

控制与决策

Control and Decision

基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法

阴艳超, 蒋维, 徐凯, 廖伟智

引用本文:

阴艳超, 蒋维, 徐凯, 等. 基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1368–1376.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1311>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

概率区间值直觉犹豫模糊Maclaurin对称平均算子及决策方法

Probabilistic interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and decision method
控制与决策. 2021, 36(5): 1249–1258 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1370>

基于接触状态感知发育的机器人柔性装配方法

Flexible assembly method based on contact state perception development
控制与决策. 2021, 36(4): 876–884 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1079>

考虑主体心理行为的三边单向非循环稳定匹配

Three-sided stable matching with one-way acyclic preference considering agent's psychological behavior
控制与决策. 2021, 36(3): 741–746 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1047>

基于知识粒度特征的多目标粗糙集属性约简算法

Multi objective rough set attribute reduction algorithm based on characteristics of knowledge granularity
控制与决策. 2021, 36(1): 196–205 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0490>

结合注意力机制的循环神经网络复述识别模型

Recurrent neural networks based paraphrase identification model combined with attention mechanism
控制与决策. 2021, 36(1): 152–158 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0638>

基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法

阴艳超^{1†}, 蒋 维¹, 徐 凯¹, 廖伟智²

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500; 2. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 610054)

摘 要: 针对复杂产品虚拟装配过程中零部件间匹配关系描述不清晰、反映装配约束的特征属性考虑不足、装配序列规划中零件配对精度不高等问题, 提出基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法. 在分析典型复杂型面结构体的装配工艺关联、匹配型面特征, 以及装配设计意图的基础上, 构建包括工程语义 (engineering semantic, ES)、单元件 (single element, SE)、装配约束 (assembly constraints, AC)、装配端口 (assembly port, AP)、装配空间关系 (assembly space relation, ASR) 等多特征融合的特征装配集, 采用有向无环图对特征装配集进行模块化封装和拓扑排序, 获取最优装配序列, 并通过模糊理想解法完成复杂型面结构体特征装配集模型从定性输入到定量求解, 再到定性输出的映射变换, 实现特征装配集间的精准匹配, 给出匹配决策过程. 最后, 通过应用案例验证模型与算法的有效性, 为实现复杂型面结构体高效精确装配提供新思路.

关键词: 虚拟装配; 特征装配集; 多资源特征; 模块化封装; 拓扑排序; 匹配决策

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1311

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 阴艳超, 蒋维, 徐凯, 等. 基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1368-1376.

Decision-making method for complex surface coordination based on resource feature fusion

YIN Yan-chao^{1†}, JIANG Wei¹, XU Kai¹, LIAO Wei-zhi²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract: Aiming at the problems of unclear description of matching relationship between components in virtual assembly process of complex products, the narrow consideration of characteristic attributes reflecting technological constraints, and the low accuracy of parts matching, a decision-making method for complex surface coordination based on resource feature fusion is proposed. Firstly, by analyzing the assembly process association, matching surface features, and assembly design intent of a typical complex surface structural body, a feature assembly set based on multi-feature fusion including engineering semantics (ES), single element (SE), assembly constraints (AC), assembly ports (AP), and assembly space relationships (ASR) is constructed. Then, the assembly set is modularly encapsulated and topologically sorted using directed acyclic graph. Through using the fuzzy ideal solution, the transition process that the assembly set model from qualitative input to qualitative solving and then to qualitative output can be realized, and the matching decision process is given. Finally, an application case is given to illustrate the effectiveness of the proposed model and the algorithm, which provides a new idea for efficient and accurate assembly of complex surface structures.

Keywords: virtual assembly; feature assembly set; multi resource characteristics; modular encapsulation; topological sort; matching decision

0 引 言

复杂产品虚拟装配过程中零部件间匹配关系描述不清晰, 反映装配约束的特征属性考虑不足, 装配序列规划中零件配对精度不高等均是迫切需要解决

的问题, 已成为该领域近年来研究的重点. 目前装配序列规划的方法主要有智能算法、知识推理法和几何推理法等, 其中基于智能算法的装配序列规划主要有遗传算法^[1]、蚁群优化算法^[2]、萤火虫算法^[3]、粒

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2020-01-03.

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFB1400301).

责任编委: 阳春华.

[†]通讯作者. E-mail: yinyc@163.com.

子群算法^[4]、混合蛙跳算法^[5]等。上述算法主要解决涉及常规零件结构装配引起组合爆炸的装配序列规划问题,但不适用于一些结构特殊的装配体。针对知识推理法^[6-8]:文献[6]提出了一种几何增强的本体建模和推理框架,并明确给出了基于该方法的装配序列规划(ASP)的相关概念;文献[7]面向装配序列规划问题,构建基于装配对象的装配本体 OWL-ASP,并以此为基础,完成装配知识的自动推理;文献[8]提出了一种基于本体的装配序列自动生成方法。针对几何推理^[9-11]:文献[9]提出了一种生成装配与或图的高效算法,在时间复杂度方面明显低于现有算法,在一定程度上降低了产品装配序列规划的难度;文献[10]提出了一种基于关键装配约束的分层分级方法,并且通过重新调整产品的工程材料清单(EBOM)实现了机械产品装配序列的快速规划;文献[11]结合与或图与装配连接图表达产品零部件之间的约束关系,提出了基于多色集合的装配序列规划方法,减小了搜索空间,进而简化了计算。知识推理法和几何推理法较适用于装配零件种类少且装配特征易识别的零件装配序列规划问题。上述几类装配序列规划方法均存在装配设计过程中零部件间匹配关系描述不清晰、装配序列规划中零件配对精度不高等问题。此外,在装配模型构建^[12-13]方面:文献[12]提出了一种基于 AFP 的装配设计意图建模方法,可在零件建模阶段捕获装配设计意图,为其一致性、简化传递奠定基础;文献[13]提出了基于本体和资源描述框架(RDF)表达模式的装配设计语义框架。然而,传统装配模型中各零

部件之间装配关系的描述不够直观,不能充分利用零件间的几何配合信息自动推理优先约束及最优装配序列等,零部件间如装配关系、层次关系等装配信息通常采用单一描述,表达方式松散,难以集中表达装配体间的复杂装配关系,并进行扩展。

上述问题主要包括:基于智能算法的装配序列规划方法难以描述特殊结构装配零件间的定位关系、干涉关系和连接关系等装配工艺关联问题;基于知识推理的装配序列规划方法缺少对装配件匹配型面特征以及装配设计意图的描述,主要适合于装配零件种类少且装配特征易识别的零件装配序列规划问题。针对上述问题,本文结合复杂型面结构体的装配要求和特点,提出一种基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法。建立反映装配件间的装配工艺关联、装配体之间的装配语义关系、装配特征间的约束关系,以及装配的工程要求等多特征融合的特征装配集,并采用有向无环图将按特征装配集划分的复杂型面结构体进行模块化封装和拓扑排序,获取相应的最优装配序列。在此基础上,结合模糊理想解法建立精准匹配模型,解决装配序列规划中零件选择问题并提高零件间的配对精度,给出推理过程。

1 基于特征装配集的复杂型面配合决策框架

本文提出的匹配推理框架重点解决复杂型面结构体装配设计过程中的零部件间匹配特征的一体化描述、工艺约束下的装配序列规划,以及最优装配逻辑的自适应推理问题,如图1所示。

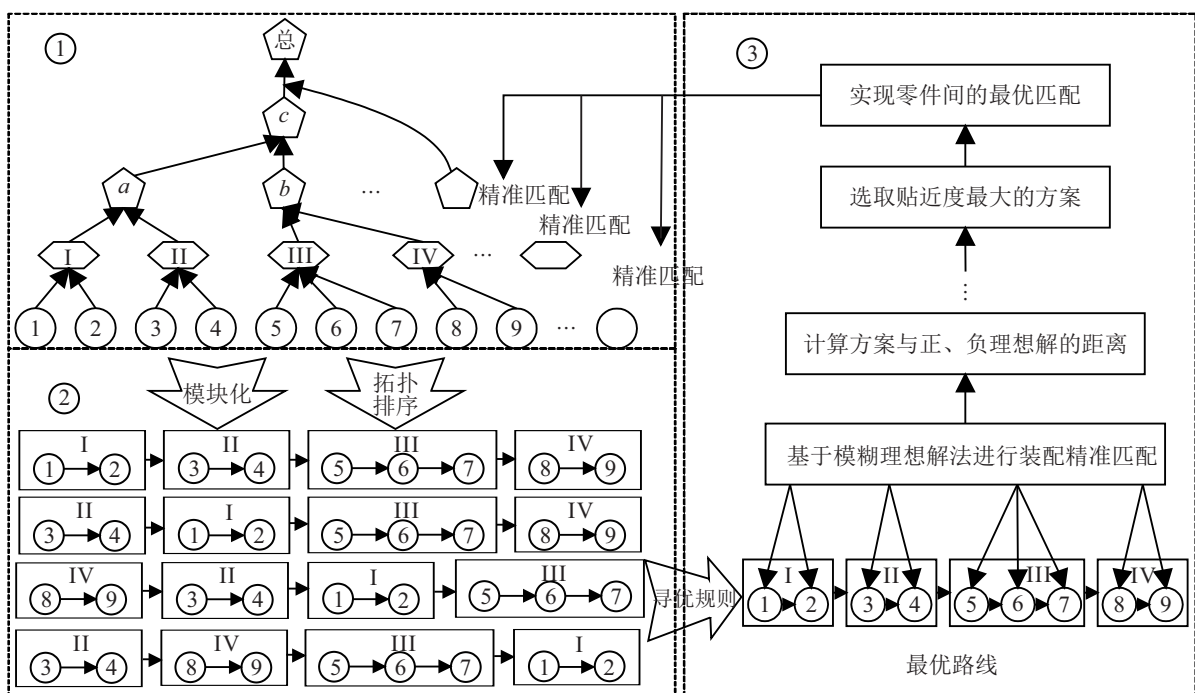


图1 匹配特征驱动装配推理

该框架包括特征装配集构建、装配序列模块化封装和装配逻辑精准匹配3个模块. 模块①特征装配集将工程语义、单元件、装配约束、装配端口、装配空间关系等零部件间的匹配信息进行一体化描述,通过工程语义反映装配设计意图、零部件间的定位约束与工程约束,通过单元件反映装配过程中零部件间多种连接关系,通过装配约束描述待装配零部件约束关系与装配工艺性约束关系,通过装配端口反映不同类型装配平面与装配连接关系,通过装配空间关系反映不同特征装配集之间的装配约束在空间的运动关系和布局关系. 模块②装配序列的模块化封装是基于复杂网络的拓扑结构性性质,将有向无环图按照特征装配集进行模块化处理,并进行拓扑排序,以获取最优装配序列,其中有向无环图中顶点的选择由模块③的配对结果决定. 模块③装配逻辑的精准匹配是基于模糊数学原理将抽象的装配模型转换为精准匹配的数学模型,并采用可量化的模糊集进行匹配贴近度的计算,依据贴近度的大小获得最优的匹配对象,实现装配设计过程中复杂型面结构体间的精准匹配.

1.1 多特征融合的特征装配集模型

1.1.1 基本定义

定义1 特征装配集工程语义. 将描述装配体间的装配语义关系、装配特征间的约束关系,以及装配工程要求的由联接语义、传动语义、配合语义和自定义语义构成的四元组 $AssES = (sj, V(sj)) \cup (ts, U(ts)) \cup (cs, W(cs)) \cup (ds, K(ds))$ 称为特征装配集工程语义. 其中: sj 、 ts 、 cs 、 ds 分别表示联接语义特征、传动语义特征、配合语义特征和自定义语义特征, $V(sj)$ 、 $U(ts)$ 、 $W(cs)$ 、 $K(ds)$ 分别表示各语义特征的量域,并且各量域包括其语义特征的ID、类型(Type)、所属装配体ID(OwnAssID)、装配对象(AssComp)、约束链表(ConsCL),其取值类型有字符型、数值型、文本型、日期型、状态型,将 $(sj, V(sj))$ 、 $(ts, U(ts))$ 、 $(cs, W(cs))$ 、 $(ds, K(ds))$ 分别称为联接语义特征元、传动语义特征元、配合语义特征元和自定义语义特征元.

定义2 特征装配集单元件. 将协作完成预定产品设计功能的不可分拆的单个制件称为特征装配集单元件,可表示为

$$AssSE = \begin{bmatrix} \text{attribute} & ID & F(ID) \\ & Type & F(Type) \\ & EngC & F(EngC) \\ & EngP & F(EngP) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中:ID、Type、EngC、EngP分别表示特征装配集单元件的ID、类型、工程约束以及工程参数; $F(ID)$ 、 $F(Type)$ 、 $F(EngC)$ 、 $F(EngP)$ 分别表示特征装配集单元件各属性的取值.

定义3 特征装配集装配约束. 特征装配集装配约束是复杂型面结构体零件、特征装配集及子装配体之间形成的约束关系与装配工艺性约束关系的抽象描述. 可定义为 $AssCons = (Ty, Cr, Apc)$. 其中:Ty为装配约束的类型; $Cr = Cor \cup Ir$ 为构成约束关系的接触关系(Cor)与干涉关系(Ir), $Cor = Fr \cup F$ 为构成接触关系的配合关系(Fr)与配合类型(Ft), $Fr = (\text{配对, 对齐, 垂直, 同轴, 距离, 相切等})$; Apc为装配体之间的装配工艺性约束关系,包含工件的工装定位约束(Lc)和装配工具操作约束(Aoc).

定义4 特征装配集端口. 装配集端口是对具有物理接触的装配体之间的装配平面与装配连接关系的抽象描述,包含单一装配端口与多个混合装配面端口. 可定义为 $AssPort = (Ap, Cnr)$. 其中: $Ap = (Apt, Gt, Gd, Ai)$ 为装配平面, Apt为装配平面类型, $Gt = (Sc, Pb, Gl, Rc, Dc)$ 为装配平面上的几何特征类型,包括型面特征Sc、行为属性Pb、特征列表Gl、保留特征Rc、废除特征Dc, $Gd = (Dt, Dr, Dh)$ 为装配平面上几何特征的分布,包括分布的类型 $Dt = (\text{线性, 圆弧, 二次曲线})$, 分布规律 $Dr = (\text{专用, 规律, 一般})$, 分布层次 $Dh = (\text{一元, 多元})$, $Ai = (In, It, Ia)$ 为装配平面上几何特征的装配接口,包括接口名称、接口类型、接口属性; $Cnr = (Fc, Cc)$ 为装配连接关系, Fc为配合连接关系, $Cc = (Fdc, N-Fdc, Kc)$ 为连接件连接关系,包含固定可拆连接Fdc、固定不可拆连接N-Fdc和运动连接Kc, $Fdc = (\text{螺纹连接, 联轴器连接, 键连接等})$, $N-Fdc = (\text{焊接, 铆接等})$, $Kc = (\text{带连接, 轴承连接, 弹簧连接等})$.

定义5 特征装配集装配空间关系^[4]. 特征装配集空间关系是对复杂型面结构体零件、特征装配集及子装配体之间形成的装配约束在空间的运动关系与布局关系的抽象描述. 可定义为 $AssSR = (Kr, Lr)$. 其中: $Kr = (Tt, Rm)$ 为运动关系,包含传动类型Tt和相对运动Rm; $Lr = (AR, IR, IAR, IKR, ISHR, OR)$ 为布局关系,包括邻接关系AR、插入关系IR、插入邻接关系IAR、插入轴孔关系IKR、插入键槽关系ISHR、其他关系OR.

1.1.2 特征装配集模型

特征装配集模型是集成记录两个零件之间包括工程语义、单元件、装配约束、装配端口、装配空间关

系等装配信息的最小描述单元,其概念模型如图2所示。

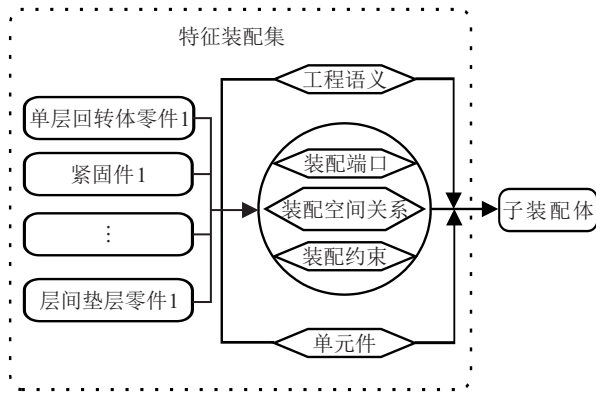


图2 特征装配集概念模型

特征装配集可表示为 $AssM = (AssInfor-Set, R-Set, AS-HR, AS-CR)$ 。其中: $AssInfor-Set = (AssES-S, AssSE-S, AssCons-S, AssPort-S, AssASR-S)$ 为特征装配集信息集合,包括工程语义集合 $AssIAssES-S$ 、单元件集合 $AssIAssSE-S$ 、约束集合 $AssIAssCons-S$ 、端口集合 $AssIAssPort-S$ 和空间关系集合 $AssIAssASR-S$ 。 $AssR-Set$ 为特征装配集各信息单元间的关系集合,包括聚合、依赖、继承和包含关系; $AS-HR$ 为特征装配集各信息单元之间的抽象层次关系; $AS-CR$ 为待装配设计意图和规范等因素限制的各信息集合之间的组合约束关系,包括可选、冲突、耦合和组合约束关系。

1.2 基于特征装配集的装配序列模块化拓扑排序

为了更好地描述特征装配集的装配序列推理,构建由顶点集与边集构成的特征装配集有向无环图,其可抽象为由两类节点构成:1)节点1表示单元件;节点I表示特征装配集;2)节点a表示子装配体,子装配体是特征装配集的高级体现,依据总装配体的零部件连接关系构造如图3所示有向无环图,该多层有向无环图是基于特征装配集的装配推理。

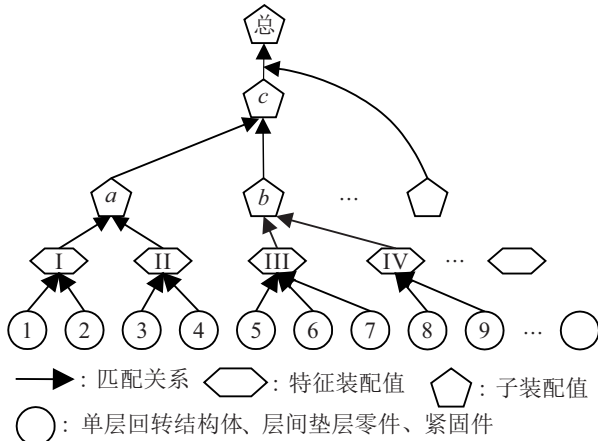


图3 装配序列的有向无环图

为了便于对特征装配集或子装配体节点间的关联关系进行分析,得到相应的装配最优路径,将有向无环图进行基于特征装配集的模块化拓扑排序处理,实现过程如下:1)在装配序列的有向无环图中任意选择一个没有前驱的顶点,即顶点入度为零,将该顶点输出;2)从装配序列的有向无环图中删除该顶点,并删除从该顶点出发的弧;3)依据本文中基于模糊理想解法的复杂型面结构体匹配推理的配对结果选择下一个没有前驱的顶点,重复执行前两步,直到装配序列的有向无环图不存在无前驱的顶点为止,获取多条装配序列。

2 基于模糊理想法的复杂型面配合决策

采用模糊数学方法将抽象的装配模型转换为便于计算与储存的数学模型。根据三角模糊数定义,确定9种语言变量(特征装配集间的匹配度)描述三角模糊数的取值如表1所示。

表1 特征装配集属性指标的三角模糊数对应表

匹配度级别	语言变量	三角模糊数
级别1	超低	(0.0, 0.1, 0.2)
级别2	特低	(0.1, 0.2, 0.3)
级别3	很低	(0.2, 0.3, 0.4)
级别4	低	(0.3, 0.4, 0.5)
级别5	一般	(0.4, 0.5, 0.6)
级别6	高	(0.5, 0.6, 0.7)
级别7	很高	(0.6, 0.7, 0.8)
级别8	特高	(0.7, 0.8, 0.9)
级别9	超高	(0.8, 0.9, 1.0)

依据表1,分别针对单元件-单元件、特征装配集-特征装配集、子装配体-特征装配集给出基于特征装配集的三角模糊数属性值;进一步地,将特征装配集进行数学模糊化处理得到与特征装配集对应的模糊集,再利用模糊理想解法计算特征装配集间的贴近度,通过比较贴近度数值选取最佳匹配的特征装配集,具体流程如图4所示。

基于模糊理想解法的复杂型面配合决策方法基本流程如下:

step 1: 构建单元件层、特征装配集层、子装配体层,并进行初始化。

step 2: 采用模糊层次分析法^[15](FAHP)计算特征装配集 $AK(P) = GC, AP, ASR$ 中各种属性的权重

$$w_1, w_2, w_3 =$$

$$(w_1^l, w_1^m, w_1^h), (w_2^l, w_2^m, w_2^h), (w_3^l, w_3^m, w_3^h).$$

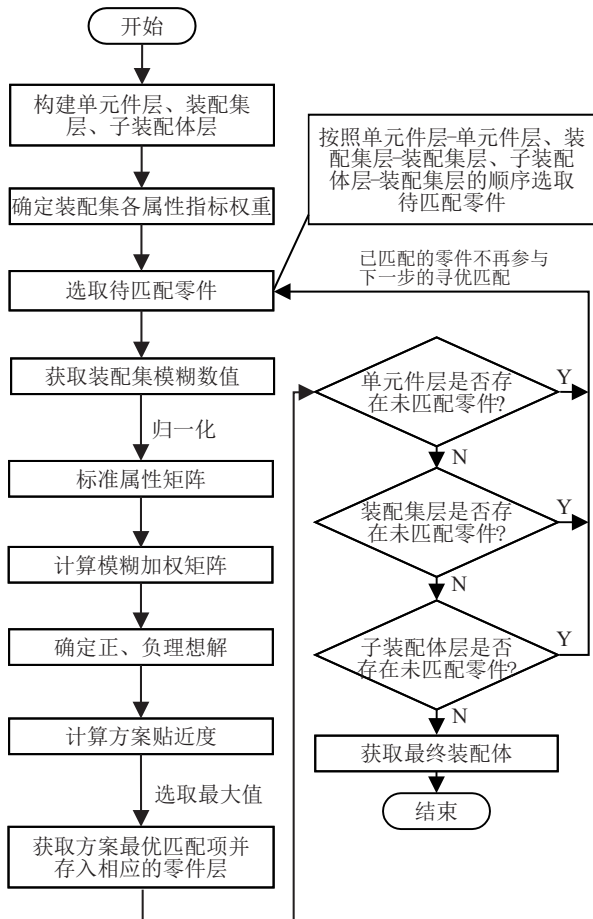


图4 基于模糊理想解法的复杂型面配合决策

step 3: 按照单元件层-单元件层、特征装配集层-特征装配集层、子装配体层-特征装配集层的顺序选取一个待匹配零件。

step 4: 根据特征装配集隶属度值的三角模糊数对应表给出特征装配集的属性指标 x_{ij} , 并进行归一化得到特征装配集的属性标准^[16]。

step 5: 采用模糊理想解法 (FTOPSIS) 计算模糊加权矩阵 $F_w = (w_j X_{ij}) = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

step 6: 计算模糊加权的正、负理想解

$$M_w^+ = (M_{1w}^+, M_{2w}^+, \dots, M_{nw}^+),$$

$$M_w^- = (M_{1w}^-, M_{2w}^-, \dots, M_{nw}^-).$$

step 7: 计算方案 A_k 与正、负理想解的距离。

方案 A_k 到正理想解的距离

$$D_k^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (D(r_{kj}, M_w^+))^2}. \quad (2)$$

方案 A_k 到负理想解的距离

$$D_k^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (D(r_{kj}, M_w^-))^2}. \quad (3)$$

在式 (2) 和 (3) 中, 两个三角模糊数 $M = (m_1,$

$m_2, m_3)$ 与 $N = (n_1, n_2, n_3)$ 之间的距离 D 定义为

$$D(M, N) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (m_i - n_i)^2}. \quad (4)$$

step 8: 确定方案 A_k 与模糊理想解之间的相对贴近度

$$D_k = \frac{D_k^-}{D_k^- + D_k^+}. \quad (5)$$

step 9: 按 D_k 的大小确定方案的优劣次序, D_k 越大, 方案越优。进一步地, 获取最优匹配方案。

step 10: 重复 step 3 ~ step 9, 遍历单元件层, 确定最优特征装配集匹配方案, 形成特征装配集层, 未能成功匹配的单元件自动存入下一装配层。已匹配的零件不再参与本层下一步的寻优过程。

step 11: 按照自下至上装配顺序的寻优规则, 选取位于特征装配集为装配主体的零件, 重复步骤 step 3 ~ step 9, 构建子装配体层, 未能成功匹配的单元件自动存入下一装配层。已匹配的零件不再参与本层下一步的寻优过程。

step 12: 重复 step 3 ~ step 9, 以子装配体为装配主体, 在特征装配集层中选取贴近度最高的特征装配集形成子装配体, 直至最终总装配体。

3 应用案例

大型水轮机导水机构是典型的复杂产品, 本文以大型水轮机导水机构为例, 导水机构由 11 类零件 (219 个零件) 装配而成。通过建立导水机构特征装配集模型, 实现装配工艺关联、匹配型面特征, 以及装配设计意图的集成化封装。在此基础上, 建立由单元件层、特征装配集层、子装配体层构成的大型水轮机导水机构有向无环装配图, 经过模块化拓扑排序处理后完成最优路径推理, 最后, 通过模糊理想解法计算大型水轮机导水机构特征装配集间的贴近度, 实现装配过程中零件的精准匹配。

3.1 大型水轮机导水机构的装配序列模块化拓扑排序

基于特征装配集的大型水轮机导水机构有向无环装配图如图 5 所示。

在图 5 中, 由单元件层组成大型水轮机装配序列决策的最底层, 依次向上装配构建特征装配集层、子装配体层直至获得最终装配产品, 每一层都具备特征装配集的基本属性。

将有向无环图经过模块化拓扑排序后处理得到相应的特征装配集及子装配体的装配序列, 如图 6 所示。

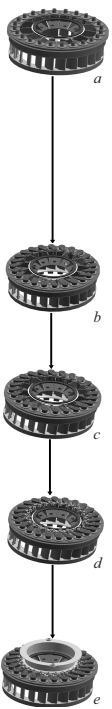
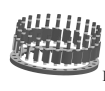

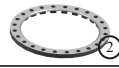





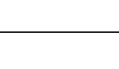
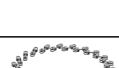
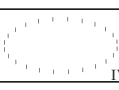

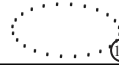



子装配体层	装配集层	单元件层	装配集几何约束	装配集装配端口	装配集装配空间关系	装配集工程语义
		 ①	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ②	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ③	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ④	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ⑤	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ⑥	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ⑦	柱面-柱面 平面-平面 共轴、贴合	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ⑧	柱面-柱面 共轴	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合 面面配合
		 ⑨	柱面-柱面 共轴	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合
		 ⑩	柱面-柱面 共轴	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合
		 ⑪	柱面-柱面 共轴	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合
		 ⑫	柱面-柱面 共轴	规律端口 单一装配面	插入轴孔关系	轴孔配合

图5 大型水轮机导水机构有向无环装配框架

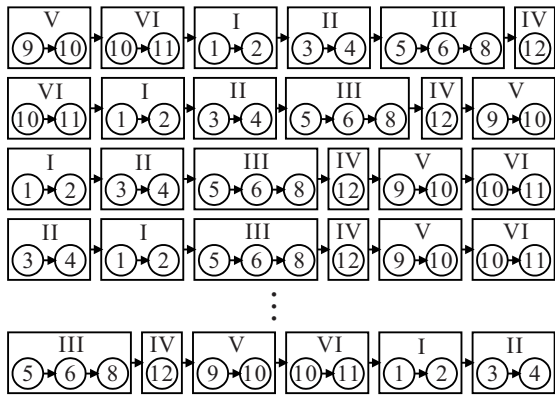


图6 模块化拓扑排序

单元件①与单元件②构成特征装配集I,单元件③与单元件④构成特征装配集II,单元件⑨与单元件⑩构成特征装配集V,单元件⑪与单元件⑫构成特征装配集VI.

在单元件中的单层回转结构体、层间垫层零件及紧固件中进行匹配构成特征装配集的过程中存在一种特殊情况,单元件的待装配面是由多个零件共同组成,即混合面装配端口.如图6所示,特征装配集III由单元件⑤、单元件⑥与单元件⑧共同构成,首先单元件⑤与单元件⑥优先装配构成高级别的功能件⑦,进而单元件⑦通过单元件⑧固定构成特征装配集III.

由于单元件①作为主要承重件应位于装配最底层,在装配位置中应该首先装配.故根据模块化装配拓扑结果选取功能件①位于首位的装配序列.根据实际装配经验,水轮机是由自下至上的顺序进行装配,故最终筛选路径(①-②)-(③-④)-(⑤-⑥-⑧)-(⑫)-(⑨-⑩)-(⑩-⑪)作为大型水轮机导水机构的最优装配序列.

3.2 基于模糊理想解法的大型水轮机导水机构配合决策

根据第2节中基于模糊理想解法的复杂型面配合决策方法完成大型水轮机导水机构零件的精准匹配,实现过程如下:

- 1) 构建单元件层、特征装配集层、子装配体层,并进行初始化.
- 2) 计算水轮机特征装配集各属性指标权重.由模糊层次分析法计算特征装配集矩阵中各属性指标权重,按照重要程度从大到小排序依次如下:
几何约束 $w_1 = (0.38, 0.45, 0.51)$,
装配端口 $w_2 = (0.25, 0.31, 0.40)$,
装配空间关系 $w_3 = (0.19, 0.24, 0.31)$.
- 3) 在单元件层选取底环作为待匹配对象.
- 4) 获取归一化后的标准矩阵.分别给出基于底环

装配的10个方案的3个属性的模糊属性值,并进行归一化处理得到标准矩阵,见表2.

表2 特征装配集模糊属性值

	GC	AP	ASR
权重 (w)	(0.38, 0.45, 0.51)	(0.25, 0.31, 0.40)	(0.19, 0.24, 0.31)
底环-导叶	(0.87, 0.90, 0.94)	(0.78, 0.82, 0.88)	(0.85, 0.91, 0.96)
底环-顶盖	(0.13, 0.22, 0.29)	(0.05, 0.12, 0.18)	(0.03, 0.11, 0.17)
底环-导筒	(0.43, 0.50, 0.56)	(0.51, 0.59, 0.67)	(0.35, 0.43, 0.49)
底环-拐臂	(0.32, 0.41, 0.47)	(0.44, 0.52, 0.59)	(0.22, 0.31, 0.37)
底环-键	(0.24, 0.32, 0.36)	(0.41, 0.52, 0.55)	(0.51, 0.62, 0.67)
底环-副拐臂	(0.33, 0.40, 0.46)	(0.43, 0.51, 0.58)	(0.21, 0.33, 0.40)
底环-键端销	(0.13, 0.21, 0.29)	(0.33, 0.42, 0.51)	(0.51, 0.61, 0.73)
底环-销钉	(0.31, 0.39, 0.45)	(0.41, 0.53, 0.63)	(0.51, 0.63, 0.69)
底环-连杆	(0.11, 0.19, 0.26)	(0.41, 0.47, 0.54)	(0.14, 0.21, 0.31)
底环-控制环	(0.11, 0.18, 0.25)	(0.54, 0.63, 0.71)	(0.23, 0.31, 0.38)

5) 计算模糊加权矩阵 $F_w = (w_j \times x_{ij})(m \times n)$. 计算结果见表3.

表3 模糊加权矩阵属性值

方案	GC	AP	ASR
底环-导叶	(0.33, 0.41, 0.48)	(0.20, 0.25, 0.35)	(0.16, 0.22, 0.30)
底环-顶盖	(0.05, 0.10, 0.15)	(0.01, 0.04, 0.07)	(0.01, 0.03, 0.05)
底环-导筒	(0.16, 0.23, 0.28)	(0.13, 0.18, 0.27)	(0.07, 0.10, 0.15)
底环-拐臂	(0.12, 0.18, 0.24)	(0.11, 0.16, 0.24)	(0.04, 0.07, 0.11)
底环-键	(0.09, 0.14, 0.18)	(0.10, 0.16, 0.22)	(0.10, 0.15, 0.21)
底环-副拐臂	(0.13, 0.18, 0.23)	(0.11, 0.16, 0.23)	(0.04, 0.08, 0.12)
底环-键端销	(0.05, 0.09, 0.15)	(0.08, 0.13, 0.20)	(0.10, 0.15, 0.23)
底环-销钉	(0.12, 0.18, 0.23)	(0.10, 0.16, 0.25)	(0.10, 0.15, 0.21)
底环-连杆	(0.04, 0.09, 0.13)	(0.10, 0.15, 0.22)	(0.03, 0.05, 0.10)
底环-控制环	(0.04, 0.08, 0.13)	(0.14, 0.20, 0.28)	(0.04, 0.07, 0.11)

6) 确定正、负理想解

$$M^- = ((0.04, 0.08, 0.13), (0.01, 0.04, 0.07), (0.01, 0.03, 0.05)),$$

$$M^+ = ((0.33, 0.41, 0.48), (0.20, 0.25, 0.35), (0.16, 0.22, 0.30)).$$

7) 计算方案与正、负理想解的海明距离以及贴近度,计算结果见表4.

表4 海明距离和贴近度

	方案A	方案B	方案C	方案D	方案E
D_k^+	0	0.43	0.23	0.29	0.30
D_k^-	0.45	0.03	0.39	0.17	0.18
D_k	0.99	0.07	0.63	0.37	0.38

	方案F	方案G	方案H	方案I	方案J
D_k^+	0.29	0.34	0.26	0.38	0.36
D_k^-	0.17	0.17	0.21	0.12	0.18
D_k	0.37	0.33	0.45	0.24	0.33

由表4可知,方案A的贴近度为0.99最大,方案最优,即对底环而言,导叶是其最优匹配项.

8) 重复第2节中 step 3 ~ step 9,依次计算出以导叶、顶盖、导筒、拐臂、键、副拐臂、键端销、销钉、连杆以及控制环为基础件时对应的待装配零件的贴近度.

9) 重复第2节中 step 3 ~ step 9依次完成特征装配集-特征装配集,构建子装配体层,子装配体-特征装配集的后续装配.

通过上述步骤得出大型水轮机导水机构的最优装配路线搜索结果如下,最优装配总图如图7所示.

- 特征装配集I-特征装配集II→子装配体a;
- 特征装配集III-子装配体a→子装配体b;
- 特征装配集IV-子装配体b→子装配体c;
- 特征装配集V-子装配体c→子装配体d;
- 特征装配集VI-子装配体d→子装配体e.

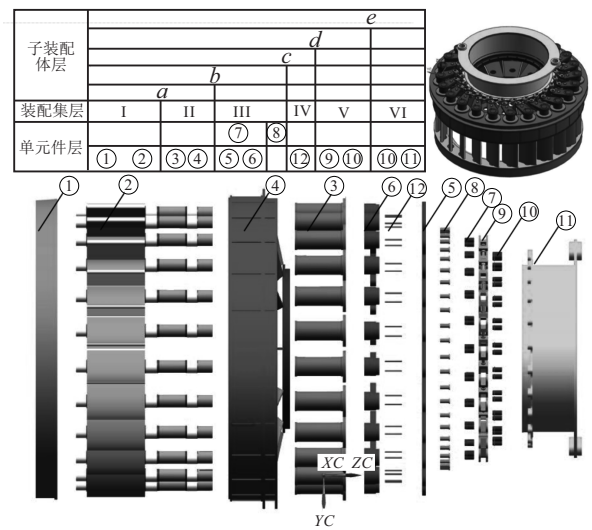


图7 大型水轮机导水机构最优装配

3.3 对比分析

为了进一步验证本文方法在解决装配零件多且配合型面结构多样的复杂产品高效准确装配问题的可行性和优越性,将本文方法与基于本体的装配序列自动生成方法^[8]、基于与或图的方法^[9]、基于多色集合的方法^[11],以及基于改进粒子群算法的多工位装配序列规划方法(IPSO)^[4]进行比较,如表5所示.

表5 5种装配序列规划方法可行序列数实验结果对比

参数	本文方法	基于本体	与或图	多色集合	IPSO
零件数	219	16	16	32	16
特征装配集(子装配体)数	6	6	/	8	/
可行序列数	10	32	16!	48	50

由表5可知:当零件数 $n = 219$ 时,所提方法生成的理论装配序列数量为10;当零件数 $n = 16$ 时,基于本体的方法生成的序列为32;当零件数 $n = 16$ 时,与或图生成的可能序列为16!;当零件数 $n = 32$ 时,基于多色集合的方法生成的序列为48;当零件数 $n = 16$ 时,基于粒子群算法生成的序列为50.由此可见,所提

方法的执行效果相当于将所有装配单元以子装配体为单位进行划分,减少了序列组合,在很大程度上缩小了解的个数,降低了计算的复杂度。

同时,为了客观评价所提方法得到的可行序列的可行性,采用文献[17]中式(6)和(7)对装配路径复杂度 Y 与装配路径困难基数 J 进行计算,并将计算结果与相关文献进行比较,如表6所示。

表6 4种装配序列规划方法可行序列评价结果对比

参数	本文方法	基于本体	多色集合	IPSO
Y	0.2946	0.8125	0.4618	0.4375
J	0.2108	0.4058	0.8569	0.6625

$$|Y| = \left| \frac{D}{D_E} + \frac{e_x + e_y + e_z}{|e_D|} + \frac{N}{N_E} \right| \quad (6)$$

其中: D_E 表示目标路径所在装配顺序段中所有路径的方向变化总和, D 表示目标路径方向变化数, N_E 表示目标路径所在装配顺序段中所有路径的点集空间大小总和, N 表示目标路径点集空间大小, e_D 表示偏移矩阵方差阵, e_x, e_y, e_z 表示 X, Y, Z 方向偏移量方差。

$$J = \frac{S}{S_E} + \frac{T}{T_E} + K \quad (7)$$

其中: S_E 表示目标装配体所在装配顺序段中所有障碍物数量的总和, S 表示目标装配体障碍物数量, T_E 表示目标装配体所在装配顺序段中所有工具数量的总和, T 表示目标装配体工具数量, K 表示工装开敞性。

由文献[17]装配序列评价方法可知:当 $0 \leq Y \leq 1$ 且 $0 \leq J \leq 1$ 时,装配规划是可行的且无需重新设计; Y 与 J 越小,装配序列表现越优。从表6可以看出,本文方法得到的 $Y = 0.2946$ 、 $J = 0.2108$ 均为较小值,且优于其他3种方法,说明本文所提方法具有更强的寻优能力,即本文所提方法在解决装配零件多且配合型面结构多样的复杂产品精准匹配方面具有一定的优势。

通过上述两方面的对比表明,采用本文方法生成的装配序列在装配顺序的可行性、工艺性和优劣程度等方面均具有明显的优势。

3.4 装配服务封装

为了展示精准匹配推送结果,本文将复杂型面装配过程中的配合决策方法进行服务封装,构建基于特征装配集的资源服务平台,平台主要以 Eclipse 作为集成开发环境,利用 SQL 构建平台数据库,集成采用 Java、XML、JavaScript、VRML 等语言开发多特征融合的装配资源组件,最后以 Tomcat 为服务器搭建资源服务平台,如图8所示,实现复杂产品的精准装配。



图8 大型水轮机导水机构装配资源匹配实现

4 结论

本文针对复杂型面装配过程中零部件间配合关系表述不清晰、装配序列寻优困难,以及无法依据工艺约束特征进行自适应精准匹配问题,提出了基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法,构建了复杂型面基于多特征融合的装配集模型,通过集成化模块封装实现装配工艺关联、匹配型面特征,以及装配设计意图等配合特征的一体化抽象描述,通过将所构建特征装配集模型进行拓扑排序获取最优装配序列。在此基础上,引入模糊理想解法,通过计算复杂型面结构体间的匹配贴适度,实现复杂产品装配设计阶段零部件间基于特征装配集的精准匹配,最后通过实例验证了所提方法的可行性和有效性。

由于零件装配优选过程中涉及的影响因素较多,指标关系复杂,本文只研究了其主要特征属性,为实现复杂型面结构体高效精确装配提供了新思路。下一步工作主要考虑针对实际装配环境下的指标体系对特征装配集模型和匹配算法作进一步完善,使其可以更加有效地解决实际装配过程中零部件的自适应精准匹配问题。

参考文献(References)

- [1] Mathew A T. Implementation of genetic algorithm to optimize the assembly sequence plan based on penalty function[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2014, 9(4): 453-456.
- [2] Ning J X, Zhang Q, Zhang C S, et al. A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm[J]. Information Sciences, 2018, 433/434: 142-162.
- [3] Wang Y, Liu J H. Chaotic particle swarm optimization for assembly sequence planning[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 212-222.
- [4] 宫华, 袁田, 张彪. 基于深度邻域搜索 PSO 算法的装配序列优化问题[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1291-1295.
(Gong H, Yuan T, Zhang B. Assembly sequence planning problem based on particle swarm optimization algorithm

- with depth local search[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(7): 1291-1295.)
- [5] 王松, 孙振忠, 郭建文, 等. 基于混合蛙跳算法的复杂产品装配序列规划[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(12): 2991-2999.
(Wang S, Sun Z Z, Guo J W, et al. Assembly sequence planning based on shuffled frog leaping algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 2991-2999.)
- [6] Qiao L H, Qie Y F, Zhu Z W, et al. An ontology-based modelling and reasoning framework for assembly sequence planning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9/10/11/12): 4187-4197.
- [7] 孟瑜, 古天龙, 常亮, 等. 面向装配序列规划的装配本体设计[J]. *模式识别与人工智能*, 2016, 29(3): 203-215.
(Meng Y, Gu T L, Chang L, et al. Assembly ontology for assembly sequence planning[J]. *Recognition and Artificial Intelligence*, 2016, 29(3): 203-215.)
- [8] 钟艳如, 姜超豪, 覃裕初, 等. 基于本体的装配序列自动生成[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(6): 1345-1356.
(Zhang Y R, Jiang C H, Qin Y C, et al. Automatic generation of assembly sequences based on ontology[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(6): 1345-1356.)
- [9] 梁勇强. 生成装配与或图的直接算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(5): 956-963.
(Liang Y Q. Direct algorithm for the generation of assembly AND/OR graph[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(5): 956-963.)
- [10] 刘翊, 李世其, 曾洪梅, 等. 产品关键装配约束代理的分层分级方法研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(12): 7-11.
(Liu Y, Li S Q, Zeng H M, et al. Hierarchical classification method study for key constraint agent of products[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2013, 41(12): 7-11.)
- [11] 赵姗姗, 李宗斌. 基于多色集合的装配序列规划方法[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(14): 1691-1697.
(Zhao S S, Li Z B. Research on polychromatic sets-based assembly sequence generation method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(14): 1691-1697.)
- [12] 徐志佳, 王清辉, 李静蓉. 基于装配特征偶的设计意图建模方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(1): 214-222.
(Xu Z J, Wang Q H, Li J R. Modeling assembly design intent based on assembly feature pair[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(1): 214-222.)
- [13] Zhang Y Z, Luo X F, Fan C. Semantic representation for assembly design intent[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(2): 248-255.
- [14] 张应中, 罗晓芳, 范超. 装配空间关系形式表达[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(9): 1553-1560.
(Zhang Y Z, Luo X F, Fan C. Formal representation of spatial relations of assembly[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2011, 23(9): 1553-1560.)
- [15] 李永锋, 朱丽萍. 基于模糊层次分析法的产品可用性评价方法[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(14): 183-191.
(Li Y F, Zhu L P. Product usability evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14): 183-191.)
- [16] Ye F, Li Y. An extended TOPSIS model based on the possibility theory under fuzzy environment[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 67(3): 263-269.
- [17] 余剑峰, 程晖, 姚定, 等. 复杂产品装配顺序评价的路径反馈方法[J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(1): 24-29.
(Yu J F, Cheng H, Yao D, et al. A path feedback method for evaluating the assembly sequence of complex products[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(1): 24-29.)

作者简介

阴艳超(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能制造、资源体系、知识工程等研究, E-mail: yinyc@163.com;

蒋维(1994—), 男, 硕士生, 从事智能制造、知识服务的研究, E-mail: jiangwei6835@163.com;

徐凯(1993—), 男, 硕士生, 从事虚拟装配、知识工程的研究, E-mail: xukai_0607@163.com;

廖伟智(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事资源体系、产业集群、知识服务等研究, E-mail: liaoweizhi@126.com.

(责任编辑: 闫妍)