

基于向位妨碍的约束状态图模型及其拆卸序列

陈 建 王建勇 黄 林 李锦春

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,杭州,310014

摘要:为了有效衡量拆卸过程中零部件约束方向区间的大小,提出了一种基于向位妨碍的约束状态图模型及其拆卸序列生成方法。根据零部件之间在拆卸过程中的约束类型及空间妨碍关系,提出了一种三维向位妨碍的概念及其计算方法,并构建了基于向位妨碍的约束状态图模型;在此基础上构建了相应的状态矩阵和拆卸算子矩阵,将拆卸过程转化为拆卸算子矩阵与状态矩阵的迭代运算过程,并给出了相应的拆卸规则及拆卸序列规划算法。以平口钳产品拆卸为例,进行了拆卸建模与序列规划求解,结果表明该方法有效、可行。

关键词:三维向位妨碍;状态图模型;拆卸算子;拆卸序列

中图分类号:TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.21.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Constraint State Graph Model Based on Phase Hinder and Its
Disassembly Sequence

CHEN Jian WANG Jianyong HUANG Lin LI Jinchun

Key Lab of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,

Minister of Education/Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310014

Abstract: In order to measure the sizes of the constraint direction interval of parts effectively in the disassembly processes, a constraint graph model was constructed herein based on phase hinder and the disassembly sequence generation method. First of all, according to the space constraint in the disassembly processes and hinder with each other relations, a concept of 3D phase hinder and calculation method were put forward, and a constraint state graph model was constructed based on phase hinder. Then, in order to describe the product state and the disassembly processes, the corresponding state matrixes and disassembly operator matrixes were constructed, and the disassembly processes were transformed into iterative operation processes of the disassembly operator matrixes and the state matrixes, and the disassembly rules and disassembly sequence planning algorithm were given based on the above researches. Finally, taking a plain vice as an example, the disassembly modeling and sequence planning were solved, the results show that the method is effective and feasible.

Key words: 3D phase hinder; state graph model; disassembly operator; disassembly sequence

0 引言

实现废旧产品的拆卸处理可有效提高资源利用率、减少环境污染,也是提高企业社会效益和经济利益的重要手段。目前围绕废旧产品的拆卸建模研究大多是将几种基本图模型集成在一起或结合其他理论方法进行建模与拆卸信息表达,这种混合形式图模型较好地解决了单一模型所产生的问题,是拆卸模型构建的重要发展方向。张秀芬等^[1]在无向图的基础上,提出了产品拆卸多约束图,增加了拆卸优先级约束和空间约束信息。TAN 等^[2]构建了信息建模(BIM)技术和改进算

法,为拆卸石油平台提供了精确的组件信息。汪开普等^[3]针对实际拆卸作业的复杂性,建立了考虑模糊作业时间平衡问题的数学模型,并提出一种基于 Pareto 解集的多目标遗传模拟退火算法进行求解。JIAO 等^[4]建立了以评估拆卸序列质量为目的的健身功能模型(FFM),并提出一种离散 BA 方法优化拆卸序列问题。宋守许等^[5]在构建混合图拆卸模型基础上,将产品拆卸序列转化为一类约束满足问题。LI 等^[6]为了获得拆卸序列最优解,提出一种拆卸序列规划(DSP)转换为基于拆卸约束图的约束分类问题(CSP)模型方法,并得到有效的可行拆卸序列。REN 等^[7]为了解决平行拆卸序列(PDP)问题,提出了拆卸过程中的优先约束模型和可视化表示方法。王淑旺

收稿日期:2018-05-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175473,61772469);
浙江省自然科学基金资助项目(Y15E050071)

等^[8]针对拆卸中的不确定问题,构建了拆卸约束混合图拆卸模型。ZHENG 等^[9]提出一种基于映射关系的 OWL 动态建模方法,以提高机器人的分解能力。ZHANG 等^[10]针对平行拆卸问题,构建了基于模糊时间的调度拆卸过程模型。MITROUCHEV 等^[11]根据零部件移除轨迹定义了零件之间的约束范围,依据约束方向范围的大小来判断该零部件是否可拆。宋小文等^[12]针对由于零件缺陷产生不可拆问题构建了一种五元组拆卸混合图模型,用于表达拆卸组件单元、方向性约束、空间约束、选择性约束和无方向性约束关系。KANG 等^[13]构建了一种 d-BOM 结构图模型,根节点表示待拆卸产品整体,叶节点表示不可继续分离部分。李方义等^[14]针对目标拆卸问题,提出了一个基于约束和产品拓扑关系的复合有向图模型。江吉彬等^[15]针对拆卸设计理论演算多、实用化难等问题,提出面向拆卸对象的层次网络图模型。ZHANG 等^[16]通过建立混合模糊模型,提高了拆卸路径规划的环境适应性。李世停等^[17]提出了基于约束关系的 Petri 网拆卸模型,有效地对设备拆卸过程进行了表达。ZHU 等^[18]采用标准建模语言(UML)方法构建了一种动态拆卸信息模型图,用来表达拆卸方向、空间约束和拆卸工具。邹宾森等^[19]针对拆卸线单边不足问题,建立了多目标拆卸性平衡问题模型,并提出一种 Pareto 蝙蝠算法以提高效率。张雷等^[20]为了研究复杂产品的并行拆卸构建了一种混合图,无向边表示零件之间存在某种连接的约束,有向边表示干涉关系。

综上所述,在可拆卸问题研究中,影响拆卸的因素有零件本身的特性(尺寸、质量、结构类型)、约束类型、拆卸工具等,而本文研究的三维向位妨碍是约束类型中的重要影响因素。在拆卸约束问题研究中,零部件可拆是整个拆卸的基础,对可拆卸性的研究若以二维拆卸方向为基础,不研究三维拆卸约束的表示和约束量值的计算,则容易忽略拆卸零件本身空间特性影响,因此,本文在分析机械产品零部件之间装配方式和约束关系的基础上,提出三维向位妨碍的概念和妨碍区间的计算方法,同时根据要拆卸的不同约束情况对计算方法进行优化。

1 向位妨碍约束状态图模型

1.1 三维向位妨碍区间

定义 1 在拆卸空间中,任一零部件 i 的拆卸方向为从零部件 i 中心发射的无数条射线 S_{ni} ,如

果存在零部件 j 对零部件 i 的拆卸移动方向产生阻碍,则称这种阻碍为零部件 j 对零部件 i 的向位妨碍,射线 S_{ni} 形成的封闭曲线 S_1 为可拆卸空间与不可拆卸空间的分界线,具体见图 1。

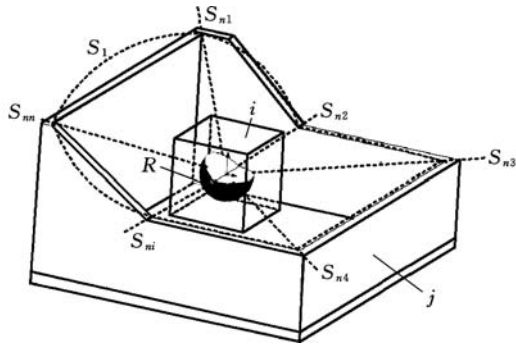


图 1 三维向位妨碍示意图

Fig.1 3D phase hinder diagram

定义 2 假设任一零部件 j 对零件 i 的向位妨碍射线形成一个三维锥体空间,其顶角用 Ω 表示,那么总会存在一个半径为 r 的球体与之相交得到一个妨碍曲面,则称该三维锥体与球体的相交面为三维向位妨碍区间 R_{ij} ,它的数值大小为球面($r=1$)被妨碍射线组成的锥体所截得的球面面积 R_{ij} ,其中球体中心为妨碍射线汇集点,为零部件 i 的形心,具体见图 2。

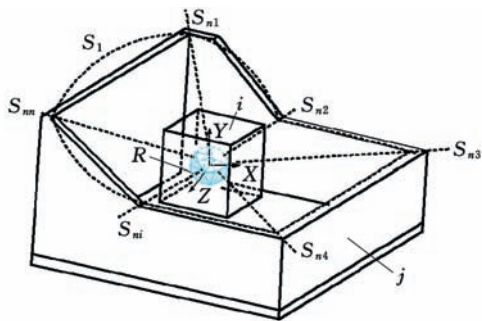


图 2 三维向位妨碍区间

Fig.2 3D phase hinder interval

取笛卡儿坐标系为参考坐标系,那么在向位妨碍球表面上总存在一微小曲面 dA ,不计高阶无穷小,可把这个微小曲面看成一个长方形,其经线方向的长度 $dl_1 = r d\theta$ ($d\theta$ 为 dl_1 对应的圆心角),纬线方向的宽度 $dl_2 = r \sin\theta d\varphi$ ($d\varphi$ 为 dl_2 对应的圆心角)。可得出曲面上面积微元 $dA = dl_1 dl_2 = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$,具体见图 3。

同时,根据定义 2 可得具体妨碍值计算公式:

$$R_{ij} = \int dA_{ij} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中, θ_1 、 θ_2 为拆卸射线在 OXZ 面与 Y 轴正方向由妨碍起点转到妨碍终点的妨碍夹角,通过投影可得到 θ 积分域为 $[0, \pi]$; φ_1 、 φ_2 为从正 Y 轴方向看自 X 轴按逆时针方向由妨碍起点转到妨碍终点的妨碍夹角,通过投影可得到 φ 积分域为 $[0, 2\pi]$ 。

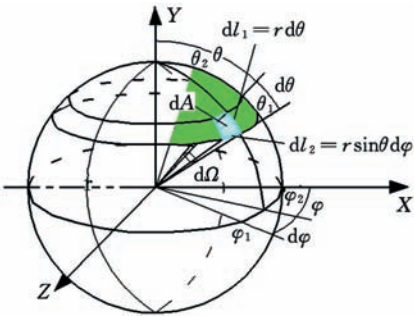


图 3 向位妨碍的示意图

Fig.3 A diagram showing the hindrance

为了明确表达两零部件之间的向位妨碍关系,假设单位球体被分成两个部分:一部分代表零部件 j 对零部件 i 产生的向位妨碍区间 R_{ij} ,用灰色表示(图 4 球体左下部);另一部分表示零部件 i 对零部件 j 产生的向位妨碍区间 R_{ji} ,用白色表示(图 4 球体右上部)。根据上述定义可知,在非全向位妨碍和非无向位妨碍时,零部件 i 对零部件 j 产生的向位妨碍区间($r=1$)为

$$R_{ji} = 4\pi - R_{ij} \tag{2}$$

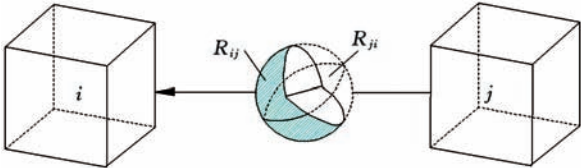


图 4 三维空间约束向位妨碍示意图

Fig.4 3D-space constraint hindrance diagram

若零部件 j 对零部件 i 产生的向位妨碍值为全向位妨碍,则用全灰色球体表示(图 5a);若为无向位妨碍,则用全白色高斯球表示(图 5b);若零部件 i 移动方向只有一个方向,则用白色锥体或箭头表示(图 5c),其他情况为部分向位妨碍,球面区域大小由妨碍区间大小决定(图 5d)。

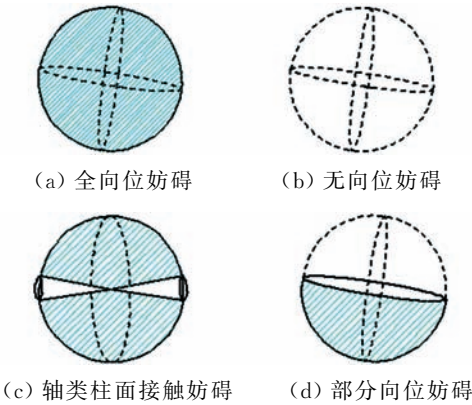


图 5 三维向位妨碍分类简图

Fig.5 3D phase hinder classification diagram

1.2 三维向位妨碍区间分类计算

实际零部件之间的接触方式可以分为平面接触、曲面接触及其他接触。形锁合接触(链、带、齿

轮)、材锁合接触(焊接、粘接)及无接触配合等都属于其他接触。

1.2.1 平面接触

机械零件平面接触分为单面接触和多面接触,设零件 A 和零件 B 为平面接触,则根据向位妨碍定义可得出 B 对 A 的向位妨碍为 R_{AB} ,如图 6 所示。根据式(1)得图 6 中平面接触向位妨碍值如下:

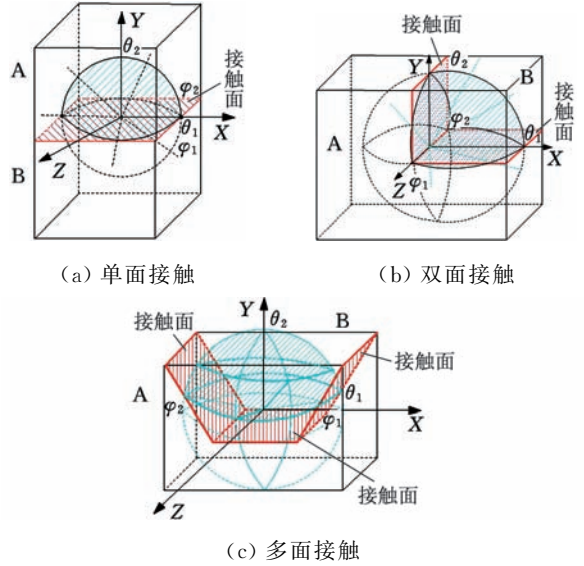


图 6 平面接触

Fig.6 Plane contact

(1) 图 6a 为单面接触, $\theta \in [0, \pi/2], \varphi \in [0, 2\pi]$,则妨碍值 $R_{AB} = \int dA_{AB} = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta = 2\pi$,同理,如果接触面为 OXZ, OYZ ,表示方法和计算结果同为 $R_{AB} = 2\pi$ 。

(2) 图 6b 为双面接触, $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \varphi \in [0, \pi]$,则妨碍值 $R_{AB} = r^2 \int_0^{\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta = \pi$,同理,如果接触面为 OXZ, OYZ ,表示方法和计算结果同为 $R_{AB} = \pi$ 。

(3) 图 6c 为多面接触, $\theta \in [\theta_1, \theta_2], \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2]$,则妨碍值 $R_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$,其中 θ, φ 可由图中或模型中求得,进而可以求出 B 对 A 的妨碍值。

1.2.2 曲面配合

根据机械零件的实际特征和装配情况,曲面配合可以分为三类:第一类为柱面接触,可进一步分为螺纹配合和过渡、过盈、间隙配合;第二类为圆锥类配合;第三类为球面配合。设零件 A 和零件 B 为曲面接触,则根据向位妨碍定义可得出 B 对 A 的向位妨碍值 R_{AB} ,如图 7 所示。根据式(1)得图 7 中曲面向位妨碍值如下:

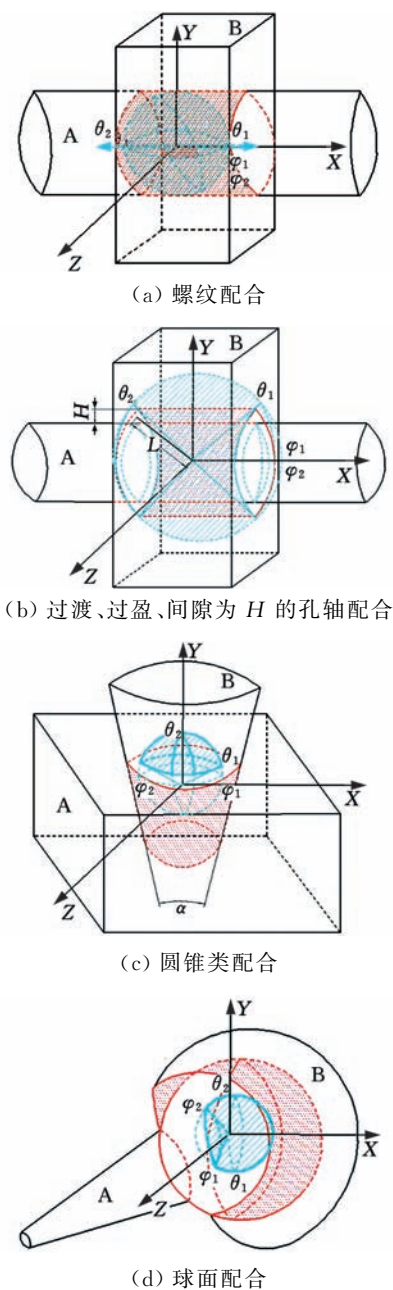


图 7 曲面配合

Fig.7 Surface combined

(1) 图 7a 为螺纹配合,此配合实际情况为结构组织相互交错紧配合,因此, $R'_{AB} = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin\theta d\theta = 4\pi$; 又根据机械设计手册,同时考虑到实际必然会存在一定径向间隙(即存在轴向的单向旋转移动,图中箭头方向),取 d 为螺纹直径, d_2 为螺纹小径,那么可认为存在的因旋转产生的(单向移动)非妨碍区面积为 $\pi(\frac{d-d_2}{2})^2$,同时向妨碍球面投影单位规范化的非妨碍面积为 $\frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2$,根据机械手册中常用螺纹,可得到 $0 \leq \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2 \leq \pi$,则最终螺纹配合的妨碍值

$$R_{AB} = R'_{AB} - \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2 = 4\pi - \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2 \quad (3)$$

(2) 图 7b 为过渡、过盈及间隙为 H 的孔轴配合,可知实际配合中存在因过渡、过盈、间隙配合而产生的非妨碍区面积为 $\pi(\frac{H}{2})^2$,则向妨碍球面投影单位规范化的非妨碍面积为 $\frac{\pi}{L}(\frac{H}{2})^2$,图 7b 所示向位妨碍值

$$R_{AB} = \int dA_{AB} = 4\pi \pm \frac{\pi}{L}(\frac{H}{2})^2 \quad (4)$$

其中, θ, φ 可由图中或模型中求得,为过渡、间隙配合时,取“-”,为过盈配合时,取“+”,进而可以求出 B 对 A 的妨碍值。

(3) 图 7c 为圆锥面接触配合,设锥角为 α ,图 7c 所示向位妨碍值

$$R_{AB} = \int dA_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \quad (5)$$

其中, $\theta \in [\frac{\alpha\pi}{2}, \frac{2+\alpha}{2}]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$,进而可以求出 B 对 A 的妨碍值。

(4) 图 7d 为球面接触配合,图 7d 所示向位妨碍值

$$R_{AB} = \int dA_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta \quad (6)$$

其中, θ, φ 可由图 7d 中或模型中的包裹角求得,进而可以求出 B 对 A 的妨碍值。

1.2.3 形锁合接触

(1) 齿轮啮合接触配合。以半径为 r_a, r_b 的一对渐开线标准直齿圆柱齿轮为例,根据齿轮啮合原理,可知齿轮 B 对齿轮 A 的向位妨碍为图 8a 所示的齿轮 B 的边缘线,同时根据定义 1、定义 2,取齿轮啮合中心线中央啮合点为妨碍球体的中心,得到齿轮 B 对齿轮 A 的向位妨碍面,为图 8a 所示的右部阴影区域面积。结合式(1)可知,齿轮 B 对齿轮 A 的向位妨碍值 $R_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$ 。又根据齿轮齿廓啮合基本定律可知,齿轮 B 中某一齿进入啮合到退出啮合的接触齿面刚好为齿轮的实际妨碍面,而进入啮合到退出啮合的距离为线段 $N_A N_B$ 长度,那么进一步可得实际妨碍面积 $S_{AB} = L_{AB} h$,其中 L_{AB} 为齿轮 A、B 最长啮合线段, h 为齿轮宽度,如图 8b 所示。同时,为了方便计算齿轮啮合妨碍值 R_{AB} 大小,对实际啮合妨碍面积 S_{AB} 规范化得到 $S'_{AB} = 2\pi h r a / (360^\circ r_B)$,那么当齿轮 B 对齿轮 A 妨碍面积投影到半径 $r = 1$ 的球体上时,妨碍值

$$R_{AB} = S'_{AB} = 2\pi h r a / (360^\circ r_B) \quad (7)$$

式中, α 为啮合夹角; r_B 为齿轮 B 的分度圆半径。

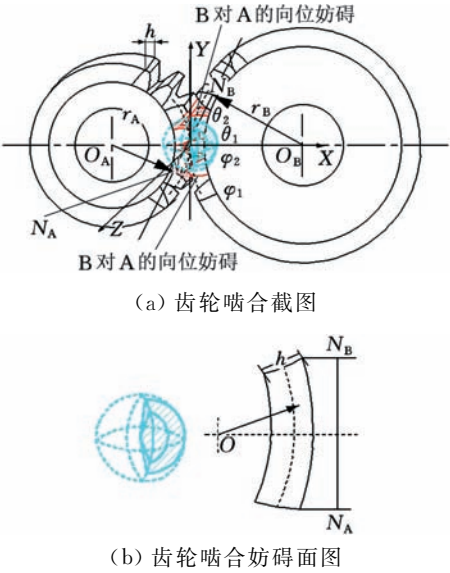


图 8 齿轮啮合接触配合

Fig.8 Gear mesh contact combined

(2) 带与带轮接触配合。带与带轮接触配合选取普通 V 带与 V 带轮为例,如图 9a 所示,根据定义 1 可知带 B 对带轮 A 的拆卸阻碍为与带轮接触的外围 V 带,根据定义 2 可知带 B 对带轮 A 的向位妨碍值为以带轮中心为球体中心与可拆卸方向射线的交面 R_{AB} ,且 $R_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$ 。同时,根据带与带轮的传动特点可以得出单根带实际的妨碍面积 S_{AB} ,如图 9b 所示, $S_{AB} = bL = \pi b d \alpha / 360^\circ$,其中, b 为单根带宽, d 为轮径,也为带妨碍半径, α 为带轮中心包角, L 为包裹带长。进一步,为了方便直接计算带与带轮的向位妨碍值,对实际妨碍面积向半径为 r 的截面球体规范化投影,可得到数量 n_1 的带对带轮的妨碍面积 $S'_{AB} = \pi n_1 b r \alpha / (360^\circ d)$ 。由此可知,带与带轮的向位妨碍值

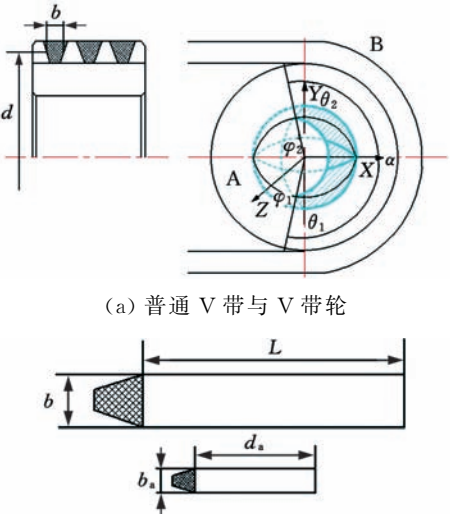


图 9 带与带轮向位妨碍

图 9 Belt and pulley hinder

$$R_{AB} = S'_{AB} = 2\pi n_1 b r \alpha / (360^\circ d) \quad (8)$$

(3) 链与链轮接触配合。选取滚子链为例,链轮 A 与链 B 的配合见图 10a,根据定义 1 知,链 B 对链轮 A 的妨碍为包裹在链轮 A 的外部链条,根据定义 2 可知,选取链轮中心为半径为 r 的球体中心,与链轮 A 的移动射线相交的球面为链 B 对链轮 A 的妨碍面(图中阴影面积),且向位妨碍值 $R_{AB} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$ 。进一步分析,链条数为 n_2 的链 B 对链轮 A 的实际妨碍面积见图 10b,链条的妨碍面积 $S_{AB} = n_2 C L d_2 = C n_2 p_2 d_2$ 。为了方便计算链与链轮的妨碍面积,将妨碍面积 S_{AB} 规范化投影到半径为 r 的球体上,妨碍值 $S'_{AB} = d_{a2} L_a = 4\pi n_2 C r a d_2 / (360^\circ d)$ 。其中, C 为链节数, p_2 为节距, n_2 为链条数, d 、 d_2 、 α 可由待拆链与链轮获得。那么可知此时 $R_{AB} = S'_{AB}$,所以链与链轮的妨碍值

$$R_{AB} = S'_{AB} = 4\pi n_2 r a d_2 / (360^\circ d) \quad (9)$$

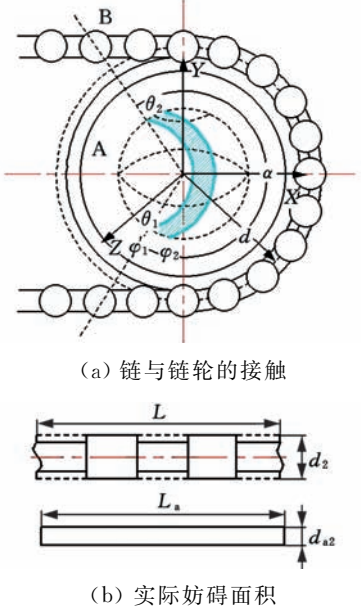


图 10 链与链轮妨碍

Fig.10 Chain and sprocket hinder

1.2.4 材料锁合接触

材料锁合为材料内部结构组织粘合,如零件 A 和零件 B 粘合。图 11 为材料锁合接触,实际情

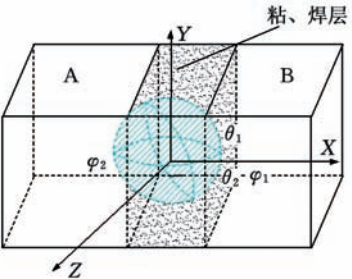


图 11 材料锁合接触

Fig.11 Material closure contact

况为材料内部结构组织粘合配合。没有移动方向,分析认定为全向位妨碍,有

R_{AB} = \int dA_{AB} = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin\theta d\theta = 4\pi \tag{10}

1.2.5 无接触配合

无接触配合为无结构组织结合或无接触的配合,零件 A 和零件 B 直接存在一定的距离,见图 12。零件 A 和 B 可以自由移动,则认定为无向位妨碍,无向位妨碍值

R_{AB} = R_{BA} = 0 \tag{11}

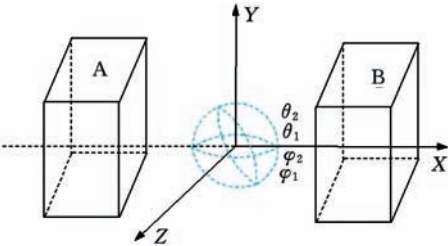


图 12 无接触配合

Fig.12 No-contact combined

根据上述提到的机械零件之间的具体配合分类以及对应的三维向位妨碍计算方法,整理可得表 1。

表 1 机械零件装配分类及向位妨碍
Tab.1 Assembly classification and alignment obstruction of mechanical parts

接触类型		配合类型	连接类型	妨碍值 R_{ij}
平面接触	单面接触	面贴合		$R_{ij} = R_{ji} = 2\pi$
	多面接触	对齐	键连接	
曲面接触	柱面接触	过渡、过盈、间隙、配合	孔轴连接	$R_{ij} = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta \pm \Delta$ Δ 根据实际情况选取
			螺纹连接	
	锥面接触		销钉连接	
	球面接触		球副连接	
其他	无接触			
	形锁合	结构接触	齿轮	$R_{ij} = 2\pi h r a / (360^\circ r_B)$
			带与带轮	$R_{ij} = 2\pi n_1 b r a / (360^\circ d)$
			链与链轮	$R_{ij} = 4\pi n_2 C r a d_2 / (360^\circ d)$
	材料锁合		焊、粘、铆接	全向位妨碍 $R_{ij} = R_{ji} = 4\pi$

1.3 基于向位妨碍的约束状态图

在废旧产品拆卸过程中,零部件的约束关系主要分为接触关系和连接关系。接触关系是指两零件之间的装配面配合关系,如平面接触、曲面接触等;连接关系是指零部件间的紧固连接关系,如螺纹连接、键连接、过盈配合、粘、焊接等。基于向位妨碍的约束状态图的具体定义如下。

定义 3 设 V 为零件 A 的一个顶点集合,V 的元素个数为 |V|,当 |V| > 1 时,任取 V 中的

元素 v_1, v_2, \dots, v_n (n > 1), 如果 v_1, v_2, \dots, v_n 互不相交,那么定义 e_{dk} = \{v_i, v_j\} (k \in \mathbf{N}; i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j; n > 1) 为有向边,表示需要通过外力作用才能解除的连接关系。有向边用实线箭头表示,箭头元素的拆卸优先级小于箭尾元素的拆卸优先级,具有相同拆卸优先级的有向边其约束程度大小用向位妨碍区间大小 R_{ij} 表示。

定义 4 设基于向位妨碍的分类约束图集合 G_A = \{V, E_d(R_{ij})\}, 其中, E_d 为有向边集合。定义产品在拆卸过程是一个从 t_0 时刻一直到 t_n 时刻的状态变化过程,记为 G_A(t) = \{V(t), E_d(R_{ij})(t)\} (t = t_0, t_1, \dots, t_n)。拆卸之前的状态集合 G_A(t_0) = \{V(t_0), E_d(R_{ij})(t_0)\}, 第一个关联关系解除之后的状态集合 G_A(t_1) = \{V(t_1), E_d(R_{ij})(t_1)\}, 依此类推,完全拆卸之后的状态集合 G_A(t_n) = \{(V(t_n), E_d(R_{ij})(t_n))\}。

将符合以上定义的集合约束图称为基于向位妨碍的约束状态图模型。图 13 为挤压机构装配示意简图,根据其零部件装配关系及向位妨碍关系可构建其 t_0 时刻基于向位妨碍的约束状态图,见图 14。

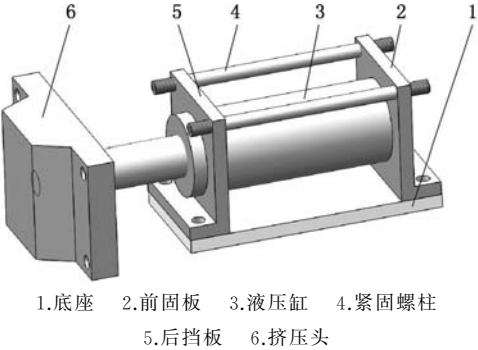


图 13 挤压机构装配示意简图

Fig.13 Assembly schematic diagram of extrusion mechanism

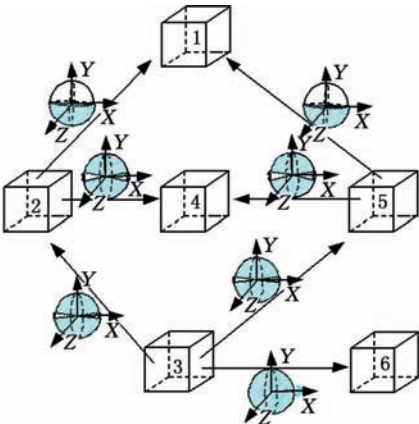


图 14 挤压机构 t_0 时刻基于向位妨碍的约束状态图

Fig.14 Constraint state graph based on phase hinder of extrusion mechanism at t_0

根据图 13 实际零件接触方式及表 1 分析可知,零件 1 与零件 2、零件 5 为平面接触中的单面接触,可得零件 1 对零件 2、零件 5 的妨碍值 $R_{12} = R_{15} = 2\pi$;零件 2 与零件 3 为曲面接触配合中具有间隙的圆柱配合,根据式(1), $R_{23} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta d\varphi$,根据实际接触投影可得 $\theta_1 = \frac{\pi}{18}, \theta_2 = \frac{17\pi}{18}, \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 2\pi$,同时根据不同情况的使用可直接使用式(4)简化计算,得 $R_{23} = 4\pi - \frac{\pi}{L}(\frac{H}{2})^2$,其中 $L、d、d_2$ 可由实际尺寸得到,同理可求得 R_{35} ;零件 2 与零件 4 为曲面接触配合中具有间隙的圆柱配合,因此 $R_{24} = r^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta d\varphi$,根据实际接触投影可得 $\theta_1 = \frac{17\pi}{180}, \theta_2 = \frac{163\pi}{180}, \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 2\pi$,同理可求得 R_{45} ;零件 3 与零件 6 为曲面接触配合中的螺纹接触,且在 +X 方向可移动,因此由式(3)得 $R_{36} = 4\pi - \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2 = 3.99\pi$ 。具体见图 14。

2 基于向位妨碍的约束状态矩阵

基于向位妨碍的分类约束状态矩阵 $\mathbf{M}(t)$ ($0 < t < N$) 表示 t 时刻包含已拆卸零部件与未拆卸零部件所具有的约束状态,它是进行拆卸序列规划的依据。矩阵元素可通过 t 时刻基于向位妨碍的分类约束状态图分析得到,表示列序号零部件对行序号零部件的向位妨碍或接触关系。矩阵元素 m_{ij} 表示零件 i 和零件 j 是否存在接触关系或连接关系,图模型的无向边决定矩阵中零件 i 与零件 j 是否存在接触关系,其数值为 1 或 0;图模型的有向边决定矩阵元素 i 与元素 j 是否存在连接关系,其数值为两元素向位妨碍区间的大小。矩阵元素表达式为

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{零部件 } i、j \text{ 存在无向边约束} \\ R_{ij} & \text{零部件 } i、j \text{ 存在有向边约束} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$i, j = 1, 2, \dots, N$

以图 14 为例,分析 t_0 时刻基于向位妨碍的分类约束状态图,图中共有有向边 7 条。 t_0 时刻的状态矩阵如下:

$$\mathbf{M}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 & 2\pi & 0 & 0 & 2\pi & 0 \\ 2\pi & 0 & 3.92\pi & 3.83\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0.08\pi & 0 & 0 & 3.92\pi & 3.99\pi \\ 0 & 0.17\pi & 0 & 0 & 3.83\pi & 0 \\ 2\pi & 0 & 0.08\pi & 0.17\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01\pi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3 拆卸规则算子与拆卸路径生成

3.1 拆卸规则算子 D

在构建了基于向位妨碍的分类约束状态矩阵 $\mathbf{M}(t_0)$ 之后,产品的拆卸就是依据状态矩阵进行运算的过程。为了对状态矩阵进行有效的运算、搜索,需要根据状态矩阵构成特点制定优先拆卸的规则。具体内容如下:

- (1) 由于状态矩阵的行元素代表待拆卸零部件,列元素是对行元素有可能产生约束和妨碍的零部件,所以首先需要判定哪个行元素是无约束或被约束最少,并优先拆卸该零部件。
- (2) 如果有多个行元素的约束数量相同,则需要进一步判定向位妨碍区间值,向位妨碍区间值小的零部件优先拆卸。在不考虑其他影响因子的前提下,对于图 6a, $R_{ABa} = R_{BAa}$,那么拆卸 A 与 B 的难度相同;对于图 6b, $R_{ABb} < R_{BAb}$,所以优先拆除部件 A;如果针对图 6a 与图 6b, $R_{ABa} = 2\pi > R_{ABb}$,那么对拆卸零件 A 来说图 6a 情况要难于图 6b,反之对拆卸零件 B 来说图 6b 难于图 6a。
- (3) 为了提高拆卸效率,对于行元素中存在相同约束数量,但向位妨碍区间长度不一样的情况,可实现多目标同时拆卸。

产品拆卸过程就是状态矩阵不断变化迭代的过程,每拆卸一项,相当于一个时刻 t 的变化。根据状态矩阵运算、搜索规则,构建了一个对状态矩阵操作的拆卸规则算子 \mathbf{D} 。

定义 5 假设待拆卸产品从初始状态一直到最终拆卸完成有 n 个状态,可表示为 $\mathbf{M}(t_0)、\mathbf{M}(t_1)、\dots、\mathbf{M}(t_n)$,其中总存在一个矩阵 $\mathbf{D}_{N \times N}$ 使得 $\mathbf{M}(t_{i+1}) = \mathbf{D}\mathbf{M}(t_i) (0 \leq i < n-1)$,则 \mathbf{D} 为状态矩阵 $\mathbf{M}(t)$ 的拆卸算子。拆卸算子 \mathbf{D} 中的元素 $x = 0$ 或 1,与待拆卸零部件行号对应的列号全部为 0,其余为 1。

3.2 拆卸路径生成流程

结合制定的拆卸规则,将拆卸规则算子 \mathbf{D} 与状态矩阵 \mathbf{M} 不断进行运算迭代可得到所有最优拆卸方案。拆卸序列规划流程如下(图 15):

- (1) 计算机读入状态矩阵 \mathbf{M} 及元素全为 1 的算子矩阵 \mathbf{D} ;
- (2) 搜索状态矩阵各行,寻找约束项最少的一行(约束个数要大于 0,如果约束个数为 0,则表示该零部件已拆卸),假设为第 m 行;
- (3) 判断约束最少的行是否为单行,如果不是单行,则转到步骤(8);
- (4) 如果是单行,则将 \mathbf{D} 相应的第 m 列置为 0;

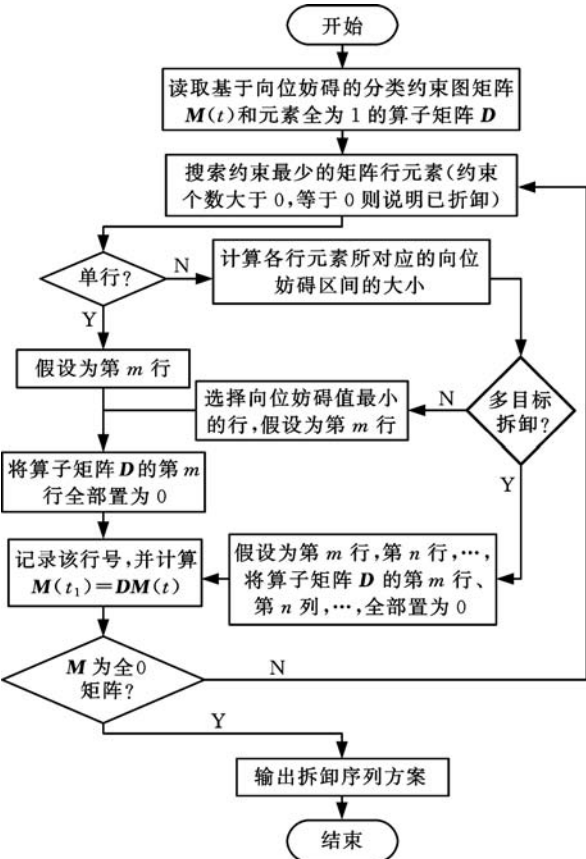


图 15 拆卸序列规划流程图

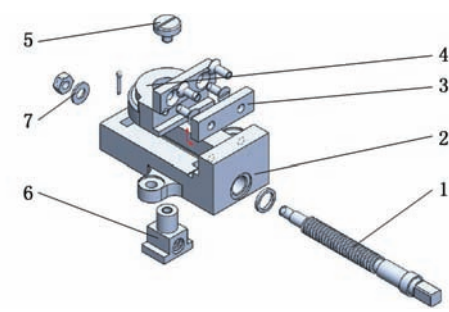
Fig.15 Demolition sequence planning flow chart

- (5) 记录该行号, 并计算 $M(t_{n+1}) = DM(t_n)$;
- (6) 判断矩阵 M 元素是否全为 0, 如果是则输出拆卸序列方案, 结束;
- (7) 如果不是则转到步骤(2);
- (8) 如果是单目标拆卸, 计算各行元素向位妨碍区间长度, 并选择向位妨碍区间最短的行, 假设为第 m 行, 转到步骤(4);
- (9) 如果是多目标拆卸, 则把算子矩阵相应列元素置为 0, 同时转到步骤(5)。

4 实例分析

平口钳是一种通用可调夹具, 适用于多品种小批量生产加工, 也可用于组合夹具作为一种“合件”。由于其定位精度较高、夹紧迅速、通用性好、操作方便, 因此应用广泛^[21]。平口钳是易损易耗产品, 对平口钳进行拆卸回收具有重要意义。图 16 为平口钳装配示意简图, 根据其零部件装配关系及向位妨碍关系可构建其 t_0 时刻基于向位妨碍的分类约束状态图, 见图 17。

根据图 16 实际零件接触方式及表 1 分析, 可知零件 1、3 为平面接触中的单面接触, 根据式(1)可得零件 1 对零件 3 的妨碍值 $R_{13} = r^2 \int_0^\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta d\varphi = \pi$; 零件 1、2 为曲面接触中的螺



1.螺杆 2.固定钳身 3.钳口板 4.活动钳身
5.紧固螺钉 6.螺母 7.固定圆环

图 16 平口钳装配示意简图

Fig.16 Assembly diagram of flat nose pliers

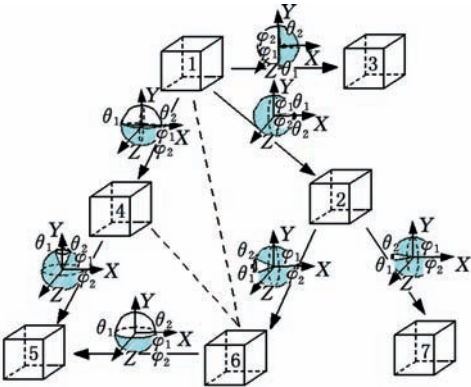


图 17 t_0 时刻基于向位妨碍的分类约束状态图

Fig.17 Constraint state graph based on phase hinder at t_0

纹配合接触, 根据零件 2 的外形特征可知拆卸方向为沿 X 单方向, 综合可得零件 1 对零件 2 的妨碍值采用式(3), 可得 $R_{12} = 4\pi - \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2$, 由图中可知 $\theta_1 = \frac{\pi}{13}$, $\theta_2 = \pi$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 2\pi$, $r = 1$, 则根据式(1)和定义可得 $R_{12} = r^2 \int_0^{2\pi} \int_{\frac{\pi}{13}}^\pi \sin\theta d\theta d\varphi = 3.90\pi$, 也可用式(3)得 $R_{12} = 4\pi - \frac{\pi}{d}(\frac{d-d_2}{2})^2 = 3.90\pi$; 零件 1、4 为面接触中的单面接触, 且 $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \pi$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 2\pi$, $r = 1$, 根据表 1 及式(1)可得零件 1 对零件 4 的妨碍值 $R_{14} = 2\pi$ 。同理, 可得出 R_{45} 、 R_{56} 、 R_{26} 、 R_{27} 的值。

依据所提出的拆卸算法与流程, 具体实施如下:

- (1) 从状态矩阵 $M(t_0)$ 中选取所在行元素为 1 和向位妨碍个数最少的项, 结果为零件 3 和零件 7。接着比较零件 3 和零件 7 所在行的所有妨碍区间集合长度, 可得 $R_3 = 2\pi$, $R_7 = 2.66\pi$, $R_3 < R_7$, 因此优先进行零件 3 拆卸。将矩阵 D 第 3 列元素全置为 0, 再与 t_0 时刻状态矩阵进行计算, 即

$$\mathbf{M}(t_1) = \mathbf{D}_1 \mathbf{M}(t_0) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M}(t_0)$$

此时 t_1 时刻的状态矩阵

$$\mathbf{M}(t_1) = \begin{bmatrix} 0 & 3.93\pi & 0 & \pi & 0 & 1 & 0 \\ 0.07\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.46\pi & 3.66\pi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi & 0 & 0 & 0 & 3.33\pi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.67\pi & 0 & 2\pi & 0 \\ 1 & 0.54\pi & 0 & 1 & 2\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0.34\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

t_1 时刻的向位妨碍分类约束状态图见图 18。

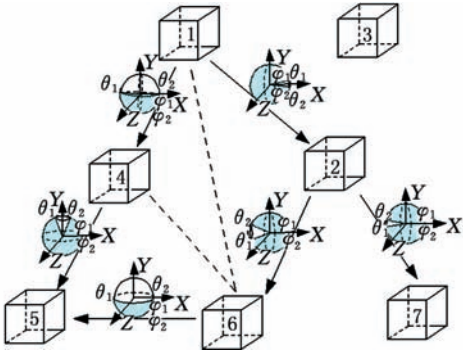


图 18 t_1 时刻基于向位妨碍的约束状态图
Fig.18 Constraint state graph based on phase hinder at t_1

(2) 继续从状态矩阵中选取所在行约束的数量最少的项,约束个数为 0,表示已经拆卸,这时选择零件 7 进行拆卸。继续将矩阵 \mathbf{D} 第 7 列置为 0,再与 t_1 时刻状态矩阵进行计算,即

$$\mathbf{M}(t_2) = \mathbf{D}_2 \mathbf{M}(t_1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{M}(t_1)$$

此时 t_2 时刻的状态矩阵

$$\mathbf{M}(t_2) = \begin{bmatrix} 0 & 3.93\pi & 2\pi & \pi & 0 & 1 & 0 \\ 0.07\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.46\pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi & 0 & 0 & 0 & 3.33\pi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.67\pi & 0 & 2\pi & 0 \\ 1 & 0.54\pi & 0 & 1 & 2\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

依此类推,不断对状态矩阵和拆卸算子矩阵进行运算,在有多多个约束数量相同的情况下,进一

步计算向位妨碍的长度,依次对产品零部件进行拆卸。最终拆卸完成的标志是 $\mathbf{M}(t_7)$ 、 \mathbf{D}_7 都为全零矩阵。此时可得到拆卸序列为:3-7-5-4-6-2-1。另外,如果在拆卸过程中需要进行多目标拆卸,这时候只需设定一个向位妨碍比较阈值,满足要求的零部件即可同时拆卸。

5 结论

- (1) 针对拆卸约束的描述与量化问题,提出了一种三维向位妨碍的概念与计算方法,并在此基础上构建了一种基于三维向位妨碍的约束状态图模型,以便拆卸决策中更合理、有效地对拆卸约束进行形式化、模型化和定量化描述与计算。
- (2) 在向位妨碍约束图模型基础上,构建了相应的状态矩阵和拆卸算子,一方面可分步描述产品的拆卸状态,另一方面将拆卸行为描述为拆卸算子与状态矩阵的迭代运算过程。
- (3) 在状态矩阵、拆卸算子、拆卸规则构建基础上,给出了一种产品拆卸序列自动迭代的运算方法,对于产品零部件复杂情况可借助计算机辅助实现产品拆卸序列规划。

参考文献:

[1] 张秀芬,胡志勇,蔚刚,等. 基于联接元的复杂产品拆卸模型构建方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 122-130.
ZHANG Xiufen, HU Zhiyong, YU Gang, et al. Disassembly Modeling Method for Complex Products Based on Connector Structure Units[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 122-130.

[2] TAN Yi, SONG Yongze, WANG Xiangyu, et al. A BIM-based Framework for Lifting Planning in Top-sides Disassembly of Offshore Oil and Gas Platforms [J]. Automation in Construction, 2017, 79: 19-30.

[3] 汪开普,张则强,邹宾森,等. 模糊作业时间的拆卸线平衡 Pareto 多目标优化[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(1): 256-263.
WANG Kaipu, ZHANG Zeqiang, ZOU Binsen, et al. Pareto Optimization for Multi-objective Disassembly Line Balancing with Fuzzy Operation Times [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(1): 256-263.

[4] JIAO Qinglong, XU Da. A Discrete Bat Algorithm for Disassembly Sequence Planning[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2018, 2(23): 276-285.

[5] 宋守许,胡迪,高洋,等. 基于约束满足问题的产品拆卸序列规划[J]. 中国机械工程, 2010, 21(17):

- 2058-2062.
- SONG Shouxu, HU Di, GAO Yang, et al. Product Disassembly Sequence Planning Based on Constraint Satisfaction Problems[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17): 2058-2062.
- [6] LI B, DING L, RAJAI M, et al. Backtracking Algorithm-based Disassembly Sequence Planning[J]. Procedia CIRP, 2018, 69: 932-937.
- [7] REN Yaping, ZHANG Chaoyong, ZHAO Fu, et al. An Asynchronous Parallel Disassembly Planning Based on Genetic Algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 647-660.
- [8] 王淑旺, 刘志峰, 胡迪, 等. 基于不确定规划的产品拆卸序列规划[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2143-2148.
- WANG Shuwang, LIU Zhifeng, HU Di, et al. Product Disassembly Sequence Planning Based on Uncertain Programming[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(18): 2143-2148.
- [9] ZHENG Z, XU W, ZHOU Z, et al. Dynamic Modeling of Manufacturing Capability for Robotic Disassembly in Remanufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 15-25.
- [10] ZHANG Z F, FENG Y X, TAN J R, et al. A Novel Approach for Parallel Disassembly Design Based on a Hybrid Fuzzy-time Model[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16(9): 724-736.
- [11] MITROUCHEV P, WANG C G, LU L X, et al. Selective Disassembly Sequence Generation Based on Lowest Level Disassembly Graph Method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1/4): 141-159.
- [12] 宋小文, 潘兴兴, 冯坤, 等. 面向零件不可拆的复杂产品拆卸序列规划[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1249-1255.
- SONG Xiaowen, PAN Xingxing, FENG Kun, et al. Complex Product Disassembly Sequence Planning Oriented to Defective Parts[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1249-1255.
- [13] KANG K W, DOH H H, PARK J H, et al. Disassembly Leveling and Lot Sizing for Multiple Product Types: a Basic Model and Its Extension[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82: 1463-1473.
- [14] 李方义, 李剑峰, 李建志, 等. 面向目标拆卸的产品复合有向图建模[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 553-558.
- LI Fangyi, LI Jianfeng, LI Jianzhi, et al. A Product Selective Disassembly Modle Based on Hybrid Directed Graph[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(5): 553-558.
- [15] 江吉彬, 刘志峰, 刘光复. 基于层次网络图模型的可拆卸性设计[J]. 中国机械工程, 2003, 14(21): 70-73.
- JIANG Jibin, LIU Zhifeng, LIU Guangfu. Detachable Design Based on Hierarchical Network Graph Model[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2003, 14(21): 70-73.
- [16] ZHANG Z F, FENG Y X, TAN J R, et al. A Novel Approach for Parallel Disassembly Design Based on a Hybrid Fuzzy-time Model[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16(9): 724-736.
- [17] 李世停, 朱波, 蔡琦, 等. 基于机械设备零件约束关系的 Petri 网拆卸过程模型研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19): 2302-2305.
- LI Shiting, ZHU Bo, CAI Qi, et al. Research on Petri Net Disassembly Process Model Based on Constraint Relationship of Parts for Mechanical Equipment [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(19): 2302-2305.
- [18] ZHU Bicheng, SARIGECILI M I, ROY U. Disassembly Information Model Incorporating Dynamic Capabilities for Disassembly Sequence Generation[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2013, 29: 396-409.
- [19] 邹宾森, 张则强, 李六柯, 等. 双边拆卸线平衡问题建模与优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9): 1-8.
- ZOU Binsen, ZHANG Zeqiang, LI Liuke, et al. Modeling and Optimization for Two-sided Disassembly Line Balancing Problems[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(9): 1-8.
- [20] 张雷, 彭宏伟, 卞本阳, 等. 复杂产品并行拆解建模及规划方法研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(7): 937-943.
- ZANG Lei, PENG Hongwei, BIAN Benyang, et al. Parallel Disassembly Modeling and Planning Method of Complex Products[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(7): 937-943.
- [21] 王光斗, 王春福. 机床夹具设计手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- WANG Guangdou, WANG Chunfu. Machine Tool Fixture Design Manual[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2000.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 陈 建, 男, 1975 年生, 副研究员、博士。研究方向为绿色设计、数字化设计与制造等。获中国机械工业科学技术奖二等奖 1 项, 省科学技术奖三等奖 1 项, 发表论文 20 余篇。E-mail: chenjian@zjut.edu.cn。