“硬合规”与“软适配”两个维度落实国家级法规要求。一方面，在设备接入与运行前，需完成严格的合规性审查，确保设备型号符合国家强制标准，具备完整的身份编码如无人机的唯一识别码），并已按规定完成登记备案；对于飞行活动，需严格遵循条例中关于飞行空域划分（如管制空域、适飞空域）、飞行时间限制、禁飞区域（如机场净空区、军事管理区）的规定，通过系统内置的空域数据库与电子围栏功能，自动规避违规飞行计划。另一方面，系统还需同步适配其他相关国家级法规与标准。

b) 为实现地方规范的精准适配，系统需构建“动态更新+智能匹配”的地方合规管理机制。首先，建立地方规范数据库，实时同步全国各省市、自治区出台的低空管理政策，包括空域划分细则、气象预警联动要求、特殊活动期间的临时管控措施（如重大赛事、节假日期间的空域管制）等，并对政策内容进行结构化拆解，形成可被系统识别的合规规则库；其次，在用户发起飞行计划时，系统通过定位功能获取飞行区域信息，自动匹配该区域的地方规范，对飞行参数（高度、速度、航线）进行合规性校验。

#### 7.2.2 预留接口要求

## T/CAMC 0014-2025

a) 合规管理不仅要求低空设备自身“依规运行”，还需为监管部门提供透明、实时的监管数据支持，实现“运行可追溯、风险可监管”。系统主动预留监管接口，正是通过标准化的技术手段，构建监管部门与设备运行方之间的数据桥梁，确保监管行为高效、精准实施；

b) 监管接口的核心价值在于实现“数据实时互通、监管闭环管理”。接口需满足监管部门对关键信息的获取需求，主要包括三大类数据：一是飞行状态数据，如设备实时位置（经纬度、高度）、飞行速度、剩余电量、姿态参数（如俯仰角、滚转角）等，便于监管部门实时掌握设备运行动态，及时发现异常飞行行为（如突然偏离航线、超高度飞行）；二是轨迹数据，包括历史飞行轨迹的存储与回溯，要求数据精度达到米级，且存储时间不低于法规要求的期限（通常不低于6个月），以便在发生安全事故或违规事件时，能够进行责任追溯与原因分析；三是设备信息数据，如设备型号、唯一识别码、生产厂商、登记备案信息、维护保养记录等，帮助监管部门建立设备“一人一机一档”的管理体系，实现对设备全生命周期的监管。

## 8 运维要求

### 8.1 动态迭代

为确保低空设备相关标准的时效性与先进性，可建立每两年一次的修订机制。修订过程中需主动纳入新兴技术成果，如引入联邦学习技术实现多主体数据协同训练，在保障数据安全的同时优化合规判定模型；融入因果推理技术，提升对设备异常运行原因的分析效率，增强风险预判能力。同时，结合试点验证结果与行业发展新需求，调整空域适配、数据监管等条款，确保标准始终与技术创新、产业实践同频共振。

### 8.2 运维管理

运维管理需构建全维度保障体系，一方面建立设备健康档案管理系统，记录设备生产信息、登记备案情况、历次维护数据、故障处理记录等内容，实现从出厂到报废的全生命周期数据可追溯，为设备性能评估与合规审查提供支撑；另一方面定期开展安全演练，其中红蓝对抗演练可模拟黑客攻击、违规入侵等场景，检验系统防御能力，应急响应演练频次需 $\geq 2$ 次/年，涵盖设备失联、坠机、数据泄露等突发情况，提升运维团队处置效率，保障设备持续合规运行。