

微器件产品装配工艺的智能决策

史玲玲* 杜逸民 郭丽丽 张之敬 金鑫 李佳迪

北京理工大学机械与车辆学院,北京,100081

摘要:针对微器件产品装配工艺规划严重依赖人工经验的问题,提出了基于知识驱动的细节度微器件装配工艺规划方法,研制了融合产品和系统知识的微器件装配工艺决策软件。该规划方法考虑装配系统资源约束,从工序、工步、工艺参数三个维度规划微器件的装配工艺。基于区间型犹豫模糊熵的混合属性匹配权重参数确定方法保证了工艺决策算法的有效性。研制的决策系统实现了微器件产品装配工艺的快速决策。

关键词:装配工艺规划;知识驱动;装配系统;微器件

中图分类号:TH164;TH162

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Intelligent Decision-making for Assembly Processes of Micro-device Products

SHI Lingling* DU Yimin GUO Lili ZHANG Zhijing JIN Xin LI Jiadi

School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081

Abstract: To solve the problems that the assembly process planning of micro-device products relies on manual experience heavily, a knowledge-driven fine-grained micro-device assembly process planning method was proposed. And a micro-device assembly process decision software integrating product and system knowledge was developed. This planning method took the resource constraints of the assembly systems into account, and planned the assembly processes of micro-devices from process, steps, and process parameters. Based on interval-type hesitant fuzzy entropy, a mixed attribute matching weight parameter determination method ensured the effectiveness of the process decision algorithm. The developed decision system realized rapid decision-making of the assembly processes of micro-device products.

Key words: assembly process planning; knowledge-driven; assembly system; micro-device

0 引言

微靶、微加速度计等微器件在国民经济中的应用越来越广泛。为解决微器件产品装配质量一致性差、效率低的问题,适应微器件产品形状不规则、尺寸跨度大、易碎易变形的特点,满足高精度、多品种、变批量的生产需求,急需采用精密智能微装配系统或全自动微装配技术代替手工装配^[1]。现有的装配工艺规划主要从产品的角度出发,过分依赖人工经验,未能充分考虑实际的装配系统约束,规划过程缺乏对知识的有效管理和应用,生成的工艺难以直接指导实际装配,因此,面向装配系统的微器件产品装配工艺规划是实现微器件智能化、柔性化装配的关键问题之一。

现有研究中,装配工艺规划方法主要基于流程、模型定义、取向和几何特征、数字孪生以及知识。

基于流程的装配工艺规划将装配过程看作由

装配节点组成的流程,通过设置节点属性、配置节点数据,实现对装配过程和装配信息的描述与管理。文献[2-3]基于总装流程图和专项流程图,提出嵌入装配流程图的装配资源管理和工艺生成方法,以及基于流程的结构化装配工艺设计方法。基于流程的装配工艺规划方法提供装配过程和装配信息的描述形式,但装配工艺流程图仍依赖工艺人员设计,效率低下,难以满足复杂微器件多品种、变批量的柔性化生产要求。

基于模型定义(model based definition, MBD)的装配工艺规划技术被逐渐用于制造领域并取得丰硕成果。波音787的设计与制造实现了从产品数字化定义到数字化装配工艺设计的无缝数据流和信息流^[4-6]。刘欢连等^[7]提出一种以三维装配过程模型为载体、面向现场装配的产品装配工艺模型表达与管理方法。中国商飞、中航工业成飞加强了MBD技术在飞机制造领域的应用,缩短了装配工艺设计时间^[8]。基于MBD的装配工艺规划直接关联信息集成后的CAD模型与工艺规划系统,避免了手绘工程图产生的人为错误,极大降

低了对人工的依赖,但所用三维模型中的数据来自不同的设计师或制造商团队,实际应用过程中难以保证数据质量的一致性及数据共享。基于MBD所用模型,通过分析零部件间的取向和几何特征关系可实现装配工艺规划中装配序列的自动推理^[9-11]。

为实现面向装配过程的装配工艺规划和优化,数字孪生技术在装配领域逐渐被应用。陶飞等^[12]提出了数字孪生工艺模型构建,以及基于数字孪生的工艺创新设计与工艺持续优化的难点,明确了数字孪生技术在装配工艺设计应用的研究方向。郭飞燕等^[13]探索了孪生工艺模型动态构建与分析、装配工艺规划与评价等关键问题的解决方法。刘检华等^[14]提出了实用的集成化虚拟装配工艺规划系统,并对虚拟产品装配模型、装配过程中知识辅助决策、装配现场工艺可视化等虚拟装配工艺规划系统的关键技术进行了论述。上述方法可有效实现与装配现场信息实现交互,但如何结合长期以来积累的专家经验知识,还有待进一步研究。

为充分利用装配过程中的各类数据、知识元,实现对装配过程信息的统一管理、共享和复用,学者对工艺知识进行形式化表达,并以此指导装配工艺规划。柳振兴等^[15]提出一种基于知识的装配顺序规划优化方法。王峻峰等^[16]基于本体概念构建了装配工艺知识体系,形成了包含装配单元、装配工序、装配资源和基本装配工艺等知识的装配工艺知识库,开发了面向装配规划需求的装配工艺知识管理系统。GONG等^[17]提出的装配工艺决策方法基于产品的本体知识模型匹配推送相似案例。上述装配工艺规划过程所得的工艺知识大多停留在工序层,工步层的内容以手工装配为主,规划过程从产品角度出发,未考虑实际的自动/半自动装配系统约束。

针对上述问题,本文在构建知识模型及对应微器件装配系统约束的基础上,开展面向多种微器件产品的知识驱动装配工艺规划方法研究,并研制了面向微器件装配过程的装配工艺规划软件。该软件可快速生成微器件产品的细粒度装配工艺,提高系统的柔性,生成的装配工艺文件能与实际物理系统的控制函数模块形成映射,促进工艺变更下系统的快速响应。

1 微器件产品的装配工艺描述

微器件产品的装配工艺可通过工序、工步、工

艺参数来表达。产品的装配工序是装配工艺的顶层描述,将零件/部件/组件装配成对应父装配体的过程为一道工序。每个工序由6个基本操作工步即取件、运送、放置、检测、调整、装配组成,根据实际工序需求,选择部分或全部工步组成工序内容。各操作工步包含该工步所需决策的具体工艺参数。装配工艺的多维描述架构如图1所示。依据零部件的装配要求,结合装配工步/子工步在装配过程中的实现功能,梳理工步/子工步包含的工艺参数。工艺参数是工步的核心内容,可通过知识解析、规则推理、仿真分析等方法获取,获取后将其赋值于对应的控制函数模块形参。

2 微器件产品装配工艺的智能决策方法

针对微器件产品和微器件装配系统(图2^[18]),依据装配工艺的内涵及生成顺序,以产品的知识模型为输入(设计模型到知识模型的构建可参看文献[19]),通过人机交互的方式规划产品的装配序列,确定产品装配工序。在此基础上,基于规则判断各工序包含的基础工步,然后基于混合属性匹配算法实施工艺参数决策,并利用基于区间型犹豫模糊熵的方法确定涉及的工艺匹配参数。

2.1 基于人机交互的装配序列规划

基于产品本体知识模型的装配序列规划过程如图3所示。为便于工艺人员明确产品装配的先后关系,在产品知识模型的支撑下,将解析获取的产品装配层次信息可视化重构为装配层次树。对于装配层次树自上而下的各个层次,节点零部件的结构复杂度逐级递减,装配优先级逐渐增加。对于同层级的装配关系,通过人机交互设置装配类型及装配件类型属性,再基于建立的层次树遍历规则遍历装配层次树,最终生成产品装配工序。

2.1.1 产品装配层次识别

根据基于产品设计数据的知识挖掘和产品知识模型构建方法^[18],挖掘产品设计模型包含的有效装配工艺知识,构建产品的本体知识模型。以产品知识模型为输入,解析推理产品的装配层次关系,并可视觉化为装配层次树。如图4所示,每个灰色块代表一个零件,产品1~5层(自顶向下)的零部件数分别为1、4、4、4、4。

2.1.2 确定装配次序优先级

建立产品的装配层次树后,通过人机交互确定各个装配层次间的装配类型及该层次下各个零部件类型的属性(装配基体或待装配件),补充的属

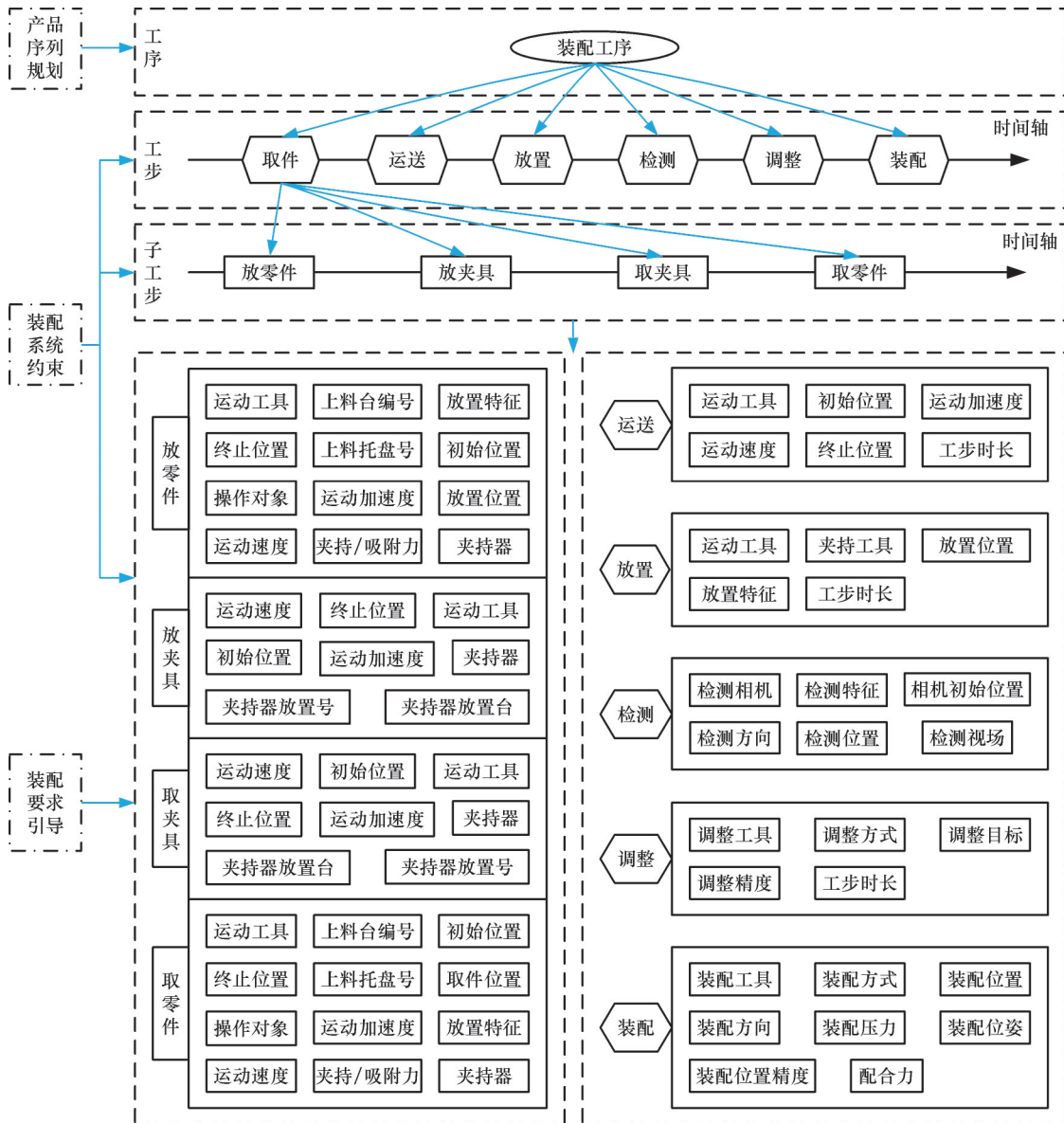


图1 装配工艺的多维描述架构图

Fig.1 Multi-dimensional description architecture diagram of assembly process

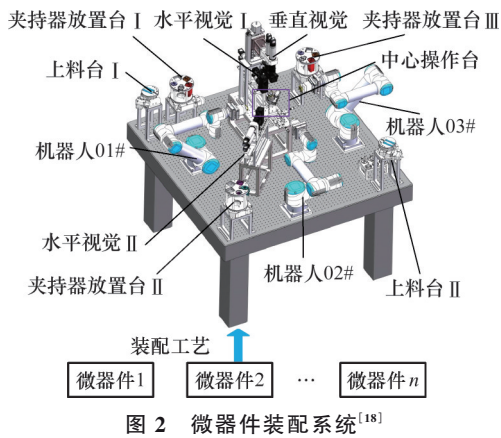


图2 微器件装配系统^[18]

Fig.2 Micro-device assembly system^[18]

性通过数据映射方式添加至产品本体,从而更新产品知识模型。按“装配层次从下往上、装配枝树先左后右、装配件类型先装配基准再待装配件”的规则遍历产品装配层次树,生成产品的装配工序。

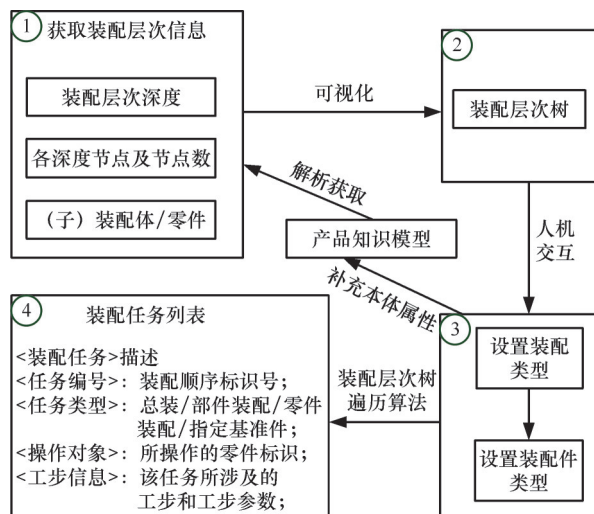


图3 人机交互的装配序列规划过程

Fig.3 Human-computer interactive assembly sequence planning process

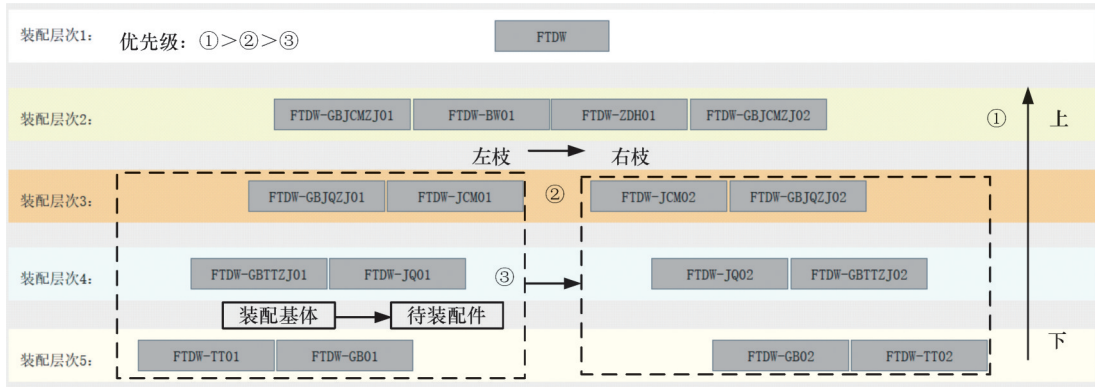


图4 装配层次树遍历规则

Fig.4 Assembly hierarchy tree traversal rules

2.2 基于规则推理的装配工步判断

2.2.1 取件工步判断规则

位于上料台的零件需运送至装配工位进行装配,故取件工步需匹配夹持器和运送机器人。根据匹配的夹持器和机器人确定取件工步选用的子工步内容。取件的4个子工步描述是否取/放夹持器和取/放零件。它们的判断基本准则为:未处于开始状态时,机器人判断“上一装配工序所用夹持器是否与当前工序所需夹持器一致”“上一装配工序生成的子装配体是否与当前工序装配对象一致”。定义取件工步判断所需变量,并利用产生式规则判断取件工步的子工步,规则示例代码如下:

```
If partTray.contains("HandTP") == false & robotAssemblyTask.isEmpty == false & CurTaskGripper.Equal(lastTaskGripper) == true & CurTaskObjet.equal(lastTaskOutAssembly) == true & isPartOnRob == true & isGripperOnRob == true;
Then pickUpStepList == {null, null, null, null}.
```

上述规则含义为:若零件不在上料台、该机器人执行过装配动作、当前夹持器与上一工序所用夹持器一致、当前装配对象与上一工序的子装配体一致、该机器人末端有零部件、该机器人末端有夹持器的条件同时满足,则无取件工步。

2.2.2 运送工步判断规则

运送工步是将装配对象运送至装配工位附近,等待下一步检测、调整等装配工步动作,所以各工序均包含运送工步。

2.2.3 放置工步判断规则

放置工步包含夹持器松开零件的动作。装配过程中,若待装配件需要保持在夹持器上并沿装配方向移动、实施装配,则不需要放置工步。若装配基体不在装配工位上,则需将其运送至装配工位附近并放置在工位的工装上,因此需放置工

步。定义放置工步判断过程所需变量,并利用产生式规则进行放置工步的判断,规则示例代码如下:

```
If AssemType.equal("装配基体") == true & productPutErea.contians("HandTP") == true;
Then isHasPutDownStep = false;
If AssemType.equal("装配基体") == true & isHasPlaceOnHT == false;
Then isHasPutDownStep = false;
Else isHasPutDownStep = true.
```

上述规则含义为:如果装配件类型为装配基体且零件放置区包含转台托盘,则没有放置工步;如果装配件类型为装配基体,且转台托盘上无零件放置位置,需要在机器人上完成装配,则没有放置工步。除此之外,则有放置工步。

2.2.4 检测、调整工步判断规则

检测、调整是相互迭代的过程,通过不断的检测、调整直至达到要求的目标装配位姿。按照装配件类型,零件可分为装配基体和待装配件,二者均需检测以判断是否达到装配位姿,也均需通过调整工步达到目标位姿。

2.2.5 装配工步判断规则

装配过程中,装配基体不动,待装配件沿装配方向移动一定距离完成装配,所以待装配件有装配动作,装配基体无装配动作。定义装配工步判断过程所需变量,并利用产生式规则判断装配工步,规则示例代码如下:

```
If AssemType.equal("待装配件") == true;
Then isHasAssemStep = true.
```

上述规则含义为:如果装配件类型为待装配件,则有装配工步。

2.3 基于知识推理与混合属性匹配的工艺参数决策

工艺参数包含如初始位置、终止位置等随装配进程不断变化的位置参数,这些参数与运动工

具是否处于初始状态以及相邻工步的装配动作有关,工步参数决策时暂不考虑,统一采用位置变量指针的方式追踪获取。

2.3.1 取件工步参数决策

整理图1所示的4个子工步涉及的工艺参数,在不考虑初始/终止位置的情况下,各工艺参数的关系及获取方式如图5所示。首先确定装配对象、运动工具和夹持器,其余工艺参数通过知识解析、规则约束或仿真计算获取。

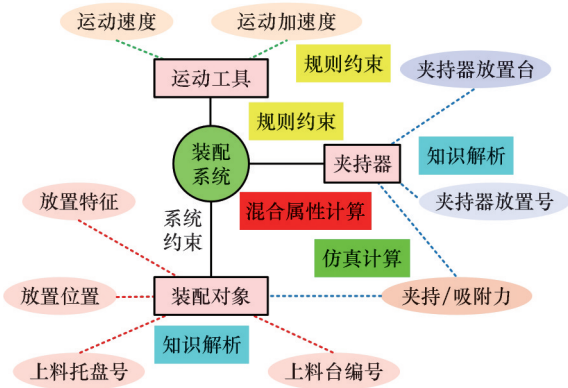


图5 取件工步参数决策

Fig.5 Parameter decision of the picking step

根据装配工序确定装配对象。根据该装配对象的装配系统,确定装配对象的放置位置、上料台编号、上料托盘号、夹持器放置台。确定装配对象和夹持器后,解析产品本体知识模型,获取上述参数及放置特征值。确定装配对象夹持器后,通过力学仿真得到装配对象的夹持/吸附力。确定零件夹

持/吸附力后,最大运动加速度应满足如下约束:

$$a_{Ri}G_{Pi}/g < (F_{Si} - G_{Pi})\mu_i\beta$$

$$G_{Pi}(a_{Ri}/g + 1) < F_{Ci}\mu_i\beta$$

式中: a_{Ri} 为运动工具运送零件*i*时的最大加速度; G_{Pi} 为零件*i*的重力; g 为重力加速度; F_{Si} 为第*i*个零件的吸附力; F_{Ci} 为第*i*个零件的夹持力; μ_i 为第*i*个零件的表面静摩擦因数; β 为安全系数。

夹持器和运动工具的确定方式如下。

1)基于混合属性的夹持器匹配。夹持器的夹持方式和表面刚度、夹爪表面粗糙特性、夹持力大小等均会对微器件零件的夹持效果产生显著影响。受装配系统约束,夹持器会影响移动工具的选择、工步必要性确定、各工步参数设计等。因此,首先详细讨论夹持器的匹配方法,采用专家经验确定与装配工艺相关的夹持器和零件属性,在此基础上提出混合属性匹配算法选择夹持器。夹持器匹配即将零件的各个夹持属性与系统中各个夹持器的夹持属性依次进行匹配,根据夹持属性的匹配得分,推送得分高的夹持器,并通过人机交互进行确认。夹持属性的数据类型包含枚举型、精确数值型、区间范围型、布尔型、字符串型等,根据概念相似度公式MD3模型,获得不同的属性匹配计算公式。图6中, $C_1\sim C_4$ 与 $P_1\sim P_4$ 的属性匹配值可基于专家经验获取,其他属性匹配方法如下:

①精确数值型。零件特征尺寸与夹具特征尺寸、零件特征面积与夹具特征面积的匹配公式分别为

抓取工艺特性	零件特性	P ₁		P ₂			P ₃			P ₄			P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	
		形状特征			表面粗糙度			夹持力学特征			操作特征数			几何尺寸-产品夹取特征尺寸	几何尺寸-产品夹取特征面积	可承受夹持力大小	零件重量	标志符(ID)
		片状	不规则三维实体	规则三维实体	光滑	普通	粗糙	易变形	易碎	普通	1个面	2个面	多个面					
C ₁	刚性夹持	0.6	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0	0	1								
	柔性夹持	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6								
	吸附	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1								
C ₂	夹爪表面	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6								
	柔性表面	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.8								
	刚性表面	0.3	1	1	0.6	1	1	0.6	0.6	1								
C ₃	夹爪表面				0.3	0.3	0.3											
	光滑																	
	普通				1	1	1											
C ₄	粗糙度特性				0.3	1	1											
	1个面									1	0.8	0.8						
	2个面									0.3	1	0.8						
C ₅	多个面									0	0.3	1						
	基于专家经验的工艺匹配参数																	
	几何尺寸-1												S-decimal					
C ₆	几何尺寸-2													S-decimal				
	夹取特征面积																	
C ₇	夹取力大小														S-section	≥mg/u		
C ₈	夹持最大负载															≥		
C ₉	标志符(ID属性)																	S-string

图6 基于混合属性的夹持器匹配

Fig.6 Gripper matching based on hybrid attributes

$$S(P_5, C_5) = \exp\left(-\frac{|P_5 - C_5|}{P_5 + C_5}\right)$$

$$S(P_6, C_6) = \exp\left(-\frac{|P_6 - C_6|}{P_6 + C_6}\right)$$

式中: P_5 、 C_5 分别为产品夹取特征尺寸和夹持器夹取特征尺寸的精确值; P_6 、 C_6 分别为产品夹取特征面积和夹持器

夹取特征面积的精确值。

②区间范围型。零件可承受夹持力大小与夹具夹取力大小的属性匹配公式为

$$S(P_7, C_7) = w_7 S'(P_7, C_7)$$

$$w_7 = \begin{cases} 1 & C_7 \geq P_8/u \\ 0 & C_7 < P_8/u \end{cases}$$

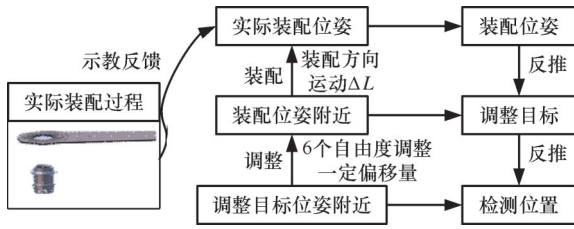


图9 装配位姿、调整目标位姿、检测位置关系

Fig.9 Assembly posture, adjustment of target posture, and detection of position relationship

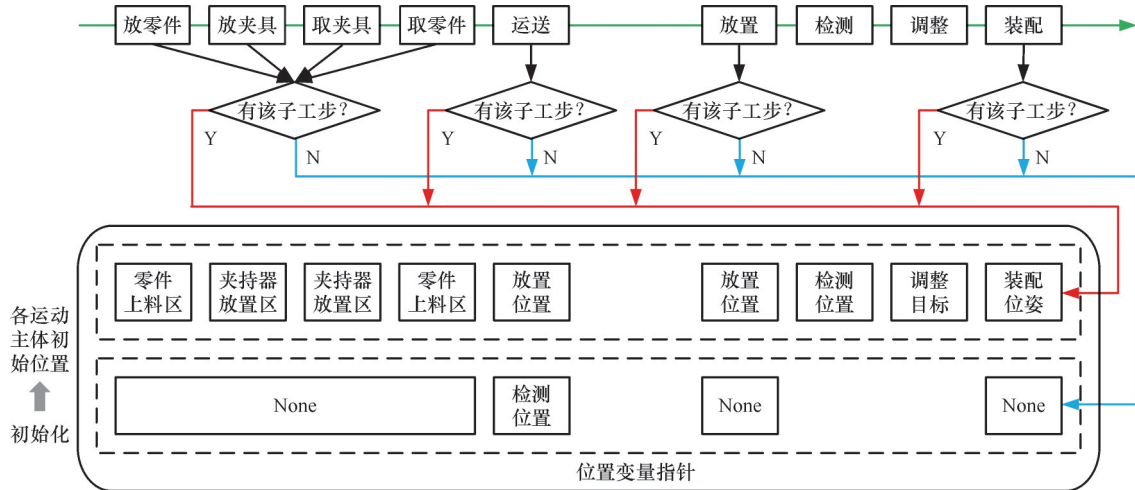


图10 各工步位置变量变化范围

Fig.10 The range of position variables of each process step

2.4 基于区间型犹豫模糊熵的工艺匹配参数确定

工步工艺参数决策中,匹配算法权重参数的确定依赖专家经验,为减少专家个人偏好引起的匹配结果不准确,采用调查问卷获得专家对属性关联度的评分,利用区间型犹豫模糊熵确定工艺匹配权重参数。

以夹持器匹配涉及的参数为例,说明零件属性对夹持器属性选择的权重系数。问卷探究零件

2.3.5 路径参数的确定

确定初始位置和终止位置的基本原则如下:装配路径应形成闭环,上一工步装配资源的终止位置即为下一工步的起始位置,如取夹具工步的终止位置为取零件工步的初始位置。通过定义各运动主体的位置变量指针获取操作工步中的初始位置和终止位置。按照执行流程,各工步涉及的位置变化如图10所示。

的形状特征、表面粗糙度、夹持力学特征等属性与夹持器夹持方式和夹爪表面刚度的相关性,从而获得最适合该零件属性的夹持器。若易碎零件推荐柔性夹持或吸附的取件方式,则易碎与柔性夹持和吸附的相关性应比刚性夹持的相关性大。将 C_i 与 P_i 的相关性划分为5个等级:非常小(0~0.2)、小(0.2~0.4)、一般(0.4~0.6)、大(0.6~0.8)、非常大(0.8~1),其中括号中的数值为匹配值范围。获取的专家原始数据示例如表1所示。

表1 问卷原始数据示例

Tab.1 Sample questionnaire raw data

夹持工艺特性		零件属性与夹持特性的相关性								
		零件属性								
		形状特征 P_1			表面粗糙度 P_2			夹持力学特征 P_3		
	片状	不规则三维实体	规则三维实体	光滑	普通	粗糙	易变形	易碎	普通	
夹持方式 C_1	刚性夹持	非常小	非常小	一般	一般	一般	大	非常小	非常小	一般
	柔性夹持	小	大	小	一般	小	小	一般	一般	一般
	吸附	大	非常小	小	非常小	小	小	一般	一般	非常小
夹爪表面刚度特性 C_2	柔性表面	一般	非常小	非常小	一般	小	非常小	大	大	非常小
	刚柔性表面	一般	一般	一般	一般	一般	一般	小	一般	一般
	刚性表面	小	一般	一般	非常小	一般	一般	非常小	非常小	大

利用克隆巴赫系数法对所获得数据进行可信度分析,以保证数据的一致性和稳定性。克隆巴赫系数计算公式为

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left(1 - \frac{1}{S_r^2} \sum_{i=1}^K S_i^2 \right)$$

式中: K 为测试题目数量; S_i 为受试者 i 答题的标准差; S_r 为受试者总分的标准差。

采用上述方法分析比较问卷涉及的夹持器属性与零件属性的关系,删除或更新问卷中明显错误的数据,最终数据均满足 $\alpha > 0.7$ 。

熵权法是确定匹配参数最常用的方法。熵权法的权重计算大多基于确定型数据,所以本文将程度倾向性描述以区间型数据即犹豫模糊元表达,并利用区间型犹豫模糊熵确定夹持器的匹配参数。匹配参数的计算过程如下:

1) 针对第 i 个夹持器属性、第 k 个零件属性的区间型犹豫模糊熵为

$$E_{ik}(\tilde{\alpha}) = \frac{1}{(\sqrt{2}-1)l} \sum_{j=1}^l \left(\sin \frac{\pi(\tilde{\alpha}_{k,j}^- + \tilde{\alpha}_{k,l-j+1}^+)}{4} + \cos \frac{\pi(\tilde{\alpha}_{k,j}^- + \tilde{\alpha}_{k,l-j+1}^+)}{4} - 1 \right)$$

式中: l 为专家总数; $\tilde{\alpha}_{k,j}^-$ 、 $\tilde{\alpha}_{k,j}^+$ 分别为第 k 个零件属性中第 j 个犹豫模糊元(区间型数据)的左右边界值。

2) 零件属性权重。为获取零件属性对夹持方式的影响程度,将每个零件属性对3类夹持方式属性的犹豫模糊熵取均值。然后根据熵权法依次计算各属性的差异系数,进而计算零件属性权

重。第 k 个零件属性 w_k 的计算公式为

$$w_k = (1 - e_k) \sum_{k=1}^m (1 - e_k)$$

$$e_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ik}(\tilde{\alpha})$$

式中: m 为零件属性总个数; n 为夹持方式属性总个数; e_k 为第 k 个零件的差异系数。

3) 零件属性得分。零件属性得分 s_k 以各专家对相关性选择的均值来代替:

$$s_k = \frac{1}{2l} \sum_{j=1}^l (\tilde{\alpha}_{k,j}^- + \tilde{\alpha}_{k,j}^+)$$

s_k 可在一定程度上初步反映该零件属性的相关性。

4) 零件属性加权得分。以零件属性的加权得分作为该属性与各零件夹持方式的匹配参数。零件属性与夹持方式属性的相关性如表2所示。片状零件与刚性夹持的相关性为0.0575,与吸附的相关性为0.1707,这说明若零件具有片状属性,则被刚性夹持的可能性很小、被吸附拾取的可能性较大。零件属性加权得分 w'_k 的计算公式为

$$w'_k = w_k s_k$$

表2 各属性加权得分计算结果

Tab.2 Weighted scores of each attribute

夹持工艺特性		零件特性								
		形状特征 P_1			表面粗糙度 P_2			夹持力学特征 P_3		
		片状	不规则三维实体	规则三维实体	光滑	普通	粗糙	易变形	易碎	普通
夹持方式 C_1	刚性夹持	0.0575	0.0270	0.0512	0.0259	0.0155	0.0589	0.0398	0.0420	0.0134
	柔性夹持	0.1052	0.0467	0.0396	0.0343	0.0153	0.0531	0.1064	0.1793	0.0109
	吸附	0.1707	0.0314	0.0390	0.0403	0.0144	0.0322	0.1194	0.1670	0.0114

3 微器件装配工艺智能决策软件

为实现多类微器件的装配工艺规划,提高微器件装配工艺设计效率,指导物理执行系统的具体实施,设计了微器件装配工艺智能决策系统(microdevice assembly process intelligent decision system, MAPIDS)。MAPIDS的特点如下:①集成了上述工艺规划的所有内容,能实现工序、工步、工艺参数的细粒度工艺决策;②在工艺决策关键环节支持人机交互,通过智能推荐和用户选择(或确认)相结合的方式提高工艺决策结果的工程可行性;③建立了输出的规范装配工艺文件与装配系统控制函数模块之间的映射关系,直接指导微器件的装配过程。

MAPIDS分为用户管理模块、数据库管理模块、知识库管理模块、装配工艺辅助决策模块。装配工艺辅助决策模块是MAPIDS最重要的功能模块,它通过导入系统本体和产品本体,实现在二

者支撑下的产品工艺规划,最终输出产品工艺文件,具体的决策流程如图11所示。

分体DW靶作为典型微器件,具有三维复杂结构,由多个跨尺度(微米至厘米)、异质异构、不规则、易变形微小零件组装而成,具有高精度、高效率、柔性化需求的特征。

3.1 工序编辑

产品工序生成过程如图12所示。软件的输入为分体DW靶本体,基于知识模型进行知识推理,获取装配层次知识,生成产品的装配层次树。通过人机交互为零件设置装配类型和装配件类型属性,获得产品的装配工序并将其显示在界面。如图12所示,分体DW靶中的部分结构装配顺序为套筒01→硅臂01→金腔01→组件01。

3.2 工步编辑

装配序列确定后,编辑工步内容。如图13所示,装配任务列表包含各个工序节点,选中一个工序节点后,基本工步栏中显示6个工步按

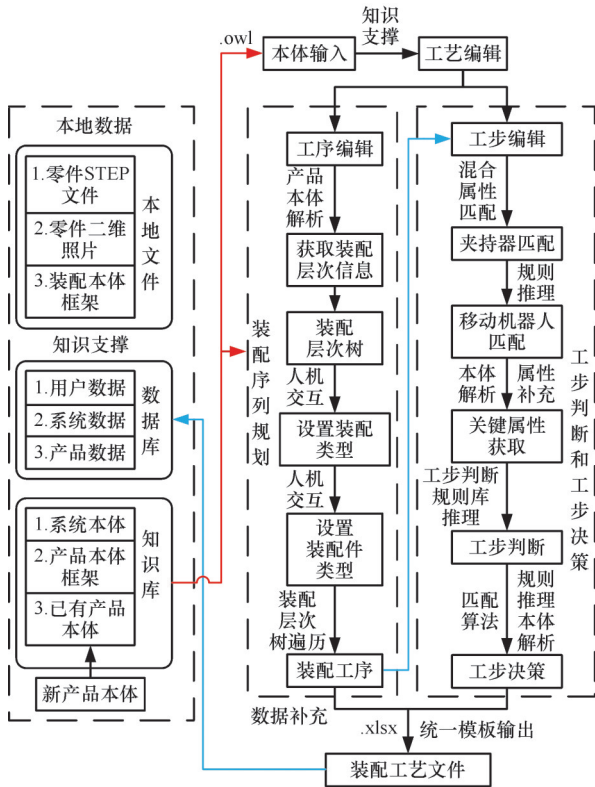


图 11 装配工艺辅助决策流程

Fig.11 Assembly process decision-making process

钮,并在右方弹出工步判断界面。编辑完各工序节点后,界面下半部分生成需要导出的产品工序信息。

1)工步判断。判断选中的工序包含基本工序中的哪些工步。工步判断前,需获取装配对象及其编号与类型、零件放置位置、夹持器编号和移动机器人编号等关键属性。与装配对象相关的属性可通过解析产品本体获取,夹持器编号和移动机器人编号需要通过夹持器属性匹配与移动机器人属性匹配获取。获取相关属性后即可通过点击工步判断按钮,判断该工序具体所包含的工步动作。硅臂01的装配工序包含6个工步:取件、运送、放置、检测、调整、装配。

2)夹持器匹配。夹持器匹配界面如图 14 所示。在硅臂01装配工序的取零件子工步中的夹持器匹配中,调用混合属性匹配算法即可获得夹持器与硅臂01的属性匹配得分,其中,夹持器4的匹配得分1最高。用户可通过点击“夹持器”按钮查看其详细信息,确认推荐结果是否可信。点击“确定”,完成夹持器的选择,并返回至工步判断界面。上述人机交互方式提高了推荐结果的工程应用性。

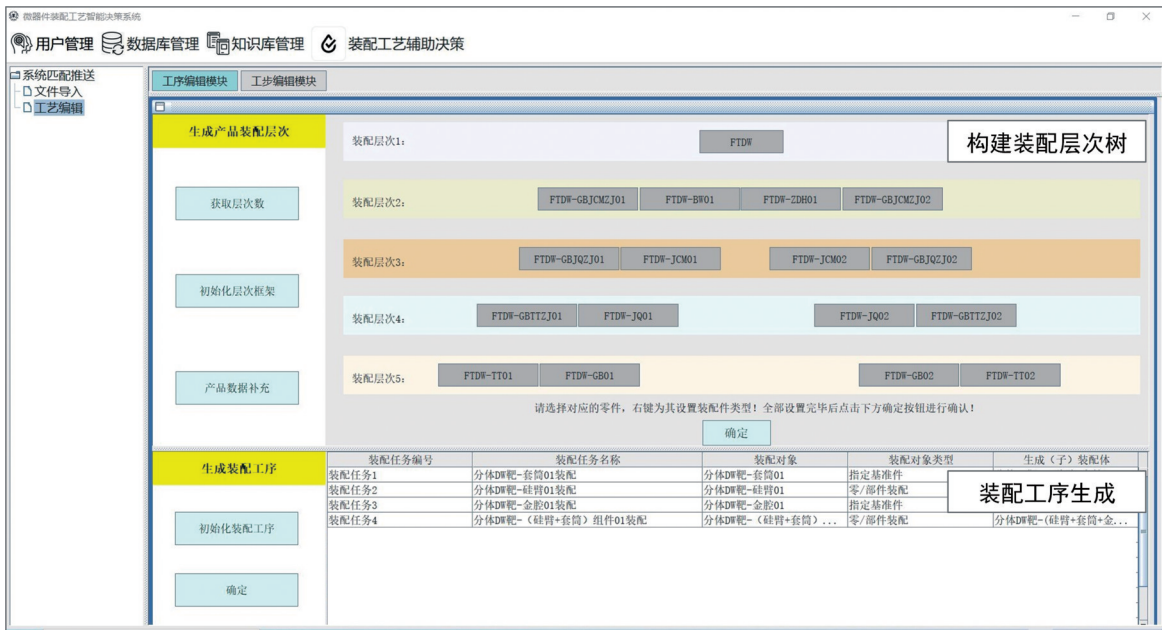


图 12 MAPIDS 工序编辑

Fig.12 MAPIDS process editing

3)工艺参数决策。依据对工步动作的规范化描述,依次确定各个工步动作的工步参数。对于硅臂01装配工序中的取零件子工步,依次点击“获取装配对象编号”、“工步参数补充”和“确定”按钮,可调用底层匹配算法、进行规则推理或实施产品本体解析,从而完成该子工步的工步参数补充,如图 15 所示。

3.3 工艺文件输出

基于上述系统输入和工艺决策过程,生成装配分体DW靶的工艺文件。输出工艺文件分为描述产品装配工序的装配任务总工序文件、描述工序节点的单零件工序详细工步信息文件与多零件工序详细工步信息文件。

1)装配任务总工序文件。该文件描述产品的



图 13 MAPIDS 工步编辑

Fig.13 MAPIDS step editing



图 14 夹持器匹配

Fig.14 Gripper matching



图 15 MAPIDS 取零件子工步决策

Fig.15 MAPIDS part picking sub-step decision

装配序列,包括装配任务编号和任务名称。按照各工序包含的零件(装配对象)数量,装配工序类型可分为单零件工序和多零件工序。图 16 所示的分体 DW 靶总工序(部分)中,工序 1~4 只包含 1 个装配对象,属于单零件工序;工序 14 包含 3 个装配对象且多个零件同时装配,属于多零件工序。

2)单零件工序文件。该文件是对只包含 1 个待装配零件工序的工步信息描述。图 17 所示为

装配任务序列	
装配任务编号	装配任务名称
Pseq1_FTDW-TT01	分体DW靶-套筒01装配
Pseq2_FTDW-GB01	分体DW靶-硅臂01装配
Pseq3_FTDW-JQ01	分体DW靶-金腔01装配
Pseq4_FTDW-GBTZJ01	分体DW靶-(硅臂+套筒)组件01装配
...	...
Pseq14_FTDW-GBJCMZJ01-FTDW-BW01-FTDW-GBJCMZJ02	分体DW靶-(硅臂+套筒+金腔+夹持膜)组件01,分体DW靶-靶丸01,分体DW靶-(硅臂+套筒+金腔+夹持膜)组件02装配

图 16 分体 DW 靶装配任务总工序

Fig.16 Overall process of split DW target assembly task

分体 DW 靶的第 2 道工序——硅臂 01 的装配(部分)。该工序文件主要包括工序基本信息和工序各工步信息。工序的基本信息包括任务编号、任务名称、装配对象、工步编号、工步名称、子工步编号和名称等。工步信息详细描述了该工序包含基本工步的参数。

3)多零件工序文件。该文件是对包含多个零件工序的详细描述,可分为多个零件对象的基本信息描述(汇总),是单零件工序基本信息表格的集成;各个零件对象的详细描述,与单零件工序文件描述一致,工艺人员可直观获取该工序各装配对象的信息。

4 结论

本文提出一种能快速、准确生成微器件细粒度(工序、工步、工艺参数)装配工艺的智能型装配工艺规划方法,并研制了微器件装配工艺智能决策软件系统。基于知识驱动的微器件装配工艺规划方法覆盖了工序、工步、工艺参数三个维度,考虑了装配系统的资源约束。针对知识匹配需要依靠专家经验确定参数的问题,提出一种基于区间

装配任务												
任务编号	任务名称	装配对象	工步编号	工步名称	子工步编号	子工步名称						
Psq2_FTDW-GB01	分体DW靶-硅臂01装配	分体DW靶-硅臂01	Psq2_FTDW-GB01_Pick	取件	NA	放零件						
					NA	放夹具						
					Psq2_FTDW-GB01_Pick_Grip	取夹具						
					Psq2_FTDW-GB01_Pick_Part	取零件						
			Psq2_FTDW-GB01_Enter_View	运送	NA							
			NA	放置	NA							
			Psq2_FTDW-GB01_Check	检测	NA							
Psq2_FTDW-GB01_Adjust	调整	NA										
Psq2_FTDW-GB01_Asm	装配	NA										
工序基本信息												
各工序工步信息												
放零件												
运动工具	动作类型	初始位置	终止位置	速度	加速度	夹持器	动作类型	放置位置	放置特征	上料台编号	上料托盘号	时长
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
放夹具												
运动工具	动作类型	初始位置	终止位置	速度	加速度	动作类型	夹持器	夹持器放置台	夹持器位置号	时长		
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
取夹具												
运动工具	动作类型	初始位置	终止位置	速度	加速度	动作类型	夹持器	夹持器放置台	夹持器位置号	时长		
Robert01	Move	Robert01初始位置	GripPut01_1	20.0	20.0	PickUp	Grip-DW-GB-XF-PM-NA-1	GripPut01	GripPut01_1			
取零件												
运动工具	动作类型	初始位置	终止位置	速度	加速度	夹持器	动作类型	夹取特征	夹持/吸附力	上料台编号	上料托盘号	时长
Robert01	Move	GripPut01_1	LoadPart01_GB	20.0	20.0	Grip-DW-GB-XF-PM-NA-1	PickUp	FTDW-GB01_Clamp_er_01	0.4	LoadPart01	PartTP01_1	

图 17 分体 DW 靶单零件工序文件示例

Fig.17 A single part process file for a split DW target

型犹豫模糊熵的参数确定方法。基于人机交互模式,微器件装配工艺智能决策系统可实现微器件的装配工艺规划,并输出规范的装配工艺文件。该工艺文件与装配系统的控制函数模块映射,可直接指导微器件的装配过程,提高装配系统的智能化水平,实现工艺变更后物理执行系统的快速响应。对微器件装配工艺规划的研究适用于复杂微器件装配,通过知识模型的更新或拓展、算法的推广、软件的迭代还可推广应用至其他产品的装配工艺决策过程。

本文方法局限于基于知识的离线工艺规划。装配现场的资源信息主要作为规则制定或模型建立的约束条件,未与现场装配的实时数据交互。未来可结合现场数据的分析进一步优化工艺,如通过力传感器的反馈与力学仿真优化夹持力阈值,根据现场故障报警信息建立含有容错机制的时序动态规划方法等。

参考文献:

[1] 程俊森,吴文荣,杨毅,等. 智能微装配技术研究综述[J]. 现代制造工程, 2022(6):142-152.
CHENG Junsen, WU Wenrong, YANG Yi, et al. A Review of Intelligent Micro-assembly Technology

[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(6): 142-152.
[2] 张佳朋,刘检华,宁汝新. 基于工作流的产品装配工艺生成及信息集成技术研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(9):1145-1151.
ZHANG Jiapeng, LIU Jianhua, NING Ruxin. Assembly Process Generation and Information Integration Technique Based on Workflow[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(9):1145-1151.
[3] 孟倩,刘检华,唐承统,等. 基于流程的复杂产品结构化装配工艺设计技术研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2):301-312.
MENG Qian, LIU Jianhua, TANG Chengtong, et al. Research and Application of Process-based Structural Assembly Process Design Technology for Complex Product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2):301-312.
[4] 卢鹤,于勇,杨五兵,等. 飞机单一产品数据源集成模型研究[J]. 航空学报, 2010, 31(4):836-841.
LU Hu, YU Yong, YANG Wubing, et al. Research on Integration Model of Single Source Aircraft Product Data[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4):836-841.
[5] SELVARAJ P, RADHAKRISHNAN P,

- ADITHAN M. An Integrated Approach to Design for Manufacturing and Assembly Based on Reduction of Product Development Time and Cost[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(1):13-29.
- [6] JIN Y, CURRAN R, BUTTERFIELD J, et al. Intelligent Assembly Time Analysis Using a Digital Knowledge-based Approach [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2009, 6(8):506-522.
- [7] 刘欢连, 易扬, 刘晓军, 等. 面向现场装配的产品装配工艺模型表达与管理方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1):31-42.
- LIU Huanlian, YI Yang, LIU Xiaojun, et al. Information Expression and Management Approach of Product Assembly Process Model for Field Assembly [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1):31-42.
- [8] 毕利文, 唐晓东, 杨红宇. 飞机数字化装配工艺仿真技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(20):48-50.
- BI Liwen, TANG Xiaodong, YANG Hongyu. Digital Assembly Process Simulation Technology for Aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(20):48-50.
- [9] BOURJAULT A. Methodology of Assembly Automation: a New Approach[M]//Robotics and Factories of the Future '87. Berlin:Springer, 1988:37-45.
- [10] HOMEM de MELLO L S, SANDERSON A C. AND/OR Graph Representation of Assembly Plans [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 6(2):188-199.
- [11] GOTTIPOLU R B, GHOSH K. A Simplified and Efficient Representation for Evaluation and Selection of Assembly Sequences[J]. Computers in Industry, 2003, 50(3):251-264.
- [12] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1):1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1):1-18.
- [13] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17):110-132.
- GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the State-of-art, Connotation and Key Implementation Technology of Assembly Process Planning with Digital Twin [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17):110-132.
- [14] 刘检华, 宁汝新, 阎艳. 集成化虚拟装配工艺规划系统研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(23):2486-2491.
- LIU Jianhua, NING Ruxin, YAN Yan. Study on an Integrated Virtual Assembly Process Planning System [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(23):2486-2491.
- [15] 柳振兴, 李原, 张开富, 等. 基于知识的装配顺序规划优化方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(21):2571-2574.
- LIU Zhenxing, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. Assembly Sequence Planning Optimization Method Based on Knowledge [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(21):2571-2574.
- [16] 王峻峰, 李健, 李世其. 面向装配规划的机械产品装配工艺知识管理系统[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(6):21-24.
- WANG Junfeng, LI Jian, LI Shiqi. Assembly Process Knowledge Management System of Mechanical Products for Assembly Planning [J]. Machine Building & Automation, 2014, 43(6):21-24.
- [17] GONG Hanqing, SHI Lingling, ZHAI Xiang, et al. Assembly Process Case Matching Based on a Multilevel Assembly Ontology Method [J]. Assembly Automation, 2022, 42(1):80-98.
- [18] 吴文荣, 胡益玮, 杨毅. 复杂微器件柔性装配机器人控制系统设计与实现[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(2):79-84.
- WU Wenrong, HU Yiwei, YANG Yi. Design and Implementation of Control System for Complex Micro-device Flexible Assembly Robot [J]. Machine Design & Research, 2024, 40(2):79-84.
- [19] GONG Hanqing, SHI Lingling, LIU Dongmei, et al. Construction and Implementation of Extraction Rules for Assembly Hierarchy Information of a Product Based on OntoSTEP [J]. Procedia CIRP, 2021, 97:514-519.

(编辑 张洋)

作者简介:史玲玲(通信作者),女,1988年生,副教授、博士研究生导师。研究方向为智能装配。发表论文40余篇。E-mail:l.shi@bit.edu.cn.

本文引用格式:

史玲玲,杜逸民,郭丽丽,等. 微器件产品装配工艺的智能决策[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2159-2170.

SHI Lingling, DU Yimin, GUO Lili, et al. Intelligent Decision-making for Assembly Processes of Micro-device Products [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2159-2170.