

液冷系统多模态健康监测与动态评估方法

陈学文, 王以波, 柯昌燕, 何恩, 邢楷

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: **目的** 针对液冷电子设备长期运行中因凝露隐蔽性强、检测灵敏度低、安全风险高等问题, 现有方法存在动态监测能力不足、多参数协同分析缺失等局限, 提出一种液冷系统多模态健康监测与动态评估方法。**方法** 通过集成离子溅射镀膜液体传感器、压力传感器、压差传感器及 PT1000 铂电阻温度探头, 构建分布式多物理场监测网络, 实时追踪凝露蓄积量、流道压力变化、流道堵塞率及热交换效能。创新性建立模糊综合评价模型 (HIS-LC), 采用熵权法动态分配特征权重 $\omega_1 \sim \omega_4$, 实现系统 0~100 标度的健康状态量化评分。**结果** 凝露检测限达 0.05 mL (置信度 95%), 1 mL 凝露检测灵敏度达 98%, 压力突变响应时间为 2 s, 流道压差大于 1.5 MPa 时, 报警率为 100%。经 48 h 连续运行验证, 散热系统健康评分稳定维持 ≥ 98 (标准差 $\sigma=0.8$), 散热效率衰减率 $<0.8\%/24$ h。**结论** 本研究为高可靠性液冷系统从“故障后维修”向“预测性维护”转型提供了技术支撑。

关键词: 液冷系统; 健康管理; 多模态传感; 凝露检测; 熵权法; 动态评估

中图分类号: TP277

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0147-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.019

Multi-modal Health Monitoring and Dynamic Evaluation Method for Liquid Cooling Systems

CHEN Xuwen, WANG Yibo, KE Changyan, HE En, XING Kai

(29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a multi-modal health monitoring and dynamic evaluation method for liquid cooling systems to address the challenges of concealed condensation, low detection sensitivity, and high safety risks in liquid-cooled electronic equipment during long-term operation, where existing methods suffer from insufficient dynamic monitoring and lack of multi-parameter collaborative analysis. A distributed multi-physics monitoring network was constructed by integrating ion-sputtered liquid sensors, pressure sensors, differential pressure sensors, and PT1000 platinum resistance temperature probes, enabling real-time tracking of condensation accumulation, flow channel pressure changes, flow channel blockage rate, and heat exchange efficiency. A fuzzy comprehensive evaluation model (HIS-LC) was innovatively established, utilizing the entropy weight method to dynamically allocate feature weights ($\omega_1 \sim \omega_4$) and quantify system health status on a 0-100 scale. Experimental results demonstrated that the threshold of condensation detection was 0.05 mL (95% confidence), the detection sensitivity of 1 mL condensation was 98%, the pressure transient response time was 2 s, and the alarm rate was 100% when the flow channel pressure difference was greater than 1.5 MPa. Continuous 48-hour operation tests confirmed the cooling system stable health

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-03-26

Received: 2025-03-04; Revised: 2025-03-26

引文格式: 陈学文, 王以波, 柯昌燕, 等. 液冷系统多模态健康监测与动态评估方法[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 147-153.

CHEN Xuwen, WANG Yibo, KE Changyan, et al. Multi-modal Health Monitoring and Dynamic Evaluation Method for Liquid Cooling Systems[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 147-153.

scores ≥ 98 (standard deviation $\sigma=0.8$) and a heat dissipation efficiency decay rate $<0.8\%/24$ h. This research provides technical support for transitioning high-reliability liquid cooling systems from “post-failure maintenance” to “predictive maintenance”.

KEY WORDS: liquid cooling system; health management; multi-modal sensing; condensation detection; entropy weight method; dynamic evaluation

随着电子芯片单元面积的功率密度突破 200 W/cm^2 ^[1], 液冷系统已成为高可靠散热的主流方案^[2]。目前高集成度的电子设备机架, 广泛采用液冷设计架构, 以解决模块高热耗、高热流密度的散热需求^[3-5], 如图 1 所示。机架中出现凝露时, 位置隐蔽, 不易观察, 而机架中模块的液冷互联与电气互联密切, 一旦凝露蓄积成流动液体极易短路, 对设备的正常运行产生较大威胁^[6-7]。现有检测技术, 如人为观测法^[8-9]、光纤传感器检测法^[10-11], 受限于观测不便, 工程实施难度大, 难以实现。国内外学者 Billmann 等^[12]、王镛根等^[13]开始探索利用平衡法来测试管道泄漏出的液体, 但灵敏度不高, 少量液体难以检测。方丽萍等^[14]提出利用负压波法测试管道泄漏液体, 并总结了多种算法来提高检测概率, 但对微弱信号和静态信号的检测仍然难以实现。刘昕瑜等^[15]、马云栋等^[16]、孙凯杰^[17]提出利用声学方法来实现液体的检测, 但易受噪声干扰, 灵敏度不高, 且对某一范围的检测需布置多个测试点。柳亚格^[18]借助视频监控平台, 设计了基于动态检测和网络特征提取的少量液体检测系统框架, 准确率达 99%, 适用于动态液体的检测和可布置监控的场合。以上方法难以满足高集成液冷系统对凝露液体的监测需求。

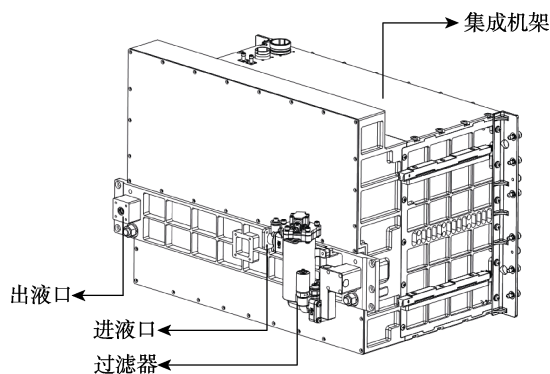


图 1 高集成度液冷机架
Fig.1 Highly integrated liquid cooling rack

考虑到液体流道堵塞、压力偏移和液体温度异常对系统散热功能带来的威胁^[19], 如何实现凝露-流道堵塞-压力-温度多物理场耦合的实时监测与健康评估, 成为制约液冷系统从“故障后维修”向“预测性维护”转型的关键挑战。为动态、全面地评价散热系统的运行状况, 及时上报异常, 提出一种液冷系统多模态健康监测与动态评估方法, 包含硬件架构设计、信号融合处理与健康评价模型, 并进行了实验验证。

本方法采用离子溅射镀膜工艺的液体感应传感器, 极大地提高了凝露检测限 (达 0.05 mL)。熵权法驱动的动态评估能够实时调整权重, 解决传统单参数阈值报警方法功能单一、工况适应性较差的缺陷。最后依据可解释的健康模型输出 $0\sim 100$ 量化评分, 支持运维决策透明化, 可依据系统结构及供液回路的特点, 对液冷散热系统实时监控, 保障设备健康安全运行。

1 多模态传感网络硬件架构设计

硬件架构设计如图 2 所示, 包括智能处理单元、传感器网络、液冷源等。智能处理单元搜集分布在液冷系统中的多模态传感数据, 实时追踪凝露蓄积量、流道压力变化、流道堵塞率及热交换效能。

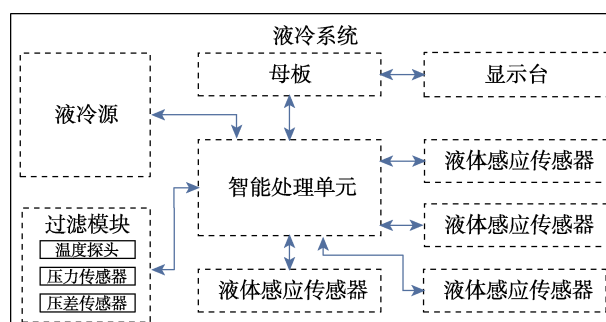


图 2 硬件架构设计
Fig.2 Hardware architecture design

1.1 液体感应传感器

通过对液体检测原理及应用情况进行分析, 利用接触式液体感应传感器, 与液体直接接触, 可降低误报的概率, 并实现少量液体的检测, 在凝露初期进行预警, 避免不必要的损失。线缆检测法是较为合适的检测方法, 其根据凝露蓄积而成的液体所引起的线缆阻抗变化来实施检测^[20-21]。普通感应线缆仅能检测到导电性较好的液体的阻抗稳态值, 不适用于机架环境和导电性能较差的凝露的检测, 同时对于其动态变化没有反映。需要找到阻抗随液体的变化规律, 对阻抗变化的过程进行跟踪, 及时判断出凝露蓄积的程度。专用感应线缆可检测有机溶剂、导电性能差的溶剂, 通过采用离子溅射镀膜电路的液体感应传感器制造工艺, 在基底薄膜或绝缘涂层整体表面形成可导电的双传导线路, 在绝缘涂层上设置相互贴合的粘贴层与保护膜层, 制成专用的液体感应传感器, 可实现对机

架某一区域凝露的连续检测。

液体感应传感器检测凝露的原理分为不包含末端连接器和包含末端连接器 2 部分。无末端连接器检测原理如图 3 所示, 无凝露时, 检测电阻 R_1 上的电压 $V_1=0\text{ V}$; 发生凝露, R_1 上的电压变为:

$$V_1 = \frac{R_1 V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

式中: V_{CC} 为供电电压; R_2 为液体阻值。依据多层级阈值, 可判断是否凝露, 且多点凝露检测也可实现, 但无法实现液体感应传感器接入检测功能。

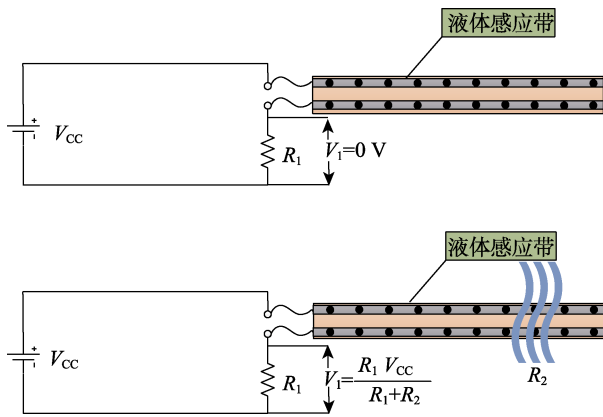


图 3 无末端连接器的凝露检测原理

Fig.3 Condensation detection principle without end connector

带末端连接器的检测原理如图 4 所示。无凝露发生时, R_1 上的电压为:

$$V_1 = \frac{R_1 V_{CC}}{R_1 + R_f} \quad (2)$$

式中: R_f 为末端连接器阻值。若液体感应带未接入, R_1 上的电压 $V_1=0\text{ V}$, 可据此实现传感器是否成功接入的检测功能; 当检测到凝露时, 液体感应带的阻值发生变化, R_1 上的电压发生变化:

$$V_1 = \frac{R_1 V_{CC}}{R_1 + R_2 \parallel R_f} \quad (3)$$

将电压变化值送入单片机, 与多层级电压阈值进行比较, 即可判断是否发生凝露, 并进行凝露报警。

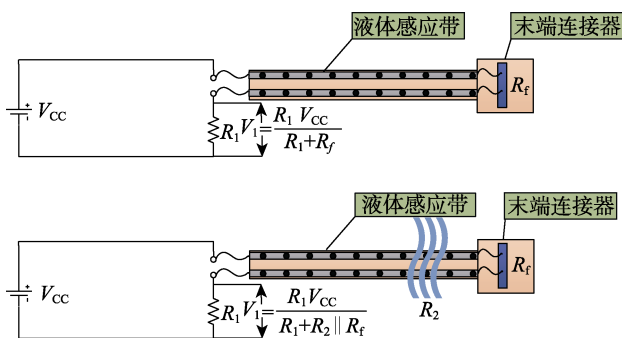


图 4 带末端连接器的凝露检测原理

Fig.4 Condensation detection principle with end connector

1.2 多模态传感器并联过滤模块

为区别传统单参数阈值报警方法带来的局限性, 如系统运行动态响应迟缓、参数检测灵敏度低等^[22], 需构建多模态传感器监测网络, 综合多维度数据, 形成丰富可靠的数据集, 依据综合评价标准, 动态地反映系统的运行状况^[23]。压力、压差传感器、温度探头采用传感器多级并联形式, 形成集成式过滤模块, 同步监测热力-流体力耦合效应, 实现杂质过滤、温度测量、压力测量、堵塞报警等功能, 如图 5 所示。过滤模块入口设计有压力传感器和温度传感器, 对系统压力和温度值进行监测。过滤模块采用 3 个滤芯并联的原理, 尽可能地增大过滤面积和流通能力。压差传感器用于监测滤芯的污染度情况, 当滤芯过滤前后的压差达到 0.15 MPa 时, 压差传感器报警, 并在过滤模块表面进行指示灯显示。

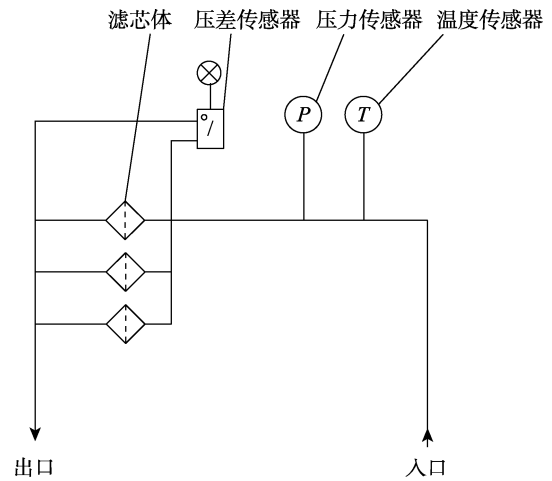


图 5 过滤模块原理

Fig.5 Filter principle

1.2.1 温度传感器

选用具备 0.3% 非线性度和 $-55\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温度敏感范围的 PT1000 铂电阻温度探头作为温度传感器。为减小电压对输出量的影响, 检测电路采用恒电压型温度检测电路, 其原理如图 6 所示。

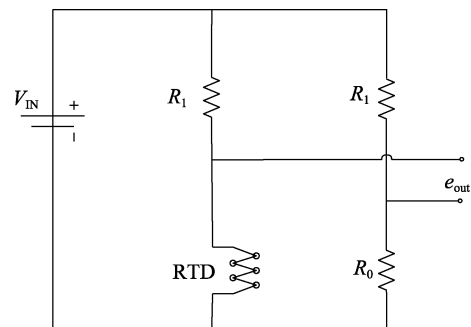


图 6 恒电压型温度检测电路原理

Fig.6 Principle of constant voltage temperature detection circuit

恒电压型温度检测电路的输出电压与温度传感器阻值的变化 ΔR 呈线性关系。在 R_1 和 R_0 确定后, 根据输出电压 e_{out} 的变化范围, 确定 R_1 的阻值。电流流过铂电阻引起铂电阻温度升高带来的测量误差, 通过减小 e_{out} 的电压和选取适当的 R_1 的阻值消除。 e_{out} 的电压由参考电压 V_{IN} 和 R_0/R_1 的值共同决定, 因此选择输出电压比较低的参考电压, 同时降低 R_0/R_1 的值。电路中铂电阻引线引入的测量误差, 通过在电桥支路中串入与引线电阻阻值相当的电阻消除。

1.2.2 压力传感器

压力传感器安装在供液回路中, 将 0~2 MPa 的绝对压力信号转化为 1~4.8 V 的模拟电压信号, 以对散热系统流道内液体的压力偏移实时监测。考虑到单片机 AD 口采样的最大电压值为 3.3 V, 使用分压电路转化为 0.68~3.3 V 的输入电压信号, 将压力信号与电压信号两者范围对应后, 根据得到的电压信号即可准确地测得压力大小。

1.2.3 压差传感器

过滤模块报警压差为 0.15 MPa。当杂质污染堵塞供液回路时, 过滤模块在液体过滤前后的压差 > 0.15 MPa, 给出开关信号, 输出 +5 V 高电平报警信

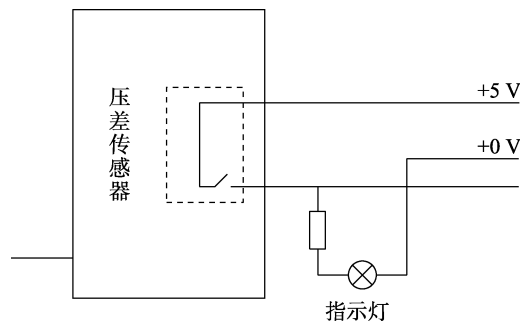


图7 压差传感器堵塞报警原理

Fig.7 Blocking alarm principle of differential pressure sensor

号 (如图7所示), 分压后输出 +3.3 V。

1.3 智能处理单元

智能处理单元的功能组成如图8所示, 其检测电路由单片机、以太网芯片、DC-DC 电源、信号调理电路、电源检测芯片、基准电压源等组成。分布式传感器网络检测到的凝露信号、温度、压力参数和流道堵塞状态, 经过信号调理电路后, 转化为模拟信号或高电平输入单片机。在单片机内部进行软件滤波、多模态数据综合处理后, 通过网络实时将散热系统动态信息上报给系统。

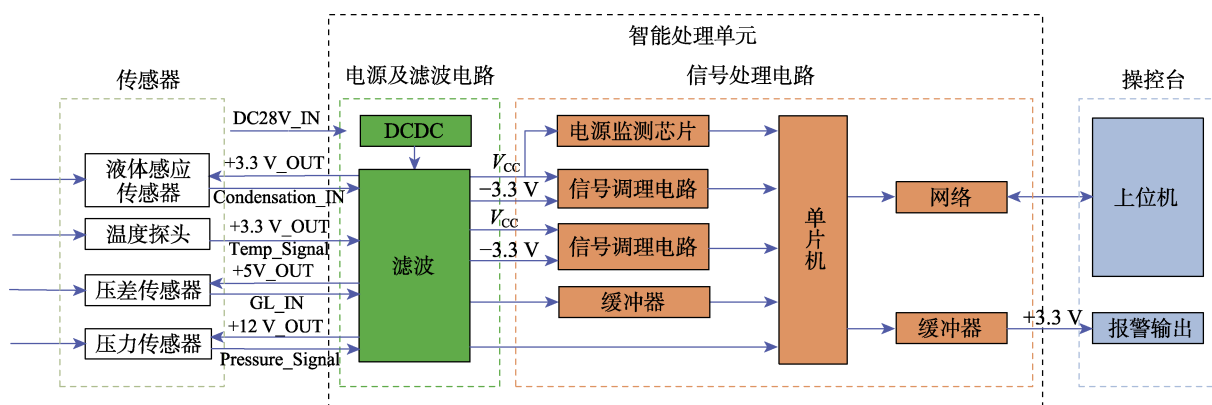


图8 智能处理单元功能组成

Fig.8 Functional composition of intelligent processing unit

1.3.1 液体感应电路设计

传感器输入的凝露信号实际为液体感应传感器阻值的变化, 通过分压比较和滤波即可输出模拟信号, 但考虑到发生凝露时电路的工作电流较小 (在 μA 级别), 需使用放大器对电流进行放大。电流放大电路采用仪表放大器 ZSAD620TS, 该芯片主要用于放大输入电流, 增强传感器输入模拟量的可检测性^[24]。

放大器电路主要误差有 2 种, 包括增益误差、电压失调误差。其中, 增益误差最大值为 0.5%, 带来的误差为 0.016 5 V。ZSAD620TS 在 3.3 V 供电情况下的失调电压为 13.57 μV 。在基准电源输出选择为 3.3 V 的情况下, 凝露检测误差最大为 0.5%。

1.3.2 多模态传感器电路设计

温度传感器采集得到的信号具有浮动性, 会造成一定程度的失真。采样信号的调理电路采用差动放大电路, 其具有较好的共模抑制比, 可大大降低浮接性电压信号带来的影响。惠斯登电桥产生的信号电压幅度较小, 同时会放大电路中电阻等因素的误差, 为输出单片机采样需要的标准 0~3.3 V 模拟量电压, 差动放大电路设计成增益可调。信号调理电路选用带 T 形反馈的放大电路, 对共模抑制比的增益调整影响极小。

在恒电压型温度检测电路中, 温度传感器供电电源的变化直接影响检测电路输出的电压。电路选择

3.3 V 电压基准源, 在 85 °C 的极限工作温度下, 电压波动幅度控制在 $\pm 0.2\%$, 带来的温度误差最大为 0.17 °C。放大器误差包括最大 0.5% 的增益误差、0.3% 的非线性误差, 约为 0.68 °C。单片机的模拟输入精度可做到 10 位。AD 采集误差带来的温度误差最大为 0.083 °C。因此, 最大温度误差约为 0.933 °C。

压力传感器输出的电压变化范围为 1~4.8 V, 分压后在 AD 采样可允许的 0.68~3.3 V, 对应 0~2 MPa, AD 采集误差带来的压力误差最大为 1.95 kPa。传感器测量精度为 $\pm 0.5\%$, 因此最大压力误差为 11.95 kPa。

过滤模块的输出信号为 0、5 V, 分压后输出 0、3.3 V, 滤波后输入到电平转换器。

1.3.3 主控及报警电路设计

单片机芯片采用 32 位微控制器电路, 丰富的外设, 2 个 12 位的高速 ADC, 可实现高精度模拟信号采集, 单片机芯片自带 80 通道的通用输入输出口, 可实现数字信号的输入输出。

网络通信电路使用千兆以太网收发器 PHY 芯片实现 MII 信号转化, 该芯片默认工作模式为 MII->SGMII, SGMII 通过母板连接器连接到系统的交换网络上, PHY 芯片可通过 MDIO (Management Data Input/Output) 配置为 MII->Copper, 经由调试转接板, 进行单模块的网络调试。

电平转换电路采用电平转换器, 凝露报警时输出 3.3 V 电平, 具备最大 50 mA 驱动能力, 可驱动报警灯。

2 信号融合处理与健康评价模型

为动态评估散热系统的运行态势, 需要结合多模态传感器数据, 对信号进行融合处理, 提出一种基于熵权法^[25]的模糊综合评价模型, 即液冷系统健康综合评分模型 (Health Integrated Scoring Model for Liquid Cooling Systems, HIS-LC):

$$\text{HIS-LC} = 100 \times \sum_{j=1}^4 \omega_j T_{ij} \left(\sum_{j=1}^4 \omega_j = 1 \right) \quad (4)$$

其中, HIS-LC 的量化评分在 0~100 标度, 权重系数 ω_j ($j=1, 2, 3, 4$) 通过信息熵 E_j 动态调整, 信息熵 E_j 为模态参数 j 的熵值:

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^4 (1 - E_j)} \quad (5)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

低熵值 (即 $E_j \rightarrow 0$): 参数数据分布集中, 不确定性低, 权重 ω_j 增大; 高熵值 (即 $E_j \rightarrow 1$): 参数数据分散, 不确定性高, 权重 ω_j 降低。当某一参数 (如

温度) 因环境干扰产生异常波动时, 其信息熵 E_j 升高, 权重 ω_j 自动降低, 减少瞬时波动对健康评分的负面影响。反之, 若参数数据稳定, 如压力信号噪声低, 信息熵 E_j 降低, 权重 ω_j 增大, 强化其决策贡献。增强系统的适应性, 避免干扰、采集误差、环境波动等因素导致系统评分剧烈波动。其中, p_{ij} 为第 j 个传感器参数在 i 时间段的数值比重, m 为时间段总数:

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^m T_{ij}} \quad (7)$$

T_{ij} 为模态参数归一化后的数据。该模型采用近邻聚类的方法对多模态参数进行聚类, 获得信号的典型特征, 建立评估指标集, 并采用熵权法动态调整信息熵的权重系数, 对液冷系统健康程度综合评估。

3 实验验证

为验证凝露检测性能和系统稳定性, 在某型液冷测试机架上构建分布式多物理场监测网络, 利用智能处理单元实时监测上报。

3.1 凝露检测性能

在温湿度可控的环境舱 ($(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, $(85 \pm 3)\%\text{RH}$) 中进行了空白实验和凝露生成实验, 某时间段机架内部凝露情况如图 9 所示。

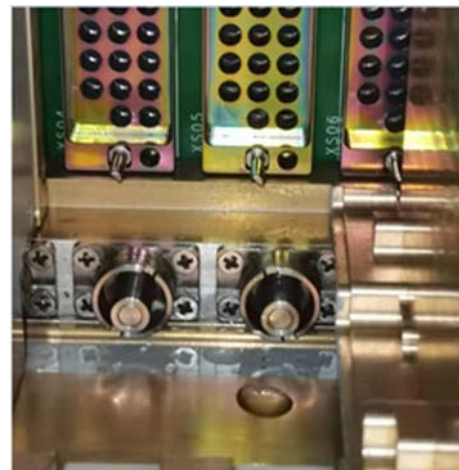


图 9 凝露测试
Fig.9 Condensation test

空白实验: 在环境舱内进行 200 次无凝露测试。

凝露生成实验: 采用微量注射泵 (精度为 $\pm 0.01 \text{ mL}$) 在液冷机架底部传感器覆盖区域滴加凝露, 模拟实际工况中凝露的随机分布特性, 20 个位置独立测试 10 次, 共 200 次实验。

将实验数据整理为 2×2 列联表, 见表 1。由于凝露检测依赖液滴与传感器接触, 检测概率受位置影响, 采用概率统计方法定义检测限。原假设 (H_0) 与备择假设 (H_1) 如下。

表1 凝露测试对比实验数据
Tab.1 Comparative test data for condensation detection

实验	报警成功	未报警
空白实验	1	199
0.05 mL 凝露	28	172

H_0 : 凝露组的报警率 $\leq$ 空白实验组的误报率 ($P_{\text{det}} \leq P_{\text{noise}}$);

H_1 : 凝露组的报警率 $>$ 空白实验组的误报率 ($P_{\text{det}} > P_{\text{noise}}$).

采用 Fisher 精确检验(单侧), 计算得到 $p=0.000\ 2$, 远小于显著性水平 0.05。拒绝原假设 ($P_{\text{det}} \leq P_{\text{noise}}$), 接受备择假设 ($P_{\text{det}} > P_{\text{noise}}$)。实验结果支持 0.05 mL 作为检测限, 其报警率 14% 具有统计显著性。

采用 Clopper-Pearson 精确法, 计算得到 0.05 mL 凝露的报警率 14% 的 95% 置信区间为 9.7%~19.6%, 即真实报警率有 95% 的概率在 9.7%~19.6%。空白实验误报率 0.5% 的 95% 置信区间为 0.01%~2.7%。检测限的报警率置信区间与噪声误报区间的无重叠性, 0.05 mL 的报警率下限 (9.7%) 远高于误报率上限 2.7%, 证明检测信号显著, 表明 0.05 mL 检测限在 95% 置信度下有效。

与采用其他方法的测试结果对比见表 2, 其他方法用于检测非凝露液体, 实际凝露导电性弱, 更不容易检测。测试结果表明, 本方法凝露检测限可达 0.05 mL (置信度 95%), 1 mL 凝露检测灵敏度达 98%, 响应时间优于 0.9 s, 相对于其他方法具备突出优势。

表2 测试数据
Tab.2 Test data

方法	液体检测限/mL	1ml 液体检测灵敏度/%	响应时间/s
本方法	0.05	98	0.9
声学法 ^[16]	0.8	87.76	\
光纤法 ^[10]	\	\	3.5

3.2 系统稳定性

健康评分: 48 h 连续运行中, HIS-LC $\geq$ 98 (标准差 $\sigma=0.8$), 表明系统健康状态始终接近最优, 反映了多模态传感网络与熵权法的协同有效性。

散热功能: 散热效率衰减率 $<0.8\%/24\text{ h}$ 。

压力突变响应: 阶梯加压测试 (0 $\rightarrow$ 2 MPa), 40 kPa 为间隔, 重复测试 50 次, 响应时间均值为 2.0 s (标准差 $\sigma=0.2\text{ s}$), 超调量 $<3\%$ 。

堵塞响应: 重复 20 次模拟堵塞, 流道压差大于 1.5 MPa 时的报警率为 100%。

4 结语

面对电子设备高集成化、高功率化的发展趋势,

以事后维修和定期维护为重心的传统保障工作已无法很好地满足现代战争和装备保障要求, 将逐渐转变为以信息获取、处理、传输并做出维修决策为主的健康管理方向。本研究通过多模态传感融合与动态健康评价模型, 实现了液冷系统状态监测从“阈值报警”到“量化评估”的跨越, 对散热系统的动态特性实时响应, 对凝露、回路堵塞等异常状况的及时上报, 可为高可靠性液冷系统的故障预警与健康管理工作提供新的技术路径。未来工作将拓展极端环境测试 (如 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温、 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温、RH $>95\%$ 高湿), 并开展外场试验, 进一步验证工程适用性。

参考文献:

- [1] 祝涵睿. 基于取向性石墨烯骨架结构的热界面材料传热性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZHU H R. Study on Heat Transfer Performance of Thermal Interface Materials Based on Oriented Graphene Skeleton Structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [2] 白茹, 李定坤, 郭曼利. 国内外机载电子设备液体冷却系统分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 73-79.
BAI R, LI D K, GUO M L. Liquid Cooling System for Airborne Electronic Equipment at Home and Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 73-79.
- [3] 朱春玲, 宁献文. 用于机载大功率电子设备新型液冷环控系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 203-207.
ZHU C L, NING X W. Liquid Cooling System for High-Powered Avionics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 203-207.
- [4] 叶发亮, 陈光杰, 何威. 基于 ASAAC 标准模块的机载液冷机架的热设计[J]. 电子机械工程, 2014, 30(5): 7-12.
YE F L, CHEN G J, HE W. Thermal Design for an Airborne Rack Based on ASAAC Standard Module[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2014, 30(5): 7-12.
- [5] 白宗旭, 张铜, 潘威. 基于 FloEFD 的某机载液冷机架流阻研究[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(15): 7-9.
BAI Z X, ZHANG T, PAN W. Study on FloEFD-Based Flow Resistance of an Airborne Liquid Cooling Rack[J]. Technology Innovation and Application, 2019, 9(15): 7-9.
- [6] 赵俊. 某型相控阵雷达电源失效分析[J]. 航空维修与工程, 2021(10): 41-44.
ZHAO J. Analysis on Power Supply Failure for a Certain Type of Phased Array Radar[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(10): 41-44.
- [7] 程建, 刘钰, 张瀚文, 等. 航天组件级单机热循环试验过程防凝露试验技术探讨[J]. 环境技术, 2020, 38(6): 26-29.
CHENG J, LIU Y, ZHANG H W, et al. Discussion on Anti-Condensation Test Technology during the Thermal Cycling Test on Components of the Aerospace Craft[J].

- Environmental Technology, 2020, 38(6): 26-29.
- [8] 王海生, 张布悦, 王桂增, 等. 输油管道实时泄漏监测系统的设计与应用[J]. 油气储运, 2001, 20(12): 17-22.
WANG H S, ZHANG B Y, WANG G Z, et al. The Design and Application of a Computer-Based Leak Detection and Location System for Oil Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(12): 17-22.
- [9] 林鹏. 城市排水管道泄漏检测技术现状及未来发展新见解[J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 926-935.
LIN P. Present Situation and Future Development of Leak Detection Technology for Urban Drainage Pipelines[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(S1): 926-935.
- [10] 张峰, 崔永俊, 侯钰龙. 基于 STM32 的光纤侧向耦合漏液监测系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(10): 156-161.
ZHANG F, CUI Y J, HOU Y L. Design of Optical Fiber Lateral Coupling Leakage Monitoring System Based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(10): 156-161.
- [11] 蔡昌新, 易康, 廖锐全. 长输油管道泄漏检测与定位技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10177-10189.
CAI C X, YI K, LIAO R Q. Research Progress on Leak Detection and Location Technology for Long-Distance Oil Pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(24): 10177-10189.
- [12] BILLMANN L, ISERMANN R. Leak Detection Methods for Pipelines[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1984, 17(2): 1813-1818.
- [13] 王镛根, 曹菁, 夏红云. 液体管道小泄漏检测和定位[J]. 信息与控制, 1988, 17(4): 24-27.
WANG Y G, CAO J, XIA H Y. Detection and Location of Little Leakage in Fluid Pipeline[J]. Information and Control, 1988, 17(4): 24-27.
- [14] 方丽萍, 李玉星, 刘翠伟, 等. 气液管道泄漏检测及信号处理技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 26-34.
FANG L P, LI Y X, LIU C W, et al. Multiphase Leakage Detection and Leakage Signal Processing Technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 26-34.
- [15] 刘昕瑜, 郭颖, 赵宇. 基于 TMS320 的在线管道泄漏检测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(6): 129-133.
LIU X Y, GUO Y, ZHAO Y. Design of Online Pipeline Leakage Detection System Based on TMS320[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(6): 129-133.
- [16] 马云栋, 董绍华, 徐晴晴, 等. 被动声学液体管道微泄漏内检测方法研究[J]. 中国测试, 2023, 49(10): 19-26.
MA Y D, DONG S H, XU Q Q, et al. Study on Internal Detection Method of Small Leakage in Liquid Pipeline Based on Passive Acoustics[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(10): 19-26.
- [17] 孙凯杰. 基于 TMS320VC5402 的供水管道泄漏检测定位系统设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
SUN K J. Design and Implementation of Water Supply Pipeline Leakage Detection and Location System Based on TMS320VC5402[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [18] 柳亚格. 基于动态检测和网络特征提取的液体微泄漏检测[D]. 天津: 天津大学, 2021.
LIU Y G. Liquid Micro-Leakage Detection Based on Dynamic Detection and Network Feature Extraction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [19] 贾丽姣, 左向梅, 邱勇. 试验机改装中液冷系统的常见故障及排除方法[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(1): 161-163.
JIA L J, ZUO X M, QIU Y. Common Faults and Troubleshooting Methods of Liquid Cooling System in Experimental Aircraft Modification[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(1): 161-163.
- [20] 税爱社, 陈伟民, 方卫红, 等. 基于分压补偿的传感电缆泄漏检测精确定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 332-337.
SHUI A S, CHEN W M, FANG W H, et al. Leak Detection and Accurate Localization Method for Sensing Cable Based on Share Voltage Compensation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 332-337.
- [21] 付保川, 陆卫忠, 刘文亮, 等. 液体泄漏检测与定位的一种新方法[J]. 传感器技术, 2005, 24(11): 21-23.
FU B C, LU W Z, LIU W L, et al. Novel Method of Liquid Leak Detection and Location[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(11): 21-23.
- [22] 马德胜, 庞丽萍, 毛晓东, 等. 机载综合环控系统的管理[J]. 化工学报, 2020, 71(S1): 436-440.
MA D S, PANG L P, MAO X D, et al. Thermal Management of Airborne Integrated Environmental Control System[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1): 436-440.
- [23] 殷文慧, 郭栋, 王飞, 等. 面向小型无人艇健康监测系统方案设计与实施[J]. 装备环境工程, 2023, 20(9): 160-168.
YIN W H, GUO D, WANG F, et al. Scheme Design and Implementation for Health Monitoring Systems of Small Unmanned Surface Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(9): 160-168.
- [24] 窦如凤, 井娥林. 基于 AD620 的微弱信号放大器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(3): 45-47.
DOU R F, JING E L. Design of Weak Signal Amplifier Based on AD620[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(3): 45-47.
- [25] 褚双磊, 魏志强, 任强, 等. 基于 AHP-熵权法的民用飞机运行需求模糊综合评价[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(4): 362-369.
CHU S L, WEI Z Q, REN Q, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Civil Aircraft Operational Requirement Based on AHP-Entropy Method[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2021, 35(4): 362-369.