

一种新的装配序列规划方法研究

赵姗姗, 李宗斌

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在新的装配序列规划方法中,采用多色集合建立了装配信息模型,把装配约束关系分为定位关系、阻碍拆卸关系和联接关系,建立了装配约束关系方程——定位方程、阻碍拆卸方程和联接关系方程,用数学方程表示零件的装配约束条件,同时提出了求取零件装配序列的算法.与传统的装配序列规划方法相比,基于多色集合理论的装配序列规划方法通过装配约束关系方程,提前排除了不合理的装配序列,因此避免了由约束信息膨胀产生的组合爆炸.

关键词: 装配序列规划;多色集合;定位方程;阻碍拆卸方程;联接关系方程

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0580-05

New Assembly Sequence Planning Method

Zhao Shanshan, Li Zongbin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The assembly sequence planning method is presented, where the assembly information model is established with the polychromatic sets, and the assembly constraints relations are divided into three kinds, locating relation, obstructing-disassembly relation, and junction relation, to form an assembly-constraints-relation matrix, and to present assembly planning sequences generation algorithm. Compared with the conventional methods, assembly planning sequence based on polychromatic sets excludes the unreasonable assembly sequences in advance to avoid the exponential explosion due to the expansion of constrain relation.

Keywords: assembly sequence plan; polychromatic set; locating equation; obstructing disassembly equation; jointing equation

装配序列的自动生成是计算机辅助装配工艺规划的关键环节,现有的方法大部分强调装配零件的几何可行性以及装配的方向性,计算复杂,缺少便于计算机识别和提取的装配信息模型,不能充分应用零部件之间的联系来计算装配序列.本文在文献[1]的基础上,沿用了 Homem De Mello 和 Sanderson 的思想,把拆卸和装配过程看作逆过程,利用拆卸过程推导装配过程,提出了一种新的基于多色集合的装配序列规划算法(PSAPS).首先,建立装配信息矩阵和装配关系模型,提取装配体的各个零件的定位关系方程、阻碍拆卸方程和联接关系方程,并对装配体进行多级装配分析,最后获得所有可行的装配

序列.

1 装配关系模型的建立

装配关系模型是装配序列规划的基础,本文提出的装配关系模型包括装配信息模型和装配约束关系模型.装配信息模型描述了与装配紧密相关的零件信息,装配约束关系模型给出了零件之间的定位关系、干涉和联接关系.

1.1 装配信息模型

装配信息建模是装配顺序规划的第1个步骤,装配信息主要包括零件级特征信息和关联级特征^[2]信息(简称零件级特征和并联级特征).本文应用多

色集合理论^[3]将零件级特征和关联级特征集成到一个模型中,转化成简单的布尔矩阵,具体建模过程分为如下2个步骤。

(1)提取与装配要求相关零件之间的联接关系和配合关系。

(2)采用多色集合建立装配信息模型,将产品 A 的各个装配零部件视作多色集合的基本元素 a_i ,零件装配信息视为多色集合的个人颜色 $F(a)$,在多色集合模型中,将作为基本元素的各个零件看作行,零件级特征和关联级特征看作列,建立产品装配信息矩阵。如果 $a_i \in A$ 具有性质 $F(a_i) \in F_j(a)$,那么矩阵元素 $c_{i(j)} = 1$,在产品装配信息矩阵中用 $\bullet$ 表示;反之,矩阵元素 $c_{i(j)} = 0$ 。

以减速器的输出轴为例(见图1),建立装配信息模型。输出轴的装配信息分为两类:一类是零件结构信息,由 $F_1 \sim F_3$ 组成;另一类是零件配合信息,由 $F_4 \sim F_6$ 组成。采用多色集合建立装配信息布尔矩阵,令输出轴为装配体 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n\}$,其中 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示构成输出轴的各零件,将零件结构信息和零件配合信息看作 $F(a_i)$,而所有元素的个人颜色为

$$F(a) = \bigcup_{i=1}^n F(a_i)$$

当 $a_i \in A, F_j(a_i) \in F(a)$ 时, $c_{i(j)} = 1$,在图2中用 $\bullet$ 表示。反之 $c_{i(j)} = 0$ 。

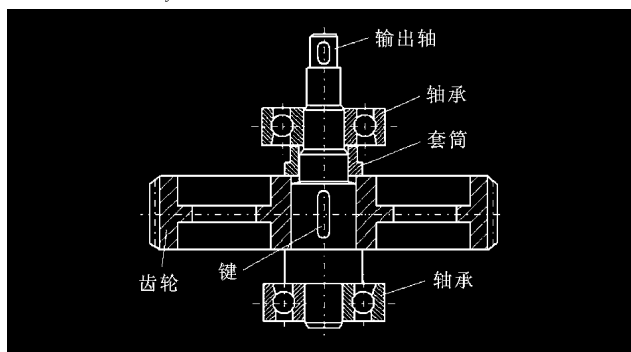


图1 减速器输出轴部件

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
a_1	$\bullet$			$\bullet$		$\bullet$
a_2	$\bullet$					$\bullet$
a_3	$\bullet$					$\bullet$
a_4	$\bullet$			$\bullet$		
a_5	$\bullet$					$\bullet$
a_6	$\bullet$			$\bullet$		

a_1 :轴; a_2 :齿轮; a_3 :键; a_4 :轴承; a_5 :套筒; a_6 :轴承; F_1 :普通零件; F_2 :带螺纹零件; F_3 :联接杆; F_4 :过盈配合; F_5 :过渡配合; F_6 :间隙配合

图2 多色集合的输出轴装配信息模型

1.2 装配约束关系模型

装配约束关系是生成装配序列的关键环节,2个相互配合或者接触的零件之间具有约束关系,无配合关系的2个零件之间也可能具有约束关系,如阻碍拆卸关系等。通常在装配零件时,需要考虑零件定位方式以及阻碍该零件装配的其他零件。因此,文中的装配约束关系主要包括定位关系、阻碍拆卸关系和联接关系。

1.2.1 定位关系方程 零件在装配设计时首先需要定位,在装配时,零件通过与其他零件保持接触或配合来满足定位要求并保持状态不变。当零件不依靠装配体中的其他零件、而通过外界因素(a_0)来满足定位要求时,该零件被称为自定位零件。对于一个零件,如果存在一组与它相关的其他零件能实现此零件定位,那么由这组相关的零件按照一定的逻辑关系所组成的逻辑方程就是此零件的定位关系方程^[4-5]

$$B(a_i) = b(a_j) \wedge (\vee) b(a_l) \wedge (\vee) \dots \wedge (\vee) b(a_m) \quad (1)$$

式中: $b(a_l)$ 表示零件 a_l 在 a_i 定位过程中的逻辑值。如果 a_l 先于 a_i 定位,则 $b(a_l)$ 为1,否则为0。由零件之间的关系确定式(1)中 $b(a_l), \dots, b(a_m)$ 间的与或关系,从而求出 $B(a_i)$ 。

由式(1)的值可以确定零件的定位是否被保证,例如 a_i 的定位状态由它的定位关系方程 $B(a_i)$ 确定,如果 a_i 达到定位要求,则 $B(a_i) = 1$,反之 $B(a_i) = 0$ 。

1.2.2 阻碍拆卸(干涉)方程 通常情况下拆卸和装配是可逆过程,文中采用阻碍拆卸方程来代替阻碍装配方程,用于描述零件在拆卸过程中被其他零件干涉的情况。把阻挡该零件拆卸的零件组按照一定的逻辑关系组成的逻辑方程称为此零件的阻碍拆卸方程

$$W(a_i) = w(a_j) \wedge (\vee) w(a_l) \wedge (\vee) \dots \wedge (\vee) w(a_m) \quad (2)$$

式中: $w(a_l)$ 表示零件 a_l 在 a_i 拆卸过程中的逻辑值。如果 a_l 先于 a_i 装配,则 $w(a_l)$ 为1,否则为0。由零件之间的关系确定式(1)中 $w(a_l), \dots, w(a_m)$ 间的与或关系,从而求出 $W(a_i)$ 。

由式(2)的值可以确定该零件的拆卸通道是否被保证,例如 a_i 拆卸的干涉状态由它的阻碍拆卸关系方程 $W(a_i)$ 确定,如果 $W(a_i) = 1$,则表示 a_i 的拆卸通道被阻碍,反之若 $W(a_i) = 0$,则 a_i 的拆卸通道未被阻碍。

1.2.3 联接关系方程 由于联接件和紧固件多为标准件,且本身并不参与产品的装配序列问题,因此很多装配规划的算法研究都忽略了联接件对装配过程的影响^[6].但是,联接关系对序列生成中零件之间的局部和全局几何的可装配性,以及子装配体的稳定性十分关键.大部分产品都包含有螺栓或者螺纹联接结构,本文以螺栓、螺纹联接代表联接关系,建立的联接关系方程为

$$D(a_i) = d(a_j) \wedge (\vee) d(a_l) \wedge (\vee) \cdots \wedge (\vee) d(a_m) \quad (3)$$

式中: $d(a_l)$ 表示零件 a_l 在 a_i 联接过程中的逻辑值.当 a_l 满足式(1)和式(2)时, $d(a_l)$ 为1,否则为0.由零件间的联接关系确定式(3)中 $d(a_l), \dots, d(a_m)$ 间的与或关系,从而求出 $D(a_i)$.如果满足 $D(a_i)=1$,则表示由 a_i 联接的零件满足联接要求,否则表示 a_i 不能满足联接要求.

2 基于多色集合的装配序列生成算法

PSAPS算法按照自定位条件在所有产品零件中选择第1级可行装配零件,根据装配约束关系方程在余下的零件中选择下一级可行的装配零件,直到最后一级装配零件,得出所有可行的装配序列.与以往所研究的算法相比较,本文提出的PSAPS算法主要强调产品的可装配性,将装配约束关系形式化,使得算法简单明了.

定义1 a_0 表示确定装配体零件位置的外界因素, $a_i \{i=1, \dots, n\}$ 表示装配体中的各零件.

定义2 $s_i, i=1, \dots, n$ 表示第 i 级装配零件的可行集,如果装配体中有 n 个零件,则装配可分为 n 级, $s=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 为可行装配序列,是满足定位方程和阻碍拆卸方程的所有可行序列.

定义3 定位关系方程

$$B(a_i) = b(a_j) \wedge (\vee) b(a_l) \wedge (\vee) \cdots \wedge (\vee) b(a_m)$$

$i, j, l, m \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \neq l \neq m$,表示装配体中各零件之间的定位关系.

阻碍拆卸关系方程

$$W(a_i) = w(a_j) \wedge (\vee) w(a_l) \wedge (\vee) \cdots \wedge (\vee) w(a_m)$$

$i, j, l, m \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \neq l \neq m$,表示装配体中各零件拆卸路径限制.

联接关系方程

$$D(a_i) = d(a_j) \wedge (\vee) d(a_l) \wedge (\vee) \cdots \wedge (\vee) d(a_m)$$

$i, j, l, m \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \neq l \neq m$,表示联接体中的联接关系.

PSAPS算法如下.输入: $a_0, a_i (i=1, \dots, n)$,各零件对应 $B(a_i), W(a_i)$ 和 $D(a_i)$;输出:所有可行的零件装配序列;初始化:对于有 N 个零件、 M 个联接件的装配体,根据式(1)~式(3)分别求出 $b(a_i), w(a_i)$ 和 $d(a_i), i=1, \dots, N$ 的值后,再根据输入中的3个方程求解 $B(a_i), W(a_i), D(a_i), i=1, \dots, N$ 的值.

步骤1 根据可自定位条件 a_0 ,来选择可以作为第1级装配的零件集合 s_1 ,使得下式成立

$$s_1 = \{a_i \mid i=1, \dots, n\}$$

其中 a_i 使得

$$B(a_i) = b(a_l) \vee (\wedge) b(a_m), \dots, \vee (\wedge) b(a_0) \\ i \neq l \neq m$$

成立,即 $B(a_i)=1$,并得到第1级装配零件的序列.

步骤2 根据 s_1 求出 s_2 ,具体算法如下

for ($j=1; j \leq N$ and $i \neq j; j++$)

{

if ($B(a_j)=1$ and $W(a_j)=0$)

$s_2 \leftarrow a_j$;

for (temp=0; temp<M; temp++)

{

if ($a_j \in D(a_{\text{temp}}) \cap D(a_{\text{temp}})$)

$s_2 \leftarrow a_{\text{temp}}$;

};

}

依此类推,可以求出第 N 级装配零件的可行集

for ($k=1; k \leq N, k \neq i, j, \dots; k++$)

{

if ($B(a_k)=1$ and $W(a_k)=0$)

$s_n \leftarrow a_k$;

for (temp=0; temp<M; temp++)

{

if ($a_k \in D(a_{\text{temp}}) \cap D(a_{\text{temp}})$)

$s_n \leftarrow a_{\text{temp}}$;

};

}

步骤3 由步骤2得出可行序列集合矩阵

$$\mathbf{M} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

其中 $s_{i|i=1, \dots, n}$ 为步骤2所求零件序列集,所以可以表示为

$$\mathbf{M} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} = \{\{a_i\}^T, \{a_j\}^T, \dots, \{a_k\}^T\} \\ (i, j, k \in [1, \dots, n], i \neq j \neq k)$$

显然, M 为一个 $m \times n$ 维矩阵, 其中 m 为可行序列的数目, 由步骤 2 中具体装配过程满足要求的最小可行集决定. M 的每行元素组成一组可行装配序列, 由此得到所有可行装配序列.

3 实 例

如图 3 所示, 把减速器作为算法的应用实例. 减速器包括 32 个零件, 以及 12 个螺栓和 24 个螺钉. 通气孔盖、油标、堵头以及环首螺钉作为减速器的附件结构, 不会影响整个产品的装配顺序, 因此在计算装配序列时, 不考虑这 4 个零件.

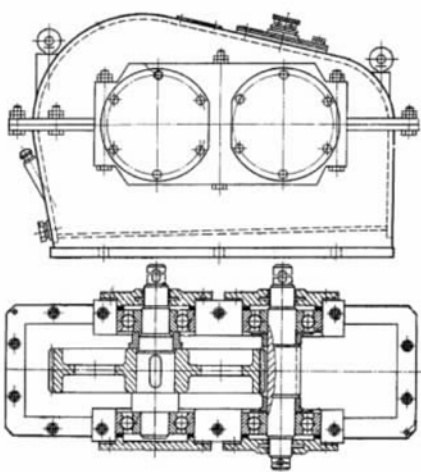


图 3 减速器装配图

为了简化计算过程, 根据文献[7], 将减速器简化为 13 个部件, 即壳体 (S_1)、输入轴部件 (S_2)、输出轴部件 (S_3)、减速器盖 (S_4)、2 个输出轴盖 (S_5, S_8)、2 个输入轴盖 (S_6, S_7)、螺栓结构 (S_9) 和 4 个螺钉组 ($S_{10} \sim S_{13}$).

3.1 建立减速器的装配信息模型

由于螺栓和螺钉是标准件, 因此在零部件的装配信息模型中忽略这个部件. 采用多色集合建立的装配信息模型如图 4 所示.

3.2 建立减速器的定位、阻碍拆卸和联接关系方程

按照图 4 所示的装配信息, 提取减速器的定位方程、阻碍拆卸方程和联接关系方程.

定位方程

$$\begin{aligned} B(S_1) &= S_0; & B(S_2) &= S_1 \\ B(S_3) &= S_1; & B(S_4) &= S_1 \\ B(S_5) &= (S_1 \vee S_4) \wedge S_3 \\ B(S_6) &= (S_1 \vee S_4) \wedge S_2 \\ B(S_7) &= (S_1 \vee S_4) \wedge S_2 \\ B(S_8) &= (S_1 \vee S_4) \wedge S_3 \end{aligned}$$

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
S_1		•			•		•	•
S_2	•				•			
S_3	•				•			
S_4		•			•		•	•
S_5		•					•	
S_6		•					•	
S_7		•					•	
S_8		•					•	

F_7 : 螺栓联接结构; F_8 : 螺栓联接结构

图 4 多色集合减速器的装配信息模型

阻碍拆卸方程

$$\begin{aligned} W(S_1) &= S_5 \vee S_6 \vee S_7 \vee S_8 \vee S_4 \\ W(S_2) &= (S_1 \wedge S_4) \vee S_6 \vee S_7 \\ W(S_3) &= (S_1 \wedge S_4) \vee S_5 \vee S_8 \\ W(S_4) &= S_5 \vee S_6 \vee S_7 \vee S_8 \\ W(S_5) &= 0; & W(S_6) &= 0 \\ W(S_7) &= 0; & W(S_8) &= 0 \end{aligned}$$

联接关系方程

$$\begin{aligned} D(S_9) &= S_1 \wedge S_4 \\ D(S_{10}) &= S_1 \wedge S_4 \wedge S_5 \\ D(S_{11}) &= S_1 \wedge S_4 \wedge S_6 \\ D(S_{12}) &= S_1 \wedge S_4 \wedge S_7 \\ D(S_{13}) &= S_1 \wedge S_4 \wedge S_8 \end{aligned}$$

3.3 计算减速器可行装配序列

采用装配序列求取算法, 得出减速器所有可行的装配序列共 48 种, 图 5 列出了其中的 16 种. 依此类推, 可以计算每个部件的装配顺序.

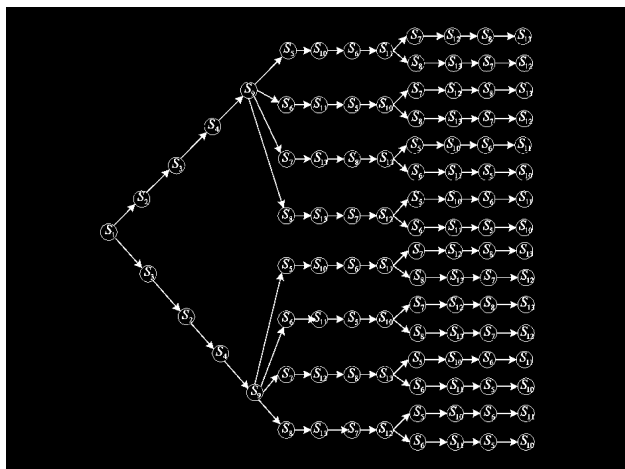


图 5 减速器产品级装配序列(部分)示意图

4 结 论

装配序列的生成是计算机辅助装配的关键技术

之一,国内外的学者已做了很多研究,但主要集中在装配零件的几何描述以及装配方向的算法研究上.本文采用多色集合建立了产品的装配信息模型,把装配特征转换为简单的多色集合矩阵,不仅便于计算机识别和提取,而且建立的产品中各零件的定位方程、阻碍拆卸方程和联接关系方程,是一种新的装配序列的生成算法.本文采用布尔关系,提出的方法简化了整个装配过程,因此降低了计算的复杂性,适用于复杂产品的装配.文中还以减速器为例,验证了本文提出算法的正确性及有效性.

参考文献:

- [1] van Holland W, Bronsvoort W F. Assembly features in modeling and planning [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2000, 16(4): 277-294.
- [2] 李春书, 彭商贤, 崔根群. 产品装配特征的分类与表达技术的研究[J]. *机械科学与技术*, 2002, 19(5): 770-772.
- Li Chunshu, Peng Shangxian, Cui Genqun. The technique of classification and expression for product's assembly features [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2002, 19(5): 770-772.
- [3] 李宗斌. 先进制造中多色集合理论的研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 12-16.
- [4] 张博, 张洪涛, 赵姗姗, 等. 基于多色集合理论的产品装配规划建模与算法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(11): 1254-1258.
- Zhang Bo, Zhang Hongtao, Zhao Shanshan, et al. Product assembly planning modeling and algorithm based on polychromatic sets [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(11): 1254-1258.
- [5] 赵姗姗, 李宗斌. 汽车车体的无应力分解与装配序列算法的研究[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(15): 1635-1640.
- Zhao Shanshan, Li Zongbin. Non-forced decomposition and assembly sequences algorithm of car body [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(15): 1635-1640.
- [6] 白芳妮, 李磊, 魏生民. 装配序列生成中装配信息的表示方法研究[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(14): 1209-1212.
- Bai Fangni, Li Lei, Wei Shengmin. Research on assembly information representation for assembly sequence generation [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(14): 1209-1212.
- [7] 杨培林, 朱均, 陈晓南. 装配规划中装配体的表达以及子装配体的识别[J]. *西安交通大学学报*, 1999, 33(12): 40-43.
- Yang Peilin, Zhu Jun, Chen Xiaonan. Identification of subassemblies in sequence planning [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(12): 40-43.

(编辑 管咏梅)