

基于KPI的FS11传感器预测性维护研究

季川

中国民用航空西北地区空中交通管理局甘肃分局, 中国·甘肃 兰州 730087

摘要: 跑道视程是民航飞机起飞和着陆最低运行标准的决定性气象参数, FS11 能见度传感器作为国内枢纽机场能见度测量的主要传感器, 其数据可靠性直接关联飞行安全。现行对该设备的维护是以月维护、半年设备换季等为主的预防性维护为主, 本质上是“按时维护”而非“按需维护”, 这种维护方式导致设备性能隐性衰退难被及时发现。本文提出将 KPI (关键设备性能指标) 引入 FS11 运维管理, 将 FS11 自测的窗口污染值、发射光强值等参数转化设备健康的 KPI 指标, 通过巧妙设计 KPI 指标并建立相应的预测流程, 实现从“按期维护”向“预测性维护”的转变。研究表明, 这种以 KPI 为核心的预测性维护, 可显著提升 RVR 数据的可信度与机务运维工作质量。

关键词: 跑道视程; FS11; 能见度传感器; KPI; 预测性维护

Research on Predictive Maintenance of FS11 Sensor Based on KPI

Ji Chuan

Gansu Branch of Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, China Gansu Lanzhou 730087

Abstract: Runway visual range is a crucial meteorological parameter determining the minimum operational standards for takeoff and landing of civil aircraft. The FS11 visibility sensor, as the main sensor for visibility measurement at domestic hub airports, the reliability of its data is directly related to flight safety. The current maintenance of this equipment is mainly based on preventive maintenance such as monthly maintenance and equipment replacement at the end of the season. Essentially, it is "timely maintenance" rather than "on-demand maintenance", and this maintenance method leads to the difficulty in timely detection of the hidden decline in equipment performance. This paper proposes to introduce KPI (Key Equipment Performance Indicators) into the operation and maintenance management of FS11, converting the window contamination values, emission light intensity values, etc. of FS11 self-tests into KPI indicators of equipment health. Through ingenious design of KPI indicators and establishment of corresponding prediction processes, the transformation from "timely maintenance" to "predictive maintenance" is achieved. Research shows that this predictive maintenance based on KPI can significantly improve the credibility of RVR data and the quality of aircraft maintenance and operation work.

Keywords: Runway visual range; FS11; Visibility sensor; KPI; Predictive maintenance

0 引言

FS11 传感器是机场普遍使用的能见度测量设备, 其测量数值参与跑道视程 (RVR) 的估算, RVR 是 ICAO Annex 3 规定的机场最低运行标准唯一的气象参数, CAT I/II/III 运行中 RVR 门槛分别为 550 m、300 m、175 m, RVR 每米偏差均可能影响放行决策^[1]。日常运维中机务员需要按照《民航空管自动气象观测系统运行维护维修规定》要求对 FS11 传感器进行月度维护以及在强雷雨、雪、雨夹雪和沙尘等天气过后对设备进行检查^[2], 维护时最多的操作是进行窗口清洁和定期设备校准, 这种定期维护在面对如兰州地区多沙尘、有机场施工等环境时易导致“过度维护”或“滞后维护”。此外, LED 光源老化、光路微偏、

密封失效导致的内部凝露等慢变过程, 在没有预警机制的情况下, 往往要到数据跳变或触发告警时才被发现, 最终影响管制等用户对能见度数据的使用。因此, 把 FS11 自身“一直在测但未被设备维护人员充分利用”的参数, 组织成基于这些关键参数的预测性维护工作流程, 让机务员的维护决策从经验判断走向数据驱动, 最终实现从“按期维护”向“按需维护”的跃迁。

1 FS11 设备 KPI 可行性分析与指标体系构建

1.1 FS11 建立预测性维护的可行性分析

首先, 为保证 FS11 测量数据的准确性, 机务员在维护 FS11 设备时, 主要围绕“光学窗口通路”“光路”“光源”“环境干扰”等四个方面开展维护工作, 如表 1 所示。

表1 FS11健康敏感链路 with 参量映射

链路	物理本质	衰退模式	对应参量
①光学窗口通路	窗口透射率决定光强预算	灰尘/污垢/水渍渐进积累	Window cont
②光路	FS11测量的空间需要无固态遮挡	积雪/鸟粪/塑料袋遮挡	Backscatter
③光源	LED发光二极管随运行时间衰减情况	老化→驱动电流↑	LEDI
④光污染	关发射机时接收机需要输出零电平	密封漏光/PCB板受潮	OFFSET

这四链路也是 FS11 内置监控的四条主线，构成后续 KPI 指标体系的物理量。

其次，机务员可以通过 FS11 内置的 STATUS 命令输出 FS11 此时的工作状态，这些状态包括 Window cont、Backscatter、LEDI、OFFSET、±12V/5V、TS/TB 等参数^[3]。这些参数是手册明确定义、随时可读的设备状态值，机务员不需要拆设备、不需要改固件，只需周期轮询即可获得这些值。在手册中每个参数都有明确的指示意义，如：Window cont 对应窗口污染程度→能见度值失真风险；Backscatter 对应积雪 / 异物遮挡情况→数据虚低风险；LEDI 对应光源性能→LED AGED 前兆；OFFSET 映射密封漏光 /PCB 板受潮→SIGNAL OFFSET DRIFTED 前兆。每个 KPI 候选量都有故障物理支撑。

最后，手册在 Warning/Alarm 表中明确了关键动作边界，KPI 阈值可直接参照手册告警触发逻辑反推预警带。例如 Window cont 告警在约 15% 触发，则可设黄带 8%~12%、橙带 12%~15%、红≥15%，使 KPI 输出自然衔接到既有维护动作。

1.2 三层 KPI 架构设计

FS11 的 KPI 指标遵循四项设计原则：不发明新物理量；三层分离（健康保障层、测量性能层、环境影响层）；三级阈值（绿 / 黄 / 红）；趋势优先于快照。其中 L2 测量性能层是预测性价值的核心所在。三层架构如表 2 所示。

1.3 核心 KPI 详解

KPI_p1 窗口污染度取 TX 与 RX 两侧更差者为短板值，如式 (2) 所示。

$$KPI_{p1} = \max(WC_TX, WC_RX) \tag{2}$$

斜率（窗口污染速度）：

$$SlopeWC=(WC(t)-WC(t-30d))/30[\%/d] \tag{3}$$

其中公式中 WC(t) 是现在污染度，WC(t-30d) 指 30 天前污染度。

阈值方案为：绿区 <8%（污染轻微，仅纳入趋势记录）；黄区 8%~13%（计算斜率，若 30 天斜率 >0.25%/d 则提前预约清洁）；橙区 13%~16%（24~48h 内清洁窗口）；红区 ≥16% 或 WINDOW CONTAMINATED 置位（立即清洁，若清洁后 WC 仍 >5% 则查窗口划伤）。

斜率预警是预测性核心：即使当前 WC=6%（绿色），若 SlopeWC>0.25%/d 则自动升一级显示为黄色，并生成“预计 N 天后需清洁窗口”的预告任务。越界天数预估如式 (4) 所示。

$$T_remaining = (15\% - WC_current) / Slope_WC \tag{4}$$

KPI_p2 后向散射 / 阻塞指数用最近一次 CLEAN 后的 BS 做基线，去窗口贡献后的净阻塞分量如式 (5) 所示。

$$KPI_{p2}(\%) = (BS(t) - BS_ref) / BS_ref \times 100\% \tag{5}$$

KPI_p2 的价值不在绝对值而在相对变化。每次 CALIBRATE WINDOW_CLEAN 后应刷新 BS_ref。当 Δ>+100% 或触发 CLOGGING ALARM 时，表明光路严重受阻，需立即现场排查。

KPI_p3 LED 老化指数如式 (6) 所示，相对新装基线的增幅比直接反映 LED 衰老程度。当 Δ>+20% 时申领 FST102 备件，Δ>+35% 或 LED AGED 置位时尽快更换。

$$KPI_{p3}(\%)=(LEDI(t)-LEDI_new)/LEDI_new \times 100\% \tag{6}$$

2 KPI 驱动的六步闭环流程与应用案例

2.1 六步闭环操作流程

机务员面向 KPI 的预测性维护闭环包含六个步骤：（1）采集——定时或事件触发，从 FS11 查 STATUS 报文；（2）解析——提取 WC、BS、LEDI、OFFSET 等关键量；（3）评级——逐 KPI 对照绿黄橙红阈值生成健康快照；（4）趋势——算 Δ/Δt 斜率，预测越界倒计时；（5）决

表2 FS11三层KPI指标体系概要

层级	KPI名称	数据来源	阈值要点
L1-h1	电源健康	+12V/-12V/+5V	绿≤±5%；红>±10%
L1-h2	温控/加热器健康	TS/TB/hood temp	黄：加热器ON但温不升
L1-h3	系统完整性	SYSTEM STATUS	红：任何ERROR位
L2-p1	窗口污染度	Window cont	绿<8%；橙13~16%；红≥16%
L2-p2	后向散射/阻塞指数	Backscatter	绿Δ≤+20%；红Δ>+100%
L2-p3	LED老化指数	LEDI	绿Δ≤+10%；红>+35%
L2-p4	偏移漂移	OFFSET	绿≤0.0001；红>0.0005
L2-p5	校准一致性残差	CALIBRATE CHECK	绿≤3%；红>15%
L3-e1	温度偏离度	TS vs气温	归因分析用
L3-e2	加热器效能	hood_temp	归因分析用

策——生成三类工单（紧急 / 计划 / 观察）；（6）执行与验证——清洁 / 更换 / 校准后再次 STA 确认 KPI 回归绿区，关闭工单并更新基线。

2.2 案例一：慢变双因子衰退场景

兰州中川机场跑道端 FS11 已服役第 2 年，时间跨度为 11 月中旬至 2 月末（冬春沙尘 / 除冰液飞溅 + 融雪冻融反复），KPI 数据如表 3 所示。

表3 慢变双因子衰退场景KPI推演

日期	KPI_p1	KPI_p2	LEDI	KPI_p3	KPI驱动动作
11/15	3%	+0%	169	基线	—
11/29	6%	+11%	172	+1.8%	查飞行区有无施工
12/13	9%	+28%	176	+4.1%	斜率0.21%/d→提前预约 12/20清洁
12/20	2%	+1%	174	+2.9%	清洁+CALIBRATE→WC 归2%
01/24	13%	+42%	185	+9.5%	清 洁 后 W C 回 落 3%→CALIBRATE
02/15	7%	+14%	196	+16%	LEDI超出绿区→申领备件
02/28	—	—	227	+34%	LED AGED→紧急更换 FST102

KPI 驱动做对了三件事：第一，WC 斜率触发提前介入（12/13 的 0.21%/d → 12/20 提前擦），避免了污染在低能见度天气发生时无声越界；第二，BS 相对变化帮助区分“纯脏”与“脏 + 堵”，触发目视复核发现罩下缘泥垢结壳；第三，LEDI 趋势线在 LED AGED 出现前约 6~8 周就进入黄区，给了机务员申领备件、协调管制用户的时间。

对比传统的定期维护，12/20 那次不会被提前；1 月上旬 WC 悄然穿过 12%~15% 无人知，若恰遇大雾天低能见度运行则决策风险极大。LED 老化则完全不可见，直到某天数据 missing。

2.3 案例二：快变光路遮挡排查场景

兰州机场夏夜强对流带来强阵风。傍晚收到 CLOGGING ALARM 告警。KPI 诊断过程如下：KPI_p1（窗口污染）仅为 5%（绿色），说明不是窗口脏了；KPI_p2 相对变化率高达 +173%，远超红色阈值；LEDI 和 OFFSET 均无异常。KPI 组合（WC 正常 + BS 暴增）= 物理遮挡，不是擦玻璃能解决的。

机务员通过室外视频摄像头查看，发现 FS11 上出现被大风吹上去的杂草半包裹住了接收机一侧窗口罩。机务员进场清洁掉挂在接收机一侧窗口罩的杂草后，BS 回落至 112，CLOGGING ALARM 消失。KPI_p2 与 KPI_p1 的背离是关键信号，精准区分了“污染”与“遮挡”，避免了

无效的盲修。

3 结语

本文通过对 Vaisala FS11 能见度传感器内置监控参数的深度挖掘与体系化重构，建立了基于 KPI 的预防性维护策略，得出以下结论：

（1）FS11 具备天然的 KPI 化基因。其 STATUS 命令输出的窗口污染度、后向散射、LED 驱动电流、零偏移及电源电压等参数，是设备健康状态的数字化映射，转化为 KPI 指标在技术上具有充分可行性，无需硬件改造即可实现。

（2）三层 KPI 架构实现了运维的升级。L1 健康保障层确保设备基础生存条件；L2 测量性能层（特别是 KPI_p1 与 KPI_p2 的组合）成功区分了“渐进式衰退”与“突发性故障”，解决了传统维护中“看不见慢变量”的痛点；L3 环境影响层为数据异常提供了归因分析依据。

（3）“斜率预警”是预测性维护的核心。通过计算 KPI_p1 的斜率来预测越界时间，使维护工作从“亡羊补牢”转变为“未雨绸缪”，显著降低了因设备隐性劣化导致的 RVR 数据风险。

（4）案例验证了 KPI 体系的实战价值。在慢变场景中提前锁定了 LED 老化趋势，避免了突发失效；在快变场景中精准区分了污染与遮挡，指导了精准排故。

建议引入“定期维护 + KPI 阈值维护”相结合的维护方式，对于本场 FS11 传感器建立“一机一档”KPI 基线库。远期可探索数字孪生技术、AI 自适应阈值算法与备件供应链联动，实现民航气象设备运维从“经验驱动”向“数据驱动”的全面转型。

参考文献：

- [1] ICAO. Annex 3: Meteorological Service for International Air Navigation (20nd ed.)[S]. Montreal: ICAO, 2018.
- [2] 《民航空管自动气象观测系统运行维护维修规定》MD-TM-2015-004.
- [3] Vaisala Oyj. Vaisala Visibily Sensor FS11 User's Guide M211107EN-C[S]. Helsinki: Vaisala Oyj, 2015.

作者简介：季川（1986-），男，中国四川·崇州人，本科，主任工程师，研究方向：从事民航气象设备维护维修研究工作。