

基于尖锐边界等值面填充算法的型壳有限元 网格自动划分

杨明, 陈涛, 廖敦明, 曹流, 唐玉龙
(华中科技大学, 材料成形与模具国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 在熔模铸造的模拟过程中, 型壳网格的质量对于模拟金属模型的成形形状、成形性能、内部缺陷等都有很大影响。近来比较引人注目的网格划分算法当属Labelle and Shewchuk的等值面填充算法。本文基于改进的等值面填充算法, 替换填充包围盒的晶格和采用特征匹配技术来提高单元网格质量, 从而可以快速高效地划分出任意复杂模型的型壳, 这对于保证和提高熔模铸造充型凝固模拟的准确度具有重要意义。

关键词: 等值面填充算法; 型壳; 熔模铸造; 有限元; 网格划分

中图分类号: TG316.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4977 (2016) 11-1071-04

The Finite Element Mesh Division Automatically of Shell Mold Based on Isosurface Stuffing Algorithm with a Sharp Boundary

YANG Ming, CHEN Tao, LIAO Dun-ming, CAO Liu, TANG Yu-long
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: During the simulation of investment casting, the quality of the shell mold mesh has a great influence on the shape, formability, internal defects of the process of metal forming simulation. Recently, the most compelling meshing algorithm comes from Labelle and Shewchuk's Isosurface filling algorithm. The paper is based on an improved isosurface stuffing algorithm, to replace the stuffing lattice and use feature matching technology to improve the quality of shell mold so that we can divide high quality shell mold of any form of complex model rapidly and efficiently, which is of great significance to ensure and improve the accuracy of the filling solidification simulation.

Key words: isosurface stuffing algorithm; shell mold; investment casting; the finite element; meshing

在熔模铸造的充型凝固模拟过程中, 一个高质量的模壳对于准确的模拟至关重要^[1-2]。高质量四面体网格问题本质上是两个对立面的结合体: 一方面需要划分的四面体单元网格具有高质量; 另一方面需要充分描述体积域, 特别是体积域的表面边界。二者之间不可能完全兼容。理论上最好的四面体网格是等边四面体, 单元体所有的二面角都相等。然而已经证明, 只是用等边四面体来划分一个结构, 即便是很简单的模型都无法让人满意^[3]。所以为了获得体积域的一致性, 只能在网格质量上做出妥协, 也就是说填充体积域包围盒用的晶格单元不可能全部是等边四面体。本文基于标准等值面填充算法, 从几个方面进行了改进, 大大提高了网格质量。所采用的关键技术包括符号距离场^[4]、快速扫描算法^[5]、特征匹配算法、四面体单元的

相关理论知识等。

1 标准等值面填充算法

标准的等值面填充算法包括如下几个步骤。

(1) 用有符号距离场表示体积域。为了易于操作, 便于计算机计算, 必须把零件体积域离散化。使用符号距离场来表示输入体积域。符号距离场采用离散化的方式来追踪等值面, 即变形后值相等的节点就处于同一等值面上, 从而可以准确地追踪模型的变形情况。

(2) 用体心立方晶体单元填充包围盒。首先构造输入体积域的方体包围盒。然后用体心立方结构的晶体单元 (BCC) 填充包围盒, BCC晶体单元具有比较直观的可视化和易于操作的特点, 如图1所示。最后切

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-0229); 国家数控重大专项 (2012ZX04010-031)。

收稿日期: 2016-05-10收到初稿, 2016-09-10收到修订稿。

作者简介: 杨明 (1990-), 男, 硕士, 主要研究方向为拓展有限元网格划分。E-mail: 746787197@qq.com

通讯作者: 陈涛, 男, 博士后。电话: 18071143215, E-mail: 415807550@qq.com

除掉完全处于体积域外部的四面体单元。

(3) 记录体积域边界和晶体单元相交信息。把那些和三角面片相交的四面体单元晶格的边全部记录在称为相交边的集合中,把相交边和三角面片相交的点叫做切除点。首先分别计算切除点到相交边的两个端点的距离,然后计算它们占整个相交边的距离比 α ,这个距离比 α 的大小就决定了接下来应该怎么处理这些相交边的端点。

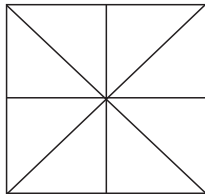
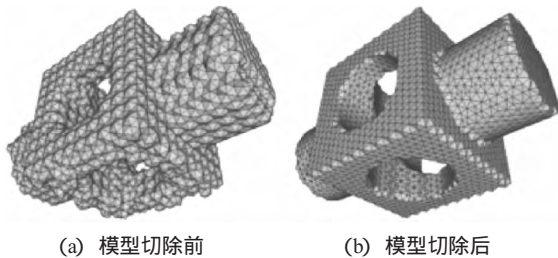


图1 体心立方平面示意图

Fig. 1 The schematic diagram of body centered cubic

(4) 根据记录的距离比 α 处理相交边的端点。如果距离比 α 处于一个给定的阈值 x 之内,那么就这些相交边的端点移到切除点上与之重合,这些调整后的相交边的端点就处于体积域表面。那些距离比 α 大于 x 的就认为切除点靠近相交边的任何一个端点的距离相当,这类切除点就不作特殊处理。

如图2所示的是一个模型网格进行划分时,经过切除操作前后的形状。从图中可以看出,划分后的模型边界以及顶点等尖锐特征都丢失了。这正是标准等值面填充算法的重大缺陷。



(a) 模型切除前 (b) 模型切除后

图2 模型切除操作前后对比

Fig. 2 The model before and after resection

标准等值面填充算法与其他自动网格算法相比,不仅简单而且易于实现。值得注意的是,该算法采用的BCC晶体模型限制了单元质量,而且标准等值面填充算法不能在最终的划分结果中显示尖锐特征,在划分后它的顶点、边界等尖锐特征会丢失。那么在那些需要显示不光滑特点的应用中,等值面填充算法就不适用了,这显然是有待改进的地方。

2 改进等值面填充算法

本文从改变填充包围盒的晶体模型和增加匹配算法两个方面来改进标准等值面填充算法。

2.1 提高单元网格质量

衡量四面体单元的网格质量的标准很多,比如宽

高比,二面角等^[6]。最理想的二面角是等边四面体的单元二面角,其值约等于 70.53° 。最理想的宽高比为1.2左右。所以单元的二面角越接近 70.53° ,宽高比越接近1.2,网格质量相对来说就越高;相反,越背离理想值网格质量就越差。当前很流行的填充晶格是BCC晶格模型,但是BCC模型全部是相同的立方体结构,网格状的特点限制了其网格质量的提高。

本文采用A15^[7]填充晶格代替BCC晶格。A15晶格的示意图如图3所示。



图3 A15晶格示意图

Fig. 3 The diagram of A15 lattice

从图3中可以看到A15晶体是五阶边或六阶边,说明A15晶格模型的所有二面角都处于 53° 和 79° 之间,很接近理想二面角,所以是一种比较理想的填充模型。

2.2 特征匹配

标准的等值面填充算法不可以显示非光滑特征,从第一节的图2所示的最终划分结果可以看出。所以本文目的很明确,就是要在最终划分的结果中显示出尖角和边界线等尖锐的特征。这种方法称之为特征匹配算法,其流程如下:

(1) 首先划分模型的四面体网格,此时没有显示尖锐特征;

(2) 对于输入体积域中的每个特征端点,比如顶点,在网格边界上找到一个最近的节点,并把它移动到特征端点上;

(3) 对于输入体积域中的每个特征曲线,比如边界线,以两个特征端点作为一条路径的首尾点,找到一条穿越网格边界的路径,然后把每一个分布在这条路径周围的节点移动到路径上;

(4) 在网格上面进行顶点圆滑来保持网格单元质量,已经被移动到特征(端点,边界)上面的就固定在特征上面,没有移动的而处于网格边界上的就留在等值面上。

如图4所示,可以看出采用特征匹配算法后就可以很好的显示输入体积域的尖锐特征,也就对模型外轮廓线进行精确地剖分。

3 模壳网格的自动划分

基于前面所述的划分网格的具体的算法以及流程,

采用修正后的算法来划分网格可以确保网格质量。对于熔模铸造而言，自动生成模壳是进行模拟的前提^[8]，接下来需要获取模壳结构。模壳其实就是包裹体积域的一个模腔，把原始体积域的零等值面（即表面边界）向外扩展几个距离值就可以得到一个形状相同、体积更大的体积域，接着将两个体积域进行布尔差运算就可以得到模壳结构了。图5为输入体积域模型，用三角面片的格式显示。

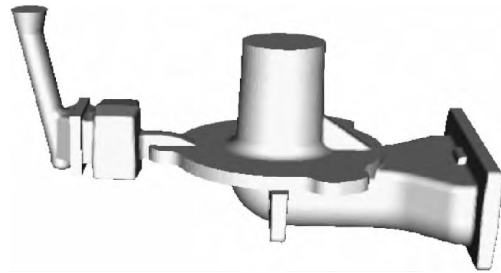
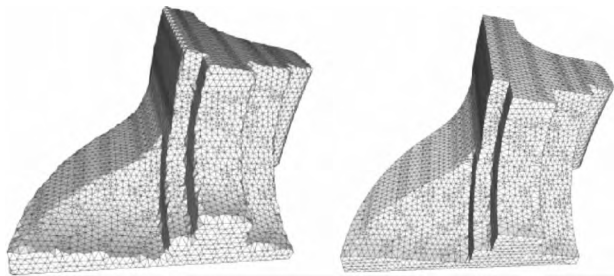


图5 输入体积域
Fig. 5 The input model



(a) 特征匹配前 (b) 特征匹配后
图4 特征匹配前后

Fig. 4 Without and with feature matching

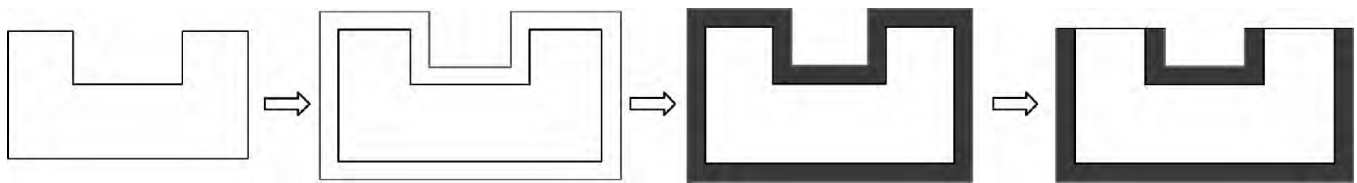
3.1 构造体积域包围盒

采用长方体的对称包围盒来包围体积域。构造包围盒时一般要多加几层网格来保证外扩模型完全被包裹其中，这一点对于本文所用方法来说尤为重要。层

数过多，增加计算负担且不符合实际情况；层数过少，模型外扩后可能溢出，更加不合理。所以必须选择一个合理的层数，具体加多少层网格与外扩的距离值的大小相关。

3.2 初始化输入体积域

第一节已经介绍过采用符号距离场（SDF）来离散化输入体积域。但是本文需要同时初始化两个输入体积域。其中一个SDF用于表示原始体积域，另一个用于表示外扩后的体积域，然后两个SDF进行一次布尔差运算，即从外扩后的体积域中减去原始模型体积域就得到了模壳结构。图6为输入模型的外扩流程图，图中黑色实线为原始输入模型边界，红色实线为外扩后的模型边界。



(a) 原始模型 (b) 外扩后模型 (c) 挖空内部零件后模型 (d) 构造浇口特征

图6 模型外扩流程图

Fig. 6 The flow chart of mold extending

3.3 构建浇口特征

对于熔模铸造零件来说，成型过程中都要有浇口结构，以本文所用算例来看，外扩后再进行布尔差运算，模型处于一个封闭形状，没有浇口，显然不合理。如图7所示，黑色圆圈处显示浇口处于密闭状态。

为了使浇口处于开通状态，本文采用一个平面截取封闭的浇口，即再次进行布尔差运算，从而构建出合理的浇口形状，如上图8所示。

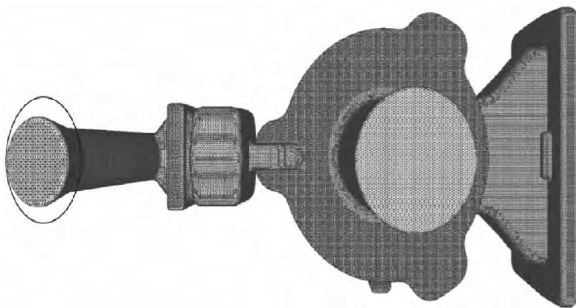


图7 型壳的初步划分结果

Fig. 7 The preliminary division results of shell mould

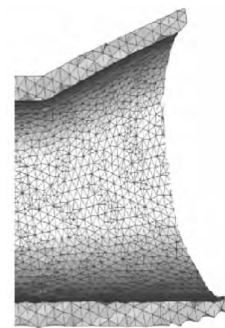


图8 冒口的最终状态

Fig. 8 The final state of riser

3.5 最终划分结果

把前面几步中的布尔运算得到的最终SDF代入改

进后的填充算法中就可以获得高质量的模壳网格。图9所示的是剖分后输入模型y轴方向的剖面图。可以看出其结构特别复杂，但是即便这样复杂的模型结构，采用本文所用方法还是可以划分出高质量的模壳网格。

4 数据分析

衡量四面体单元网格质量最流行的标准主要有单元的宽高比 q 和二面角 c 。通过对生成的网格质量的相关数据进行分析，我们可以得出单元网格质量的好坏。如图10和图11显示了四面体单元网格的质量状况。

从图10中可以看出，宽高比 q 在0~1.5的占20.3%，1.5~2的占44.26%，2~2.5占25.17%，在2.5以下的比

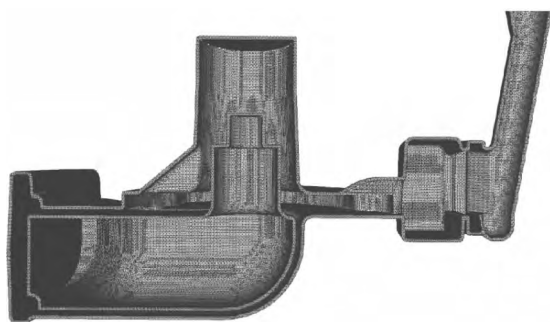


图9 沿y轴的剖面图

Fig. 9 Final profile by y axis of symmetry

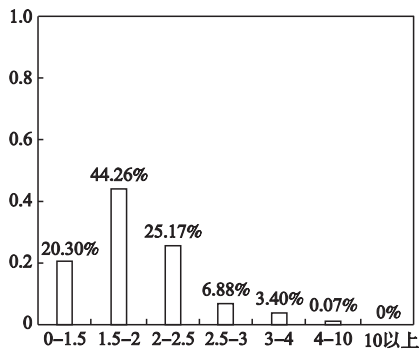


图10 网格单元的宽高比

Fig. 10 The aspect ratio of tetrahedral

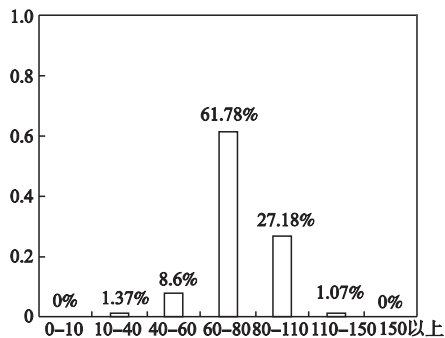


图11 网格单元的二面角

Fig. 11 The dihedral angle of grid unit

例占据了绝大多数，接近理想值1.2的单元数量也最多。所以从宽高比这个衡量标准来说，本文划分的网格质量很高。

二面角 c 也是衡量网格单元质量好坏的重要标准，其定义为四面体单元中两个邻边的夹角。接近理想二面角 70.53° 为比较理想的二面角。从图11中可以看出，二面角在 $60^\circ\sim 80^\circ$ 占61.78%，在 $80^\circ\sim 110^\circ$ 的占27.18%，显然大部分单元的二面角处于 $60^\circ\sim 110^\circ$ ，而且处于 $70^\circ\sim 80^\circ$ 这种比较理想的二面角占据了大多数。由此可见所划分的单元质量很高。

5 结语

本文首先从两个方面改进等值面填充算法，其中一方面是用A15四面体单元来替换体心立方结构；另一方面采用了特征匹配算法，从而保证离散模型的尖角、折皱等尖锐特征。改进后的算法保证了划分后的单元网格质量处于一个优良的范围。这种模壳生成方法不仅可以随形而动，而且操作简单。然后采用构建包围盒模型、符号距离场、布尔运算、四面体单元结构理论、特征匹配算法等关键技术，研究了快速高效的划分出任意形状的输入模型的模壳。最后通过对相关的数据进行分析，从而得出了本文所用方法相较其他方法^[9]划分的模壳网格质量高的结论。

参考文献：

- [1] 潘玉洪. 熔模铸造型壳变形等缺陷分析 [J]. 凿岩机械气动工具, 2014 (4) : 27-32.
- [2] 彭刚, 董安平, 王俊. 高温合金大型薄壁件熔模精铸技术与发展 [J]. 铸造工程, 2012 (3) : 1-4.
- [3] Labelle F, Shewchuk J R. Isosurface stuffing : fast tetrahedral meshes with good dihedral angles [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26 (3) : 57-67.
- [4] 董吉文, 杨海英, 张冰. 水平集方法中符号距离函数的快速生成 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (34) : 180-182.
- [5] Zhao H. A fast sweeping method for eikonal equations [J]. Mathematics of Computation, 2005, 74 (250) : 603-627.
- [6] Shewchuk J. What is a good linear finite element?-Interpolation, conditioning, anisotropy, and quality measures. eleventh international [J]. Meshing Roundtable, 2002 (9) : 115-126.
- [7] Sullivan J M. The geometry of bubbles and foams [M]. Springer : In Foams and emulsions, 1999 : 379-402.
- [8] 张锡平, 闫双景. 熔模铸造型壳的现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2002 (5) : 30-31.
- [9] Shephard M S, Georges M K. Automatic three-dimensional mesh generation by the finite octree technique [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1991, 32 (4) : 709-749.

(编辑：曲学良, qxl@foundryworld.com)