

基于点匹配的变壁厚 CAD 模型中间面生成

陈志杨¹ 喻谷鸣¹ 张引²

1. 浙江工业大学, 杭州, 310023 2. 浙江大学, 杭州, 310012

摘要:提出一种针对变壁厚模型的中间面生成方法。该方法包括运用基于样条链(环)的 CAD 模型过渡特征识别与抑制算法对初始 CAD 模型(B-Rep 模型)的预处理、pair 对生成以及基于等(变)壁厚模型的中间面生成算法。鉴于目前变壁厚模型处理中主要针对只有变壁厚平面 pair 对的变壁厚模型,研究了包含样条曲面变壁厚等各种情况,提出了基于 surface 点匹配和基于 face 点匹配的变壁厚模型中间面生成算法。模型测试结果表明所提出的算法具有较好普适性。

关键词:中间面抽取; pair 对选取; 变壁厚模型; 点匹配

中图分类号: TP391.72

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.24.009

Middle Surface Generation with Variable Thickness CAD Model Based on Point Matching

Chen Zhiyang¹ Yu Guming¹ Zhang Yin²

1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023

2. Zhejiang University, Hangzhou, 310012

Abstract: An algorithm of mid-surface abstraction was proposed based on variable thickness model. This method included applying the algorithm of fillet recognition and suppression based on feature chain to the initial CAD model(B-Rep model) pretreatment, pair selection and invariable (variable) thickness model mid-surface abstraction algorithm. In view of the present research of the variable thickness model focused on the variable thickness model that just has plane variable thickness, this paper studied contained spline variable thickness etc., proposed the algorithm of middle surface generation with variable thickness CAD model based on surface point matching and face point matching, various kinds of situation. The model testing results show that the algorithm has universal.

Key words: mid-surface abstraction; pair selection; variable thickness model; point matching

0 引言

在薄板件有限元分析计算中,往往通过将原模型简化为没有厚度的面来进行应力、应变分析,从而达到减小计算量、提高计算效率的目的。这种简化的面就是中间面(middle surface)。另外,中间面还可作为六面体网格划分的基础。六面体网格是 CAE 分析计算中最好、最稳定的一种网格结构,但是六面体网格的剖分比较困难。在某些情况下,对 3D 模型剖分六面体网格甚至是无解的。如果将 3D 的六面体网格剖分首先转化为二维面上的四边形剖分,进而采用扩张的方式就可以得到 3D 上的六面体网格。因此,中间面在有限元分析中有重要作用。目前主流的 CAE 软件以及部分 CAD 软件和网格处理软件,都有中间面生成功能。大部分软件能很好地处理等壁厚模型的中间面生成,少数软件,如 HyperMesh、ICEM 可以处理变壁厚模型,但是生成效果未能

尽如人意。变壁厚模型中间面生成已经成为一个瓶颈问题,研究变壁厚模型中间面生成具有重要理论意义和应用价值。

许多学者提出了中间面生成的算法。文献[1]提出了一种中间面抽取算法,该算法主要针对由平面组成模型的中间面生成。文献[2]提出了一种基于实体分解与简化的算法,该算法可较好地提取等壁厚模型的中间面。文献[3]提出一种基于 2D 中轴转换(MAT)的算法来生成中间面, MAT 方法虽然能较好地提取 pair 对的中间面,但提取 CAD 模型的中间面模型将非常耗时。文献[4]提出了一种基于图的模型中间面生成和自动延伸与修补算法,但该算法只适用于简单的 B-Rep 模型。文献[5]提出了一套较完整的中间面生成方法,给出了相对完整的等壁厚模型 pair 对选取算法以及中间面提取后的后续操作,该方法主要针对等壁厚模型的中间面抽取。文献[6]提出了基于 Hausdorff 距离和基于几何图属性的两种评估中间面模型质量的方法。文献[7-8]提出了一种实体缩胀的方法来生成中间面模型,可

收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z1A5); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1090597)

很好地处理等壁厚模型。

上述算法主要针对等壁厚模型的中间面生成。针对变壁厚模型,本文提出了一种基于点匹配的变壁厚 CAD 模型中间面生成算法,算法可以同时处理变壁厚模型和等壁厚模型的中间面提取。实例证明,本文提出的中间面生成算法对于包含样条曲面的变壁厚模型可以得到较好形态的中间面模型。

1 算法概述

在进行 CAD 模型分析前,往往需要对 CAD 模型进行预处理。抑制小圆角(倒角)特征就是重要的预处理步骤。在对模型进行预处理后,将模型所有的面进行归类,先选取符合 pair 对要求的等壁厚 pair 对,在没有选入等壁厚 pair 对的面中再选取变壁厚 pair 对,将选取的所有 pair 对生成对应的中间面。接着判断模型的中间面是否全部生成,若没有则由用户手动选取要生成中间面的 pair 对生成中间面(根据模型的复杂程度不同,手工生成中间面的工作量会有不同,对于可以自动生成的中间面,生成速度将非常快)。全部中间面生成后进行延伸和修补操作,最终生成符合 CAE 分析要求的中间面模型,具体过程见图 1。

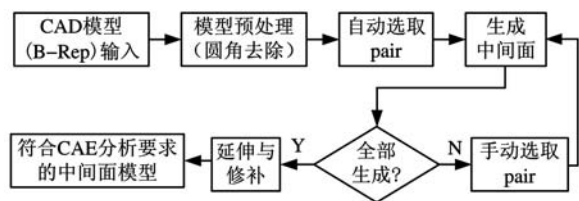


图 1 中间面模型生成算法

2 pair 对生成

通常情况下模型的 pair 对选取中,等壁厚 pair 对选取占据了大部分,对于等壁厚类型的 pair 对,可以通过自动选取算法实现,而变壁厚 pair 对选取中涉及各种复杂情况,因此变壁厚 pair 对的自动选取主要针对相同类型二次曲面 pair 对,以及其中包含平面的变壁厚 pair 对,辅助以手工选取完成。

2.1 相关名词

(1)Thickness。表示选取的两个面之间的最短距离。

(2)Overlap。表示选取的两个面中存在一个面按面上某一点的法线的反方向映射到另一个面的映射面积不为 0。

(3)Concave connect。表示两个面之间以凹槽形状连接。

2.2 等壁厚 pair 对选取

首先将模型所有的面进行归类,然后对同类型的面进行 pair 对选取,没有选入 pair 对的面暂时保存。自动选取等壁厚 pair 对时不管什么类型的面都要先符合以下三个基本条件:第一,两个面之间的距离不能大于设定 Thickness;第二,两个面必须是 Overlap;第三,两个面不能是 Concave connect。

对于不同类型的面的 pair 对选取还要加上属于它们的不同判断条件。

(1)平面与平面:两平面的法向 N_1 与 N_2 满足 $N_1 \cdot N_2 = \pm 1$ (1)

图 2 中,面 a 和 b 为 pair 对面不平行的情况,面 c 和 d 为 pair 对面 Concave connect 的情况。图 3 为 pair 对面不是 Overlap 的情况。图 2 和图 3 所示均为不符合条件的 pair 对,图 4 所示为符合条件的 pair 对。

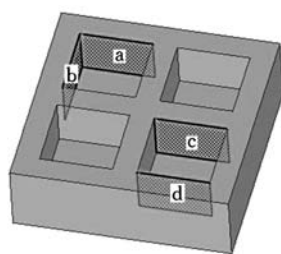


图 2 不平行与 Concave connect

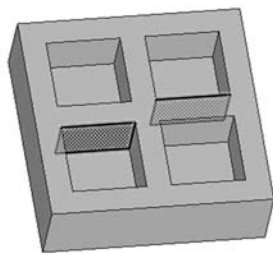


图 3 不是 Overlap

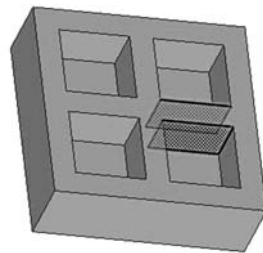


图 4 正确 pair 对

(2)柱面与柱面以及锥面与锥面:两柱面或者两锥面是否同轴。

(3)球面与球面:两球面是否为同圆心。

(4)样条面与样条面:等壁厚样条面 pair 对只要符合三个基本条件就认为是符合条件的 pair 对。

2.3 变壁厚 pair 对选取

等壁厚 pair 对选取结束后,将没有选入 pair 对的所有面进行变壁厚 pair 对选取,首先选取面类型相同的 pair 对,保存暂时没有选入到 pair 对的面。平面变壁厚 pair 对首先要判断两个平面的法向夹角是否在一个合理阈值之内,根据开发经验,在 CAD 系统中,对于角度误差的判断,一

般取 10^{-2} rad, 距离误差的判断一般是 10^{-6} mm, 这些值作为默认值存在, 用户可以根据实际情况进行修改。其次要满足等壁厚 pair 对选取的三个基本条件, 其他面类型相同的变壁厚 pair 对选取只要满足等壁厚 pair 对选取的三个基本条件即可。如图 5~图 8 是满足条件的四种面同类型的变壁厚 pair 对, 图 9 和图 10 为变壁厚样条面和平面 pair 对与变壁厚柱面和平面 pair 对。



图 5 变壁厚平面 pair 对

图 6 变壁厚柱面 pair 对



图 7 变壁厚锥面 pair 对

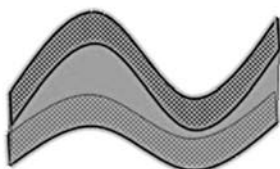


图 8 变壁厚样条面 pair 对

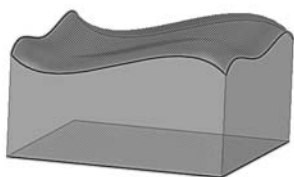


图 9 变壁厚平面与样条面 pair 对



图 10 变壁厚平面与柱面 pair 对

3 变壁厚模型中间面生成

等壁厚 pair 对的中间面生成只需根据两个面的 offset 关系进行偏移即可, 其他类似等壁厚圆锥面 pair 对或者等壁厚样条面 pair 对不能直接进行偏移生成中间面, 可以采用点匹配算法生成中间面。

3.1 变壁厚平面 pair 对中间面生成

对于变壁厚平面 pair 对, 首先判断两个面是否对称, 方法为找到两个平面上距离最近的两个顶点 P_{min1} 和 P_{min2} , 将第一个面上的所有顶点按法向 \mathbf{P}_{N1} ($P_{min1} - P_{min2}$) 映射到以 \mathbf{P}_{N1} 为法向且经过 P_{min1} 的平面 $F_{project}$ (图 11) 得到映射点组 $P_{project1}$, 将第二个面上的所有顶点按法向 \mathbf{P}_{N2} ($P_{min2} - P_{min1}$) 映射到平面 $F_{project}$ 上得到映射点组 $P_{project2}$, 判断 $P_{project1}$ 和 $P_{project2}$ 中的点是否全相同 (可能数组中点的顺序不一样), 若相同则得到每两个相同映射点的被映射点, 这两个被映射点称为对称点, 取出所有对称点的中点构造一张面, 该面即为中间面, 如图 12 所示。若两个面不对称则取出第一

个面上所有的点, 取得每个点连接的非该面所有边的直线边, 用该直线边的 curve 与第二面相交, 若都有交点, 则只需将第一个面的每个点与其对应的交点取中点, 然后将这些中点重新构造一张面, 该面即为中间面。若非都有交点或者点所连接的这些边不全是直线边, 则将这些点按第二个面的法向映射到第二个面的 surface 上, 然后分别取这些点和它们对应的映射点的中点, 根据这些中点重新构造一张面, 该面即为中间面, 如图 13 所示。

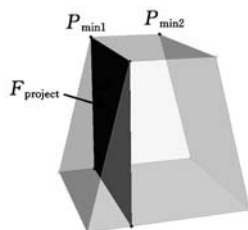


图 11 对称变壁厚平面 pair 对



图 12 对称变壁厚平面中间面

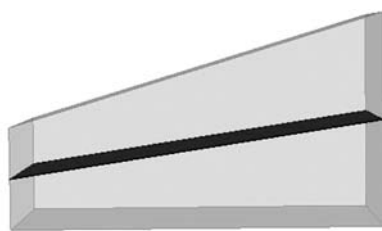


图 13 非对称变壁厚平面中间面

3.2 变壁厚非平面与非平面 pair 对中间面生成

本文中变壁厚非平面 pair 对中间面的生成采用点匹配算法, 因为在通常情况下, 一个样条面的参数域有 u 和 v 的范围, 所以我们可以反算在 u, v 上分别取各自最大最小值时对应的四个原始样条面 (没有被裁剪的样条面) 的点, 该类点称为角点, 这是本文算法的前提条件。使用原始样条面生成的中间面在后面的裁剪和缝合中将较少地用到延伸操作, 从而减少了延伸操作导致的不确定性, 这将使最后生成的中间面模型有较好的形态。经过研究分析, 变壁厚样条面 pair 对和等壁厚样条面 pair 对按 surface 点匹配生成中间面, 其他变壁厚 pair 对按 face 点匹配生成中间面。用点匹配方法抽取中间面时先将不是样条面的面转化为样条面, 以便利用 u, v 值取点。算法流程如图 14 所示。

3.2.1 surface 点匹配

(1) 首先得到两张样条面的 surface 记为 surface1 和 surface2, 根据两张 surface 分别得到它们的 u_{max}, v_{max} 值和 u_{min}, v_{min} 值, 每张 surface 根据这四个值得到 surface 上的四个点分别为

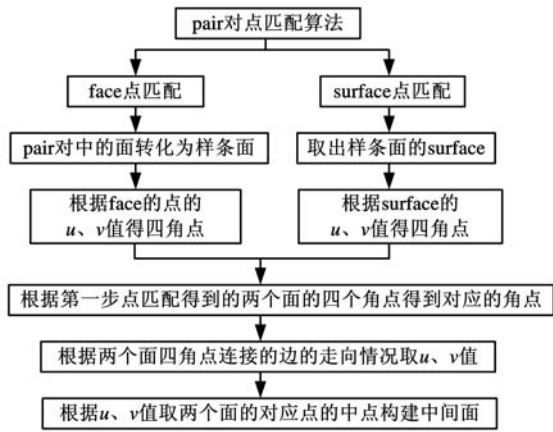


图 14 点匹配算法

$P_{\min u \min v}$ 、 $P_{\min u \max v}$ 、 $P_{\max u \max v}$ 、 $P_{\max u \min v}$ ，称之为 surface 角点。

(2)按最短距离进行第一步点匹配得到对应的角点,先用第一个面的四个角点匹配第二个面的四个角点,若对应的角点中没有重复角点则匹配成功,否则用第二个面的四个角点匹配第一个面的四个角点。如图 15 所示, (P_1, P_5) 、 (P_2, P_6) 、 (P_3, P_7) 、 (P_4, P_8) 为四组匹配的角点。

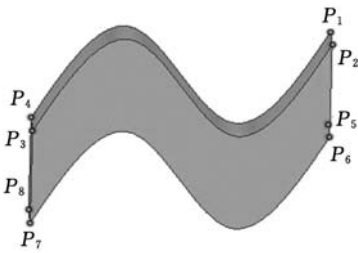


图 15 样条面 pair 点对点匹配

(3)第一步匹配结束后得到四组匹配角点,根据四个角点的连接边的走向(图 16 为边走向相同,图 17 为边走向相反)确定它们的 u 、 v 值在各自的边走向中相对应的最大值和最小值的 8 种情况。

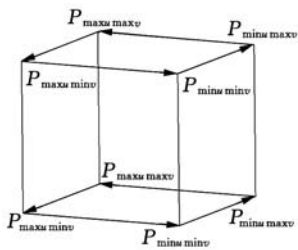


图 16 边走向相同

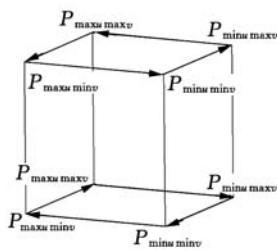


图 17 边走向相反

(4)根据步骤(3)中得到角点的 u 、 v 的最大值和最小值情况进行第二步点匹配。在两张样条面的 surface 上按 u 、 v 值均匀增减(u 值的增减比例和 v 值的增减比例取相同)取出对应的点,然后得到两张 surface 上对应点的中点,中点全部取出后插值得到一张曲面,该曲面即为中间面。

图 18 和图 19 所示为样条面 pair 对中间面生成。

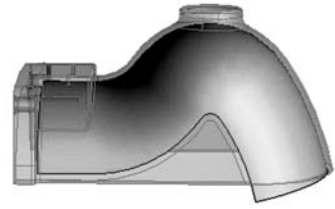


图 18 等壁厚样条面 pair 中间面



图 19 变壁厚样条面 pair 中间面

3.2.2 face 点匹配

face 点匹配与 surface 点匹配不同之处在于取最大的 u 、 v 值和最小的 u 、 v 值方法不同。face 点匹配方法为首先取出 face 上的所有点,分别比较各个点的 u 、 v 值大小,取出最大的 u 、 v 值和最小的 u 、 v 值,根据这四个值得到 surface 上的四个点分别为 $P_{\min u \min v}$ 、 $P_{\min u \max v}$ 、 $P_{\max u \max v}$ 、 $P_{\max u \min v}$ ，称之为 face 角点。再进行点匹配从而得到中间面。其中要注意的是对柱面取四角点时,它们的 u 、 v 要先进行判断,因为柱面 surface 上开始点和结束点的 u 、 v 值是一样的(比如圆的开始点和结束点是同一点),若开始点在柱面上,那 u 或 v 的取值就不是递增或递减,它将是一个先递增后递减或者先递减后递增的过程。图 20 和图 21 为按 face 点匹配得到的中间面。

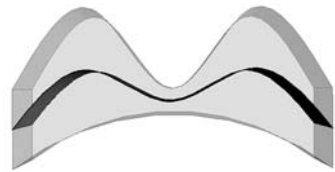


图 20 样条面与柱面中间面



图 21 柱面与柱面中间面

由于变壁厚平面与非平面 pair 对中平面的 surface 是一张无限的面,所以不能按 surface 点匹配算法生成中间面。又考虑到若平面与非平面面积相差较大时,按 face 点匹配算法生成中间面会影响生成中间面的质量,所以也不能直接用 face 点匹配算法。基于上述分析,本文按如下方

法取变壁厚平面与非平面 pair 对中间面:首先对变壁厚平面与非平面 pair 对进行 face 点匹配的第一步点匹配,然后判断匹配点对应点的最大距离与对应点最小距离的比值是否小于一个阈值,相关表达式如下:

$$\text{Dis } i = \text{Distance}(P_{S1}[i], P_{S2}[P_{\text{pair}}[i]]) \quad (2)$$

$$i = 0, 1, 2, 3$$

$$\text{Dis } j = \text{Distance}(P_{S1}[j], P_{S2}[P_{\text{pair}}[j]]) \quad (3)$$

$$j = 0, 1, 2, 3 \quad j \neq i$$

$$\text{Dis } i / \text{Dis } j < \lambda \quad (4)$$

式中,Distance()为计算两点距离的函数;Dis i 为角点序号 i 和角点序号 $P_{\text{pair}}[i]$ 所对应角点之间的距离;Dis j 为角点序号 j 和角点序号 $P_{\text{pair}}[j]$ 所对应角点之间的距离; λ 为允许比值的最大阈值; P_{S1} 为 surface1 上根据最大最小 u, v 反算得到的 face 角点; P_{S2} 为 surface2 上根据最大最小 u, v 反算得到的 face 角点。

若 i 和 j 取不同的值时均满足式(4),则变壁厚平面与非平面 pair 对按 face 点匹配算法抽取中间面。若不全满足,则非平面(对于柱面需先判断 u, v 值的取法)按 face 点匹配中的边走向相同的第一种情况的方法取出所有的点,将这些点按平面的法向映射到平面的 surface 上,再根据被映射点和它的映射点得到它们的中点,取出所有的中点后插值得到一张曲面,该曲面即为中间面。

4 算法实现与实例

本文算法基于 ACIS15.0 实现,利用 C++ 在 PC(inter 酷睿双核 2.26GHz CPU, 2GB DDR3 内存)上进行了算法验证。CAE 软件 HyperMesh 和 CAD 软件 UG 是目前提取中间面功能做得比较好的软件,下面分别给出了 HyperMesh 和 UG 提取中间面的效果和本文的提取效果。

图 22、图 23 为等壁厚 CAD 模型的中间面自动生成效果。

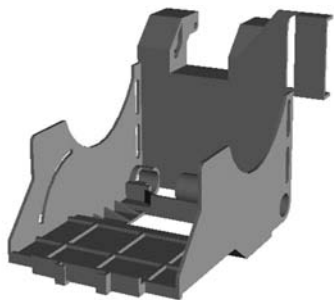


图 22 等壁厚模型

图 24、图 25 所示为包含许多变壁厚 pair 对模型的中间面自动生成效果。图 26 为 HyperMesh10.0 中间面自动生成效果,可以看到变壁厚柱面 pair 对生成的中间面是错误的,且一对

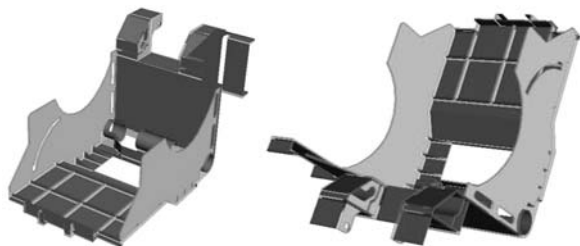


图 23 中间面自动生成后等壁厚模型

变壁厚平面 pair 对都没有生成。图 27 为自动生成中间面后再手动生成的效果,变壁厚柱面 pair 对还是没能正确生成中间面,变壁厚平面 pair 对生成的中间面也是错误的。

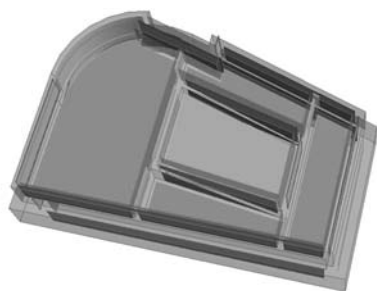


图 24 中间面自动生成后变壁厚模型顶部



图 25 中间面自动生成后变壁厚模型底部

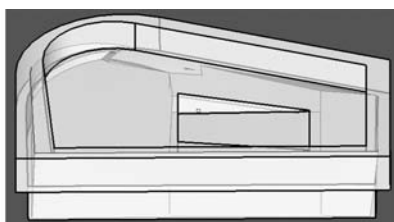


图 26 HyperMesh 中间面自动生成效果(实例 1)

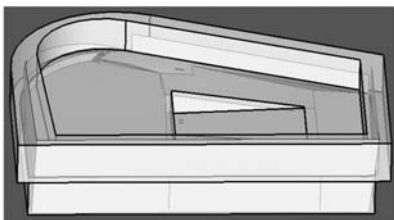


图 27 HyperMesh 自动生成中间面后再手动生成效果(实例 1)

图 28、图 29 为一个包含变壁厚样条面的模型以及其中间面,图 30 为 HyperMesh10.0 中间面自动生成效果,图 31 为 UGNX7.5 中间面自动生成效果。

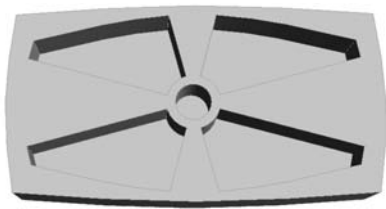


图 28 变壁厚模型(实例 2)

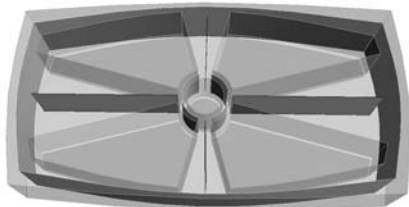


图 29 变壁厚模型中间面自动生成效果(实例 2)

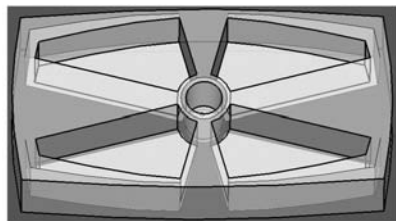


图 30 HyperMesh 中间面自动生成效果(实例 2)

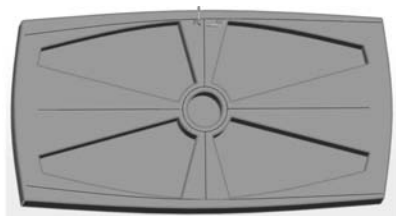


图 31 UGNX7.5 中间面自动生成效果(实例 2)

图 32~图 35 为一个变壁厚模型生成中间面的过程,笔者在圆角特征处理方面进行了深入研究,在前人研究的基础上实现了圆角特征的自动识别及处理^[9],本文模型的预处理(去圆角)即使用了该方法。图 36 为模型在 HyperMesh10.0 中中间面的自动生成效果图,可以看到柱面与平面的 pair 对中间面没有生成,图 37 为自动生成中间面后再手动生成的效果,可以看到生成的柱面与平面的 pair 对中间面是错误的,图 38 为 UGNX7.5 中间面自动生成效果,可以看到柱面



图 32 原始模型
(实例 3)



图 33 预处理
(实例 3)



图 34 pair 对生成
(实例 3)



图 35 中间面生成
(实例 3)

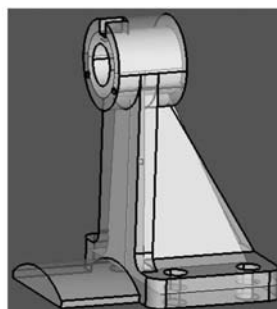


图 36 HyperMesh
中间面自动生成效果
(实例 3)

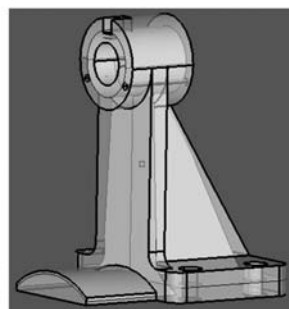


图 37 HyperMesh 自动生成
中间面后再手动生成效果
(实例 3)

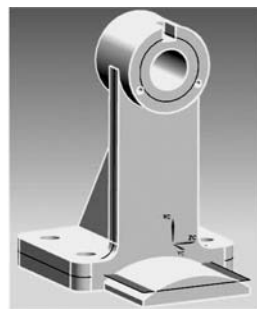


图 38 UGNX7.5 中间面自动生成效果(实例 3)

与平面的 pair 对生成的中间面是也错误的。

5 结论

与现有软件和算法比较,本文方法具有如下优点:

(1)自动 pair 对选取,特别是对于变壁厚模型而言,目前软件和算法中尚未见到成熟、实用的选取方法。本文提出的 pair 对选取的方法能较好地处理等壁厚、变壁厚 pair 对的选取问题。

(2)现有软件和算法大多数针对等壁厚模型可以有较好的中间面生成效果,对于变壁厚模型,包括 HyperMesh、ANSYS 等软件都有明显不足(或有不能处理的情况),特别涉及样条面的模型处理效果不理想。本文对各类变壁厚情况作了详细的分析,提出了基于点匹配的变壁厚模型的中间面生成方法,实际模型测试结果显示,本文算法

(下转第 2967 页)

械工程,1998,9(6):59-63.

[3] Belegundu A D, Zhang S H. Robustness of Design Through Minimum Sensitivity[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1992, 114(6): 213-217.

[4] Parkinson A, Sorensen C, Pourhassan N. A General Approach for Robust Optimal Design [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1993, 115(1): 74-79.

[5] Emch G, Parkinson A. Robust Optimal Design for Worst-case Tolerances[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1994, 116(4): 1019-1025.

[6] 曹衍龙. 面向制造环境的公差稳健设计方法与技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[7] 郭惠昕. 基于改进遗传算法的离散公差模糊稳健优化设计[J]. 机械设计, 2006, 23(7): 37-39.

[8] 周恺, 蔡颖, 张振家, 等. 稳健设计理论在公差分析中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(5): 557-560.

[9] 王瑜, 翟文杰, 吴伟国, 等. 公差稳健优化设计的研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(11): 2081-2085.

[10] 姬舒平, 孙贤会, 马玉林. 一种基于制造环境的统计公差分析方法[J]. 中国机械工程, 1999, 10(3): 249-252.

[11] Dong Z, Hu W, Xue D. New Production Cost-tolerance Models for Tolerance Synthesis[J]. Journal of Eng. Industry, 1994, 116(2): 199-206.

[12] 曹衍龙, 王移凤, 杨将新, 等. 基于可行稳健性的公差设计方法研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(3): 364-367.

[13] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法[M]. 3版. 大连: 大连理工大学出版社, 2004.

[14] 姚澎涛. 计算机辅助飞机制造容差优化设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[15] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 谭昌柏, 男, 1978年生。南京航空航天大学机电学院副教授。主要研究方向为计算机辅助公差设计、飞机数字化制造、飞机数字化反求。袁 军, 男, 1986年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。周来水, 男, 1962年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。

成熟的算法,使得取出的中间面更加精确。

(2)生成中间面后的自动延伸和修补操作也是中间面模型生成的一大难点,在以后的研究中将提出关于这方面的算法。

参考文献:

[1] Rezaat M. Midsurface Abstraction from 3D Solid Models: General Theory and Applications[J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(11): 905-915.

[2] Chong C S, Kumar A S, Lee K H. Automatic Solid Decomposition and Reduction for Non-manifold Geometric Model Generation[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1357-1369.

[3] Ramanathan M, Gurumoorthy B. Generating the Mid-surface of a Solid Using 2D MAT of Its Faces [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2004, 1(1/4): 665-674.

[4] Lee H, Nam Y Y, Park S W. Graph-based Mid-surface Extraction for Finite Element Analysis [C]//Proceedings of the 2007 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Mdelbourne, Australia, 2007: 1055-1058.

[5] Sheen D, Son T, Ryu C, et al. Dimension Reduction of Solid Models by Mid-surface Generation [J]. International Journal of CAD/CAM, 2007, 7(1): 71-80.

[6] Lockett H, Guenova M. Similarity Measures for Mid-surface Quality Evaluation[J]. Computer Aided-Design, 2008, 40(3): 368-380.

[7] Sheen Dong-Pyoung, Son Tae-geun, Myung Dae-Kwang, et al. Solid Deflation Approach to Transform Solid into Mid-surface [C]//International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering. Izmir, Turkey, 2008: 21-25.

[8] Dong-Pyoung Sheen, Tae-geun Son, Dae-Kwang Myung, et al. Transformation of a Thin-walled Solid Model into a Surface Model via Solid Deflation[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(8): 720-730.

[9] 陈志杨, 喻谷鸣, 张引. 基于样条链(环)的CAD模型过渡特征识别与抑制[J]. 中国机械工程, 2011, 22(22): 2707-2711.

(编辑 卢湘帆)

(上接第 2941 页)

对于各种模型中间面的生成都有较好效果。

进一步的研究主要包括:

(1)因为生成的中间面模型是一个近似的模型,所以对精确度的要求将是一个重要的研究方向,特别是对复杂样条面的中间面抽取需要有更

作者简介: 陈志杨, 男, 1971年生。浙江工业大学计算机学院教授、博士。主要研究方向为 CAD/CAGD/计算机图形学。发表论文 30 余篇。喻谷鸣, 男, 1986年生。浙江工业大学计算机学院硕士研究生。张 引, 女, 1970年生。浙江大学计算机学院副教授、博士。