

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-149-06

空调水系统运行参数关联准则研究

王玉杰¹ 邓亚宏² 伍学智² 徐侃¹ 徐新华¹

(1. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074;
2. 中建三局第二建设工程有限责任公司 武汉 430000)

【摘要】 采用关联准则方法对中央空调水系统的运行参数进行了挖掘,得到了在不同室外空气温湿度与建筑冷量需求条件下,能够保证空调系统高效运行的系统运行参数。进一步在该空调系统模拟平台对关联准则的应用效果进行了模拟分析。模拟结果表明,在中等负荷日,采用关联准则中的运行参数(即优化模式)运行与既有模式运行对比,系统的运行效果与能效明显提升。优化后的水系统 COP 在大部分运行时间内比既有模式高 1.5 左右,与关联准则的目标值一致。采用关联准则对该系统进行优化运行,系统节能率为 8.8%。关联准则可用空调系统进行优化控制,并有明显的节能效果。

【关键词】 中央空调; 运行参数; 数据挖掘; 关联准则

中图分类号 TU832.3 文献标识码 A

Study of the Associated Rules of Operation Parameters of an Air-Conditioning Water System

Wang Yujie¹ Deng Yahong² Wu Xuezhizhi² Xu Kai¹ Xu Xinhua¹

(1.Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074; 2.The Second Construction Engineering Co., Ltd of China Construction Third Bureau, Wuhan, 430000)

【Abstract】 This paper presents the data mining of the operation parameters of a central air-conditioning water system by using the associated rule method. The system operation parameters are obtained for ensure the efficient operation of the air-conditioning system under the conditions of different outdoor air temperature and humidity and building cooling demands. Furthermore, the application effect of the associated rule is simulated and analyzed on the air-conditioning system simulation platform. The results show that, for a medium load day, the operation effect and energy efficiency of the system are significantly improved when the performance by using the operation parameters in the associated rule (i.e., the optimal mode) is compared with that by using the existing mode. The water system COP by using the optimal mode is about 1.5 higher than that by using the existing mode during most of the operation period. This COP agrees with the target of the associated rule. The energy saving ratio of the system is 8.8% after the associated rule (i.e., optimal mode) is used. The associated rule can be used to optimize the system operation parameters of the air-conditioning system for practical control. It has obvious energy saving effect.

【Keywords】 Central air-conditioning; Operation parameter; Data mining; Associated rule

基金项目: 国家自然科学基金 (51678263)

作者简介: 王玉杰 (1996.9-), 男, 硕士, E-mail: yujiewang1996@163.com

通讯作者: 徐新华 (1972.1-), 男, 博士, 教授, E-mail: bexhXu@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-08-05

0 引言

2030 年碳达峰和 2060 年碳中和是我国重大

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量的重要组成部

分^[1]。2018 年,中国民用建筑建造能耗为 5.2 亿吨标准煤当量,与民用建筑建造相关的碳排放总量约为 18 亿吨 CO₂^[2]。在建筑能源消耗中,用于空调系统的运行通常占比 30%~40%,空调系统的运行节能是建筑节能工作的一个重点^[3,4]。在中央空调系统设计时,由于设计工况和余量的考虑,设计人员往往会选择型号偏大的制冷主机、水泵和冷却塔等,导致空调系统长期处于最大负荷的 65% 以下运行^[5,6],系统中的水泵风机等仍然以工频或者固定频率运行,造成大量的能源浪费^[7]。

数据挖掘是一种新兴的人工智能技术,它提供了处理海量且复杂数据的新方法^[8]。数据挖掘是一个多学科的学科,集成了统计、机器学习、人工智能和高性能计算等技术。数据挖掘技术在建筑领域的预测^[9,10]、故障检测^[10,11]和控制优化^[11,12]有很多研究与应用。徐欣与田喆^[7]利用多元线性回归的方法预测日平均负荷。实际案例表明,采用该方法的预测精度可控制在 15% 以内。Fan 与 Xiao 等^[13]研究了深度学习的方法在预测建筑物未来 24 小时内冷负荷的应用,结果表明,使用无监督深度学习提取的特征变量作为负荷预测的输入时,可以明显提高预测的准确度。闫军威等^[14]根据空调实际运行数据,利用最小二乘方法对各模型的参数进行辨识,以冷源系统运行设备总能耗最小为目标,探讨基于遗传算法的中央空调冷源系统最佳运行参数值,并将优化的运行参数用于控制进行实验验证。数据挖掘可分为监督分析和无监督分析^[15]。监督分析需要在很多先验知识的基础上进行研究分析。例如,在开发冷水机组能耗预测模型时,预先选择了模型输入,比如冷冻水的进水温度和回水温度以及冷却水的进水温度和回水温度,领域的专业知识告诉我们,这些变量是影响冷水机组能耗的重要变量^[16]。无监督分析可以在没有先验知识或者先验知识有限的情况下发现新颖的知识。无监督分析专注于探索数据的内在结构、关联和模式,因此具有发现潜在有用但先前未知的知识的能力。更重要的是,实施无监督分析的成功较少取决于领域的专业知识且不受高质量标记培训数据的可用性的影响。

采用数据挖掘技术从大量的空调系统日常运行数据中挖掘能够指导空调系统高效运行的参数,能够为空调系统带来可观的节能效果。对中央空调水系统进行参数优化控制研究,提出在不同的边界

条件下,适合中央空调水系统高效稳定运行的状态参数,对于空调系统高效运行、降低运行能耗和延长使用寿命等有着重要的意义。本文提出采用关联规则挖掘的方法,以实际空调水系统为对象,进行数据挖掘,获得空调系统的运行参数与相关边界条件的关联准则,并在模拟平台上进行应用分析,节能效果明显。

1 关联规则数据挖掘介绍

关联规则挖掘是数据挖掘中常用的一种方法,是发现数据中频繁模式的一种重要手段^[17]。它在诸如购物篮、计算机网络、推荐系统和医疗保健等众多应用中都取得了巨大的成功。关联规则的基本概念如下:

交易数据库 (D) 由 n 个不同的项目和 m 个交易组成。 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ 是一组 n 个项目, $D = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 是一组有限的交易。事务 t 是集合 I 中的一组项目 ($t \subseteq I$)。基于支持和置信度度量,提取关联规则 $X \rightarrow Y$ 。规则 $X \rightarrow Y$ 的支持度 (用 α 表示) 是同时包含 X 和 Y 的交易百分比,其中 X 和 Y 分别是规则的左侧和右侧项集。支持度计算为 $|X \cup Y|/m$, 其中 m 是数据库中的事务数,而 $|X \cup Y|$ 是规则的频率。置信度是包含 X 的事务也包含 Y 事务的比例,用 β 表示。置信度的计算方式为 $|X \cup Y|/|X|$, 其中 $|X \cup Y|$ 和 $|X|$ 分别是规则和项目集 X 的支持计数。如果某项集的支持高于最小支持阈值,则该项集很频繁。当规则的置信度高于由 β_{\min} 决定的最低置信度阈值时,规则就很强。

Apriori 算法是常用的一种关联准则的数据挖掘方法^[13]。该算法使用频繁项集性质。大致思想就是逐层搜索,首先,它会扫描数据库里面的所有数据,计算出每一种类型的数据个数,保留那些满足最小支持度的数据类别。其次,找到第一个频繁项集,然后从剩余项集里找出第二个频繁项集。以此类推,不断寻找,直到找不出来新的频繁项集为止。提升度是一个表示规则挖掘是由有效的参数,定义为:

$$lift(X \rightarrow Y) = P(Y/X) / P(X)$$

该定义表示在含有 X 的条件下,同时含有 Y 的概率,与 Y 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准则,但是强关联准则也是有有效和无效之分的。如果提升度 $lift$

($X \rightarrow Y$) > 1, 那么规则就是有效的规则; 如果提升度 $lift(X \rightarrow Y) < 1$, 那么规则就是无效的规则; 特别的, 当 $lift=1$ 的时候, 代表 X 和 Y 是相互独立的。

2 空调水系统及模拟分析

2.1 空调系统介绍

本文以中央空调水系统为研究对象, 如图 1 所示。该系统为某地下空间提供冷量。该系统通过冷却塔制取冷却水, 冷冻水由制冷机制取, 末端为空气处理机组, 有两台冷冻水泵和两台冷却水泵。制冷机最小运行负载为 15%。系统中的水泵与风机全部采用变频控制。制冷机额定制冷量为 534.3kW, 蒸发器额定流量为 92m³/h, 冷凝器额定流量为 110m³/h, 额定功率为 104.9kW。冷冻水泵额定流量为 171m³/h, 功率为 22kW, 扬程为 32.7mH₂O。冷却水泵额定流量为 163.5m³/h, 功率为 18.5kW, 扬程为 29.3m。冷却塔额定冷却水流量 150m³/h, 风机功率 5.5kW, 冷却水进出水的设计温度 37/32℃。水系统设置 A、B 支路为大空调机组提供冷冻水, C、D 为小空调机组提供冷冻水。

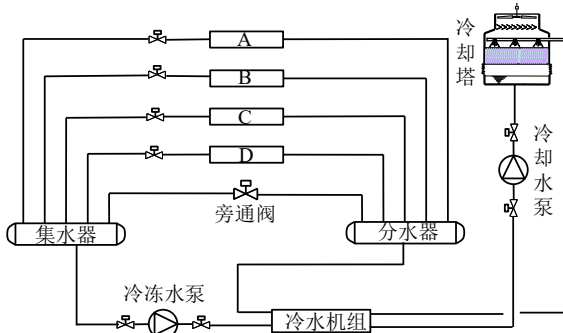


图 1 空调水系统示意图

Fig.1 Schematica of air conditioning water system

2.2 系统模拟及标定

本文在 TRNSYS 软件中对建筑的负荷与空调系统进行了建模, 通过制冷机实际运行参数对制冷机模型进行验证, 采用实际测量数据对冷却塔、空气处理机组 (AHU) 和水泵等进行模型验证。本文采用的冷机模型^[18]考虑了机组内部参数, 能够较为准确地模拟机组的运行。冷却塔模型采用传热单元法 (NTU) 根据进口参数计算出口空气及冷却水出水状态。该方法先假定出口空气湿球温度, 利用热交换器换热原理采用迭达的方法进行出口状态的计算, 在此过程中, 假定刘易斯数为 1, 同时忽略冷却塔侧壁的传热。本文所用的 AHU 模型是

TRNSYS 中自带的组件 Type32。图 2 是制冷机的模型预测与实际测量功率对比, 误差在±5%之间。图 3 是冷却塔预测模型与实际测量出水温度对比, 误差范围在+2%~5%之间。

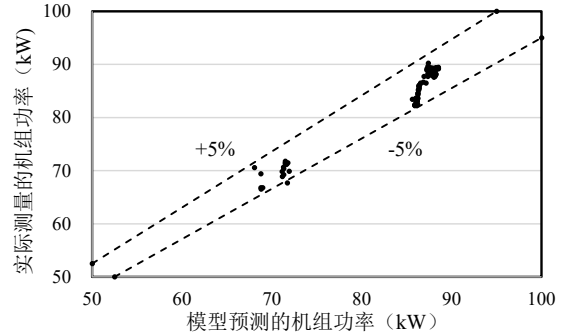


图 2 模型与实际测量的制冷机功率对比

Fig.2 Comparison of the model predicted chiller power and the measurement

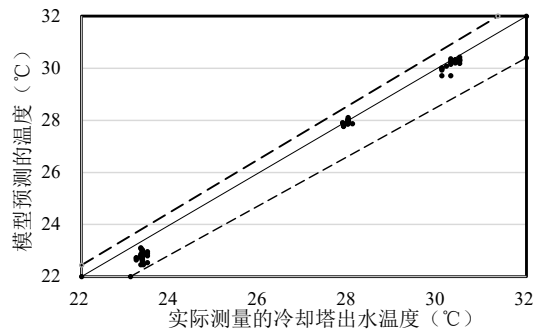


图 3 冷却塔模型预测与实际测量的冷水出水温度对比

Fig.3 Comparison of the cooling water outlet temperatures of the cooling tower model prediction and the measurement

2.3 挖掘数据样本

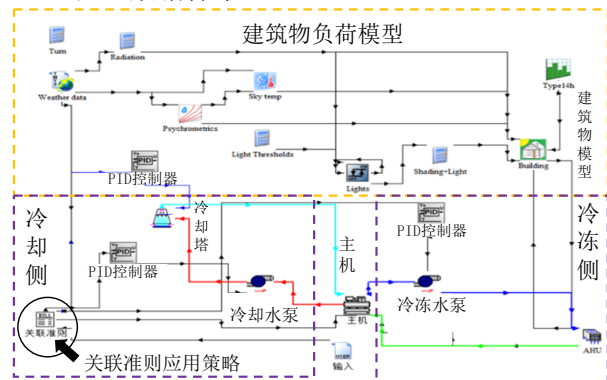


图 4 TRNSYS 中的建筑物与空调系统模型

Fig.4 Models of the building and the air conditioning system in the TRNSYS platform

将空调水系统模型与建筑物负荷模型耦合在一起，空调水系统模型主要包括制冷机、冷水泵、冷却塔集管网等。在模型中，制冷机输出的冷冻水通过冷冻水泵输送至 AHU 中经过换热后返回到制冷机。从 AHU 中出来的低温空气送至室内空间，用 PID 控制器控制冷冻水泵的频率来控制冷冻水流量，进而控制室内空间的回风温度，使得回风温度维持在 28℃ 左右，送风量恒定。在模拟平台运行过程中，分别给定不同的制冷机冷冻水出水温度设定值，从 7℃ 至 18℃，以 1℃ 为间隔。在空调系统的冷却水侧，制冷机输出的冷却水经过冷却塔散热返回到制冷机中，分别给定不同的冷却水泵运行频率，从 24Hz 至 50Hz，每 2Hz 为间隔。通过上述的运行策略，可以得到大量的空调水系统运行数据，主要关注数据为制冷机冷冻水出水温度、冷冻水流量和回水温度，冷却水流量、冷却水供回水温度，各个设备的能耗与系统能效等。图是 TRNSYS

表 1 是部分工况下的关联准则。

中的建筑与空调系统的耦合模拟平台模型。图中上半部分是建筑物的负荷模型，下半部分是空调水系统模型，左侧是冷却侧，右侧是冷冻侧，中间是制冷机。

3 系统运行参数关联规则挖掘

本文选取了与空调水系统运行有关的水系统运行参数，包括冷冻水供水温度、冷冻水温差、冷却水回水温度、冷却水温差，以及室外空气温度、湿度与系统需求冷量为影响因素。将模拟得到的数据采用 Apriori 算法进行，获得在不同的室外空气温湿度和系统冷量需求的边界条件下，能够让空调水系统高效运行的参数，即（冷冻水供水温度、冷冻水温差、冷却水回水温度、冷却水温差）→（水系统 COP）样式的关联准则，

表 1 关联准则表

Table 1 Associated rules

制冷量 /kW	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
100-150	15-20	60-80	16	3.1	2.6	19.8	5.6	2.4	72.4	6.4
100-150	15-20	80-100	16	3.1	2.6	21.0	5.6	1.8	76.2	8.7
100-150	20-25	60-80	14	4.0	3.8	22.2	6.0	1.9	70.8	4.6
100-150	20-25	60-80	16	3.5	3.2	21.0	6.0	1.0	78.3	4.9

4 关联规则应用及结果分析

本节对挖掘得到的关联准则的有效性和在中央空调水系统运用的节能性进行分析。首先按照实际的运行模式进行模拟，得到整个制冷季按照既有模式运行的数据。既有模式即为冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔风机等工频运行，主机供水温度恒定，不随冷量需求变化而调整。关联准则运行模式则是通过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（见图 5 左下角）经过判断可以寻找该边界条件下的最优参数值（即目标值），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。通过 PID 控制器控制冷却水泵、冷冻水泵的运行频率进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。将模型中按照关联准则运行得到的各项数据与实际测量（即既有模式的运行数据）的数据进行对比，分析关联准则的有效性和节能潜力。**Error! Reference source not found.**图 5 为关联准则的优化应用流程图。

究

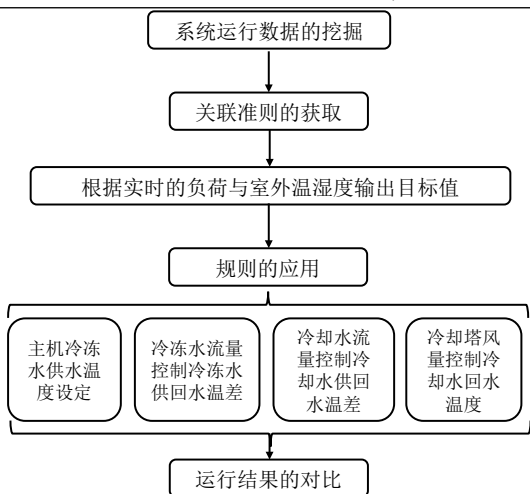


图 5 参数优化运用流程图

Fig.5 Implementation flowchart of parameter optimization

本研究对空调制冷季进行了优化运行模拟分析, 选择中等负荷日的数据进行展示分析。图 6 与图 7 分别是某中等负荷日的室外空气温度和相对湿度与空调系统的需求冷量。图 8 是采用关联准则前后(即既有模式与优化模式)的冷冻水供水温度。优化后冷冻水供水温度大部分运行时间内高于既有模式运行的供水温度, 与关联准则的目标值一致。图 9 是优化前后冷冻水供水回水温差对比图, 从图中可以看出优化后冷冻水温差大于优化前的温差, 与关联准则的目标值基本一致。图 10 是冷却水回水温度对比图, 从图中可以看出优化模式的回水温度比既有模式的回水温度低。图 11 是优化前后水系统 COP 对比图, 图中的“目标 COP”曲线是在该负荷日运行工况下关联准则中对应的 COP 数值。从图中进一步可以看出, 在一部分的运行时间内, 优化后比优化前的水系统 COP 提升了 1.5 左右(水系统的能耗包括冷水机组、冷冻泵、冷却泵、冷却塔风机的电耗, 不包括末端的能耗), 并且在全天运行过程中, 优化模式的空调水系统 COP 比关联规则对应的 COP 曲线略低, 但很接近, 说明了关联准则的有效性。在该负荷日下, 系统既有运行模式的水系统能耗为 1869.6kWh, 采用关联准则的优化运行模式的水系统能耗为 1705.7kWh, 节能率为 8.8%, 采用关联准则进行空调系统的优化运行有明显的节能效果。

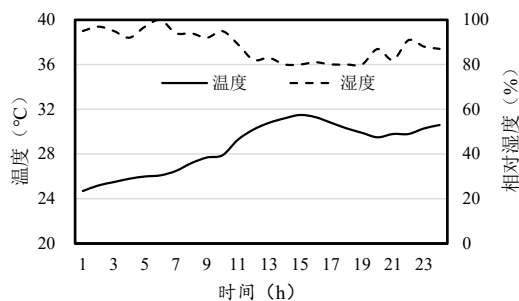


图 6 室外空气温度和相对湿度

Fig.6 Outdoor air temperature and relative humidity

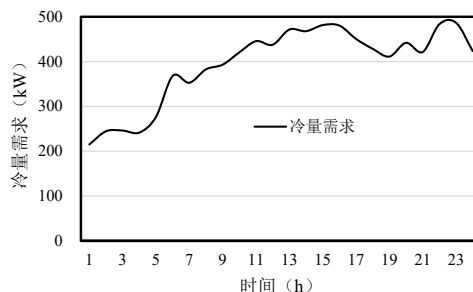


图 7 建筑逐时冷量需求

Fig.7 Hourly cooling demand of the building

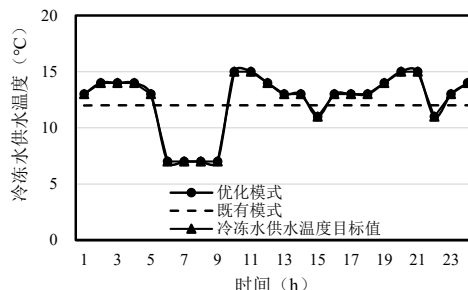


图 8 既有模式与优化模式的冷冻水供水温度

Fig.8 Chilled water supply temperature profiles of the existed operation mode and the optimal operation mode

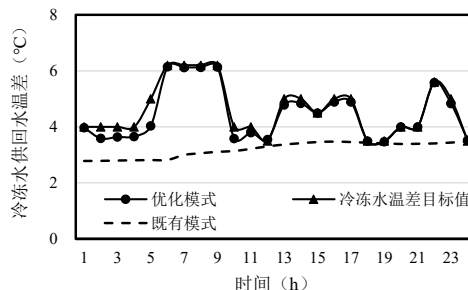


图 9 既有模式与优化模式的冷冻水温差

Fig.9 Chilled water temperature difference profiles of the existed operation mode and the optimal mode

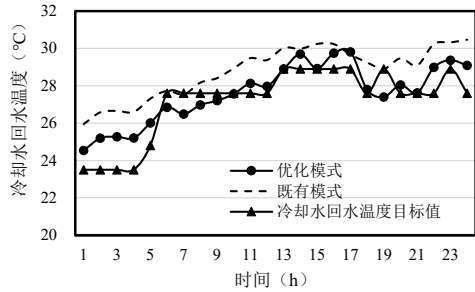


图 10 既有模式与优化模式的冷却水回水温度

Fig.10 Cooling water temperature profiles of the existed operation mode and the optimal mode

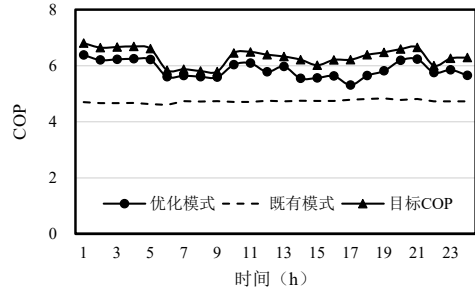


图 11 既有模式与优化模式的水系统 COP

Fig.11 Water system COP profiles of the existed operation mode and the optimal mode

5 结论

本文利用关联准则数据挖掘方法,通过对某空调系统制冷季的运行数据的挖掘,获得了在不同工况条件(系统冷量需求和室外空气温湿度)下的空调水系统高效运行的参数,即根据不同的系统冷量需求、室外空气温度和空气湿度,得到保证系统高效运行的冷冻水供水温度设定值、冷冻水温差、冷却水温差和冷却水回水温度等。进一步对关联准则进行了应用分析。在中等负荷日下,优化后冷冻水供水温度大部分运行时间内高于既有模式运行的供水温度,优化后冷冻水温差大于优化前的温差,优化模式的冷却水回水温度比既有模式的回水温度低,与关联准则的目标值基本一致。优化后的水系统 COP 在大部分运行时间内比既有模式高 1.5 左右。在该负荷日下,既有运行模式的能耗为 1869.6kWh,采用关联准则的优化模式的能耗为 1705.7kWh,节能率为 8.8%。

参考文献:

[1] International Energy Agency (IEA), Transition to Sustainable Buildings: Strategy and Opportunities to

2050[R]. 2013,July.

[2] 中国建筑节能年度发展研究报告 2020[R].北京:中国建筑工业出版社,2020.

[3] 孙洪鹏,陈晨,张广智.国内大型公共建筑空调系统运行管理现状调查研究[J].建筑节能,2020,48(10):8-13.

[4] 周孝清,刘芳,陈伟青,等.广州公共建筑能耗调查及研究[J].建筑科学,2007,(12):76-80.

[5] 凌善旭,梁彩华,张小松.集中式空调系统调控策略优化与节能研究[J].建筑科学,2017,33(8):35-41.

[6] 李彬,肖勇全,李德英,等.变流量空调水系统的节能探讨[J].暖通空调,2006,36(1):132-136

[7] 廖滢,常文成,牛利敏,等.中央空调冷冻水系统问题分析及研究状况[J].制冷与空调,2016,30(1):36-41

[8] C Fan, F Xiao, C 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] 徐欣,田喆.天津市办公建筑供暖负荷中短期预测[J].暖通空调,2016,46(4):50-54,11.

[10] 崔治国,曹勇,魏景姝,等.数据挖掘技术在建筑暖通空调领域的研究应用进展[J].建筑科学,2018,34(4):85-97.

[11] 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.

[12] A Kusiak, M Y Li, F Tang. Modeling and optimization of HVAC energy consumption [J]. Applied Energy, 2010,87(10):3092-3102.

[13] C Fan, F Xiao, Y Zhao. A short-term building cooling load prediction method using deep learning algorithms[J]. Applied Energy, 2017,195:222-233.

[14] 闫军威,梁艳辉,黄扬春,等.商场过渡季节中央空调冷源系统运行参数优化研究[J].制冷与空调,2016,30(6): 677-683,695.

[15] D F M Cabrera, H Zareipour. Data association mining for identifying lighting energy waste patterns in educational institutes [J]. Energy Build, 2013,62:210-216.

[16] Y C Chang. Sequencing of chillers by estimating chiller power consumption using artificial neural networks[J]. Building Environment, 2007,42(1):180-188.

[17] R Agrawal, T Imieliński, A Swami. Mining association rules between sets of items in large databases[J]. *Energy*, 1993,22(2):207-216.

[18] 吴丹. 热泵机组模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.