文章编号:2096-1472(2023)08-0016-04

DOI: 10.19644/j.cnki.issn2096-1472.2023.008.004

基于参数驱动和自动剖分的体参数化模型构建

邝传基,陈 龙

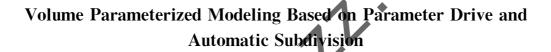
(上海理工大学机械工程学院,上海 200082) ⋈ 834317210@qq.com; cl@usst.edu.cn



摘 要:为实现计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助分析(CAE)的一体化,构建适用于等几何分析的模型,有 关学者提出体参数化造型方法。针对体参数化模型构建过程中存在的操作烦琐、耗时长等问题,文章提出一种参数 驱动体参数化模型快速构建的方法。首先,从草图中提取模型轮廓参数,利用提取到的参数构建模型的样条曲线轮 廓,其次结合剖分算法对曲多边形进行剖分,最后将二维曲面映射到三维得到体参数化模型。实例表明该方法能够 通过较少的模型参数快速得到体参数化模型,无须进行节点矢量等数据的重复输入。

关键词: 等几何分析; 体参数化; 剖分; 样条

中图分类号:TP391.4 文献标志码:A



KUANG Chuanji, CHEN Long

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China) ⊠ 834317210@ uq.com; cl@usst.edu.cn

Abstract: In order to achieve the integration of Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Engineering (CAE), and build models suitable for Isogeometric analysis, scholars have proposed a volume parameterized modeling method. Aiming at the problems of cumbersome operations and time consumption in the process of volume parameterized modeling, this paper proposes a parameter-driven method for rapid construction of volume parameterized models. Firstly, model profile parameters are extracted from the sketch, and the extracted parameters are used to construct the spline profile of the model. Then, subdivision algorithm is used to subdivide the curved polygon. Finally, the 2D surface is mapped to the 3D, so as to obtain a volume parameterized model. Examples show that this method can quickly obtain volume parameterized models with fewer model parameters, without the need for repeated input of data such as node vectors.

Key words: Isogeometric analysis; volume parameterization; subdivision; spline

0 引言(Introduction)

随着智能制造的快速发展,对产品的设计与分析的要求也随之提高,以缩短产品设计周期及降低成本为目的,计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助工程(CAE)一体化已成大势所趋。等几何分析(IGA)融合了计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助工程(CAE)两个相关学科,近年来成为数值分析和几何建模

领域的一个热点。

当代计算机辅助几何设计(CAGD)系统生成的三维几何对象几乎完全利用边界表示(B-rep)和构造表示(CSG)^[1],使用传统有限元分析法对几何模型进行分析优化时,需要进行划分网格,而离散网格生成阶段约占整个设计分析过程的80%,实际设计优化过程中模型可能要进行多次转换,导致模型细节易

丢失,时间成本也比较高,而基于样条曲线表达体参数化模型以及等几何分析有望实现 CAD 和 CAE 的无缝融合。以 B 样条或非均匀有理 B 样条作为映射函数的体参数化模型可避免 B-Rep 和 CSG 表达模型的缺陷,不需要进行格式转换和划分网格,就可直接进行分析和优化。但是,体参数化模型表达形式必须是零亏格的三变量张量体,导致其难以创建具有任意拓扑结构的三维模型,比如带有空洞的模型。此外,在创建体参数化模型时,需要进行控制点、节点矢量、次数等参数的设置,这也使得时间成本升高。本文提出一种快速构建体参数化模型的方法,从草图中提取模型轮廓参数,首先利用提取到的参数构建模型有理 B 样条曲线轮廓,其次结合四边剖分算法对曲多边形进行剖分,最后将二维映射到三维得到体参数化模型。

1 相关工作(Related work)

由于非均匀有理 B 样条(NURBS)在形状定义方面的功能强大,可精确表示二次曲线和球面等曲面,通常用来构建复杂体参数化模型。目前,体参数化模型的构建主要分为创建式和重建式两种方法。创建式方法通过构建截面和路径,并结合拉伸、扫描和放样等几何操作,得到体参数化模型^[2]。重建式方法通过提取现有的点云模型和标准格式模型等模型中的参数或特征构建体参数化模型^[3-4]。创建式方法多采用不同样条进行体参数化模型的构建,其中 B 样条和 NURBS 的应用较为广泛。王中等^[5]提出一种基于特征驱动的 T 样条船体曲面参数化设计方法。何坤金等^[6]提出了层次参数化的自由曲面特征表示与实现方法。目前,重建式方法应用较为广泛,但模型转换存在误差。ZUO等^[7]将 CSG 模型重新分成若干实体,并用NURBS 进行表示,将相邻两个实体进行裁剪并参数化,结合布尔运算得到整体模型。

在构建体参数化模型时,需要对存在 云格的模型进行剖分,使之转化为零亏格模型。目前,针对模型剖分的算法已有大量相关研究,主要分为简单多边形凸分解和网格分解。(1)简单多边形凸分解,剖分结果多为三角形和四边形集合,如梯形分割算法^[8]。(2)网格分解,剖分得到有限元网格或曲四边网格,三维网格是在二维网格的基础上得到的,如 Q-Morph(曲面四边形生成)法。陈建军等^[9]提出一种基于前沿推进三角网格思想的铺路法拓展至曲面四边网格生成的方法。对于适用于等几何分析的二维参数化曲面或三维体参数化模型,其形式为严格的双变量张量曲面或三变量张量体,映射到物理域为二维四边曲面或三维六面体,故剖分之后应为全四边形或六面体,因此直接进行体分割较为困难,可在二维剖分的基础上结合特征操作得到体参数化模型。

2 体参数化理论基础 (Theoretical basis of volume parameterization)

2.1 B 样条基函数

采用 de Boor-Cox 递推公式定义 B 样条基函数,其表示形式如公式(1):

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{ #t} \end{cases} \\ N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \end{cases}$$
(1)
$$\frac{0}{0} = 0$$

其中, $N_{i,p}(u)$ 表示第 $i \land p$ 次基函数, $i \in [0,n]$, u_i 为节点,保证 $u_i \leq u_{i+1}$.

2.2 NURBS

在B样条的基础上增加权重,得到NURBS。NURBS继承了B样条所有的优点,能够精确地表达圆锥曲线,具有更高的灵活性。通过对NURBS曲线的控制点和权重的调整,可以得到更为精确的模型。此外,NURBS有许多比较成熟且高效的算法,比如曲线升阶、曲线拟合、节点插入和节点细化等,可在计算机中实现。

对于u 方向次数为p 的 NURBS 曲线, 其表达式如公式(2):

$$\sum_{i=0}^{n} N_{i,p}(u)\omega_{i}P_{i}$$

$$\sum_{i=0}^{n} N_{i,p}(u)\omega_{i}$$
(2)

其中, $N_{i,p}(u)$ 分别是次数为 p 的基函数, P_i 是 NURBS 曲面的控制点, α 。为控制点权重。

对于a方向次数为p和v方向次数为q的 NURBS 曲面, 其表达式如公式(3):

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}}$$
(3)

其中, $N_{i,p}(u)$ 、 $N_{j,q}(v)$ 分别是次数为p、q 的基函数, $P_{i,j}$ 是 NURBS 曲面的控制点, $\omega_{i,j}$ 为控制点权重。

对于 u 方向次数为 p、v 方向次数为 q 和 w 方向次数为 r 的 NURBS 体,其表达式如公式(4):

$$V(u,v,w) = \frac{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{l} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k} P_{i,j,k}}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{l} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \omega_{i,j,k}}$$

其中, $N_{i,p}(u)$ 、 $N_{j,q}(v)$ 、 $N_{k,r}(w)$ 分别是次数为 p、q 、r 的基函数, $P_{i,j,k}$ 是 NURBS 体的控制点, $\omega_{i,j,k}$ 为控制点权重。

3 体参数化模型构建(Volume parameterized modeling)

以 NURBS 为基础,采用创建式方法直接进行体参数化构建,但是在模型构建过程中,需要手动给出曲线的控制点、节点矢量和次数,操作烦琐,导致工作量较大、时间成本高。

本文从草图中提取模型的主要参数,根据参数设置对应控制点坐标,由点与点之间的拓扑关系,得到模型的内外轮廓,结合改进的剖分算法对多边形进行剖分,结合拉伸等特征操作生成体参数化模型^[10]。体参数化模型构建流程如图 1 所示。

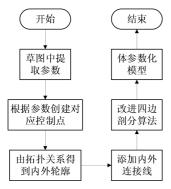


图 1 体参数化模型构建流程

Fig. 1 The process of volume parameterized modeling

3.1 参数驱动 NURBS 曲线模型构建

模型构建过程中,最主要的是多边形轮廓的生成,为提高模型轮廓构建效率,将常用轮廓线进行封装,并存放到模型库中。在构建多边形轮廓时,通过直接调用模型库中的基础轮廓线,达到模型快速构建的目的。

直线是曲线中的一种,是多边形轮廓中最常用的,所以将其封装成模板,并存入模板库中。设置直线的节点矢量 $U=\{0,0,0,1,1,1\}$,次数为2,通过给出起始点和终止点,构建目标直线,如图2(a)所示,其端点权重默认为1。同样,设置弧线段的初始节点矢量为 $U=\{0,0,0,1,1,1\}$,曲线次数为2,给出初始3个顶点,构建角度为90°的圆弧线,如图2(b)所示,其顶点权重分别为 $1,\cos(\pi/4)$ 、1。

在多边形轮廓构建过程中,时常会出现任意角度 θ 的圆弧,如图 2(c)所示。这时,需要对中间顶点的权重进行计算 其权重计算公式如下:

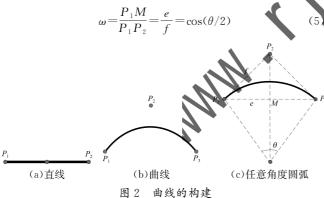


Fig. 2 Construction of the curve

3.2 参数驱动 NURBS 曲面模型构建

对于一些常用的二维平面模型,也可以将其存放到模型库中,当要使用时,只需要输入相应的参数即可。在构建二维平面模型轮廓的时候,可以使用模型库中的基本曲线构建轮廓。我们只需要设置基本的参数,由参数得到模型中的特征点坐标,进而生成多边形的轮廓线。最常用的二维模型是圆形和正方形:通过输入二维圆模型的半径,得到圆的轮廓多边形,然后使用 Coons 插值,得到二维曲面,如图 3(a)和图 3(b)所示。同样,通过输入正方形外轮廓边长和内轮廓半径最终得到二维曲面模型,如图 3(c)和图 3(d)所示。

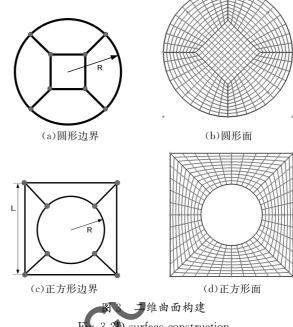


Fig. 3 2D surface construction

3.3 参数驱动 NURBS 体模型构建

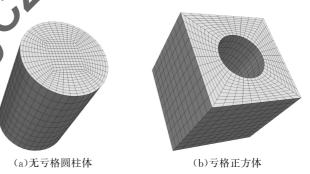


图 4 三维模型构建

Fig. 4 3D model construction

3.4 复杂模型构建

对于复杂模型,特别是存在亏格的机械零件模型,在进行体参数化模型创建时,首先需要将其转换为零亏格的模型,其次进行全四边剖分,最后构建体参数化模型。

存在亏格的几何域,可通过改进连接线自动生成算法得到内外轮廓连接线,使其转换为零亏格^[10]。图 5 为连接线生成过程。

图 5 从左到右依次为模型轮廓、所有符合要求的连接线和 最佳连接线。通过设置角度约束,从所有可行连接线中寻找最 佳连接线,可提高后续剖分模型的质量。连接线的自动生成能 够减少人工干预,提高整个体参数化模型的构建效率。

改进文献[11]中提出的剖分算法实现平面的全四边剖分, 经过 Coons 插值,得到 NURBS 曲面。对得到的剖分面进行拉 伸、放样等特征操作,可得到 NURBS 体参数化模型。图 6 为模型生成过程,分别表示模型内外轮廓、连接线、NURBS 曲面和 NURBS 体。

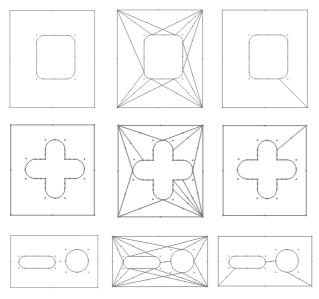


图 5 连接线生成过程

Fig. 5 Generation process of connection line

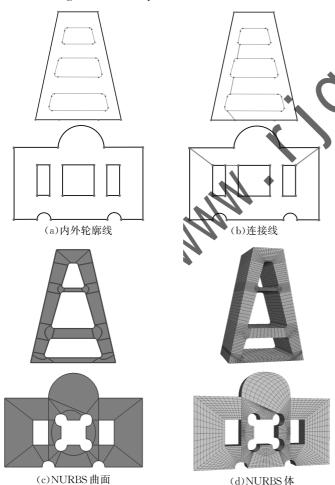


图 6 复杂零件快速构建示例 Fig. 6 Example of rapid construction of complex parts

4 结论(Conclusion)

本文提出一种基于参数驱动和自动剖分的体参数化模型 快速构建的方法。该方法通过对常用曲线、曲面、体模型等进 行封装,存入模型库中,并结合改进的四边剖分算法,快速得到 全四边形样条曲面,再通过拉伸、放样等特征操作得到体参数 化模型。此方法能够克服以往方法工作量大、时间成本高等缺 点,快速构建体参数化模型,得到的模型可直接用于等几何分 析和优化。

参考文献(References)

- [1] MASSARWI F, ANTOLIN P, ELBER G. Volumetric untrimming: precise decomposition of trimmed trivariates into tensor products [J]. Computer Aided Geometric Design, 2019, 71:1-15.
- [2] AIGNER M, HEINRICH C, JÜTTLER B, et al. Swept volume parameterization for isogeometric analysis [C] // HANCOCK E R, MARTIN R R, SABIN M A. IMA International Conference on Mathematics of Surfaces XIII. Berlin Heidelberg: Springer, 2009, 5654, 19-44.
- [3] GOYAL M, MURUGAPPAN S, PIYA C, et al. Towards locally and globally shape-aware reverse 3D modeling[J]. Computer Aided Design, 2012, 44(6):537-553.
- MARTIN T, COHEN E. Volumetric parameterization of complex objects by respecting multiple materials [J]. Computers & Graphics, 2010, 34(3):187-197.
- []] 王中,彭飞,韩玉超,等. 特征驱动的 T 样条船体曲面参数 化设计方法研究[J]. 舰船科学技术,2017,39(15):7-11.
- [6] 何坤金,赵宗星,耿维忠,等. 层次参数化的自由曲面特征表示与实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26 (5):826-834,840.
- [7] ZUO B Q, HUANG Z D, WANG Y W, et al. Isogeometric analysis for CSG models [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 285: 102-124.
- [8] 王金敏,刘季烨,方沂. 基于梯形分解的不规则多边形干涉 算法[J]. 工程图学学报,2005,26(6):52-57.
- [9] 陈建军,郑建靖,季廷炜,等. 前沿推进曲面四边形网格生成算法[J]. 计算力学学报,2011,28(5):779-784.
- [10] 徐岗,舒来新,朱亚光,等. 边界简化与多目标优化相结合的高质量四边形网格生成[J]. 中国图象图形学报,2018,23(1):61-73.
- [11] 王博,李笑牛,李华. 一种加权剖分简单多边形为三角形和凸四边形子域的算法[J]. 中国图象图形学报,2002,7(5):486-490.

作者简介:

产传基(1998-),男,硕士生。研究领域:几何图形学。 陈 龙(1978-),男,博士,教授。研究领域:几何图形学。