

# 机械产品装配序列规划研究

彭琛<sup>1</sup>, 刘克能<sup>2</sup>, 周长省<sup>3</sup>

(1. 南京信息职业技术学院 机电工程系, 江苏 南京 210046;

2. 苏州大学 机电工程系, 江苏 苏州 215021;

3. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**[摘要]** 研究装配序列规划作为装配工艺中的核心内容, 对实现生产自动化有着十分重要的意义, 是目前国内外工艺领域的研究热点. 在比较了各种装配序列规划方法的基础上, 以某实际产品为例, 借助干涉矩阵, 就装配序列的生成展开了讨论. 为防止随着装配单元数量的增加, 产品的装配顺序方案呈指数增加, 从而产生组合爆炸或大量的交互问答, 同时也为了获得行之有效的装配序列, 在已获取的一系列装配序列的基础上, 综合装配约束关系及子装配本的识别对装配序列的获取进行了优化, 生成合理的接近实际的装配序列.

**[关键词]** 装配序列规划, 干涉矩阵, 优化

**[中图分类号]** TP391 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0081-05

## Study on Mechanical Product's Assembly Sequence Planning

PENG Chen<sup>1</sup>, LIU Keneng<sup>2</sup>, ZHOU Changsheng<sup>3</sup>

(1. Department of Electromechanical Engineering, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210046, China;

2. Department of Electromechanical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** With the rapid development of FMS (Flexible Manufacture System), CAX (Computer Aided Design Software) and information technology, the manufacturing of worldwide will be in the automatization epoch. However, the assembly technology has become the weakness of modern manufacturing due to its development lag behind design's development. Therefore, the research of assembly sequence planning is not only the core of assembly process, but also plays an important role in realizing the automatic production and becomes the hotspot in technical study field both home and aboard. Having compared with some kinds of assembly sequence planning methodologies, and take a real product as an example, we discuss how to generate the sequence by interfere matrix. In order to prevent getting too much feasible sequences and the exploding of ask and answer between man and machine while components or parts increasing, we use the restriction information as well as the recognition of subassemblies for further optimization based on the sequences we have obtained. In this way, both the time we spend on getting the sequence and the procedure will be less while the efficiency of generating sequence will be higher.

**Key words:** assembly sequence planning, interfere matrix, optimization

## 0 引言

装配序列是描述产品装配过程的重要信息之一, 是装配工艺规划的核心. 目前, 装配序列规划主要采用手工方法完成, 装配方案的好坏在很大程度上依赖于装配工艺师的相关知识和已有经验. 虽然许多经验丰富的装配工艺师拥有设计给定产品高效装配序列的诀窍, 但是仅仅采用手工方法无法保证每次得到最好的装配序列, 从而造成装配成本和时间的浪费. 因此装配序列规划自动化对于实现装配序列优化和缩短装配序列规划时间具有重要意义, 是目前国内外工艺领域的研究热点<sup>[1]</sup>. 本文将就装配序列的生成及优化展开讨论.

收稿日期: 2005-12-03.

作者简介: 彭琛(1980-), 女, 助教, 主要从事表面组装技术的教学与研究. E-mail: xinfumm@163.com

## 1 装配序列的方法

装配序列规划实质上就是在各种几何约束条件及工艺约束条件的制约下,求解出满足各种约束条件、性能优良的装配序列. 装配序列的规划方法主要有以下几种<sup>[2]</sup>:

(1) 基于装配优先约束关系的装配序列生成方法: 获取优先约束关系并将其显式表达是最直观的装配顺序生成方法. 这种方法的关键是装配优先约束关系的获取. 但这种方法通常采用人机交互式, 工作量大, 对操作人员要求高, 而且容易出错.

(2) 基于组件识别的装配序列求解方法: 根据零件的组件分类, 确定组件, 分层次生成组件的装配顺序, 综合组件的装配顺序, 求得产品的装配序列. 该方法可有效减小装配顺序生成的组合复杂性, 删除装配操作工艺性差但理论上可行的装配序列.

(3) 基于矩阵运算的方法: 装配体中有配合关系的零件之间的联接关系以矩阵记录, 矩阵中的每个元素代表零件的装配关系. 矩阵用线性代数中的有关运算进行变换、规约, 简化了联结关系矩阵对应的装配序列.

(4) 基于知识的求解方法: 该方法采用一阶谓词逻辑来表达产品结构、序列优先约束和装配资源约束等知识. 系统以产品 CAD 模型为输入, 通过人机交互获取零部件的装配优先约束、通过图搜索算法求解产品配合特征图的最小割集来产生装配序列. 该方法对于特定产品的装配序列求解比较有效, 但适用面窄, 且需要较深的专业知识.

(5) 拆卸法求解装配序列的方法: 若零件装配和拆卸互为可逆过程, 则可通过求解零件的拆卸顺序来得到零件的装配顺序. 拆卸法求解装配顺序的优点是: 若判定某零件满足拆卸条件, 则该零件一定满足序列约束. 反之, 装配过程中某一阶段满足装配条件的零件并不一定满足装配序列约束条件, 因为该零件有可能影响到后续零件的装配. 另外, 通过几何计算和推理可从零部件的装配状态演绎出零部件拆卸的初始方向, 而从自由状态的零部件却无法推导出零部件的装配方向.

由此可见, 装配序列生成是一个综合性的问题, 其中不仅涉及到几何的、技术的、机械的问题, 还存在一些模糊经验知识的应用. 因此, 若只从上述的某一方法进行考虑, 一方面可能会随着装配单元数量的增加, 产品的装配顺序方案呈指数增加, 从而产生组合爆炸或大量的交互问答; 另一方面, 由于新产品开发通常是对现有产品进行改进设计的过程, 现有产品的装配顺序是经过实践检验的、行之有效的装配序列, 而目前缺乏对这些装配序列经验进行有效的组织和再利用.

综上所述, 本文将不会囿于某一单一的求解方法来对实际产品进行规划, 而将以拆卸求解法为主要思路, 借助干涉矩阵, 对某机械产品的装配序列进行求解. 在已获取的一系列装配序列的基础上, 综合装配约束关系及子装配本的识别对装配序列的获取进行优化, 生成合理的接近实际的装配序列并减少序列生成的步骤及时间.

## 2 干涉矩阵

从易于装配的观点来看, 无论是对于手工装配还是自动化装配, 装配操作都是越简单越好. 基于这一原则, 将构成装配体的零件之间的约束关系用 3 个矩阵( $A_x, A_y, A_z$ ) 来表示. 若一个装配体由  $n$  个零件构成, 则该矩阵为维数为  $n$  的方阵  $A_p(p = x, y, z)$ .

规定: 当零件  $j$  固定时, 如果零件  $i$  在  $p$  轴正方向上有一条无干涉拆卸路径, 可使零件  $i$  完全拆开, 则  $A_{p[i,j]} = 0$ , 否则  $A_{p[i,j]} = 1$ , 且对所有的  $i, j, A_{p[i,j]} = 0 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ . 该  $n$  阶方阵  $A_p$  称为该装配体的干涉矩阵.

显然对于同一方向上(如  $+x$ ) 的两个零件  $i$  和  $j$ , 若零件  $j$  阻碍了零件  $i$  的完全拆卸, 则必然有在其相反方向上零件  $i$  会阻碍零件  $j$  的完全拆卸, 所以某一坐标轴上的干涉矩阵具有如下性质:

(1) 在干涉矩阵  $A_p(p = x, y, z)$  中, 如果第  $i$  行所有元素均为 0, 则零件  $i$  可从装配体中沿  $+p$  方向拆卸.

(2) 如果第  $j$  列所有元素为 0, 则零件  $j$  可从装配体中沿  $-p$  方向拆卸.

(3) 如果不存在某行或某列元素全为 0, 则该装配体不能沿  $p$  轴方向拆卸.

利用干涉矩阵的性质,可以很容易地得到装配序列的算法:

(1) 从干涉矩阵  $A_x, A_y, A_z$  中随机取一个矩阵  $A_p, p \in (x, y, z)$ .

(2) 检测  $A_p$  是否为 0 矩阵,若是,则转(4),否则继续下一步.

(3) 检测  $A_p$  中第  $i$  行(列)中所有元素是否均为 0,若是,则零件  $i$  可沿  $p$  轴拆卸,将  $i$  推入堆栈  $S$ ,并将  $A_x, A_y, A_z$  中的  $i$  行  $i$  列都去掉,继续(3),若否,则转(1).

(4) 由于堆栈具有先进后出的特点,所以将零件依次出栈即得该装配体的一个装配序列.

下面结合实例,讨论干涉矩阵在装配序列获取方面的应用.

### 3 应用实例

图 1 为某机械产品示意图. 矩阵(1) 是以图示  $Z$  轴正向为拆卸方向的干涉矩阵  $A_{z1}$ . 若  $A_{z1}$  中第  $i$  行全为零,则第  $i$  个零件可沿  $Z$  轴正向拆除,将  $A_{z1}$  中第  $i$  行第  $i$  列划去得到新矩阵  $A'_{z1}$ ,并继续步骤(3);同理,若  $A_{z1}$  中第  $j$  列全为零,则第  $j$  个零件可沿  $Z$  轴负向拆除,仿照前述步骤获取新矩阵.

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

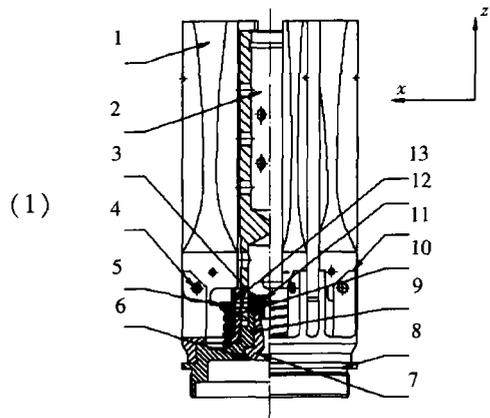


图 1 某机械产品装配示意图

则图 1 所示某机械产品装配体的拆卸顺序为:  $6(-Z) \rightarrow 7(-Z) \rightarrow 8(-Z) \rightarrow 10(-Z) \rightarrow 12(-Z) \rightarrow$

$3(-Z) \rightarrow 13(+X) \rightarrow 4(+Y) \rightarrow \begin{cases} 1(+Z) \\ 2(+Z) \rightarrow 5(+Z) \rightarrow 9(+Z) \\ 11(+Z) \end{cases}$ , 将此拆卸顺序反向即为所求的装配顺序.

序.

以图 1 为例,通过 13 个干涉矩阵运算,可以得到 3 种可能的装配序列. 而对于实际的产品,其零部件数还远不止图 1 所示的数目,因而,当产品中零件数目较多时,不仅求解步骤会较多,而且极有可能出现组合爆炸的问题,从而影响干涉矩阵的应用. 因此,需要采取一些方法或措施来减小矩阵的规模以及减少求解的步骤. 在此借鉴舒启林<sup>[3]</sup>等人的研究成果,通过引入工程语义信息减少获取产品装配序列时所要考虑的零件个数,降低装配体干涉矩阵的规模,提高求解的效率.

#### 3.1 装配语义信息的引入

对于组成实际产品的各个零件,它们都有各自相应的角色和功能,如果在获取产品装配序列时充分利用各零部件所承担的功能角色,那么装配序列的获得将得到简化.

装配语义是对装配体中装配特征间存在的装配配合关系、装配层次关系、装配动作、装配顺序、装配规则与参数(包括尺寸)等装配关系与装配过程信息的抽象描述. 在弹箭产品中,常用装配语义包括:螺钉-螺孔联接、螺栓-孔-螺母联接、圆柱销-孔联接、圆锥销-圆锥孔联接、键-槽联接. 由此,在考虑装配序列的时候,可以把组成装配体零件分为两类:功能件和联接件. 在拆卸某个功能件的时候,必须先拆卸其上的联接件. 常见的联接件有:螺栓、螺钉、垫圈、双头螺柱、螺母等. 这样一来,在考虑装配序列的时候不再将联接件纳入,从而减少零件数目,缩小干涉矩阵的规模.

仍以图1所示装配体为例,当引入装配语义信息以后,可以把沿Z轴方向的矩阵(1)改写为矩阵(2)的形式.

用连接矩阵L来表示零件之间的连接关系:若两个零件之间为紧连接(如螺纹连接、过盈连接、粘接、焊接、铆接等),则 $L_{[i,j]} = 2$ ;若零件*i, j*仅为一般接触关系 $L_{[i,j]} = 1$ ;若零件*i, j*不接触,则 $L_{[i,j]} = 0$ . 矩阵(3)和图2为图1所示装配体的连接矩阵和连接图,实线表示紧连接,虚线表示一般接触关系,边上的数值表示连接该两个零件的联接件.

	1	2	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
7	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
9	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0

	1	2	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0
2	1	0	0	0	0	1	2	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
8	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
9	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
11	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0

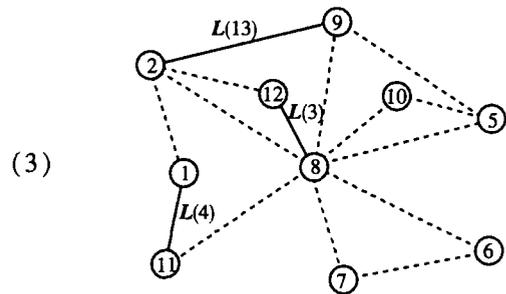


图2 连接图

由干涉矩阵(2),根据前面介绍的干涉矩阵算法,可以得到图1所示某机械产品装配体的拆卸顺序为:

$$\begin{cases} 1(+Z) \\ 2(+Z) \\ 11(+11) \\ 6(-Z) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 5(+Z) \\ 7(+Z) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 9(+Z) \\ 10(+Z) \\ 12(+Z) \end{cases} \rightarrow 8(+Z)$$

由前文所作约定:若想拆卸零件1,则必须先将零件4拆卸,因为零件1和11是通过联接件4相连的,这一点通过连接图很容易看出来.同样的道理,若想拆卸零件2,则必须先将零件13拆卸,则可行的拆卸顺序之一为:4(-Y) → 1(+Z) → 13(+X) → 2(+Z) → 11(+11) → 6(-Z) → 5(+Z) → 7(+Z) → 9(+Z) → 10(+Z) → 3(+Z) → 12(+Z) → 8(+Z)

对照先前获取图1所示某机械产品装配体的拆卸顺序的步骤,引入装配语义信息后所需的步骤由前面的13步降低到3步,计算速度得到了很大的提高.

### 3.2 子装配的引入

在前两次获取装配序列的过程中,一次是直接利用干涉矩阵的性质求解,获得装配序列,另一次则是在构建干涉矩阵的基础上,通过引入装配语义信息,将矩阵规模降低再求解,从而得到装配序列.第一种方式最少需要13步才能完成求解,共有3种可行装配序列;第二种方式只需要3步就可完成求解,但有288种可行装配序列.两种方法各有所长又各有不足,而且所获得的装配序列与实际的装配序列还有出入.因此,对于干涉矩阵的优化,不仅可以从装配语义信息方面入手,而且可以把若干个零件看作一个子装配体,进一步减少规划时所要考虑的零件数目,从而提高算法的效率.

由于子装配体必须具有稳定性和紧固性的特点,因而只有相互连接的零件才有可能形成子装配体.此外,在装配过程中,要求已经装配的零件稳定,所以,必定存在一个作为基准的零件,其它零件或子装配体通过基准零件进行装配.作为基准的零件一般应具有与其它零件连接数较多,体积、重量较大,不属于任何子装配体且为最后拆卸的零件的特点.对于图1所示某机械产品装配体而言,零件8与其它零件连接数最

多,重量较大且为最后拆卸的零件,故零件8应为基准件.又由于前面约定,定义了基准件是不属于任何子装配体的,因而零件3、8和12不能构成子装配体,所以只有零件1、11和联接件4能形成子装配体 $z_1$ ,零件2、9和联接件13能形成子装配体 $z_2$ .将子装配体 $z_1$ 、 $z_2$ 看作两个零件参与装配序列的获取,待获得整体的装配序列之后,再对子装配体用同样的方法进行装配序列的求解,从而得出装配体的装配序列.图1所示

某机械产品装配体的拆卸顺序为: $\begin{cases} z_1(+z) \\ 6(-z) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 5(+z) \\ 7(-z) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} z_2(+z) \\ 10(+z) \end{cases} \rightarrow 3(+z) \rightarrow 12(+z) \rightarrow 8(+z)$ .

在求解过程中需要注意一点,即:在求解过程中,虽然出现了第8列全为0的情况,但由于零件8为基准件,按照前面所做的约定,零件8应为最后一个拆卸的零件,故第8行第8列不可划去,其排列顺序应在拆卸顺序之末.表1是图1所示某机械产品的拆卸顺序.

对照前面获得装配序列的方法可以看出,引入工程语义信息和连接矩阵并运用子装配体概念后,装配序列的获取共需5个步骤,有8种可行装配序列.装配序列获取的效率大为提高,并且获得的结果也较前次的优化.

#### 4 结语

本文以某机械产品为例,通过干涉矩阵获取装配序列.由于采用干涉矩阵法进行装配体的拆卸必须沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向进行,所以应事先使装配体中尽量多的面垂直或平行于3个坐标轴.在拆卸过程中,若有些零件沿这3个方向均不能拆卸,应改变装配体方位,对剩余装配体重新生成干涉矩阵进行拆卸.若反复多次仍不能拆卸,则表明该装配体不能沿简单的直线方向拆装,装配操作比较复杂,不利于产品的快速上市.应返回到CAD系统中,提示设计者进行修改.在已获取装配序列的基础上,通过引入工程语义信息和连接矩阵以及子装配体的概念对干涉矩阵的规模进行了化简,提高产品装配序列的获取效率.

表1 图1所示某机械产品装配体的拆卸顺序

1	Z1 或 6	+ Z 或 - Z
2	6 或 Z1	- Z 或 + Z
3	5 或 7	+ Z 或 - Z
4	7 或 5	- Z 或 + Z
5	Z2 或 10	+ Z
6	10 或 Z2	+ Z
7	3	+ Z
8	12	+ Z
9	8	+ Z
子装配体 Z1 的拆卸顺序		
1	4	+ Y
2	1	+ Z
3	11	+ Z
子装配体 Z2 的拆卸顺序		
1	13	+ X
2	2	+ Z
3	9	+ Z

注:将表中所示的拆卸顺序求反即为所求的装配序列.

#### [参考文献] (References)

- [1] 严晓光,高艳丽,耿标.计算机辅助装配顺序规划技术概述[J].CAD/CAM与制造业信息化,2004(11):11-13.  
YAN Xiaoguang, GAO Yanli, GEN Biao. The summarize of computer aided assembly sequence planning technology [J]. CAD/CAM and Manufacturing Automation, 2004(11): 11-13. (in Chinese)
- [2] 潘洋宇,王拴虎,龚光荣.计算机辅助装配工艺设计关键技术研究[J].机械,2003,30(2):52-55.  
PAN Yangyu, WANG Shuanhu, GONG Guangrong. The study of the key technology of computer aided assembly design [J]. Machine, 2003, 30(2): 52-55. (in Chinese)
- [3] 舒启林,郝永平,王德俊.装配顺序自动规划及其评价的研究[J].机械设计与研究,2002,18(3):46-48.  
SU Qilin, HAO Yongping, WANG Dejun. The study of assembly sequence automatic planning and evaluation [J]. Machine Design and Research, 2002, 18(3): 46-48. (in Chinese)
- [4] BAI Y W, CHEN Z N, BIN H Z, et al. An effective integration approach toward assembly sequence planning and evaluation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(1): 96-105.

[责任编辑:刘健]