

引文格式:何其昌,许志杰.产品装配数字孪生可视化模型自适应精简方法[J].航空制造技术,2022,65(19):50-55.

HE Qichang, XU Zhijie. Adaptive simplification method for product assembly digital twin visualization model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 50-55.

产品装配数字孪生可视化模型自适应精简方法*

何其昌,许志杰

(上海交通大学,上海 200240)

[摘要] 针对产品装配数字孪生模型实时可视化的需求,提出了一种面向装配过程的可视化模型精简方法。首先利用 B-Rep 信息建立模型的 AAG (属性邻接图),通过基本特征 AAG 的图匹配实现装配特征的自动识别;对装配语义进行解析,提取当前装配过程的装配特征;然后采用改进 QEM (二次误差度量)算法,优化边折叠误差,实现模型局部精简率的自适应调整,满足实时可视化的需求;最后以某型号发动机机匣装配为例验证了方法的有效性。

关键词:装配数字孪生;装配过程;装配特征识别;装配语义;改进 QEM

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.050



何其昌

副教授,博士,研究方向为数字化车间规划、制造系统数字孪生、虚拟现实/增强现实工业应用等。

装配孪生模型是利用数字孪生技术与虚拟装配技术,构建与物理装配现场完全一致的虚拟装配模型,通过物理装配现场数据实时驱动虚拟模型的仿真分析,评估装配过程中的行为和装配性能,从而指导装配现场

的操作并保证装配质量^[1-2]。以航空航天领域为代表的装备具有极其复杂的产品结构,其几何数字模型的三角面片可达数亿^[3],如何高效地实时绘制该量级的虚拟装配可视化模型,是极具挑战性的研究课题。

目前,自动特征识别的算法主要分为基于立体分解和基于边界匹配:基于立体分解的算法通过对零件体分解得到凸体集合,再将凸体集合重组并分类,从而确定特征类型^[4];基于边界匹配的算法通过查找特征库中边界组合模板,获取所有符合模板的几何拓扑数据集合,根据特征库的形式可进一步将识别算法分为基于规则^[5]、基于痕迹^[6]和基于图^[7-9],其中基于图的特征识别算法的研究成果最为丰富。Gao等^[10]提出一种基于特征抑制的CAD网格模型简化框架,通过抑制识别到的特征,并填充由此造成的孔洞,得到多个简化等级的网格模型。齐洪方等^[11]引入顶点邻域三角形平均面积、三角形的

法向量变化以及边长信息计算折叠代价,通过边折叠操作有效减少网格模型的数据量。曹增欢等^[12]基于曲度,对网格模型分区域采用边折叠和三角形折叠,实现高效简化的同时,较好地保持了模型细节特征。Kwon等^[13]通过将CAD模型体分解为若干特征区域,然后根据其重要性顺序依次删除并修补网格模型,从而获取多分辨率的简化模型。基于几何元素折叠的简化方法可以高效生成任意简化精度的网格模型,但容易造成部分特征失真,最终影响装配仿真的准确性。基于特征的模型简化方法以特征为单位从原模型中删除特征信息,在简化的同时尽可能地保留了模型的外观,但是无法实现连续等级的简化精度,直接删除或抑制装配特征区域可能导致无法完成装配仿真。

针对装备数字孪生可视化模型精简的需求,提出面向装配仿真过程的模型自适应简化方法。首先,针对装配过程仿真,提出自适应简化

* 基金项目:国家自然科学基金(51975362)。

策略;然后,建立模型的AAG(属性邻接图),将其与基本特征库中的子图进行匹配实现特征的自动识别,并通过解析装配语义获得当前装配工序的装配特征;其次,优化QEM(Quadratic error metric)的折叠代价计算方法,实现保留装配特征网格的模型自适应简化;最后以发动机机匣装配工艺仿真进行应用验证。

1 方法描述

复杂产品的装配工艺路线通常遵循先子装配后总装的思想,通过分解产品PBOM(Process bill of material)结构形成若干子装配单元,完成子装配单元的装配后再进行上一层级的装配。因此,装配数字孪生可视化模型数量会随着装配过程不断累加,装配仿真场景的几何三角网格数量也将不断增长。

装配特征在装配仿真中参与约束求解、碰撞干涉检测等计算,此区域的三角网格需要保证较高的精度,才能对物理现场的装配过程进行准确模拟,预测装配性能。针对装配过程仿真,数字孪生模型只需要保留当前装配工步对应的装配特征,而其余区域的三角网格则可以简化。

图1为装配工艺PBOM,虚线表示两个零件或子装配之间具有装配约束关系,其中装配工艺AP可分解为 n 个装配工步, P_i 表示第 i 个装配工步, $i \in [1, n]$ 。 $Part_{ij}$ 表示第 i 个装配工步相关的零件或子装配(零件及子装配统一用Part表示), $j \in [1, m]$, j 表示第 j 个零件; m 表示该工步涉及的零部件总数。

$$Part_{ij} = Feature_{ij}^1 \cup Feature_{ij}^2 \cup \dots \cup Feature_{ij}^k \cup NotFeature_{ij} \quad (1)$$

$Feature_{ij}^l$ 表示第 i 个装配工步中, $Part_{ij}$ 第 l 个装配特征, $l \in [1, k]$, k 为 $Part_{ij}$ 的装配特征总数。 $NotFeature_{ij}$ 表示 $Part_{ij}$ 的非装配特征,则 P_i 为

$$P_i = Assemble(\sum_{j=1}^m Part_{ij}) =$$

$$Assemble(\sum_{j=1}^m \{Feature_{ij}^l\}) \quad (2)$$

$\{Feature_{ij}^l\}$ 为只在 P_i 中涉及的 $Part_{ij}$ 装配特征集合。因此,在第 i 个工步的可视化模型 $VisModel_i$ 可以表示为

$$VisModel_i = Preserve(\sum_{j=1}^m \{Feature_{ij}^l\}) \cup Simplify(\sum_{j=1}^m NotFeature_{ij}) \quad (3)$$

$Preserve()$ 与 $Simplify()$ 分别表示对网格区域的保留与简化,对于同一零件,其装配特征区域会随着工步对应的装配约束而变化,即 $\{Feature_{ij}^l\}$ 依赖于 P_i 的具体内容,从而动态调整精简区域。尽管装配工步的零部件数量以及结构会随着装配过程的进行趋向复杂,但是每一个工步中只保留当前的装配特征区域,其大小相对稳定,在后序工步仿真中仍有充足的简化空间降低装配仿真场景的三角面片数量,最终在保证装配可视化效果的前提下实现模型的自适应精简。

2 基于图的装配特征识别

主流的产品几何模型采用B-Rep数据模型,其通过边界表面表示实体,其包含了点、边、面、环等几何信息以及几何元素之间的拓扑连接信息。如图2所示,本文利用B-Rep信息,基于AAG进行装配特征识别。AAG是一种描述零件几何拓扑信息的图结构,节点表示模型的面,弧表示面相交形成的边,面可分为平面、圆柱面、圆锥面、球面等类型,边可分为直线边、圆弧边、椭圆边等类型^[14]。在图匹配的过程中,内外环以及边的凹凸性是AAG重要的属性。首尾连接的边的方向(沿着法向,使得面在边的左侧的方向)为逆时针,定义成外环;反之为内环。邻接面的外二面角大于 180° 时,定义成凸边;等于 180° 时,

为光顺边;小于 180° 时,为凹边。图3为三维线框模型及其属性邻接图,图3(a)和(b)分别表示零件的线框模型(数字1~9表示模型边界表面,其中弧为1表示凸边,-1表示凹边,0表示光顺边)及对应的AAG。

构建基本特征图库,其包含了常见特征的属性邻接图,如圆通孔和通台阶的AAG(图4)。圆通孔由两个圆柱面组成,圆柱面相交成两条光顺边;通台阶由两个平面组成,平面相交成一条凹边。由于AAG规模随着模型的复杂度而变大,为了提高图匹配的效率,需要对AAG进行分解,提取潜在的特征子图,最终得到最小属性邻接图(Minimum attributed adjacency graph, MAAG),如图3(c)所示。MAAG的构建算法如下:

(1) 遍历AAG,判断是否存在内边界环,若存在,则先分解内边界环对应的边,由此得到子图集合 S_{G1} ;

(2) 遍历 S_{G1} 中每个子图,进行

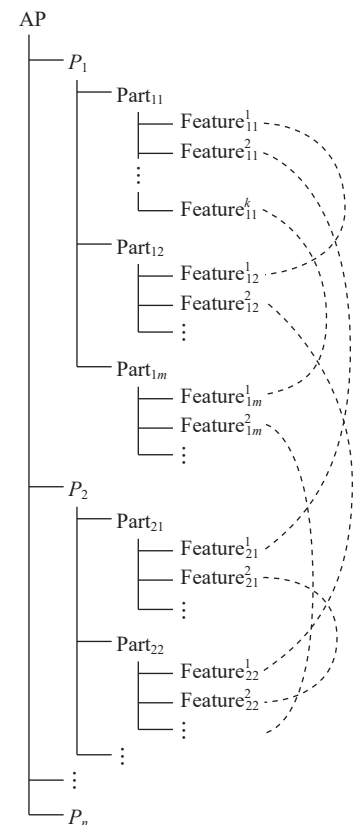


图1 装配工艺PBOM
Fig.1 Assembly process PBOM

一次图匹配,未成功完成图匹配的子图进入步骤(3);

(3) 遍历 S_{G1} 中未完成图匹配的子图,分解弧值为 1 的边,完成二次分解,得到 S_{G2} ;

(4) 整理合并 S_{G1} 和 S_{G2} , 得到最终的分解结果 S_G 。

图匹配实际上是判断 MAAG 与基本特征图库中的 AAG 是否为图同构关系的过程。图同构的定义为两个图的节点和弧的数量、属性相同,且弧的连接性相同。给定两个图 $G_1=(V_1, E_1)$ 、 $G_2=(V_2, E_2)$, V 和 E 分别表示图的节点集和弧集,图匹配的具体过程如下:

(1) 判断节点集和弧集的数量是否相同,若不相同则直接判定不为图同构关系,反之进入步骤(2);

(2) 在 V_1 、 V_2 中任意选取一个顶点 v_{1i} 、 v_{2j} , 构成未遍历过的顶点对 (i, j) ;

(3) 判断 (i, j) 对应的节点属性

及其一阶邻接弧的数量和属性是否完全相同,若相同则标记 $Flag(i, j)$ 为 True,反之则为 False;

(4) 判断是否存在未遍历过的顶点对,若存在,跳回步骤(2);

(5) 遍历 $Flag(i, j)$, 判断每个 v_{1i} 是否至少有一个 v_{2j} 与之匹配,每个 v_{2j} 是否至少有一个 v_{1i} 与之匹配,若满足,则 G_1 、 G_2 同构,反之不为同构。

经过图匹配后将得到模型的基本特征图集 S_{FG} , 而数字孪生模型只需保留当前装配工步的装配特征,因此需要从 S_{FG} 中提取装配特征图集 S_{AFG} 。

如图 2 所示,通过解析装配语义构建了装配语义特征库,以此提取 S_{FG} 中当前装配工序的装配特征。装配语义特征库基于装配约束信息,列举了装配语义对应的装配特征。例如针对螺栓连接零件 A 与 B 的装配语义, A 的装配特征定义为

$$Feature_A = \{CircularThroughHole,$$

TopFace, BottomFace}

表明圆通孔特征在螺栓连接装配时额外需要上下平面作为面贴合的关键特征,其提取规则表示为

“If feature Is Type (Circular Through Hole), Then feature. Add (TopFace and BottomFace).”

即若图 4 (a) 中的特征为螺栓连接语义中的圆通孔,则 TopFace 与 BottomFace 分别对应 3 号面与 4 号面。针对齿轮 C 安装到传动轴 D 上的装配语义,传动轴 D 的装配特征定义为

$$Feature_D = \{OuterCylindricalFace, RingFace\}$$

由传动轴的外圆柱面及其邻接的圆环面组成,分别作为径向和轴向的定位特征,其提取规则表示为

“If feature Is Type (Outer Cylindrical Face), Then feature. Add (RingFace).”

邻接的圆环面可由外圆柱面通过凹边连接的节点取得,由此得到准确的装配特征图集 S_{AFG} 。

3 基于改进 QEM 的模型精简

目前,基于几何网络的简化算法可分为几何元素删除法^[15]、网格重新划分法^[16]和几何元素折叠法^[17]。几何元素删除法通过不断地从网格中删除顶点或三角形,并对留下的空

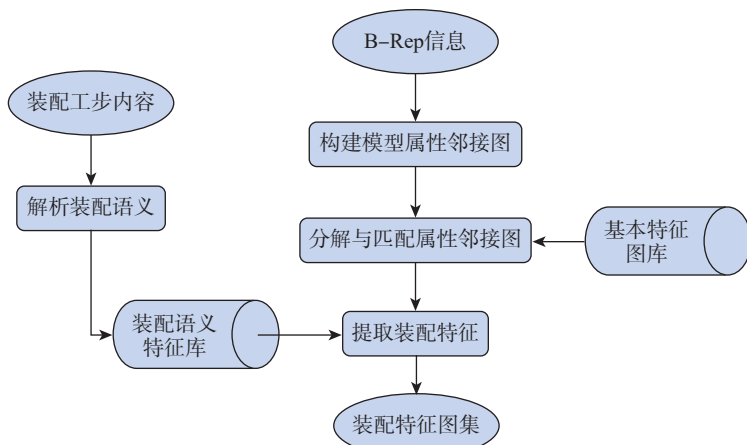


图 2 基于 AAG 的装配特征识别流程

Fig.2 Flow of assembly feature recognition based on AAG

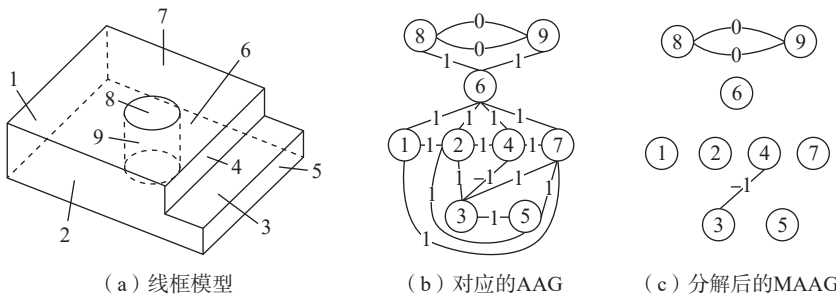


图 3 三维线框模型及其属性邻接图

Fig.3 3D wireframe model and its AAG

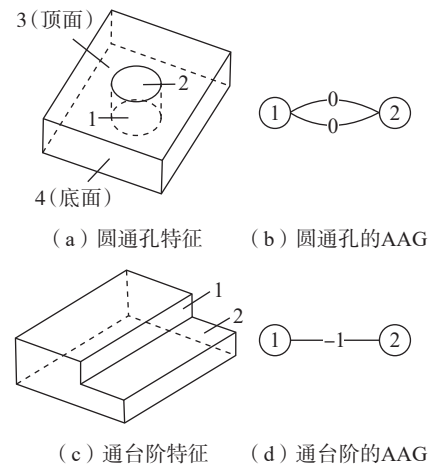


图 4 圆通孔及通台阶的 AAG

Fig.4 AAG of circular through hole and through step

洞重新三角化。网格重新划分法通过增加新顶点,再对网格三角剖分,最终产生一个更为简单的逼近网格。几何元素折叠法不需要对折叠区域重新三角化,相比前两种方法具有更好的稳定性和更快的简化速度^[18],如Garland等^[19]使用QEM计算边折叠的代价,是经典的网格简化算法。

边折叠是简化时的关键步骤,是指将顶点 V_i 和顶点 V_j 折叠成新顶点 V_n ,并重新调整新顶点的邻接三角形的过程,如图5所示。

边折叠会引起网格形状的变化,因此需要有指标衡量折叠前后的误差。QEM采用新顶点到原顶点邻域三角形面的距离的平方和(即二次误差)作为折叠代价,其计算过程如下。

三维空间中的平面 P 可以表示为 $ax+by+cz+d=0$,且 $a^2+b^2+c^2=1$, d 为常数。令 $p=[a, b, c, d]^T$,则空间中的顶点 $v=[v_x, v_y, v_z, 1]^T$ 到 P 的距离的平方 $D_p^2(v)$ 为

$$D_p^2(v) = (p^T v)^2 = v^T (pp^T) v \quad (4)$$

令误差矩阵 $K_p=pp^T$,则 v 的二次误差 $\Delta(v)$ 为

$$\Delta(v) = v^T \left(\sum_{P \in P(v)} K_p \right) v = v^T Q v \quad (5)$$

式中, $P(v)$ 表示顶点 v 的一阶邻域平面集合; Q 为 v 的误差矩阵。定义边 $v_i v_j$ 折叠到新顶点 v_n 的二次误差 $\Delta(v_n)$ 为

$$\Delta(v_n) = v_n^T (Q_i + Q_j) v_n = v_n^T Q_n v_n \quad (6)$$

式中, Q_i, Q_j, Q_n 分别对应 v_i, v_j, v_n 的误差矩阵。对 $\Delta(v_n)$ 求偏导即可推出二次误差极小时的 v_n ,若无法取得误差的极小值,则 v_n 取 v_i, v_j 或两个顶点的中点 $(v_i+v_j)/2$ 中二次误差最小的顶点。

基于QEM的计算可以保证模型的简化沿着曲率较小的方向,但是在简化时容易丢失网格的几何特性,而机械CAD网络模型具有轮廓规则分明、三角网格分布不均、含有众多特征面的特点,对产品机械CAD网络

直接应用QEM算法容易导致特征失真。因此,针对当前装配工步需要保留的装配特征,通过修正,对QEM进行改进,算法流程如图6所示。

首先按照式(6)计算出所有边的新顶点 v_n 及其二次误差,若边 $v_i v_j$ 属于当前工步装配特征的三角网格区域,修正的二次误差 $\Delta'(v_n)$ 为

$$\Delta'(v_n) = \Delta(v_n) + \text{Max}(\Delta(v_n)) \quad (7)$$

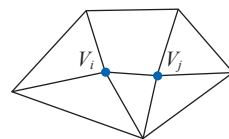
式中, $\text{Max}(\Delta(v_n))$ 表示所有未修正的二次误差最大值,以此保证装配特征区域的简化优先级最低。完成修正后,根据边折叠的代价建立最小堆结构(经排序过的完全二叉树,保证非叶子节点的值不大于其左右子节点的值),每次折叠时取堆顶的边,并维护最小堆结构使得堆顶的折叠代价始终为最小值。假设计算机渲染的最大三角面数量为 N_{\max} ,当前工步 P_i 未简化的模型三角面片总数为 N_1 , Part_j 的三角面片数量为 N_2 ,则 Part_j 简化后的三角面数量要求 N 为

$$N = \frac{N_2}{N_1} \times N_{\max} \quad (8)$$

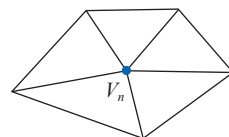
然后不断进行边折叠,同时更新网格与折叠代价的排序,直至当前的三角面数量满足要求为止。

4 应用验证

采用某型号发动机压气机匣的数字孪生装配仿真进行应用验证,其CAD模型面片数量为35548,选取的两个装配工步 P_1, P_2 分别是机匣工作



(a) 折叠前的局部网格



(b) 折叠后的局部网格

图5 边折叠过程

Fig.5 Edge collapse process

环上螺钉的拧紧以及端面法兰的螺栓连接,需要识别工作环上的沉头孔特征与法兰上的圆通孔特征,并保证简化后的面片数量维持在5200(保证渲染帧率fps>60),精简率为85.4%。

图7(a)为机匣模型局部区域的AAG,通过与基本特征图库中沉头孔的AAG(图7(b))进行图匹配,可得77~81节点为沉头孔特征。针对螺钉拧紧的装配语义,沉头孔的装配特征 Feature_E 定义为

$$\text{Feature}_E = \{\text{CounterboredHole, BottomFace}\}$$

即装配沉头孔时,下底面也是关键的配合特征,提取规则需要增加344节点,这里指机匣的内环面,因此 P_1 的识别结果为77~81及344节点。50、51为圆通孔特征, P_2 的装配语义为螺栓连接,因此, P_2 的识别结果为50、51、235、105节点,235与105节点分别为圆通孔特征邻接的上下平面。

根据识别到的装配特征区域,采用改进的QEM简化算法对机匣网格模型进行精简处理。设置机匣模型的精简要求 $N=5200$,图8展示了

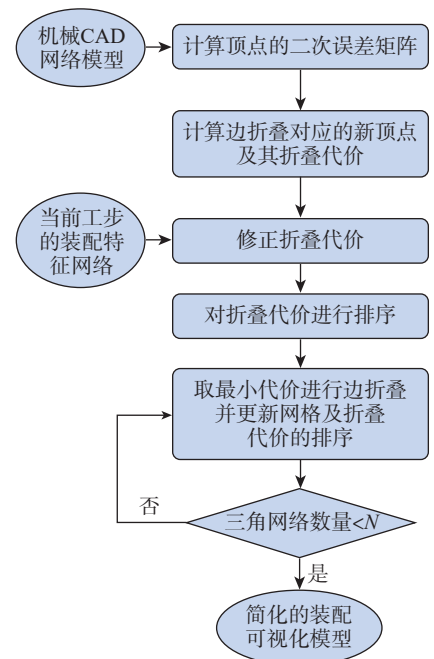


图6 改进QEM算法流程

Fig.6 Improved QEM simplification algorithm flow

改进的 QEM 简化算法与原 QEM 简化算法的效果对比。由图 8 (b) 可知, QEM 算法趋向将网格模型的各个部分均匀简化,在总体上保持了较好的可视化效果,但是针对 P_1 、 P_2 工步,沉头孔与圆通孔特征网格均严重失真,无法满足数字孪生装配仿真的要求。当 $P_i=P_1$ 时,图 8 (c) 中的网格模型保留了机匣的沉头孔与内环

面特征。 $P_i=P_2$ 时,图 8 (d) 中的网格模型保留了圆通孔与法兰端面特征,两个装配工步下都分别提高了其非特征区域的简化率。由此可得,改进的 QEM 算法针对不同工步中的相同的网格模型,通过自适应地调整局部精简率使得装配区域保持较高的分辨率。因此,改进的 QEM 算法更好地保留了装配特征。

另外, QEM 算法的时间复杂度为 $O(n \log n)$,空间复杂度为 $O(n)$,在处理大型复杂网格模型时仍可以表现出较好的运算速度^[20],而改进的 QEM 算法只是在计算边折叠代价时增添了是否修正的判断,不会增加 QEM 算法的时间复杂度,案例运行时电脑配置 CPU 为 Intel Core i7-10710U,内存大小为 16 G,显卡型号是 GeForce MX350,图 8 (b)~(d) 的平均简化耗时分别为 450 ms、472 ms 和 475 ms。

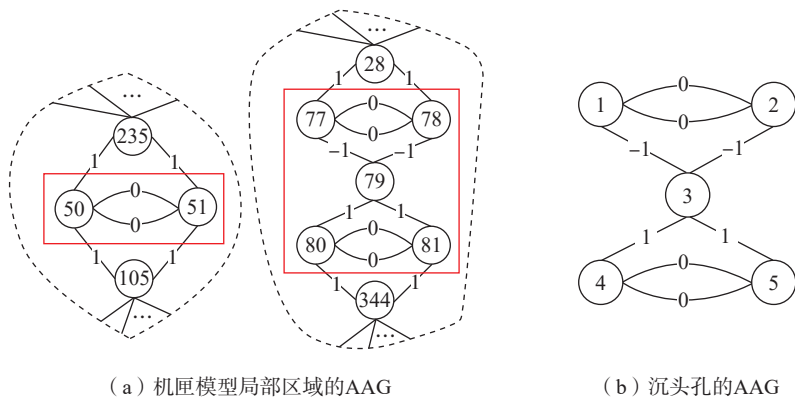


图 7 机匣模型的 AAG
Fig.7 AAG of casing model

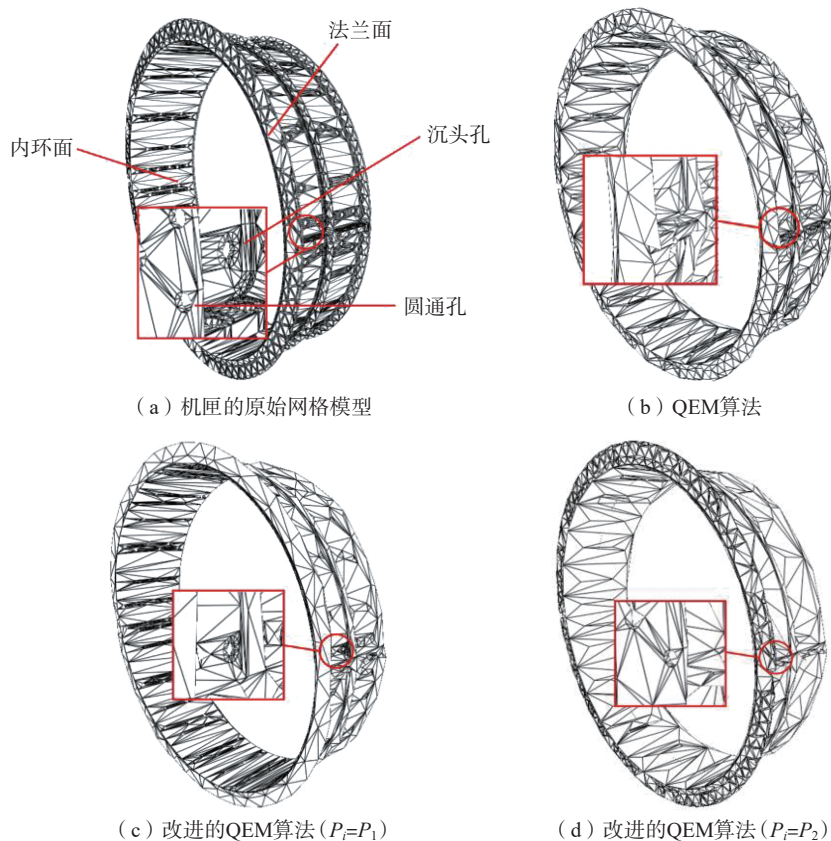


图 8 机匣模型精简效果对比 ($N=5200$)

Fig.8 Comparison of simplified effect of casing model ($N=5200$)

5 结论

针对数字孪生装配可视化模型简化的需求,本文实现了自适应调整网格局部简化率的精简方法,保持了当前装配工步的装配特征网格质量。在基于图的自动特征识别算法之上,引入了装配语义特征库提取实际装配特征。基于装配特征识别的结果,改进了 QEM 算法的代价计算,最后的应用验证表明,改进后的算法具有更好的精简效果。未来,可以采用深度学习的方法提高复杂装配特征识别的效率,同时对折叠简化算法进一步优化,在保留装配特征的同时,提高非装配区域的网格质量,从而优化装配模型整体的可视化效果。

参考文献

- [1] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.
- [2] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.
- [3] BAXTER W V, SUD A, GOVINDARAJU N K, et al. GigaWalk: Interactive walkthrough of complex environments[C]// EGRW'02: Proceedings of the 13th Eurographics

- workshop on Rendering. Orlando, 2002: 203–214.
- [4] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. 计算机学报, 1998, 21(3): 281–288.
- GAO Shuming. A survey of automatic feature recognition[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(3): 281–288.
- [5] ABOUEL NASR E S, KAMRANI A K. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(3): 389–415.
- [6] 李梅竹, 陈荣. 基于痕迹对 STEP 文件进行特征识别的研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 57–62.
- LI Meizhu, CHEN Rong. A study of feature recognition based on hint from step files[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 29(4): 57–62.
- [7] 施建飞, 李迎光, 刘旭, 等. 基于属性边点图的飞机结构件筋特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 521–529.
- SHI Jianfei, LI Yingguang, LIU Xu, et al. Rib feature recognition method for aircraft structural parts based on vertex attributed adjacency graph[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 521–529.
- [8] 陆凯, 李迎光, 刘旭, 等. 数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 32–40, 57.
- LU Kai, LI Yingguang, LIU Xu, et al. A data-driven method for machining feature recognition for aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 32–40, 57.
- [9] 黄丰云, 刘小磊, 徐劲力, 等. 三维工艺设计中的制造特征识别方法[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 228–231, 235.
- HUANG Fengyun, LIU Xiaolei, XU Jinli, et al. A method of manufacturing feature recognition in 3D process design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 228–231, 235.
- [10] GAO S M, ZHAO W, LIN H W, et al. Feature suppression based CAD mesh model simplification[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12): 1178–1188.
- [11] 齐洪方, 汪耀. 面向 Web 的机械产品三维模型简化算法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(11): 280–283, 289.
- QI Hongfang, WANG Yao. Research of web-oriented simplifying mechanical products' 3D model[J]. Computer Simulation, 2021, 38(11): 280–283, 289.
- [12] 曹增欢, 黄常标, 郑红. 三角网格模型的特征保持混合折叠简化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 971–983.
- CAO Zenghuan, HUANG Changbiao, ZHENG Hong. Feature preserving mesh simplification based on hybrid collapse[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 971–983.
- [13] KWON S, MUN D, KIM B C, et al. B-rep model simplification using selective and iterative volume decomposition to obtain finer multi-resolution models[J]. Computer-Aided Design, 2019, 112: 23–34.
- [14] 刘雪梅, 贾勇琪, 陈祖瑞, 等. 缸体类零件加工特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1197–1204.
- LIU Xuemei, JIA Yongqi, CHEN Zurui, et al. Recognition of machining feature for engine cylinder blocks[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5): 1197–1204.
- [15] SCHROEDER W J, ZARGE J A, LORENSEN W E. Decimation of triangle meshes[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992, 26(2): 65–70.
- [16] TURK G. Retiling polygonal surfaces[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992, 26(2): 55–64.
- [17] ZHOU M D, WANG M Y. Engineered model simplification for simulation based structural design[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2012, 9(1): 87–94.
- [18] 张霞, 段黎明, 刘璐. 保持特征的高质量三角网格简化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 486–493.
- ZHANG Xia, DUAN Liming, LIU Lu. High quality triangular mesh simplification with feature-preserving[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 486–493.
- [19] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques-SIGGRAPH'97. New York: ACM Press, 1997: 209–216.
- [20] 陈伟海, 徐鲤鸿, 刘敬猛, 等. 网格简化中基于特征矩阵的二次误差测度算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 572–575, 595.
- CHEN Weihai, XU Lihong, LIU Jingmeng, et al. Quadric error metrics for mesh simplification based on feature matrix[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 572–575, 595.

Adaptive Simplification Method for Product Assembly Digital Twin Visualization Model

HE Qichang, XU Zhijie

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirement of real-time visualization of the assembly digital twin model of product, a visualization model simplification method oriented to the assembly process was proposed. Firstly, the AAG (Attributed adjacency graph) of the model was established by using the B-Rep information, the automatic recognition of features was realized through the graph matching of the basic feature AAG, and the assembly semantics were analyzed to extract the assembly feature information of current assembly process; Then, the improved QEM algorithm was used to optimize the error of edge collapse, which realized the adaptive adjustment of local simplification rate of the model and met the need of real-time visualization. Finally, the effectiveness of the method was verified by taking the assembly of a certain type of engine casing as an example.

Keywords: Assembly digital twin; Assembly procedure; Assembly feature recognition; Assembly semantics; Improved QEM (责编 七七)