

doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.015

一种快速轻量总装装配方法

邬堂珂, 郭连水

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 为提高总装装配效率, 基于 CREO Parametric 3 维建模软件, 开发一种快速轻量总装装配系统。提取部件模型的表面生成轻量化模型, 通过模型参数建立轻量化模型与部件模型顶点、边、面的一一对应关系, 使用轻量化模型替换部件模型进行装配, 从空间位置的映射和装配约束关系的映射 2 方面对实体模型的自动映射进行阐述。分析结果表明: 该方法能满足快速轻量总装装配的需要, 自动将轻量化整机模型下的轻量化模型映射为实体部件模型。

关键词: 总装装配; 轻量化模型; 自动映射

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

A Fast and Lightweight Assembly Method

Wu Tangke, Guo Lianshui

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve assembly efficiency, a fast and lightweight assembly system is developed based on CREO Parametric three-dimensional modeling software. The lightweight model is generated by extracting the surface of the component model. The one-to-one correspondence between the lightweight model and the vertices, edges and surfaces of the component model is established by model parameters. The lightweight model is used to replace the component model for assembly. The automatic mapping of the entity model is carried out from two aspects: mapping of space position and mapping of assembly constraints. The analysis results show that the method can meet the needs of rapid and lightweight assembly, and automatically map the lightweight model under the lightweight machine model to the solid component model.

Keywords: final assembly; lightweight model; automatic mapping

0 引言

装配建模作为计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 的重要环节, 其操作过程是自下向上, 由局部到整体^[1], 按照装配阶段分合件装配、组件装配、部件装配和总装装配, 每一装配阶段生成的装配单元作为子模型参与下一阶段的装配, 最终得到整机模型。到总装装配阶段, 参与装配的部件模型多为结构复杂、数据量巨大的大模型, CAD 系统对部件模型进行加载显示耗时长, 在 CAD 系统中对部件模型进行旋转、平移、缩放等交互操作出现卡顿甚至卡死的现象, 装配效率随着模型数据量的增加而降低。

国内外学者对提高装配效率方法进行了大量研究: 美国的 Kitamura 等^[2]提出了装配导航技术, 通过提取与装配约束相匹配的几何元素, 使得装配约束的元件项与装配项几何元素更容易被拾取; Fa M 教授等^[3]提出通过分析模型相互关系及运动约束实现装配约束的智能添加方法; 国内学者庄晓等^[4]提出通过对模型约束关系进行识别, 采用“搭积木”

的方式对模型装配约束关系进行推理以完成装配约束自动添加的方法。以上方法虽然在一定程度上可以提高装配效率, 但不能从根本上解决模型数据量与装配效率之间的矛盾, 并且其算法运行速度和正确率会随着模型复杂程度的增长而急剧降低, 不能用于实际工程。对大模型进行轻量化处理, 以减少其在交互装配建模过程中的数据量, 成为提高装配效率的另一个解决思路。

经过查阅文献, 笔者发现模型轻量化 (模型简化) 的方式有很多, 包括三角网格简化、细小特征抑制、孔洞填充和模型“抽壳”处理等, 方式虽然不同, 目的只有一个: 减少模型的文件尺寸, 加快模型处理速度。关于 CAD 模型轻量化处理方法, 浙江大学的薛辉^[5]提出了模型细节面抑制简化技术以实现将 3 维模型信息“降维”至 2 维轮廓进行分析和简化; 韩国学者 Youngjae 等^[6]提出了一种网络覆盖 (Wrap Around) 方法可以得到基于边界表示模型 (B-Rep) 的一系列细节层次模型 (LOD); 美国的 Cigonin 教授等^[7]提出了基于三角网格的模型简化

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-03-13

作者简介: 邬堂珂 (1994—), 男, 四川人, 硕士, 从事工业工程、计算机辅助设计研究。E-mail: 254472726@qq.com.

方法采取网格渐变的方式光滑模型细节特征以减小模型数量。以上方法只能针对零件模型进行轻量化处理，不能用于装配体模型的轻量化处理，并且会使模型外形发生改变从而造成模型失真，不可用于后继的装配建模；因此，笔者基于前人的研究成果，提出了大模型快速轻量总装装配方法。

1 模型轻量化处理

1.1 模型轻量化原理

基于特征建模的 3 维模型数据不仅包括几何模型，而且反映了设计模型、制造模型^[8]；不仅存储静态的产品标准、规范等信息，而且涉及动态产品设计、制造过程信息^[9]。模型特征划分如表 1 所示。

表 1 模型特征分类详述

特征类型	具体内容
形状特征	模型中有一定拓扑关系和一组几何元素所构成的一个特征形状 包括用于模型构造零件的主体形状的主体特征和对主体特征进行局部修饰的辅形状特征
精度特征	用于表达模型各要素尺寸公差、形状公差、位置公差和表面粗糙度等精度要求的信息
管理特征	用于描述零件的管理信息
技术特征	用于描述模型的性能、功能的信息
材料特征	表达模型材料类型、理化指标等的信息集合
装配特征	表达模型在装配过程中所需用到的信息

装配建模过程需要参考模型的外形特征设置空间位置并添加装配约束，模型的其他特征数据并不为装配建模提供依据，在装配建模过程中也不涉及这些特征数据的更改；因此，模型轻量化处理就是保留模型的形状特征，删除模型的其他特征信息，以减小模型数据量的过程。

1.2 模型轻量化方法

零部件模型的轻量化是装配体模型轻量化的基础。首先获取零部件的所有表面特征以及表面特征的空间位置，然后创建表面特征的复制几何特征，最后根据各表面的空间位置，将面的复制几何特征拼接成一个与原实体零部件外形一致的空壳轻量化模型。对于实体装配体模型，首先对模型树进行深度优先遍历，判断子模型是否已经被轻量化。如果子模型已经被轻量化，在轻量化模型库中将轻量化子模型进行加载并参考对应实体模型空间位置固定装配到轻量化大装配体；如果子模型未被轻量化，判断子模型类型。如果子模型类型为装配体模型，继续对其进行深度优先遍历，重复上述步骤；如果子模型类型为零部件模型，对其进行轻量化处理，然后参考实体装配体中零部件的空间位置，将轻量

化零部件固定装配到轻量化装配体中对应位置。遍历完实体装配体模型下所有子模型，完成实体装配体轻量化处理。将生成的轻量化零部件模型和轻量化装配体模型保存到轻量化模型库中。装配体轻量化处理流程如图 1 所示。

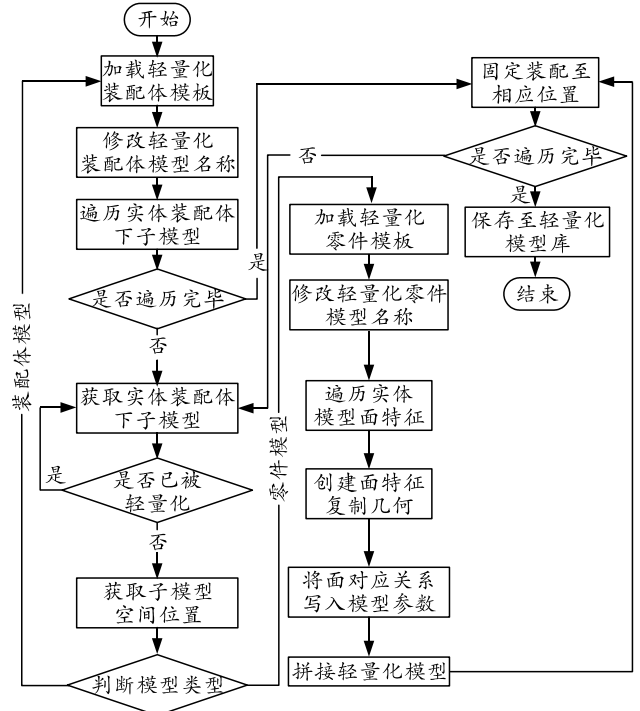


图 1 装配体模型轻量化处理流程

1.3 建立轻量化模型与实体模型的对应关系

模型轻量化处理还需要建立轻量化模型与实体模型之间的对应关系，用于轻量化模型到实体模型的映射。轻量化模型与实体之间的对应关系有 2 层含义：1) 在模型层面将轻量化模型映射到其对应的实体模型，即可通过轻量化模型信息在实体模型库中找到其对应的实体模型；2) 将轻量化模型中的图元对应到实体模型上的图元，因此，需要建立轻量化模型与实体模型中顶点、边、面的对应关系。实体模型与轻量化模型的对应关系如图 2 所示。

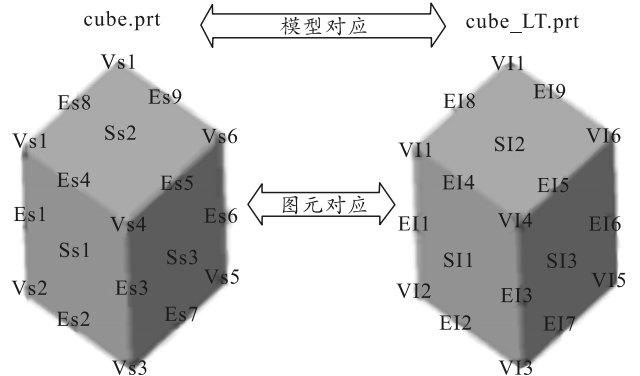


图 2 实体模型与轻量化模型对应关系

在实体模型库中模型名称与模型类型作为模型的唯一标识，将实体模型的模型名称和模型类型作为参数写入实体模型，建立轻量化模型到实体模型的模型级别对应关系；模型的顶点、边、面使用特征 id 作为标识，每个体素元具有唯一特征 id 号，建立轻量化模型与实体模型图元对应关系集合：

$$\begin{aligned} \{S_s : S_l; E_s : E_l; V_s : V_l\} &= \{S_{s1} : S_{l1}, S_{s2} : S_{l2}, \dots, \\ S_{sn} : S_{ln}; E_{s1} : E_{l1}, E_{s2} : E_{l2}, \dots, E_{sm} : E_{lm}; V_{s1} : V_{l1}, \\ V_{s2} : V_{l2}, \dots, V_{si} : V_{li}\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中： S_s 为实体模型曲面集； S_l 为轻量化模型曲面集； E_s 为实体模型的边集； E_l 为轻量化模型的边集； V_s 为实体模型的顶点集； V_l 为轻量化模型的顶点集； S 为模型曲面特征标识； E 为模型边的特征标识； V 为模型顶点的特征标识。

基于边界表示实体建模方法 (B-Rep)，3 维模型记录实体所有几何信息和拓扑信息^[10]，以任一图元作为输入，可以得到该图元具有拓扑关系的其他图元。在图 2 中， $\{V_{s4}\} = \{S_{s1}, S_{s2}, S_{s3}\}$ ， $\{E_{s4}\} = \{S_{s1}, S_{s2}\}$ ，通过面可以找到构成该面的边和顶点，通过边和顶点可以找到相邻的面。对图元对应关系集合进行化简，使用轻量化模型与实体模型面的对应关系可能表示所有图元对应关系：

$$\{S_s : S_l; E_s : E_l; V_s : V_l\} = \{S_{s1} : S_{l1}, S_{s2} : S_{l2}, \dots, S_{sn} : S_{ln}\} \quad (2)$$

将图元对应关系作为参数写入轻量化模型中，轻量化模型对应关系参数如图 3 所示。COPY_

$${}^o_q T = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma & a \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & b \\ -\cos\alpha & \cos\beta\sin\gamma & c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据轻量化模型变换矩阵，将实体子模型变换至相同空间位置。

2.2 装配约束关系的映射

解析轻量化子模型装配树，获取装配约束的装配项和元件项。装配约束分为基于图元的装配约束和基于基准的装配约束 2 类。基于图元的装配约束参考模型上的顶点、线、面进行装配约束的添加，如顶点、边、面的重合、距离和平行等装配约束。基于基准的装配约束参考模型的基准参考特征进行装配约束的添加，如基准坐标系、基准面、基准轴、基准点的重合、距离和平行等装配约束。基于图元的装配约束强调模型与模型之间的相互关系；基于基准的装配约束强调模型的空间位置。在映射装配

GEOM_ORIGIN 参数记录对应实体模型名称，COPY_GEOM_ORIGINE_TYPE 参数记录对应实体模型类型，ORG_SURF_IDS 参数记录对应实体模型中面的特征标识，COPY_SURF_IDS 参数记录轻量化模型中面的特征标识，且与 ORG_SURF_IDS 的记录信息一一对应。

名称	类型	值	指定
COPY_GEOM_ORIGIN	字符串	802049010043432	
COPY_GEOM_ORIGINE_TYPE	字符串	Part	
ORG_SURF_IDS_1	字符串	79;81;83;85;87;89;91;93;113;117;121;125;156;158;187;189;213;215;239;241;273;275;	
ORG_SURF_IDS_2	字符串	299;301;325;327;351;353;696;701;705;710;713;718	
COPY_SURF_IDS_1	字符串	41;42;43;44;45;46;47;48;49;50;51;52;53;54;55;56;57;58;59;60;61;62;63;64;65;66;67	
COPY_SURF_IDS_2	字符串	;68;69;70;71;72;73;74	

图 3 轻量化模型对应关系参数

2 实体模型自动映射

2.1 空间集团的映射

快速装配建模完成后，需要将轻量化大装配体下的轻量化子模型自动映射为其对应的实体模型并保留空间位置信息和装配约束关系。首先加载装配体模板，修改名称为实体大装配体名称。然后遍历轻量化大装配体下轻量化子模型，读取轻量化子模型参数，得到其对应实体模型的模型名称和模型类型，根据实体模型名称和模型类型将实体模型从实体模型库中加载至实体大装配体。获取轻量化子模型空间位置坐标，轻量化子模型坐标为 (a, b, c) ，绕 OX 轴、 OY 轴、 OZ 轴旋转角度分别为 α 、 β 、 γ ，则轻量化子模型的齐次变换矩阵为：

约束时，判断轻量化子模型装配约束装配项与元件项的装配类型。如果装配约束类型为基于基准的装配约束，在实体装配体中实体子模型空间位置创建坐标系，并与实体子模型默认坐标系按照坐标系重合进行装配；如果装配约束类型为基于图元装配约束，读取轻量化模型参数得到图元对应关系集合 $\{S_s : S_l; E_s : E_l; V_s : V_l\} = \{S_{s1} : S_{l1}, S_{s2} : S_{l2}, \dots, S_{sn} : S_{ln}\}$ ，获取该约束的参考图元，并判断参考图元类型。如果参考图元为面， $f_s(S_l) = S_s$ ，通过图元关系集合直接获取实体模型上对应面；如果参考图元为线， $f_e(E_l) = (S_{lm}, S_{ln}) \xrightarrow{f_s(S)} (S_{sm}, S_{sn}) = E_s$ ，获取与该线相邻的 2 个面，通过轻量化模型面找到对应实体模型面，由 2 个相邻实体面获取实体模型上的线；如

果参考图元为顶点， $f_v(V_1) = (S_{1m}, \dots, S_{1n}) \xrightarrow{f_s(S)} (S_{sm}, \dots, S_{sn}) = V_s$ ，获取与该顶点相邻的所有面，通过轻量化模型面找到对应实体模型面，所有实体面的相同顶点即为实体模型上的对应顶点。最后将装配树中的装配项与元件项的装配约束参考由轻量化子模型上的 S_1 、 E_1 、 V_1 替换为实体模型上的 S_s 、 E_s 、 V_s ，保留装配参考其他信息，实现装配约束的映射。实体模型映射功能流程如图 4 所示。

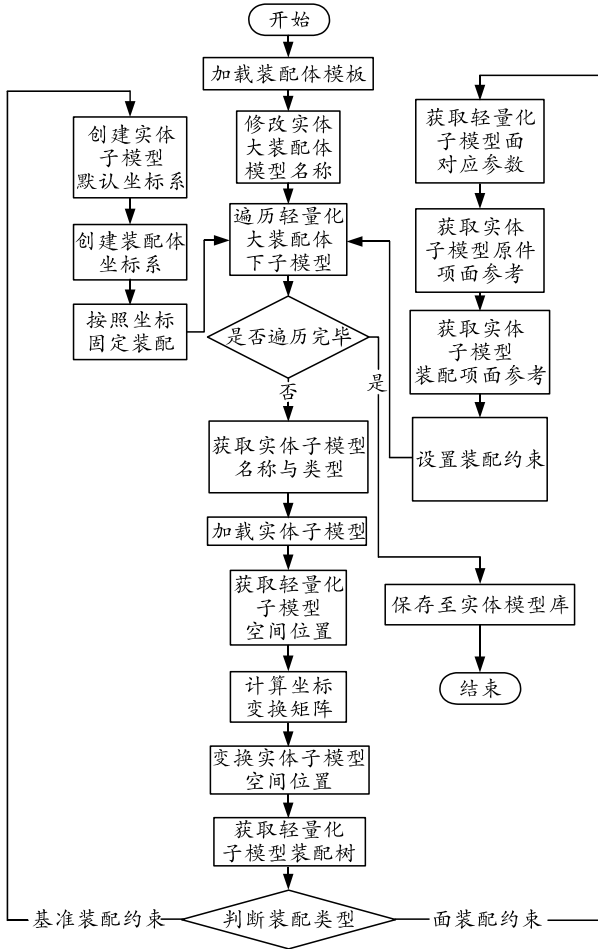


图 4 实体模型自动映射流程

3 运行实例与分析

3.1 模型轻量化压缩比

测试结果表明，模型轻量化平均压缩比为 20%，能够满足轻量化快速装配建模的需求。模型轻量化压缩比测试数据如表 2 所示。

3.2 模型轻量化实例

模型轻量化前后对比如图 5 所示，轻量化模型及其子模型以“_LT”为后缀进行命名，保留与部件模型相同的外形和模型树结构。轻量化前模型大小为 495 M，轻量化后模型大小为 90 M，压缩比为 18%；轻量化前模型的打开时间为 42 s，轻量化后模型的打开时间为 9 s；轻量化前模型的平移延时为 2.01 s，旋转延时为 1.98 s，缩放延时为 3.03 s；轻量化后模型的平移延时为 0.31 s，旋转延时为 0.48 s，缩放延时为 0.93 s，对模型进行各项操作没有出现卡顿现象，模型的交互装配操作效率显著提高。

3.3 实体模型自动映射实例

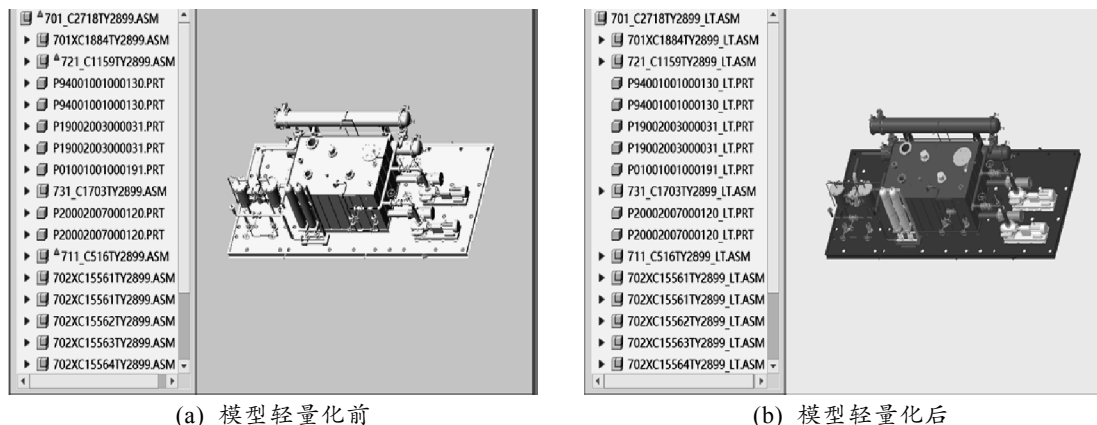
实体模型自动映射前后对比如图 6 所示，实体整机模型保留了轻量化整机模型中添加的子模型空间位置信息和装配约束关系。

3.4 不足与改进

由于系统采取提取模型所有表面的方法生成轻量化模型，没有考虑省略转化隐藏在模型内部的零件和面，造成了模型轻量化处理耗时长，存在无效转化的情况，浪费了计算机资源，轻量化模型压缩比还有进一步降低的空间。下一步将改进模型轻量化处理算法，识别模型隐藏的内部零件和面，只转化模型可视的零件，提高模型轻量化处理效率，降低轻量化模型的压缩比。

表 2 模型轻量化处理压缩比

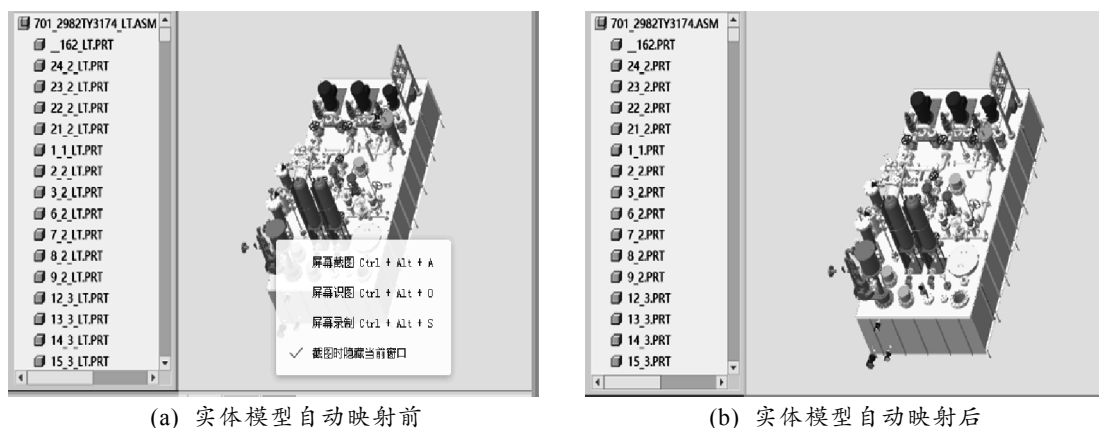
序号	操作	图号	轻量化处理压缩比				
			装配数量	子项数量	处理前/M	处理后/M	压缩比/%
1	装配机柜	DKBA41063915_ZZ	1	13 288	804.0	237.0	29.50
2	装配线卡 X20	CR58EPXFB_ZP	20	662	397.0	65.10	16.40
3	装配主控 X2	CR58MPUN_ZZ	2	581	173.0	36.40	21.00
4	装配网板 X8	CR58SFU1TF_ZZ	8	454	188.0	32.10	17.10
5	装配电源柜	DKBA41043934_ZZ	1	2 315	172.0	43.90	25.50
6	装配造型件	DKBA68635286	1	145	24.7	4.82	19.50
7	装配造型件	DKBA68635189	1	151	22.3	8.88	39.80
8	装配造型件	DBKA68635294	1	215	45.2	11.80	26.10
9	装配侧门	DKBA410207234	1	631	28.5	7.37	25.90
10	装配后门	DKBA41208004	1	61	66.1	6.53	9.90
11	装配前门	DKBA41208513	1	290	73.7	16.20	22.00



(a) 模型轻量化前

(b) 模型轻量化后

图 5 模型轻量化前后对比



(a) 实体模型自动映射前

(b) 实体模型自动映射后

图 6 实体模型自动映射前后对比

4 结论

笔者开发的快速轻量总装装配系统能够在保持模型外观不变的情况下将数据量压缩至原来的 20%，满足快速轻量总装装配的需要，还能够自动将轻量化整机模型下的轻量化模型映射为实体部件模型，并且保留空间位置信息和装配约束关系，生成实体整机模型以用于后续设计生产环节。笔者提出的方法和系统已在华为得到初步应用，将为提高总装装配效率提供有效可行的解决方案。

参考文献：

- [1] 于建明. 装配建模及装配顺序分层规划方法研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(4): 671-673.
- [2] KITAMURA Y, YEE A, KISHINO F. A sophisticated manipulation aid in a VE based on the dynamic constraints among object faces[C]//IEEE International Conference on Systems, Piscataway, NJ: IEEE, 1995: 13-15.
- [3] MINGXIAN F. Direct 3 D Manipulation Techniques for Interactive Constraint-based Solid Modelling[J].

Computer Graphics Forum, 1993, 12(3): 237-248.

- [4] SHANGHAI, XUEYU R. Rapid Assembly Modeling within Virtual Environment[J]. CHINA MECHANICAL ENGINEERING, 1999, 15(3): 28-30.
- [5] 薛辉. 面向协同装配设计的实体模型简化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 30-33.
- [6] YOUNGJAE S, KUNWOO L. (2004). Incremental Transmission of B-Rep Models through the Network. Computer-Aided Design and Applications[Z]. 1. 10. 1080/16864360. 2004. 10738295.
- [7] CIGNONI P, MONTANI C, ROCCHINI C, et al. External Memory Management and Simplification of Huge Meshes[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2002, 9(4): 525-537.
- [8] 宋玉银, 梁木养. 基于特征设计的 CAD 系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 10(2): 145-151.
- [9] 张莉彦. 有关特征建模技术的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 1998, 10(3): 40-43.
- [10] ZHU H, MENQ C H. B-Rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(2): 109-123.