

基于割集的三维模型模块划分与表示方法研究*

Research on Module Partition and Representation Method for 3D Model Based on Cut Set

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 王延平 张杰 李原 闫振国

[摘要] 为了解决大规模图进行同构分析导致的组合爆炸问题,从降低图复杂度出发,本文提出了一种模块划分与分层表示方法。建立了表示三维模型的分层连接图表示方法,制定了模块划分的尺寸比例约束和连接强度约束,并在此基础上提出了基于割集的三维模型模块划分算法,以某型飞机襟翼为实例验证了方法的正确性和有效性。

关键词: 三维模型 模块划分 割集 分层连接图

[ABSTRACT] In order to solve combination explosion problem of large scale graph isomorphism, an approach for module partition and representation is presented to reduce graph scale. Firstly layered connection graph is built to express 3D model topological structure, and constraint rule of dimension scale and connection strength are established. On this basis, a module partition method based on cut set is presented. Finally validity and rationality of the method is demonstrated with an aircraft flaps example.

Keywords: 3D model Module partition Cut set Layered connection graph

随着航空设计领域中 CAD 工具的广泛应用出现了大量的产品三维模型,而重用这些模型中的设计经验对飞机快速设计具有重要意义。因此,在海量模型中寻找可参考和重用的三维模型也成为研究重点,当前的主要方法^[1]有:基于统计量、基于频域特征、基于图像比较、基于拓扑结构^[2]的模型检索方法。而上述方法均将模型作为整体,从全局角度对模型不同方面的特征进行提取和对比分析,并取得了较好的效果。但对于结构复杂的航空 CAD 模型来说,只进行模型整体的相似性分析还不够,因为模型各部分间的拓扑结构对功能也有重要影响。如飞机的尾翼和鸭

翼虽然形状、结构的相似度很高,但由于相对机翼位置的不同所产生的气动特性则不尽相同。因此,还需对模型的拓扑结构进行明确的表达,以便检索时进行模型拓扑结构的分析。

拓扑结构模型主要有层次模型和关联模型^[3]。层次模型主要表达零部件之间的层次关系,对连接关系未能充分表达;而关联模型则往往缺少层次信息。对于零件数目众多的航空 CAD 模型来说,若只采用关联模型进行表示,在以图同构方法分析模型结构相似性时会面临组合爆炸、搜索空间过大等问题。这就需要将模型划分成分层模块,在上层表示大粒度模块间的拓扑关系,下层表示小粒度模块间的拓扑关系。这样在每层中只存在少量的拓扑结构关系,降低了结构分析的复杂度。

为此,本文提出了一种基于割集的模块划分方法。建立了分层连接图结构用于模型拓扑结构的表示,并且制定了模块划分所遵循的约束规则,同时在此基础上提出了基于割集的模块划分算法。本文中所提到的方法可对复杂的航空 CAD 模型进行层层分解,并用分层连接图将其拓扑连接关系按自顶向下越来越精细的方式表示出来,作为后续模型结构相似性分析的基础。

1 模型拓扑结构的连接图表示

拓扑结构信息多采用图结构进行描述,本文在图结构的基础上增加了模块划分所需要的零件尺寸、模块关系和层次信息,建立了模型的分层连接图来表示结构。

1.1 基本连接图表示

在模块划分之前需通过对三维模型的解析,提取出零件间的连接关系和尺寸信息,以图结构进行表示。具体来说可定义为一个三元组 $M = \{P, L, A\}$, 其中 P 为零件或模块集合; L 为模型的连接关系集合, L_{ij} 表示零件或模块 P_i 和 P_j 之间的连接关系; $A(P_i)$ 表示 P_i 的尺寸属性,包含了 x 、 y 、 z 坐标方向上的最大最小值。表示如下:

* 国家 863 项目资助(2009AA044601)、西北工业大学基础研究基金(GBKY1003)资助。

$$A(P_i) = \left\{ \begin{array}{cc} \text{MAX}(x_i) & \text{MIN}(x_i) \\ \text{MAX}(y_i) & \text{MIN}(y_i) \\ \text{MAX}(z_i) & \text{MIN}(z_i) \end{array} \right\}. \quad (1)$$

1.2 分层连接图表示

模块划分后产生了模块关系和层次结构信息,需在连接图中增加层次结构和父子关系属性,并增加相应的模块节点、尺寸属性和连接关系,即将图扩展为五元结构 $M=\{P,L,A,H,F\}$ 。其中, H 表示层次信息, H_i 为第 i 层中的所有零件和模块。 F 表示零模块的父子关系,由节点的包含关系表示,如 $P_1 \supseteq \{P_2, P_3, P_4\}$ 表示 P_1 由 P_2, P_3, P_4 组成。

2 模块划分约束的建立

模块划分的依据因划分目的不同而有所区别,如根据用户需求、功能相关性、几何相关性、物理相关性^[4]等。本文从模型各部分的尺寸和结构关系出发,针对不同层次模块划分的粒度和模块耦合程度,建立尺寸比例约束和模块连接强度约束作为划分的依据。

2.1 尺寸比例约束

将大规模图结构划分为小规模图时,要求对粒度大小的评判有统一的标准。尺寸是模型的基本属性,且对各类模型具有通用性和统一性,以模块尺寸的大小作为粒度大小的评判也符合人们的习惯,因此本文从尺寸出发制定各层次的模块粒度大小的约束。

尺寸比例定义为模块尺寸占模型整体尺寸的比例,因为三维模型中 3 个坐标方向的尺寸具有同等的重要性,应以相同的权重进行比例的计算,计算公式如下:

$$B_s = \frac{1}{3} \sum_{x,y,z} \frac{\text{MAX}(x_s) - \text{MIN}(x_s)}{\text{MAX}(x_p) - \text{MIN}(x_p)}. \quad (2)$$

其中, B_s 表示零件或模块 P_s 所占模型的比例。

然后制定各层尺寸的约束范围,先根据模型复杂程度确定层次的数量,模型复杂时需划分成多个层次,简单时只需划分成较少的层次。用 K 表示层数,各层中的模块的尺寸比例范围可由

$$HF_1 = [0, \frac{1}{K}), HF_2 = [\frac{1}{K}, \frac{2}{K}),$$

...

$$HF_k = [\frac{K-1}{K}, 1] \text{ 得到。如将分层数定为 4, 则}$$

$$HF_1 = [0, 0.25), HF_2 = [0.25, 0.5), HF_3 = [0.7, 0.75), HF_4 = [0.75, 1]。$$

模块的坐标大小由所含零件所占据的空间范围决定,如式(3)确定:

$$A(P_s) = \left\{ \begin{array}{l} \text{MAX}(x_s) = \max\{\text{MAX}(x_i)\} \\ \text{MIN}(x_s) = \min\{\text{MIN}(x_i)\} \\ \text{MAX}(y_s) = \max\{\text{MAX}(y_i)\} \\ \text{MIN}(y_s) = \min\{\text{MIN}(y_i)\} \\ \text{MAX}(z_s) = \max\{\text{MAX}(z_i)\} \\ \text{MIN}(z_s) = \min\{\text{MIN}(z_i)\} \end{array} \right\}, \forall P_i \subseteq P_s \quad (3)$$

模块的坐标大小确定后可计算模块的尺寸比例,并根据每层的范围判断模块是否属于该层。表示如下:

$$B_s > \frac{j-1}{K}, P_s \in H_j \quad (4)$$

$$B_s \leq \frac{j}{K}, P_s \in H_j \quad (5)$$

在划分过程中,可能出现在划分出部分模块后,所剩余模型的尺寸比例小于该层的范围下限而无法继续划分的情况,这时将所剩余部分作为该层的一个模块。

2.2 连接强度约束

在进行模块划分过程中,会出现多个满足尺寸比例约束的模块划分方案,本文根据模块与周围零件的连接紧密程度来决定。一个模块与周围零件的连接关系越少(即连接强度低)说明其独立性强,更可能作为一个模块单独具有某些功能。因此可根据模块与周围零件连接边的数量来对模块划分的优劣进行判断,先计算各符合尺寸比例约束模块的连接强度(式(6)),优先划分出连接强度低的模块。

$$Q_{CS} = \sum_{i=1}^m Q(L_i) \quad (6)$$

$$Q(L_i) = \begin{cases} 1, IF & L_i \in CS \\ 0, IF & L_i \notin CS \end{cases}$$

其中, Q_{CS} 表示模块划分的割集 CS 的连接强度; $Q(L_i)$ 表示边 L_i 的连接强度,当边属于割集时强度为 1,否则为 0。

3 基于割集的模块划分算法

模块划分的方法有多种,如文献[5]中根据装配特征进行装配体划分。而对于表示为图结构的模型,可根据割集进行其结构的划分,割集的方法已广泛应用于通讯网络设计^[6]、装配顺序规划、故障诊断、安全分析等领域的图划分中。但随着图中顶点个数的增加,会导致割集数目呈指数增加^[7],因此需对割集的求解方法进行改进。

3.1 DFS 生成树的构建

每个割集都反映了一种图划分方式,对于表达为连接图的三维模型来说,割集可将其可能的模块划分完全反映,如果其中有满足模块划分约束的部分,则

将这部分划分为一个模块。本文采用深度搜索算法(DFS)产生连接图的生成树,再通过生成树树枝进行割集搜索,并将模块划分约束融入搜索过程中以排除不可行割集,避免割集数目的过快增长。首选给出割集和生成树的定义以及深度优先搜索的基本过程。

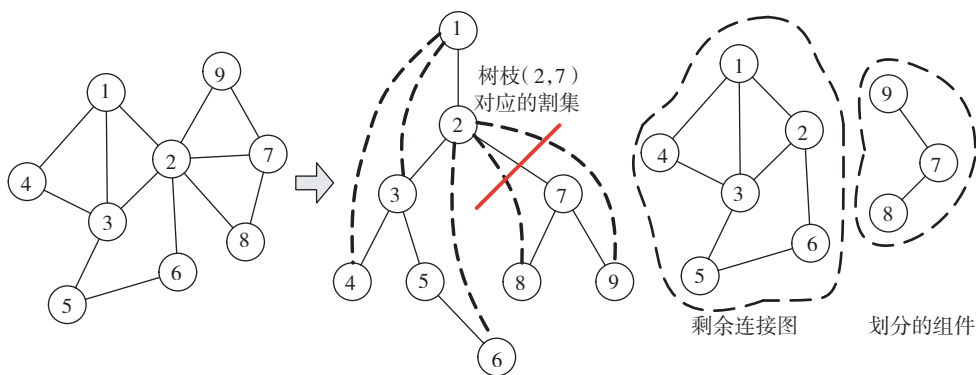


图1 深度优先搜索及模块划分
Fig.1 DFS and module partition

【定义1】割集: 设 S

是图 G 的一个边集,如果在连通图 G 中去掉 S 中的全部边后,图 G 分离为两个子图,且 S 的任意真子集无此性质,则边集 S 为图 G 的一个割集。

【定义2】生成树: 图 G 的一个生成子图 T 如果是一棵树,称它为图 G 的一颗生成树;生成树的边称为树枝, G 中非生成树的边称为弦。

【定义3】无关节点: 两个节点 v 和 w , 如果其中一个另一个的子孙,则说它们是有关节点,否则是无关节点。

【定义4】横跨边: 图 G 的DFS生成树中无关节点之间的边称为横跨边。

深度优先搜索^[8](DFS)是从某一节点 v_0 开始,搜索出一个与 v_0 直接相连的节点 v_1 ,记 v_1 父亲节点为 v_0 ,然后再找 v_1 的某个未搜索过的直接相连节点 v_2 。直到某节点 v_i 无法再向下搜索时,退回到它的父亲 v_{i-1} ,然后再找 v_{i-1} 的未搜索过的直接相连节点。

在深度优先搜索中,当节点 v 第一次被访问时,给其深度优先数 $DFN(v)$ 赋值。如果 v 是第 i 个被访问的节点,则对 $DFN(v)=i$ 。 $DFN(v)$ 表示了节点在DFS搜索访问过程中的先后顺序。深度优先搜索可将

连接图转化为一棵DFS生成树,如图1所示。

利用DFS生成树没有横跨边的特性可进行割集搜索,即根据生成树中一条树枝及其对应的弦,产生该图的一个割集。

3.2 模块的割集划分算法

在DFS生成树的基础上可进行割集的搜索和模块的划分,在连接图的DFS生成树的产生过程中,同步产生割集并进行模块尺寸比例和连接强度约束的判断,能有效识别出各分层中的模块,算法的具体流程如图2所示。

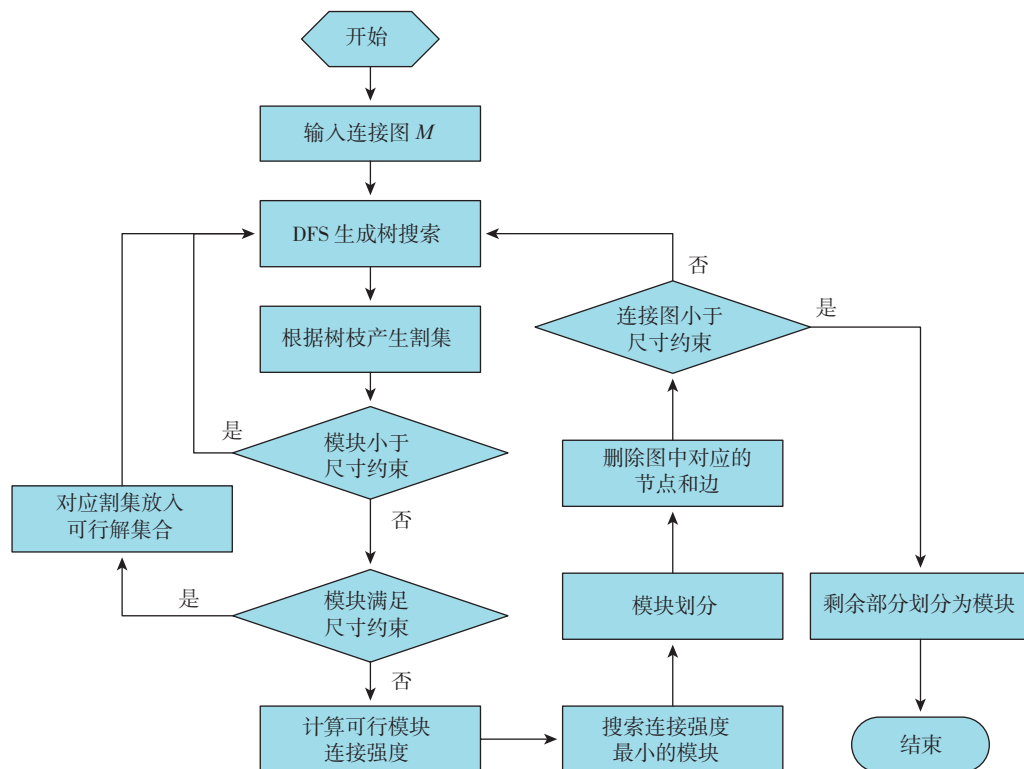


图2 模块划分算法的流程图
Fig.2 Flow chart of module partition algorithm

首先将模型转换得到的基本连接图 M 输入算法,对连接图进行深度优先搜索 (DFS) 获得生成树。然后,根据生成树的树枝获得割集,并在尺寸比例约束的判断下产生可行割集。再对割集进行连接强度计算,选择连接强度最小的割集进行模块划分。

如图 1 所示的模块划分过程,其中图由树枝边 (2,7) 对应的割集进行划分,右侧由部分(节点 7、8、9 组成)满足尺寸比例和连接强度约束划分为一个模块,而左侧部分的连接图需进行进一步的划分。

通过割集进行划分时,由于不同层次中尺寸范围不同,需要自上向下对连接图进行分层划分,在进行每层划分时每次产生一个模块,经多次划分直到整个连接图的所有节点均被划分到模块中。

具体算法过程如下:

(1) Step1: 输入连接图 M , 模块集合 $ZJ = \phi$, 层次范围 HF 。

(2) Step2: 对图 M 中的每个结点 P , 令其父节点 $Father(P) = \phi$, 节点访问标识 $Mark(P) = 0$, 对图 M 中的每个边 L , 令边访问标识 $Mark(L) = 0$, 将边 L 置于弦边集 $XL(L)$ 中, 可行割集集合 $KGJ = \phi$; $i = 1$ 。

(3) Step3: 任选一个节点 r 作为生成树的树根, 置 $DFN(r) = i$, $Mark(r) = 1$, 当前处理节点 $v = r$ 。

(4) Step4: 如果与 v 关联的任何边 L 都满足

$Mark(L) = 1$, 转到 Step8。否则选一条未查边 $L_{v,w}$, 并置 $Mark(L_{v,w}) = 1$ 。

(5) Step5: 若 $Mark(w) = 0$, 则 $i = i + 1$, $DFN(w) = i$, $Mark(w) = 1$, $Father(w) = v$, $v = w$, 转入 Step4; 若 $Mark(w) = 1$, 则将边 $L_{v,w}$ 置于弦边集 $XL(L_{Father(v),v})$ 中, $j = Father(v)$ 。

(6) Step6: 如果 $DFN(w) < DFN(j)$, 则 $L_{v,w}$ 置于弦边集 $XL(L_{Father(j),j})$ 中, $j = Father(j)$; 转入 Step6; 否则转入 Step4。

(7) Step7: 若 $Father(v) = 0$, 则转入 Step11, 否则将 $XL(L_{Father(v),v})$ 识别为割集。

(8) Step8: 计算 $XL(L_{Father(v),v})$ 划分出的 2 个部分的尺寸比例 B_1 、 B_2 , 如果 B_1 、 B_2 最少有一个满足公式 (4) 和 (5) 则将该割集置于可行割集集合 KGJ , $v = Father(v)$, 转入 Step4; 如果 B_1 、 B_2 均不满足公式 (5), 转入 Step9; 其他情况则 $v = Father(v)$, 转入 Step4;

(9) Step9: 按式 (6) 选择可行割集集合 KGJ 中连接强度最小的割集, 其划分出的 2 个部分的尺寸比例 B_1 、 B_2 中满足公式 (4) 和 (5) 的作为模块并放入集合 ZJ , 然后删除图 M 中的模块的节点。

(10) Step10: 图 M 不满足公式 (4), 则将图 M 作为模块放入 ZJ , 转入 Step11; 否则将图作为输入, 转

表1 零件属性表

名称	符号	MAX(x_i)-MIN(x_i)		MAX(y_i)-MIN(y_i)		MAX(z_i)-MIN(z_i)		总比例 B
		长 /m	比例	宽 /m	比例	高 /m	比例	
襟翼整体	P	4.48	1.00	1.06	1.00	0.20	1.00	1.00
前梁	P_1	4.48	1.00	0.18	0.17	0.20	1.00	0.72
后梁	P_2	4.48	1.00	0.11	0.10	0.12	0.60	0.57
上壁板	P_3	4.46	1.00	0.57	0.54	0.00	0.00	0.51
下壁板	P_4	4.46	1.00	0.56	0.53	0.00	0.00	0.51
前缘 1 段	P_5	3.15	0.70	0.16	0.15	0.20	1.00	0.62
前缘 2 段	P_6	1.12	0.25	0.16	0.15	0.20	1.00	0.47
后缘上蒙皮	P_7	4.48	1.00	0.35	0.33	0.00	0.00	0.44
后缘下蒙皮	P_8	4.48	1.00	0.36	0.34	0.00	0.00	0.45
后缘封严梁	P_9	4.48	1.00	0.06	0.06	0.11	0.55	0.54
后缘蜂窝 1	P_{10}	1.07	0.24	0.28	0.26	0.09	0.45	0.32
后缘蜂窝 2	P_{11}	1.89	0.42	0.28	0.26	0.05	0.25	0.31
后缘蜂窝 3	P_{12}	1.52	0.34	0.28	0.26	0.06	0.30	0.30
外侧端肋	P_{13}	0.03	0.01	0.71	0.67	0.20	1.00	0.56
摇臂加强肋	P_{14}	0.05	0.01	0.55	0.52	0.20	1.00	0.51
加强肋 1	P_{15}	0.03	0.01	0.55	0.52	0.20	1.00	0.51
加强肋 2	P_{16}	0.03	0.01	0.55	0.52	0.20	1.00	0.51
普通肋	P_{17}	0.06	0.01	0.55	0.52	0.20	1.00	0.51
端肋 1	P_{18}	0.05	0.01	0.55	0.52	0.20	1.00	0.51
端肋 2	P_{19}	0.03	0.01	0.71	0.67	0.20	1.00	0.56

入 Step2。

(11) Step11: 结束, 输出模块集合 ZJ。

4 实例分析

以某型飞机的部分襟翼为例, 具体情况见表 1 对其 CAD 模型进行拓扑结构分层划分与表示。

首先将模型表示成零件集合、连接关系集合和零件属性集合。

零件尺寸属性表示为 A , 由于该属性是由坐标表示不够直观, 将各坐标的最大、最小值相减得到最大长、宽、高。另外, 根据尺寸比例公式(2)计算比例 B 。

然后, 对连接图进行简化。将 $P_{13} \sim P_{19}$ 7 个肋零件作为一个整体翼肋模块, 用符号 P_{20} 进行表示。 $P_{11} \sim P_{12}$ 作为一个后缘蜂窝, 用符号 P_{21} 进行表示。

再对简化后的连接图(图 3)采用分层模块识别算法。由于实例规模不大层次数 K 设为 3, 则各层范围分别为第 1 层 $[0, 0.33]$; 第 2 层 $[0.33, 0.66]$; 第 3 层 $[0.66, 1]$ 。

然后使用基于割集的模块划分算法进行具体的模块划分。其中深度搜索算法(DFS)产生的连接图生成树如图 3 所示。

在 DFS 生成树的基础上通过 4 次割集划分, 可将襟翼整体划分为 5 个部分。其中进行划分的割集分别为第 1 次 $\{L_{2,9}\}$ 、第 2 次 $\{L_{2,9}, L_{1,6}\}$ 、第 3 次

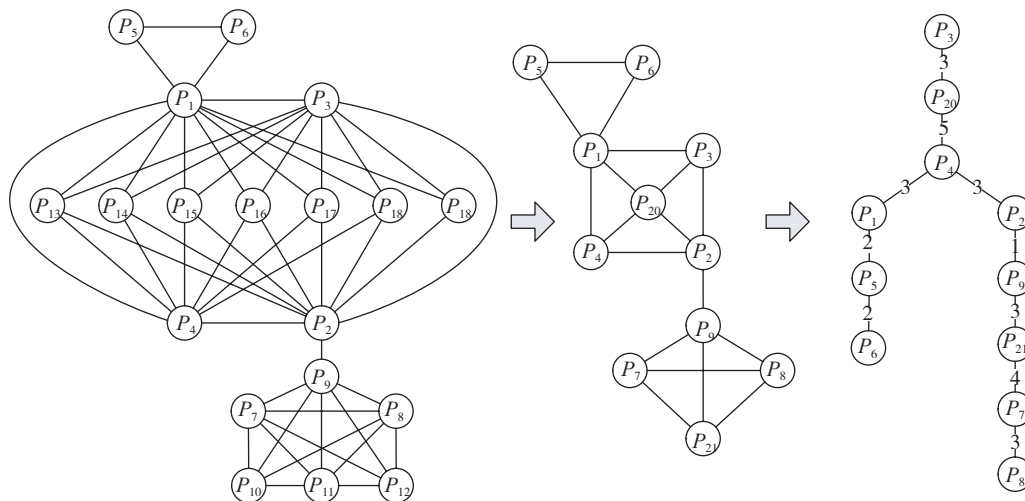


图3 实例连接图的简化
Fig.3 Simplification of attribute adjacent graph

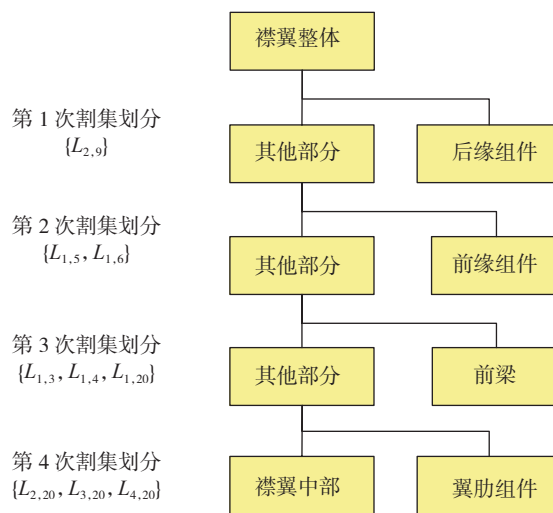


图4 襟翼第3层划分过程
Fig.4 Module partition of flap's third layer

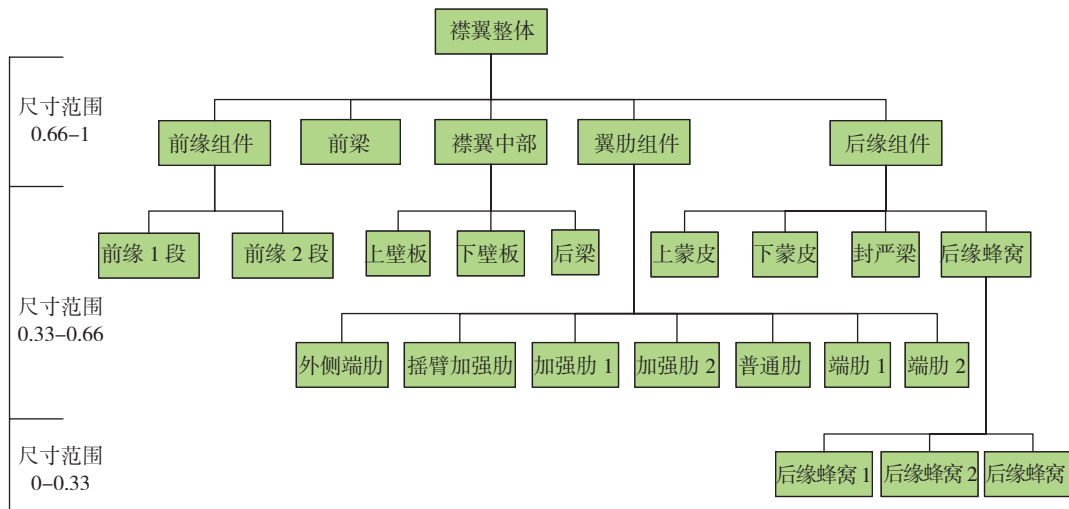


图5 襟翼的分层结构
Fig.5 Layered structure of flap

表2 模块属性表

名称	符号	MAX(x _i)-MIN(x _i)		MAX(y _j)-MIN(y _j)		MAX(z _i)-MIN(z _i)		总比例 B
		长	比例	宽	比例	高	比例	
翼肋模块	P ₂₀	4.47	1.00	0.03	0.03	0.20	1.00	0.68
后缘蜂窝	P ₂₁	4.48	1.00	0.28	0.26	0.09	0.45	0.57
后缘模块	P ₂₂	4.48	1.00	0.34	0.32	0.12	0.60	0.64
前缘模块	P ₂₃	4.48	1.00	0.15	0.14	0.20	1.00	0.71
襟翼中部	P ₂₄	4.48	1.00	0.75	0.71	0.20	1.00	0.90

{L_{1,3}, L_{1,4}, L_{1,20}}、第4次 {L_{2,20}, L_{3,20}, L_{4,20}}。获得的第3层的5个模块:前缘模块、前缘、襟翼中部、翼肋模块、后缘模块。划分过程如图4所示。

再对各个模块进行割集划分,可得到如图5的分层表示结果。可以看出本文算法将前梁单独作为襟翼整体的下级,而实际中一般将前梁划分到襟翼中部模块中。其他部分本文算法得到的产品分层表示结果与实际中手工划分结果相同。

最后将模块识别产生的结果,用分层连接图表示如图5。将识别出的模块信息添加到集合中,零件集合P中添加识别出的模块P₂₀, P₂₁, P₂₂, P₂₃, P₂₄, 添加连接关系L_{1,20}, L_{2,20}, L_{3,20}, L_{4,20}, L_{9,21}, L_{7,21}, L_{8,21}及相应属性信息,如表2所示。

同时建立相应的层次关系H={H₁, H₂, H₃}和父子关系F={F₁, F₂, F₃, F₄, F₅, F₆}。

5 结束语

本文对三维模型拓扑结构的模块划分与分层表示方法进行了研究,为了将复杂的模型结构进行清晰的表达,建立了三维模型拓扑结构的分层连接图表示方法,通过在DFS生成树的搜索过程中融入模块划分约束,避免了割集数量的快速增长,改善了模块划分的效率,并给出了基于割集的模块划分方法算法的具体过程,模块划分的结果可用于基于无向图理论进行三维模型拓扑结构相似性分析,以及产品的模块化设计和管理中。

参考文献

[1] Iyer N, Jayanti S, Lou K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. Computer-Aided Design 2005(37):509-530.
 [2] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, et al. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM Siggraph, Los Angeles, CA, USA 2001: 203-212.
 [3] 朱大群, 赵良才, 张俊. 基于层次等级关联关系模型的装配序列规划. 华东船舶工业学院学报, 2000, 14(1): 71-75.
 [4] 潘双夏, 高飞, 冯培恩. 批量客户化生产模式下的模块划分方法研究. 机械工程学报, 2003, 39(7): 1-6.

[5] 曹德君, 田锡天, 耿俊浩, 等. 在装配序列规划中子装配体识别方法研究. 机械设计与制造. 2009(10): 126-128.
 [6] 张先迪, 李正良. 图论及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2005.
 [7] 姚寿文, 鲁立鹏, 李慎龙. 基于割集算法和子装配体识别的装配顺序规划. 机床与液压. 2008, 36(9): 6-12.
 [8] 戴一奇, 胡冠章, 陈卫. 图论与代数结构. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(责编 深蓝)

(上接第76页)

从试验现象及表2的试验结果可以看出:

(1) 裂纹和破孔修补试验件均为焊点首先发生剪切破坏, 然后试件在危险截面部位被剪断。绝大多数试件断裂面均穿过点焊熔核, 这表明在点焊熔核内部存在一定的应力集中和组织缺陷^[4]。

(2) 钛合金裂纹损伤经单面点焊加强后, 其强度恢复率能达到无损伤件的86.07%, 钛合金破孔损伤经单面点焊加强后, 其强度恢复率能达到无损伤件的86.95%, 均满足飞机结构原位修复的强度需要。

4 结束语

近年来, 点焊技术已成为一种重要的连接技术。钛及钛合金点焊修复主要用于α型钛合金(TA7等)和α+β型钛合金(TC4等), 由于其热物理性能与奥氏体不锈钢近似, 故点焊焊接性良好^[5]。尤其是单面点焊, 由于操作简便、适用范围广和受结构限制小等显著特点, 非常适用于飞机钛合金结构裂纹、缺口、破孔和刚度失稳等损伤原位快速修复的技术要求。

参考文献

[1] 代永朝, 郑立胜. 飞机结构检修. 北京: 航空工业出版社, 2006.
 [2] 董宝明, 郭德伦, 张田仓. 钛合金焊接结构在先进飞机中的应用及发展. 航空材料学报, 2003, 10(23): 240-244.
 [3] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 2008.
 [4] 杨思乾, 张勇, 李京龙. TC3钛合金的双脉冲点焊试验研究. 航空制造技术, 2002(11): 45-48.
 [5] 王亚荣, 张忠典, 冯吉才. 电阻点焊过程中动态电阻的变化规律. 电焊机, 2006(2): 42-46.

(责编 三丰)