

基于多属性决策的农机专业底盘实例推理方法

赵秀艳¹ 宋正河² 张开兴^{3,4} 刘贤喜³

(1. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 4. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对农机专业底盘参数属性多、参数类型差异大、属性不能无条件补偿等特点, 传统实例推理中以属性加权评价为主的最近邻算法已不能满足实际需求。基于此, 提出将级别高于关系的 ELECTRE 多属性决策方法应用到农机专业底盘的实例推理中, 算法首先对农机底盘实例数据进行预处理, 然后采用层次分析法确定属性权重, 通过不断试验调整各属性不和谐性阈值后进行级别高于关系构造、挖掘, 最终实现目标实例与数据库中实例的相似性评价, 并以履带式稻麦收获机底盘实例进行验证。与经典的最近邻评价方法相比, 算法除能返回总体相似度较高的模型之外, 同时返回影响实例排序的关键参数, 让用户拥有更多后续评价依据, 总体效果较好。

关键词: 农机专业底盘; 稻麦收获机底盘; 实例推理; ELECTRE 方法

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0370-08

Evaluation Method of Agricultural Machinery Professional Chassis' Cases Based on Multiple Attributes Decision

ZHAO Xiuyan¹ SONG Zhenghe² ZHANG Kaixing^{3,4} LIU Xianxi³

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

4. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian 271018, China)

Abstract: Agricultural machinery professional chassis has many types of parameters and their difference between each other is so large that they cannot be fully compensated without any price. For these characteristics, the classical nearest neighbor algorithm which relies on weight properties in case-based reasoning is unacceptable in practice. Aiming at the situation above, the sorted method ELECTRE, belonging to multiple attribute decision, which was characterized by outranking relationship, was applied to the similarity assessment. In this algorithm, the first step was data preprocessing; then AHP was adopted to determine attributes' weights; after that harmony and disharmony thresholds were obtained by constantly experimenting adjustment; and then construction and mining of relationships were carried out; the ultimate goal was to accomplish similarity assessment between design case and database cases. After that, crawler of walking system and chassis prototype were used for verification of the algorithm. Compared with the nearest neighbor method, the algorithm not only returned the former models which had higher overall similarity, but also marked the key parameters that affected the order, allowing users to have more follow-up evaluation. To make the algorithm to be more practical, a prototype interface of CBR was developed and the input of critical parameters and output of results were demonstrated. The overall result was good.

Key words: agricultural machinery professional chassis; rice and wheat harvesting machinery's chassis; case-based reasoning; ELECTRE method

引言

在新产品研发过程中, 若常借助于已有实例进

行变形设计或者重用设计, 能够达到快速有效设计的目标。实例推理^[1-2] (Case-based reasoning, CBR) 以充分挖掘、提取已有数据库内容, 加快设计、

制造进度为目标,在新产品设计研发中已得到广泛应用^[3]。实现 CBR 系统的关键技术^[4]包括实例表示、实例检索、实例重用、实例自学习与实例库维护几个方面。其中,实例检索是实现 CBR 关键,其主要作用是根据设计要求从已有实例中检索出与当前设计要求最相似的一组实例,常用的方法有最近邻法、归纳法、知识引导法等,其中以最近邻算法应用^[5-8]最为普遍。CBR 技术在各行业快速应用^[9-11]的同时,在农机专业领域也有较为广泛的研究^[12-15]。但是,同一般实例属性信息相比较,农机底盘产品由行走系、转向系、制动系等构成,具有属性数量繁多、属性类型差异大、不同属性值之间的差距累计会影响方案选择等特点,传统的以最近邻算法为主体的匹配、评价、决策算法已远不能满足实际农机推理结果的需要;现有的研究成果虽已较为丰富,但多集中在已有理论、方法的应用方面,没有考虑到上述农机产品的具体特点,不能摆脱这一方法本身的局限性。

为解决以上问题,本文以履带式收获机械底盘、水田作业底盘和高地隙喷雾机底盘为研究对象,提出将级别-关系中的 ELECTRE^[16-17] (Elimination of choice translating reality) 多属性决策方法应用到农机专业底盘产品的实例相似性评价中。

1 算法实现原理

ELECTRE 方法,即淘汰与选择轮换实现法,该方法的核心是级别高于关系。常规优先关系的定义为:一个方案 a 优于另一个方案 b,当且仅当 a 所对应的每个属性都不小于 b,且至少有一个属性 a 的值严格大于 b。ELECTRE 定义的是一种较弱的排序关系,它允许偏好风险的存在,这就是“级别高于关系”。它主要由两部分构成:一是级别高于关系的构造;二是对级别高于关系的挖掘和运用,即在级别高于关系上进行的选择、排序或者是分类。

图 1 为算法实现原理图,实例匹配开始后,首先输入获得的局部机构实例属性信息并进行数据预处理,随后确定该机构各属性权重以及属性需要的和谐性与不和谐性阈值,通过关键词匹配的方式查询数据库实例,并将数据导入本地内存进行存储、处理,通过循环构造关系并进行关系挖掘,经过不断试验调整阈值后判定是否存在可用实例,存在可重用实例时,进行数据库已有实例的修改和调整,形成新实例后进行存储。其中 ELECTRE 方法中包括的主要步骤^[18]有层次分析法确定权重、确定和谐性与不和谐性指标阈值、级别关系构造、级别关系挖掘。

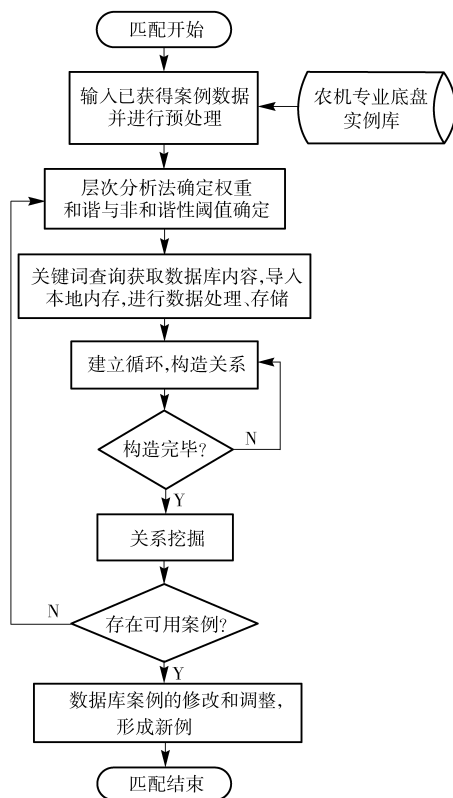


图 1 实现步骤流程图

Fig. 1 Flow chart of implementation steps

2 基于多属性决策农机专业底盘实例推理实现

为实现提出的技术原理,以履带式收获机械底盘中行走系中履带装配体属性参数为例,进行步骤演示。

2.1 数据预处理阶段

使用相似性度量函数将数据库中已有数据与输入数据进行相似度计算,两者接近,相似度高,转化之后,此时实例数据均为效益类型,相似性越大越好。常用的数据类型有数值型、字符型、区间型,采用的相似性度量函数依次如下:

(1) 数值型

假定用户输入的某个属性值为 P_i ,库中实例 M 对应的属性值为 P_d 。若某实例的属性 P 值只有唯一与之对应,如与尺寸相关的属性,相似性度量函数类型采用均匀分布函数来计算。相似度 s 计算公式为

$$s = 1 - \frac{|P_i - P_d|}{P_{\max} - P_{\min}}$$

式中 P_{\max} 、 P_{\min} ——数据库中所有模型此属性的最大值和最小值

(2) 字符型

若某实例的属性 P 的类型为字符型或者属性值具有唯一性,采用精确匹配函数 $IF (P_i = P_d)$

THEN 1 ELSE 0 计算两属性值是否相等。

(3) 区间型

若实例的属性 P 值类型为一个区间范围 $[P_L, P_H]$, 如公差等, 其相似性距离采用重叠函数计算, 即计算用户输入属性值与实例库中 $M[M_L, M_H]$ 属性值重叠范围与用户输入的属性值范围的比值, 具体分为:

① $M_H < P_L$ 或 $P_H < M_L$, 即两区间毫无重合性, 此时 $s = 0$ 。

② $M_H > P_H$ 且 $M_L < P_L$, 即 M 区间完全将 P 的区间包围, 此时

$$s = \frac{P_H - P_L}{M_H - M_L}$$

③ $M_H < P_H$ 且 $M_L > P_L$, 即 P 将 M 的区间完全包围, 此时

$$s = \frac{M_H - M_L}{P_H - P_L}$$

④ $M_L < P_L < M_H < P_H$, 即 P 与 M 的区间部分重合, 此时

$$s = \frac{M_H - P_L}{P_H - P_L}$$

⑤ $P_L < M_L < P_H$, 同样 P 与 M 的区间部分重合, 此时

$$s = \frac{P_H - M_L}{P_H - P_L}$$

表 1 为履带式稻麦收获机械底盘实例库中履带属性参数, 表中: 动力机功率单位为 kW, 履带板宽、履带节距、轴距、轨距、接地长度单位为 mm, 接地压力单位为 kPa; V 代表属性值, S 代表使用相似性度量函数处理后得到的相似度; 图 2 为算法演示中的

表 1 实例库中履带实例属性与用户自行输入属性
Tab. 1 Properties of cases in library and user-input

属性	实例 1		实例 2		实例 3		实例 4		输入
	V	S	V	S	V	S	V	S	
履带类型	钢	0	嵌胶刺钢	0	橡胶	1	橡胶	1	橡胶
功率	9	1	9	1	18	0	9	1	9
履带板宽	250	1	260	0.889	340	0	300	0.444	250
履带节距	121	0.992	120	1	120	1	100	0	120
轴距	1 100	0.735	1 136	0.831	1 478	0.265	1 294	0.751	1 200
轨距	820	0.667	760	0.417	1 000	0.583	800	0.583	900
接地长度	1 100	1	1 136	0.905	1 478	0	1 124	0.937	1 100
接地压力	23	0.7	15	0.5	23	0.7	13	0.3	20

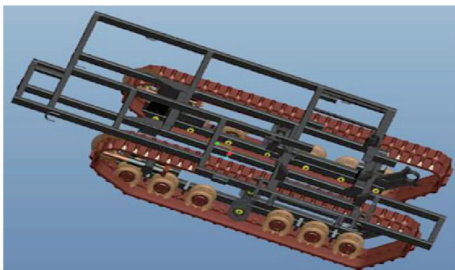


图 2 履带模型图

Fig. 2 Diagram of track model

履带模型图。

2.2 属性对应权重向量确定

算法使用层次分析法^[19], 它具有系统性、实用性、简洁性等特点, 主要实现步骤为:

(1) 建立层次结构模型: 该结构图包括目标层、准则层、方案层。

(2) 构造成对比较矩阵: 从第 2 层开始用成对比较矩阵和 1~9 标度。

(3) 计算单排序权重向量并做一致性检验: 对每个成对比较矩阵计算最大特征值及其对应的特征向量, 利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率

作一致性检验。若检验通过, 归一化后的特征向量即为权重向量; 若不通过, 需要重新构造成对比较矩阵。

(4) 计算总排序权重向量并做一致性检验: 计算最下层对最上层总排序的权重向量, 利用总排序一致性比率进行检验。

履带属性权重的计算方法如下:

(1) 确定属性标度矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/7 \\ 5 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1/3 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/5 \\ 7 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 计算每一行 W^* , 如第 1 行的计算方式为

$$W_1^* = \sqrt[8]{1 \times (1/5) \times (1/3) \times (1/3) \times (1/3) \times (1/3) \times (1/3) \times (1/7)} = 0.323$$

(3) 计算每一列 S , 如第 1 列的计算方式为

$$S_1 = 1 + 5 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 7 = 28$$

(4) 计算属性的权重 W

累加每一行 W^* , 得到 W_{total} , 之后确定每一属性对应权重为

$$W_1 = W_1^* / W_{total} = 0.031$$

类似可以计算出其余属性权重, 如表 2 所示。

(5) 验证

求取每一行的 W 与对应每一列的 S 乘积的累加之和, 即

$$\lambda = \sum_{i=1}^8 W_i S_i$$

查表 3, 属性个数为 8 时, 标准值是 8.99, $\lambda = 8.055 < 8.99$, 通过验证。

表 2 履带属性权重

Tab.2 Track attributes' weights

属性	履带类型	功率	履带板宽	履带节距	轴距	轨距	接地长度	接地压力
权重	0.031	0.201	0.076	0.076	0.076	0.076	0.076	0.380

表 3 标度合理性验证

Tab.3 Scale reasonable verification

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_{max}		3.12	4.07	5.45	6.62	7.79	8.99	10.16	11.34

2.3 确定和谐性指标阈值

对于 3 个指标值的选取, 在满足 $0.5 \leq \alpha^- < \alpha^0 < \alpha^* < 1$ 的条件下, 需要通过多次试验、比较之后最终进行确定, 依据是: 在决策人和分析人认可的条件下, 根据最后的阈值能够有效构造出备选方案之间的级别高于关系。

算法确定选取的 3 个值依次是 0.5、0.55、0.60。

2.4 确定各个属性指标高、中、低 3 个不和谐性集的阈值

不和谐性集的阈值选取同样需要根据具体指标值由决策人和分析人协商而定。实际确定选取它们的值时, d^0 为阈值下界, 初步定为 $(0.1 \sim 0.2) \Delta_{max}$, d^* 为阈值上界, 初步定为 $(0.5 \sim 0.8) \Delta_{max}$, Δ_{max} 为数据库中实例属性值与输入属性的最大差值, 同时进行人为主观观察和试验测试验证, 针对权重较大、相对重要的属性可以适当缩小阈值, 而对于不那么重要的属性可以根据实际对阈值进行放大, 本文确定的履带各个属性不和谐性阈值如表 4 所示。

表 4 履带属性不和谐性阈值

Tab.4 Track properties' discord threshold

属性	履带类型	功率	履带板宽	履带节距	轴距	轨距	接地长度	接地压力
d^0	0	0.9	9	2	38	24	38	1
d^*	1	4.5	45	10	189	120	189	5

2.5 级别关系判定

任选 2 个方案, 进行和谐性与不和谐性指标计算, 确定是强级别还是弱级别高于关系, 或根据这种方法无法判断。

以数据库实例 1、2 进行判定为例: 由于相似度属于效益型数值, 因此值越大越好。假设实例 1 > 实例 2, 根据属性 1、2、3、6、7、8 对应的相似度, 实例 1 不小于实例 2。对属性分类: $J^+(1, 2)$ 、 $J^-(1, 2)$ 、 $J^=(1, 2)$ 分别表示实例 1 优于实例 2 的属性集合、实例 1 差于实例 2 的属性集合、实例 1 等于实例 2 的属性集合, 即

$$J^+(1, 2) = \{j = 3, 6, 7, 8\}$$

$$J^-(1, 2) = \{j = 3, 4\}$$

$$J^=(1, 2) = \{j = 1, 2\}$$

进行和谐性检验: C 和 G 是和谐性判断的两个指标, 即

$$C(1, 2) = \sum_{j \in J^+} w_j + \sum_{j \in J^=} w_j = 0.031 + 0.201 + 0.076 + 0.076 + 0.076 + 0.380 = 0.84 > \alpha^*$$

$$G(1, 2) = \sum_{j \in J^+} w_j / \sum_{j \in J^-} w_j = (0.076 \times 3 + 0.380) / (0.076 \times 2) > 1$$

根据 C 和 G 判定和谐性检验通过。

进行不和谐性检验

$$D_j^m = \{(g_j(a), g_j(b)) \mid d_j^0 \leq g_j(b) - g_j(a) \leq d_j^*\}$$

$$D_3^m = \{(g_3(1), g_3(2)) \mid d_3^0 = 9 \leq$$

$$g_3(2) - g_3(1) = 10 \leq d_3^* = 45\}$$

$$D_j^h = \{(g_j(a), g_j(b)) \mid g_j(b) - g_j(a) < d_j^0\}$$

$$D_4^l = \{(g_4(1), g_4(2)) \mid g_4(2) - g_4(1) = 1 < d_4^0 = 2\}$$

实例 1 劣于实例 2 的属性有 3、4, 经过验证, 不和谐性分别属于中等和低等, 不和谐性验证通过。

综合可得, 实例 1 等级高于实例 2 成立。

2.6 关系挖掘

利用 0-1 表格进行最终关系的挖掘、表示。

在履带实例中,4个候选实例,共有6种两两比较情况,进行等级判定,结果依次是实例1>实例2、实例1>实例3、实例1>实例4、实例2>实例3(弱)、实例2>实例4、实例3与实例4无法判定,以0-1表格进行结果显示。

表5是算法针对履带实例的推理结果,表中以行进行观察,每一实例对应的数字中,1的数量越多,表示模型的等级越高;反之可得,0的数量多,表示该模型的等级与多数模型相比处于较低的地位。

根据表5可以得出:实例1优先性最好,等级高于实例2、实例3、实例4,同时根据表6加权值得出实例1为最优。尽管实例4的加权值高于实例3,但用等级高于关系判定,两者等级无法判断,因为算法认为实例4的部分属性值比实例3相差太多,不能完全接受。

表5 履带实例推理结果

Tab.5 Results of track in case-based reasoning

实例	1	2	3	4
1	—	1	1	1
2	0	—	1	1
3	0	0	—	不定
4	0	0	不定	—

表6 履带实例加权比较结果

Tab.6 Comparison results of track weighted algorithm

实例	1	2	3	4
加权值	0.796 4	0.698 1	0.437 4	0.552 3

3 算法验证与系统实现

3.1 算法验证

为进一步对算法推理效果进行对比验证,以文献[20]中使用的最近邻算法为对比对象,以其中使用的收获机底盘实例为验证对象,利用级别-关系算法重新进行推理比较。图3为稻麦收获机械装配图。



图3 整体装配图

Fig.3 Overall assembly drawing

表7是实例数据库实例与输入目标的具体参数,此实例采用7个参数,分别是底盘长、宽、高,割幅尺寸以及喂入量,质量和功率;表8为属性归一化后的值 Q 及相似度 S ;表9是上述7个属性占据的权重。

表7 输入属性与实例库属性

Tab.7 Properties of cases in library and user-input

属性	实例1	实例2	实例3	实例4	输入实例
长/mm	6 360	6 720	6 700	6 670	6 517
宽/mm	2 710	3 150	2 950	2 710	2 748
高/mm	3 220	3 230	3 280	3 255	3 214
割幅/mm	2 360	2 500	2 800	2 360	2 500
喂入量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	2	3	2.5	3	2
整机质量/kg	4 360	4 300	4 340	4 500	4 312
功率/kW	55.86	56	61	62	60

表10、表11分别是级别-关系算法的推理结果与最近邻算法的评价结果。在最近邻算法中,规定整体相似度阈值是0.6,因此只有实例1会被返回。使用级别-关系算法时,先对实例库中的属性进行处理,实例1和实例2的功率属性极为接近,可将实例1的功率55.86 kW近似为56 kW,后续试算结果证明这是有效的。从表10中可以看出,实例2是级别最低的,但是实例1、实例3之间互有优势,难以取舍。具体分析:实例1与实例3之间对比,除功率外,其余属性实例1较优,但实例1功率相似度为0.326,不足50%,同时与实例3的相似度差距超过

表8 归一化属性与相似度

Tab.8 Normalized attributes and similarity

属性	实例1		实例2		实例3		实例4		输入实例
	Q	S	Q	S	Q	S	Q	S	
长	0	0.564	1	0.436	0.940	0.492	0.860	0.575	0.440
宽	0	0.914	1	0.086	0.550	0.541	0	0.914	0.090
高	0.090	0.900	0.240	0.733	1	0.091	0.620	0.317	0
割幅	0	0.682	0.320	1	1	0.318	0	0.682	0.320
喂入量	0	1	1	0	0.5	0.5	1	0	0
整机质量	0.30	0.76	0	0.94	0.20	0.86	1	0.06	0.06
功率	0	0.326	0.020	0.346	0.840	0.837	1	0.674	0.670

表 9 属性权重

Tab.9 Property weights

属性	长	宽	高	割幅	喂入量	整机质量	功率
权重	0.05	0.05	0.05	0.3	0.2	0.05	0.3

表 10 级别-关系算法推理结果

Tab.10 Reasoning results of algorithm

实例	1	2	3	4
1	—	1	不定	1
2	0	—	0	0
3	不定	1	—	1
4	0	1	0	—

表 11 最近邻检索结果

Tab.11 Results of the nearest neighbor algorithm

实例	1	2	3	4
相似度	0.66	0.52	0.54	0.50

50% 阈值范围,在属性权重较高为 0.3 的情况下,算法认为这一差值不能无条件接受,此时对这一属性做出标记,实例 1 与实例 3 之间优劣无法判断。

算法对比:相同点是实例 1、3 是较优选择,从最近邻算法上讲,相似度排在前两位;从级别-关系算法上讲,两两互相对比中,实例 1、3 都优于其他实例。不同点是级别-关系算法进行更加细化推理,将实例对比中的更多信息返回给用户;尽管实例 1 相似度最高,但由于功率属性相差较多,如果仅返回实例 1,在实际设计中,很有可能因为这一属性差距导致两者实际结构已有较大变化;相反,实例 3 虽然在数值相似度落后,但是在功率属性保持较大优势的条件下,其余属性与实例 1 的差距都在可以接受范围内,实际操作中,两者设计结构极有可能更为接近。

3.2 系统实现

为便于算法使用,以 32 位 XP 环境为开发平台,以 VS2008 为集成开发环境,设计开发了农机专业底盘实例推理系统,图 4 所示为系统交互界面。

该界面目前主要有三大功能,多属性实例推理、实例参数化与模型几何特征检索。在实例推理中,主要以稻麦收获机底盘及主要机构为推理对象,通过在数据库中存储相应实例,为每个机构开发相应的属性匹配界面,依据级别高于关系算法寻找数据库中与目标实例最相近的实例;用户输入设计要求后,系统将存储在数据库中的实例映射到本地内存之后,通过算法进行数据提取、分析计算、推理得出结果。实例参数化中,对模型库中的部分零部件进行参数化配置之后,用户在界面提示下仅需输入需要修改的属性数据,便可以

自动重新生成模型;几何特征检索中包括整体检索与局部检索,与实例推理中的文本属性信息比较相比,直接对 CAD 模型进行处理,提取几何、拓扑信息等,避免人为主观信息的干扰,力求从另一个角度实现实例的挖掘。

图 5 展示的是整机目标参数的输入界面,根据提示依次输入已经获得的设计参数;图 6 是属性的

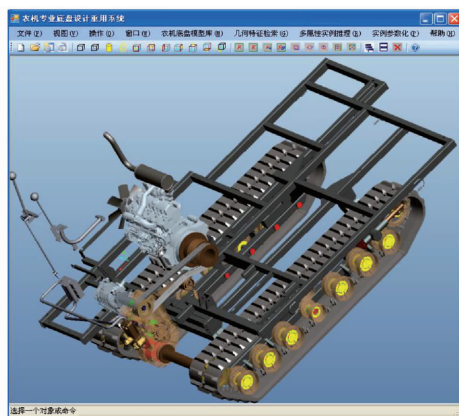


图 4 系统主界面

Fig.4 Main interface of system



图 5 目标底盘数据输入界面

Fig.5 Input interface of target chassis



图 6 底盘属性权重确定界面

Fig.6 Weights' interface of target chassis

权重确定界面;图7是不和谐性阈值的确定界面;图8是最终结果的返回界面,算法认为实例1、3之间重要的差异属性是功率,因此进行标注。图6和图7的操作是难点。在确定属性权重时,用户可以使用已有的默认值,但若觉得默认权重设置不符合自己预期,可通过自行输入标度矩阵后,不断调试,得出符合自己实际的权重并进行保存。在确定不和谐性阈值时,通常的做法是先填入较大的阈值返回,查看返回的实例数量。若此实例对应实例较多,可以逐渐尝试对某些关键属性阈值进行范围缩小后选择更加合适实例。

图7 不和谐性阈值输入界面

Fig.7 Input interface of discord threshold

图8 底盘实例推理结果

Fig.8 Results of chassis reasoning

农机底盘的实例推理中,并以稻麦收获机械底盘实例进行验证。应用算法时,首先依据设计要求获得一定数量的实例设计估计值或者经验值并进行数据预处理,随后采用层次分析法确定此实例中各属性权重及属性阈值,并进行关系构造与挖掘,在确定属性的和谐性与不和谐性阈值时,通常做法是先放宽阈值甚至允许最大阈值存在,随后根据反馈结果进行阈值再修改直至结果数量符合预期并且结果具备设计实用价值时,停止匹配。试验结果表明,该算法返回的前几位相似度较高的模型中包含最近邻算法返回的最好模型;同时对影响较优实例排序的关键参数进行标记,让用户拥有更多后续评价依据,总体效果较好,具备实际应用价值。

4 结束语

将多属性决策中的 ELECTRE 方法应用到复杂

参 考 文 献

- XU L D. Case-based reasoning a major paradigm of artificial intelligence[J]. IEEE Potentials, 1995, 13(5): 10 - 13.
- LIAO T W, ZHANG Z, MOUNT C R. Similarity measures for retrieval in case-based reasoning systems[J]. Applied Artificial Intelligence, 1998, 12(4): 267 - 288.
- 李晓辉, 刘妍秀. 基于实例推理机制综述[J]. 长春大学学报, 2006, 16(4): 68 - 70.
LI Xiaohui, LIU Yanxiu. A survey of case based reasoning mechanism [J]. Journal of Changchun University, 2006, 16(4): 68 - 70. (in Chinese)
- 周静. 精密播种机数字化设计系统中的实例检索的算法研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2011.
ZHOU Jing. The research of case retrieval algorithm on the digital system for tackles types corn precision drill [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011. (in Chinese)
- 蒋占四, 陈立平, 罗年猛. 最近邻实例检索相似度分析[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1165 - 1168.
JIANG Zhansi, CHEN Liping, LUO Nianmeng. Similarity analysis in nearest-neighbor case retrieval [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6): 1165 - 1168. (in Chinese)
- LEES, RYU J H, WON J S, et al. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network[J]. Engineer Geology, 2004, 71(3 - 4): 289 - 302.
- 朱文博, 李爱平, 刘雪梅. 基于工艺相似的冲压件实例检索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(4): 721 - 726.
ZHU Wenbo, LI Aiping, LIU Xuemei. Stamping parts case retrieval methodology based on process similarity [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(4): 721 - 726. (in Chinese)
- 张旭堂, 侯鑫, 金天国. 集成形状比较技术的产品实例检索研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 89 - 95.
ZHANG Xutang, HOU Xin, JIN Tianguo. Product cases retrieval with integration of shape matching technique [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(1): 89 - 95. (in Chinese)
- 林兰芬, 高鹏, 蔡铭, 等. 基于几何形状相似性的工艺实例检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 2094 - 2099.

- LIN Lanfen, GAO Peng, CAI Ming, et al. Case retrieval for manufacturing process planning based on geometry similarity [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(9): 2094 - 2099. (in Chinese)
- 10 程晓东, 李建勇. 基于粗糙集的柔性制造系统概念设计实例检索技术 [J]. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(6): 769 - 771. CHENG Xiaodong, LI Jianyong. Rough set-based case retrieval technology in conceptual design of FMS [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, 11(6): 769 - 771. (in Chinese)
- 11 刘金山, 廖文和, 张素敏, 等. 基于零件特征关注度的夹具实例相似性检索 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(10): 1304 - 1307. LIU Jinshan, LIAO Wenhe, ZHANG Sumin, et al. Research on feature attention-driven fixture case retrieval [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(10): 1304 - 1307. (in Chinese)
- 12 朱凌云, 赵韩, 钱德猛. 基于模糊客户需求信息的农机设计方案及检索示例 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 100 - 103. ZHU Lingyun, ZHAO Han, QIAN Demeng. Method of agricultural machinery design retrieval based on fuzzy customer requirement information [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 100 - 103. (in Chinese)
- 13 李成华, 杨宇, 张晓东, 等. 铲式播种机数字化设计实例检索策略研究 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 31 - 34. LI Chenghua, YANG Yu, ZHANG Xiaodong, et al. Retrieval strategy of spade punch planter for digital design case [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 31 - 34. (in Chinese)
- 14 包志炎, 肖刚, 高飞, 等. 基于实例推理的个性化产品评价方法 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 197 - 201. BAO Zhiyan, XIAO Gang, GAO Fei, et al. Evaluation method of individualized products based on case reasoning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 197 - 201. (in Chinese)
- 15 杨宇, 李成华, 张国梁. 基于实例推理的铲式玉米精密播种机设计 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 51 - 55. YANG Yu, LI Chenghua, ZHANG Guoliang. Design method of precision spade punch planter of maize based on CBR [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12): 51 - 55. (in Chinese)
- 16 龚俊华. 集成的 ELECTRE 方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006. GONG Junhua. Research of integrative ELECTRE method [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- 17 徐敏杉. 基于 ELECTRE 算法的多属性决策支持系统的设计与实现 [D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2012. XU Minshan. Design and implementation for multiple attribute decision support system based on ELECTRE algorithm [D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2012. (in Chinese)
- 18 于跃, 赵秋红, 周泓. 改进的 Electre 方法在反应型供应链供应商选择中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 19(2): 13 - 16. YU Yue, ZHAO QiuHong, ZHOU Hong. Application of the improved Electre method in supplier selection of responsive supply chain [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 19(2): 13 - 16. (in Chinese)
- 19 梁郑丽, 贾晓丰. 决策支持系统理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- 20 李长林. 基于知识的农机专业底盘快速设计专家系统构建方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014. LI Changlin. Research on building method of knowledge based rapid design expert of agricultural machinery professional chassis [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

(上接第 353 页)

- 12 SANTACESARIA C, SCATTOLINI R. Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty [J]. *Automatica*, 1993, 29(6): 1595 - 1597.
- 13 PALMOR Z. Stability properties of Smith dead-time compensator controllers [J]. *International Journal of Control*, 1980, 32(6): 937 - 949.
- 14 YAMANAKA K, SHIMEMURA E. Effects of mismatched Smith controller on stability in systems with time-delay [J]. *Automatica*, 1987, 23(6): 787 - 791.
- 15 SANZ M G, GUILLEN J C, IBARROLA J J. Robust controller design for uncertain systems with variable time delay [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(9): 961 - 972.
- 16 HOUPIS C H, RASMUSSEN S J, SANZ M G. Quantitative feedback theory fundamentals and applications [M]. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- 17 LIU Qifang, CHEN Hong, HU Yunfeng, et al. Modeling and control of the fuel injection system for rail pressure regulation in GDI Engine [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(5): 1501 - 1513.
- 18 班智博, 谢辉, 何宇. 汽油机电液式可变气门正时系统响应性能仿真与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 12 - 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20130903&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.003.
- BAN Zhibo, XIE Hui, HE Yu. Experiment and simulation on response performance of electro-hydraulic VVT system for gasoline engine [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 12 - 18. (in Chinese)
- 19 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 256 - 260.
- 20 HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. Columbus, OH: McGraw-Hill Education, 1988.