

区域工业能耗数据挖掘模型^①

郝平^{1,2}, 刘薇¹, 王雨晨¹

¹(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310032)

²(浙江绍兴东越科技有限公司, 绍兴 312000)

摘要: 针对区域能源监察工作中存在的有数据, 却没有有效方法分析数据的问题, 使用数据挖掘的方法建立一种新的区域工业能耗数据挖掘模型. 首先利用 k-均值聚类分析区域各行业能耗特征; 并对单个行业进行聚类, 找出同行业高能耗, 中能耗, 低能耗企业; 然后基于同类企业中相同产品工艺设备的相关性使用多维关联规则算法, 找出同类产品中工艺、设备、能效的相关性, 指导区域节能工作, 该算法是 apriori 算法的改进, 以适用于具体产品工艺设备的频繁谓词集挖掘. 通过实例分析表明, 该模型有效、可行, 为区域工业节能提供了一条新的途径.

关键词: 区域; 能耗; k-均值聚类; 多维关联规则; 数据挖掘

Data Mining Model of Energy Consumption for Regional Industry

HAO Ping^{1,2}, LIU Wei¹, WANG Yu-Chen¹

¹(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

²(Dongyue Technology Co., Ltd, Shaoxing 312000, China)

Abstract: This paper proposes a new data mining model of energy consumption for regional industry, which is used to solve the problem that there is no effective method on data analysis in regional energy monitor. First, it analyses the characteristics of regional energy consumption in different industries in k-means, clusters a single industry and finds out the high, middle, low energy consumption industrial enterprises. Then, multidimensional association rules are used to find the correlation of processes, equipments and energy efficiency to guide the energy conservation in regional energy monitor. The algorithm has been improved on the basis of apriori algorithm to find the frequent predicate set of specific product's processes and equipment. The analysis of the example shows the model is effective and feasible which provides a new way for energy saving of regional industry.

Key words: regional; energy consumption; k-means; multidimensional association rules; data mining;

随着发展的深入, 中国已步入工业经济大国行列, 工业是我国能源消耗大户, 也是国家节能政策的重点对象, 有效的节能能够明显降低企业的生产成本, 增加企业的利润, 也能有效地促进管理的改善和技术的进步. 如何挖掘节能潜力成为解决问题的关键所在.

在已查阅的文献中, 文献[1]提出建立企业能源管理系统(EMS)的办法. 主要是通过该系统对企业内部的能源使用进行监督, 预警和评估; 文献[2]提出用数据挖掘的方法分析高能耗企业的节能潜力; 文献[3]提

出用 Petri 网的方法建立企业能耗过程高级模糊 Petri 网模型, 对企业的能耗过程进行仿真分析. 这些方法对企业的节能起到了很好的效果. 但是它们主要是针对单个企业的能源进行管理, 能源的使用也只是从企业内部进行比较, 不能和其他同行业的企业进行对比, 找出工艺、设备环节等对企业能耗的影响. 文献[4]提出一种区域能源的管理办法: 电力需求侧管理(DSM), 它是对终端电能用户进行负荷管理, 使用电负荷平均化, 提高终端能源使用效率及实现综合资源规划. 但它只是针对单类别的能源进行调度和管理. 无法从整

^① 基金项目: 浙江省信息服务业发展专项资金(浙财企[2011]342 号)

收稿时间: 2013-05-17; 收到修改稿时间: 2013-08-26

体上把握区域用能特点, 指导区域节能. 文献[5,6]提出了一种 LEAP (Long-range Energy Alternative Planning system) 模型, 它是由美国劳伦斯-伯克利国家实验室研究开发的能源-环境情景分析模型, 用于长期能源供需的预测与规划. 还有对能源消费进行预测的 ARMA (Auto-Regressive and Moving Average Model) 模型^[7,8]; 对能源的开采和转化过程进行系统优化的 MARKAL (Market Allocation) 模型^[9]; 但是这些模型及其方法立足于全球、国家和区域, 通过能源与经济、环境的关系来建模, 只能从宏观的角度来分析能源的使用.

然而, 在实际的区域能源监察和管理中, 管理者迫切希望通过一种实用的方法对区域能源的使用进行评估和具体决策方法的指导, 以寻求区域节能的关键点. 本文在区域能源监察和预警系统已成功运作两年的基础上, 对系统中的数据使用 k-均值聚类和多维关联规则建立了一种新的区域工业能耗数据挖掘模型, 该模型使用聚类和改进的 Apriori 挖掘算法, 并以某区域的能源监察作为试点, 在指导区域节能方面取得了良好的效果.

1 问题的描述与解决方案

1.1 问题的描述

在实际的能源监察工作中, 往往对重点能耗企业进行监察, 企业上报的主要能耗数据如图 1 所示.

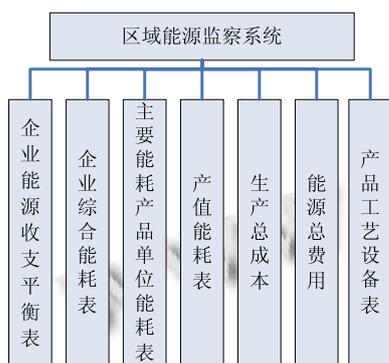


图 1 主要能耗数据

主要包括能源收支平衡表, 企业综合能耗, 主要耗能产品单位能耗等. 如何从现有的数据中挖掘区域能耗的特性, 指导区域节能工作, 是本文研究的重点.

对已有的数据和行业间、行业内部能耗特性进行分析, 提出以下三个待解决的问题:

(1) 区域的能源管理数据具有全行业性, 行业与

行业之间的能耗是有差别的, 如何找出行业间能耗的差别性, 指导区域扶持高能效行业, 重点监督低能效行业.

(2) 同行业内不同企业的能耗也有差别, 如何将高能耗与低能耗的企业区别开来, 鼓励低能耗企业, 整顿高能耗企业.

(3) 企业能效与企业生产的产品、工艺、设备有直接的关联, 如何找出之间的关联性, 对高能效的工艺设备进行推广, 淘汰低能效的工艺设备.

1.2 问题的解决方案

基于以上问题, 本文提出一种新的区域工业能耗数据挖掘模型, 用以解决上述区域能源管理中存在的问题.

行业间挖掘:

根据能耗特性, 提取出衡量企业能耗水平的多维数据, 对数据进行 K-均值聚类分析, 由于同行业产品、工艺、设备的相似性, 能耗值也会呈现一定的特征, 实际聚类的结果也显示同行业的能耗值大部分聚在同一簇中, 根据这一特点, 可以分析该地区不同行业的能耗特征, 找出高能耗的行业和低能耗的行业, 扶植低能耗行业, 对高能耗的行业进行重点监察.

行业内挖掘分析:

将单一行业多维数据聚类, 将企业分为高能耗, 中能耗, 低能耗三簇, 由于工艺、设备与能效的紧密相关性, 用多维关联规则找出生产同类产品的高能效工艺、设备之间的频繁项集, 即可找到生产该类产品的高能效的工艺和设备, 可以在区域中加以推广. 同理, 可以挖掘出低能效的工艺、设备, 该方法可用于指导区域推广高能效的工艺设备, 淘汰低能效的工艺设备.

2 模型的基本思想与描述

2.1 模型图

根据上述的问题解决思路, 建立一种新的区域工业能耗数据挖掘模型, 模型如图 2 所示.

2.2 模型基本算法介绍

2.2.1 K-均值聚类

聚类是指将数据集中有某些相似特性的数据成员进行组织分类, 聚类可以发现某一无序数据集中的内在结构, 聚类技术经常被视为无监督学习技术, K-均值算法是最著名的划分聚类方法, 由于简洁和效率使其被广泛使用.

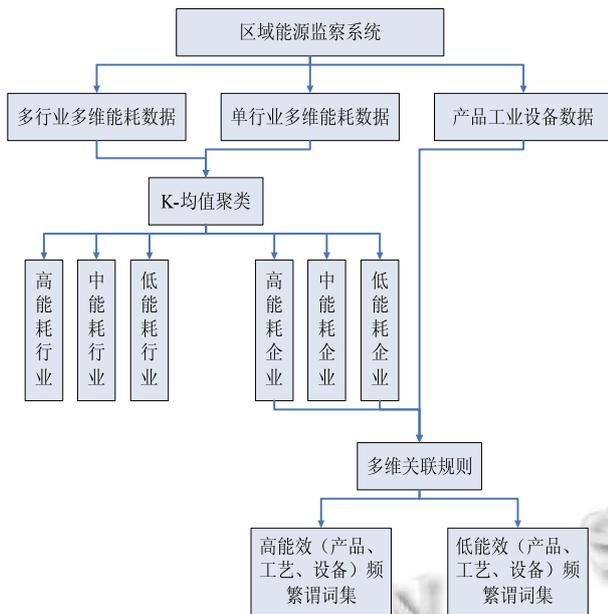


图 2 区域工业能耗数据挖掘模型

K-均值算法以 k 为输入参数, 把 n 个对象的集合分为 k 个簇, 使得结果簇内的相似度高, 而簇间的相似度低。

区域能耗数据挖掘模型中需两次使用 K-均值聚类算法, 首次用于多行业的多维数据挖掘, 通过对多行业的三维数据(万元产值能耗、万元增加值能耗、能源占总成本比)进行聚类, 可找出高、中、低三个能耗行业等级。再次使用 K-均值聚类对单个行业三维数据进行聚类, 可找出单个行业中的高、中、低能耗企业。

以多行业多维数据为例分析算法工作原理: 因为我们要将多行业三维数据分为三类, 所以随机选 3 个数据, 每个数据都是一个三维(万元产值能耗、万元增加值能耗、能源占总成本比)数据, 每个数据代表一个簇的中心点, 对剩余的所有数据, 根据其与各个簇中心点的距离, 将它指派到距离最近的簇。然后计算每个簇的新中心点, 不断重复相同过程, 直到中心点的位置不变。

算法描述:

输入:

① k : 簇的数目(此处 $k=3$)

② D : 多行业三维数据集

输出: 3 个簇的集合

方法:

(1) 从 D 中任意选择 3 个三维数据点, 每个数据点

为一个簇的中心, 计算其余数据到这三个点的距离, 哪个最近指派到哪个簇;

(2) 将所有的点分成三个簇后重新计算三个簇的中心点, 计算每个点到这三个中心点的距离, 指派到距离最近的点的簇中。

(3) 重复步骤(2), 直到中心点的距离不再变化, 即得到三个簇的集合。

单行业的三维(万元产值能耗、万元增加值能耗、能源占总成本比)数据可以同样用以上方法分为高、中、低能耗企业三类。

2.2.2 多维关联规则

关联规则概念首先由 R.Agrawal 等于 1993 年提出, 它是指客体间的相互关系。

传统的关联规则是形如 $A \Rightarrow B$ (即 A 与 B 关联)的蕴涵式。如果 $A \Rightarrow B$ 在事务集中成立, 需要满足支持度 s 和置信度 c , 其中 s 是 D 中 A 与 B 同时发生的概率, c 是 D 中 A 发生的情况下 B 发生的概率。即:

$$\text{support}(A \Rightarrow B) = P(A \cup B);$$

$$\text{confidence}(A \Rightarrow B) = P(B|A) = P(A \cup B) / P(A);$$

同时满足最小支持度和最小置信度的规则叫作强规则。

在区域能源管理中, 为了找出产品, 工艺, 设备数据之间的关联性, 需要引入多维关联规则分析方法, 挖掘出工业生产中的高、低能效工艺和设备。

区域中生产同类产品时, 往往会使用相同或者相类似的工艺生产线, 而工艺生产线中使用的设备又有很大的相似性, 生产同类产品的企业有不同的能耗值, 除了其能源的管理方式存在差异外, 不同的工艺和设备的选择对能源的利用率也有很大的影响, 高能耗的企业之所以能耗高, 与其生产同类产品所使用的工艺和设备有一定的关系, 通过使用多维关联规则对高能耗的企业工艺设备进行挖掘, 可以找出生产该类产品的低能效工艺设备。

以同行业高能耗企业的产品、工艺、设备数据为例分析多维关联规则工作原理:

(1) 初始化产品、工艺、设备数据, 数据的基本格式为 {产品, 工艺, 设备 1, 设备 2, ..., 设备 n } (注: 此处的工艺主要是指生产线名称, 可能一条生产线生产多种产品)。

(2) 设定产品维的支持度阈值 $\text{support} = d_1\%$, 找出满足该阈值的产品 A_i 。

(3) 固定产品维 A_i , 设定生产该产品的工艺维的支持度阈值为 $support=d_2\%$, 找出满足该阈值的工艺 B_i .

(4) 固定 A_i 和 B_i , 设定设备维的支持度和置信度为 $[support=d_3\%, confidence=d_4\%]$, 满足条件的设备频繁项集为 $\{C_k|k \text{ 为满足条件的频繁项下标}\}$. 得到关联规则: 产品(**行业," A_i ") \wedge 工艺(**行业," B_i ") \Rightarrow 设备(**行业," $\{C_k|k \text{ 为满足条件的频繁项下标}\}$ ").

多维关联规则的运用可以找出同行业高能耗企业在生产某类产品中频繁使用的工艺和设备, 基于其能耗高的特点, 可以对其工艺和设备重点监察, 淘汰低能效的工艺设备. 同理该方法可用于对低能耗企业中, 挖掘出生产某类产品频繁使用的工艺设备, 该工艺和设备很可能是企业能耗低的关键所在, 重点监察以找出高能效的工艺设备以推广使用.

3 模型的应用与实现

3.1 应用背景

模型以一个区域的能源监察系统数据为基础, 该系统中的数据主要包括企业名称, 所属行业, 工业总产值, 工业增加值, 综合能耗, 万元增加值综合能耗, 万元产值能耗, 生产总成本, 能源总费用, 能源费用占生产成本比率, 主要产品名称, 单位产品产值能耗, 工艺生产线表, 重点耗能设备等.

(1) 由于行业与行业间生产工艺的不同, 存在高、低能耗的行业, 如何从已有的数据中挖掘出高能耗的行业和低能耗的行业, 是该模型要解决的问题.

从已有的数据来看, 综合能耗是指企业在一段时间内实际消耗的各种能源实物量, 而由于不同行业的企业产品千差万别, 即使同行业的企业生产相同产品, 其质量也有区别, 价格高的产品能耗相对较高, 所以不能单凭综合能耗来判断企业的能效, 万元增加值综合能耗, 万元产值能耗, 能源费用占生产成本比率这三个值是在系统中找到的能与能效有直接关联的数据, 通过这三个数据的聚类分析, 可以找到能耗高及能耗低的企业, 再对各个数据集中的企业进行分析, 计算出数据集中各行业企业所占的比重, 可以找出高能耗和低能耗行业.

其中, 万元产值能耗:是指企业每万元工业产值所消耗的能源量(吨标准煤); 万元增加值能耗:指企业每万元工业增加值所消耗的能源量(吨标准煤); 能源占总成本比:能源总费用与生产总成本的比值. 从这三个

方面综合分析企业能耗状况.

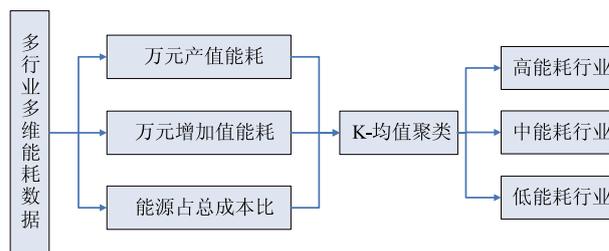


图 3 多行业多维能耗数据挖掘模型

(2) 对单个行业的企业能耗数据进行聚类, 找出行业中高能耗和低能耗的企业, 再对高能耗企业的数据进行多维关联规则挖掘, 找出生产相同产品的低能效工艺和设备, 对低能耗企业的数据进行多维关联规则挖掘, 找出生产相同产品的高能效工艺和设备.

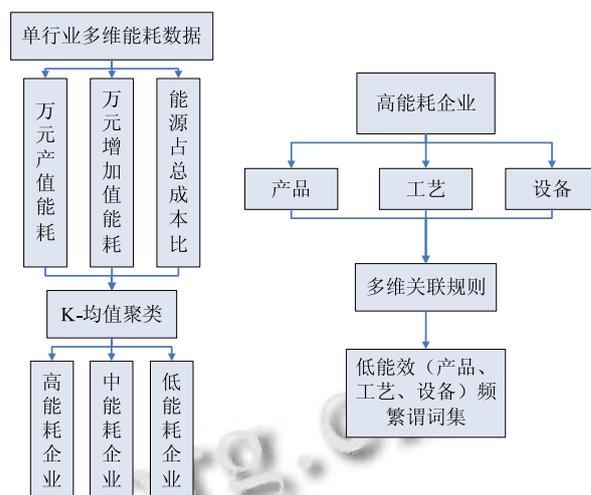


图 4 单个行业多维能耗数据挖掘模型

3.2 具体操作

本文提出应用模型的具体操作如下:

(1) 聚类分析:

① 将企业数据按行业进行划分. 以某市能源监察系统中一年的能源数据为例, 该市的企业可划分为电力、热力生产和供应业、电气机械及器材制造业、纺织服装、帽饰业、纺织业、非金属矿物制品业、化学原料和化学制品制造业、金属制品业、酒、饮料和精制茶制造业、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业、汽车制造业、食品制造业、塑料制品业等(以上分类参考国民经济行业分类(GB/T4754-2011)). 对已划分好的行业数据进行 K-均值聚类, 找出行业的能耗特征. 首次聚类的结果.

```

=== Model and evaluation on training set ===

kMeans
=====

Number of iterations: 18
Within cluster sum of squared errors: 4.249529772473591
Missing values globally replaced with mean/mode

Cluster centroids:

Attribute      Full Data      Cluster#
              (258)          0          1          2
              (10)         (87)       (161)
-----
add            5.8675        31.3207   8.4395   2.8966
per            1.1507        4.5917   1.9324   0.5145
rate          0.3302        0.5186   0.6155   0.1644

Time taken to build model (full training data) : 0.02 seconds

=== Model and evaluation on training set ===

Clustered Instances

0      10 ( 4%)
1      87 ( 34%)
2     161 ( 62%)
    
```



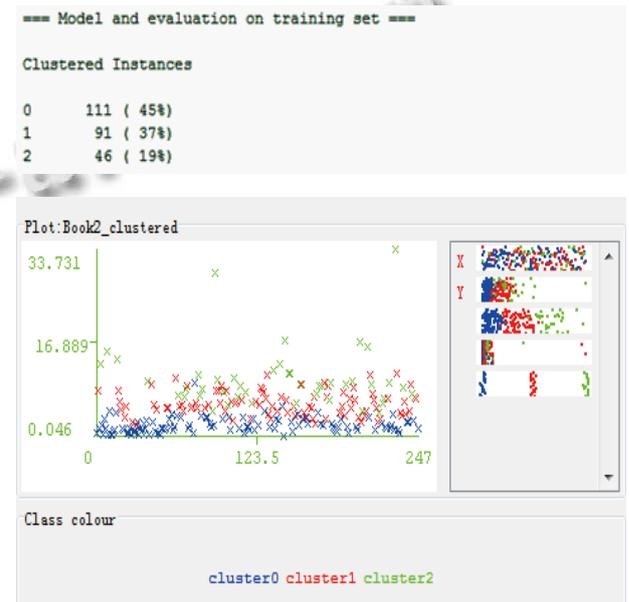
结果如下表所示:

表 1 行业聚类

| 行业 | 总数 | 簇 0 | 簇 1 | 簇 2 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| 电力、热力生产和供应业 | 18 | 0 | 6 | 12 |
| 电气机械及器材制造业 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 纺织服装、帽饰业 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| 纺织业 | 160 | 4 | 70 | 86 |
| 非金属矿物制品业 | 13 | 4 | 5 | 4 |
| 化学原料和化学制品制造业 | 27 | 1 | 1 | 25 |
| 金属制品业 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| 酒、饮料和精制茶制造业 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业 | 4 | 0 | 0 | 4 |
| 汽车制造业 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 食品制造业 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 塑料制品业 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 橡胶和塑料制品业 | 3 | 0 | 1 | 2 |
| 医药制造业 | 4 | 0 | 0 | 4 |
| 造纸和纸制品业 | 6 | 1 | 3 | 2 |
| 专用设备制造业 | 7 | 0 | 1 | 6 |

结果分析: 样本数据中明显有 10 家企业的能耗数据即属于簇 0 明显高于其他企业, 可以对这 10 家企业的能耗数据的准确性进行分析, 如果数据准确, 这 10 家企业属于重点能耗监察企业。

② 由于以上 10 家企业的数据存在异常数据的可能, 而且属于行业的能耗特例, 对我们挖掘行业能耗特性有一定的干扰, 将这 10 家企业的数据剔除, 再做一次聚类分析, 结果如下:



结果如下表所示:

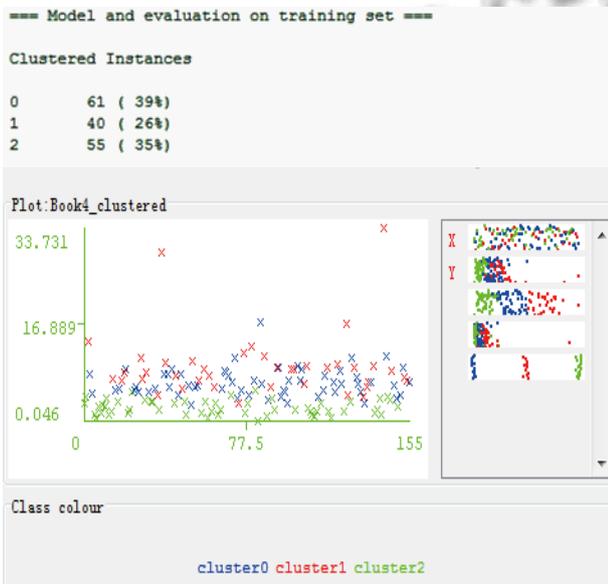
表 2 剔除异常数据聚类

| 行业 | 总数 | 簇 0 | 簇 1 | 簇 2 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| 电力、热力生产和供应业 | 18 | 2 | 15 | 1 |
| 电气机械及器材制造业 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 纺织服装、帽饰业 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| 纺织业 | 156 | 52 | 64 | 40 |
| 非金属矿物制品业 | 9 | 3 | 3 | 3 |
| 化学原料和化学制品制造业 | 26 | 23 | 2 | 1 |
| 金属制品业 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| 酒、饮料和精制茶制造业 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业 | 4 | 4 | 0 | 0 |
| 汽车制造业 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 食品制造业 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 塑料制品业 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 橡胶和塑料制品业 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 医药制造业 | 4 | 4 | 0 | 0 |
| 造纸和纸制品业 | 5 | 1 | 4 | 0 |
| 专用设备制造业 | 7 | 5 | 2 | 0 |

结果分析: 该市的能耗重点行业有电力、热力生产和供应业、纺织业及造纸和纸制品业; 其中纺织业是该市能耗最大的行业. 非金属矿物制品业能耗波动范围比较大, 可以将能耗高于能耗低的企业的技术进行比较; 其他的行业尤其是化学原料和化学制品制造业则能耗较低, 只有较个别企业能耗较高, 值得观察; 其他的一些行业如汽车制造业等由于样本数据太少, 不好下定论.

③ 该市有纺织企业 156 个, 纺织业是最重要的能耗行业, 也是节能的关键之所在, 可重点对该市的纺织业进行分析, 找出能耗高及能耗低的企业, 对能耗高的企业进行重点用能监督.

结果如下:



结果如表 3 所示.

表 3 纺织业数据聚类

| 行业 | 总数 | 簇 0 | 簇 1 | 簇 2 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 纺织业 | 156 | 61 | 40 | 55 |

结果分析: 簇 1 的 40 家企业为能耗高的企业, 簇 2 的 55 家企业为能耗低的企业.

(2) 多维关联规则挖掘

如何深层次地挖掘出单个行业的能耗特点, 找出企业的节能潜力之所在, 是接下来要解决的问题.

企业在生产同类产品中, 使用的工艺和设备具有很大的相似度, 使用多维关联规则挖掘算法, 挖掘出高能效的工艺、设备和低能效的工艺、设备.

以上述数据中的纺织业为例, 在纺织业的高能耗

企业中挖掘低能效的工艺设备, 多维数据集格式如下: {产品, 工艺, 设备 1, 设备 2, ..., 设备 n}, 采用 OLAP 切片技术, 固定一维数据, 在其他两个维度上观察数据.

表 4 高能耗企业中产品工艺设备数据表

| TID | 产品 | 工艺 | 设备 |
|-----|----------------|----------------|---|
| 1 | A ₁ | B ₁ | C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ |
| 2 | A ₂ | B ₂ | C ₁ , C ₃ , C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈ |
| 3 | A ₁ | B ₃ | C ₃ , C ₇ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ |
| 4 | A ₃ | B ₁ | C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₅ , C ₆ |
| 5 | A ₁ | B ₁ | C ₁ , C ₂ , C ₅ , C ₉ , C ₁₀ |
| 6 | A ₂ | B ₄ | C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₄ , C ₁₅ |
| 7 | A ₃ | B ₅ | C ₁₃ , C ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇ |
| 8 | A ₁ | B ₃ | C ₃ , C ₇ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ |
| 9 | A ₃ | B ₂ | C ₁ , C ₃ , C ₄ , C ₆ , C ₇ , C ₉ |
| 10 | A ₁ | B ₆ | C ₁₃ , C ₁₅ , C ₁₈ , C ₁₉ |
| 11 | A ₃ | B ₁ | C ₁ , C ₂ , C ₄ , C ₅ |
| 12 | A ₁ | B ₇ | C ₁₅ , C ₁₉ , C ₂₀ |
| 13 | A ₁ | B ₃ | C ₃ , C ₈ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₁ |
| 14 | A ₃ | B ₁ | C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₉ , C ₂₁ |
| 15 | A ₁ | B ₃ | C ₃ , C ₇ , C ₉ , C ₁₀ , C ₁₂ |

此处多维关联规则的使用用于挖掘形如产品(**行业, "A_i")^工艺(**行业, "B_i") ⇒ 设备(**行业, "C_i")的关联规则.

设产品维的支持度阈值 support=30%, 满足该阈值的项有 A₁, A₃.

固定产品维的产品为 A₁, 与之相对应的工艺项有 B₁, B₃, B₆, B₇. 设定工艺维的支持度阈值 support=20%, 满足该阈值的工艺有 B₁, B₃.

固定 A₁ 和 B₁, 设定设备维的支持度和置信度为 [support=60%, confidence=70%], 满足条件的频繁项集为 {C₁, C₂, C₃}. 得到关联规则:

产品(纺织业, "A₁")^工艺(纺织业, "B₁") ⇒ 设备(纺织业, "C₁, C₂, C₃")

结果分析: 在高能耗的纺织企业中, 使用 B₁ 工艺生产 A₁ 产品时多用到 C₁, C₂, C₃ 设备, 这三种设备很有可能是低能效的设备, 可以进行重点监察; 用同样的方法对低能耗纺织企业中的产品工艺设备数据进行挖掘, 可以找出高能效的设备. 区域在开展能源监察工作时可以督促企业淘汰低能效设备, 启用高能效设备; 如果数据挖掘的结果出现高能耗企业与低能耗企业生产同种产品时使用的工艺和设备相同或有很大相似度, 可以从企业的其他角度分析, 比如考察其他不同设备的能效以及两个企业的能源管理能力, 从而找

到节能的关键点。

4 结语

本文基于区域能源管理系统已有数据, 针对区域工业企业能耗提出一种数据挖掘模型, 该模型使用 K-均值聚类和多维关联规则算法, 先通过 K-均值聚类分析区域不同行业的能耗特征, 并找出同行业的高能耗企业和低能耗企业, 指导区域能源监察工作, 再使用多维关联规则算法, 在高能耗企业数据集中找到生产中的低能效工艺设备, 在低能耗企业数据集中找到高能效工艺设备, 淘汰低能效设备, 推广高能效设备, 为区域节能提供具体指导。该模型可在不同区域的能源监察工作中推广使用, 也可用于能源部门对地区的能源使用进行评估。

参考文献

- 1 Van Gorp JC. Maximizing energy savings with enterprise energy management systems. Pulp and Paper Industry Technical Conference. 2004. Conference Record of the 2004 Annual. Michigan, University of Michigan. 2004. 175-181.
- 2 胡轶群, 王坚, 凌卫青. 高能耗企业节能潜力分析方法. 机电一体化, 2012(1):57-62.
- 3 马福民. 支持企业能效评估的能源消耗系统模型及其分析方法研究[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- 4 宋宏坤. 需求侧管理项目评估模型及其实施机制的研究[博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2007.
- 5 高虎, 梁志鹏, 庄幸. LEAP 模型在可再生能源规划中的应用. 中国能源, 2004, 26(10):34-37.
- 6 Jebaraj S, Iniyar S. A review of energy models. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10 (4): 281-311.
- 7 Al-Shehri A, Inr J. A simple forecasting model for industrial electric energy consumption. Energy Res., 2000, 24 (8): 719-726.
- 8 黄俊, 周猛, 王海俊. ARMA 模型在我国能源消费预测中的应用. 统计与决策, 2004, (12):49-50.
- 9 佟庆, 白泉, 刘滨. MARKAL 模型在北京中远期能源发展研究中的应用. 中国能源, 2004, 26(6):36-40.

(上接第 148 页)

连续性库存检查策略为例, 在客户需求及提前期不确定的条件下, 进行了仿真实验与优化实验, 得出最优库存控制策略, 在保证客户服务水平的基础上实现了库存成本最低。

参考文献

- 1 张晴, 刘志学. 基于多 agent 的供应链信息协调建模与仿真. 计算机应用研究, 2009, 26(10):3709-3711.
- 2 Hall DC, Saygin C. Impact of information sharing on supply chain performance. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1-4): 397-409.
- 3 Bhattacharya R., Bandyopadhyay S. A review of the causes of bullwhip effect in a supply chain. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9-12): 1245-1261.
- 4 万杰, 赵丛, 韩建枫. 基于(R,Q)库存策略的供应链系统成本仿真研究. 河北工业大学学报, 2010, 39(1):79-83.
- 5 周宁. 供应链环境下易逝品的补货策略模型与仿真研究. 沈阳: 东北大学, 2008.
- 6 马士华, 黄焜, 何媛媛. 基于 Supply-Hub 运作模式的供应商协同补货策略研究. 管理工程学报, 2011, 25(1):26-32.
- 7 李文锋, 袁兵, 张煜. 物流系统建模与仿真. 北京: 科学出版社, 2010.
- 8 Li WF, Li CM. Transshipment policy research of multi-location inventory system based on multi-agent system. IEEE International Conference on Automation and Logistics. Qingdao, China. 2008. 1344-1351.
- 9 黄银娣, 卞荣花, 张骏. 国内外物流系统仿真软件的应用研究. 工业工程与管理, 2010, 15(3):124-128.