导向辊生产设备制造资源集合匹配方法

张增强，刘善慧，师可强，钱颂，王先菊
（西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院，西安 710048）

摘要：目的 为解决云制造环境下导向辊生产工序外协时设备制造资源搜索效率低的问题，本文提出一种导向辊生产设备云制造资源集合与生产工序云制造需求匹配的方法，用于降低导向辊制造资源的寻优范围。**方法** 首先建立导向辊生产设备制造资源的可拓物元模型，通过可拓聚类算法实现导向辊生产设备制造资源的聚类，接着利用集合中制造资源的可用加工方法属性与制造需求的加工方法属性进行配对，通过配对结果完成导向辊生产设备制造资源集合与生产工序制造需求的匹配。**结果** 使用该匹配方法后，成功将 10 个导向辊制造资源样本聚类为 7 种制造资源集合 K_{N1}—K_{N7}，并将其与导向辊的 7 种生产工序制造需求实现匹配。**结论** 实验结果表明，该方法能够实现导向辊生产设备云制造资源集合与生产工序需求的匹配，提高了后续导向辊生产工序外协资源的寻优效率。

关键词：导向辊；工序外协；制造资源；匹配方法；可拓聚类
中图分类号：TS95 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)11-0242-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.028

Manufacturing Resource Set Matching Method for Guide Roller Production Equipment

ZHANG Zeng-qiang[1], *LIU Shan-hui*[1], *SHI Ke-qiang*[1], *QIAN Song*[1], *WANG Xian-ju*[1]

(1. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a method to reduce the scope of finding the optimal resources by matching the cloud manufacturing resource set of the guide roller production equipment with the cloud manufacturing requirements of the production process, so as to solve the problem of low efficiency in searching equipment manufacturing resources when the guide roller production process is outsourced in the cloud manufacturing environment. Firstly, an extension matter-element model of manufacturing resources of guide roller production equipment was established, and the clustering of manufacturing resources of guide roller production equipment was realized by extension clustering algorithm. Then, the available processing method attributes of manufacturing resources in the set were paired with the processing method attributes of manufacturing requirements. The matching result was used to complete the matching between the manufacturing resources set of the guide roller production equipment and the manufacturing requirements of the production process. After application of this matching method, 10 guide roller manufacturing resource samples were successfully clustered into 7 manufacturing resource sets K_{N1}-K_{N7}, which were matched with the manufacturing requirements of 7 production processes of guide rollers. It is proved that this method can match the cloud manufacturing resource set of guide roller production equipment with the production process requirements, and improve the efficiency of finding the optimal resources for the subsequent outsourced guide roller production process.

KEY WORDS: guide roller; outsourced production process; manufacturing resources; matching method; extension cluster

收稿日期：2022−12−30
基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFB1707200）；陕西省技术创新引导专项（2020QFY03–08）
作者简介：张增强（1996—），男，硕士生，主攻云制造资源优化配置技术。
通信作者：刘善慧（1982—），男，博士，副教授，主要研究方向为先进印刷包装技术与设备。

导向辊作为包装印刷机械的核心零部件，当其传统生产方式中的某道工序由于自身加工能力不足等原因无法加工时，就需要外包给具有相应制造能力的加工企业协助完成，在这一过程中存在制造资源利用率低、外协成本高等难题。云制造是一种面向服务的、高效率、低能耗的网络化制造新模式[1]，将其引入导向辊生产工序外协中来，能够有效提高导向辊外协企业设备制造资源的利用率、降低企业的外协成本，促进制造企业之间的跨域协同。然而，由于在云资源池中具有相似功能的导向辊生产设备云制造资源（Cloud Manufacturing Resources，CMR）数目繁多，直接寻找满足导向辊生产工序云制造需求（Cloud Manufacturing Demand，CMD）的最优生产设备 CMR 效率较低。因此，在导向辊工序外协的初期，如何对种类数量多、功能相似的导向辊生产设备 CMR 进行聚类，实现导向辊生产工序 CMD 与生产设备 CMR 集合的匹配，降低制造资源的寻优范围已成为亟待解决的问题。

目前，关于云制造需求与资源集合的匹配方法已有很多国内外学者进行了相关研究。Bouzary 等[2]通过实施 5 种分类算法并使用从制造能力数据中提取的 TF–IDF 向量，成功检索了相应子任务的候选集；马仁杰等[3]采用区间数对质量信息进行描述，基于灰色关联度计算服务质量匹配相似度，对服务资源类型、描述和质量信息进行了匹配；Zhang 等[4]提出了一种基于遗传算法的客户需求匹配算法，以保证所有任务的总成本和时间最低；高新勤等[5]在对云服务进行聚类预处理并形成多个服务类簇的基础上，提出了加工设备云服务集合的初选方法；Xiao 等[6]提出了一种基于多维信息融合的制造资源匹配决策方法，用于实现制造资源的精确匹配；Wang 等[7]建立了 Web 服务语言和人工神经网络的 Web 外包服务聚类和搜索模型；李成海等[8]提出一种基于属性匹配的云制造服务资源搜索方法，并构造了关键词规范化算法和参数化的属性匹配算法；Xu 等[9]建立了基于关键字同义词扩展的服务发现匹配模型；Tong 等[10]提出一种基于分布式哈希表的高效、便捷、智能资源发现机制的云制造分层资源服务模型。但是结合导向辊生产工艺及制造资源特点的 CMD 与 CMR 集合的匹配研究仍然较为匮乏。

可拓聚类是一种基于可拓学理论模型进行数据聚类的方法[11]，具有判断数据所属类别简单高效的特点，被应用于量化分析社会网格变化[12]、建筑用户需求发现[13]、预测电信运营商的指标[14]、矿井通风可靠性评价[15]、复杂产品系统模块划分[16]、质量状态动态评估[17]、软件质量测度[18]、服装需求预测[19]等数据分析领域且均有很好的效果。因此，本文针对云制造模式下导向辊外协制造特点对传统的可拓聚类算法进行改进，完成导向辊生产设备 CMR 聚类集合与生产工序需求的匹配，最后通过实验验证该方法在导向辊工序外协中的有效性。

1　导向辊生产设备 CMR 建模

1.1　制造工艺分析

导向辊按照有无钢轴分为有钢轴导向辊和无钢轴导向辊两大类，其中有钢轴导向辊最为常见。本文也以此作为研究对象。有钢轴导向辊主要由钢轴、铝堵、辊筒等三部分组成。结合对导向辊制造企业的调研分析，得到导向辊的生产工艺流程及其生产设备 CMR 如图 1 所示。

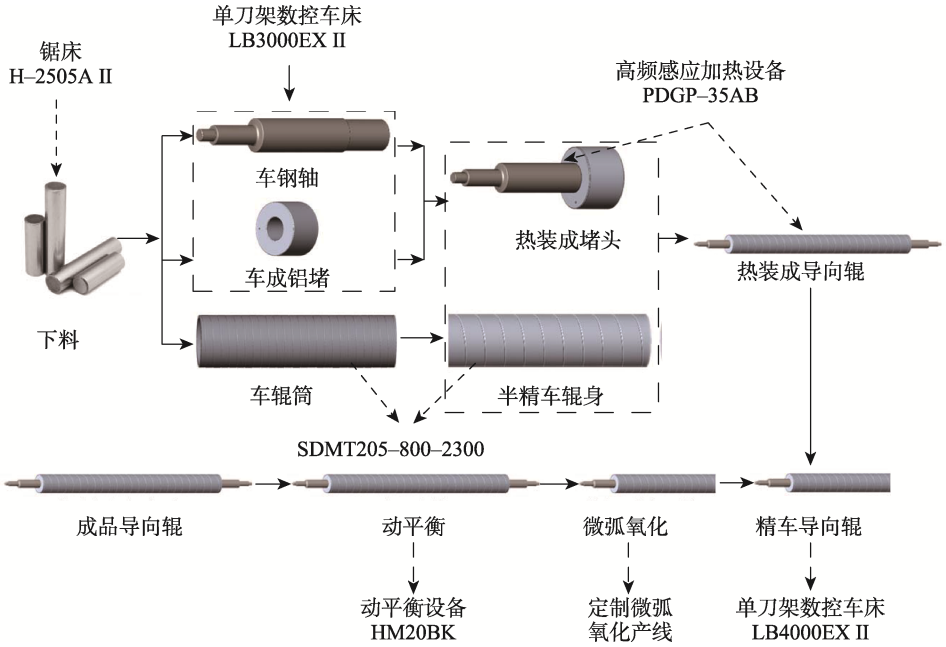

图 1　导向辊制造工艺与设备制造资源

Fig.1 Guide roller manufacturing process and equipment manufacturing resources

根据导向辊制造工艺所用设备的不同，本文将导向辊制造过程分为 7 道工序，以每道工序作为不同的生产工序 CMD，分别为下料、粗车钢轴和铝堵、精车辊筒、热装、精车导向辊、微弧氧化以及动平衡 CMD。

1.2 生产设备 CMR 建模

设导向辊生产设备 CMR 集合为 $R=\{q_1, q_2, \ldots, q_n\}$，其中，$q_i$（$i$=1, 2, …, n）表示单个 CMR，n 表示导向辊生产设备 CMR 的数量。

建立 q_i 的物元模型为 R_i：

$$R_i=\begin{bmatrix} q_i, & C_1, x_1 \\ & C_2, x_2 \\ & \vdots \quad \vdots \\ & C_m, x_m \end{bmatrix} \tag{1}$$

则称 R_i 为 N 维物元，其中 C_1, C_2, …, C_m 表示导向辊生产设备 CMR 的 m 个不同的特征属性，x_1, x_2, …, x_m 表示对应特征属性的量值。

2 CMR 集合匹配方法

本文在对导向辊生产设备 CMR 属性值分析的基础上对原有算法进行了改进，建立了导向辊生产工序 CMD 子集，并且利用该 CMD 子集先实现导向辊生产设备 CMR 的聚类，最后实现了生产设备 CMR 集合与生产工序 CMD 的匹配。

2.1 建立生产工序 CMD 子集

根据上文对导向辊工艺进行分析，以导向辊的 7 道工序作为不同的制造需求，采用深入陕西北人印刷机械有限责任公司调研得到的常见有钢轴导向辊每道工序的云制造资源数据作为原始数据，建立导向辊生产工序 CMD 子集 N_i'，具体步骤如下：

1）根据导向辊生产工序 CMD 确定导向辊生产工序 CMD 子集数量为 7，即 N_1'—N_7'。

2）选取导向辊生产设备 CMR 的可用加工方法属性类型为导向辊生产工序 CMD 子集的数据属性，其中 C_1 为可加工最大质量，C_2 为可加工材料，C_3 为可加工最大长度，C_4 为可加工最大直径。其余如加工精度、加工成本和质量等属性因素将会在后续 CMR 最优选时作为资源的评价指标，这里不做考虑。

3）选取调研数据中的同类生产设备 CMR 的各属性值的最小值，并缩小 10%作为需求子集的左端点 a；选取各属性的最大值，并扩大 10%作为需求子集的右端点 b。最终建立的导向辊生产工序 CMD 子集如表 1 所示。

2.2 确定经典域和节域

1）参考文献[20]中的方法，建立第 i 个云制造需求子集 N_i'的经典域可拓物元模型为 R_{N_i}，见式（2）。

$$R_{N_i}=\begin{bmatrix} N_i, & C_1, V_{i1} \\ & C_2, V_{i2} \\ & \vdots \quad \vdots \\ & C_m, V_{im} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_i, & C_1, \langle a_{i1}, b_{i1} \rangle \\ & C_2, \langle a_{i2}, b_{i2} \rangle \\ & \vdots \quad \vdots \\ & C_m, \langle a_{im}, b_{im} \rangle \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：C_1, C_2, …, C_m 为子集 N_i'的 m 个不同的特征属性；V_{i1}, V_{i2}, …, V_{im} 分别为子集 N_i'关于特征 C_1, C_2, …, C_m 的取值范围，即为经典域，记作：

$$V_{ij}=\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle \tag{3}$$

式中：i=1, 2, …, n；j=1, 2, …, m。

2）建立导向辊云制造需求子集 N_i'的节域可拓物元模型为 R_{P_i}，见式（4）。

$$R_{P_i}=\begin{bmatrix} Q, & C_1, W_{p_1} \\ & C_2, W_{p_2} \\ & \vdots \quad \vdots \\ & C_m, W_{p_m} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Q, & C_1, \langle a_{p_1}, b_{p_1} \rangle \\ & C_2, \langle a_{p_2}, b_{p_2} \rangle \\ & \vdots \quad \vdots \\ & C_m, \langle a_{p_m}, b_{p_m} \rangle \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：W_{p_m} 为 N_i'的第 m 个特征 C_m 的对应量值范围，即节域，记作：

$$W_{p_m}=\langle a_{p_j}, b_{p_j} \rangle \tag{5}$$

式中：j=1, 2, …, m。

表 1 属性数据

Tab.1 Attributes

类型	加工方法	C_1/kg	C_2	C_3/mm	C_4/mm
N_1'	下料	45.05~60.06	1~4.9	2 250~3 300	122.5~143.05
N_2'	粗车	9.05~22.03	1~4.9	1 270~1 430	36.4~102.6
N_3'	车轴筒	27.3~33.5	5.4~6.6	1 080~1 130	18.01~22.03
N_4'	热装	51.3~66.02	4.1~5.0	1 170~1 430	87.15~112.4
N_5'	精车辊身	39.2~47.8	4.1~5.0	1 935~2 365	95.0~116.0
N_6'	微弧氧化	45.29~55.02	4.1~5.0	1 174.5~1 435.5	99.05~121.05
N_7'	动平衡	44.01~46.59	4.1~5.0	1 935~2 365	100.0~122.21

2.3 计算综合关联度

1）待聚类 q_i 的每个属性因子的权系数为：

$$w_{ij}=\frac{x_{ij}/b_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}/b_{ij})} \tag{6}$$

式中：x_{ij} 为待聚类 q_i 的各属性值；b_{ij} 为待聚类制造资源 q_i 所对应的经典域的最大值；j 为因子，j=1, 2, …, n；i 为类别，i=1, 2, …, m。

2）根据文献[21]中的方法，计算待聚类制造资源 q_i 对 N_i'各类别关联函数的公式见式（7）。

$$K_i(x_i)=\begin{cases}\dfrac{\rho(x_j,X_{ij})}{\rho(x_j,X_{p_j})-\rho(x_j,X_{ij})}, & x_j\in X_{p_j}\\ -\rho(x_j,X_{ij})/\left|X_{ij}\right|, & x_j\in X_{ij}\\ \rho(x_j,X_{p_j})=\left|x_j-\dfrac{a_{p_j}+b_{p_j}}{2}\right|-\dfrac{b_{p_j}-a_{p_j}}{2}\\ \rho(x_j,X_{ij})=\left|x_j-\dfrac{a_{ij}+b_{ij}}{2}\right|-\dfrac{b_{ij}-a_{ij}}{2}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$K_i(x_j)$为第 j 个物元 R_j 的每一个特征值与第 i 个经典域和节域之间的关联函数，i=1, 2, …, n，j=1, 2, …, m，其中 n 为经典域个数，m 为物元的特征值个数；$\rho(x_j, X_{ij})$为 x_j 与区间 X_{ij} 的距；$\rho(x_j, X_{pj})$为 x_j 与区间 X_{p_j} 的距；x_j 为物元 R_i 的第 j 个特征值；区间 X_{ij} 为第 i 个经典域 R_{N_i} 的 V_{ij}；区间 X_{p_j} 为节域 R_{P_i} 对应的 W_{p_j}，且 X_{ij} 和 X_{p_j} 无公共端点。

3）待聚类 q_i 对 N_i'的综合关联度计算公式为：

$$K_i(q_i)=\sum_{j=1}^{n}w_{ij}K_i(x_j) \tag{8}$$

式中：$K_i(q_i)$为物元 R_i 所代表的云制造资源 q_i 与第 i 个 N_i'的综合关联度。

2.4 导向辊 CMR 聚类

待聚类 q_i 的聚类流程如图 2 所示，具体步骤如下：

1）取 K_i=$max(K_i(q_i))$，其中 i=1, 2, …, m。

2）若 K_i>0，则判定样本 q_i 属于 N_i'；若 K_i=0，则无法判断该样本 q_i 属于该 N_i'；若对一切 i(i=1, 2, …, n)都有 K_i<0，则可判定样本 q_i 不属于所定的 N_i'类。

3）通过上述步骤寻找出属于相同需求子集 N_i' 的样本 q_i，形成不同的云制造资源聚类集合 K_{N_i}，完成云制造资源聚类。

2.5 导向辊 CMR 集合与 CMD 匹配

云制造资源集合与制造需求匹配流程如图 3 所示，具体步骤如下：

1）从第 i（i=1）个云制造资源集合 K_{N_i} 中随机选取制造资源 q_j（j 为随机数）。

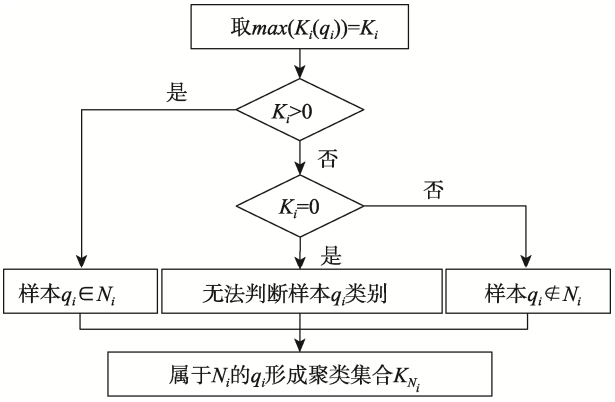

图 2　聚类流程
Fig.2 Clustering flowchart

2）选取 q_j 的可用加工方法属性值 x_1，再选取导向辊制造需求集合 N 中的第 i 个导向辊制造需求 R_{t_i} 的加工方法属性值 x_{t_1}。

3）判断 x_1 是否与 x_{t_1} 相等，如果相等则 K_{N_i} 与 R_{t_i} 互相匹配；接着判断 $K_{N_{i+1}}$ 是否存在，如果存在则先执行 i=i+1，回到起点继续循环，不存在则循环结束，所有的制造资源与导向辊制造需求匹配完成。

4）如果 x_1 与 x_{t_1} 不相等，则先执行 i=i+1，再判断实际导向辊云制造需求集合中是否还有制造需求，如果有，则继续返回选取第 i+1 个制造需求；如果没有，则再判断 $K_{N_{i+1}}$ 是否存在，如果不存在则循环结束，所有的制造资源与实际导向辊制造需求匹配完成，如果存在则回到起点继续循环。至此，全部的制造资源匹配完成。

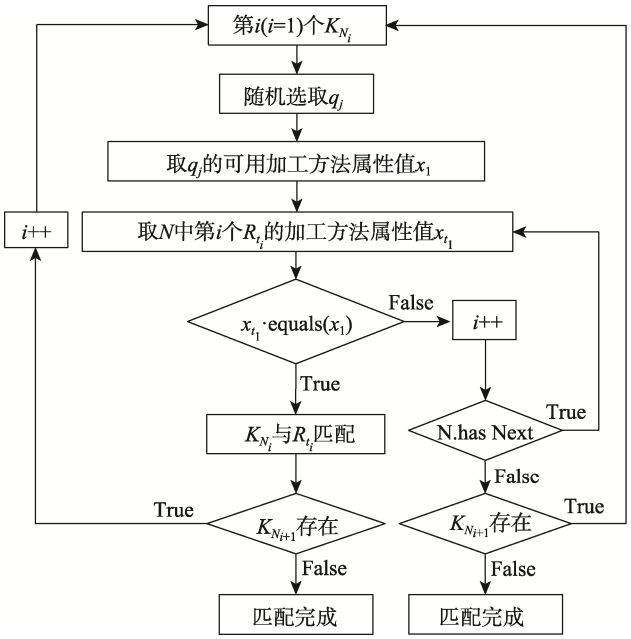

图 3　匹配流程
Fig.3 Matching flowchart

3 实验与分析

本文所用导向辊生产设备数据为深入企业调研后修改部分得到，实验所选择的 10 例导向辊生产设备制造资源数据是从调研得到不同类别的数据中随机抽取而来。导向辊生产设备 CMR 和生产工序 CMD 属性数据说明见表 2，待聚类导向辊生产设备 CMR 属性数据见表 3，导向辊生产工序 CMD 属性数据见表 4。

表 2 属性数据说明
Tab.2 Description of attributes

属性	说明
q_1—q_{10}	导向辊生产设备 CMR
C_1'	加工质量，单位 kg
C_2'	加工材料
C_3'	加工长度，单位 mm
C_4'	加工直径，单位 mm
N_1	钢轴/铝堵下料
N_2	粗车钢轴/铝堵
N_3	粗/精车轴筒
N_4	辊筒与轴头热装
N_5	精车辊身
N_6	辊面微弧氧化
N_7	辊身动平衡
6.005	6005 合金铝
4.5	45 钢
1.2	LY12 铝合金

表 3 导向辊 CMR 属性数据
Tab.3 Attributes of guide roller CMR

编号	加工方法	C_1/kg	C_2	C_3/mm	C_4/mm
q_1	锯	50.03	4.5	2 500	132.01
q_2	锯	55.02	1.2	3 000	130.02
q_3	粗车	10.05	4.5	1 300	40.175
q_4	粗车	20.05	1.2	1 300	93.28
q_5	热装	57.03	4.5	1 300	97.175
q_6	半精车	30.5	6.005	1 105	20.05
q_7	热装	60.02	4.5	1 300	102.2
q_8	精车	43.59	4.5	2 150	105.5
q_9	氧化	50.08	4.5	1 305	110.05
q_{10}	动平衡	45.09	4.5	2 150	111.1

表 4 导向辊 CMD 属性数据
Tab.4 Attributes of guide roller CMD

需求	加工方法	C_1'/kg	C_2'	C_3'/mm	C_4'/mm
N_1	锯	49.03	4.5/1.2	2 400~2 900	128~134
N_2	粗车	9.02	4.5/1.2	1 280	35~90
N_3	车轴筒	25.05	6.005	1 100	19
N_4	热装	51.05	4.5	1 200	96~100
N_5	精车	41.03	4.5	2 100	103
N_6	氧化	48.5	4.5	1 300	107
N_7	动平衡	44.2	4.5	2 140	108

实验最终得到导向辊生产设备 CMR 的聚类结果如表 5 所示。由表 5 可以看出，代号为 q_1 与 q_2 的 CMR 被聚类到导向辊 CMD 子集 N_1'下。分析 q_1 与 q_2 的各属性值，发现属性值较为接近，即 q_1 与 q_2 能够完成的导向辊生产工序 CMD 类似。同理，对其余聚类到一起的资源属性值进行分析也能得到同样的结果，聚类结果准确。

表 5 样本聚类结果
Tab.5 Sample clustering result

需求子集	聚类结果	聚类集合
N_1'	q_1q_2	K_{N_1}
N_2'	q_3q_4	K_{N_2}
N_3'	q_6	K_{N_3}
N_4'	q_5q_7	K_{N_4}
N_5'	q_8	K_{N_5}
N_6'	q_9	K_{N_6}
N_7'	q_{10}	K_{N_7}

导向辊生产工序 CMD 与生产设备 CMR 集合的匹配结果如表 6 所示。可以看出，生产设备 CMR 集合 K_{N_1} 中的代号为 q_1、q_2 的 CMR 的可用加工方法属性为锯，因此均可满足导向辊的下料需求 N_1。同理，其他资源集合中的 CMR 也能完成所对应的导向辊生产工序 CMD，实验结果与实际需求情况一致。说明本方法对导向辊生产设备 CMR 集合与生产工序 CMD 的匹配具有良好的效果。

表 6 样本集合匹配结果
Tab.6 Sample set matching result

制造需求	匹配集合	集合资源
N_1	K_{N_1}	q_1q_2
N_2	K_{N_2}	q_3q_4
N_3	K_{N_3}	q_6
N_4	K_{N_4}	q_5q_7
N_5	K_{N_5}	q_8
N_6	K_{N_6}	q_9
N_7	K_{N_7}	q_{10}

4　结语

针对云制造环境下，导向辊生产工序外协时直接搜索满足导向辊生产工序 CMD 的生产设备 CMR 效率较低的问题，本文结合云制造模式下导向辊制造的特点，将可拓聚类算法引入导向辊生产设备 CMR 聚类中，并对传统的可拓聚类算法进行了改进，提出了基于改进可拓聚类的导向辊生产工序 CMD 与生产设备 CMR 集合匹配方法。本方法解决了可拓聚类算法无法直接在导向辊生产设备 CMR 聚类中使用的问题，能够有效地对导向辊生产设备 CMR 进行聚类并且与生产工序 CMD 匹配，缩小了搜索候选生产设备 CMR 的范围，提高了导向辊生产工序外协时云制造初期的匹配效率。为下一步按照加工精度和加工成本等评价指标寻找满足导向辊生产工序 CMD 的最优生产设备 CMR 奠定了基础。

参考文献：

[1] 李伯虎，张霖，王时龙，等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统，2010, 16(1): 1-7.
LI Bo-hu, ZHANG Lin, WANG Shi-long, et al. Cloud Manufacturing: A New Service-Oriented Networked Manufacturing Model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7.

[2] BOUZARY H, CHEN F. A Classification-Based Approach for Integrated Service Matching and Composition in Cloud Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66: 101989.

[3] 马仁杰，陈军，郭钢. 基于区间和灰色关联度的云制造服务匹配方法[J]. 计算机集成制造系统，2022, 28(3): 918-926.
MA Ren-jie, CHEN Jun, GUO Gang. Cloud Manufacturing Service Matching Method Based on Interval Numbers and Grey Correlation Degree[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(3): 918-926.

[4] ZHANG Ming, LI Chun-quan, SHANG Yu-ling, et al. Research on Resource Service Matching in Cloud Manufacturing[J]. Manufacturing Letters, 2018, 15: 50-54.

[5] 高新勤，荆彦臻，王雪萍，等. 云制造模式下面向加工设备的服务聚类与初选方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 703-713.
GAO Xin-qin, JING Yan-zhen, WANG Xue-ping, et al. Processing Equipment-Oriented Service Clustering and Initial Selection Method under Cloud Manufacturing Mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 703-713.

[6] XIAO Yan, LI Cong-dong, SONG Li-jun, et al. A Multidimensional Information Fusion-Based Matching Decision Method for Manufacturing Service Resource[J]. IEEE Access, 2021, PP(99): 1.

[7] WANG Lei, GUO Chen, LI Yi-bing, et al. An Outsourcing Service Selection Method Using ANN and SFLA Algorithms for Cement Equipment Manufacturing Enterprises in Cloud Manufacturing[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(12): 1065-1079.

[8] 李成海，黄必清. 基于属性描述匹配的云制造服务资源搜索方法[J]. 计算机集成制造系统，2014, 20(6): 1499-1507.
LI Cheng-hai, HUANG Bi-qing. Cloud Manufacturing Service Resources Based on Attribute Description Matching[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(6): 1499-1507.

[9] XU Dong-sheng, CHEN You-ling, DUAN Ke-hua. Cloud Manufacturing Service Discovery and Matching Based on Keyword Synonymous Extension[C]// Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence, 2019: 67-72.

[10] TONG Y, WU X, WANG Q, et al. Research on Service Discovery Based on DHT for Cloud Manufacturing System[J]. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2018, 80(2): 247-262.

[11] REN She-dong, ZHAO Yan-wei, LOU Jiong-jiong, et al. Multifactor Correlation Analysis and Modeling for Product Low-Carbon Design[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2018, 35(7): 432-443.

[12] 严家萌，庞超逸，许立波. 复杂社会网络节点重要性可拓聚类动态分析方法[J]. 计算机应用与软件，2019, 36(7): 76-82.
YAN Jia-meng, PANG Chao-yi, XU Li-bo. Extension Clustering Dynamic Analysis Method for Importance of Complex Social Network Nodes[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(7): 76-82.

[13] GUO Qiang, ZOU Guang-tian, SUN Tian-zhi. Discovery of the Knowledge on the Demands of Building Users Based on Extension Clustering[J]. Rev. D'intelligence Artif., 2018, 32(5-6): 705-718.

[14] TANG Z, LI J, JIN Z. Investigation and Application of Extension Clustering Prediction[J]. Boletin Tecni-

co/Technical Bulletin, 2017, 55(12): 660-666.

[15] 毕娟, 李希建. 因子分析耦合可拓聚类在矿井通风可靠性评价中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(4): 100-104.
BI Juan, LI Xi-jian. Application of Factor Analysis Coupled with Extension Clustering in Reliability Evaluation of Mine Ventilation[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(4): 100-104.

[16] 许世鹏, 吕锋, 贾现召, 等. 集成复杂网络和可拓聚类的复杂产品系统模块划分方法[J]. 农业工程, 2021, 11(10): 103-107.
XU Shi-peng, LYU Feng, JIA Xian-zhao, et al. Module Division Method of Complex Product System with Integrated Complex Network and Extension Clustering[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(10): 103-107.

[17] 王丰, 顾佼佼, 孙江. 可拓聚类方法在导弹质量状态动态评估研究中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(7): 219-223.
WANG Feng, GU Jiao-jiao, SUN Jiang. Research on Missile Quality State Assessment Based on Extension Clustering Method[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2020, 41(7): 219-223.

[18] 余平, 胡玲. 基于可拓聚类分析的软件质量测度算法研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(11): 71-77.
YU Ping, HU Ling. A Software Quality Measurement Algorithm Based on Extension Cluster Analysis[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2018, 43(11): 71-77.

[19] 何海洪, 余军合, 许立波, 等. 基于可拓聚类的服装需求预测方法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(5): 273-281.
HE Hai-hong, YU Jun-he, XU Li-bo, et al. Clothing Demand Forecasting Method Based on Extension Clustering[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(5): 273-281.

[20] LI Qing-fu, ZHOU Hua-de, ZHANG Hua. Durability Evaluation of Highway Tunnel Lining Structure Based on Matter Element Extension-Simple Correlation Function Method-Cloud Model: A Case Study[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(4): 4027-4054.

[21] SHAN Cheng-ju, DONG Zeng-chuan, LU De-bao, et al. Study on River Health Assessment Based on a Fuzzy Matter-Element Extension Model[J]. Ecological Indicators, 2021, 127(10): 107742.

责任编辑：曾钰婵