

基于 PHM 的自动气象站健康评价 与故障预判方法研究

李文博, 李宛桐, 史静, 姜明, 崔明

(天津市气象探测中心, 天津 300061)

摘要: 针对自动气象站建设和应用规模大、运行监控手段单一、维护保障成本较高的现状, 首次将 PHM 技术理念应用于自动气象站的运维管理之中; 采用层次分析法通过构造判断矩阵、专家打分、确定权重从而以“健康值”的形式对自动气象站综合健康状态进行评价; 通过对状态信息与历史极值、故障信息进行判断, 提出了一种对自动气象站供电和通信故障“两级告警”的预判方法; 通过开发软件系统实现了健康评价和故障预判方法的应用, 能够较为合理地量化自动气象站健康状态、对疑似故障发出及时告警; 该方法丰富了自动气象站运行监控方法, 减少了故障的排除诊断与修复时间, 同时也为 PHM 技术在气象探测设备中的应用提供了思路。

关键词: PHM; 自动气象站; 健康评价; 故障预判; 运行维护

Research on Health Evaluation and Fault Prediction of AWS Based on PHM

LI Wenbo, LI Wantong, SHI Jing, JIANG Ming, CUI Ming

(Tianjin Meteorological Observation Centre, Tianjin 300061, China)

Abstract: Aiming at the problems of large-scale construction and application, single operation monitoring means and high maintenance support cost in the automatic weather station (AWS). The technology of the prognostics and health management (PHM) is firstly applied to the operation and maintenance management of AWS. Analytic hierarchy process is used to evaluate the AWS health status of constructing judgment matrix, scoring by experts and determining weight in the form of health value. A two-level alarm prediction method for the power supply and communication fault of the AWS is proposed by judging the status information, the historical extreme value and fault information. Through the developing software system, the health evaluation and fault prediction method is realized, which can reasonably quantify the health status and give timely alarm to the suspected faults. This method enriches the operation monitoring of the AWS, reduces the troubleshooting, diagnosis and repair time, and also provides an idea for the application of the PHM technology in meteorological observing equipment.

Keywords: PHM; AWS; health evaluation; fault prediction; operation and maintenance

0 引言

我国是自然灾害多发的国家之一, 各类灾害给人民生命和财产造成了巨大损失^[1-2]。自动气象站遍布街道、乡镇、山区、湖泊, 是地面气象观测站网的重要组成部分, 在气象预报预警和防灾减灾服务等方面发挥着关键作用^[3-4]。站点大规模建设的同时对运行维护和技术保障工作提出了前所未有的考验与挑战^[4]。由于站点受设备质量、站点环境、保障能力等影响, 其系统性能、故障损耗、设备状态等难以及时地全面掌握, 无法对设备运行状况做出综合性的客观评价。此外, 随着站点使用年限增加, 各类故障出现频次逐年上升, 在站点基数较大、保障人力物力有限的情况下, 运行维修成本不断增加。仅以天津市统计

数据为例, 全市区域自动气象站每年平均发生故障 350 余站次, 维护维修消耗备件 330 余件次, 维护维修年行车里程超过 11 万公里。

根据国家气象部门气象装备未来业务发展规划, 预防性运维将成为今后的主要研究方向和维护方式, 在降低气象观测数据缺失风险的同时, 及时发出故障预警、准确定位设备故障, 降低运维成本。故障预测与健康管理的 PHM (prognostics and health management) 技术理念与自动气象站运行管理与技术保障具有较好的兼容性, 它是指利用各种传感器, 广泛获取设备的状态信息, 借助各种智能算法评估设备本身的健康状态并对故障的发展进行预测^[5]。近年来, 我国 PHM 技术研究在关键技术、智能故障诊断及预

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-02-07。

基金项目: 天津市气象局科研项目(202118dgx06)。

作者简介: 李文博(1986-), 男, 河北乐亭人, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象探测设备与计量技术方向的研究。

引用格式: 李文博, 李宛桐, 史静, 等. 基于 PHM 的自动气象站健康评价与故障预判方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 256-263, 276.

测算法方面都有了研究和应用^[6], 诸多相关研究课题被列入“863” 发展计划^[7-9]。国内在 PHM 技术研究和应用方面当前处于技术探索阶段^[10]。PHM 技术理念与自动气象站运行管理与技术保障具有较好的兼容性, 具备开展深入研究的技术条件。目前基于 PHM 的自动气象站方面相关研究开展不多, 仅有程永明等^[11]基于 GIS 和天气实况及预报分析出天气等外部环境引起的可能出现故障的站点, 在一定程度上解决了站点维修的滞后性, 但该方法较为依赖 GIS 数据和天气预报的准确性, 且数据更新存在缺陷, 局限性较强。此外未查阅到其它学者在该方面的研究成果。

针对自动气象站提出一种基于 PHM 的站点健康评价和故障预判方法, 该方法的创新点在于: 一是以“健康值”作为综合指标反映自动气象站当前运行状态, 运用层次分析法将诸多定性问题量化处理, 直观体现站点的“健康”程度; 二是利用自动气象站状态信息进行故障预判, 对其中心电源和通讯状态数据进行整理与分析, 为供电和通讯故障的预防性运维提供技术支撑, 也为自动气象站未来故障预测技术研究与发展提供借鉴思路。

1 总体方案

自动气象站的健康评价与故障预判分别以实现站点的直观量化健康状态评估结果和及时故障预判告警为目标, 基于现有站点的各类数据信息通过相应方法实现上述功能。其中健康评价方法以站点固有属性、运行监控数据、维护维修信息、站点故障信息为基础, 通过层次分析法确定各相关因子的权重, 最终计算得到站点的“健康值”; 故障预判方法根据站点运行监控信息和故障信息, 结合历史极值设置告警阈值实现供电和通讯故障的及时预判。方法的整体方案和主要流程如图 1 所示。

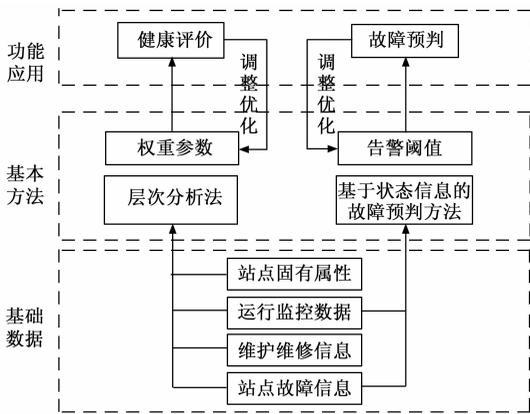


图 1 总体方案和流程

2 健康评价方法

2.1 健康评价体系的构建

目前, 国内尚未对自动气象站开展健康评价的研究与应用, 依照“量化评估、直观展现、尽量客观”的理念, 按照层次分析法的基本思路^[12-14], 将综合评价的影响因素按互相支配、隶属的关系分成不同层次, 用线段将下层因素和上层有隶属关系的属性联接, 将指标聚合成有序的递

阶层次结构。通过收集、整理有关文献资料, 并结合长期自动气象站建设和维护工作经验, 对影响站点健康状况的关键因素进行了集中梳理和整合, 将自动气象站健康评价指标体系分为四层: 目标层 A、准则层 B、准则层 C 和指标层 D, 如图 2 所示。基于此框架, 自动气象站健康评价的思路如下: 首先, 根据层次分析法计算各层之间各因子所占的权重系数; 其次, 根据设备特点、环境状况等条件建立评级因子等级划分标准; 再次, 根据等级划分标准和权重系数, 计算各层评价分数; 最终得到以“健康值”为表征的站点综合健康评价指标。

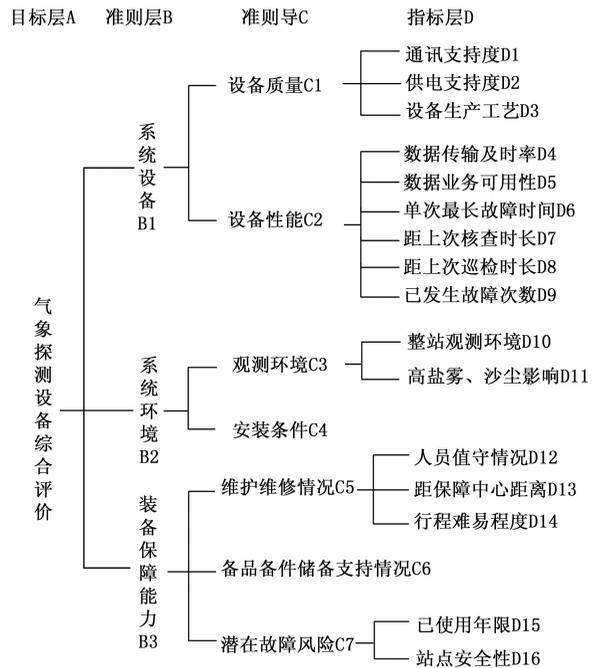


图 2 自动气象站健康评价体系层次结构图

2.2 构造判断矩阵

判断矩阵表示上一层次的某一因素与本层次有关因素之间相对重要性的比较。如对某一准则, 对其下的方案进行两两比较, 按其重要性程度评定等级 (一般为 9 个比例标度), 两两比较结果构成的矩阵称之为判断矩阵。判断矩阵的构成是层次分析法的关键一步, 通常通过专家咨询完成。为保证判断矩阵构造的合理性, 我们在全国范围内甄选了 11 位相关专家进行了综合评价打分, 专家范围包括国家级、省级业务技术和管理专家, 以及仪器设备生产厂家及维保单位技术骨干。表 1~表 3 展示了其中一位专家目标层 A、准则层 (系统设备 B1)、准则层 (设备质量 C1) 判断矩阵示例。

表 1 B1、B2、B3 满足 A 判断矩阵

A	B1	B2	B3
B1	1	1/7	1/5
B2	7	1	5
B3	5	1/5	1

表 2 C1、C2 满足 B1 判断矩阵

B1	C1	C2
C1	1	1/5
C2	5	1

表 3 D1、D2、D3 满足 C1 判断矩阵

C1	D1	D2	D3
D1	1	1/2	1/7
D2	2	1	1/7
D3	7	7	1

2.3 权重值计算

由全部专家打分，将评价体系指标进行逐层递阶两两比较得到成对比较矩阵，再计算出每位专家对评价模型指标的权重值，即计算判断矩阵每一行元素乘积的 n 次方根，然后归一化求解出判断矩阵最大特征值 λ_{max} 和特征向量 W ，特征向量 W 即为该层权重。

2.4 一致性检验

层次分析法的主要优点是将决策者的定性思维过程定量，所以在模型化过程中必须保持判断矩阵的逻辑一致性。一致性检验的步骤为：计算一致性指标 CI 、确定相应的平均随机一致性指标 RI 、计算一致性比率 CR 。当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的；反之，认为判断矩阵不符合一致性要求，需要对该判断矩阵进行重新修正。

上述示例中，准则层 B 权重向量 W 及一致性检验 CR 计算结果见表 4。最大特征值 $\lambda_{max} = 3.0126$ ，一致性检验 $CR = 0.01086 < 0.1$ 。

表 4 B-A 判断矩阵及层次排序结果表

A	B1	B2	B3	W	排序
B1	1	1/7	1/5	0.078	3
B2	7	1	5	0.487	1
B3	5	1/5	1	0.435	2

计算指标层 D 对应目标层 A 的组合权重，则可以分析各指标对总目标的影响大小。上述示例中，D1、D2、D3 的组合权重向量 W_{D_i-A} ($i=1, 2$) 为该路径上相关向量的乘积，计算结果见表 5。

表 5 D1、D2、D3 对应目标层组合权重值表

W_{D1-A}	W_{D2-A}	W_{D3-A}
0.0011	0.0018	0.0101

2.5 “健康值”计算

健康值是反映探测设备运行状态的综合指标，与准则层和指标层息息相关。在计算其大小时，其相关指标必须是可量化的。为此，选取 D1~D16 及 C4 和 C6 作为健康值的相关因子，其等级划分标准、分支和对应权重如表 6 所

示，其中，权重通过 2.3 节所述方法计算得到，分值在分析相关因子对实际业务影响程度的基础上由专家讨论得出。

表 6 相关因子等级划分标准

影响因素	相关因子	分类条件	权重	分值
系统设备 B1	通讯支持度 D1	4G 信号强 4G 信号弱	0.01	1 0
	供电支持度 D2	供电系统完善 供电系统不完善	0.01	1 0
	设备生产工艺 D3	气象装备使用许可证 无	0.03	1 0
	数据传输及时率 D4	0~5 min(含 5 min)到报 5~10 min(含 10 min)到报 10~15 min(含 15 min)到报 15 min 以上到报	0.01	1 0.75 0.5 0
	数据业务可用性 D5	24 h 业务可用性	0.01	
	单次最长故障时间 D6	0 h 0~12h(含 12h) 12~24h(含 24h) 24~36h(含 36h) >36h	0.01	1 0.75 0.5 0.25 0
	距上次核查时长 D7	<1 年(含 1 年) >1 年	0.02	1 0
	距上次巡检时长 D8	<1 个月(含 1 个月) >1 个月	0.02	1 0
	已发生故障次数 D9	1 个月内 0 次 1 个月内 <2 次(含 2 次) 1 个月内 >2 次	0.02	1 0.5 0
系统环境 B2	整站观测环境 D10	良好 存在问题	0.02	10
	高盐雾、沙尘影响 D11	不存在 存在	0.06	1 0
	安装条件 C4	有利 不利	0.23	1 0
装备保障能力 B3	人员值守情况 D12	有 无	0.01	1 0
	距保障中心距离 D13	车程 <1 h(含 1 h) 车程 >1 h	0.02	1 0
	行程难易程度 D14	易 难	0.03	1 0
	备品备件储备支持情况 C6	支持 不支持	0.17	1 0
	已使用年限 D15	<1 年(含 1 年) 1~3 年(含 3 年) 3~5 年(含 5 年) >5 年	0.10	1 0.75 0.5 0
	站点安全性 D16	是 否	0.22	1 0

从而建立起“健康值”与相关因子的关系模型，如公式 (1) 所示：

$$S = 100 \times \sum_{i=1}^k (W_{DFA} x_i) \quad (1)$$

式中, S 为设备的“健康值”, k 为相关因子的个数 (在本文体系中为 18), W_{DFA} 为相关因子的权重, x_i 为相关因子的分值。

3 供电和通讯故障预判方法

3.1 供电类故障分析与预判方法

供电系统是整个站点正常工作的“源动力”。目前天津市自动气象站均采用蓄电池供电的方式, 与市电供电方式相比, 其稳定性较差^[11], 依赖于太阳能板和蓄电池的产品质量和性能, 且与所处位置和天气情况相关。

根据工作经验, 供电系统故障主要表现为以下几类:

- 1) 太阳能板受外界影响 (长时间阴天或雾霾、异物遮挡等) 无法为蓄电池正常充电;
 - 2) 太阳能板损坏无法为蓄电池正常充电;
 - 3) 蓄电池故障 (一般为电池老化, 内阻过大、电池容量降低等);
 - 4) 主板供电模块故障导致无法为蓄电池正常充电;
 - 5) 供电系统线路故障;
 - 6) 自动站部分部件损坏异常耗电。
- 经初步统计, 近年来造成站点供电系统出现故障的最主要原因: 1) 连续数日雾霾或阴天导致太阳能板充电电压不足, 蓄电池充电少、放电多, 最终亏电无电流输出; 2) 蓄电池正常老化, 性能衰减, 充放电能力不足导致亏电无电流输出; 3) 异物遮挡太阳能板导致无法充电。

从供电系统技术指标来看, 根据目前能够掌握的自动气象站状态数据信息, 能够反映供电系统是否正常工作的状态信息有: 蓄电池电压、蓄电池放电电流、太阳能板充电电压。3 类状态信息与上文所述 6 种故障状态一一对应, 具体如图 3。

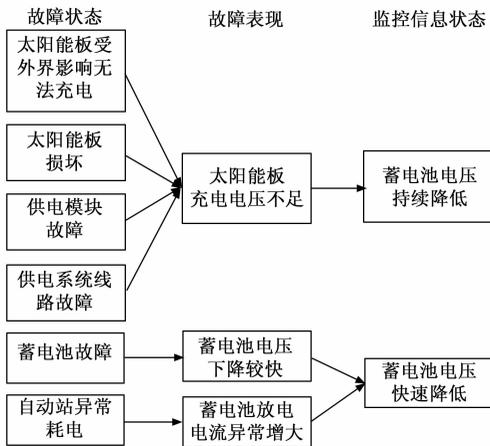


图 3 供电系统故障表现与状态信息对应情况

通过图 3 可见, 供电系统状态信息中蓄电池电压是决定能够为自动站正常供电的决定性因素, 而太阳能板充电电压和蓄电池放电电流是导致蓄电池电压异常的原因。因此, 供电系统故障的预判可通过“两级预判”的形式开展, 即: 第一级预判为判断太阳能板充电电压、蓄电池满电电压和蓄电池放电电流是否正常, 第二级预判判断蓄电池电

压是否达到预警阈值。第一级预判对应“关注告警”, 说明供电系统在一定程度上或在某些方面存在问题, 需向运行监控人员发出提示并持续关注; 第二级预判对应“风险告警”, 说明电池在正常使用情况下可能很快到达电压临界并结束供电, 需保障人员及时赴现场处理。根据上述思路, 对 3 种供电系统状态信息进行查询统计计算分析, 结合相关文献及技术手册确定两级预判的阈值。

1) 太阳能板充电电压告警阈值: 太阳能板充电电压取决于所处位置的光照环境, 主要因素为白天和黑夜, 白天光照较为充足, 太阳能板输出电压持续较高, 不断为蓄电池补充电能; 傍晚太阳落山光线减少, 输出电压迅速降低; 夜间零光照情况下太阳能板仅由于连接负载而产生的 5 V 电压; 清晨太阳出来后, 光线逐渐增加, 输出电压迅速增大。由于全年四季日照时长不同, 为了明确区分正常充电时段、非充电时段及过度时段, 计算了 50 个站点历史数据各整点时次太阳能板输出电压的平均值, 如图 4 所示。

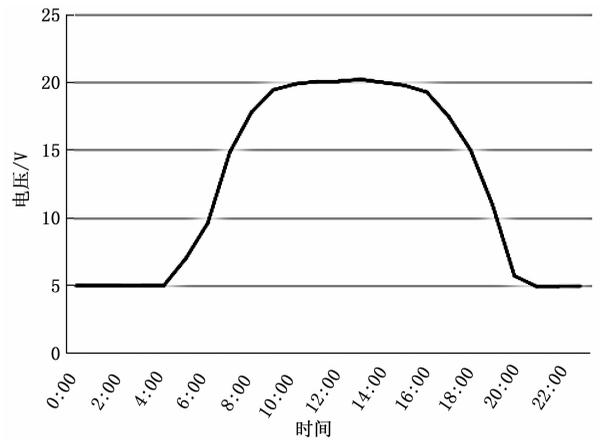


图 4 全年各整点时次太阳能板输出电压平均值

根据技术手册, 12 V 铅酸蓄电池充电电压约在 15.4 V 以上, 因此由统计结果可做如下判断: 在全年各种光照条件下, 8:00-17:00 太阳能板输出电压保持在 15.4 V 以上, 为正常充电时段; 21:00-次日 4:00 太阳能板输出电压保持 5 V 左右, 为零光照非充电时段; 5:00-7:00 和 18:00-20:00 为过渡阶段。因此, 正常充电时段应为蓄电池持续充电的时段, 为了设定太阳能板充电电压阈值, 统计了 50 个站点供电系统全部状态信息, 得到在该时段内 A2170 站于 4 月 15 日 17:00 出现了最低太阳能板充电电压, 为 9.4 V, 前后时次充电电压均正常, 由于该时次充电电压不足, 导致蓄电池电压下降 0.4 V, 又受太阳辐射降低的影响, 下一时次蓄电池电压并未得到提高, 但未影响自动站的供电。具体电压变化情况如图 5 所示。因此, 太阳能板充电电压历史最小极值为 9.4 V, 故其告警电压阈值设置为 9.4 V, 根据工作经验, 低于阈值持续 3 小时后触发关注告警。

2) 蓄电池压降速度告警阈值: 随着铅酸蓄电池使用年限增加, 蓄电池性能逐渐退化, 内阻逐渐增加, 蓄电池欧

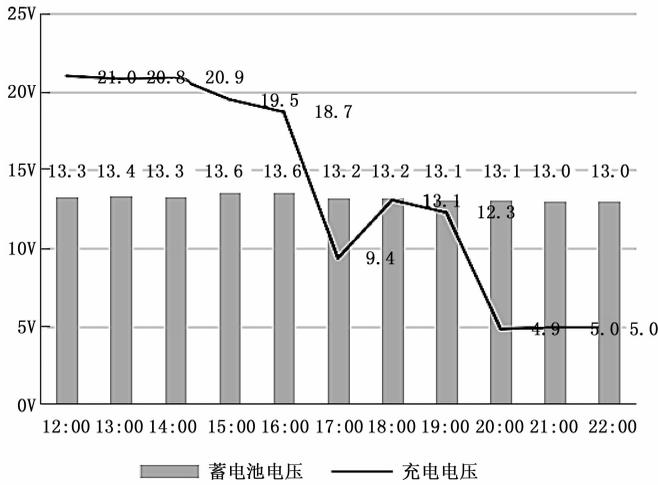


图 5 A2170 站点太阳能板充电电压历史极值

姆内阻值的增量是蓄电池性能退化的重要指示器^[15-16]。测量蓄电池内阻目前主要有密度法、开路电压法、直流感电法、交流法等^[17]，但由于电池内阻测量需要专用设备，而自动气象站并为配备相关仪器，无法通过直接测量蓄电池内阻进而估计蓄电池剩余寿命，只能通过现有的蓄电池电压变化情况进行较粗略的估算。蓄电池老化直接导致电池容量降低，进而加快蓄电池的电压下降速度，因此可以间接通过电压下降情况进行分析计算。

根据前期试验验证，自动气象站在正常工作时整站功耗基本保持恒定，几乎不受外界环境的变化影响^[18]。结合图 4 的分析，21:00-次日 4:00 期间蓄电池处于纯放电阶段，而自动气象站功耗一定，则该时段内的蓄电池电压下降速度可以反映电池老化程度。对 50 个站点全年 21:00-次日 4:00 期间蓄电池逐小时电压下降情况进行了统计分析，得到全部站点逐小时蓄电池电压下降平均值如图 6 所示，期间各站点平均电压下降幅度为 0.16 V，单站电压下降幅度极值出现在 A2126 站点 2 月 18 日 21:00-19 日 4:00，蓄电池电压下降 0.8 V。

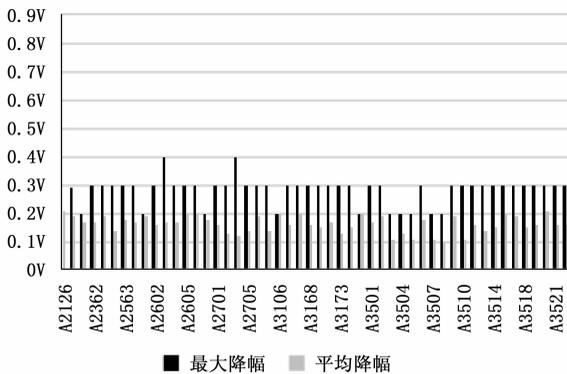


图 6 蓄电池夜间逐小时电压下降情况统计

4:00 蓄电池电压为 12.8 V 并持续至 7:00，太阳辐射增加后 8:00 电压升至 13.8 V，此后未出现异常。因此，

A2126 站点在夜间蓄电池电压下降 0.8 V 的情况下仍未影响站点正常工作，因此可将该值作为蓄电池夜间压降速度告警阈值，且达到阈值即触发关注告警。

3) 蓄电池放电电流阈值：根据前期试验结果，CAWS600-R (T) 自动气象站在搭载全要素传感器观测时，其放电电流在 0.1 A 以下，2 要素站点放电电流试验最大值不超过 67.5 mA，4 要素站点放电电流试验最大值不超过 97.5 mA^[19]。目前，部分自动站状态信息中含有蓄电池放电电流信息，由于采集器和搭载传感器型号不同，放电电流与实验数据略有差别，但依然可以作为历史经验值设置蓄电池放电电流的阈值。经过对 50 个站点全部 21:00-次日 4:00 期间放电电流数据的分析，不同要素站点放电电流情况如表 7 所示。

表 7 不同要素最大放电电流情况

要素数	站点个数	放电电流历史极值/mA	放电电流历史均值/mA
4 要素	48	220	58.3
6 要素	1	92	74.7
7 要素	1	400	350.4

由于带有放电电流状态数据的站点中 4 要素站点数量较多，因此数据分析具有较高的实际价值。4 要素站点最大放电电流为 220 mA，该站点对应历史平均电流为 97.3 mA，远高于 58.3 mA 的 4 要素站平均放电电流。查看了该站点具体历史记录，夜间放电电流一直处于 210 mA 左右的水平，远大于其它站点，原因尚未查明，但该放电电流并未影响电池使用。结合该站数据和 7 要素站点放电电流、蓄电池电压变化数据，放电电流大小与蓄电池电压下降幅度呈正比例线性关系，放电电流每 100 mA 约对应蓄电池电压下降 0.1 V/h。为了能够保证蓄电池能够以足够的电量度过夜间无太阳辐射时期的 8 个小时，且电压不低于 11.1 V 的极限值^[18,20]，可以计算得到放电电流阈值为 3 A，高于阈值 3 h 后触发关注告警。

4) 蓄电池电压阈值：自动气象站供电系统包含太阳能充电控制器，该控制器具备过充和过放保护功能，当蓄电池电压低于 11.1 V 时，进入过放保护，停止对系统供电。为了能够提前预判蓄电池故障，电压告警阈值应高于 11.1 V，为提前维护维修争取足够的时间。对 50 个站点蓄电池最低电压进行了统计分析，电压分布情况如图 7 所示，历史数据中最低电压为 12.3 V，经过查阅维修维护资料，该电压并未导致蓄电池故障。因此，可将该值作为蓄电池电压阈值（风险告警阈值）。

3.2 通讯类故障分析与预判

自动气象站通讯故障一般表现为自动站数据无法传输至中心站数据库^[21]，由于自动气象站均布设在野外，数据传输方式采用 SIM 卡的形式，因此其通讯故障主要来源于两个方面，一是通讯模块硬件故障，二是自动站所处位置移动信号较弱或无信号，导致观测数据无法上传或延迟上

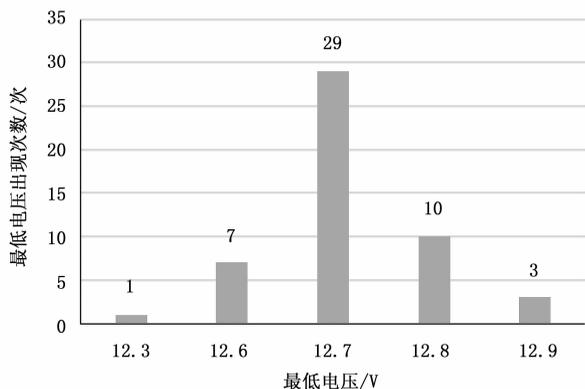


图 7 50 个站点最低电压出现次数

传。而根据目前自动气象站技术组成, 无法对通讯模块进行实时状态监控, 因此硬件故障无有效方式进行预判, 而移动信号强度可以根据状态数据进行分析判断。

移动信号强度直接影响自动气象站观测数据传输。对通讯类故障采用一级预判, 即发现信号强度问题立即触发风险告警, 说明信号非常弱或已经消失, 可能出现较严重的延迟到报或已经缺报。对 50 个站点全年信号强度进行了统计分析, 各个站点受当地运营商发射信号强度及所处位置影响, 信号强度各有不同, 具体情况如图 8 所示。各站点平均信号强度为 26.8 dB, 信号强度最好的站点平均信号强度达到 31.0 dB, 信号强度最差的站点平均信号强度达到 18.7 dB。表 8 统计了 50 个站点中全年信号较弱或无信号的个例及对应时次到报情况。

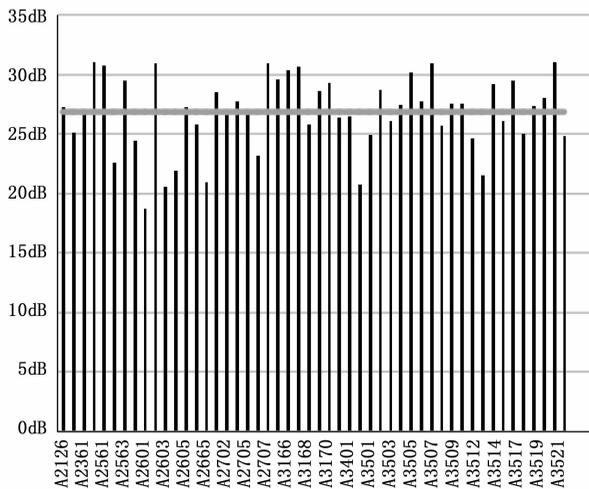


图 8 各站点平均信号强度

由表 8 可知, 全部统计数据中, 信号强度为 0 时共发生 3 个时次, 对应时次均无数据传输, 直至信号回复后延迟到报。信号强度最弱值为 4 dB, 经过查询该时次以及信号较弱的 7 dB、9 dB 对应时次均正常到报, 说明 4 dB 可以满足信号的传输。由于未在相关技术手册中查阅到自动气象站对移动信号强度的最低要求, 因此可将 4 dB 作为信号强度的风险告警阈值。

表 8 信号较弱或无信号的个例

信号强度历史数据低值	站号	时次	数据到报情况
0 dB	A2706	4 月 2 日 12 : 00 - 18 : 00	缺报
	A3168	3 月 21 日 13 : 00	缺报
	A3513	8 月 30 日 11 : 00	缺报
4 dB	A3513	7 月 16 日 16 : 00 7 月 27 日 23 : 00 7 月 29 日 6 : 00 7 月 29 日 12 : 00 8 月 18 日 11 : 00	正常到报
7 dB	A2126	7 月 15 日 18 : 00	正常到报
9 dB	A2666	8 月 10 日 11 : 00	正常到报
	A3170	6 月 12 日 13 : 00	正常到报

3.3 故障预判流程

在日常设备运行监控中, 定时 (间隔最长不超过 1 小时) 对太阳能板充电电压、蓄电池电压、蓄电池放电电流、信号强度进行监控, 与阈值比较后判断是否需要发出告警。根据工作经验, 太阳能板充电电压、蓄电池电压下降幅度、蓄电池放电电流三项状态指标分别满足阈值和持续时间条件后触发关注告警, 运行监控人员予以重点关注, 待蓄电池电压低于阈值后, 或者信号强度低于阈值后触发风险告警, 维修维护人员应前往维修查看排除故障。由于上述状态指标均为历史数据极值和经验值, 因此阈值采取动态调整策略, 即若某次某项状态数据低于阈值触发告警但并未引起实际故障, 则由人工根据具体数值和站点情况进行阈值调整和优化。

供电系统和通讯系统故障预判流程如图 9 所示。

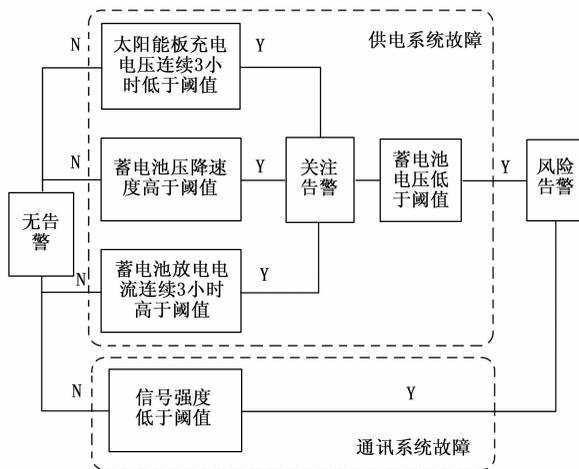


图 9 故障预判流程图

4 健康评价体系的主观权重结果分析

4.1 因子权重分析

通过对全部专家判断矩阵的数据处理, 得出了所有影响因子项在各层及总目标中的权重情况。分析因子权重路径图, 见表 9。由表可知, 相较于设备本身, 人们对设备安

装条件、备品备件储备支持情况及潜在故障风险等指标更为关心，原因在于气象部门现行的装备保障体制。由于气象装备市场的规范性，所有进入业务列装的仪器设备均需符合相关行业标准和规范，且需经过长期的测试及评估，其设备质量和性能均有较为严格的保证，因此，系统设备本身在综合评价和运维管理中的关注度较低。

表 9 因子权重路径图

准则层 B	准则层 C	指标层 D
系统设备 14%	设备质量 35%(5%)	通讯支持度 15%(1%)
		供电支持度 20%(1%)
		设备生产工艺 65%(3%)
	设备性能 65%(9%)	数据传输及时率 6%(1%)
		数据业务可用性 7%(1%)
		单次最长故障时间 17%(1%)
		距上次核查时长 21%(2%)
		距上次巡检时长 24%(2%)
		已发生故障次数 25%(2%)
		整站观测环境 21%(2%)
系统环境 31%	观测环境 25%(8%)	高盐雾、沙尘影响 79%(6%)
	设备安装条件 75%(23%)	
装备保障能力 55%	维护维修情况 11%(6%)	站点人员值守情况 14%(1%)
		距保障中心距离 35%(2%)
		行程难易程度 51%(3%)
	备品备件储备支持情况 30%(17)	
		潜在故障风险 59%(32%)
		站点安全性 68%(22%)

值得注意的是，专家普遍认为，潜在故障风险项的指标在气象探测设备的综合评价中最为重要，如表 10 所示。可以理解为，随着设备自身老化，其运行稳定性和观测数据的准确度就会不断下降；而且，从站点安全性角度来看，设备曾经发生过外力破坏或不可抗力的影响次数越多，其存在的安全风险等级就越高，设备“健康状况”就越值得关注。

表 10 D15、D16 对应目标层组合权重值表

	W_{D15-A}	W_{D16-A}
P1	0.04	0.25
P2	0.05	0.25
P3	0.09	0.09
P4	0.05	0.27
P5	0.14	0.14
P6	0.07	0.35
P7	0.24	0.24
P8	0.13	0.13
P9	0.06	0.31
P10	0.23	0.23
P11	0.06	0.19
平均值	0.1	0.22

4.2 因子逐层分析

从目标层的因子堆积图(图 10)中可知，对于气象探测设备的综合评价，装备保障能力的重要程度超过了系统设备与环境之和，且系统环境的重要性也远高于设备本身。这个结论客观反映了现行体制下，在对气象探测设备“健康状况”的综合评价中，人们更关注系统所处的探测环境对观测数据准确性的影响，以及装备保障能力对设备能否长久稳定运行的支持程度。

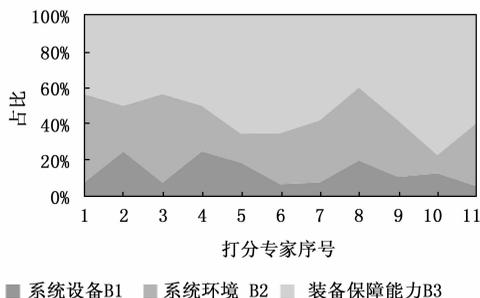


图 10 目标层因子堆积图

对系统环境准则层 B2(图 11)进行分析，设备安装条件的因子权重为 75%，系统观测环境仅为 25%。观测环境的优劣虽然能对观测数据的准确性造成一定的影响，但仍一定程度上反映了站点所在环境的气象条件，而安装条件的好坏则直接影响了设备能否真实测量到自然环境。以自动气象站为例，有研究表明，防辐射通风罩安装条件下的温度、湿度观测数据准确度比百叶箱安装环境略差；测风塔对风观测的影响比风杆略大。这种人为差异化的安装，对客观评价气象探测设备数据准确性方面存在一定影响。

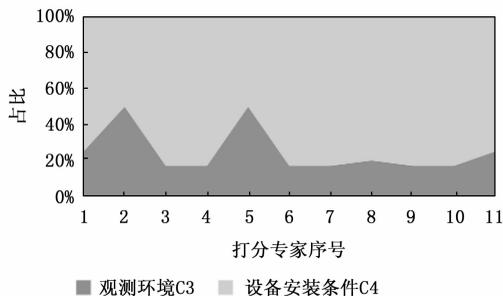


图 11 准则层 B2 的因子堆积图

在维护维修情况(准则层 C5)的因子堆积图(图 12)中，行程难易程度影响权重较大(51%)。这给了我们站点布局选址方面很好的启示，在满足观测代表性前提下，应尽量考虑维护可行性和便捷性，这对于提高气象探测设备的稳定运行能够起到较好的支撑。

4.3 评分稳定性分析

对于各位专家评分的稳定性，我们也作了相应分析，如表 11 所示。从表中可以看出专家评分标准差远小于平均值，表明 11 名专家打分稳定有效。

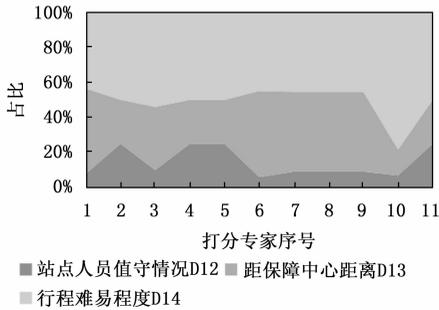


图 12 准则层 C5 的因子堆积图

表 11 专家评分稳定性

	系统设备 B1	系统环境 B2	装备保障能力 B3
专家 1	0.08	0.49	0.44
专家 2	0.25	0.25	0.5
专家 3	0.08	0.49	0.44
专家 4	0.25	0.25	0.5
专家 5	0.19	0.16	0.66
专家 6	0.07	0.28	0.65
专家 7	0.08	0.34	0.58
专家 8	0.2	0.4	0.4
专家 9	0.11	0.31	0.58
专家 10	0.13	0.1	0.77
专家 11	0.06	0.35	0.6
平均值	0.14	0.31	0.55
标准差	0.07	0.12	0.11

5 应用验证与分析

为了更便捷地应用上述健康评价与故障预判方法, 开发了“自动气象站 PHM 分析”软件系统, 通过将相关权重、站点信息、阈值等信息导入系统, 同时获取业务系统数据库中站点状态信息, 自动进行站点健康评价和故障预判, 在实际业务中发挥了一定作用, 为自动气象站的运行维护提供了新的方式和途径。同时也在实际运行过程中, 不断发现该方法存在的问题并进行优化。

5.1 站点健康评价实例与分析

2021 年 6 月 13 日夜间, 天津市发生一次降水过程, 普降中到大雨, 局部暴雨, 部分站点出现降水量异常情况。以 2021 年 6 月 14 日 8:00 为时间节点, 在天津市辖区内随机选取 10 个域自动气象站, 查看其健康评价结果, 如图 13 所示。

为了验证上述健康评价结果的合理性和可用性, 对所涉及的站点及其差异情况进行分析。

宁河潘庄镇和小白楼运行情况较好, 综合评价结果为 97.5 分。西青杨柳青和珠江里分别于当日发生雨量筒堵塞, 造成降水量数据缺测, 业务可用性数据降低, 两站综合评价结果分别为 97.1 和 97.0。北辰辛侯庄于本月出现 1 次故障, 综合评价结果为 94.5。滨海新区官港水库运行情况较

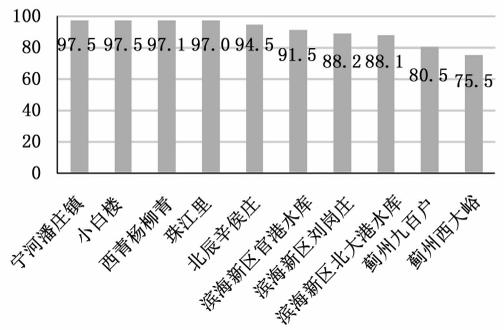


图 13 自动气象站健康评价结果

好, 但其位于沿海地带, 受高湿高盐环境影响较为严重, 对维修维护工作的要求较高, 属于设备的潜在风险, 综合评价结果 91.5 分。滨海新区刘岗庄于前一日起缺报并持续故障 19 小时, 滨海新区北大港水库降水量缺失 4 小时且本月前已发生过一次故障, 两站综合评价结果分别为 88.21 和 88.08。蓟州九百户和蓟州西大峪两站运行情况较好, 但综合评价仅有 80.5 分和 75.5 分, 主要原因在于两个站备品备件在所在地保障分中心缺乏储备, 对于故障持续时间、业务可用性和观测数据的连续性都具有重要的影响, 因此两站虽稳定运行但健康值得分较低

通过分析可知, 健康值较高说明站点整体运行稳定, 未存在较为严重的故障或潜在风险; 健康值较低说明站点存在较为严重的故障或潜在风险。通过健康评价, 可以直观有效地对站点运行情况进行监控和分析, 提醒运行监控人员对个别站点进行重点关注和维护维修, 有助于站点的保障与管理, 提升气象装备保障效能。

5.2 故障预判应用实例

软件应用以来, 共触发关注告警 2 次, 均为太阳能板充电电压连续 3 小时低于阈值, 其电压值分别为 9.3 V 和 9.2 V, 发出了关注告警, 值班人员对其进行了重点监控, 发现站点并未出现电源系统故障, 故将该项阈值调整至 9.2 V, 根据站点位置分析了充电电压较低的原因, 系站点南侧树木遮挡所致。

由于近年来华北地区空气质量得到明显改善, 雾霾天气出现频次降低, 各站点供电情况良好, 供电系统出现故障的频率较低, 因此触发两级告警的频次较低。该预判思路与软件系统需依靠更多的数据支撑方可提高预判准确性。

6 结束语

根据目前自动气象站维护管理中存在的问题, 结合自动气象站自身数据信息, 基于 PHM 技术理念提出了一种自动气象站健康评价和故障预判的方法。基于层次分析法, 建立了气象探测设备综合评价模型。该模型以专家打分数据为基础, 利用层次分析法计算各因子权重, 最后根据评级因子数据计算设备实时的健康值, 从而建立起气象探测设备运行健康状况的实时健康模型, 能够帮助业务人员更加

(下转第 276 页)