

面向 STEP 模型装配特征自动提取的 装配信息模型构建

贾康^{1,2} 唐竞^{1,2} 任东旭^{1,2} 王浩^{1,2} 赵强强^{1,2} 洪军^{1,2*}

1.西安交通大学现代设计与轴承-转子教育部重点实验室,西安,710049

2.西安交通大学机械工程学院,西安,710049

摘要: 装配信息建模是数字化装配、智能化装配的基础,然而人工交互建模效率低下且易发生装配特征识别和装配特征配合的错误,难以满足复杂机械系统的精确建模。基于三维装配体模型隐含的装配工艺信息,以 STEP 模型文件为输入,研究了面向几何信息的装配特征自动提取与配合关系识别算法。进而针对装配集成信息模型的构建,从装配精度模型和装配序列规划角度提出了信息推理算法。最后基于开发的系统,通过装配实例信息模型构建证明了所提算法的有效性。

关键词: 装配信息建模; 装配特征自动提取; 配合关系识别; 装配层次对象坐标系

中图分类号: TP391

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction of Assembly Information Model Based on Assembly Feature Automatic Extraction for STEP Models

JIA Kang^{1,2} TANG Jing^{1,2} REN Dongxu^{1,2} WANG Hao^{1,2}

ZHAO Qiangqiang^{1,2} HONG Jun^{1,2*}

1.Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

2.School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

Abstract: Assembly information modeling was the foundation of digital assembly and intelligent assembly. However, the manual interactive modeling was inefficient and prone to errors in assembly feature recognition and assembly feature fitting, which was difficult to meet the precise modeling needs of complex mechanical systems. Based on the assembly process information implied by a 3D assembly model, this paper used STEP model files as inputs to study the algorithms for automatic extraction of assembly features and recognition of fitting relationships focused on geometric information. Furthermore, an information reasoning algorithm was proposed for constructing an integrated assembly information model from the perspectives of assembly accuracy modeling and assembly sequence planning. Finally, the effectiveness of the proposed algorithms was demonstrated through the construction of assembly instance information models based on the developed system.

Key words: assembly information modelling; assembly feature automatic extraction; pairing relationship distinguish; assembly hierarchical coordinate system

0 引言

装配是机械产品制造的最后一环,装配工艺的合理规划与仿真验证对装配效率和装配质量的提升与保障至关重要^[1]。产品的装配信息模型是进行装配工艺规划的基础,直接服务于装配序列规划、装配路径规划、装配精度预测分析等工艺活动,也是产品装配数字孪生建模的重要组成部分^[2]。复杂机械产品组成零部件多、装配层级与装配信息模型复杂,依赖人工经验构建装配信息

模型的操作周期长且易出错^[3]。基于模型定义的系统工程(MBSE)将产品的三维模型作为统一数据源,力图打通涵盖产品设计、制造与维护的全生命周期^[4]。MBSE的具体实施过程主要包括制订协议标准和必要的定制化开发,可实现各个阶段工艺信息与三维模型的绑定、传输与使能,确保模型关联信息的一致性^[5]。实际上,产品的装配数字模型隐含零件与装配特征的隶属关系、装配特征之间的配合关系,包含完整的零件实体及其几何表面的造型数据^[6]。上述信息是装配信息模型的基础要素,可支持自底向上构建装配单元、装配零件、装配特征和装配关系等层级间及层级内部

收稿日期:2023-09-19

基金项目:特种车辆及其传动系统智能制造国家重点实验室开放基金(GZ2022KF013)

的几何和工艺关联关系^[7]。与此同时,从软件工程角度出发,对轻量级的装配体模型隐含的工艺信息进行挖掘与推理^[8],如对装配特征的自动识别有望实现装配信息的自动建模,降低人工交互的工作量与难度,并使基于现有装配工艺知识推进的装配工艺建模与规划智能化成为可能。

传统软件操作中,面向三维模型的装配特征以人工识别为主。当前,对装配特征的自动识别取得了一定进展,如基于 B-rep 模型并结合一定装配逻辑关系自动识别装配特征^[9-10]、利用卷积神经网络与传统图像处理算法快速识别装配特征^[11]、基于特征识别算法识别零件配合面并通过 AR 技术实现装配面自动配合^[12]。装配特征自动识别需要大量装配相关信息的支持,因此保证装配信息数据的快速完备提取是基础。由此可见,基于装配体模型包含的几何信息进行解析以提取装配信息具有较强的可行性^[13]。

STEP 作为一种中间文件格式,可在多个 CAD 系统之间保持良好的数据传递性与数据描述的一致性。基于 STEP 文件描述实体对象几何数据及其关联的拓扑关系信息,将以描述设计信息为主的 AP203 协议作为目标文件格式输入装配体数字模型。尽管 STEP 模型文件包含零件装配的约束关系,但此类装配约束多基于人机交互定义的装配约束关系,未必符合正确的装配工艺,也不符合装配工艺信息模型的表达规范,因此不提取这种装配信息,而仅关注基本几何造型信息提供的隐含装配工艺信息的挖掘。在 STEP 模型的装配信息自动提取上,刘凯等^[14]设计信息提取类 CExtractFileInfo 来处理数据段中的字符串以获取信息,使用 NUBRS 表示几何图形并根据指定配合关系计算变换矩阵,但通过变化零件位置逐步实现装配。刘一字等^[15]利用 STEP 的 Assembly 对象模型逐一匹配两个零件面集合的几何位置,通过判断匹配零件面的法向量来提取零件装配特征,但提取特征的种类少。因此从 STEP 模型开展装配信息的自动提取需要确定具体特征的识别方法与特征间配合关系的判断准则。

为提高复杂机械产品装配工艺规划的数字化与智能化水平并开发使能软件工具,本文从装配体数字模型的装配特征识别入手,探索装配体集成信息模型的构建。本文以 STEP (AP203) 装配体模型文件为输入,首先研究面向几何信息的装配特征自动提取与配合关系识别算法,给出详细的平面装配特征与圆柱面装配特征识别流程,进而面向装配集成信息模型的构建,从装配精度模

型和装配序列规划角度进行信息推理,并给出装配对象间关联信息矩阵的完备推理。最后通过装配示例信息模型构建证明了本文算法的有效性。

1 面向装配体 STEP 模型的装配特征及其配合关系提取

装配体零件之间的安装与定位主要由存在配合关系的表面决定,因此将零件间存在配合关系的几何表面指定为零件的装配特征。装配特征作为零件实体的几何表面要素,与实体的隶属关系对应装配特征与零件的隶属关系,零件几何类型及空间相对位姿对应装配特征之间的配合类型与关系。由此,可基于装配体 STEP 模型对全体零件的几何表面进行装配特征的识别与提取。此外,考虑到绝大多数装配特征为平面和圆柱面,本文仅针对这两类几何要素进行装配特征提取及其配合关系的判定。

1.1 面向装配特征提取的 STEP 模型信息预处理

STEP 文件以 B-rep 模式对几何实体进行点、边、环、面、体、壳的拓扑关系与实体数据元素的描述,根据 EXPRESS 语言规范,依据拓扑关系对应的实体数据进行逐级提取,实现几何构建。STEP 模型文件的提取可借助 Open Cascade (OCC) 等具备模型输入输出和数据标准交换功能的平台或控件实现。

基于装配体 STEP 模型的装配特征及其配合关系的提取中,通过对识别出的几何要素的类型、几何结构参数和空间姿态进行配合关系判定,是装配特征构建的关键。为此,对装配体 STEP 模型的几何要素提取做如下要求:①以各零件包含的几何表面为基本元素,对其几何属性即平面、圆柱面、圆锥面、球面、其他自由表面等进行标记,以便于组织与识别面向装配特征的数据;②将所有几何表面统一到全局坐标系中表达,以便于装配特征空间配合关系的判定,以及后续装配体精度信息模型的自动构建。基于此,设计两级链表 List<List<几何表面>> STEP Mdoel 对装配体 STEP 模型进行几何表面的提取与存储,其中,链表的第一级对应装配体中的全体零件实体,第二级存储对应零件实体的所有几何表面元素。设计两类几何表面提取时的存储信息,如下所示:

1) 圆柱面。标志类型 **C**; 轴线矢量 **A**; 轴向的起点坐标 **P_s** 和终点坐标 **P_e**, 半径 **R**。

2) 平面。标志类型 **F**; 平面原点坐标 **O**; 平面外法线矢量 **N**; 构成平面的三角形面片信息列表

List<Triangle>。

实际零件实体造型几何的复杂性可能导致一个圆柱特征被分解为若干个局部 / 不完整圆柱面。为避免这些不完整圆柱特征的重复识别导致的装配信息建模错误,按照下述规则对其进行合并:同一零件包含的圆柱面若同时满足轴线平行、轴线重合、轴向范围重合的条件,则认为不完整圆柱特征重复识别。

综上所述,按照图 1 所示流程,在提取装配体全部几何面片的基础上对每一零件内所有圆柱面进行遍历。若 2 个圆柱面满足合并规则,则将圆柱面轴向起点和终点更新为所有圆柱面轴向的最小起点和最大终点,同时删除重复的圆柱面。

配合关系的准确判定是识别零件装配特征、构建装配关系的关键。本文依据平面和圆柱面在 STEP 模型文件预处理中提取的数据结构,通过装配特征在全局坐标系中的相对空间位姿,进行配合关系的快速准确判定。

1.2.1 平面装配特征配合关系的判定

两平面若具有配合关系,则存在图 2 所示的局部重合区域,即同时满足两平面重合、两平面有区域交集的条件。从空间矢量计算模型出发,综合排除条件的优先级与计算代价。判定两平面是否存在配合关系组织的 3 个顺序条件如下:① 两平面的法向量 N_1 和 N_2 平行即 $(N_1 \times N_2) \cdot (N_1 \times N_2) \leq E$, 其中, E 为接近为 0 的正小值,用于防止浮点漂移;② 平面 1 的原点 O_1 在平面 2 上,即 $|(O_2 - O_1) \cdot N_1| \leq E$;③ 平面 1 和平面 2 具有重合区域。若上述 3 个条件中的任意一个条件不满足,则两平面不满足配合关系。为保证本文算法对具有复杂边界平面的通用性,将每个平面区域转换为一系列三角面片的集合,因此,两平面是否具有重合区域可等效为判定两面包围的三角形

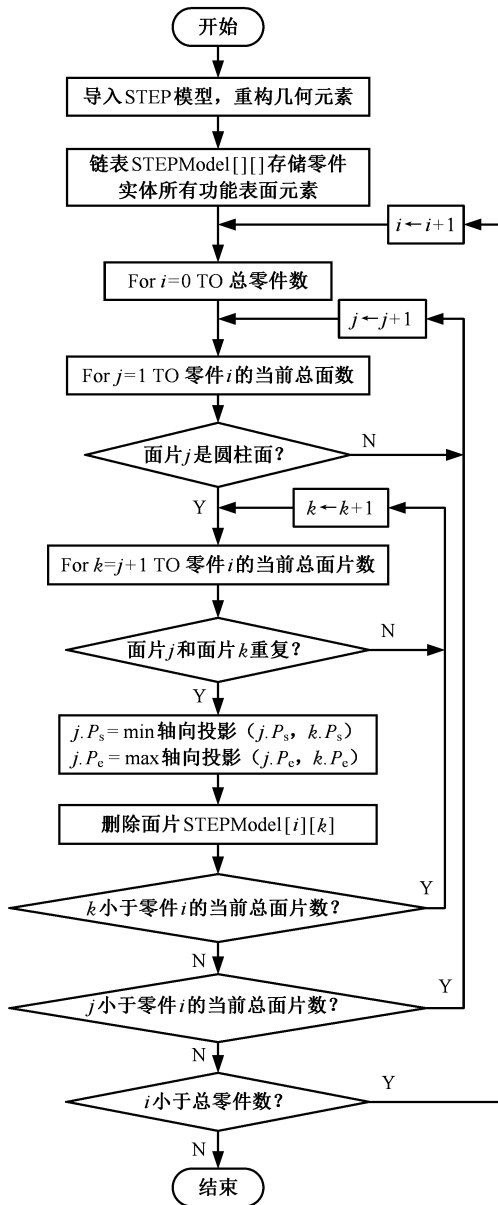
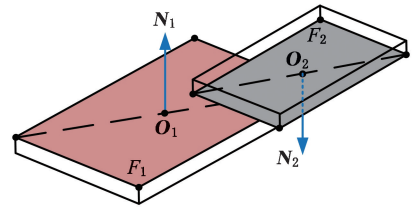


图 1 STEP 装配体模型预处理

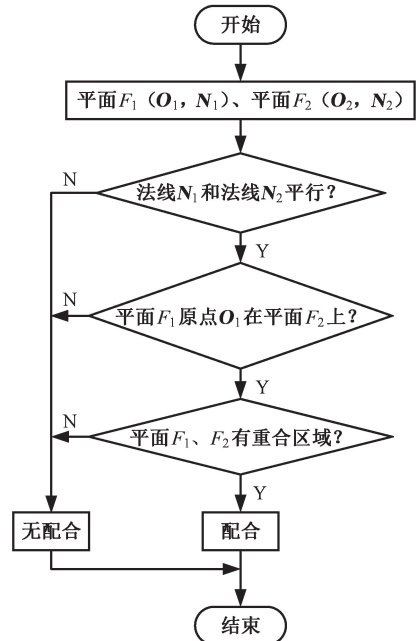
Fig.1 STEP assembly model preprocessing

1.2 装配特征配合关系识别

不同零件的平面与平面和圆柱面与圆柱面的



(a) 原理



(b) 流程

图 2 平面装配特征配合关系判定原理与流程

Fig.2 Principle and process for determining the matching relationship of plane assembly features

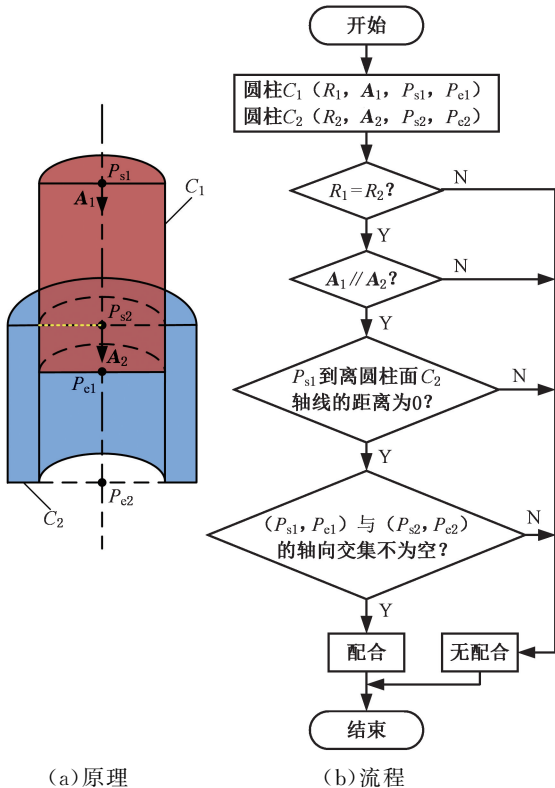
面片是否存在重合关系,即一个平面的三角形顶点在另一平面包含的三角形内,则重合关系可采用质心坐标计算方法判定。

1.2.2 圆柱面装配特征配合关系判定

若两圆柱面发生配合关系,则满足半径相等、轴线重合的条件,如图 3 所示。综合考虑排除条件的优先级和空间向量的计算代价,判定两圆柱面是否存在配合关系组织的 4 个顺序条件如下:① 两圆柱面的半径 $R_1、R_2$ 相等即 $|R_1 - R_2| \leq E$;② 两圆柱面的轴线方向向量 $A_1、A_2$ 平行即 $(A_1 \times A_2) \cdot (A_1 \times A_2) \leq E$;③ 圆柱面 2 的起点 O_2 与圆柱面 1 的轴向距离为 0,即 $(O_2 - O_1) \cdot (O_2 - O_1) - ((O_2 - O_1) \cdot A_1)^2 \leq E$;④ 两圆柱面沿轴线的投影区间交集不为空。具体采用空间矢量投影进行判断:

1) 将圆柱面 1、圆柱面 2 的起始端点 $P_{s1}、P_{s2}$ 和终止端点 $P_{e1}、P_{e2}$,统一向以 P_{s1} 为起点的圆柱面 1 的轴向矢量 A_1 投影,得到投影长度 $t_{x,i} = (P_{x,i} - P_{s1}) \cdot A_1$,其中, $i=1,2;x=s,e$ 。

2) 若投影长度满足 $(t_{s,2} < t_{s,1} \cap t_{e,2} < t_{s,1})$ 或 $(t_{s,2} > t_{e,1} \cap t_{e,2} > t_{e,1})$,则两圆柱面在轴向无交集,否则两圆柱面在轴向存在交集。若上述 4 个条件中的任意 1 个条件不满足,则直接判定两圆柱面不存在配合关系。



(a)原理

(b)流程

图 3 圆柱装配特征配合关系判定原理与流程

Fig.3 Principle and process for determining the matching relationship of cylindrical assembly features

1.3 基于 STEP 模型的装配体全体装配特征识别与配合关系的构建

在装配体内,将不同零件之间发生配合关系的几何面作为零件实体的装配特征。基于此,为识别装配体中全部零件之间的装配特征并构建装配特征配合关系,需在装配 STEP 模型预处理的基础上对零件间全部面片的任意两个面片进行配合关系判定,并存储识别出的装配特征与配合关系。为此,需在设计合适的数据结构保证准确构建装配特征与配合关系的同时,组织合理的计算流程,提高海量几何面片之间配合关系的识别效率。

每个零件包含若干装配特征,每个装配特征仅对应一个几何表面。实际装配中,一个装配特征可能与多个装配特征存在配合关系。为避免基于配合关系的装配特征识别引发装配特征的重复生成,对每个已生成的装配特征采用其在父零件中的面片索引进行唯一性标记。由于每个零件的装配特征在识别过程中逐渐添加,同时需对重复识别的装配特征进行筛选,因此采用链表结构对每个零件识别出的装配特征进行存储。设计 1 个二级链表 $List\langle List\langle int \rangle \rangle asm_feature$ 存储全体装配特征,其中,第一级对应全部零件,第二层对应每个零件识别出的全部装配特征;采用链表 $List\langle int, int \rangle asm_feature_pair$ 存储识别出配合关系的 2 个装配特征 ID。

由于装配体实体的全体零件含大量面片,为提高全体几何面之间配合关系的判定效率,需充分利用零件、面片等的相对空间位姿关系进行优先排除,并合理组织各层级对象之间的遍历顺序与装配特征重复性筛选。如图 4 所示,在遍历组织零件的基础上,通过零件轴对齐碰撞箱(axis-aligned bounding box, AABB)判定零件是否存在相交,若无,则退出重复性筛选,否则进入下一层的平面两两判定;对 2 个零件的几何面进行两两遍历,并依据几何面类型进行平面-平面或圆柱面-圆柱面配合关系的判定,若存在配合关系,则检查两几何面是否都已在各自父零件的装配特征内,若在,则添加装配特征,进而存储该装配关系。

2 基于装配特征识别的装配信息模型构建

装配体通常划分为三个层级:装配单元、零件、装配特征。装配体的集成信息模型主要描述各层级对象之间的空间位姿关系及关联工艺属性信息,用于装配体的精度建模分析和装配序列与

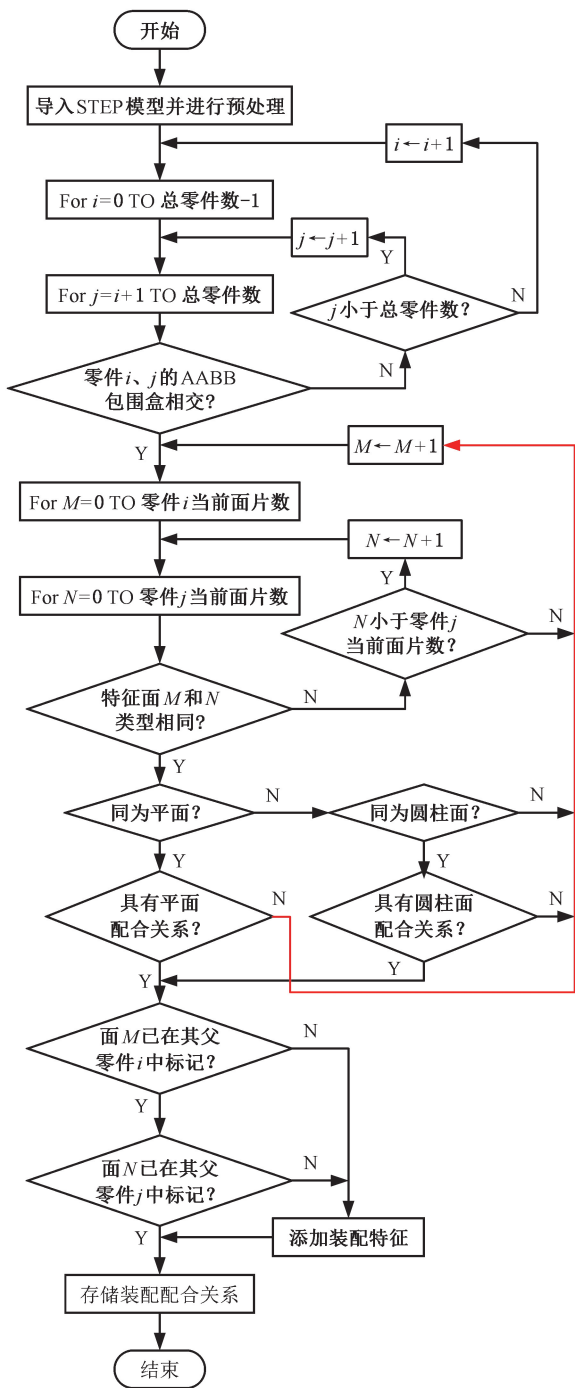


图 4 装配体装配特征及其配合关系识别提取的计算流程

Fig.4 The calculation process for identifying and extracting assembly features and their matching relationships of assembly bodies

装配路径规划。依据基于装配体 STEP 模型文件识别出的装配特征对应的空间几何信息及装配特征之间的配合关系,可设计合理的计算规则,推理不同层级装配对象的空间位姿传递关系及其邻接、定位等信息,由此实现装配体信息模型的构建。

2.1 面向多装配层级的装配精度坐标系系统构建

面向装配体包含的三层对象,基于各层级对象之间的隶属关系,对各级对象之间进行适当的

空间坐标变换、组织构建及维护是装配精度建模与分析的基础,如图 5 所示。定位误差、零件的形状误差和位置误差是装配误差的主要来源。装配误差通过零件装配结合面的装配特征进行传播。当前的装配精度建模与分析方法如雅可比-SDT 等都以装配特征为基础元素展开。因此,设计简洁、准确的坐标系传递模型是确保装配特征与上层对象之间空间坐标变换精度的关键,对装配精度建模和装配误差传递至关重要。

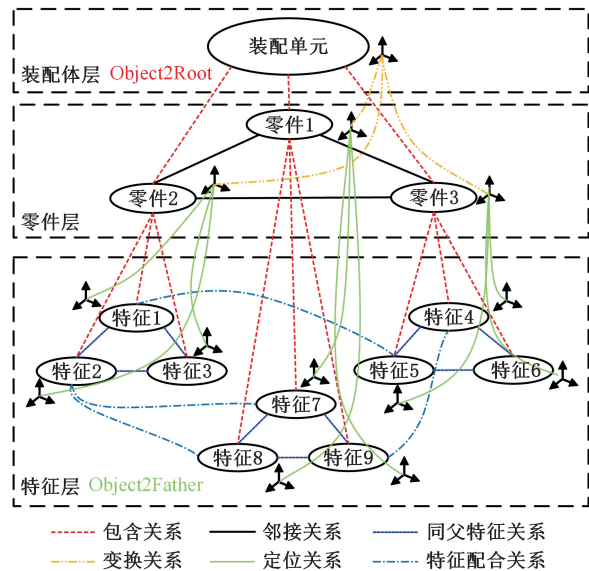


图 5 装配层次关系建模表达

Fig.5 Assembly hierarchical relationship modeling expression

针对具有 3 个装配层级对象的共性隶属关系,设计装配对象 Object,以同时表达装配层次关系树型结构与各级对象之间的坐标变换:

```
Object:
➢ Int ID;
➢ List <Object> SonObject;
➢ Mat4x4_Object2Root;
➢ Mat4x4_Object2Father;
```

其中, SonObject 存储装配单元-零件-装配特征之间自顶向下的树结构; Mat4x4_Object2Root、Mat4x4_Object2Father 为当前装配对象坐标系相对于装配树根坐标系和父对象坐标系的齐次坐标变换矩阵(4 阶方阵)。

基于设计的装配对象模型,依据识别的装配特征按照如下操作完成装配体信息模型的实例化构建:①将装配体添加为根对象;②将每个零件添加到装配体根对象的子对象 SonObject 中;③将装配特征作为零件的子对象添加到对应的零件 SonObject 中;④每个装配对象的 Mat4x4_Object2Root 由其在 STEP 模型的几何数据(零件坐标系和装配特征坐标系在全局坐标系中的位姿)

确定;⑤每个装配对象相对于父对象坐标系的齐次坐标变换矩阵 $\text{Mat}_{4 \times 4_Object2Father} = (\text{Father. Mat}_{4 \times 4_Object2Root})^{-1} \times \text{Mat}_{4 \times 4_Object2Root}$ 。

实际的装配工艺建模中,通常通过划分装配单元组织装配工艺。在人机交互指定装配单元全局坐标系及其包含子对象的基础上,依次进行如下操作完成装配单元对象的构建:①定义装配单元 A,并将该装配单元加入到 A 的父对象的子节点列表 SonObject 中,同时将 A 的 $\text{Mat}_{4 \times 4_Object2Father}$ 更新为 $(\text{Father. Mat}_{4 \times 4_Object2Root})^{-1} \times \text{Mat}_{4 \times 4_Object2Root}$;②将选中的子对象从其原始父对象的 SonObject 中删除,并添加到装配单元 A 的 SonObject 中,进而将子对象的 $\text{Mat}_{4 \times 4_Object2Father}$ 更新为 $(\text{A. Mat}_{4 \times 4_Object2Root})^{-1} \times \text{Mat}_{4 \times 4_Object2Root}$ 。

装配误差计算和装配动画仿真常需要对装配结构树进行自顶向下的遍历更新。这可借助装配对象之间的变换矩阵实现,即按照自顶向下的模式更新全体装配对象相对全局坐标系的空间位姿。每个对象的全局坐标系变换矩阵 $\text{Mat}_{4 \times 4_Object2Root} = (\text{Father. Mat}_{4 \times 4_Object2Root}) \times \text{Mat}_{4 \times 4_Object2Father}$ 。

基于构建出的多层次装配对象坐标系变换模型,结合装配特征的形位误差表达模型如小位移旋量(SDT),即可对装配体完成基本的装配精度建模与分析优化。

2.2 装配工艺信息模型构建

装配体各层级装配对象之间的关联属性信息主要通过邻接、定位、干涉矩阵等表达。装配特征作为装配体的最基本元素,依据装配特征配合关系与空间定位方向,可自底向上进行上述信息矩阵(L,P,I)的推理构建。

2.2.1 邻接矩阵推理

邻接矩阵(Mat_Liasion)表达装配对象(零件、装配单元)之间是否存在接触关系,即是否存在配合的装配特征。依据面向装配体 STEP 模型文件识别出的装配特征,对具有配合关系的装配特征对,将装配特征对应的父零件的关系设置为邻接关系:

```
for i=1 to num
  fea1, fea2 = asm_feature_pair(i);
  part1=fea1.father, part2=fea2.father;
  Mat_Liasion(part1,part2)=1;
end
```

实际的装配工艺设计中,若干零件通常被组

织成装配单元的形式。这时的装配邻接矩阵构件中,装配单元作为一个元素,对应的邻接矩阵元素为其包含零件的邻接状态的“析取”,即任意一个零件与某个对象存在邻接关系时,该装配单元与该对象存在邻接关系。

2.2.2 定位矩阵推理

定位矩阵(Mat_Position)表达了存在邻接关系的装配对象在空间自由度方向上的定位约束关系。在全局坐标系中描述定位矩阵,并约定矩阵元素 $\text{Mat_Position}(i, j, k)$ 表示零件 i 对零件 j 在自由度 k (沿 X、Y、Z 轴的移动和绕 X、Y、Z 轴的旋转)的定位关系。

装配特征作为零件之间装配连接的使能要素,装配特征空间位姿直接对零件作用相应的自由度定位。针对通用的平面和圆柱面装配特征配合有:①平面装配特征约束平面沿外法线的移动自由度和轴线垂直于外法线的 2 个旋转自由度;②圆柱装配特征约束垂直于轴线的 2 个移动自由度和 1 个旋转自由度。因此,基于 STEP 模型提取的装配特征几何要素(外法线向量、轴线向量)在全局坐标系中的向量,依据平面配合、圆柱配合的空间自由度定位规则,按照表 1 即可得到该配合关系中 2 个装配特征对其父零件形成的约束自由度元素。

表 1 非零坐标轴分量与自由度的定位关系
Tab.1 Positioning relationship between non zero coordinate axis components and degrees of freedom

非零坐标轴分量	移动自由度	旋转自由度
$x > 0$	+X	β, γ
$x < 0$	-X	
$y > 0$	+Y	α, γ
$y < 0$	-Y	
$z > 0$	+Z	α, β
$z < 0$	-Z	

2 个邻接零件往往存在多个配合关系,因此,零件之间的定位约束关系是所有配合关系构成的定位自由度集合。基于此,遍历装配特征对 asm_feature_pair 的全体配合关系,依据装配特征推理出约束自由度元素集合并将其以并集的形式添加到矩阵 Mat_Position 相应的零件对元素中,即可构建出装配体中具有邻接关系的全部零件对的定位约束矩阵。在此基础上,进行装配单元对象的定位矩阵元素构建。该装配对象与其他装配对象的定位矩阵元素是装配单元包含的全体子对象与对应装配对象定位元素的合集。

2.2.3 干涉矩阵推理

干涉矩阵(Mat_Interference)表达的是在全局坐标系中±X/Y/Z 六个方向上,装配对象两两

之间移动出装配体包络空间的过程中是否存在干涉。约定矩阵元素 $Mat_Interference(i, j, k)$ 表示零件 i 在 k 方向运动时与零件 j 之间的干涉关系。为充分利用装配特征之间的配合关系对零件在空间运动方向的约束信息,借助邻接矩阵和定位矩阵的信息,构建干涉矩阵针对邻接和非邻接零件对的判断方法:①邻接零件对 (i, j) 运动自由度元素的定位与干涉等价,即运动方向如存在定位关系则该方向存在干涉,反之则无干涉;②对于非邻接零件对,在面向逃离装配体包围空间的方向,对每个零件沿 6 个运动方向移出装配体包络空间的运动路径进行离散扫掠表达,通过零件几何模型的碰撞检测来判定两个零件是否干涉,进而确定干涉矩阵的对应元素^[16]。

装配单元对象与其他装配对象的干涉矩阵元素是该装配单元的子装配对象与对应装配对象干涉矩阵元素的并集,即:若装配单元任一子装配对象与该装配对象沿某一方向存在运动干涉,则装配单元与该装配对象在该方向存在运动干涉。

3 系统开发与验证

基于本文提出的基于装配体 STEP 模型文件的装配特征识别与装配信息模型构建算法,采用 C# (Visual studio 2017)开发了装配信息建模系统,其中,STEP 模型的导入解析和渲染采用 eyeshot 控件实现。为验证本文算法和装配信息建模的有效性,针对图 6 所示的蜗轮蜗杆减速器进行装配信息建模。

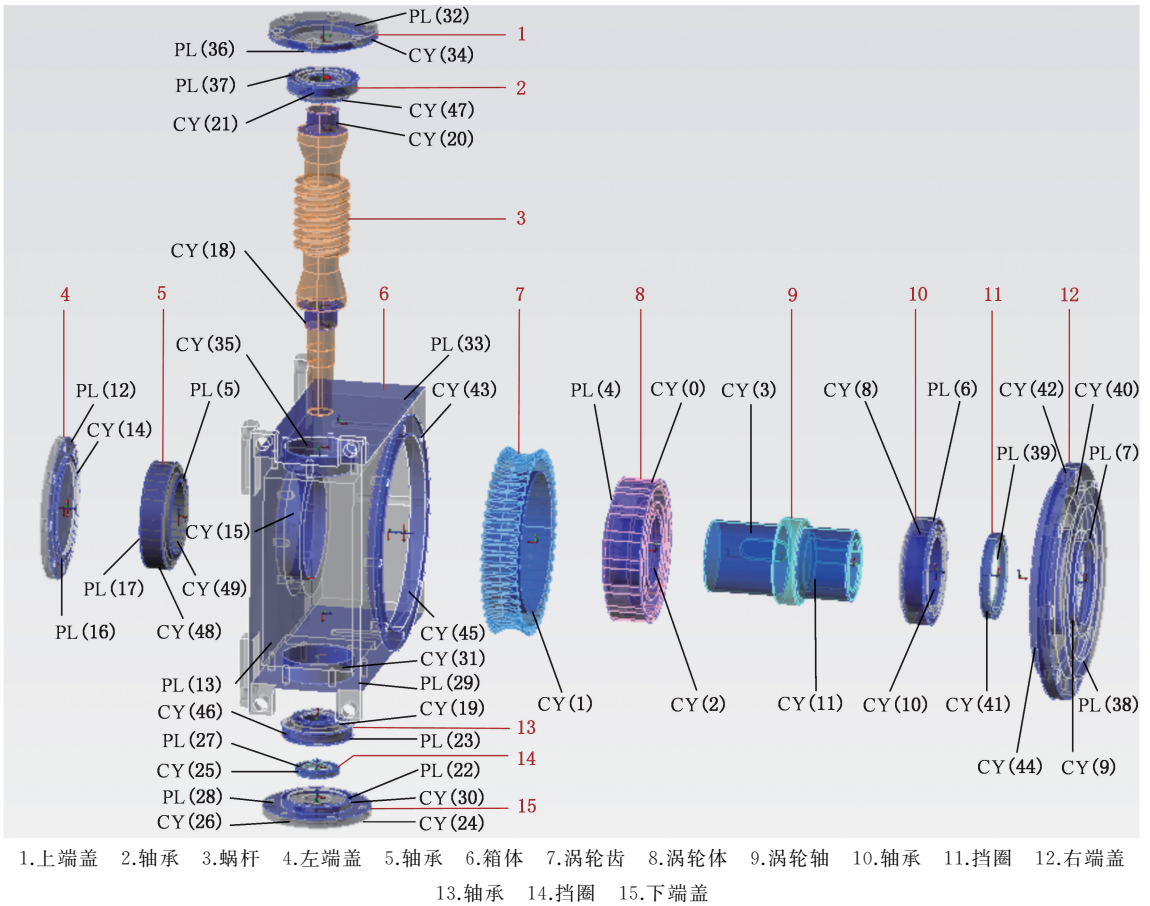


图 6 蜗轮蜗杆减速器爆炸图

Fig.6 Explosion diagram of worm gear reducer

首先,在 SolidWorks 2016 中将该模型保存为 STEP(AP203)格式并作为装配体模型并输入系统,然后进行 STEP 装配体模型的零件实体提取和装配特征,以及特征间配合关系的自动识别。该装配体包含的 15 个零件及识别出的 50 个装配特征 ID 见图 6,其中,PL 表示平面装配特征,CY 表示圆柱装配特征,括号内的数字为装配特征的序号。装配特征与零件的隶属关系、装配特征之

间的配合拓扑关系如图 7 所示。

为验证本文算法对于装配特征及其配合关系识别的有效性,对比测试本系统与商用软件 Uni-graphics NX。本系统模型层级关系的提取结果和 NX 软件一致,所提取的装配特征数与 NX 软件相同(均为 50)且配合关系一致。相较于 NX 软件,本系统还支持零件定位关系推理,在面向装配工艺规划的几何信息推理方面具有更全面的功能。

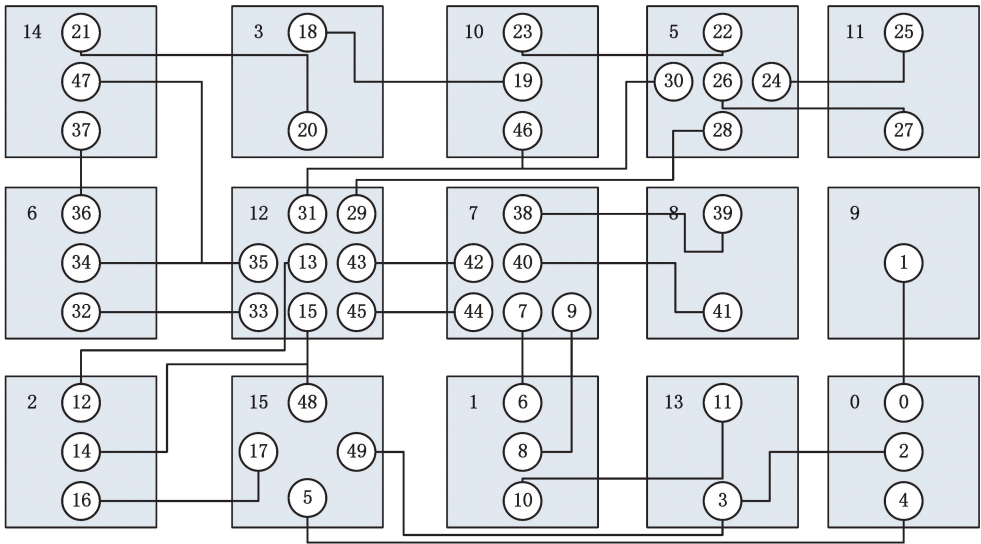


图 7 装配体全体零件所包含的装配特征及其之间的配合关系

Fig.7 The assembly features contained in all parts of the assembly and their mating relationships

基于识别出的装配特征及其配合关系,首先推理构建出零件的邻接矩阵,如图 8a 所示;然后对具有邻接关系的全部零件构建定位矩阵,如图

8b 所示,其中,“1/-1”表示在该自由度方向上零件对 $\langle i, j \rangle$ 和 $\langle j, i \rangle$ 的定位关系,其中,1 表示 i 对 j 存在定位,-1 表示 j 对 i 存在定位。

ID	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) 全体零件邻接矩阵

ID_Pair	0-9	0-13	0-15	1-7	1-13	2-12	2-15	3-10	3-14	5-10	5-11	5-12	6-12	6-14	7-8	7-12	10-12	12-14	12-15	13-15
+X			1	-1		-1	-1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		-1		1/-1	1/-1		
-X			-1	1		1	1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		1		1/-1	1/-1		
+Y	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1
-Y	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1
+Z	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1				-1	1	-1	1	1	1/-1	1/-1			1/-1	1/-1
-Z	1/-1	1/-1		1/-1	1/-1	1/-1				1	-1	1	-1	-1	1/-1	1/-1			1/-1	1/-1
α								1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1			1/-1	1/-1		
β	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1			1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1			1/-1	1/-1
γ	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1	1/-1

(b) 全体邻接零件对之间的定位矩阵

图 8 装配体全体零件之间的装配关系矩阵

Fig.8 Assembly relationship matrix between all parts of the assembly body

将蜗杆轴及其关联的轴承、油封和端盖等零件作为一个装配单元对象。该装配单元具有配合关系的装配特征,并形成一个沿蜗杆轴轴向的尺寸链,如图 9 所示。实际工程中,通过零件号将现场实测尺寸与尺寸链模型关联,实现尺寸链的计算与调整。在精度建模上,由于 STEP 零件几何实体在装配特征识别时已得到各级装配对象坐标系之间的齐次坐标变换矩阵,因此所有装配特征坐标系到全局坐标系的变换矩阵已知,即可基于雅可比-SDT 进行装配精度建模与误差传递计算。根据该方法可对重要的平面与柱面特征进行表面接触测量,并将实测的表面点云等数据引入、转换为肤面模型,计算在装配过程中传递的装配误差。由此可见,本文方法可支持装配精度的建模与计算。

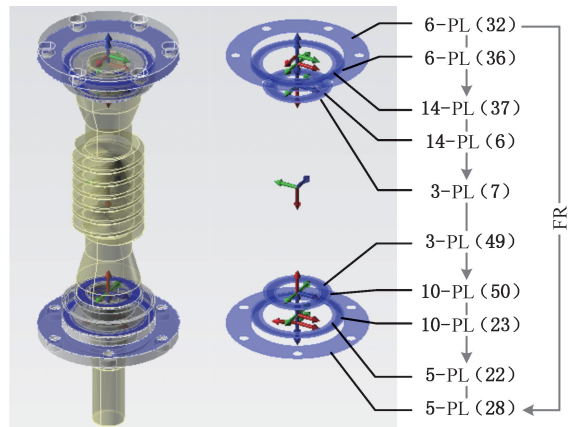


图 9 蜗杆轴装配体的装配对象坐标系变换

Fig.9 Transformation of assembly object coordinate system for worm shaft assembly body

4 结论

1) 设计了基于三维空间面片配合与圆柱面配合关系判定的装配特征自动识别算法。以具有空间配合关系的几何特征为装配特征, 实现了装配体各零件的装配特征自动识别, 以及零件之间具有配合关系的装配特征对的自动构建。

2) 基于具有配合关系的装配特征和父零件的隶属关系, 构建了零件邻接矩阵, 基于装配特征空间位姿进行自由度的约束, 以实现零件之间定位矩阵的自动构建。

3) 对装配体模型进行逐层实体模型解析和装配特征识别的过程中, 基于几何实体的空间位姿构建零件坐标系和装配特征坐标系相对全局坐标系的齐次坐标变换矩阵, 同时在精度建模上支持雅可比-SDT 等装配精度分析方法。

4) 基于自动装配特征与配合关系识别的算法能有效减少人机交互操作, 提高装配信息建模的效率和准确率, 为装配信息建模提供信息基础。

参考文献:

- [1] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11):2-28.
LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The State-of-the-Art, Connotation and Developing Trends of the Products Assembly Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.
- [2] 易扬, 刘晓军, 冯锦丹, 等. 面向数字孪生的产品表面模型表达与生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6):1454-1462.
YI Yang, LIU Xiaojun, FENG Jindan, et al. Representation and Generation Method of Digital Twin-oriented Product Skin Model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6):1454-1462.
- [3] 易扬, 冯锦丹, 刘金山, 等. 复杂产品数字孪生装配模型表达与精度预测[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):617-630.
YI Yang, FENG Jindan, LIU Jinshan, et al. Model Expression and Accuracy Prediction Method of Digital Twin-based Assembly for Complex Products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2):617-630.
- [4] 靳江艳, 黄翔, 刘希平, 等. 基于模型定义的飞机装配工艺信息建模[J]. 中国机械工程, 2014, 25(5):

569-576.

JIN Jiangyan, HUANG Xiang, LIU Xiping, et al. Model-based Definition Assembly Process Information Modeling for Aircrafts[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(5):569-576.

- [5] LINDQVIST R P, STRAND D, NILSSON M, et al. 3D Model-based Large-volume Metrology Supporting Smart Manufacturing and Digital Twin Concepts[J]. Metrology, 2023, 3(1):29-64.
- [6] 孙惠斌, 颜建兴, 魏小红, 等. 数字孪生驱动航空发动机装配技术[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7):833-841.
SUN Huibin, YAN Jianxing, WEI Xiaohong, et al. Digital Twin-driven Aero-engine Assembly Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7):833-841.
- [7] 韩周鹏, 周子涵, 田晨恺, 等. 面向设计重用的复杂机械三维 CAD 装配模型关键功能零件识别方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10):62-67.
HAN Zhoupeng, ZHOU Zihan, TIAN Chenkai, et al. Identifying for Key Function Parts in Complex Mechanical 3D CAD Assembly Model for Design Reuse[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(10):62-67.
- [8] 轩左晨, 李智, 周丹晨. 交互式 MBD 模型工艺审查方法研究[J]. 现代制造工程, 2021(8):70-76.
XUAN Zuochen, LI Zhi, ZHOU Danchen. Study on Manufacturability Evaluation of MBD Model Based on Interactive Method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(8):70-76.
- [9] SUNG R C W, CORNEY J R, CLARK D E R. Automatic Assembly Feature Recognition and Disassembly Sequence Generation[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1(4):291-299.
- [10] KAISER B, REICHLER A, VERL A. Model-based Automatic Generation of Digital Twin Models for the Simulation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Timber Construction[J]. Procedia CIRP, 2022, 107:387-392.
- [11] 陈建强, 秦娜. 基于卷积神经网络的焊接装配特征识别研究[J]. 计算机科学, 2020, 47(S2):215-218.
CHEN Jianqiang, QIN Na. Recognition Algorithm of Welding Assembly Characteristics Based on Convolutional Neural Network[J]. Computer Science, 2020, 47(S2):215-218.
- [12] 赵迪, 徐臻, 胡立宏, 等. 基于特征识别的 AR 智能配合装配研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 380

(10):134-138.

ZHAO Di, XU Zhen, HU Lihong, et al. Research on AR Intelligent Matching Assembly Based on Feature Recognition [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022, 380(10):134-138.

- [13] 韩周鹏, 刘永, 巴黎, 等. 基于复杂网络的三维 CAD 装配模型模块单元发掘[J]. 中国机械工程, 2022, 33(6):690-697.

HAN Zhoupeng, LIU Yong, BA Li, et al. Discovery of Modular Units for Complex Three-dimension CAD Assembly Model Based on Complex Network [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(6):690-697.

- [14] 刘凯, 赵新灿, 谭同德. 基于 STEP 和 OSG 的虚拟装配系统[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(1):262-267.

LIU Kai, ZHAO Xincan, TAN Tongde. Virtual Assembly System Based STEP and OSG[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(1):262-267.

- [15] 刘一字, 罗意平, 张晓峰. 基于 STEP 装配特征的 BOM 信息提取和多视图映射[J]. 微计算机信息,

2010, 26(13):141-143.

LIU Yiyu, LUO Yiping, ZHANG Xiaofeng. BOM Information Auto-generate Based on STEP Assembly Feature and BOM Multi-view Mapping[J]. Science and Technology & Innovation, 2010, 26(13):141-143.

(编辑 张 洋)

作者简介: 贾 康, 男, 1987 年生, 副研究员、硕士研究生导师。研究方向为复杂机械装备精密装配的技术与软件系统开发。发表论文 26 篇。E-mail: jiakang@xjtu.edu.cn。洪 季* (通信作者), 男, 1968 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为数字化设计、制造与装配、精密电主轴技术。发表论文 577 篇。E-mail: jhong@mail.xjtu.edu.cn。

本文引用格式:

贾康, 唐竞, 任东旭, 等. 面向 STEP 模型装配特征自动提取的装配信息模型构建[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1):123-132.

JIA Kang, TANG Jing, REN Dongxu, et al. Construction of Assembly Information Model Based on Assembly Features Automatic Extraction for STEP Models[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):123-132.

(上接第 122 页)

- [21] 张则强, 李六柯, 蔡宁, 等. 随机型拆卸线平衡问题的局部邻域遗传算法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3):607-618.

ZHANG Zeqiang, LI Liuke, CAI Ning, et al. Local Neighborhood Genetic Algorithm for Stochastic Disassembly Line Balancing Problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3):607-618.

- [22] 脱阳, 张则强, 张裕, 等. 考虑可变时间的双边机器人拆卸线平衡问题建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12):4073-4088.

TUO Yang, ZHANG Zeqiang, ZHANG Yu, et al. Modeling and Optimization for Two-sided Robots Disassembly Line Balancing Problems Considering Variable Time[J]. Computer Integrated Manufac-

turing Systems, 2023, 29(12):4073-4088.

(编辑 张 洋)

作者简介: 脱 阳, 男, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为制造系统与智能优化。发表论文 2 篇。E-mail: 1102558842@qq.com。张则强* (通信作者), 男, 1978 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为制造系统与智能优化。发表论文 100 余篇。E-mail: zzq_22@163.com。

本文引用格式:

脱阳, 张则强, 谢心澜, 等. 考虑工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题的建模与优化[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1):113-122.

TUO Yang, ZHANG Zeqiang, XIE Xinlan, et al. Modeling and Optimization of Multimanned Two-sided Disassembly Line Balancing Problem for Dynamic Workers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):113-122.