

考虑拆卸操作复杂性的拆卸顺序优化方法*

Optimum Disassembly Sequence Method Considering Disassembly Operation Complexity

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 柳振兴 李原 张开富 余剑峰

[摘要] 面对快速发展带来的结果,制造企业有必要提出一个系统的产品再制造的方法,拆卸作为产品再制造的重要阶段,选择合适的拆卸顺序亦是势在必行。为此,提出两步法对拆卸顺序进行优化,先通过优先约束计算求解可行的拆卸顺序,再从拆卸方向、拆卸工具以及操作聚合性3方面评价,得到最优的拆卸顺序。最后,以托板为例,验证了该方法的有效性。

关键词: 优先约束 拆卸顺序优化 加权平均

[ABSTRACT] With the rapid development of manufacturing industries, a systematic approach to recycling is both urgent and imperative. Disassembly is an important phase of product recycling and to choose an appropriate disassembly sequence is imperative. To solve this problem, two steps to optimize disassembly sequence are presented. The feasible disassembly sequence is obtained by using the precedence constraint algorithm. In order to obtain the optimal assembly sequence, three optimization factors including disassembly sequence, disassembly tool and operation polymerization are used to be as the evaluation standard. Finally, Successful application of this approach is validated by sequence optimization of a specific assembly of a splint.

Keywords: Precedence constraint Disassembly sequence optimization Weight average

随着产品使用寿命的不断缩短,废弃产品回收再制造技术近几年越来越受到各国的重视,美国的一项调查显示,将废弃产品拆卸再重新组装形成的产品的使用寿命比新产品的使用寿命平均延长约2倍,并且有效地降低了产品成本。拆卸是产品回收后的第一步,也是产品再修复的重要阶段,目的是为了提取出可以再使用的零部件和原料^[1]。为了规划合理的拆卸顺序,国内外学者展开了相关的研究。

迄今为止,提出了几种不同的数学方法,如Kanehara^[2]等将AND/OR图转换成Petri网络形式,再变成一个线性规划问题; Lambert^[3]提出了采用基于图

的方法选取最佳的拆卸顺序; Jhonson和Wang^[4]通过一个系统程序生成最优的拆卸顺序,并考虑材料的兼容性; Lambert^[5]采用线性规划的方法生成拆卸顺序; 而后, Yee和Ventura^[6]又将成本考虑进来; 另外,还有模拟退火方法^[7]、进化算法^[8]等; 后来, Lambert对拆卸顺序的优化问题做了进一步的研究。以上几种方法主要从产品本身出发,而没有考虑到拆卸操作的影响,致使产生的拆卸序列并不能很好地反映实际拆卸的情况。

基于此,针对拆卸顺序规划优化技术进行了研究,综合考虑拆卸过程中零件拆卸方向、拆卸工具以及拆卸操作聚合性等信息对拆卸序列的影响,采用3个试验,通过加权平均计算相应的权重,并利用目标函数对拆卸序列进行评价和优化。

1 产品模型的建立

1.1 问题描述

产品是零组件通过一定的装配关系固定在一起形成的。我们要做的就是产生一条合适的拆卸顺序,该顺序能在拆卸成本最小化的情况下移除连接件,获取分离的零组件。

由于拆卸主要是劳动集约型操作,通常认为拆卸成本与拆卸时间成比例。针对同一个产品,由于其组成相同,不同拆卸顺序中所使用的拆卸工具均相同,拆卸时间就取决于拆卸操作的复杂程度。

1.2 考虑方位信息的产品模型

产品模型应包含求解拆卸顺序所需的信息,本课题通过产品的CAD模型信息得到零部件之间的装配关联关系图,假设零件 $P_a \in P$ 、 $P_b \in P$ 且 $a \neq b$,则 P_a 和 P_b 之间的装配关联关系表示为:

$$\boxed{P_a} \xrightarrow{k} \boxed{P_b},$$

其中, $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 是一组符号集合,每一个符号表示装配体中的一个零件; n 为零件数目; k 表示 P_b 在方向 k 与 P_a 相连。拆卸方向如图1所示。

下面以一个实例对考虑方位信息的产品模型进行说明,拆卸体实例如图2所示。该实例的装配关联关系如图3所示,以 P_1 和 P_2 为例进行说明, P_2 在 X 正方向与 P_1 相连,则 P_1 在 X 负方向与 P_2 相连。

* 国家863计划项目(2006AA04Z137)资助。

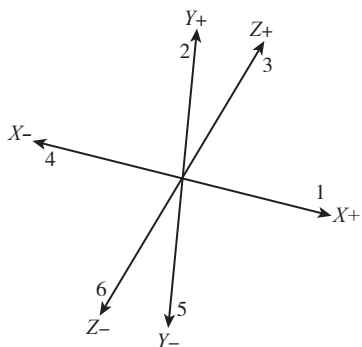


图1 拆卸方向
Fig.1 Disassembly direction

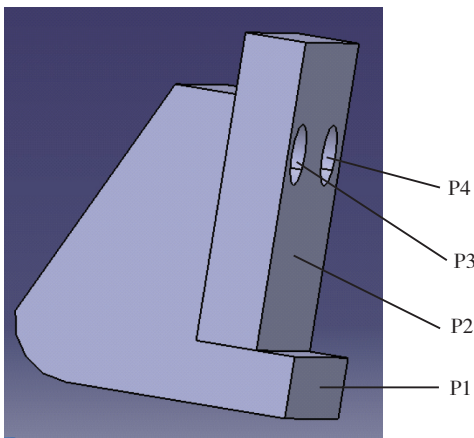


图2 拆卸体实例
Fig.2 Disassembly instance

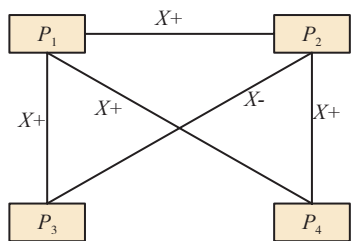


图3 装配关联关系图
Fig.3 Diagram of assembly association

2 优先约束计算

由产品 CAD 模型生成装配关联关系图,确定关系对,再由优先约束计算公式得到可行的拆卸顺序。

(1)关系对:指存在关联关系的两个零件的组合,如关系对 (a, b) 。

(2)规定: $T_{ab} : T_i \rightarrow \{0, 1\} (i=1\sim 6)$ 。当 $T_i=1$ 时,表示零件 b 在方向 i 上相对于零件 a 可移动;当 $T_i=0$ 时,表示零件 b 在方向 i 上相对于零件 a 不可移动。

优先约束的计算^[9]是根据关系对得到的,并且要求进行计算的关系对应包含一个相同的零件,如 (a, c) 和 (b, c) 。分别计算关系对的 T_i 值,通过“ \wedge ”操作,获得 TT_i 值,用数学形式表示为:

$$TT_i = T_i(a, c) \wedge T_i(b, c)。$$

依次求出 6 个方向的 TT_i 值,再进行“ \vee ”操作,记作:

$$RTT = TT_1 \vee TT_2 \vee TT_3 \vee TT_4 \vee TT_5 \vee TT_6。$$

如果 $RTT=1$,则至少应有一个 $TT_i=1$,表明零件 c 可以拆卸。也就是说, (a, b, c) 是可行的,零件 c 可以从 i 个方向进行拆卸,进而求出所有零件之间的拆卸顺序。

3 最佳的拆卸顺序

3.1 目标函数

每一条可行的拆卸的评价基于以下几个评价因素:拆卸方向的变更、拆卸工具的变更以及拆卸操作的聚合性等。建立如下的目标函数:

$$f(c) = \omega_1 SC_1 + \omega_2 SC_2 + \omega_3 SC_3。$$

$f(c)$ 的值越大,对应的拆卸顺序越好, $\max f(c)$ 即是所求的最佳的拆卸顺序。

3.2 评价因素的求解

(1)拆卸方向的变更。拆卸方向的变更是指相邻两个拆卸操作对应的拆卸零件的安装方向的变化:

$$SC_1 = n - n_d - 1,$$

其中, n 表示拆卸顺序中零件的个数, n_d 表示拆卸方向变化的次数。

(2)拆卸工具的变更。拆卸工具的变更是指相邻两个拆卸操作所使用的拆卸工具的更换:

$$SC_2 = n - n_t - 1,$$

其中, n_t 表示拆卸工具变化的次数。

(3)拆卸操作的聚合性。聚合性是指在拆卸过程中相同的或相似的拆卸操作应集中完成,以减少更换拆卸工具的次数,节省拆卸时间。由图 2 的拆卸体实例,写出其中一条可行的拆卸顺序,如表 1 所示。根据表 1,按照该拆卸顺序,可以得出:

- 拆卸方向变更一次: $SC_1 = 2$;
- 拆卸工具变更一次: $SC_2 = 2$;
- P_3 和 P_4 为相同类型的拆卸操作: $SC_3 = 2$ 。

表1 可行的拆卸顺序表示

拆卸顺序	P_4	P_3	P_2	P_1
拆卸方向	-X	-X	-X	-Z
拆卸工具	T_1	T_1	T_2	T_2

3.3 权重计算

权重是针对同一条拆卸顺序不同评价因素的相对

重要性,为了获取合适的权重,通常依据装配人员的经验和知识,由专家打分的方式决定权重的大小,但是这种方式获取的权重值往往与实际的值偏差较大,主观性强,不能真实反映各评价因素的重要性程度,为此,本课题通过3个试验分别针对3个评价因素求解权重。

考虑到拆卸同一个产品所需的装配资源相同,拆卸顺序的优劣由拆卸时间评价,因此,问题转换为求解完成相应评价因素所需时间的平均值。假定在3个试验中操作者的运动路径和移动速度均相同(为了保证实验的准确性可由点对点的运动完成),具体处理过程为:针对同一产品,按照拆卸操作过程中方向的变化、工具的变更以及聚合性,分别记录各自所需的时间(包括来回的运动时间以及完成各自变更的时间,以工具变更为例,所需时间为来回的运动时间与拾取工具的时间之和),建立方向变化次数(n_d)、工具变更次数(n_t)、聚合性操作(SC_3)与所需时间(t)的关系(只考虑相关装配资源的操作时间),由两者之间的关系表根据下式求出评价因素与时间之间的平均值 A_i ($i=1,2,3$):

$$A_i = \sum_{j=1}^m j t_{ij} / \sum_{j=1}^m j$$

再对该平均值进行归一化处理:

$$\omega_i = A_i / \sqrt{\sum_{i=1}^3 A_i^2}$$

即可作为相应评价因素的权重值,实际证明该方法能较好地反映各评价因素的相对重要性。

下面以图2的拆卸体为例,分别记录完成各评价因素所需的时间,建立表2~4。

由表中给出的数据,根据平均值的计算公式,分别求得:

表2 n_d-t 关系表

n_d	1	2	3
t	2	5	8

表3 n_t-t 关系表

n_t	1	2	3
t	5	12	20

表4 SC_3-t 关系表

SC_3	2	3	4
t	12	16	20

$$A_1 = (1 \times 2 + 2 \times 5 + 3 \times 8) / (1 + 2 + 3) = 6,$$

$$A_2 = (1 \times 5 + 2 \times 12 + 3 \times 20) / (1 + 2 + 3) = 14.8,$$

$$A_3 = (2 \times 12 + 3 \times 15 + 4 \times 18) / (2 + 3 + 4) = 15.7.$$

针对求得平均值,归一化处理得到相应的权重:

$$\omega_1 = A_1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} = 0.27,$$

$$\omega_2 = A_2 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} = 0.66,$$

$$\omega_3 = A_3 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} = 0.7.$$

4 应用实例

该方法以托板的装配为例进行验证,该装配模型图如图4所示。

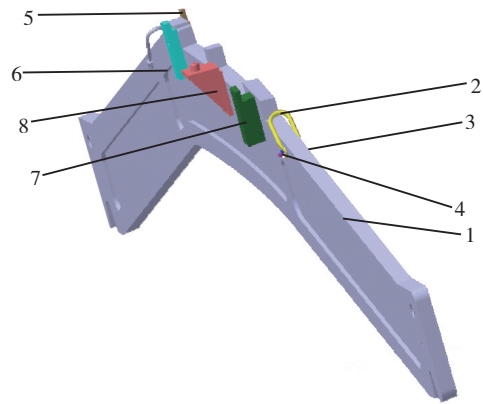


图4 托板装配模型图

Fig.4 Splint assembly model

根据装配模型图以及零件信息,得出托板的初始数据如表5所示。

采用前几节给出的计算方法,生成最佳的拆卸顺序,验证该方法的可行性。

表5 托架装配体初始数据

零件	名称	拆卸工具
1	骨架	TL_0
2	挂钩	TL_1
3	螺母	TL_2
4	螺帽	TL_3
5	挡件1	TL_4
6	挡件2	TL_4
7	挡件3	TL_4
8	耳片	TL_5

根据装配模型图,规划出该装配体的装配关联关系图,如图5所示。根据关系对的定义,确定零件之间的关系对,并根据约束计算公式得出可行的拆卸顺序。托架的关系对以及相应的 T 值如表6所示。

以 $T_4(2,4)=1$ 、 $T_4(3,4)=1$ 为例,得到 $TT_4=1$,则优先函数值 $RTT=1$,表示零件4可从方向4进行拆卸,进而可求出所有关系对的优先函数值。最终,托架装配体可行的拆卸顺序为:

Seq1: $7 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$;

Seq2: $8 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$;

Seq3: $5 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$;

Seq4: $5 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 。

按照3.3节提出的计算权值的方法,得到 $\omega_1=0.3$ 、 $\omega_2=0.3$ 、 $\omega_3=0.37$,再根据3.2节评价因素的计算方法,得到上述4个拆卸顺序的目标函数分别为: $f(1)=3.5$ 、 $f(2)=4.2$ 、 $f(3)=3.2$ 、 $f(4)=3.2$ 。因此,优化后得到的最佳拆卸顺序为Seq2。

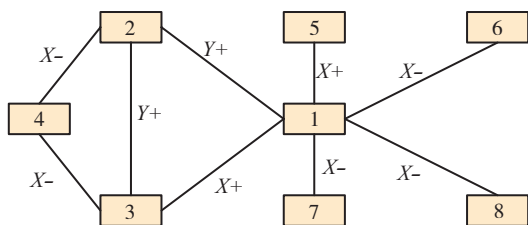


图5 托架的装配关联关系图

Fig.5 Assembly association diagram of splint

表6 托架的关系对以及相应的 T 值

关系对	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
(1, 2)	0	1	0	0	0	0
(1, 3)	1	0	0	0	0	0
(1, 5)	1	1	1	0	1	1
(1, 6)	0	1	1	1	1	1
(1, 7)	0	1	1	1	1	1
(1, 8)	0	1	1	1	1	1
(2, 3)	1	0	0	0	0	0
(2, 4)	0	1	1	1	1	1
(3, 4)	1	0	0	0	0	0

5 结束语

在产品再生阶段,零组件的合理拆卸对产品的循环使用有着直接的影响,能有效地节约成本、降低对环境的污染。本课题提出的方法能够得到最优的拆卸顺序,并且符合实际的拆卸环境。将该方法获取的最优拆卸

顺序应用到实际环境中,能够在最短的时间内拆卸零组件,符合拆卸成本最小化的要求。

参考文献

- [1] Luminita Duta, Florin G F, Henrioud J M. A method for dealing with multi-objective optimization problem of disassembly processes. France: International Symposium on Assembly and Task Planning, 2003.
- [2] Kanehara T, Suzuki T, Inaba A, et al. On algebraic and graph structural properties of assembly petri net-searching by linear programming. Proceedings of 1993 IEEE/RJSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993: 2 286-2 293.
- [3] Lambert AJD. Optimal disassembly of complex products. Int J Product Res, 1997, 35 (9): 2 509-2 523.
- [4] Johnson MR, Wang MH. Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse. Int J Product Res, 1998, 36 (12): 3 227-3 252.
- [5] Lambert AJD. Linear programming in disassembly/clustering generation. Comput Ind Eng, 1999 (36): 723-38.
- [6] Yee ST, Ventura JA. A Petri net model to determine optimal assembly sequences with assembly operation constraints. Manuf Systems, 1999 (18): 203-213.
- [7] Adenso-Diaz B, Moure F, Rendueles M. Automatic disassembly plans: applications to the continuous process industries case. Manuf Systems, 2002, 21 (4): 276-286.
- [8] Seo KK, Park HJ, Jang DS. Optimal disassembly sequence using genetic algorithms considering economic and environmental aspects. Int J Adv Manuf Technol, 2001, 18 (5): 371-380.
- [9] Reddy B, Gottipolu, Kalyan Ghosh. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences. Computers in Industry, 2003, 50: 251-264.

(责编 小颖)

(上接第93页)

最佳直线的拟合采用最小二乘法原则,详细计算公式参考文献[1]。

4 结束语

通过系统在实际中的应用,在电液比例阀装配前对比例电磁铁和比例放大器的综合性能进行测试,遴选出了综合性能好的比例放大器和比例电磁铁,对整个电液比例阀性能的提高起到了至关重要的作用。同时对出现故障电液比例阀的故障排除也是一个行之有效的手段。

参考文献

- [1] 路甬祥,胡大纭. 电液比例控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 吴根茂. 实用电液比例技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.
- [3] 谭尹耕. 液压实验设备与测试技术(修订版). 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [4] 杨乐平,李海涛,赵勇,等. LabVIEW 高级程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(责编 小颖)