



基于知识库的制造业能耗优化平台技术研究

杨伟伟¹, 王思宁², 郑贵德³, 宋亚琼²

(1. 南大通用数据技术股份有限公司, 天津 200384 ;

2. 北京中电普华信息技术有限公司, 北京 100192;

3. 中国电机工程学会, 北京 100761)

摘要: 我国制造业在经济比重、规模巨大, 企业通过数字化技术逐步实现制造企业能耗优化具有现实意义。以汽车制造为例, 提出了基于知识库实现能耗优化的方案, 包括制造业能耗的特点分析、能耗优化的关键技术及应用实践呈现。从企业生产设备入手, 通过企业制造执行系统信息及设备运行状态寻找影响能耗的规律、构建知识库, 并通过神经网络、关联分析等机器学习算法, 实现能耗优化。

关键词: 能耗优化; 知识库; 节能智慧平台

中图分类号: TP393.08

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022142

Research on manufacturing energy consumption optimization platform technology based on knowledge-base

YANG Weiwei¹, WANG Sining², ZHENG Guide³, SONG Yaqiong²

1. General Data Technology Co., Ltd., Tianjin 200384, China

2. Beijing China-Power Information Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

3. Chinese Society for Electrical Engineering, Beijing 100761, China

Abstract: China's manufacturing industry accounts for the largest proportion of the economy and involves a huge scale. It is of practical significance for enterprises to gradually realize energy consumption optimization through digital technology. Taking automobile manufacturing as an example, a scheme of energy consumption optimization based on knowledge-base was proposed, including the analysis of the characteristics of energy consumption in manufacturing industry, the key technologies of energy consumption optimization and the presentation of application practice. Starting with the production equipment of the enterprise, the law affecting energy consumption was found and a knowledge-base was build through the information of manufacturing execution system and equipment operation status of the enterprise, and the optimization of energy consumption was realized through machine learning algorithms such as neural network and correlation analysis.

Key words: energy consumption optimization, knowledge-base, energy saving intelligent platform

0 引言

生产制造企业实现能耗优化,需要管理和技术方法结合,在管理上,需要优化生产布局和流程结构,淘汰落后工艺和产能,以节能设备替换过高耗能设备。本文研究主要以汽车制造为例,通过大数据分析技术方法辅助实现能耗优化。

本文从企业生产设备入手,利用企业已有数据资源,广泛采集影响能耗的相关数据,构建能耗知识库、利用人工智能算法并通过大数据分析平台进行数据挖掘分析,形成能耗优化方案,辅助生产企业实现节能降耗。

1 能耗知识库构建

1.1 能耗特点分析

以汽车制造厂车间能耗为例,不同设备、工艺、使用能源类型、设备运行环境和状态等所反映的能耗规律均不同。

汽车行业典型的工艺包括冲压、焊装、涂装及总装四大工艺。汽车制造是高耗能企业,其中,涂装车间占比很高,通常高达 50%以上;汽车制造的能源类型有多种,常见的有电、燃气、压缩气、蒸汽(转换能源)、水(转换能源)等。以上这些特性以及产品类型、产量、设备工作模式状态、气候、班组技能、发生事件等都对能耗产生不同影响。

1.2 数据建模

典型的能耗管理决策依据包括:车间及重点设备多个维度的能耗趋势、各种能源类型的能耗的权重比、各个车间的能耗构成及比重、关键设备的 OEE(总体设备效率)、关键设备的有功效率(设备生产运行占设备开机时间),关键设备开启停次数与产量及能耗关系、高能耗设备的开温提前期与环境气温关系、关联设备的关联度及能耗、可替换设备的能耗关系、气温对加热设备的敏感度、气温对制冷设备的敏感度、停机时间对设备

能耗的影响度、异常能耗及趋势、影响设备能耗的主要因素及权重、锅炉等高能源消耗的与运行参数关系等。

设备是能耗的关键主体,本文围绕车间设备实体构建能耗知识库,数据模型示例如图 1 所示。

图 1 是车间能耗知识库的数据模型样例。实际上,由于工厂设备数量大、加工的工序多,形成的数据模型会更复杂。其反映的能耗信息如下。

- 通过车间能耗的构成关系,可以按能源类型对能耗进行汇总及换算,从而获得车间总能耗。
- 通过设备构成关系以及能耗类型关系,不仅可以实现能耗的个体分析,而也可以实现能耗的分类分析。
- 上下游能耗设备的能耗关系具有一定的比例关系,通过上下游的比例关系分析,可以及时发现能耗异常,同时能耗上下游比例关系也是能耗平衡优化的重要依据;
- 设备与产品生成的关系分析优化能耗的重要依据,单位产品能耗是制造业能耗的重要指标,同时设备与产品生成的关系可以发现设备异常能耗,计算各设备能耗的比例关系。
- 产品生成的工序流程关系,可以用来分析产品加工国产的能耗关系及影响度,挖掘能耗及产品质量、能耗与工艺、能耗与班组的的关系,同时也可以发现产品生成过程的能耗异常。

2 能耗分析方法

为了更有效对能耗进行分析,本文针对不同能耗类型,采用了不同的分析方法。主要采用的分析方法如下。

2.1 回归分析

回归分析算法在能耗优化中适用场景比较多。对于高耗能设备,可以通过设备监控获取的

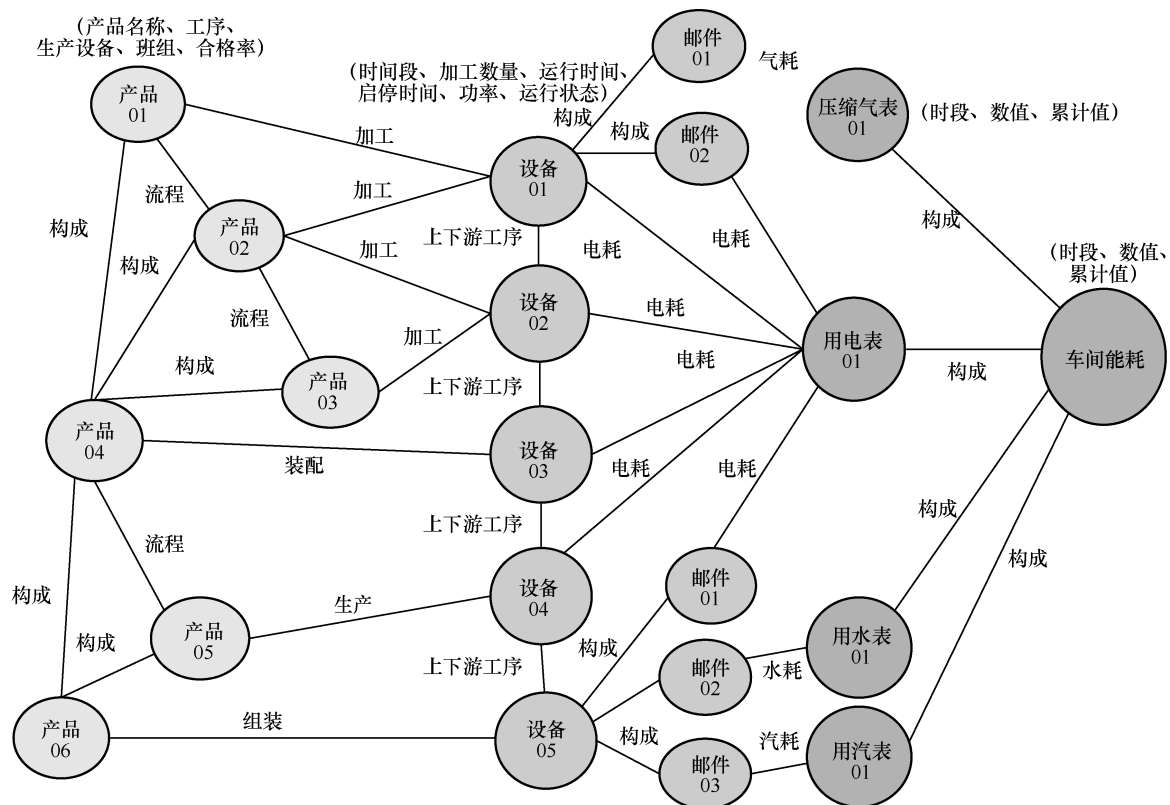


图1 汽车制造能耗知识库数据模型示例

参数实现能耗优化,以高耗能的锅炉能耗优化为例,影响锅炉能耗的典型参数有压力、蒸汽温度、汽流量、水温、排烟温度、氧化氮浓度、飞灰含碳量、烟气含氧量、燃烧原料品种等,通过回归分析可以获得各运行参数对能耗的影响度,并进一步通过优选运行参数,实现高耗能设备能耗的优化。

但由于能耗影响参数多,需要多元回归,同时,能耗与影响参数通常是非线性关系,因此,本文使用多项式非线性回归分析。非线性回归的函数组合比较灵活(如正弦、余弦、指数变量),具体函数确定不容易。而对于神经网络,有万能近似定理证明,仅有一层隐藏层的前馈网络就足够表示任何函数近似到任意的精度,故此本文使用神经网络作为回归函数,神经网络通过其激活函数(如 Sigmoid、tanh、ReLU)的非线性变化,可以较好实现非线性回归,而且神经网络在大样

本数据分析优势更大,准确度更高。

2.2 关联分析

关联分析,能够发现生产过程中影响能耗异常的因素。为了分析能耗的异常,可以构建项集{能耗,加工对象,原料品种,工序,设备,班组,时段},通过 Apriori 关联算法,得出发生能耗异常时频繁伴随发生的加工对象、原料品种、工序、设备、班组、时段。从而发现能耗异常的强关联项,当然,也可以通过关联分析,调整相关项,有效优化能耗。

理论上,如果通过枚举的方法寻找项集中各项的关联程度,但在数据量巨大的项集中实现其工程量将是浩大的,而在 Apriori 算法可以技巧性地优化工作量。

2.3 多元一次线性分析

通常,除了重点设备外,车间内的大部分设备并不提供个体能耗数据。但通过线性回归

计算, 能够获得对个体设备的能耗。个体设备能耗近似计算方法可以表示为多元一次方程, 示意如下:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 到 x_n 是待估算的个体设备的能耗, b_1 到 b_n 是各车间的总能耗。 a_{11} 到 a_{nn} 是各个体设备的产量与运行时间的乘积。通过以上线性方程就可以获得个体设备的能耗, 从而作为个体设备能耗进一步分析的基础。

2.4 知识抽取分析

设备知识库的数据源包括来自企业设备全生命周期管理的设备基本信息、设备构成、设备操作指南、维护记录、故障维修记录、生产加工的产品及数量、设备运行状态、设备功率、能耗构成及能耗量等信息。本文分析采用 RDF (resource description framework) 描述设备、能耗及其关系, 构建知识数据模型, 并以三元组的形式保存到知识库中。

知识抽取是在基于设备及能耗关系等本体信息构建的知识图谱模型基础实现的。通过设备知识抽取, 可以获取能耗优化知识, 比如, 可以了解高耗能设备启动与产品加工生产的关系、设备能耗构成、故障征兆 (故障影响能耗)、机械设备运行轨迹与能耗的关系、燃烧炉的节能模式、等效设备能耗对比等。

以电焊机能耗异常为例, 通过知识库实现异常排查。问题排查路径是: 用气异常→点焊机→加压机→维修工单→生产排程单→影响能耗、产量。其知识库模型示意图如图2所示。

依据图2示意, 搜索原理如下:

- 读取设备模型;
- 根据能耗特征找到异常设备 (点焊机 01);
- 确认设备后, 根据设备构成找到潜在故障设备部位 (加压机 01);
- 找到设备故障部位后, 根据设备状态诊断所需维修 (维修工单);
- 从同类设备维修历史工单获取设备维修需要停机或更换的时间 (生产排程);
- 根据车间排程任务调整计算可能影响的加工量及能耗。

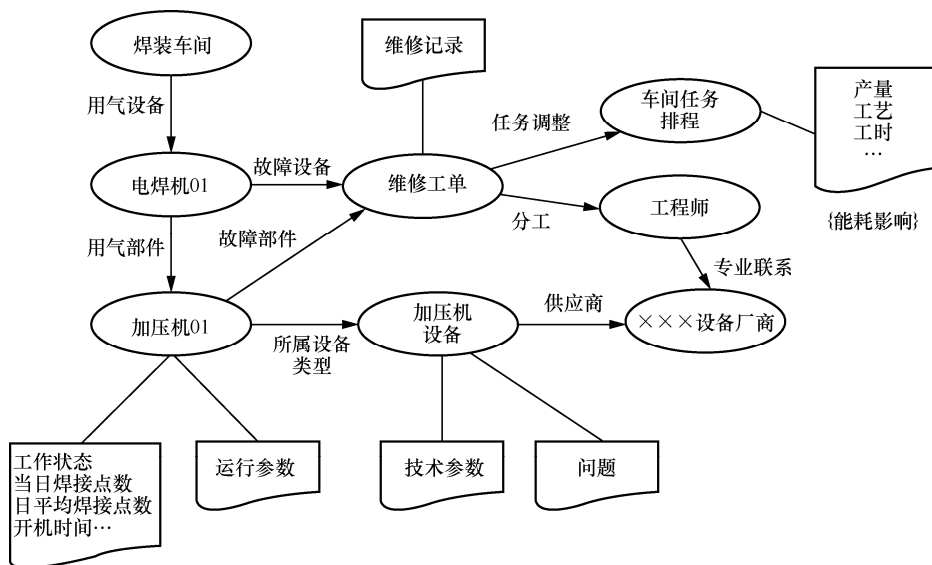


图2 汽车制造设备实体关系示意图



3 能耗分析平台构建

基于知识库的能耗优化管理需要获取大量的设备静态和动态数据,需要构建能耗分析平台实现数据的采集、组织、管理、建模以及分析展现。能耗分析平台架构如图3所示。

分析平台总体包括4个层次。

(1) IaaS 层

该层是基础设施层,支持平台的运行维护,可采用本地系统或云服务模式。

(2) DaaS 层

该层是本应用研究的核心层,提供数据服务,数据来源主要有两类,一类是来自企业已有ERP/MES中与设备及生产排程的相关信息,另一类是来自企业对设备的传感数据(IoT);通过这两类数据集成并构建知识模型,支持设备能耗分析;由于数据来源多,通常在构建业务模型前需要对数据进一步组织治理;数据支撑使用了数据仓库、数据湖及工业互联网技术。

(3) PaaS 层

该层是基于DaaS层所提供的数据服务,为上层的应用提供应用工具或应用系统,该层提供应用开发集成服务。

(4) SaaS 层

该层是用户应用层,为用户提供具体与能耗相关的报表、数据分析、知识抽取及可视化展现服务。

4 实践与验证

通过技术研究与实践,本文使用能耗优化研究技术实现了能耗的分析与展现,主要内容表现示例如下。

(1) 锅炉运行参数优化

锅炉是高耗能设备,实时采集的设备状态数据量很大,本文使用神经网络非线性回归实现对燃气锅炉(重点高能耗)的参数调优,高耗能设备运行状态优化建议见表1。

通过对历史能耗及与各指标关系的机器学习分析,系统给出了各关键指标的合理值,也就是目标值,同时给出采集到各关键指标实际值,并计算各指标实际值与目标值的偏差和产生能耗的正负影响值。以上数据可以通过信息推出供监控及操作人员参考。以上模型给出的指标建议是综合了能耗的经济性和实际工作温度要求提出的,具有实际指导意义。

(2) 烘干室升温优化

烘干室需要一定时间升温到工作状态,也就

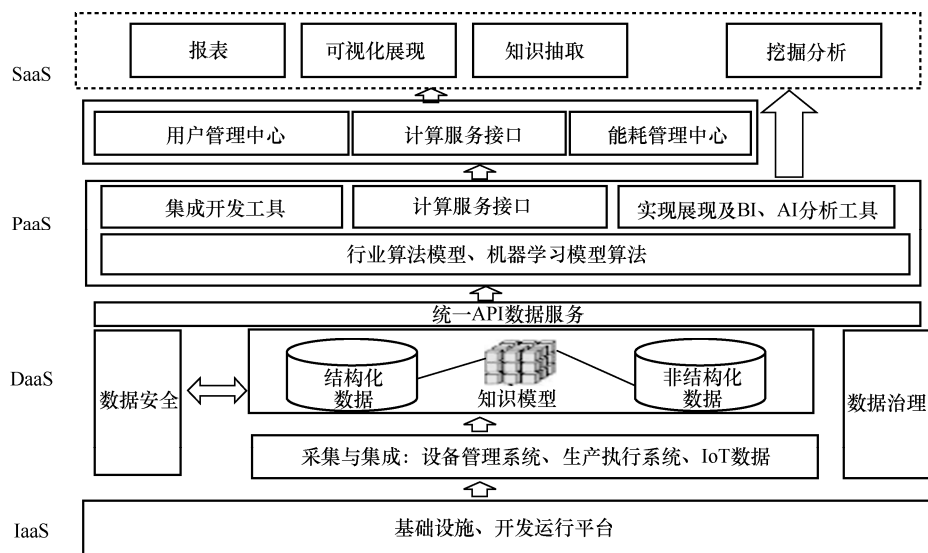


图3 能耗分析平台架构

表 1 高耗能设备运行状态优化建议

指标名称	目标值	实际值	偏差值	对燃气影响
锅炉排烟温度	119.510 2℃	140.281 8℃	20.771 6℃	1.147 8℃
出口含氧量	4.459 8%	1.992 5%	-2.467 4%	-2.402 3%
主汽温度	268℃	265.431 6℃	-2.568 4℃	0.294 8℃
主汽压力/MPa	16.67	16.319 1	-0.350 9	0.479 3
水槽温度/kPa	15	11.826 1	-3.173 9	-6.360 9
蒸汽量/(kg·h ⁻¹)	1 200	1 010	190	-2.402 3

是开温，升温的能耗很高，而且开温时间与环境温度有关，控制好升温时间节能显著。高耗能设备开温提前时间优化建议如图 4 所示。

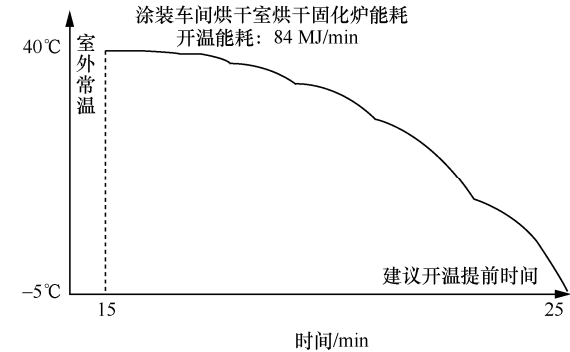


图 4 高耗能设备开温提前时间优化建议

高耗能设备开启时间不同，对能耗影响较大。在高耗能设备开始使用时间固定的情况下，由于季节不同，设备环境温度差异很大。高耗能设备起始温度也有差异。如冬天低温的起始温度是-5℃，夏天高温是 40℃。高耗能设备开启时间有很大不同。以上是通过历史数据分析，针对具体

设备在具体位置及不同环境温度，设备开启时间的建议。

(3) 能耗异常的强关联因素分析

生产要素和能耗存在关联关系，通过关联数据频繁集，本文使用关联算法生成了能耗与生产要素的关联度排序集合，为能耗问题改善提供参考建议。能耗影响因素关联分析如图 5 所示。

- 规则详细信息栏目表示关联项，如电耗异常 (Ele)、气耗异常 (Gas)、水耗异常 (Wat) 和电耗因素 (如设备 (D)、产品 (P)) 的关联；
- 置信度表示在先决条件 X 发生的情况下，由关联规则 “X→Y” 推出 Y 的概率；
- 支持度表示项集 {X,Y} 在总项集里出现的概率。前项和后项支持度分别表示 X 和 Y 在总项集的出现概率。

(4) 设备综合效率

问题设备往往会造成能耗异常，OEE（设备

规则详单信息	置信度		规则支持度		后项支持度		前项支持度	
Ele05→D08		95.45%		52.5%		66.25%		55%
Ele06→D12		93.18%		51.25%		70%		55%
Ele03→D03		87.5%		43.75%		55%		50%
Gas02→D11		86.36%		47.5%		78.75%		55%
Ele05→D08&P02		85.71%		60%		78.75%		70%
Wat03→D17		84.91%		56.25%		78.75%		66.25%
Gas02→D11&P03		84.91%		56.25%		70%		66.25%
Wat01→D012		84.91%		56.25%		68.75%		66.25%
Ele08→D06		84.78%		48.75%		66.25%		57.5%

图 5 能耗影响因素关联分析

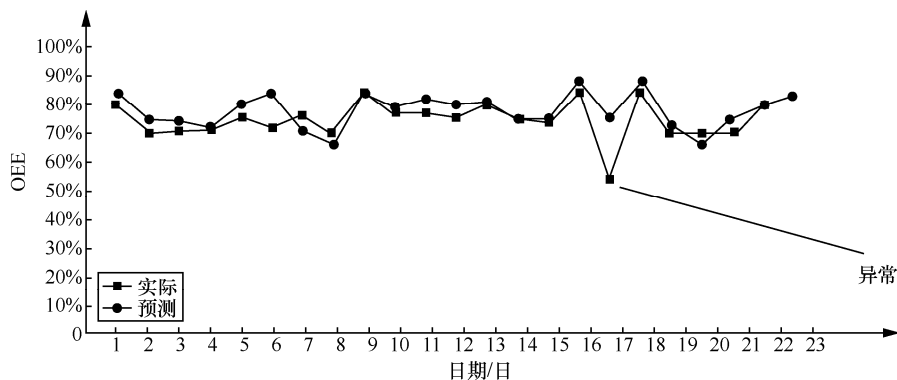


图6 设备综合效率问题分析

综合效率)指标可用来发现设备能耗利用效率。设备综合效率问题分析如图6所示。

图5表示17日时,冲压机设备有功利用率明显偏低。这种情况,可能是机器开着,但工作效率低(如工作节拍太低),会造成能耗浪费。

5 结束语

本文基于知识库的制造业能耗优化平台技术,综合了知识库、机器学习及大数据平台技术,根据制造行业对节能减排的业务需要,提出了一种可行的能耗优化数字化解决方案,经过汽车制造企业的示范研究应用,分析精度可以满足业务需要,能够提升能耗管理水平。这不仅是企业实现数字化转型的示范,也是对国家倡导的能耗优化的行业应用示范。本文研究可作为生产企业,特别是制造业能耗管理优化的参考。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 尹瑞雪. 基于碳排放评估的低碳制造工艺规划决策模型及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
YIN R X. The study and application of process planning decision model for low carbon manufacturing based on carbon emissions evaluation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

- [3] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23.
LI C B, SHEN H, LI L L, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 12-23.
- [4] 赵振家, 张鹏, 赵明楠, 等. 汽车制造过程的能耗及碳排放分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 186-190.
ZHAO Z J, ZHANG P, ZHAO M N, et al. Analysis of energy consumption and carbon emission for automobile manufacturing process[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(S1): 186-190.
- [5] 何彦, 林申龙, 王禹林, 等. 数控机床多能量源的动态能耗建模与仿真方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 123-132.
HE Y, LIN S L, WANG Y L, et al. Method for modeling the dynamic energy characteristics of multi-energy sources in CNC machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 123-132.
- [6] 孔露露. 数控机床能耗建模与参数影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
KONG L L. Research on CNC machine tool energy modeling and analysis of its influential parameters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [7] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
GAO Z J. Source characteristics of VOC emissions from typical industrial painting sources[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [8] 邹冰倩. 汽车涂装车间能耗分析与节能技术研究及应用[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
ZOU B Q. Energy consumption analysis of car coating workshop and the research and application of energy-saving technology[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016.
- [9] 罗亮, 吴文峻, 张飞. 面向云计算数据中心的能耗建模方法[J]. 软件学报, 2014, 25(7): 1371-1387.

- LUO L, WU W J, ZHANG F. Energy modeling based on cloud data center[J]. Journal of Software, 2014, 25(7): 1371-1387.
- [10] 张青. 中央空调系统节能运行控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- ZHANG Q. Study on energy saving control strategies of central air conditioning system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [11] 李忠, 安建琴, 刘海军, 等. 关联挖掘算法及发展趋势[J]. 智能计算机与应用, 2017, 7(5): 22-25.
- LI Z, AN J Q, LIU H J, et al. Association mining algorithm and its development trend[J]. Intelligent Computer and Applications, 2017, 7(5): 22-25.
- [12] 张蕾, 章毅. 大数据分析的无限深度神经网络方法[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1): 68-79.
- ZHANG L, ZHANG Y. Big data analysis by infinite deep neural networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(1): 68-79.
- [13] 李巍巍. 数据中台技术在业务系统中的应用研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(21): 108-110.
- LI W W. Research on the application of DPaaS technology in business system[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(21): 108-110.
- [14] 数据中台技术相关进展及发展趋势[EB]. 2019.
- Data middle office technology related progress and development trends[EB]. 2019.
- [15] 基于遗传算法的燃气锅炉供热系统优化策略研究[EB]. 2016.
- Research on optimization strategy of gas boiler heating system based on genetic algorithm[EB]. 2016.
- [16] 李键. 燃气锅炉燃烧控制器优化算法研究与设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- LI J. Gas boiler burning controller optimization algorithm research and design[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [17] 李昕, 钱旭, 王自强. 一种高效的高维异常数据挖掘算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 34-36.
- LI X, QIAN X, WANG Z Q. Efficient data mining algorithm for high-dimensional outlier data[J]. Computer Engineering, 2010, 36(21): 34-36.
- [18] 张荣昌. 基于数据挖掘的用电数据异常的分析与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG R C. Analysis of abnormal electro-data based on data

mining[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

- [19] 沈花玉, 王兆霞, 高成耀, 等. BP 神经网络隐含层单元数的确定[J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(5): 13-15.

SHEN H Y, WANG Z X, GAO C Y, et al. Determining the number of BP neural network hidden layer units[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2008, 24(5): 13-15.

[作者简介]



杨伟伟 (1979-), 男, 南大通用数据技术股份有限公司技术总监、高级工程师, 主要从事大数据的研究、开发与应用等工作。



王思宁 (1978-), 女, 北京中电普华信息技术有限公司副总工程师、正高级工程师、能源物联及区块链事业部总经理, 主要从事电力信息化项目管理及标准体系构建等工作。



郑贵德 (1964-), 男, 博士, 中国电机工程学会电力信息化专委会委员, 主要从事人工智能、大数据分析等工作。



宋亚琼 (1990-), 女, 现就职于北京中电普华信息技术有限公司, 主要研究方向为电力信息化项目管理及标准制修订管理。

收录声明

本刊已被中国核心期刊遴选数据库(万方)、中国学术期刊数据库(知网)全文收录,被本刊录用的文稿,将一律由编辑部统一纳入中国核心期刊遴选数据库(万方)、中国学术期刊数据库(知网)。若作者不同意被收录,将在来稿时向本刊说明,本刊将做适当处理。若无特别声明,视同将录用文稿的电子网络版、汇编或合订本的使用权授予本期刊社,本刊支付的稿费中已包含上述费用。

The articles of *Telecommunications Science* have been embodied by WANFANG DATA and CNKI. The accepted articles will be unified into WANFANG DATA and CNKI. If the author does not agree to his or her article to be included, the author must illustrate when the article is submitted. The editorial department will properly handle. If the authors do not give a special announcement, the editorial department believes that the authors have granted the right of their articles to *Telecommunications Science*. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的文稿是作者独立取得的原创性研究成果,无一稿多投;文稿内容不涉及国家机密;未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过;文稿内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题,文稿作者将承担全部责任。

The authors of *Telecommunications Science* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Telecommunications Science*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is in no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

电信科学

Telecommunications Science



邮发代号: 2-397 国外代号: M841 定价: 68.00元

ISSN 1000-0801

