

地铁通风空调水系统能耗预警模型

陈明华¹ 王伦月¹ 何磊¹ 王冠群² 夏树高²

(1. 贵阳市城市轨道交通集团有限公司, 550081, 贵阳;

2. 青岛海信网络科技股份有限公司, 266100, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘要 针对地铁通风空调水系统设备的能耗问题,以水系统制冷系数为核心,基于水系统设备的历史正常数据,将数据统计、证据理论和神经网络遗传算法相结合,构建了水系统能耗预警模型。通过该预警模型,能及时发现水系统中冷水机组、水泵等设备能耗异常,提前发现采集异常或设备故障等系统问题,并通过及时处处理,减少由此造成的能量浪费,降低城市轨道交通运营成本。

关键词 城市轨道交通; 通风空调水系统; 能耗预警模型

中图分类号 U231.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.008

Study on Early Warning Model in Energy Consumption of Metro VAC Water System

CHEN Minghua, WANG Lunyue, HE Lei, WANG Guanqun, XIA Shugao

Abstract Targeting the energy consumption problem of metro VAC (ventilation and air-conditioning) water system equipment, a water system energy consumption early warning model is established, using cooling performance coefficient as the core, based on historical normal data of the equipment, and combining data statistics, evidence theory and neural network genetic algorithm. Through the early warning model, it is possible to allocate abnormal energy consumption of cooling equipment or pump in water system in time. By detecting systematic problems such as collection abnormality or equipment failure and dealing with them in time, energy waste caused by this can be reduced, as well as urban rail transit operation cost.

Key words urban rail transit; VAC (ventilation and air-conditioning) water system; energy consumption early warning model

First-author's address Guiyang Urban Rail Transit Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China

地铁通风空调系统,又称“地铁环控系统”,是地下车站必须配备建设的,可保证地下车站及隧道内部的空气品质、温度及湿度等环境条件达到乘客

可接受水平,是地铁系统中不可分割的一部分^[1]。地铁通风空调系统耗能较高,其空调季能耗占地铁总能耗的30%~40%。各城市地铁运营公司都在尽力降低通风空调系统的能耗。目前,主要通过部署节能优化系统,利用工艺节能的手段来降低通风空调系统能耗。本文从能耗异常的运行数据出发,研究对通风空调水系统能耗异常预警诊断的模型,可对设备能耗异常状态进行及时预警,从而减少由于通风空调水系统异常造成的能耗浪费,为通风空调系统节能提出了新的思路。

1 研究背景

地铁通风空调系统设备能耗预警技术属于设备状态预警技术。设备状态预警技术是保证设备安全运行、风险评估及可靠性的重要手段,其基本思想是实时监测设备的运行状态。设备运行状态可分为正常、异常和故障等3类,但三者界限并不明显^[2]。设备状态预警技术通过能耗计算来预测设备或系统的健康状态,可在设备发生故障之前发出预警信息,以便采取相应的措施。该技术使传统的被动维修转变为主动预防、事先状态预测、提前规划管理,在一定程度上代表了设备故障诊断方法和维修体系的新发展方向。

地铁通风空调系统包含空调水系统和通风系统,其中空调水系统能耗占整个通风空调系统能耗的60%以上。对水系统能耗问题进行研究,能更有效降低地铁通风空调系统耗能情况。地铁通风空调水系统一般由冷水机组、冷却水泵、冷冻水泵、冷却塔和管路组成,设备多,管路复杂,往往出现单体设备的运行能耗和能效都在允许范围内,而整体能耗却偏高的现象。经分析,这一现象一般是由冷冻水流量偏大、冷却水流量偏大等等运行不合理情况造成的。可见,只有基于整个冷水系统的能耗诊断,才能建立有效准确的地铁通风空调水系统能耗

预警模型(以下称为“能耗预警模型”)。

本文以一定的制冷量和环境温度作为研究工况,在历史数据中搜索该工况下的最优 COP(水系统制冷系数),按一定的置信度来拟合相应的(制冷量、环境温度)生产 COP 曲面,作为冷水机组 COP 应达值,进而生成 COP 能耗预警模型。该模型可根据实时 COP 值和 COP 应达值之间的差值,来判断通风空调水系统是否存在能耗异常,进而发出预警。

2 能耗预警模型的建立

COP 能耗预警模型的工作流程包括:历史数据稳态提取、稳态工况下性能系数计算、提取不同工况下可达性能系数、通过神经网络遗传算法拟合性能系数的动态可达值曲面。

2.1 采集空调水系统正常的历史数据

能耗预警模型需要采集空调水系统在正常运行状态下的数据,包含冷冻水入口温度、冷冻水出口温度、冷冻水流量、冷却水入口温度、冷却水出口温度、冷却水流量、所有设备功率及环境温度。以 x_{ij} 表示第 i 个变量第 j 个采样时刻的采样值,则采集得到的历史正常数据矩阵 \mathbf{X} 为:

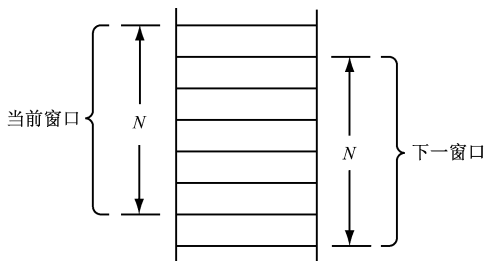
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 从历史数据中提取稳定工况

当空调水系统处于稳态工况时,受实际生产环境的限制及其他干扰条件的影响,其机组的变量参数并非恒定不变,而是会在某一数值附近波动。该数值的波动可认为是大量相互独立随机因素综合影响的结果。虽然用来描述这些微小随机因素的随机变量不一定服从正态分布,但只要每个因素都未起到压倒一切的主导作用,那么这些微小因素综合作用的参数数值就可认为近似服从正态分布。

可利用数据标准差来判断该数据是否为稳态数据。标准差可反映组内个体间的离散程度:样本标准差小,说明样本变量的分布比较密集在平均数附近;否则,说明样本的分布比较离散。利用标准差的这一特点,采用滑动窗口的形式,可判断变量是否处于稳态过程。滑动窗口如图 1 所示。在滑动窗口内,所有采集数据的标准差集合 $S = (s_1, s_2, \cdots, s_i, \cdots, s_N)$,其中 s_i 表示第 i 个变量的标准差,可表征

数据的稳定程度。



注: N 为窗口长度。

图 1 滑动窗口示意图

Fig. 1 Diagram of slider window

设定窗口长度为 N (N 为窗口内负荷数据的个数,即每个变量有 N 个采样点),窗口内负荷数据标准差 s_i 为:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

式中:

x_{ij} ——窗口内第 i 个变量第 j 个时刻数据的数值;

\bar{x}_i ——第 i 个变量窗口内 N 个数据的算术平均值。

当冷水机组处于稳态工况时,测量值服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$,若滑动窗口长度为 N ,滑动窗口内数据标准差为 s ,则 $\frac{N-1}{\sigma^2} s^2$ 服从自由度为 $N-1$ 的 χ^2 分布,分布密度曲线见图 2。即:

$$\frac{N-1}{\sigma^2} s^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sim \chi^2(N-1) \quad (3)$$

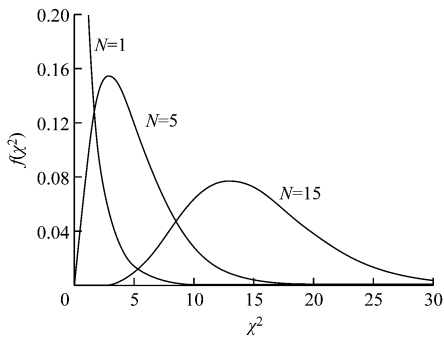


图 2 χ^2 分布的密度曲线

Fig. 2 Density curve of χ^2 distributed

非稳态阈值 θ 可根据 χ^2 分布的密度来确定。参考 3 δ 原则,取稳态工况对应的标准差 $s < \theta$ 的概率为 0.995,则:

$$\theta = \sqrt{\frac{\chi_{0.005}^2(N-1)}{N-1}} \sigma \quad (4)$$

确定每个变量的稳态判断阈值后,通过滑动窗口法对历史数据进行处理,得到窗口内每个变量的标准差: $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)$, 当每个变量的标准差都小于对应的阈值后,则表示冷水机组进入稳定工况。

2.3 稳态工况下的水系统可达性能数据

假设进入稳态工况的时刻为 t_1 , 退出稳态工况的时刻为 t_2 , 则在 t_1 至 t_2 时间段内, 冷水机组处于稳态工况。

步骤 1, 提取该时间段内所有的历史数据, 由式(1)则有:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,t_1} & x_{1,t_1+1} & \cdots & x_{1,t_2} \\ x_{2,t_1} & x_{2,t_1+1} & \cdots & x_{2,t_2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m,t_1} & x_{m,t_1+1} & \cdots & x_{m,t_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤 2, 计算该时间段内的总制冷量 Q :

$$Q = \sum_{j=t_1}^{t_2} Q_{lds,j} (t_{lds,in,j} - t_{lds,out,j}) cT \quad (6)$$

式中:

$Q_{lds,j}$ ——冷冻水 j 时刻的瞬时流量;
 $t_{lds,in,j}$ ——冷冻水 j 时刻的回水温度;
 $t_{lds,out,j}$ ——冷冻水 j 时刻的出水温度;
 T ——采样周期;
 c ——冷冻水的比热容。

步骤 3, 计算该时间段内的总耗电量 P :

$$P = \sum_{j=t_1}^{t_2} p_j T \quad (7)$$

其中:

p_j ——空调水系统所有设备瞬时功率。

步骤 4, 计算该时间段内的平均性能系数 x_{cop} :

$$x_{cop} = Q/P \quad (8)$$

步骤 5, 用 y_k 表示某稳态工况 k 下的可达性能数据, 包含 Q 、环境温度 t_{hj} 、 x_{cop} 、 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$, 则有:

$$y_k = (Q, t_{hj}, x_{cop}, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (9)$$

当统计到 K 个稳态工况时, 所有稳态工况的可达性能数据统计变量数据集 Y 为:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_K) \quad (10)$$

2.4 筛选不同工况下的可达性能数据

由于操作方式不同, 相同稳态工况下空调水系统的性能系数变化较大。为了获取可达性能数据, 需提取所有统计数据中较高的性能系数, 即 y_k 下的平均性能系数 $X_{cop,k}$ 大于统计周期内的总平均性能系数 $X_{cop,0}$ 。同样, 虽然空调水系统的性能系数可能

出现较大值, 但若该较大值的出现频次太少, 则说明性能系数值存在偶然性, 不能很好地反映机组在大部分工况下的性能。即考察所有统计点中同 y_k 相类似的 Q 和 t_{hj} 邻域内统计点, 若性能系数大于 $X_{cop,k}$ 的统计点不超过 N_0 (设定的滑动窗口长度) 个点, 则保留数据 y_k , 否则不保留 y_k 。通过以上方法对统计的数据进行筛选, 既能尽量保留性能系数较大的值, 又能避免保留数据量太少导致的求解结果偶然性。

2.5 拟合能耗预警曲线

基于证据理论和神经网络, 通过历史数据, 提取反映设备、系统正常运行的状态点。但是由于设备运行的历史数据不一定能覆盖实际运行状态下水系统设备的所有运行情况, 故在拟合能耗预警曲线的过程中, 需要合理地补足缺失的状态点。本文应用证据理论的方法对缺失状态点进行补足。

证据理论是一种处理不确定性信息的方法, 具备直接表达不确定性的能力, 与缺失值的特性相符合, 因此可用于缺失值填补等不完整数据的分析过程^[3]。

对于需补足的状态点进行分析, 抽取其中已知的确定量, 利用属性间相关性的填补方法和属性间的关联建立回归模型, 并基于完整样本求解模型参数, 进而估计缺失值。

应用 GA-BP (神经网络遗传算法), 通过选取反映设备的正常、健康的运行特性作为模型的参考点 (证据点), 构建水系统设备在不同工况下能耗水平的可达性能数据的证据库。在通风空调系统实际运行时, 基于当前工况下的运行数据, 以及结合证据理论和 GA-BP, 设置合理的模型拟合置信区间, 计算当前运行工况下的能耗合理范围, 进而实现能耗预警曲线的拟合。

基于空调水系统运行数据全局搜索和 GA-BP 算法的冷水机组能耗合理范围, 计算得到不同工况下对应的 COP 以及各设备的能耗范围。与实际运行数据对比, 如果 COP 偏低, 则进行预警, 并分析能耗异常原因; 如果 COP 偏高, 则更新模型。

2.6 模型测试

能耗预警模型在实际应用之前进行了模型测试。测试条件为: 假设在总制冷量 Q 一定时, 由冷水机组自动控制冷冻水温度 t_{ldsout} 定值, 冷冻水流量 Q_{lds} 由冷冻水泵控制, 冷冻水回水温度 $t_{lds,in}$, 根据 Q 自动计算; 冷却水回水温度根据环境温度手动设置

为一个定值,冷却水流量由冷冻泵控制,冷却水出水温度由热平衡计算;冷却塔风量由放热量根据热平衡计算,进而计算冷却塔能耗。以下是2种模型模拟的报警情况案例。

1) 在仿真计算中,对 $Q_{lds,i}$ 设置1个正偏置,则冷冻水回水温度升高,冷水机组蒸发温度升高,导致冷水机组能耗升高,同时冷却泵能耗增加,能耗预警模型根据设置条件,判断为大流量、小温差,则报警。

2) 在仿真计算中,对冷却水回水温度设置1个正偏置,表示冷却塔换热性能下降。此时,冷却水出水温度响应升高,冷水机组能耗增加,能耗预警模型判断冷却塔换热效果下降。

根据能耗预警模型的判断结果,可以对冷冻水泵、冷却塔等终端设备提前进行检查,未来也可以与通风空调智能运维专家知识库相结合,提供更有效和快速的设备维护和维修方法。

3 案例分析

贵阳轨道交通2号线能源管理系统采用了本文中的通风空调系统能耗预警模型。

在考察了通风空调系统不同设备的能耗量后,首次建立预警模型决定选取单位时间能耗量最大的冷水机组作为控制对象。在贵阳轨道交通2号线能源管理系统中预置上述预警算法,通过能源管理系统采集冷水机组运行数据及能耗数据,通过稳态提取、数据筛选及阈值系数计算级曲线拟合,判断冷水机组能耗应达值与实际之间的差距。

当发生了能耗预警事件时,能源管理系统可自动推送设备能耗预警信息,提醒运营维护人员及时对设备进行检修和检查,减少因通风空调设备“带病”运行而造成的能源浪费。

自2021年4月贵阳轨道交通2号线正式投入运行以来,2021年空调季冷水机组运行数据较少,

未来随着该线路冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵等通风空调水系统设备运行数据的增多,能耗预警模型的准确性将大大增加。

4 结语

地铁通风空调系统能耗预警模型基于大量运行数据,将数据统计、证据理论和神经网络遗传算法相结合,能及时判断水系统中的设备能耗异常问题,并发出预警,减少由此造成的能量浪费,降低城市轨道交通运营成本。该预警模型具有良好的适用性,经改动可应用在组合式空调机组等其他通风空调系统设备上,从而提高通风系统设备的稳定性,进一步降低地铁通风空调系统的能耗。

参考文献

- [1] 罗佳. 地铁通风空调系统节能运行策略研究[D]. 广州: 广州大学, 2015.
LUO Jia. Study on operation strategy of energy-saving in ventilation and air conditioning system of metro[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [2] 陈小龙. 证据驱动型火电机组状态预警方法及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
CHEN Xiaolong. Research of evidence driven condition early warning method with application in power plant[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [3] 赖晓晨, 张立勇, 刘辉, 等. 基于机器学习的数据缺失值填补: 理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
LAI Xiaochen, ZHANG Liyong, LIU Hui, et al. Missing value imputation based on machine learning: theory and method[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [4] 王冬. 基于证据理论的定量风险评价不确定性分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
WANG Dong. Uncertainty analysis in qualitative risk assessment based on evidence theory[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.

(收稿日期: 2021-12-19)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821