

# 基于优先约束关系的装配序列规划研究

陈家照,廖海涛

(第二炮兵工程学院,陕西 西安 710025)

**摘要:**利用联结图方法建立设备的装配关系模型,生成联结矩阵,并利用子装配体的概念对模型进行简化。利用联结图模型分析零件间的优先约束关系生成优先关系矩阵,利用优先约束矩阵生成设备的可行装配序列,为设备装配序列选优提供基础。

**关键词:**优先约束关系;子装配体;序列规划

**中图分类号:**TH12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2012)04-0032-03

## Research on Assembly Sequence Planning Based on Precedence Constraint Relation

CHEN Jiao-zhao, LIAO Hai-tao

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** This paper uses the connection graph method to establish an assembly relation model of equipment and create a connection matrix, and then simplifies the model according to the concept of subassembly. After analyzing the assembly precedence constraint relations among the components by using the connection graph model, it also creates an assembly precedence relation matrix, and then generates feasible assembly sequences from the matrix. This work lays the foundation for the optimization of the assembly sequences.

**Key words:** assembly precedence constraint relation; subassembly; sequence planning

## 0 引言

设备零件所包含的信息异常复杂,给产品装配序列的规划带来很大的困难,目前工业生产制造中一般采用经验的方法生成设备的装配或拆卸序列,这种方法效率低,而且根据人的经验获得的设备的装配序列往往数量有限,难免会因为失误而漏掉某些可行的序列。当零件数量增多时,设备可行装配序列的数量呈指数增长<sup>[1]</sup>,获得全部可行装配序列的难度随之大大增长。采用计算机来获得设备可行的装配序列有着巨大的优势。本文研究利用优先约束关系生成设备可行拆卸序列,是借助计算进行装配序列规划的一种有效方法。

## 1 拆卸模型的建立

要获得设备的拆卸序列,首先要根据设备零件间的装配关系,建立设备的拆卸模型,对零件的装配信息进行表达,然后基于这些信息,分析设备零件的拆卸模型,采用适当的序列生成方法,生成设备的可行拆卸序列。

### 1.1 联接图模型的建立

装配关系的联接图模型是由 Bourjault 首次提出的<sup>[2]</sup>。用  $G=(V,E)$  表示零件间的配合关系,设  $G=(V,E)$  为一个有  $n$  个节点的图, $n$  为零件的个数,联结图的节点  $V=(v_1,v_2,\dots,v_n)$  表示装配体中的零件,联接图中的边  $E=(e_1,e_2,\dots,e_m)$  表示每两个零件之间的联接关系,

$m$  为零件联结边的数目。对于一个有正确装配关系的装配体,其联接图具有简单、唯一、连通、无向的性质。

装配联接图包含了产品序列规划的基本信息,通过分析联接图模型生成设备的联接矩阵,用装配关系联接矩阵的代数特性表达设备零件间的装配关系,可以容易地判断出装配体中零件联接的紧密程度,通过矩阵中某一行或列元素的值,判断出该零件与其他零件之间存在多少接触关系,而且装配关系联接矩阵的数值特性也便于计算机进行处理。

现以闸阀为例,分析建立联接图模型的方法。

图1所示为闸阀的零件组成图。为了方便建立设备的拆卸模型,减少需要规划拆卸序列的零件的数量,把紧固件作为一个零件处理,零件及其附件作为一个整体进行处理。表1是参与拆卸序列规划的闸阀零件编号列表。

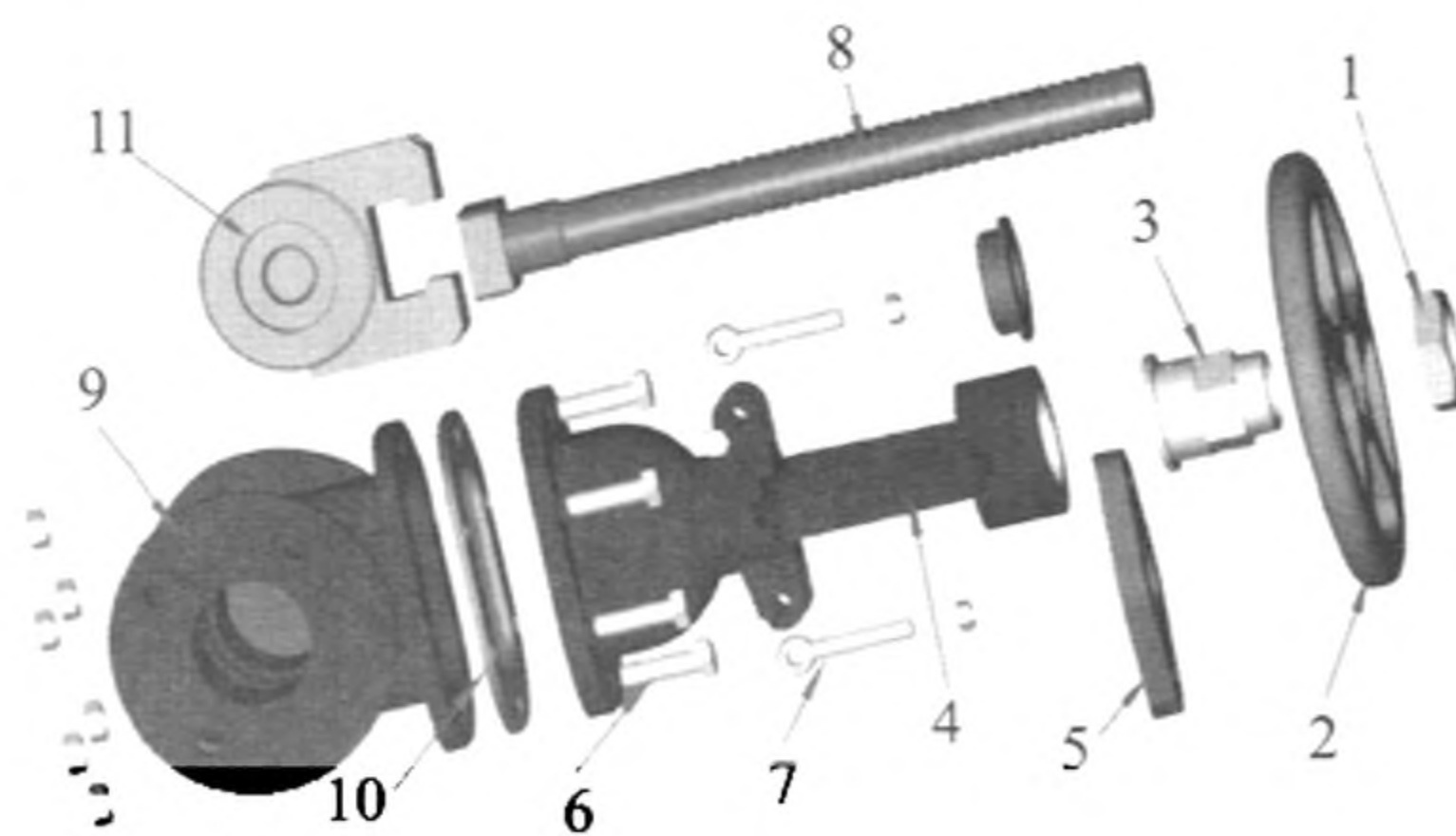


图1 闸阀零件爆炸图

**作者简介:**陈家照(1969-),男,陕西南郑人,教授,博士,主要研究导弹推进系统仿真。



表1 参与拆卸序列规划的闸阀零件编号列表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
零件名称	阀杆螺母	手轮	固定螺母	阀门盖	压盖	紧固件2	紧固件1	阀杆	阀座	垫片	闸板

对闸阀零件间的装配关系进行分析可知,阀杆与阀杆螺母、手轮、固定螺母、阀门盖、紧固件1、闸板均存在装配关系,与压盖、紧固件2、阀座、垫片不存在装配关系,由此可建立如图2所示的闸阀联结图模型。

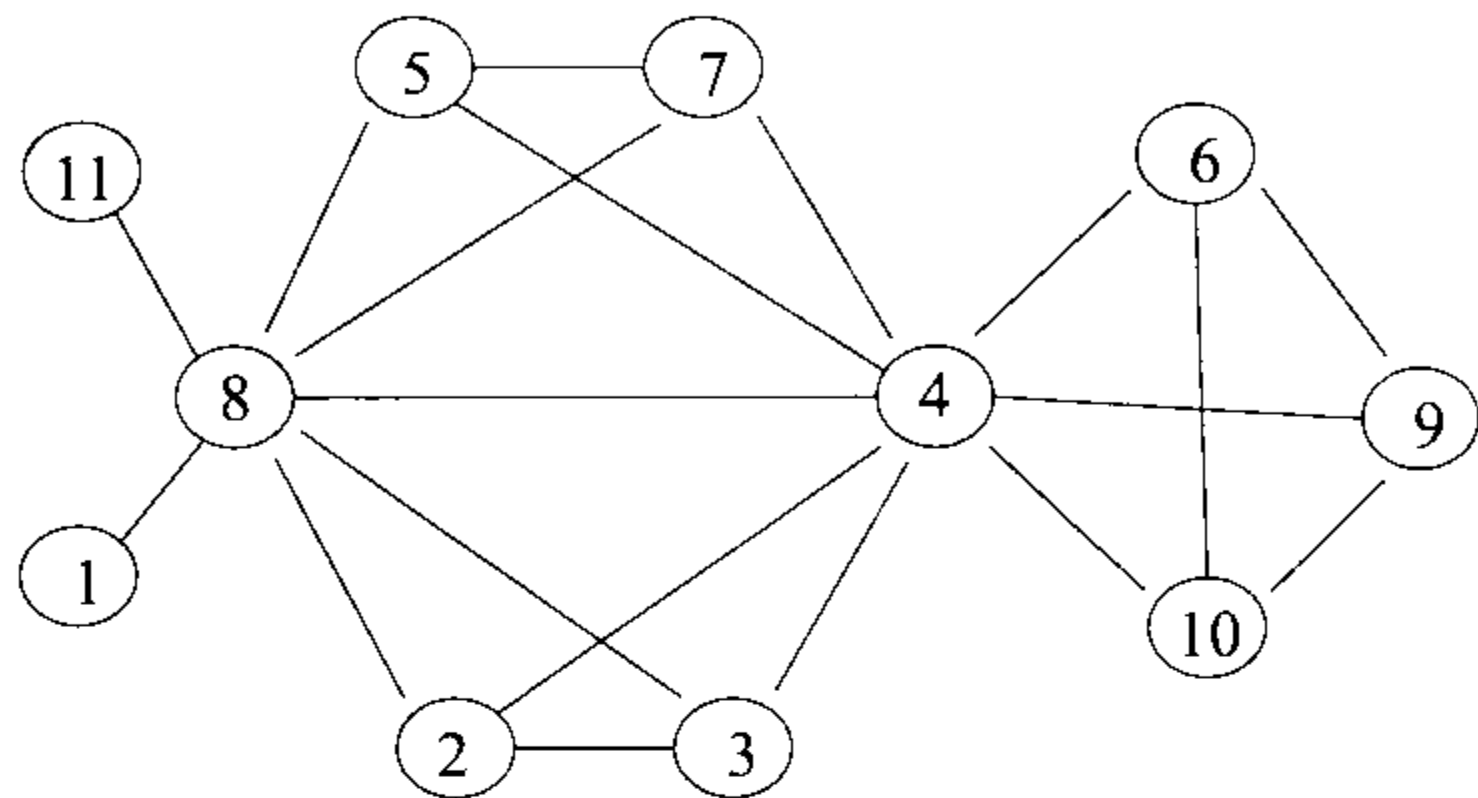


图2 闸阀联结图模型

## 1.2 联结矩阵的生成

装配关系联结矩阵(connection matrix)是根据联结图模型而生成的。在装配联结矩阵中,装配中的零件分别沿矩阵的行和列排列,矩阵的元素表示零件间的装配关系,如果设备零件之间存在物理装配关系,则相对应的矩阵中的元素值为1,否则为0。若设备的零件集 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ ,则装配关系矩阵的元素 $a_{ij}$ 存在以下关系:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 不存在联结关系} \\ 1 & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 存在联结关系} \end{cases} \quad (1)$$

依据闸阀的联结图模型生成的联结矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2 拆卸模型的简化

### 2.1 子装配体的概念

对于一个由 $n$ 个零件组成的产品 $P, P=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , $S$ 为由 $P$ 中的 $m(1 < m < n)$ 个零件组成的零件集合,如果 $S$ 满足下列条件:

- 1) 零件集合具有稳定性,即 $S$ 中的零件之间的联接关系使 $S$ 成为一个不可自发分离的子结构;
- 2)  $S$ 中的零件至少与其它一个设备零件存在装配关系;

3)  $S$ 中的零件拆卸完毕后,不影响原装配体 $P$ 中其余零件的拆卸;

4) 一个零件只能属于一个子装配体。

则 $S$ 为装配体 $P$ 的一个子装配体。

利用子装配体的概念可以对拆卸模型进行简化,把子装配体看做一个整体,参与设备零件的拆卸序列规划,这样可以解决因为设备零件增多而产生的组合爆炸问题,减少每次参与规划的零件的数目。

### 2.2 拆卸模型的简化

通过分析图2所示的闸阀零件关系可以看出,阀门盖、垫圈、阀座通过紧固件2联结在一起,这四个零件可以组成一个子装配体;以阀杆为轴,阀杆螺母、手轮、固定螺母等零件联结在一起,它们可以作为一个子装配体。通过以上方式的处理,将闸阀的联结图模型简化为如图3所示。

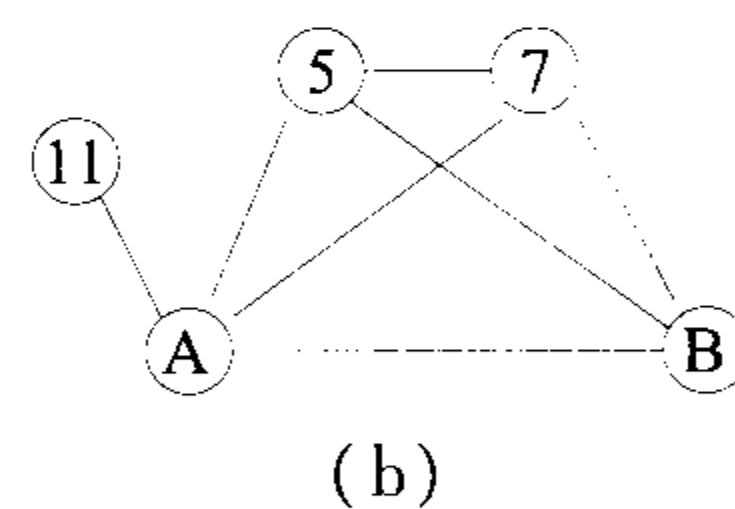
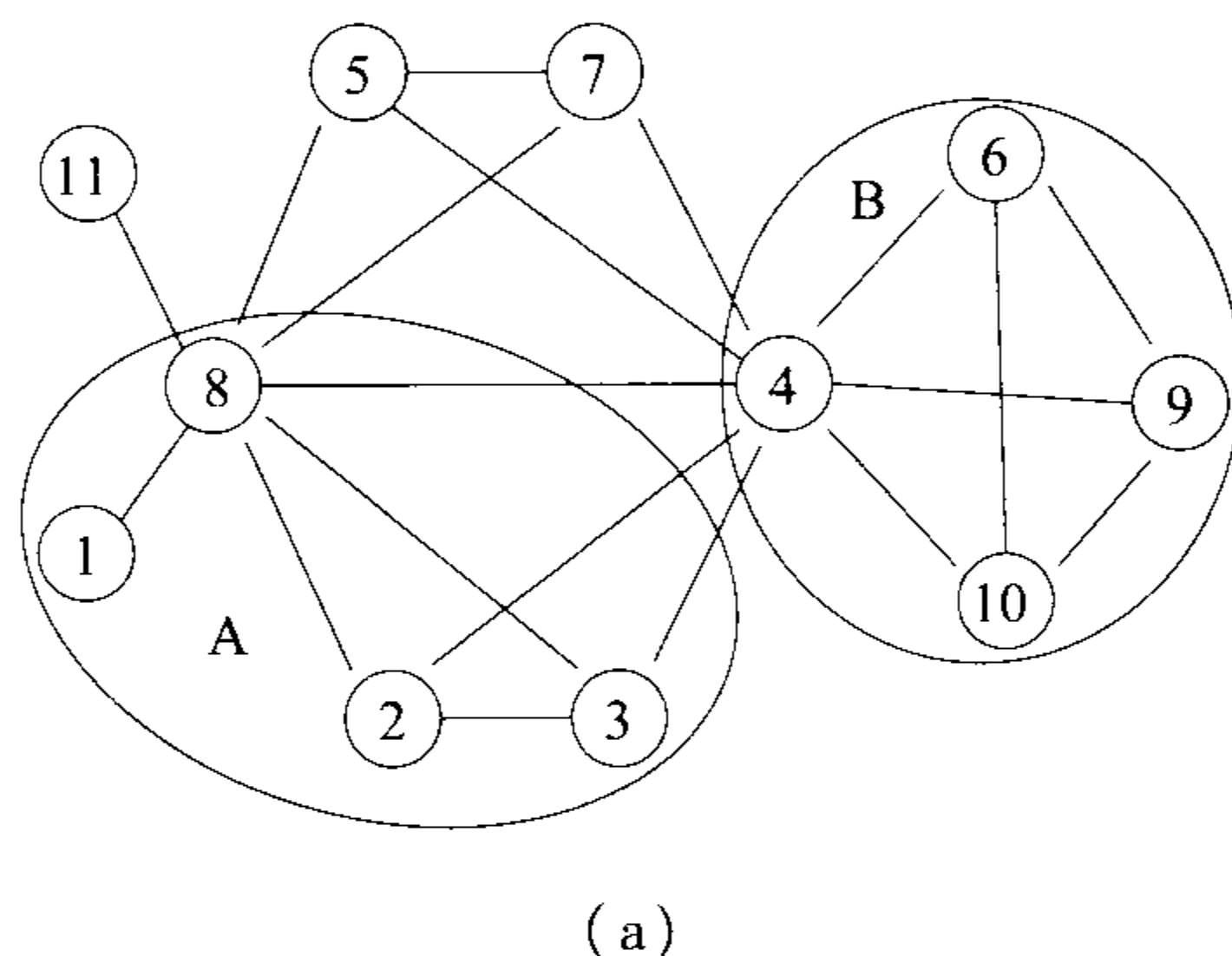


图3 闸阀子装配体联结图模型

## 3 优先约束矩阵的生成

优先约束法是根据零件在装配时存在的几何约束和物理约束关系,建立零件间的装配优先关系,并利用这种优先约束条件,生成设备的可行装配序列。

### 3.1 优先约束关系的表达

零件间的装配优先约束关系由优先关系矩阵表达,优先约束关系矩阵 $S$ 是一个 $N$ 阶矩阵,表示设备 $A$ 的 $N$ 个零件间的约束关系。 $S$ 中的元素 $S_{ij}$ 表示 $A$ 的第 $i$ 个零件与第 $j$ 个零件间的约束优先关系,并存在如下关系:

- 1) 若 $S_{ij}=0$ ,表示 $A$ 的第 $i$ 个零件与第 $j$ 个零件间不存在装配约束关系。
- 2) 若 $S_{ij}=1$ ,表示 $A$ 的第 $i$ 个零件与第 $j$ 个零件有装

配关系但不存在优先关系。

3) 若  $S_{ij}=2$ , 表示  $A$  的第  $i$  个零件必须在第  $j$  个零件之前拆卸。

4) 若  $S_{ij}=0.5$ , 表示  $A$  的第  $i$  个零件必须在第  $j$  个零件之后拆卸。

因此, 零件间的拆卸优先关系可用矩阵  $S$  表示<sup>[5]</sup>, 对矩阵  $S$  进行分析即可判断出设备的拆卸序列。

优先关系矩阵在联结图矩阵的基础上增加了零件间的优先关系信息, 增强了联结图矩阵包含的信息量。

### 3.2 优先约束矩阵的生成

依照上述假设, 在联结图模型的基础上, 通过分析有联结关系的零件间的优先约束关系, 可生成设备的优先关系矩阵。

对于闸阀模型, 从零件间的联结关系可以看出, 必须先拆除阀杆螺母之后才可以拆卸手轮, 因此阀杆螺母在拆卸中的序列要优先于手轮; 再如, 只有在拆卸掉紧固件 2 后才可以拆除阀座和垫片, 因此紧固件 2 在拆卸中的序列要优先于阀座和垫片。闸阀的优先约束关系矩阵如下:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 4 拆卸序列的生成

### 4.1 拆卸假设

在生成可行拆卸序列时, 为便于利用计算机进行计算和分析, 根据拆卸的原则, 建立如下拆卸假设:

- 1) 在拆卸的过程中不得损害零部件;
- 2) 每次拆卸操作只拆卸一个零件;
- 3) 每次拆卸操作后, 与被拆卸零件相关的约束全部解除;
- 4) 功能和作用相同的零件用一个零件表示;
- 5) 紧固件作为一个零件处理;
- 6) 参与拆卸的零件均被看作刚体处理, 零件在拆卸的过程中不发生变形。

依据以上假设, 通过分析设备零件间的优先约束关系, 可生成设备的可行拆卸序列。

### 4.2 拆卸序列的生成步骤

在设备拆卸优先关系矩阵的引导下, 生成设备初始拆卸序列的过程如下:

步骤: 1) 随机选择一个设备零件作为拆卸起点。

2) 检查步骤 1 选取的零件是否满足零件间拆卸优先约束关系, 如果不满足, 表明在当前状态选择的零件不能被拆卸, 转至步骤 1) 重新选取拆卸起点, 直到选取的零件合适为止。

3) 该设备零件拆卸完毕, 从联接图矩阵列中删除该零件。

4) 分析设备联接图模型, 选取与已拆卸零件有联接关系的零件, 并将这些零件置入列表  $C$  中作为待选零件。从列表  $C$  中随机选择一个零件作为下一个要拆卸的对象。

5) 检查步骤 4) 选取的零件是否满足拆卸优先约束关系, 如果不满足则从列表  $C$  中删除此零件, 并重新选择作为拆卸对象, 直到选取的零件合适为止。

6) 将步骤 5) 选取零件从联接图中删除, 并从联接矩阵中删除该列, 表示该零件已拆卸完毕。

7) 重复步骤 4) ~ 6), 直至装配体中所有的零件均被拆卸完毕, 生成一条合理拆卸序列为止。

8) 重复步骤 1) ~ 7) 直至生成的拆卸序列到达所需的数量为止。

初始拆卸序列生成流程图如图 4 所示

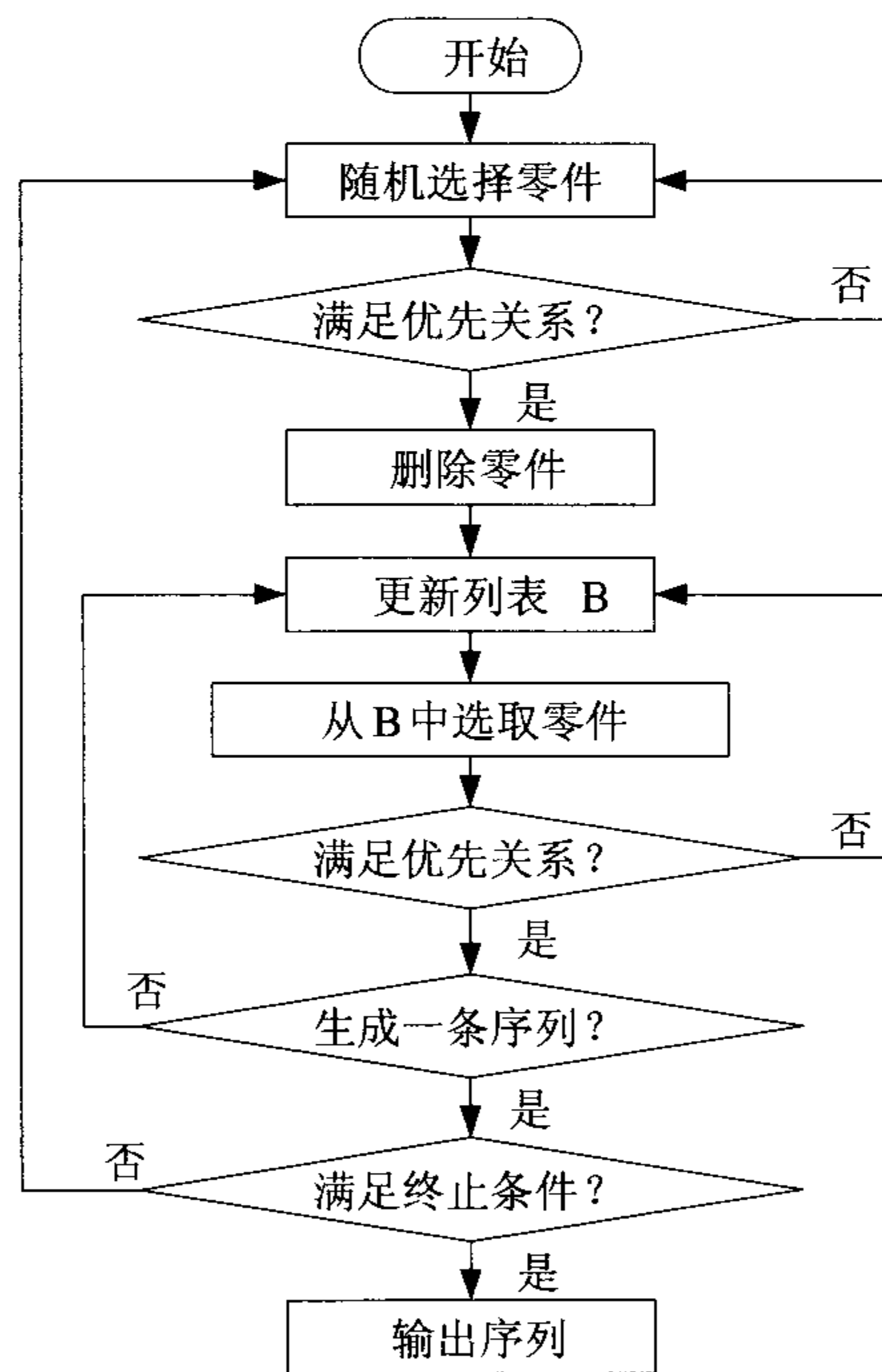


图 4 生成可行序列操作流程

### 4.3 闸阀的可行拆卸序列

按照上述方法, 利用 Visual C++ 2003.net 编程实现了设备初始拆卸序列的生成程序, 利用此程序生成的闸阀可行拆卸序列如下:

6 10 9 8 7 5 1 4 11 2 3, 6 10 9 8 7 5 4 1 11 2 3, 6 10 9 8 7 5 4 11 1 2 3, 1 2 3 6 10 9 8 7 5 4 11, 1 2 6 3 10 9 8 7 5 4 11, 1 6 2 3 10 9 8 7 5 4 11, 6 1 2 3 10 9 8 7 5 4 11, 6 10 9 1 8 7 2 5 3 4 11,

(下转第 46 页)

## 5 结论

对车体的模态分析可以了解车体的刚度分布情况,通过调整设计刚度分布,使车体的某些固有频率高于规定值,避免结构共振,缩短寿命。通过对本车的计算分析得知:

1) 无论吊不吊挂设备车体的抗菱形的能力最低,扭转、垂向、横向的刚度依次增大。

2) 吊挂设备能降低车体抵抗菱形变形、垂向弯曲的性能。

3) 方案二对很多振型频率的影响都大于其他两方案,可见简化模型时用刚性单元对车体局部刚度贡献较大。该方案适用于模拟处理与车体连接紧密且刚度很大的设备。

4) 附以适当的弹性模量、密度、截面积的 beam 单元能比 rigid 单元能更真实的模拟设备刚度。

5) 车体 1 阶垂向弯曲的固有频率满足  $> 10 \text{ Hz}$  的

要求。

### 参考文献:

- [1] 董孝卿,黄欣,吴宁. 高速铁路车辆辐射噪声特性初步研究[J]. 铁道机车车辆,2009,(4):42-45.
- [2] 滕万秀. 高速动车组车体结构强度及动态特性研究[D]. 成都:西南交通大学硕士论文.
- [3] 鲁寨军,田红旗,周丹. 270 km/h 高速动车模态分析[J]. 中国铁道科学,2005,(6):18-23.
- [4] 动车组 M2S 车体结构分析及车下悬挂设备布局优化[D]. 北京:北京交通大学硕士论文.
- [5] 范永庆,潘宏侠. 基于 ANSYS 某车体的有限元模态分析[J]. 机械管理开发,2009,(5):18-19.
- [6] 鲁寨军. 机车车体模态分析中用质量单元模拟设备重量的方法探讨[J]. 电力机车与城轨车辆 2003,(1):25-28.

收稿日期:2011-12-05

(上接第 34 页)

6 10 9 8 1 7 2 5 3 4 11,6 10 9 8 7 1 2 5 3 4 11 ,  
1 6 10 9 8 7 5 2 3 4 11,6 1 10 9 8 7 5 2 3 4 11 ,  
6 10 1 9 8 7 5 2 3 4 11,6 10 9 1 8 7 5 2 3 4 11 ,  
6 10 9 8 1 7 5 2 3 4 11,6 10 9 8 7 1 5 2 3 4 11 ,  
6 10 9 8 7 5 1 2 3 4 11,1 2 6 9 8 7 5 4 3 11 10 ,  
1 6 2 9 8 7 5 4 3 11 10,6 1 2 9 8 7 5 4 3 11 10 ,  
1 6 9 2 8 7 5 4 3 11 10,6 1 9 2 8 7 5 4 3 11 10 ,  
6 9 1 2 8 7 5 4 3 11 10,1 6 9 8 2 7 5 4 3 11 10 ,  
6 1 9 8 2 7 5 4 3 11 10,6 9 1 8 2 7 5 4 3 11 10 ,  
6 9 8 1 2 7 5 4 3 11 10,1 6 9 8 7 2 5 4 3 11 10 ,  
6 1 9 8 7 5 4 2 3 11 10,6 9 1 8 7 5 4 2 3 11 10 ,  
8 7 1 2 6 3 10 5 4 9 11,1 8 7 6 2 3 10 5 4 9 11 ,  
8 1 7 6 2 3 10 5 4 9 11,8 7 1 6 2 3 10 5 4 9 11 ,  
8 7 6 1 2 3 10 5 4 9 11,1 2 8 7 6 10 3 5 4 9 11 ,  
1 8 2 7 6 10 3 5 4 9 11,8 1 2 7 6 10 3 5 4 9 11 ,  
1 8 7 2 6 10 3 5 4 9 11,8 1 7 2 6 10 3 5 4 9 11 。

生成了设备的可行拆卸序列,就为寻找最优拆卸序列提供了基础,在此基础上采用优化方法即可得出最优的设备拆卸方案。利用遗传算法优化得到的最佳装配路径为:1,6,2,3,7,9,10,8,4,5,11。

## 5 结论

本文以闸阀为例,采用联结图模型建立了设备零件的

联结图模型和联结矩阵,并利用子装配体的概念对联结模型进行简化,减少参与序列规划的零件数目,避免因零件增多产生组合爆炸的问题。利用零件间的优先约束关系,生成零件的优先约束矩阵,基于设备的联结图模型和联结矩阵,利用优先约束关系,生成设备可行的拆卸序列,为设备拆卸序列优化提供基础。

### 参考文献:

- [1] 张林焯,童秉枢. 并行工程中的装配仿真系统及其关键技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(2):163-167.
- [2] Borujault A, LbaleA. Modeling an Assembly process[C]. IEEE International Conference Automation of Manufacturing Industry California,IEEE,1986:183-198.
- [3] C. Dini, M. Santochi. Automated Sequencing and Subassembly Detection in Assembly Planning [J]. Annals of CIRP,1992,88-100.
- [4] 田丰,等. 面向虚拟装配的三维交互平台[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(3):193-198.
- [5] 黄洁,杜平安,廖伟智. 基于配合约束的装配序列规划的遗传算法研究[J]. 计算机集成制造系统. 2007,4,(13):757-762.

收稿日期:2011-11-26