

建筑设计中曲面网格的划分方式及优化策略

李玉栋¹ 梁翠华²

1. 山东华太规划建筑设计有限公司; 2. 山东银河建筑规划设计有限公司

摘要: 随着科技和工程技术的不断发展, 建筑设计领域对于复杂形态和曲面的需求日益增加。传统的建筑几何形态已经不能满足当代建筑设计的要求, 设计师们更加倾向于使用曲面来表达建筑的独特性和创新性, 然而, 曲面的设计和构建不仅具有挑战性, 而且涉及复杂的几何学和工程学问题。因此, 深入研究建筑设计中曲面网格的划分方式及优化策略具有重要的理论和实践意义。本文通过对建筑设计中曲面网格的划分方式及优化策略进行深入研究和探讨, 期望可以为建筑设计领域提供新的方法和技术支持, 促进建筑设计的创新和发展, 推动建筑行业向着更加智能化、精确化和可持续发展的方向发展。

关键词: 建筑设计; 曲面网格; 划分方式; 优化策略

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2024. 17. 103

前言

有效的曲面网格划分方式和优化策略可以提高建筑设计的效率和质量, 减少设计和施工过程中的错误和重复工作, 降低建筑项目的成本和风险。研究曲面网格的划分方式和优化策略有助于拓展建筑设计技术的应用范围, 推动建筑设计与计算机科学、工程学等学科的跨学科融合, 为建筑设计师提供更多的设计工具和技术支持。

一、建筑曲面网格划分的目的和意义

建筑曲面网格划分是将建筑曲面分割成离散的小单元网格的过程。曲面网格划分为建筑几何形态的数字化建模提供了基础, 通过将建筑曲面分割成离散的小单元网格, 建筑设计师可以利用计算机辅助设计工具对建筑进行几何分析、可视化呈现和设计优化, 这有助于精确捕捉建筑的形态特征, 加快设计过程并提高设计效率。曲面网格划分为进行建筑结构的分析和仿真提供了基础, 通过将曲面分割成小单元网格, 可以更精确地进行结构分析, 如有限元分析、结构强度等, 从而评估建筑结构的性能和安全性, 这有助于设计师优化结构设计, 确保建筑的结构稳定和安全。

曲面网格划分为建筑制造和施工提供了技术支持, 通过将曲面分割成小单元网格, 可以为数控加工、数字化建造等提供必要的几何信息, 使得复杂曲面的制造和施工更加精确和高效。这有助于降低制造成本, 缩短施工周期, 提高建筑质量。曲面网格划分有助于建筑设计师考虑光影效果和视觉体验, 通过对曲面网格的划分, 可以优化建筑的外观和空间感受, 使得建筑更具艺术性和美感, 有助于提升建筑的整体品质, 增强人们的空间体验和情感共鸣。

二、常用的网格划分方法和技术

(一) 均匀网格划分

均匀网格划分是一种常见且直观的曲面划分方法, 其将曲面均匀地分割成小单元网格, 每个网格单元的形状和大小相似, 适用于简单曲面和规则形状的建筑。均匀网格划分方法简单直观易于理解和实现, 通过将曲面均匀地分割成小单元网格, 可以快速生成网格模型, 为建筑几何形态的数字化建模提供了基础。均匀网格划分使得每个网格单元的形状大小相似, 从而保持了整个曲面网格的稳定性和可控性, 这种划分方法能够有效地保持曲面的几何特性和光滑性。均匀网格划分适用于各种简单曲面和规则形状的建筑, 如平面、圆柱体等, 其可以满足一般建筑设计中对于几何建模和分析的基本要求。均匀网格划分为建筑结构的分析和制造施工提供了基础, 通过对曲面进行均匀网格划分, 可以进行结构分析和仿真, 评估建筑结构的性能和安全性, 并为建筑的制造和施工提供数控加工、数字化建造等技术支持。

尽管均匀网格划分方法简单, 但在处理复杂曲面或非规则形状的建筑时可能存在网格单元不均匀或浪费空间的问题, 因此, 在实际应用中, 需要根据具体的建筑形态和设计需求选择合适的曲面划分方法, 以实现准确建模和优化设计。

(二) 自适应网格划分

自适应网格划分是一种根据曲面的几何特性和曲率变化来动态调整网格密度的划分方法, 其主要思想是在曲面的不同区域, 根据需要调整网格的大小和密度, 以便更好地捕捉曲面的局部特征和变化, 这种划分方法适用于复杂曲面和不规则形状的建筑, 能够提高模型的准确性和效率。

根据曲面的几何特性和曲率变化, 自适应地调整网格的密度, 使得网格在曲面的不同区域具有不同的分辨率, 从而更好地捕捉曲面的局部特征。自适应网格划分能够更准确地表达曲面的形态和细节, 使建筑模型更加真实和精确。与均匀网格划分相比, 自适应网格划分能够在保持模型准确性的同时, 减少不必要的网格数量, 提高模型的计算效率和性能。自适应网格划分适用于各种复杂曲面和不规则形状的建筑, 能够满足不同建筑设计需求的网格划分要求。

(三) 细分网格划分

细分网格划分是一种基于细分曲面的思想, 采用逐步细分的方法生成更加精细的网格的划分方法, 在细分网格划分中, 曲面被初始网格分割成粗糙的小单元, 然后通过反复迭代细分每个小单元, 逐步生成更加精细

的网格。这种方法适用于需要高精度表示的复杂曲面建模，能够提供更准确、更细致的曲面网格表示。

细分网格划分能够生成更加精细的曲面网格，可以准确地捕捉曲面的细节和特征，提供高精度的建模效果。通过控制细分的次数和细分规则，可以灵活地调整网格的精细程度和密度，使得细分网格划分具有更好的可控性和适应性。细分网格划分适用于各种复杂曲面和细致形态的建模，能够满足不同建筑设计需求的网格划分要求。细分网格划分能够生成具有连续性和光滑性的曲面网格，能够更好地保持曲面的局部特征和整体形态。尽管细分网格划分需要进行多次迭代计算，但由于每次迭代只对局部区域进行细分，因此相比一次性生成高密度网格的方法，细分网格划分具有更高的计算效率。

（四）拓扑优化

拓扑优化是一种通过优化曲面的拓扑结构，减少网格的复杂度和冗余度，从而提高网格划分的效率和性能的方法，在拓扑优化中，主要关注的是曲面的拓扑结构，即表面上的顶点、边和面之间的连接关系，以及这些连接关系的合理性和简洁性。

通过优化曲面的拓扑结构，可以去除网格中的冗余部分和不必要的连接，使得网格的结构更加简洁和紧凑，减少数据存储和计算的负担。简化曲面的拓扑结构可以降低网格处理和计算的复杂度，提高网格划分和处理的效率，加快建模和仿真的速度。拓扑优化过程中要尽量保持曲面的几何特性和形态，确保优化后的曲面与原始曲面尽可能接近，以保证模型的准确性和可靠性。拓扑优化是一种基于算法的优化方法，通过设计和实现有效的优化算法，可以实现对曲面拓扑结构的优化，从而提高网格划分的质量和性能。

三、基础曲面分类及特点

（一）直纹曲面

直纹曲面是一种具有沿着一条或多条直线方向延伸的曲面，其曲率沿着特定方向保持一致或基本一致的曲面形态。直纹曲面可以由一条直线或多条平行直线进行移动和旋转形成的曲面，也可以是由直线和曲线组成的曲面，其特点是沿着某一或某些方向呈现出明显的线性特征。直纹曲面的几何形态相对简单清晰，易于理解和控制，具有较高的几何可控性，由于直纹曲面具有明显的线性特征，其在空间中的延伸和方向感较强，能够为建筑空间提供清晰的引导和组织。

直纹曲面常用于建筑立面设计中，作为立面表面的装饰或结构元素，以营造线性、简洁的立面效果。直纹曲面可以作为墙面装饰板材的表面纹理或图案，使得墙面具有线性排列的装饰效果，增强空间的视觉感受。在屋顶设计中，直纹曲面可以作为屋面的几何形态，以实现线性排列的屋面造型，提升建筑的整体视觉效果。直纹曲面还可以作为空间分隔和界面元素，通过线性排列

的曲面形态，划分和组织建筑内部空间，增强空间的层次感和结构感。直纹曲面是一种具有明显线性特征的曲面形态，在建筑设计中具有广泛的应用价值，可以用于立面设计、墙面装饰、屋顶设计以及空间分隔等方面，为建筑空间提供简洁清晰、线性引导的设计效果。

（二）双曲面

双曲面是一种具有双曲线形状的曲面，其特点是在两个不同方向上的曲率均为相反的，形成对称的双曲线形态。在建筑设计中，双曲面常常被用于创造独特的空间形态和动态的外观效果。双曲面的特点是具有双曲线形状，其曲率在两个方向上相反，使得双曲面呈现出独特的曲线特征。双曲面具有对称性，其两侧的曲率和形态呈现对称关系，使得双曲面在视觉上具有平衡和协调感。双曲面的曲线形态能够创造出丰富的空间感和动态的外观效果，为建筑带来生动的视觉体验。双曲面的结构形态相对灵活，可以根据具体设计需求进行调整和优化，满足不同空间和功能的要求。双曲面具有独特的曲线形态和动态效果，能够提升建筑的视觉吸引力和标志性，吸引人们的注意，双曲面的曲线形态能够创造出丰富的空间感和流畅性，使建筑空间更加富有变化和层次感。双曲面的结构形态相对灵活，能够实现多样化的建筑设计，满足不同设计理念和审美需求。

（三）可展开曲面

可展开曲面是指在特定条件下能够完全展开成平面的曲面结构，这种曲面通常具有特定的几何特性，使得在适当的情况下可以将其展开成平面，从而方便制造、加工和施工。可展开曲面通常用于建筑设计中需要复杂曲面结构的情况，如拱顶、穹顶、折叠结构等。

可展开曲面能够在不损失形态的情况下完全展开成平面，使得其在制造、加工和施工过程中更加便利和经济。由于可展开曲面可以准确展开成平面，可以有效地优化材料利用率，降低材料成本，节约资源。可展开曲面的平面展开形式使得施工过程更加简单明了，减少了施工中的测量和调整工作，降低了施工难度和风险。可展开曲面具有较高的设计灵活性，能够实现更多样化、创新化的建筑形态和结构设计，满足建筑设计师对于建筑表现形式的的需求。

四、网格单元划分优化策略

（一）基于曲面走势的思路建构

一是，逆向工程的曲面重建。逆向工程是指通过对现有曲面的分析和建模，得到曲面的参数化表示或几何模型的过程。在网格划分中，逆向工程的曲面重建需要获取现有曲面的数据，可以是现场测量、三维扫描或CAD模型导入等方式获取曲面的几何信息。对获取的曲面数据进行处理如清理数据、去噪声、曲面平滑等，以确保数据的质量和可用性。根据处理后的曲面数据，采用适当的曲面重建算法，生成曲面的参数化表示或几何模型。

二是，曲率走势可视化分析。曲率走势是指曲面上曲率值的分布和变化规律，曲率走势可视化分析是对曲面的曲率进行可视化展示和分析，以帮助理解曲面的形态特征和局部几何变化。通过对曲面进行曲率计算，得到曲面上各点的主曲率和平均曲率等曲率属性，将曲率属性映射到曲面上，并通过可视化技术展示曲率的分布和变化。分析曲率走势的变化规律，识别曲面上的高曲率区域、低曲率区域和曲率变化突变点等，以指导后续的网格划分策略。

三是，几何分区优化预处理。几何分区优化预处理是根据曲面的几何特征，将曲面划分为具有相似几何属性的区域，以优化网格划分策略。根据曲面的曲率走势和形态特征，将曲面划分为几何属性相似的区域如高曲率区域、低曲率区域和过渡区域等，对每个区域进行属性标记，如颜色标记或标签标记，以便后续的网格划分算法能够识别和区分不同属性的区域。根据不同区域的几何特征和要求，设计相应的网格划分策略，如在高曲率区域增加网格密度以更好地捕捉曲面细节，在低曲率区域减少网格密度以节约计算资源等。

（二）网格生成优化的思路建构

在建筑设计中，网格生成的优化是提高建筑模型质量和效率的关键步骤之一。细分逼近算法是一种通过不断迭代细分网格来逼近原始曲面的方法，其基本思想是从初始网格出发，通过重复迭代过程，将每个网格细分成更多的小网格，使得网格逐渐逼近原始曲面，常见的细分逼近算法包括二分法、三角形细分法等。

计算机自动寻优技术是一种利用计算机算法和优化方法，自动搜索最优解的方法。在网格生成中，可以使用自动寻优技术来优化网格的布局、密度和连接方式，以提高网格的质量和性能，常见的自动寻优技术包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。

无监督学习是一种从无标签数据中自动学习数据的分布和特征的方法。在网格生成中，可以利用无监督学习技术来分析和挖掘网格数据的特征和规律，从而优化网格的生成过程，常见的无监督学习技术包括聚类分析、主成分分析、自组织映射等。

优化检验标准是评价网格生成效果和性能的标准和指标。在网格生成优化过程中，需要设计合适的优化检验标准，用于评估生成网格的质量、准确性和效率，常见的优化检验标准包括网格光滑性、形状质量、网格分辨率、网格连接性等。通过综合应用这些方法，可以实现对网格生成过程的有效优化，提高建筑模型的质量和效率，满足建筑设计的需求和要求。

（三）生成网格结果的反馈分析

成网格结果的反馈分析是指对生成的网格进行质量评估和分析，以确定其是否满足设计要求和优化目标。形状质量分析是评估网格单元形状的好坏程度，其中，

网格单元变形度可以评估网格单元形状的扭曲程度，如长方形单元的纵横比、三角形单元的倾斜度等。评估网格单元的各边长度比和角度，以确定网格单元的度量稳定性，如是否存在过度拉伸或压缩等。对于曲面建模而言，评估网格单元与曲面的拟合程度，以确定网格单元的曲率适应性。

边缘长度分析是评估网格边缘的长度和分布情况，评估网格边缘长度的一致性，确保网格边缘的长度分布均匀，避免出现过长或过短的边缘。分析网格边缘的连接情况，确保相邻单元之间的边缘连接良好，避免出现断裂或重叠的边缘。分析网格边缘的曲率变化情况，确保曲面边缘的曲率变化平滑，避免出现突变或过渡不自然的现象。

网格流畅性标准是评估网格的整体流畅性和连续性，分析网格的连通性，确保网格单元之间的连接良好，避免出现孤立的或断裂的网格结构。分析网格中曲面的曲率变化情况，确保曲率变化的连续性，避免出现过渡不自然或突变的曲率变化。评估网格的整体平滑性，确保网格表面的平滑度和连续性，使得网格在视觉上更加自然和流畅。

五、结论

总之，在建筑设计中，曲面网格划分方式及优化策略的重要性不言而喻。曲面网格划分是建筑数字化设计的关键环节，影响着建筑模型的精确性、效率和可操作性。通过适当的网格划分方式和优化策略，可以实现对建筑曲面的准确建模、结构分析，为建筑设计的各个阶段提供支持与保障。

参考文献

- [1] 祝楚楚. 基于保特征拓扑有向图的曲面拟合及网格重划分方法研究[D]. 杭州电子科技大学, 2023.
- [2] 余昕. 复合曲面网格交界面中超网格算法研发与应用[D]. 中国舰船研究院, 2023.
- [3] 曹源, 陶志雄, 龙浩, 温四清. 某自由曲面单层网壳结构设计与节点分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 591-596.
- [4] 林茹. 样条曲面四边形网格划分算法研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [5] 张雷. 建筑设计中曲面网格的划分方式及优化策略[D]. 西安建筑科技大学, 2022.
- [6] 谢忠良, 李铁瑞. 复杂自由曲面的离散化网格划分方法[J]. 空间结构, 2021, 27(02): 19-23.
- [7] 刘峰成. 自由曲面单层空间网格结构形态与网格优化研究[D]. 东南大学, 2020.
- [8] 吴琨营. 自由曲面空间结构参数化网格划分与优化研究[D]. 东南大学, 2020.
- [9] 郑冲波. 双层自由曲面网格结构形态创构方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.