

能源健康管理系统在集中供热工程中的应用研究

赵瑞霞¹, 邓剑宏¹, 罗凯²

(1. 中国航空规划建设发展有限公司, 北京 100120; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 供热工程作为传统的重大能源供应领域, 存在系统能耗高、占地空间大、系统分布广及关键环节多等特点, 使得能源系统的可靠、安全地管理对于供热质量和稳定具有决定性的作用, 对我国城市居民生活水平具有巨大的影响; 能源系统科学管理对改善城市环境, 降低城市污染、节能减排等具有重要的意义; 通过将健康管理机制、技术、系统引入供热工程的能源管理中, 采用数字化、信息化管理手段及技术, 建立能源健康管理系统, 实现对能源系统的水温、端差、压力、振动频率、湿度等性能参数全寿命周期监控、报警、以及热交换器、水泵等关键设备诊断及评价分析, 有效解决了影响能源系统健康的关键设备故障诊断与健康水平定量评价, 达到供热工程中能源系统的全面掌控与科学管理的目的, 为创造和谐人居环境、塑造城市形象、保证城市可持续发展提供有力的保障。

关键词: 能源系统; 供热工程; 健康管理

Research on Energy Health Management System's Application in Central Heating Project

Zhao Ruixia¹, Deng Hongjian¹, Luo Kai²

(1. China Aviation Planning and Construction Development Corp. Ltd., Beijing 100120, China;

2. Beijing Aerospace Measure & Control Corp. Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: Heating Engineering as a traditional area of major energy supply has many features such as high energy consumption, covering large area, wide distribution, multi-key number etc, which makes energy systems reliable, and quality and stability of heating management plays a key role in living standards of urban residents. Energy system's scientific management has important significance to improve the urban environment and reduce urban pollution, energy conservation, etc. In this paper, we will take mechanism, technology and system into heating energy management projects, use digital, information management tools and technology to build up the Energy Health Management, achieve the full life cycle energy system monitoring, alarm, diagnosis and evaluation. Achiving energy system comprehensive, scientifically controlled in heating project will provide effective protection to a harmonious living environment, shaping the image of the city, ensuring sustainable urban development.

Keywords: energy systems; heating engineering; health management

0 引言

换热器、循环水泵和补水泵、全自动硬度在线监测软化水设备、低压变频柜、自动控制设备(自动控制方案及设备、PLC控制器、超声波热量表、超声波流量计、电动调节阀、温度变送器、压力变送器)等作为供热工程能源系统^[1]的主要组成设备, 对于整个系统的正常运行起到决定性的作用。由于热网结构复杂、分布广、系统能耗高、工作环境相对严酷, 使得能源系统中关键设备在供热期以及非供热期均可能出现异常故障以及长期的性能老化, 为整个能源系统的安全、稳定运行带来影响^[2]。本文以“换热器”、“水泵”受环境、载荷影响容易出现性能下降、故障以及失效等问题, 以供热系统的薄弱部件为研究对象, 建立透明度与智能化程度更高的能源管理和辅助决策平台目标出发, 从能源使用的全生命周期角度开展能源健康管理系统在集中供热工程中的研究。通过对重要的热网能源运行数据的集成, 实现灵活可靠的热网能源过程监

控^[3], 在更低能耗、更低排放的水平下获取运行优化和最大化能源效率^[4]。

1 典型的系统架构分析

根据 OSA-CBM+ (open system architecture for condition based maintenance: 基于视情维修开放式系统框架) 标准参考体系架构, 设计供热工程中能源健康管理系统架构如图 1 所示。

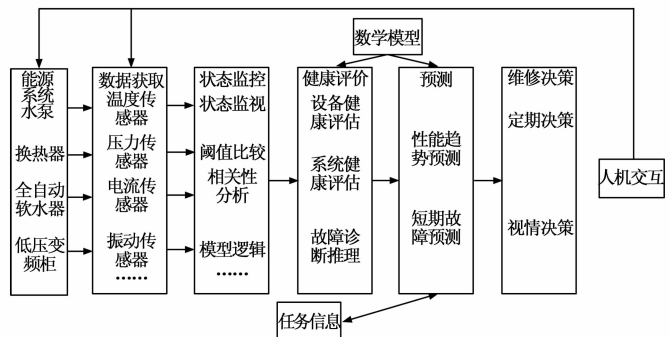


图1 供热工程中能源健康管理体系框架

收稿日期: 2014-04-23; 修回日期: 2014-05-12。

作者简介: 赵瑞霞(1980-), 女, 陕西府谷人, 中级工程师, 主要从事供热厂和垃圾焚烧电厂自控方向的研究。

其中体系组成包括：

- 1) 管理对象：供热工程中的容易出现故障、老化的设备，包括水泵、热换器、自动软水器、低压变频柜等；
- 2) 数据获取：利用传感器及部分设备已有的自检数据，包括温度、湿度、压力、振动、电流、电压、流量等指标；
- 3) 数据处理：利用编码协议、极值计算、傅里叶变换等算法，实现供热设备关键参数的处理，供后续监控、诊断、评估、预测；
- 4) 状态监控：利用工程门限、数据相关性、特征值异变等方法，实现供热关键参数的监控、异常状态识别、异常报警；
- 5) 健康评估：利用规则推理、模糊评判、支持向量机、统计评估等方法，实现供热系统关键设备、系统的健康状态评价、故障定位；
- 6) 健康预测：利用时间序列模型、多项式拟合等数据驱动方法，实现压力、温度等关键参数趋势预测，估计未来异常可能性；
- 7) 维修排故决策：利用根据供热系统历史、当前、预测等分析结果，提出合理的定期维修、视情维修决策。

能源健康管理体系架构设计后，将重点针对其中的关键分系统、设备开展有针对性的健康管理分析。

2 热换器健康状态分析

2.1 热换器健康监控

热换器是热力站的核心设备，包括了板式热换器、热交换机组、宽通道焊接式板式换热器、板壳式换热器等。以管壳式换热器为例，其工作压力从高真空到几十 Mpa，工作温度从 -100~1 200 ℃ 的高温，水从具有一定高度的水槽流出，水的流量是由相应的水位高度确定，热交换器的使用主要实现对出口水温的控制。通过热交换器的工作结构进一步分析可知，热换器出口水温所受影响因素包括进口水温、进口水量、进口蒸气流量、进口蒸气温度以及工作环境温度。

2.2 热换器故障诊断

由于热换器利用高压缸的高温过热蒸汽加热来自水泵的进水，以 U 型热管为传热面，将来自汽轮机高压缸中的高温过热抽拉进入加热器。因此管道的泄漏、接口的泄漏是其主要的故障模式之一。根据统计分析，管道的泄漏占 85%，其主要故障原因包括汽、水冲刷管道变薄，引起系统共振，给水酸性腐蚀，表现为水侧压力过大；接口处故障原因包括热应力过大、管板变形。由于热换器的成本相对低、且工作相对稳定，维修简单，因此对其开展健康管理主要通过健康监控，掌握其工作状态，并对其工作过程出现的监控参数异常、超出门限时进行故障诊断。重点关注的指标为进水温度端差与出水温度端差，具体诊断模型如式 (1) 所示。

$$\begin{aligned} \theta_i &= t_{sj} - t_{ux} \\ \theta_o &= t'_{sj} - t_{wj} \end{aligned} \quad (1)$$

其中： θ_i 为进水端差； θ_o 为出水端差； t_{sj} 为汽侧压力下蒸汽饱和温度； t_{ux} 为给水出口温度； t'_{sj} 为给疏水温度； t_{wj} 为给水出口温度。

实际的监控过程中，可根据工程经验及历史监控数据，分析判明历史过程中端差的工程门限，从而判明热换器的故障状况。对于超出门限的设备，通过现场的排查实现维修与故障恢复。

3.3 热换器健康状态评估

根据前面分析，影响热换器健康状态的因素较多，包括了温度、振动、压力等，可表征其健康状态的指标也较多，因此采用传统的模糊评判方法会导致其健康状态的误判、漏判等问题。对于长期安装使用的热换器，其在不同季节、月份所受影响相似，即同年份的对应时期内具有可比性。本文采用了基于统计的评估方法，实现利用关键参数评价换器健康水平，具体分析流程如图 2 所示。

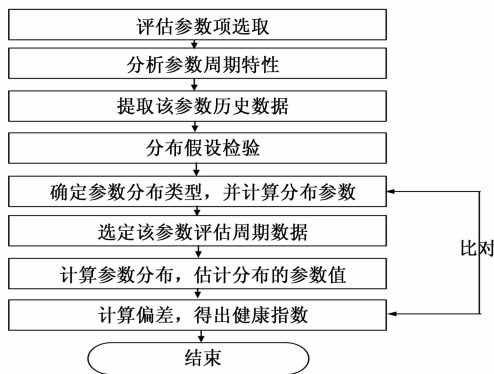


图 2 供热工程中能源健康管理体系框架

1) 评估参数项选取：以进水端差为例，该参数由于受温度、振动影响，使其在典型的月份中曾显的数据具有统计特性（可认为服从正态分布），提取该参数 2007 年 12 月的历史数据，进行检验其分布特性；

2) 分布检验，利用历史数据，分别采用极大似然法、核密度估计法，估计参数所属分布类型及概率密度函数参数，获取该参数在 2010 年数据服从的正态分布，如图 3 所示；

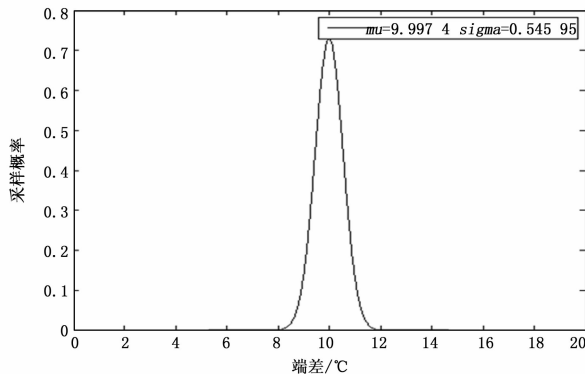


图 3 2010 年数据统计分布曲线

3) 统计评估：利用 2007 年 12 月统计分布为基准分布，将 2012 年 12 月分布与 2010 年分布计算分布差异散度得出健康评估指数 (HI: Health Index)，并将 2007 年 5 月分布与 2010 年分布最大值 2.000 1 作为最大散度，计算得出 2012 年该热换器健康评估结果如下。

$$4) \text{健康计算: } HI = \left(1 - \frac{KL}{KL_{\max}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1.0256}{2.0001}\right) \cdot 100 = 48.722.$$

3 水泵健康状态分析

3.1 水泵健康监控

水泵主要安装于供热工程中的热力站，主要用于供水、供

热的传输, 包括了循环水泵和补水泵。其中, 循环水泵是输送流体或使其增压的机械。其作用是向汽轮机凝汽器供给冷却水, 用以冷却凝汽轮机排汽; 补水泵是为保持供热系统内充满水及必须的工作压力, 在设定点向供热系统补充供热介质。根据水泵的工作原理分析, 水泵在供热期和非供热期存在着油液清洁度、颗粒聚集、污染、径向力不平衡等, 可能导致循环水泵出现故障及老化。例如, 循环水泵的液压阀卡住引起液压阀动作缓慢或不动作, 循环水泵启动失败。水泵的健康管理主要监控的参数包括承压、电机电压、水泵效率、水泵流量、密封性及工作温度等。

3.2 水泵故障诊断

水泵作为机电类产品, 在工作过程中受到温度、振动、流量等载荷影响, 利用振动信号对其进行故障诊断最为有效。根据以往经验与统计, 水泵的常见故障包括转子不平衡、转子不对中、支座松动、绕组发热等, 以上故障模式都会对水泵的振动的影 响。针对振动信号的故障诊断方法较多, 比较常见的包括傅里叶变换、小波变换等。本文采用基于时域平均的信号消噪与诊断方法, 在时域中从混有噪声干扰的信号中提取周期分量, 按照信号周期对原始信号进行连续的等长度截取, 并对各段信号进行累加平均计算, 得出处理后的单个周期的新序列。

以 Δt 为间隔的采样序列 $x(n), n = 0, 1, 2, \dots, N1$, 其中感兴趣分量的周期为 T , 则时域平均后新序列为:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n - m_k) \quad (2)$$

其中:

$$n = N1 - M + 1, N1 - M + 2, \dots, N1$$

M 为平均后的新序列长度; $M = T/\Delta t$ 的就近取整值; m_k 为 $kt/\Delta t$ 的就近取整值, N 为平均段数。

由于水泵振动信号为较为典型的周期信号, 因此采用时域平均方法进行信号消噪和提取特征频率可以取得良好的效果。其主要步骤如下:

Step1: 根据水泵的特点和故障诊断要点, 明确关键特征频率, 确定感兴趣频率分量。

Step2: 根据采样频率和所选感兴趣频率得到平均段数和新序列长度。

Step3: 计算信号经时域平均后的新序列, 观察信号时域波形, 进行趋势分析。

Step4: 对新序列进行快速傅里叶变换, 观察和分析其特征频率及其各阶倍频。为了提高频域分辨率, 进行变换前, 一般需对新序列进行周期延拓。

Step5: 将频率特征与故障信号特征比较, 判断部件故障, 实现水泵的故障诊断。

3.3 水泵健康状态评估

根据水泵的健康监控分析, 其健康状态主要由承压、电机电压、水泵效率、水泵流量等关键参数影响, 采用模糊评判的方法对其健康水平进行评价, 水泵健康状态评估原理如图 5 所示。

1) 评估指标选取, 本文主要选取了电机电压、水泵功率及水泵流量 3 个指标作为其评估指标;

2) 评估权重分配, 采用专家经验与评判矩阵计算相结合, 可有效解决专家经验不准的问题, 构造的成对评判矩阵如下, 同时采用判断矩阵对应的最优权重向量及遗传算法, 得出最优

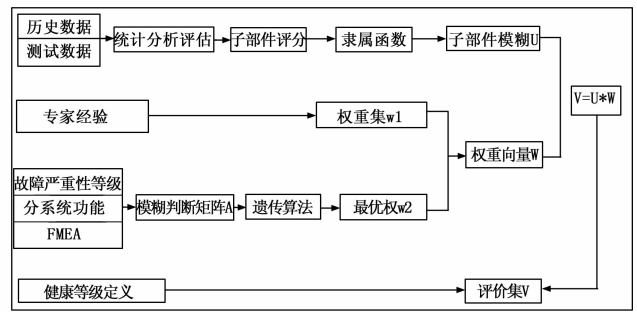


图 4 水泵结构图和实物图

权向量为 $(0.5, 0.25, 0.25)$;

$$A = \begin{bmatrix} [1 & 1] & [5 & 7] & [3 & 5] \\ [\frac{1}{7} & \frac{1}{5}] & [1 & 1] & [\frac{1}{5} & \frac{1}{3}] \\ [\frac{1}{5} & \frac{1}{3}] & [3 & 5] & [1 & 1] \end{bmatrix}$$

3) 指标级健康评估, 针对 3 个指标, 分别采用规则门限、退化率两种方法进行评估, 其中电机电压、水泵流量利用主要采用统计方式, 利用历史数据划分其健康区间, 而水泵功率主要采用了以初始平均功率为基准, 根据其设计给出的年退化率, 按照百分比退化尺度进行打分规则划分, 具体如表 1 所示。

表 1 水泵关键指标打分规则

指标	原始值	健康指数	映射关系
电机电压	(0,320,360,380)	(0,60,80,100)	线性映射
电机功率	(0,3%,10%,15%,20%,100%)	(100,90,80,60,0)	指数映射
水泵流量	(800,500,0)	(100,60,0)	线性映射

4) 健康指数打分, 利用水泵历史数据, 计算月平均值, 结合上述打分规则, 给出水泵健康水平衡量指标。

4 全自动软水器健康状态分析

全自动软水器是一种运行和再生操作过程全自动控制的离子交换软水器, 利用钠型阳离子交换树脂去除水中钙镁离子, 降低原水硬度, 以达到软化硬水的目的从而避免碳酸盐在管道、容器、锅炉产生结垢现象。全自动软水器受再生周期设定过大, 正洗时间偏短, 给水水压不稳引发的盐箱补水过少、吸盐过少、正洗不足, 以及在盐箱中的盐少等因素, 造成全自动软水器的故障及健康状态异常。由于全自动软水器的健康表征比较明显, 因此其健康状态主要可通过关键参数监控与判断, 主要监控的参数包括: 原水水质、出水水质、硬度、进水压力、进水硬度、进水水温、环境温度及相对湿度等。

5 低压变频柜系统健康状态分析

低压变频柜系统主要为循环泵、补水泵提供变频支持, 其控制电路结构简单, 成本较低, 机械特性硬度也较好, 能够满足一般传动的平滑调速要求。低压变频柜包括: 正弦脉宽调制、矢量控制变频调速及直接转矩控制等方式。低压变频柜的主要故障是主控电路故障, 主要包括主板、电源板、逆变器及滤波电容等主控电路损坏, 冷却直流风扇故障, 外围控制器件

故障，散热不良等。其主要故障原因有：外部的电磁感应干扰、环境问题、参数设置等原因。由于低压变频柜采用了自检手段，因此健康管理过程主要通过监控关键参数进行报警，具体参数包括电压、功率、过载电流、加速时间、控制精度及延时等。

6 能源健康管理系统设计

在完成热交换器、水泵等典型供热系统设备健康管理技术研究基础上，开展健康管理系统^[5-6]设计，其主要由 5 大子系统组成，包括实时监控子系统、诊断与预警子系统、健康评估子系统、综合信息管理子系统组成。系统组成如图 5 所示。

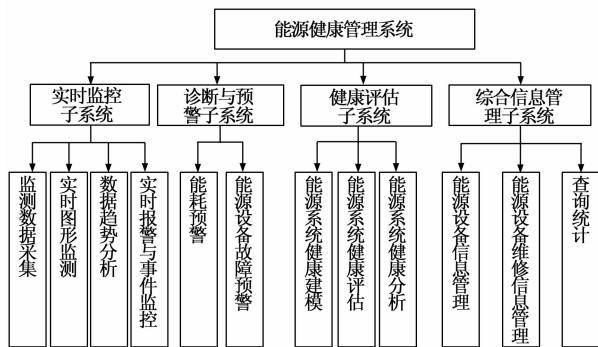


图 5 能源健康管理系统组成

1) 实时监控子系统：采用先进的图形化技术，实现热网运行过程和能源应用过程的可视化；同时提供超限报警、事件监视以及趋势分析等智能化监测手段，实现对热网的实时运行情况、实时能耗情况以及关键绩效指标的监测，为能源调度管理以及相关决策提供辅助支持。其中，检测的内容除了能源的监测以外还包括了关键的能源系统内设备的工作状态参数（具体参数见 1~4 部分的内容）。

2) 诊断与预警子系统：根据本文的 1、2 部分的研究，采用基于温度差异、信号处理等方法，研制能源系统典型设备的故障推理引擎，实现热交换器、水泵等关键设备故障诊断。同时，采用非参数回归分析、多项式拟合等方法，提供基于能源系统关键参数的趋势预测功能，根据实时预测值与预警门限的接近程度，对热网运行过程的能耗趋势、增长情况、节能情况进行统计分析，实现热网运行能耗信息的高度集成，从而有效改善整个热网能源使用的跟踪与预计能力，为管理者提供可视化的能源使用与消耗状况，辅助决策层对节能增效管理策略

的制定和实施。

3) 健康评估子系统：主要提供管网能源设备的健康评估建模管理功能，通过图形化的建模工具，实现对能源系统的层次化建模，配置待评估对象的评估节点参数、数据权重信息以及评估算法。在此基础上，提供评估执行服务，通过实时评估与历史评估服务，实现能源设备的 24 h 值班评估分析，定时给出系统健康状态评估结果。针对评估过程中出现的健康等级退化，提出健康报警。管理者可通过健康趋势分析定期查看系统健康报表，从而为提前安排检修、排故提供建议。

4) 综合信息管理子系统：系统主要提供了能源设备的基础信息管理、测试记录信息管理、故障与维修信息管理等功能。同时，提供按照供热时间、供热区域、供热系统等综合查询功能。

7 结论

能源健康管理系统采用了世界先进的能源系统平台解决方案，通过建立透明度更高、智能化程度更深的能源调度、管理和辅助决策平台，从能源使用的全生命周期角度，通过对重要的热网能源运行数据的集成，实现灵活可靠的热网能源过程监控，在更低能耗、更低排放的水平下获取运行优化和最大化能源效率。

本文主要对供热工程能源健康管理系统设计及应用进行了研究，在分析了热交换器、水泵关键系统故障及与健康状态相关参数分析基础上，提出能源健康管理设计主体框架及应用功能，对我国相关供热领域的系统可靠、安全管理具有一定借鉴作用。

参考文献：

[1] 黄 斌. 既有集中供热二级管网系统升级改造模式及应用研究 [D]. 天津：河北工业大学，2011.

[2] 王 军，王 雁，等. 采用热量表动态网络提高集中供热系统性能 [J]. 计算机工程与应用，2009，45 (2)：28-30.

[3] 赵艳涛. 大连开发区供热公司集中供热远程监控系统 [D]. 大连：大连理工大学，2007.

[4] 王玉峰. 区域供热燃煤锅炉房的优化配置 [D]. 北京：北京建筑工程学院，2010.

[5] 孙 辉. 热网远程监控系统的设计及安能城市热网的应用 [D]. 合肥：合肥工业大学，2009.

[6] 吴明强，房红征，伊大伟. 复杂系统故障预测方法与应用技术研究 [J]. 计算机测量与控制，2010，18 (1)：70-71.

(上接第 2414 页)

[3] 罗志强. 航空电子综合化系统 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1990：3-10.

[4] DDC. ACE/Mini-ACE series BC/RT/MT advanced communication engine integrated 1553 terminal user's guide [Z]. New York: Data Device Corp, 1999.

[5] 郑先成，张国俊，张晓斌. 基于 TMS320F2812 和 DSP/BIOS 的 1553B 总线接口设计 [J]. 测控技术，2008，27 (7)：53-55.

[6] 白宏阳，管雪元，薛晓中，等. 基于 DSP+FPGA 的航空 1553B 总线 RT 设置方法 [J]. 弹箭与导学报，2010，30 (4)：169

-172.

[7] 高志强，苗克坚，张雯璐. 弹载计算机 1553B 总线测试模块设计 [J]. 计算机测量与控制，2008，16 (9)：1280-1282.

[8] 蒋国锋，白红. 1553B 总线监控器的设计与实现 [J]. 电子设计工程，2011，19 (17)：98-100.

[9] 丁明亮，魏志刚. 1553B 总线远程终端仿真软件设计 [J]. 计量与测试技术，2008，35 (1)：43.

[10] 赵加风. 1553B 总线故障模拟装置研制 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010：1-10.