

部分破坏拆卸模式下拆卸规划

陈旭玲 楼佩煌

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:为了对产品进行拆卸规划, 基于装配有向图提出一种部分破坏性模式下的拆卸规划方法。通过装配有向图表达产品零部件间的装配关系, 并在此基础上构建装配关系矩阵、装配连接矩阵和可达矩阵。由矩阵遍历和运算获得产品装配结构、装配深度等信息, 并根据这些信息确定被破坏对象, 最终完成部分破坏性拆卸模式下拆卸规划过程。将上述理论应用于摩擦驱动装置拆卸规划中, 其结果验证了理论分析的有效性和正确性。

关键词:部分破坏性拆卸; 装配有向图; 拆卸规划

中图分类号: TH122 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2014)06-0945-06

Product Disassembly Sequence Planning Based on Partial Destruction Mode

Chen Xuling, Lou Peihuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A method for product disassembly sequence planning is proposed under a partial destruction mode based on partial destruction. Directed graph of assembly is used to show the relationships among the parts and the connecting pieces of products. Based on the directed graph of assembly, the relationship matrix, connecting matrix and reach ability matrix are defined. By iterating and calculating on these matrixes, the assembly structure and the assembly depth are obtained, which are used to determine the destructed objects, thus completing the disassembly sequence planning in partial destruction mode. Finally, the proposed method is verified by an example of the friction driven device. The result of sequence planning illustrates that the method is feasible and effective.

Key words: partial destruction mode; directed graph of assembly; disassembly sequence planning

在生成产品拆卸序列过程中经常采用图论模型^[1], 然而这些模型大多针对常规拆卸并不适用于部分破坏性拆卸模式。在某些情况下部分破坏性拆卸比常规拆卸更加具有可行性和易操作性。通常采用的图论模型并不适用于部分破坏性拆卸模式, 并且图论在应用于复杂产品的拆卸序列规划时, 存在信息模型过大、计算复杂、容易产生组合爆炸等问题^[2]。

目前国内外在拆卸理论方面的研究主要集中在针对常规拆卸模式下拆卸模型建立, 主要方法有通过产品装配图所表现的零部件约束关系构建拆卸分析模型^[3], 或者根据产品几何信息提取拆卸逻辑图^[4], 或者基于零部件与紧固件之间关系生成拆卸图谱^[5]。

国内外许多学者针对部分破坏性拆卸过程进行了相关研究工作。例如针对拆卸特性进行研究

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61105114)资助项目; 南京航空航天大学国家自然科学基金培养基金(XNA12066)资助项目。

收稿日期:2012-11-14; **修订日期:**2013-07-01

通信作者:陈旭玲, 女, 讲师, E-mail: Chanxuling@nuaa.edu.cn。

后提出有效降低破坏性拆卸中拆卸成本的拆卸程序规划方法^[6],结合 Petri 网和 AND/OR 图研究破坏性拆卸模式下最优拆卸序列生成算法^[7],以及通过切割解决零部件间不可拆卸问题,并基于此提出了适应多种拆卸对象的柔性模型系统,以生成灵活多变切割方案^[8]。上述解决方案主要考虑破坏性拆卸模式,因此所采用的图论、序列规划等均针对破坏性拆卸而言,不能完全适用于部分破坏性拆卸模式。国内有学者针对部分破坏模式研究产品拆卸序列规划问题,主要研究部分破坏模式下拆卸经济性和拆卸序列规划^[9]。采用拆卸无向图对产品进行建模分析,无向图对拆卸关系的表达比较简洁,但不能清晰显示零部件间的层次关系,故而对于后续的拆卸序列规划分析具有一定的影响。

为解决上述问题,本文针对部分破坏拆卸模式的特点提出根据拆卸有向图进行拆卸规划方法。

1 装配关系和装配关系矩阵

1.1 部分破坏性拆卸过程

图1给出部分破坏性拆卸过程,其中零部件A,B,C,D,F均为不可拆卸件。如果采用非破坏性拆卸方式,拆卸序列为路线①:A→B→C→D→E→F。假如零部件E属于可被破坏的联接件或者低价值零部件,则破坏零部件F后拆卸序列变为路线②:A→E→F。这样通过破坏产品中部分零部件可以缩短拆卸序列,从而节省拆卸时间和拆卸成本。

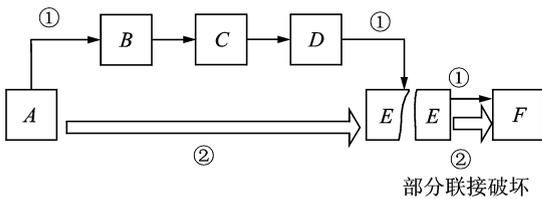


图1 部分破坏性拆卸

Fig.1 Partial destruction mode

1.2 装配关系

为了规范装配关系矩阵,对于装配关系做如下规定:

(1)当用联接件连接零部件时,零部件为基础件,联接件为装配件,装配关系顺序关系为联接件装配到零部件上。

(2)当两个零部件通过形位配合相连接时,起主导作用零部件为基础件,剩下零部件则为装配件,装配关系顺序关系为装配件装配到基础件上。

(3)当两个零部件以相互作用方式进行装配时,任选其中一零部件作为基础件,剩下的零部件则为装配件,装配关系顺序关系为装配件装配到基础件上。

(4)装配关系只存在不同零部件或联接件之间。

(5)A 零部件(或联接件)对 B 零部件(或联接件)的反向装配关系可表示 B 零部件(或联接件)对 A 零部件(或联接件)装配关系。

1.3 装配关系矩阵

用矩阵 N 表示装配关系, p_1, p_2, \dots, p_n 表示组成产品各零部件编号, c_1, c_2, \dots, c_m 表示组成产品各联接件的编号。零部件与联接件之间装配关系用 $\pm n_{ij}$ 来表示,其中 $+n_{ij}$ 表示符合装配关系中顺序关系, $-n_{ij}$ 表示不符合装配关系中顺序装配关系。 n_{ij} 具体值如表1所示。

表1 装配关系值

Tab.1 Value of assembly

装配关系	值	装配关系	值
螺纹	±1	过盈	±7
键	±2	焊接	±8
销	±3	粘合	±9
形状	±4	限位	±10
铆接	±5	卡扣	±11
伸张	±6		

按照上述要求构建装配关系矩阵 N 如表2所示。

表2 装配关系矩阵

Tab.2 Matrix of assembly

	p_1	p_2	...	p_n	c_1	...	c_m
p_1		n_{12}	...	n_{1n}	$n_{1(n+1)}$...	$n_{1(n+m)}$
p_2			...	n_{2n}	$n_{2(n+1)}$...	$n_{2(n+m)}$
⋮				⋮	⋮	⋮	⋮
p_n					$n_{p(n+1)}$...	$n_{p(n+m)}$
c_1						...	$n_{(p+1)(n+m)}$
⋮							⋮
c_m							

2 装配有向图与装配连接矩阵

2.1 装配有向图

本文定义装配有向图 $G = \{ P, C, A \}$ 来表示产品零部件之间装配关系。

定义 在装配有向图 G 中, $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ 为零部件集合,其中 n 表示产品中零部件个数; $C = \{ c_1, c_2, \dots, c_m \}$ 为联接件集合,其中 m 表示联接件个数; $A = \{ \langle p_i, p_j \rangle \text{ 或 } \langle p_i, c_j \rangle \mid p_i, p_j$

$\in P, c_j \in C\}$ 表示产品中各零部件、联接件间连接值,其值为 0 表示无装配关系,其值为 1 表示有装配关系。

根据以上定义,图 2 给出装配有向图的示例,若 $\langle p_i, p_j \rangle \in A$,则在方形节点间存在一条有向线段,装配顺序关系为装配件 p_j 装配到基础件 p_i 上。若 $\langle p_i, c_j \rangle \in A$,则在方形节点和圆形节点间存在一条从 c_j 指向 p_i 的有向线段,装配顺序关系为联接件 c_j 装配到基础件 p_i 上。

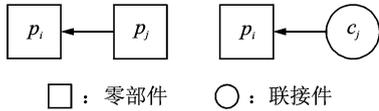


图 2 装配有向图

Fig. 2 Directed graph of assembly

2.2 装配连接矩阵

根据装配有向图定义可得到装配连接矩阵 A ,其中元素 a_{ij} 内容如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{存在顺序装配连接关系} \\ 0 & \text{不存在顺序装配连接关系} \end{cases}$$

从上述描述中可知装配连接矩阵 A 为方阵。设某产品装配有向图绘制结果如图 3 所示,与图 3 所对应装配连接矩阵如表 3 所示。

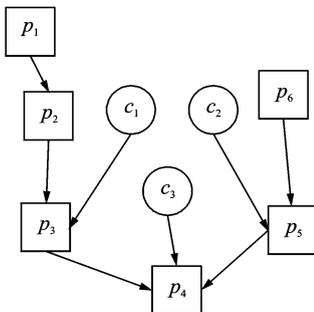


图 3 装配有向图示例

Fig. 3 Case of assembly digraph

表 3 装配连接矩阵

Tab. 3 Matrix of assembly connection

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	c_1	c_2	c_3
p_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
p_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
p_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p_6	0	0	0	0	1	0	0	0	0
c_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c_2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
c_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0

2.3 装配连接树

可以根据装配连接矩阵 A 构建装配连接树,其过程如下:

步骤 1 以行元素为单位遍历装配连接矩阵 A ,若 $\sum_{j=1}^{n+m} a_{ij} = 0$,则与其相对应行元素 p_i 为根节点。

根据装配关系定义可知联接件不能为根节点。

步骤 2 以列元素为单位遍历装配连接矩阵 A ,若 $\sum_{i=1}^{n+m} a_{ij} = 0$,则与其相对应列元素 p_i (或 c_i) 为叶节点。

步骤 3 既不满足第 1 条也不满足第 2 条的元素为装配连接树中间节点。

步骤 4 从根节点出发,根据装配连接矩阵向上寻找连接节点,直到所有分支均到达叶节点。

3 前因集和后因集

3.1 可达矩阵

定义 对于装配有向图 $G = \{P, C, A\}$, $p_i, p_j \in P, c_k \in C$,如果任意 p_i, p_j, c_k 之间存在相连接通路,则称通路所连接两个元素可达。

根据文献[10],用可达矩阵 R 表示产品各个零部件之间相互连接关系,设 R 为 $n \times n$ 方阵,其中元素满足以下条件

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{可达} \\ 0 & \text{不可达} \end{cases}$$

根据装配连接矩阵计算可达矩阵过程如式(1)所示

$$R = \bigcup_{l=0}^{n-1} A^l = (A \cup I)^{n-1} = (A \cup I)^n \quad (1)$$

式中: I 为单位矩阵, n 为矩阵 R 的维数。

本文采用可达步数来表示两个节点间远近程度,在装配有向图中,通过装配顺序关系的个数称为节点间可达步数。

由于可达步数通常情况下不会达到矩阵 A 维数 n ,在实际应用中本文采用如式(2)所示计算方法获得可达矩阵

$$\begin{cases} A_1 = A \\ A_2 = A^2 \\ \vdots \\ A_{r-1} = A^{r-1} \\ A_r = A^r \\ \text{当 } A_r = 0 \text{ 时} \\ \text{则 } R = A_{r-1} + A_{r-2} + \dots + A_1, \text{ 其中 } r \leq n-1 \end{cases} \quad (2)$$

根据可达矩阵定义,表3所示装配连接矩阵 A 可达矩阵如表4所示。

表4 可达矩阵示例

Tab. 4 Case of achievable matrix

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	c_1	c_2	c_3
p_1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
p_2	0	0	1	1	0	0	0	0	0
p_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p_6	0	0	0	1	1	0	0	0	0
c_1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
c_2	0	0	0	1	1	0	0	0	0
c_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0

零部件和联接件对于自身而言是 n 步可达,但是在实际操作中这种可达性没有应用价值,故本文不考虑对于自身可达性与可达步数计算,即可达矩阵 R 对角线元素全为 0 元素。

3.2 前因集与后因集

对于有向图 $G = \{P, C, A\}$ 满足式(3)的元素组成集合称为 p_i 前因集。

$$F(p_j) = \{p_i \in P \mid r_{ij} = 1\} \quad (3)$$

对于有向图 $G = \{P, C, A\}$ 满足式(4)的元素组成集合称为 p_i (或 c_m) 后因集。

$$B(p_i) = \{p_j \in P \mid r_{ij} = 1\}$$

$$B(c_m) = \{c_n \in C \mid r_{mn} = 1\} \quad (4)$$

前因集表示所有可以到达 p_j 的元素集合,在可达矩阵中列元素 p_j 对应矩阵元素为 1 的所有行元素组成集合。

后因集表示 p_i (或 c_m) 可以到达的所有元素集合,在可达矩阵中行元素 p_i (或 c_m) 对应矩阵元素为 1 的所有列元素组成集合。

3.3 装配层级与装配深度

对于装配连接矩阵,满足式(5)的 r 称为装配连接最大层级数。

$$\begin{cases} A_1 = A, \\ A_2 = A^2 \neq 0 \\ \vdots \\ A_{r-1} = A^{r-1} \neq 0 \\ A_r = A^r = 0 \quad r \leq n-1 \end{cases} \quad (5)$$

图4给出与图3装配有向图相对应装配层级示例,其装配最大层级数为 4。

结合装配连接矩阵 A 和可达矩阵 R 计算装配

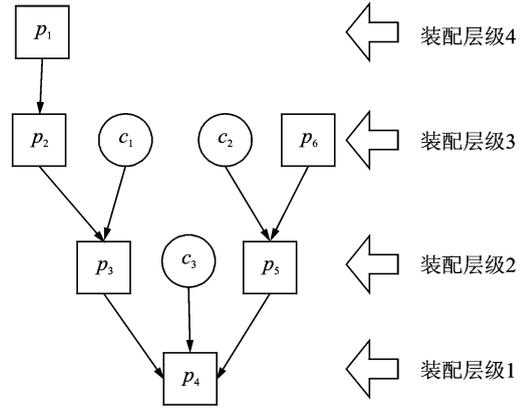


图4 装配层级示例

Fig. 4 Hierarchy of assembly

层级步骤如下：

步骤 1 根据可达矩阵 R 寻找装配层级为 1 的根节点集合 L_1 , 集合 L_1 定义如下

$$L_1(p_i) = \{p_i \in P \mid r_{ij} = 0\}$$

步骤 2 根据装配连接矩阵 A 寻找装配层级为 2 的节点集合 L_2 , 集合 L_2 定义如下

$$L_2(p_i, c_m) = \{(p_i \in P) \wedge (p_j \in L_1), \text{或} (c_m \in C) \wedge (p_j \in L_1) \mid a_{ij} = 1, \text{或} a_{mj} = 1\}$$

...

步骤 r 根据装配连接矩阵 A 寻找装配层级为 r 的节点集合 L_r , 集合 L_r 定义如下

$$L_r(p_i, c_m) = \{(p_i \in P) \wedge (p_j \in L_{r-1}), \text{或} (c_m \in C) \wedge (p_j \in L_{r-1}) \mid a_{ij} = 1, \text{或} a_{mj} = 1\}$$

步骤 $r+1$ 当 L_r 为空集时停止运算, r 为装配连接中最大层级数。

3.4 部分破坏性拆卸优化

本文将根据以下 2 条优化准则对部分破坏性拆卸模式下产生的拆卸序列进行优化选择。

优化准则 1 拆卸序列中联接件(或零部件)装配深度较深,在采取破坏该联接件(或零部件)方式进行拆卸后,能有效降低装配深度。

优化准则 2 拆卸序列中联接件(或零部件)后因集存在多个前因集,在采取破坏该联接件(或零部件)方式进行拆卸后,能有效分离复杂部件。

3.5 部分破坏性拆卸

在部分破坏性拆卸模式下主要是对联接件进行破坏操作,设用 D 表示所有联接件集合,则集合 D 定义如式(6)所示。

$$D = \{c_i(k, p_m, p_n, n_{mn}) \mid k \in L_k(p_m, c_i),$$

$$\begin{aligned}
 & p_m \in B(c_i) \wedge a_{im} = 1 \wedge a_{im} \in \mathbf{A}, \\
 & p_n \in F(c_i) \wedge a_{in} = 1 \wedge a_{in} \in \mathbf{A}, \quad (6) \\
 & n_{mn} \in \mathbf{N}
 \end{aligned}$$

在联接件集合 D 中重点考虑两种联接件,第一种是装配层级数值较大的联接件,第二种是后因集存在多个前因集的联接件。

根据上述规则,图 5 给出图 3 所示装配有向图

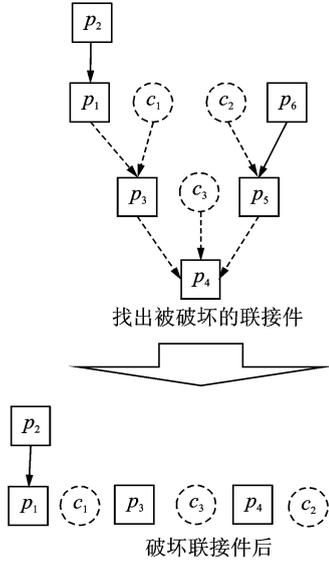


图 5 部分破坏拆卸示例

Fig. 5 Case of partial destruction disassembly

进行部分破坏性拆卸结果。从图中可以看出, c_1 和 c_2 装配层级数较大,而 c_3 后因集 p_4 有两个前因集 p_3 和 p_5 ,对 c_1, c_2 和 c_3 进行破坏后整个产品的拆卸难度明显降低。

4 应用

为验证本文提出基于拆卸有向图的拆卸规划理论,本文将针对摩擦驱动装置进行部分破坏拆卸模式拆卸规划。图 6 给出摩擦驱动装置装配简图,在工厂技术改造过程中需要对这种摩擦驱动装置进行拆除并在拆除的基础上回收有用部件。本文将采用部分破坏拆卸模式对其进行分析后给出拆卸规划建议。

为了方便运算,表 5 给出了摩擦驱动装置中零部件和联接件编号。

表 5 摩擦驱动装置零部件编号

Tab. 5 Parts number of friction driven

主动臂	从动臂	主动轮	从动轮	安装台	弹簧	调节轴
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
螺栓 1	螺栓 2	螺栓 3	螺栓 4	螺栓 5	焊接	
c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	

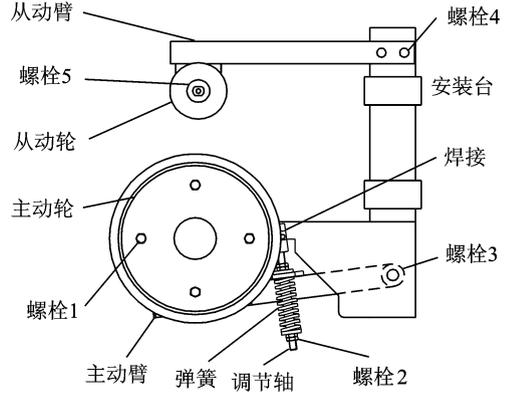


图 6 摩擦驱动装置装配图

Fig. 6 Assembly drawing of friction driven

根据以上零部件编号,由摩擦驱动装置零部件间装配关系值获得其装配关系矩阵。

根据装配关系得到摩擦驱动装置的装配连接矩阵,如表 6 所示。图 7 给出了根据装配连接矩阵及前因集、后因集构建的装配连接树,从图中可以看出摩擦驱动装置分为 3 个装配层级,最大装配深度为 3 级,根节点为安装台。

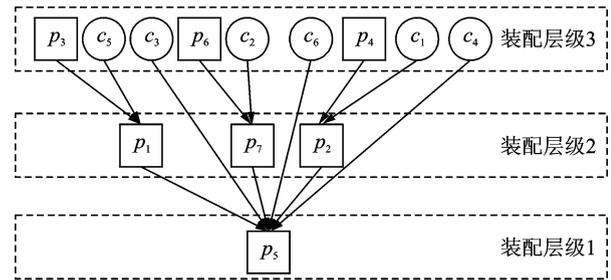


图 7 摩擦驱动装置装配连接树

Fig. 7 Assembly connection tree of friction driven

表 6 摩擦驱动装置装配连接矩阵

Tab. 6 Assembly connection matrix of friction driven

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
p_1					1								
p_2					1								
p_3	1												
p_4		1											
p_5													
p_6										1			
p_7					1								
c_1		1											
c_2								1					
c_3					1								
c_4					1								
c_5	1												
c_6										1			

根据被破坏联接件相关规则,选择对 c_3 、 c_4 和 c_6 进行破坏性拆卸,部分破坏后拆卸结果如图 8 所示。从拆卸结果可以看出对部分联接件进行破坏后有利于简化拆卸过程。

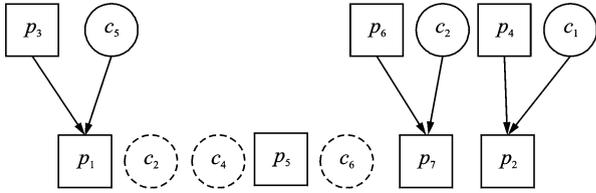


图 8 摩擦驱动装置部分破坏性拆卸结果

Fig. 8 Result of partial destruction disassembly

5 结 论

针对联接件可被破坏的拆卸场合,本文提出一种适用于部分破坏性拆卸情况下拆卸模式,该拆卸模式具有如下特点:

(1)部分破坏性拆卸模式基于部分联接件可被破坏原则提出一种有利于快速拆卸的规划方案。

(2)提出装配有向图概念用以表达产品零部件之间装配关系,并基于装配有向图构建装配关系矩阵、装配连接矩阵和可达矩阵。

(3)对装配关系矩阵、装配连接矩阵和可达矩阵的运算获得产品装配层级、装配深度,同时获得每个零部件前因集和后因集,并根据这些信息判断可被破坏联接件,最终完成部分破坏性拆卸模式下拆卸规划过程。

(4)将上述理论应用于摩擦驱动装置拆卸规划中,基于拆卸有向图对摩擦驱动装置进行分析,最终获得对联接件破坏后拆卸规划结果,并验证了理论的有效性。

参考文献:

[1] Li J R, Khoo L P, Tor S B. Generation of possible multiple components disassembly sequence for maintenance using a disassembly constraint graph [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 102(1):51-65.

[2] Gonzalez B, Adenso-Diza B. A scatter search approach to the optimum disassembly sequence [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(6): 1776-1793.

[3] Torres F, Puente S T, Aracil R. Disassembly planning based on precedence relations among assemblies [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(5):317-327.

[4] Lambert A J D, Surendra M G. Methods for optimum and near optimum disassembly sequencing [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(11):2845-2865.

[5] Cappelli F, Delogu M, Pierini M, et al. Design for disassembly: A methodology for identifying the optimal disassembly sequence [J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(6):563-575.

[6] Kyung G P, Soodhi R. Destructive disassembly of bolts and screws by impact fracture [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2002, 21(4):316-325.

[7] Dong J, Gibson P, Arndt G. Disassembly sequence generation in recycling based on parts accessibility and end-of-life strategy [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(6):1079-1085.

[8] Bailey-Van K M. Flexible robotic demanufacturing using real time tool path generation [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(1): 17-24.

[9] 宋小文,潘兴兴.部分破坏模式下的机电产品拆卸序列规划[J].计算机集成制造系统,2012,1(5):927-931.
Song Xiaowen, Pan Xingxing. Electromechanical product disassembly sequence planning based on partial destruction mode [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5):927-931.

[10] 张雷,刘志峰,杨明,等.基于解释结构模型的产品零部件拆卸序列规划[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(4):667-675.
Zhang Lei, Liu Zhifeng, Yang Ming, et al. Disassembly sequence planning based on interpretative structural model [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(4):667-675.