

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-337-07

基于欧氏距离最小化的 非常规工况空调水系统运行关联准则研究

禹富偲¹ 王玉杰² 徐新华²

(1. 重庆市轨道交通(集团)有限公司 重庆 400000;
2. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074)

【摘要】 对某地铁空调系统进行了模拟, 获得大量运行数据, 利用关联准则数据挖掘方法对运行数据进行挖掘, 得到了能够指导空调系统高效运行的关联准则。对于未能挖掘得到关联准则的部分工况(非常规工况), 提出了一种基于欧氏距离最小化的方法, 对中央空调水系统运行的非常规工况进行了关联准则补充, 并以两种非常规工况为例进行对比分析。两应用实例中采用从近到远的三个欧氏距离补充的关联准则对系统进行模拟运行。两实例的系统能效分别为5.72、5.63、5.46与5.71、5.53、5.04。与相对应的既有模式能效相比, 最高能效分别提升了1.4与1.7。结果表明采用最小欧氏距离补充的空调水系统运行关联准则能够很好地保证空调系统高效运行。

【关键词】 欧氏距离最小化; 关联准则; 空调水系统; 非常规工况
中图分类号 TU832.3 文献标识码 A

Study of Operational Associated Rules of Air-conditioning Water System under Unconventional Conditions Based on Minimization of Euclidean Distance

Yu Fusi¹ Wang Yujie² Xu Xinhua²

(1. Chongqing Rail Transit (Group) Co., Chongqing, 400000;

2. Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, 430074)

【Abstract】 An air-conditioning system in an actual building is simulated, and the associated rule data mining method is used to mine these operation data. The obtained associated rule may ensure the efficient system operation. For some operation conditions (i.e., unconventional conditions), associate rules may not be obtained. This study proposes a method based on the Euclidean distance minimization to supplement the associated rules for the operation of the central air-conditioning water system under unconventional conditions. Two instances are presented to explain the supplemented associated rules. The supplemented associate rules are applied for these two instances. The system operation efficiency of these two instances with the supplemented associated rules by the Euclidean distance from near to far are 5.72, 5.63, 5.46 and 5.71, 5.53, 5.04 respectively. Compared with the results by using the coincident existing mode, the high COP of the closest correlation criterion are improved by 1.4 and 1.7 respectively. The results show that the associated rules supplemented by minimizing Euclidean distance for unconventional conditions may ensure high efficient operation of the air-conditioning system.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0605105)

作者简介: 禹富偲(1985.12-), 男, 硕士, 高工, E-mail: 317583739@qq.com

通讯作者: 徐新华(1972.01-), 男, 博士, 教授, E-mail: bexhxu@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2023-02-03

【Keywords】 Minimazation of Euclidean distance; Associated rule; Air-conditioning water system; Unconventional operation condition

0 引言

2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和是我国重大发展战略。全球建筑能源消耗占总能源消耗的三分之一以上,并且是二氧化碳排放的重要组成部分^[1]。在建筑能耗中,空调系统运行能耗占比可达 40%,减少空调系统的能耗是建筑节能中的重要工作^[2-4]。在目前的空调系统运行中,制冷机和水泵等常处于部分负载状态下,运行效率低^[5,6]。近年来,随着物联网等信息技术的快速发展和建筑自动化水平的提高,专业人员可以获得大量的空调系统运行数据,如何从大数据中获得有用的知识,用于指导空调系统的运行,引起了学者们的关注^[7]。数据挖掘技术快速发展,为处理海量数据并从中发现有价值的信息提供了新的方法,比如通过构建建筑自动化数据知识挖掘框架实现非正常工况识别与故障识别^[8]、基于人工智能的故障检测^[9]、基于 BP 神经网络的故障诊断^[10]和基于数据挖掘的空调系统控制方法^[11]等。关联规则是数据挖掘技术中的一种,主要用于发现数据中频繁出现的模式^[12]。数据挖掘在空调领域也有许多应用。王炳文^[13]采用 *Apriori* 算法^[12]对冷源系统各种运行模式下的典型工况的历史运行数据进行了强关联规则挖掘,结果表明关联规则可以提升冷源系统的整体能效,而且不需建模,实用性强。李冠男^[14]提出一种基于聚类分析与关联规则挖掘相结合的方法,将能耗数据划分成了几个簇,识别出几种可以解释的系统能耗模式,并且在各个能耗模式下利用 *Apriori* 算法进行关联规则分析,可以识别出异常用能模式。王玉杰等^[15]采用关联规则方法对空调水系统的运行参数进行了挖掘,获得在不同室外空气温湿度与建筑冷量需求条件下高效运行的空调系统运行参数,以指导实际空调系统的运行。

利用关联规则对空调水系统运行数据进行挖掘,可以得到在不同的工况条件下,能够保证系统高效运行的水系统参数,比如,冷冻水供水温度、供回水温差、冷却水回水温度和供回水温差等。但是,采用关联规则进行数据挖掘时,会对运行数据

集进行清洗与筛选,在此过程中,一些工况会被剔除。另一方面,在实际运行中采集的工况不可能涵盖系统在全生命周期内的所有工况。因此,在采用关联规则进行规则集的挖掘时,如何获得关联规则集中的工况(常规工况)外的其他工况(非常规工况)的运行设定值,对于实际工程的运行应用非常重要。因此,本文提出一种基于欧几里得距离最小化的非常规工况的空调水系统运行关联规则的挖掘方法。

1 关联规则挖掘介绍

Apriori 算法是常用的一种关联规则的数据挖掘算法^[14],该算法使用频繁项集性质。*Apriori* 算法采用支持度、置信度及提升度来描述获得的规则的质量。支持度是代表同时包含 A , B 的集合在所有事务中出现的频率,即支持度乘总数据量为该规则所使用的数据量,如式(1)。置信度是 AB 同时出现的事项占 A 事项的比例,如式(2)。提升度是用于评估关联规则有效性的指标,如式(3)。定义支持度为:

$$\text{support}(A \rightarrow B) = P(A \cup B) \quad (1)$$

其中, $P(A \cup B)$ 代表事务包含集合 A 和 B 的并(即包含 A 和 B 中的每个项)的概率。

定义置信度为:

$$\text{confidence}(A \rightarrow B) = P(B|A) = \frac{\text{support}(A \cup B)}{\text{support}(A)} \quad (2)$$

定义提升度为:

$$\text{lift}(A \rightarrow B) = P(B/A) / P(A) \quad (3)$$

提升度表示在含有 A 的条件下,同时含有 B 的概率,与 B 同时发生的概率之比。

满足最小支持度和最小置信度的规则叫做强关联规则,但是强关联规则也是有有效和无效之分的,如果提升度 $\text{lift}(A \rightarrow B) > 1$,那么规则就是有效的规则,如果提升度 $\text{lift}(A \rightarrow B) < 1$,那么规则就是无效的规则,特别的,当 $\text{lift}=1$ 的时候,代表 A 和 B 是相互独立的。

关联规则算法步骤流程如图 1 所示。首先对给

定边界条件下的数据项的支持度、置信度以及提升度进行计算, 再按照算法得到频繁集, 根据规则等级的原则对得到的规则标签进行排序, 并剔除冗余规则。采用类别规则标签 *CARs* (*Category*

Association Rules) 按照等级进行排列, 并且经过筛选, 保留等级更高的规则。重复上述过程, 遍历给定的所有边界条件下的数据项处理与筛选, 最后获得所有的给定边界条件下的关联准则。

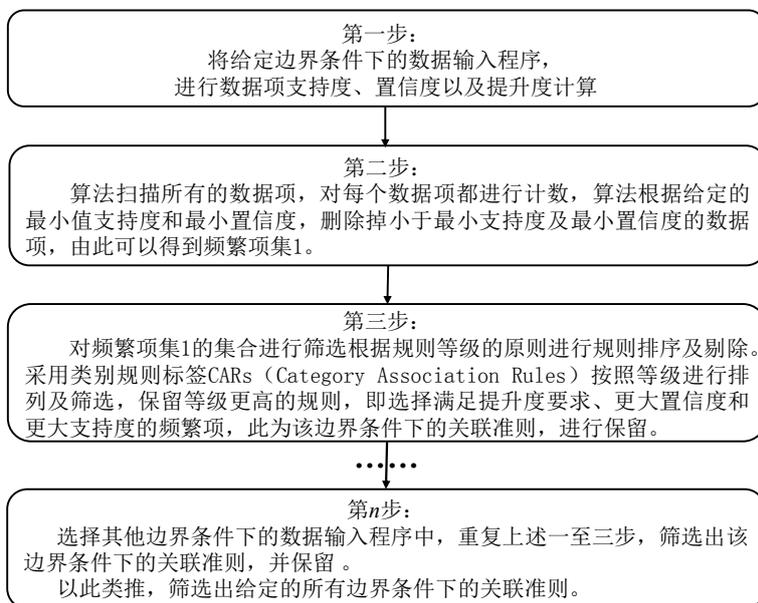


图 1 关联准则算法步骤流程示意图

Fig.1 Schematics of the procedure of the associated rule algorithm

2 非常规工况关联准则挖掘方法

2.1 常规工况的关联准则

本文以一实际建筑的中央空调系统为研究对象, 在 TRNSYS 软件中对建筑的传热与空调系统进行了建模。通过模拟, 获得在不同的冷冻水供水温度和不同的冷却水泵运行频率等众多工况下的空调系统运行数据^[17]。其中, 冷冻水供水温度设定值为 7℃-18℃, 1℃ 间隔; 冷却水泵频率为 24Hz 至 50Hz, 2Hz 间隔; 通过控制冷冻水供水流量控制室内温度在 26 至 28℃ 之间; 模拟数据以分钟计, 初步得到的数据量共计约 8830 万条。对数据进行预处理, 舍弃了室内温度不达标的数据, 得到了五千余万条可用数据。

选取了与空调水系统运行有关的参数, 对应第 1 节中的 A 事项包括冷冻水供水温度、冷冻水供水回水温差、冷却水回水温度和冷却水供水温差, B 事项为 *COP*, 然后运用关联准则数据挖掘方法, 获得了在不同的室外空气温湿度和系统冷量需求的

范围内, 系统的最佳运行参数, 即获得了该空调系统在不同工况下的高效运行关联准则^[16]。支持度代表的是一条关联准则的边界条件下, 所使用的数据量占总数据的比例。在本文研究案例中, 以分钟为单位, 数据量为几千万条, 支持度大于 1% 以上时, 在进行关联准则挖掘时, 有几十万条以上的数据量, 数据量及代表性足够。在大数据挖掘领域中, 一般的置信度设置为 70% 以上^[13,14]。在本研究中, 最小支持度取 1%, 最小置信度取 70%, 最小提升度取 1%。表 1 是部分工况下的关联准则。

在进行关联准则挖掘过程中, 在某些工况下, 未能找到满足支持度和置信度的关联准则, 即在该冷量需求、室外温度和湿度条件下, 未有对应的关联准则可用。在实际运行中采集的工况不可能涵盖系统在全生命周期内的所有工况, 并且可能会出现极端工况, 所以需要关联准则进行补充。本研究采用最近距离原则进行关联准则补充, 距离采用欧几里德距离。

表 1 关联准则表（常规工况）

Table 1 Table for associated rules (Conventional conditions)

边界条件			A 事项			B 事项		评估指标		
冷量需求/kW	室外温度/°C	相对湿度/%	冷冻水供水温度设定值/°C	冷冻水回水温差/°C	冷却水回水温差/°C	冷却水回水温度/°C	系统 COP	支持度/%	置信度/%	提升度
350-400	25-30	40-60	7	6.2	5.9	27.6	5.3	7.3	82.4	1.6
350-400	25-30	40-60	8	6.2	3.2	30.1	5.3	1.2	92.3	1.8
350-400	25-30	40-60	9	6.2	3.2	30.1	5.3	1.7	88.9	1.7
350-400	25-30	40-60	10	6.2	3.2	30.1	5.3	1.4	72.2	1.4
400-450	30-35	40-60	7	6.2	5.9	27.6	5.3	1.0	100	3.2
400-450	30-35	40-60	8	6.2	4.5	28.9	5.3	1.0	100	3.2
400-450	30-35	60-80	9	6.2	5.9	28.9	5.3	1.2	71.8	1.8
400-450	30-35	60-80	10	6.2	6.8	27.6	5.3	1.1	89.3	2.2

2.2 欧氏距离介绍

欧氏距离是欧几里德距离的简称，指的是在 m 维空间中的两个点之间的距离，如式（4）。当考虑三维空间时，两点之间欧氏距离表示为式（5）。

$$d(x, y) = \|x - y\|_2 \tag{4}$$

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2} \tag{5}$$

其中， (x_1, x_2, x_3) 为点 x 的坐标值， (y_1, y_2, y_3) 为点 y 的坐标值， $d(x, y)$ 为两点之间的距离。

欧氏距离进一步推广到加权欧氏距离，用来处理各个维度分布不一样的情况，如式（6）。

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i - y_i}{w_i}\right)^2} \tag{6}$$

其中， w_i 为第 i 维分量的权重。

2.3 非常规工况关联准则挖掘

将边界条件中的冷量需求以 50kW 为单位分成 12 个区间，分别是 [0,50)、[50,100)、[100,150)、[150,200)、[200,250)、[250,300)、[300,350)、[350,400)、[400,450)、[450,500)、[500,550) 和 [550,+∞)，从前往后依次定义区间为 01 到 12；将边界条件中的室外空气温度分成 [0,15)、[15,20)、[20,25)、[25,30)、[30,35)、[35,40) 和 [40,+∞] 七个区间，从前往后依次定义区间为 1 到 7；将边界条件中的室外空气湿度分为 [0,40)、[40,60)、[60,80) 和 [80,100]

四个区间，从前往后依次定义区间为从 1 到 4，所以经过排列组合一共可能有 $12 \times 7 \times 4 = 336$ 条关联准则。把这三个因素对应的区间的序号连接起来，定义为一个四位数的编号，冷量需求、室外空气温度和室外空气湿度分别是三维空间的三个坐标轴，编号代表其在三维空间中的位置点。比如，需求冷量区间 [0,50)，室外空气温度区间 [0,15)，室外空气湿度区间 [0,40) 对应的三维空间的位置点为 0111，如图 2 所示。判断三维空间中的位置点是否有关联准则对应，如果没有，与它距离最短的有关联准则的点所在的关联准则作为该位置点的关联准则。对于没有关联准则的空间位置点，可能有不同的有关联准则的空间位置点与其距离相等，比如 0332 在三维空间中与之距离最短即为 1 的点有 0232、0331、0232 等。考虑到需求冷量因素、室外空气温度因素、及室外空气湿度因素的权重不同，点 0332 与点 0232、0331、0232 的距离是不一样的。

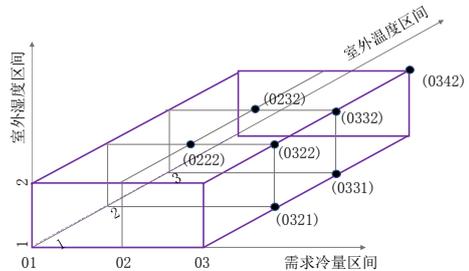


图 2 三维空间位置点示意图

Fig.2 Schematics of the point position in three-dimension space

本研究中定义三个因素, 即需求冷量、室外空气温度、室外空气湿度的权重, 以考虑这些因素对系统能效即能耗的影响作用。直接的影响是需求冷量, 而室外空气温度是通过围护结构即新风影响需求冷量的, 室外的空气湿度主要是通过冷却系统影响冷却水的回水温度进而影响系统的能耗。对这三个因素对空调系统能效与能耗的影响作用进行定性的分析, 应该需求冷量影响最大, 室外空气温度次之, 湿度影响最小, 具体的量化很难确定。在本算例中, 需求冷量因素的权重取为 50%, 室外空气温度因素的权重取为 30%, 室外空气湿度因素

的权重取为 20%。

冷量需求在 350kW-400kW 范围内、温度在 25℃-30℃ 范围内以及相对湿度在 80%-100% 范围, 与冷量需求在 450kW-500kW 范围内、温度在 20℃-25℃ 范围内以及相对湿度在 40%-60% 范围, 使用模拟得到的数据未能找到在此边界条件下, 满足支持度和置信度范围的关联准则。使用上述方法找到与之距离最近的关联准则, 同时也取次近及第三近的关联准则, 如表 2 所示。取另外两个相近的准则, 只是为了分析在采用不同准则时系统的能效情况, 详细比较分析见下一节。

表 2 关联准则表 (非常规工况)

Table 2 Table for associated rules (Non-conventional conditions)

冷量需求/kW	边界条件		A 事项				B 事项		评估指标			备注
	室外温度/℃	相对湿度/%	冷冻水供水温度设定值/℃	冷冻水供回水温差/℃	冷却水供回水温差/℃	冷却水回水温度/℃	系统 COP	支持度/%	置信度/%	提升度	备注	
350-400	20-25	80-100	12	5.6	8.4	24.8	5.6	1.3	81.8	2.7	第二近距离准则	
350-400	25-30	60-80	7	6.2	5.9	27.6	5.3	2.2	82.7	1.9	第三近距离准则	
400-450	25-30	80-100	7	6.2	5.9	27.6	5.3	1.4	72.7	1.6	第一近距离规则	
400-450	20-25	60-80	12	5.0	9.1	23.5	5.6	1.9	80.0	13.0	第二近距离准则	
450-500	25-30	40-60	12	4.5	6.8	27.6	5.0	1.2	83.3	1.6	第一近距离准则	
450-500	25-30	60-80	10	6.2	9.9	26.1	5.0	2.1	71.8	1.3	第三近距离准则	

3 应用结果分析

根据上述方法补充非常规工况的关联准则, 可得到在所有边界条件下的关联准则, 关联准则的应用流程如图 3 所示。在模型中, 关联准则的应用流程是: 读取建筑物冷量需求、空气温度与湿度数据, 模型平台中的关联准则应用策略模块经过判断可以寻找该边界条件下的最优参数值, 即冷冻水供水温度设定值、冷却水供回水温差设定值、冷却水回水温度设定值、冷冻水供回水温差设定值。通过 PID 控制器控制冷却水泵、冷冻水泵的运行频率从而控制冷却水供回水温差、冷冻水供回水温差, 通过 PID 控制器控制冷却塔风机转速从而控制冷却

水回水温度, 使得系统按照关联准则表中的最优参数来运行。在进行运行效果比较分析时, 以采用既有模式运行的结果作为参考。既有模式是指空调水系统中制冷机冷冻水供水温度设定为 7℃, 水泵与冷却塔风机以工频运行。关联准则运行模式, 就是采用关联准则表中的最优参数进行系统运行, 即按照冷冻水出水温度设定值、冷却水回水温度设定值、冷冻水泵运行频率设定 (即改变冷冻水供回水温差)、冷却水泵运行频率设定 (即改变冷却水供回水温差) 进行系统的运行。

如表 2 所示, 冷量需求在 350kW-400kW 范围内、温度在 25℃-30℃ 范围内以及相对湿度在

80%–100%范围（即工况 1）时没有对应的关联规则。此时采用与该工况点距离相近的工况点的关联准则进行系统的运行。分别用与该工况点相近的工况点的关联准则与既有运行模式对该系统在该边界条件下的运行进行模拟，得到结果如图 4 所示。在此需要说明的，空调系统的需求冷量随时间不断变化，而且室外的空气温度与湿度也不断变化，对于一个采用冷却塔冷却的空调水系统而言，其 COP 是不断变化的。在这里给出的是在冷量需求在 350kW–400kW 范围内、温度在 25℃–30℃ 范围内以及相对湿度在 80%–100% 范围的不同的状态点。COP 平均值为不同状态点的 COP 的平均值。

用该关联准则运行的能效要始终高于既有模式的运行能效。

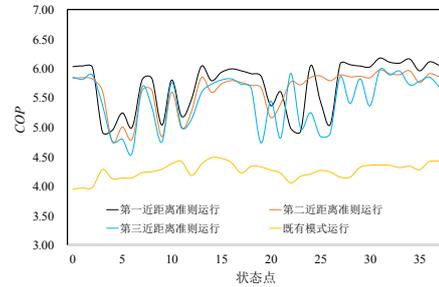


图 4 采用不同距离工况点的关联准则运行 COP 对比 (工况 1)

Fig.4 Comparison of COP when using associated rule at different condition points (Condition 1)

冷量需求在 450kW–500kW 范围内、温度在 20℃–25℃ 范围内以及相对湿度在 40%–60% 范围（即工况 2）时，也没有对应的关联准则。分别用与之最近的工况点的关联准则与既有运行模式模拟该边界条件下的运行，得到结果如图 5 所示。第一近、第二近、第三近关联准则和既有模式运行的平均 COP 分别为 5.71、5.53、5.04 和 4.00。采用第一近距离的工况点的关联准则对该系统运行，能效也有明显的提升。从上述实例可以看出，对未能挖掘得到的关联准则的工况，采用欧几里得距离方法补充的关联准则能够保证系统高效运行，而且在大部分状态点中，距离越近，COP 越高，运行效果越好。

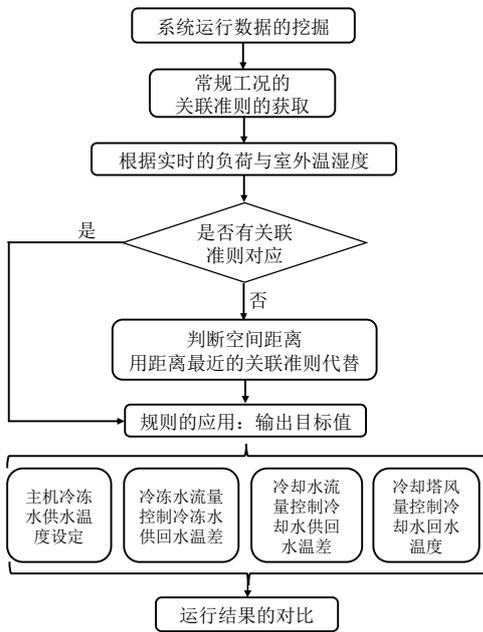


图 3 关联准则运用流程图

Fig.3 Flowchart of the application of associated rule

图 4 结果表明，第一近、第二近、第三近距离的工况点的关联准则和既有模式运行的平均 COP 分别为 5.72、5.63、5.46 和 4.26。既有运行模式指的是空调水系统中制冷机冷冻水供水温度恒定，水泵与冷却塔风机以工频运行。采用第一近距离的工况点的关联准则对该系统运行，系统 COP 比既有模式运行时的 COP 提高 1.46。在图中部分状态点出现按照第三近距离准则运行的能效超过了按照第二近与第一近距离准则运行的能效，有可能是在设置需求冷量、室外空气温度、室外空气湿度的影响权重不是最优的。但是，在非常规工况下，采用欧式距离获得了该工况下的运行关联准则，而且采

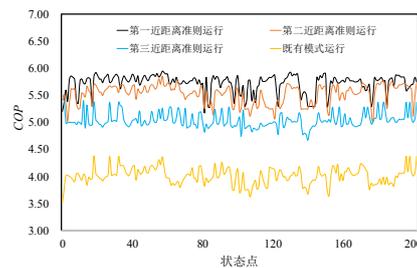


图 5 采用不同距离工况点的关联准则运行效果对比 (工况 2)

Fig.5 Comparison of COP when using associated rule at different condition points (Condition 2)

在上述给出的两个案例中，都出现了按照第三近距离准则运行的能效超过了按照第二近与第一近距离准则运行的能效，但是都显著高于既有运行模式的能效。在这里需要指出的是，在采用关联准

则进行挖掘时,由于数据的过滤与删除,以及用于关联准则挖掘的数据不可能涵盖所有的运行工况。因此在关联准则挖掘完后,可能出现一些新的运行工况(本文称为非常规工况)找不到关联准则,本文的目的就是提供一种方法,以获得非常规工况的运行关联准则。而且这一关联准则可能不是最优的,但是提供了一个关联准则,按照该准则运行,可以比既有运行模式的能效要高。

4 结论

本文利用关联准则的数据挖掘方法,对空调系统运行数据进行挖掘,获得了能够保证空调系统高效运行的参数(冷冻水供水温度设定值、冷冻水供水回水温差设定值、冷却水供水回水温差设定值和冷却水回水温度设定值)。挖掘得到的关联准则不一定涵盖所有运行工况,在部分工况(即非常规工况)下没有对应的关联准则。针对这种情况,本文提出了一种基于欧氏距离最小化的非常规工况关联准则补充方法,通过对关联准则中的边界条件进行编号,定义各个关联准则对应工况在空间中的位置,将最近距离的有关联准则的空间点的关联准则作为非常规工况位置的关联准则。本文以两个实例对采用这种方法补充的关联准则的可靠性进行了模拟分析。与既有模式相比,两实例采用从近到远的欧氏距离补充的关联准则运行的系统能效分别提升了1.4与1.7。采用欧氏距离最小化的方法补充的关联准则能够很好地保证系统的高效运行。

参考文献:

- [1] International Energy Agency (IEA). Transition to Sustainable Buildings: Strategy and Opportunities to 2050 [R]. 2013.
- [2] ASHRAE, ASHRAE Handbook-Fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., USA, 2009.
- [3] 陈孜虎.基于分布式温度采集技术的中央空调节能运行方案设计[J].制冷与空调,2021,35(1):129-133.
- [4] 冯源,沈薇.购物中心租区空调水系统现状分析及节能改造方案研究[J].制冷与空调,2022,36(3):449-454.
- [5] 蒋小强,龙惟定,李敏.部分负荷下冷水机组运行方案的优化[J].制冷与空调,2009,9(3):96-97.
- [6] 李勇伟,郑庆华,孙艳军,等.数据中心高压冷水机组定性故障诊断模型构建[J].制冷与空调,2020,34(1):53-56,61.
- [7] 王睿.大数据时代物联网技术的应用与发展[J].网络安全技术与应用,2021,(4):67-68.
- [8] C Fan, F Xiao, C Yan. A framework for knowledge discovery in massive building automation data and its application in building diagnostics[J]. Automatic Construction, 2015,50(8):81-90.
- [9] Y Zhao, T Li, X Zhang. Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019,109: 85-101.
- [10] 王玉兵,孙程斌,徐雷,等.基于BP神经网络的小型民机蒸发循环制冷系统故障诊断研究[J].制冷与空调,2020,34(3):316-320,339.
- [11] 何磊.基于数据挖掘技术的复叠空调系统监督控制方法——以辐射地板-组合式空调器复叠系统为例[J].制冷与空调,2018,32(2):113-118.
- [12] R Agrawal, T Imieliński, A Swami. Mining association rules between sets of items in large databases[J]. Energy, 1993,22(2):207-216.
- [13] 王炳文.基于数据挖掘的中央空调冷源系统运行参数优化研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [14] 李冠男.基于数据挖掘的制冷空调系统故障诊断与用能模式识别[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [15] 王玉杰,邓亚宏,伍学智,等.空调水系统运行参数关联准则研究[J].制冷与空调,2022,36(1):149-154.
- [16] 王玉杰.基于数据挖掘的空调水系统运行参数优化分析[D].武汉:华中科技大学,2021.