

基于干涉矩阵的拆卸序列规划算法研究^{*}

李 林 谢振华 杨 霄 孙鲁青
(海军航空工程学院青岛分院 青岛 266041)

摘 要 为解决拆卸序列规划理论算法存在的求解空间过大的问题,提出一种基于干涉矩阵的规划算法。该算法用干涉矩阵和干涉图来表现装配体零部件间的约束关系,通过对干涉矩阵的分析处理,简化干涉图,生成拆卸序列,达到了缩减求解空间的目的,保证了算法同工程实际的一致性,提高了实际应用和软件编程的能力。

关键词 拆卸序列规划;干涉矩阵

中图分类号 TP301.6

Research on Disassembly Sequence Planning Algorithm Based on Interference Matrix

Li Lin Xie Zhenhua Yang Xiao Sun Luqing
(Qingdao Branch of Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041)

Abstract To solve the problem of much bigger solution space existing in the theoretic disassembly sequence planning (DSP) algorithm, an approach based on interference matrix to generate the disassembly sequence is put forward. According to this algorithm, by using interference matrix and interference chart, the assembly restrictions status is manifested. Disassembly sequence is generated, by analyzing and dealing with interference matrix, interference graph is predigested and disassembly sequence is generated finally, so that the solution space is reduced. The algorithm ensures the consistence with the actual engineering situation, and the practicability and programmable capacity are greatly improved.

Key Words disassembly sequence planning, interference matrix

Class Number TP301.6

1 引言

在设备的使用阶段,需要进行一系列的维修作业,而零部件的拆卸与装配所需的时间在整个维修作业中占有相当大的比例。而且,绝大部分设备均都具备“拆-装”可逆性的构造特点^[1]。因此,通过对目标零部件的拆卸活动进行规划,求得效率最优的拆卸序列可以大大缩短维修作业时间,从而提高部队在平时和战时对装备的快速修复能力。本文在综合考虑零件类型、拆卸结构、拆卸工艺条件和安全要求等影响拆卸序列因素的基础上,通过建立设备零部件间干涉矩阵的方法生成拆卸序列,可以

避免组合爆炸问题,具有一定实际意义^[2]。

2 层次树模型

建立合理的产品装配模型是进行装配规划的基础,典型的装配模型包括图结构模型、层次模型、虚链模型等^[3~4]。一般来说,产品的结构具有层次性,产品通常由若干功能部件和零件装配而成,部件还可以向下拆分,直至不可拆分的零件为止。产品的装配关系可以使用层次模型来表示。层次模型是根据零部件的层次关系以树的形式表达装配并组织产品,能体现设计意图和产品结构^[5]。不同层次零件的装配存在先后顺序约束,下层零件的装

• 收稿日期:2011年1月17日,修回日期:2011年2月23日

作者简介:李林,男,硕士,讲师,研究方向:虚拟维修。谢振华,男,博士,教授,研究方向:武器系统运用工程。杨霄,男,硕士,讲师,研究方向:通信指挥。孙鲁青,男,硕士,讲师,研究方向:航空装备保障。

配优先于上层零件的装配,不同子装配体的零件可以并行装配。产品结构上的层次特性隐含了部分装配顺序信息,采用产品层次树结构模型,更能够体现问题的本质,有利于装配问题的分析和求解。

在建立装配模型时,按照“化整为零”的思想,将复杂产品零部件划分为产品级、部件装配级、子装配级和零件级 4 个装配级别,直观地表示成层次树结构,表达零部件间的父子从属关系。根节点表示产品,有分支的节点表示子装配体,无分支的节点为零件。如图 1 为某设备装配体的层次树结构。可以看出,除零件层(第四层)外,其它层中的任何单元都是一个子装配体,该子装配体清晰地反映出装配体中各零件之间的物理、几何连接的紧密程度。

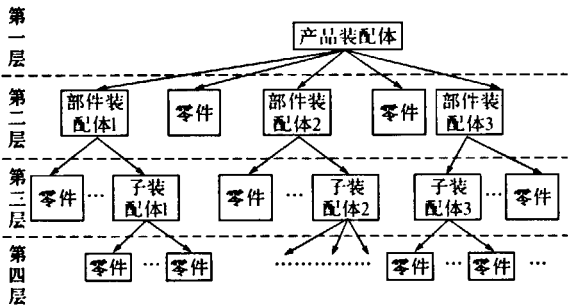


图 1 装配体的层次树结构

3 拆卸序列规划算法

近年来,人们从不同角度提出了各种拆卸序列生成方法,应用较多的是基于树搜索和图搜索方法^[6]。图搜索法虽在一定程度上解决了装配和拆卸中的顺序生成问题,但当零件数目增多时,不可避免地会产生搜索组合爆炸,在实际应用中存在很大局限。本文采用的基于干涉矩阵的拆卸序列规划算法借助干涉矩阵、干涉图,生成有限数目的拆卸顺序集,解决目前拆卸规划算法求解空间过大的问题,并通过拆卸运动过程的干涉检验,确定可行拆卸路径,可以提高目前理论 DSP 算法的实用能力。

3.1 连接矩阵

用连接矩阵 C 来描述零件之间或部件之间的连接关系。当零件 i 和零件 j 不存在连接关系时, $C_{ij}=0$;当零件 i 和零件 j 存在连接关系时, $C_{ij}=1$,由此建立图 2 所示装配体的连接矩阵如图 3 所示。

在序列规划过程中,为了方便分析可将连接矩阵转换为连接图,当矩阵中 $C_{ij}=1$ 时,零件 i 和零件 j 之间用无向边连接,否则零件 i 和零件 j 之间

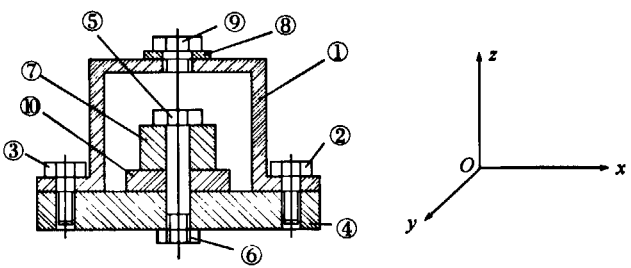


图 2 平面图

没有连接边。

3.2 干涉矩阵

将构成装配体的零件之间的约束关系用三个矩阵(A_X 、 A_Y 、 A_Z)来表示,若一个装配体由 n 个零件构成,则该矩阵是维数为 n 的方阵 A_P ($P=X,Y,Z$)。方阵 A_P 的建立原则如下:

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 $A_{ij}=0$,否则 $A_{ij}=1$,且对所有的 i , $A_{ij}=0$ ($i=1,2,\dots$),将该 n 阶方阵 A_P 称为该装配体的干涉矩阵^[7]。

基于以上的分析,建立图 2 所示装配体 Z 轴上的干涉矩阵如图 4 所示。

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

图 3 连接矩阵

图 4 干涉矩阵

容易知道,沿某一坐标轴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 i 列所有元素为 0,则零件 i 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。

于是,可得干涉矩阵算法:

1) 从干涉矩阵 A_X 、 A_Y 、 A_Z 中随机取一个矩阵 A_P ($P=X,Y,Z$)。

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)”,否则,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顺序。

3.3 干涉图

干涉矩阵中若 $A_{ij}=1$,则对应干涉图中零件 i 指向零件 j 的有向边,表示若要沿对应方向拆卸零件 i ,必须先拆卸零件 j ;若 $A_{ij}=0$,则对应干涉图中零件 i 和零件 j 无对应边。在干涉图中仅有有向边指向的结点称为汇聚点,而仅有有向边指离的结点称为发散点。建立图所示装配体的干涉图如图 5

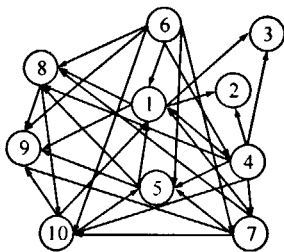


图 5 干涉图

所示。结合干涉矩阵可知,删除干涉图中的一个汇聚点相当于删除了该汇聚点所代表的零件在干涉矩阵中行和列的矩阵值。

对应装配体的干涉图可得到干涉图算法:

- 1) 根据装配体的干涉矩阵建立干涉图。
- 2) 判断干涉图中是否有会聚点,若是,取消该节点和与之相连接的边,并将该节点的序列压入堆栈,重复步骤(2);若不是,则该装配体不可拆。
- 3) 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拆卸顺序。

3.4 算法流程

基于以上分析,可以确定拆卸序列规划算法的基本流程如图 6 所示。

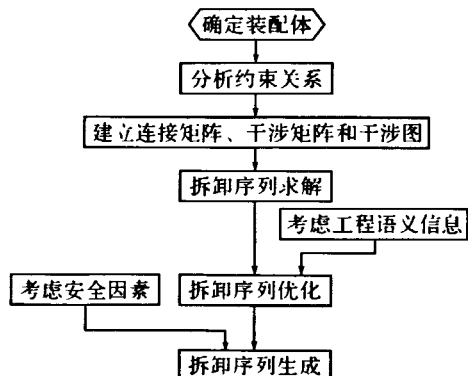


图 6 拆卸序列规划流程

可以看出,单纯通过计算求解得到的拆卸序列只是理论上的分析结果,并不能完全反映实际的拆卸序列^[8]。因此,在确定设备拆卸序列时,还必须充分考虑设备的工艺要求和安全要求,才能得到正

确、合理的拆卸序列。

4 实例研究

对于图 2 所示部件,若对它进行全拆卸,方法如下:

步骤 1:建立装配体的连接矩阵/连接图、干涉矩阵/干涉图(略去);

步骤 2:简化装配体的连接矩阵/连接图、干涉矩阵/干涉图。

图 7~8 所示的装配体的连接矩阵和连接图经简化后分别所示:

$$C = \begin{matrix} & h & 4 & 7 & 10 \\ \begin{matrix} h \\ 4 \\ 7 \\ 10 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

图 7 连接矩阵

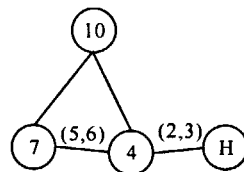


图 8 连接图

由于图 7 所示的装配体在 X 和 Y 轴方向的干涉矩阵均不存在某行或某列的值全为 0,它在 Z 轴上经简化的干涉矩阵(图 9)和干涉图(图 10(a))分别为:

$$A_z = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

图 9 干涉矩阵

步骤 3:形成拆卸序列

由干涉图 10 可知零件 h 不存在任何的干涉,故应先拆除零件 h ,对照该装配体简化后的连接矩阵, h 和零件 4

通过 2,3 结合在一起,要拆除 h 应先将连接件 2,3 拆除,拆除 h 后的干涉图如图 10(b)所示。而零件 7 在 Z 方向上不存在干涉,故接下来应拆除零件 7,如图 10(c)所示。

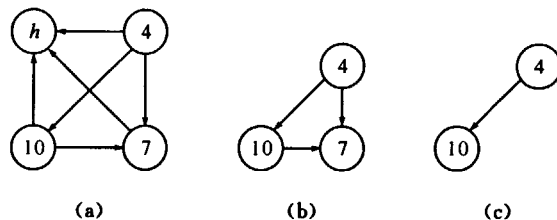


图 10 干涉图

剩下的零件 10 和 4 根据干涉矩阵的特点,零件 10 在 Z 方向上干涉零件 4 的拆卸,我们很容易判断 10 和 4 的拆装顺序,这样该装配体的拆卸顺序为 $2 \rightarrow 3 \rightarrow h \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 4$ 。下面对子装配体 h 进行拆卸,利用上面的方法分析可知 h 子装配体的拆卸顺序为 $9 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ 。综合上面的分析可得图 1 所示装配体的拆卸序列为:

(下转第 180 页)

- [2] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京:科学出版社, 2010
- [3] 高稚允, 高岳. 军用光电系统[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996
- [4] 吴晗平. 光电系统环境与可靠性[M]. 北京:科学出版社, 2009
- [5] 胡慧涛. 光电跟踪系统的伺服控制研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(11): 198~200
- [6] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989(3): 1~41
- [7] 王建立, 吉桐伯. 加速度滞后补偿提高光电跟踪系统跟踪精度的方法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 681~685
- [8] 刘廷霞. 光电跟踪系统复合轴伺服控制技术的研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- [9] 柳井莉, 陈方斌, 王红红, 等. 基于自适应算法的光电跟踪转台摩擦补偿方法研究[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 533~536
- [10] 徐征峰, 陈洪斌, 蒋行国, 等. 基于动力学解耦的跟踪系统自适应控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(9): 39~43
- [11] 王辉华, 刘文化, 张世英, 等. 舰载视轴稳定系统的变结构控制研究[J]. 光电工程, 2007, 34(3): 26~29
- [12] 吉桐伯, 王红宣, 杨秀华. 基于 SMC 的大型光电跟踪平台直流调速系统算法[J]. 吉林大学学报, 2009, 27(1): 35~39
- [13] 韩晓泉. 模糊控制在光电跟踪伺服系统中的应用研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2005
- [14] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2002
- [15] 卢广山. 高精度机载光电跟踪系统的自适应算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(4): 563~566
- [16] 蔡自兴. 智能控制基础与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998
- [17] 刘兴法, 马佳光. 用于三轴光电跟踪系统的神经网络误差修正法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1311~1316
- [18] 崔海洪. 舰载光电控制系统分析与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008
- [19] Dario Mancini. Italian national Galileo telescope (TNG) control system: hardware, software and methods adopted to improve the performance of the fully digital drive system[J]. SPIE, 1995, 2479: 245~252

~~~~~  
(上接第 150 页)

2→3→9→8→1→5→6→7→10→4

步骤 4: 考虑安全等其它因素, 修正拆卸序列

本例只给出了设备一个子装配体的拆卸序列生成步骤, 如果设备比较复杂, 则需要按照图 1 装配体的层次结构逐层生成拆卸序列, 再组合生成总的拆卸序列。

## 5 结语

拆卸序列规划是可拆卸设计的重要研究内容, 传统理论规划方法所采用的算法计算量大、解集过多, 难以适应工程实际<sup>[9~10]</sup>。本文采用的基于干涉矩阵的拆卸序列规划算法, 大大缩小了算法求解空间, 具有较强的实用性, 而且已在某型飞机弹射救生设备虚拟维修训练系统的开发中得到应用。实践表明, 该算法是可行的。

### 参考文献

- [1] 郭伟祥, 刘志峰, 刘光复. 基于模块化思想的拆卸序列规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 498~504
- [2] 曹德君, 田锡天, 耿俊浩. 在装配序列规划中子装配体识别方法研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 126~128
- [3] 谢云峰, 黄美发, 钟艳如. 一种新的拆卸序列规划方法[J]. 机械制造, 2007, 45(510): 45~47
- [4] 王波, 王宁生. 装配体拆卸序列的自动生成及优化研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2005, 14(1): 14~15
- [5] 姚丽英, 高建刚, 段广洪, 等. 基于分层结构的拆卸序列规划研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(17): 1516~1518
- [6] 江吉彬, 刘志峰, 刘光复. 基于工程语义信息的拆卸序列规划算法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 625~629
- [7] 彭涛, 李世其, 王峻峰. 基于集成干涉矩阵的蚁群装配序列规划[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 179~182
- [8] 周喜梅, 郑清春, 郭津津. 基于模块化的拆卸模型及拆卸序列规划研究[J]. 天津理工大学学报, 2009, 25(1): 26~28
- [9] 王波, 王宁生. 装配体拆卸序列的自动生成及优化研究[J]. 淮海工学院学报, 2005, 14(3): 14~17
- [10] 黄进永, 孙有朝. 基于拆卸约束图的产品可行拆卸序列生成算法[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(10): 1354~1361