

构件可再利用的光滑复合双曲面结构设计与优化方法

刘玉倩¹, 曹婷²

摘要:

本文提出了一种基于平面节点限制的、构件可再利用的结构设计方法。该方法基于光滑复合双曲面原理生成满足平面节点限制的不同结构形态。根据拆解和重组顺序对结构构件进行分组聚类,采用遗传算法优化各组内构件长度,达到不同形态结构之间构件可以拆解再利用的目标。此外,平面节点设计较传统三维节点更易于建造和多次重复利用,降低了施工难度和成本,同时也提高了结构的美观性。本研究初步通过家具尺度构筑物的案例验证了该方法的可行性,为建筑结构再利用研究领域提供了新的思路 and 工具,推动了可持续建筑设计的发展。

关键词: 构件再利用, 光滑复合双曲面结构, 节点平面化, 优化

Keywords: Component reuse; smooth poly-hypar structures; node planarization; optimization

1 简介

1.1 背景

建筑环境是气候变化的主要贡献因素之一。在全球范围内,建筑业消耗 40% 的能源,并贡献了高达 25% 的温室气体排放(Li et al., 2019)。根据联合国环境规划署发布的《2021 年全球建筑和建设状况报告》,2019 年全球建筑行业的碳排放量接近 14 亿吨,占全球碳排放总量的 38%,其中 10% 来自建筑施工(Hu, 2022)。而根据《中国建筑节能年度发展研究报告 2020》,2019 年建筑施工和建筑过程的碳排放分别占总量的 21.2% 和 50.6%(Zou et al., 2024)。承重结构对环境产生的重大影响,主要归因于其大量的材料质量需求,以及能源密集型的施工过程和由此产生的废物。因此,降低建筑业的能源消耗对于减少碳排放至关重要。为实现该目标,需要从根本上重新审视当前的设计方法和建筑结构系统。在设计早期阶段就引入结构可再利用的概念,能为建筑行业的可持续发展提供新的动力。

在建筑几何设计过程之后引入传统的结构优化、施工简化或运营能源减少策略,通常效果有限。建筑几何在改善结构性能和施工经济方面发挥着重要作用。在设计初期考虑从整体上优化调节几何形态和施工便利等问题,不仅可以在整体可持续性方面达到最优结果,还能显著降低碳排放量,优于传统建造方式。将建筑结构拆解为单元部件,再重新组装形成新结构,能够有效减少废弃和碳排放。这一问题在曲面结构建筑领域尤为突出,主要是因为曲面构件大多需要

¹ 刘玉倩 哈尔滨工业大学(深圳)研究助理

² 曹婷 (✉) 哈尔滨工业大学(深圳), 助理教授 cao.ting@hit.edu.cn

定制，难以实现再利用。为解决这一问题，本文提出一种基于光滑复合双曲面的结构杆件重组和重复利用的设计策略(Cao et al., 2021)。曲面结构设计主要包括找形法和基于几何单元的塑形法两种。其中，基于几何单元的塑形法中，双曲抛物面因其优异的力学性能和几何特性备受关注。本研究提出的光滑复合双曲面概念，是在双曲抛物面研究基础上的进一步创新。与之前研究不同，本方法强调单元的光滑拼接和平面节点设计，这不仅提高了结构的美观性，还为构件的再利用提供了可能。满足新的功能需求的同时，达到了节约材料、降低碳排放的目的。

1.2 相关研究综述

相关研究主要包括两个方面:构件可再利用结构设计和曲面结构设计

1.2.1 构件可再利用结构设计

构件可再利用结构设计的相关研究包括三类:可逆结构设计;模块化空间框架;几何优化方法。L. Alegria Mira 列举可逆结构的设计案例可用在展开式紧急避难所(Alegria Mira et al., 2014), De Temmerman(Temmerman et al., 2012)等人提出通用剪刀组件结构,类似的可逆结构设计系统具有高度灵活性和多次重复使用的优势,减少浪费,但受限于临时建筑和特定结构形式。另一种被广泛应用的是模块化空间框架,比如 MERO 系统和 Rochas 的通用节点(LANIK, 2018)。这种方法标准化精度高,装配简单,但模块化限制设计自由发挥的程度。

几何优化是通过设定既定杆件长度目标,使用 kangaroo 等方式对既定目标进行找形,找到满足重复使用杆件的不同形态。该非模块化的方式带来多样的结构形式,实现杆件的高度重复利用,显著减少材料使用成本。此研究(Jan et al., 2021)举例两个不同结构,将所有结构构件按照几何相似性分组,每一步优化的所有构件使用 K-means 无监督学习算法,将杆件数据划分为 K 个聚类簇中,通过优化调整节点位置,以达到最小化每个簇的构件长度和标准差的既定目标,并完成找形。然而,该方法面对大规模或复杂模型时,全局优化导致找形时间冗长;其次,预设簇数 K 可能导致次优解的优化结果,而非同时输出最优簇数 K 和最优解。第三,复杂模型在单个节点上需要较多点位,将三种结构形态的节点位置整合在一个球型节点上,存在难以满足不同形态结构需要的所有点位的可能,需要增大节点尺寸,还将增加节点制作的难度和复杂性。这些问题在实际应用中可能会影响结构的整体性能和美观性。

因此,本文提出一种新的思路:从节点的再利用角度出发反推找形方法,不仅能够提高结构的可重复使用性,还一定程度上简化找形过程。这种新方法将在后续章节中详细阐述。

1.2.2 曲面结构设计

曲面结构设计主要包括：找形法和基于几何单元的塑形法 (Bechthold, 2008)。找形法通过物理或数值模拟来生成曲面形。早期找形法基于物理模型，如 Frei Otto 的悬挂模型法 (Boller & Schwartz, 2020)。设计者在有弹性的膜布上施加一种主导荷载（如重力、充气气压或张拉力），引起膜布形变达到整体平衡状态，从而生成曲面形式。再将变形后的膜布上下颠倒，使其荷载方向反转，曲面内部的拉力随之转化为压力，进而得以设计仅受轴力的坚固曲面。随着计算技术的发展，数值模拟的找形法逐渐取代了物理模型。这种方法能够更精确地模拟复杂的力学行为，为设计者提供更多的可能性。然而，找形法生成的曲面形式通常只在特定荷载下保持高效的结构性能，在其他荷载条件下可能需要增加结构厚度来支撑荷载。此外，找形法在形式生成过程中并未考虑建造因素，生成的自由曲面往往导致施工难度和建造成本的大幅增加。

与找形法相对的是基于几何单元的塑形法 (form-making)。这种方法可追溯到西方古典建筑中拱券与穹顶的发展，利用经典几何形体（如球体、圆柱体或双曲抛物面）来创造结构所需的坚固性，同时塑造艺术形式与空间。在塑形法中，双曲抛物面因其优异的力学性能和几何特性备受关注。Felix Candela 在 20 世纪 50-60 年代系统研究了双曲抛物面的结构应用 (Candela, 1955, 1960)。双曲抛物面与找形法生成的曲面或其他几何形式不同，得益于其特殊的双曲面，在不同荷载下仍能保持高效的结构性能。此外，双曲抛物面作为直纹曲面，可以利用直构件实现曲面的光滑性和连续性，为曲面提供了低技、低成本建造的可能性。然而，传统的双曲抛物面结构设计通常通过加固的梁来连接单元，在形式上会出现折痕，影响了整体的连续性和美观性。

基于传统双曲抛物面结构的研究，本文提出了一种新的光滑复合双曲面 (smooth poly-hyper surface) 结构设计方法。与之前的研究不同，这种方法强调单元的光滑拼接，避免了传统方法中单元之间的折痕，实现了视觉上的连续性。同时，这种方法保留了双曲抛物面的优异力学性能和几何特性，为曲面结构设计提供了新的可能性。光滑复合双曲面结构不仅满足了建筑设计对连续光滑曲面形式美的需求，还极大地提升了自由曲面的结构性能。其局部直纹化的特征也降低了建造施工的难度。这种新型结构的具体原理和应用将在后续章节中详细讨论

1.3 研究创新点与研究目的

针对以上研究中存在的整体优化过程冗长、可再利用三维节点过于复杂等问题，本文提出一种以平面节点为限制的曲面结构与再利用优化方法。这种设计方法以双曲抛物面为基本单元，遵循节点共面原则将单元拼接成连续曲面。其具有以下优点

[1] 基于双曲抛物面单元组合的共面原则，结构设计阶段引入平面节点限制，进而避免复杂的三维节点，简化了可再利用节点的构造复杂性。这种设计方法同时考虑了结构构件与节点再利用的可能性，弥补了目前相关研究中未完全解决的节点再利用问题。

[2] 充分利用结构单元化特点，采用分组优化策略。按照拆解安装步骤的顺序，将两个结构形态 A/B 对应的杆件进行分组，显著减少了对聚类算法的依赖。与全局整体优化相比，分组优化处理数据量更小，能有效提高优化效率，为光滑复合双曲面结构的再利用设计提供了高效、可行的优化策略。

2、基于平面节点的光滑复合双曲面结构

光滑复合双曲面结构是一种单元化的负高斯曲率自由曲面。双曲抛物面作为基本的几何单元，相互之间光滑拼接成为了完整的曲面。这种光滑性，不仅从视觉上符合了建筑形式美的要求，也从结构传力效率上保证了力学的合理性。

在设计中需要寻找的是一种既符合结构力学原理的双曲抛物面单元组合原则。在单个双曲抛物面中，当其支座反力的方向总与面上直线平行时，内力总是在面内传递，因而不会引起弯矩产生(Candela, 1955, 1960; Cao, December; Cao et al., 2021)。同样的，双曲抛物面的组合原则也需要保证多个双曲抛物面单元拼接在一起后，生成的自由双曲抛物面内部同样只受轴力，不会产生弯矩。这个组合的原则即是共面原则，它实际上是一个几何限定条件，限定了当一个双曲抛物面与另一个拼接起来时需要满足的几何要求：两个双曲抛物面内所有相交于同一点的直线（直纹或是直边）总是共面的(图 1)。这个几何约束从力学上保证了沿着双曲抛物面的直边和直纹传递的内力总是交于一个平面内。同样就意味着一个双曲抛物面的内力可以通过共面的直纹和边传递到下一个双曲抛物面，却不会引起弯矩的产生。因而每个双曲抛物面单元的内力都可以通过另一个单元一层层地传递到与地面相连接的支点上。这个以结构受力为出发点而设立的几何塑形原则—共面原则，除了保证生成曲面的传力效率以外，也给几何形式本身带了视觉上的光滑连续性，同时也为构件之间的平面节点设计提供了先决条件。

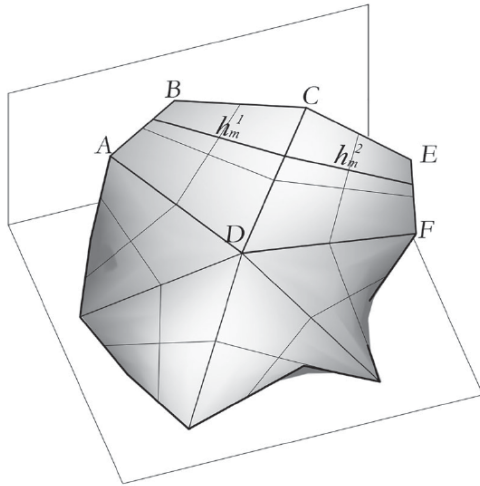


图 1：共面原则保证相邻双曲双曲抛物面上交于其相邻边上任意一点的直线总是共面

3. 光滑复合双曲面结构的设计与构件再利用优化方法

本节以两个家具尺度的构筑物为例，说明了光滑复合双曲面结构的设计方法，及其结构构件可在两个形态曲面结构中重复利用的优化方法。设计与优化流程主要包括三部分：

- [1] 确定曲面结构的几何形状：基于共面原则设计满足光滑复合双曲面原理的结构 A 和结构 B，并确定初始几何参数。
- [2] 优化结构 A 和结构 B 的杆件长度，使其相互匹配达到可相互替换的目标：
- [3] 优化节点设计：基于共面原则，设计适用于不同结构的平面节点

最终在实现这三个目标的基础上降低材料浪费，提高构件再利用效率，

3.1 确定曲面结构的几何形状

3.1.1 光滑复合双曲面的两类原型

光滑复合双曲面的共面原则决定了两个相邻双曲抛物面形成共享平面的所有交线始终共面（图 2）。由于双曲抛物面的双曲性质，以边相邻的双曲抛物面总是以一个在共享平面上方，另一个在共享平面下方的方式连接（图 2）。基于此原则，光滑复合双曲面可分为两种最简单的原型：四面双曲抛物面和六面双曲抛物面。对于四面双曲抛物面，两个双曲抛物面位于共享平面下方，另外两个位于上方（图 2(a)）；而对于六面双曲抛物面，三个双曲抛物面位于共享平面下方，另外三个位于上方（图 2(b)）。在四面双曲抛物面中，沿对角线方向的两个双曲抛物面位于共享平面的同一侧，它们的对角线轮廓正向连接（正向情况）（图 3 (a)）。相反，在六面双

曲抛物面中，每组沿对角线方向的双曲抛物面位于共享平面的不同侧，它们的对角线轮廓负向连接（负向情况）（图 3（b））。

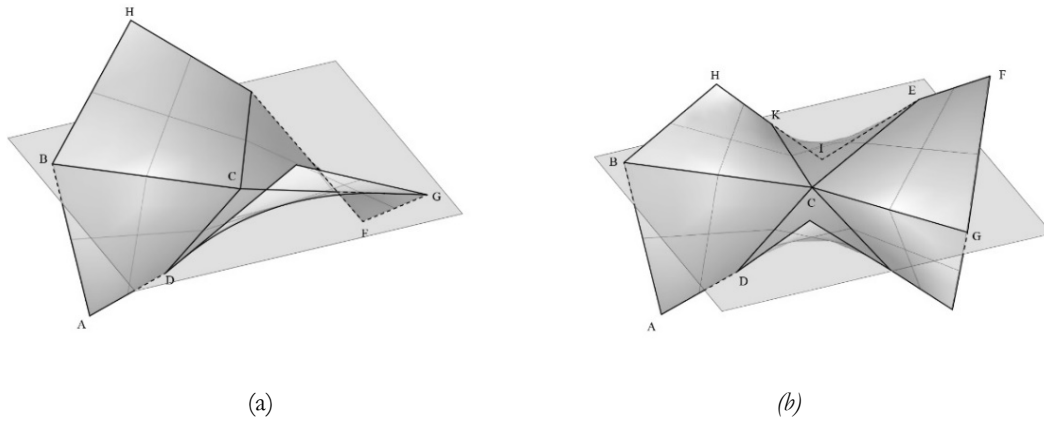


图 2：相邻双曲抛物面的交线定义了一个共享平面。每两个以边相邻的双曲抛物面中，一个在共享平面下方，另一个在上方（a）四面双曲抛物面，（b）六面双曲抛物面

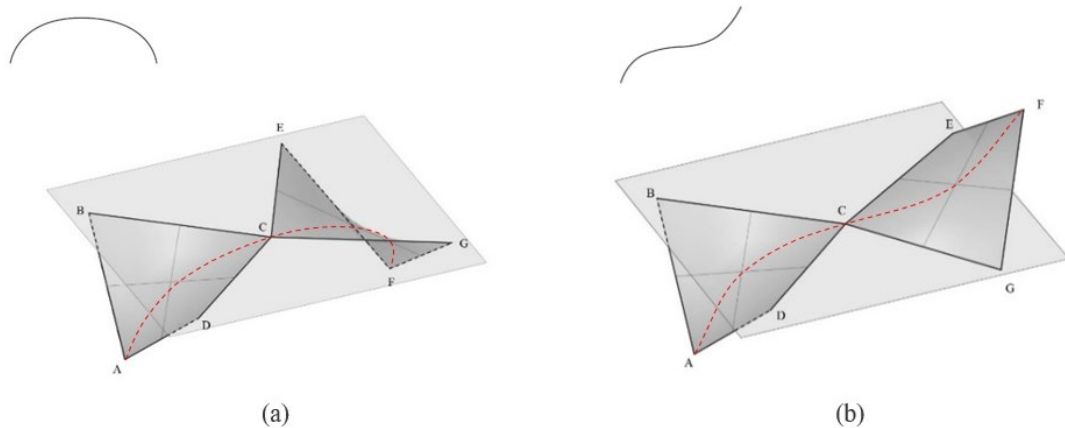


图 3：顶点连接的双曲抛物面：（a）正向情况：两个双曲抛物面位于共享平面的同一侧（b）负向情况：两个双曲抛物面位于共享平面的不同侧。

为更好地控制光滑复合双曲面的整体几何形状，首先可通过顶点而非边缘来连接双曲抛物面模块。因为对角线轮廓能够清晰地勾勒出光滑复合双曲面的整体形状。在设计光滑复合双曲面时，设计师可先通过顶点连接双曲抛物面模块，勾勒出一个方向上主曲线的轮廓，再通过添加侧边模板快的方式来完成整个曲面的设计。

基于这两种基本原型，设计师可以通过沿对角线方向添加四面双曲抛物面（正向情况）和六面双曲抛物面（负向情况），将光滑复合双曲面的对角线轮廓扩展到无数种变化。

3.1.2 结构形态 A 和结构形态 B 的生成过程

结构形态 A: 基于图 3 (a)所示, 在满足共面原则和控制线约束条件的前提下, 由 6 个同样双曲抛物面围合成一个闭合的环形。所图 4 所示, 在其上下两侧分别衍生出两组新的双曲抛物面单元。通过重复上述过程, 最终可得到完整的结构形态 A。以本案例为例, 初始选择 6 个双曲抛物面单元围合成环, 经过 a、b、c 三个步骤的迭代生成, 最终形成如图 4 所示的结构形态 A。结构形态 A 由总计 60 根杆件组成。

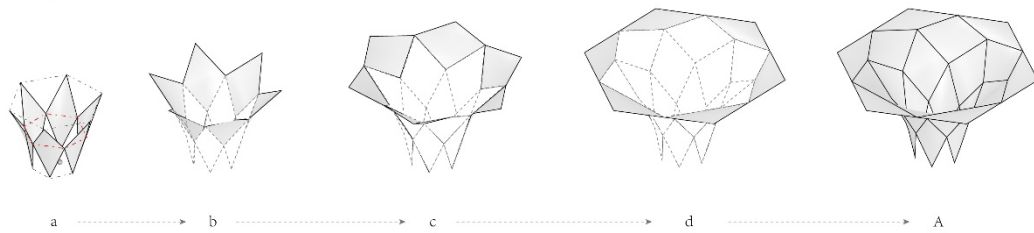


图 4: 结构形态 A 生成过程

结构形态 B: 以共面中心点为起点, 根据共面原则生成六个初始双曲抛物面单元。随后, 先确定主轴线上曲面, 并沿着主轴线方向向外扩展, 依次衍生出其余双曲抛物面单元, 直至形成完整的结构形态 B。如图 5 所示, 案例的生成过程从步骤 e 开始, 多次迭代至步骤 f 完成生成结构形态 B (图 5)。经统计, 结构形态 B 由总计 60 根杆件构成。

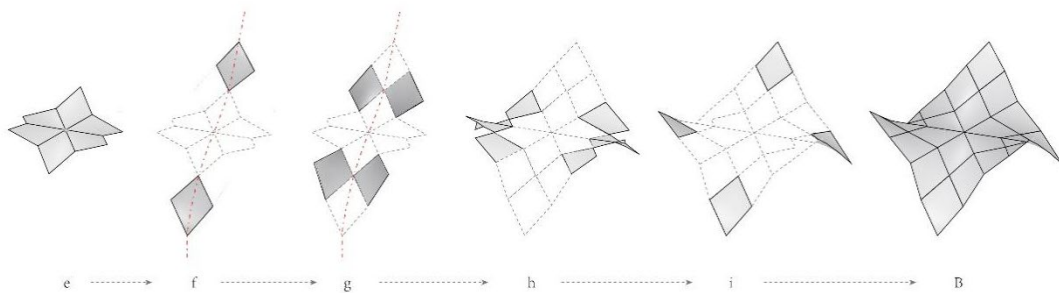


图 5: 结构形态 B 生成过程;

依据上述过程利用 Grasshopper 参数化设计工具和光滑复合双曲面结构生成插件, 建立结构结构形态 A\B。为验证该方法在家具尺度构筑物上的可行性, 每种形态的结构整体尺寸约为 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 。每个双曲抛物面单元尺寸 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 左右, 两种形态均由约 60 个杆件组成, 长度在 0.27m 到 0.32m 之间。同时, 设定 2cm 的杆件长度优化阈值, 在此尺度范围内, 这个阈值既能保证优化的精度, 又不会过分限制设计的可能性。

值得注意的是，本研究采用的单元化设计方法为后续优化奠定了基础。初始设计阶段即控制相邻模块间的尺度差异在较小范围内，这种预先考虑大大增加了后续优化成功的可能性。此外，采用的分组优化策略（详见 3.2 节）进一步提高了优化效率。通过按照拆解和重组顺序对结构进行分组，在保证共面性的同时，有针对性地优化各组杆件，从而在满足几何约束的前提下实现预期的优化效果。

3.2 曲面结构构件可在多个设计中重复再利用的优化方法

本节介绍了曲面结构构件可在多个设计中重复再利用的优化算法，这种方法不仅简化了优化问题，还提高了构件重复利用的效率。具体步骤如下图 6：

- [1] 输入结构形态 A/B 的原始形态，提取控制结构形态 A\B 生成的参数 $t_A; t_B$ ，将参数 $t_A; t_B$ 的取值范围限定在一定区间内，为杆长优化提供取值限定条件，同时也限定了优化前后结构的形态差异在一定范围内。
- [2] 根据拆解和重组顺序对两个结构 A\B 的构件进行分组。根据装配顺序进行分组和匹配，可以保证拆卸结构和装配新结构同时进行（如图中图 7 案例所示）。将结构 A 设定为先装配的结构，结构 B 设定为拆解 A 后再装配的结构，并在进行构件分组时，将处于同一装配/拆解步骤的构件分到一组。这种分组方式基于光滑复合双曲面的传力路径来确定：结构 A 从传力路径的末端（离支点最远）开始拆卸，而结构 B 从传力路径的起始端（离支点最近）开始装配。这种分组策略不仅可以提高优化时间，也能加快实际拆卸拼装的时间效率。同组双曲抛物面单元的尺度处于同一数量级，有利于后续的长度优化。
- [3] 采用遗传算法对每一组内的构件长度进行优化。优化目标是 minimized 同组构件的长度差值，由构件长度在允许阈值内（本案例中为 2cm）被视作相互可替换构件，这一阈值在后续设计中通过节点的长度容差来消化。

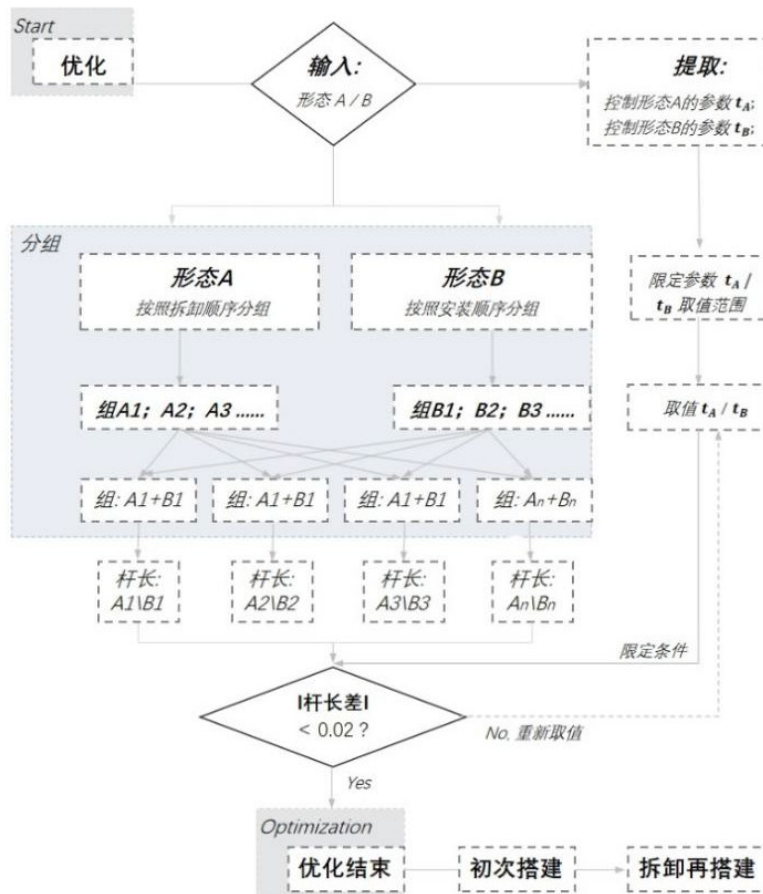


图 6: 优化流程

通过多次迭代计算，本研究成功实现所有杆件的重复利用。这一结果，不仅证明了本方法的有效性，还展示了其在实际应用中的巨大潜力。通过对构件长度的优化，可以实现结构 A 和结构 B 之间的拆解再建造，显著提高结构的可重复利用性和施工便利性。此外，在不同控制参数下，结构 A/B 呈现出多样化的曲面形态，体现了该方法在满足不同设计需求方面的灵活性。需要说明的是，本优化方法不会影响杆件的共面性。该模型基于光滑复合双曲面结构的几何原理构建，共面原则作为核心约束条件被嵌入基本算法中。优化过程仅在预设参数区间内进行调整，不改变模型的基本几何特性。具体而言，优化算法操作控制参数 t_A 和 t_B ，这些参数定义双曲抛物面单元的形状和位置。无论参数如何变化，生成的结构都将遵循光滑复合双曲面的几何特性，保证杆件的共面性。因此，在优化过程中，个别杆件的长度和位置即便发生变化，它们之间的几何关系——尤其是共面性——将始终保持。这种方法在保证结构几何完整性的同时，实现了杆件长度的优化，从而达到构件可重复利用的目标。

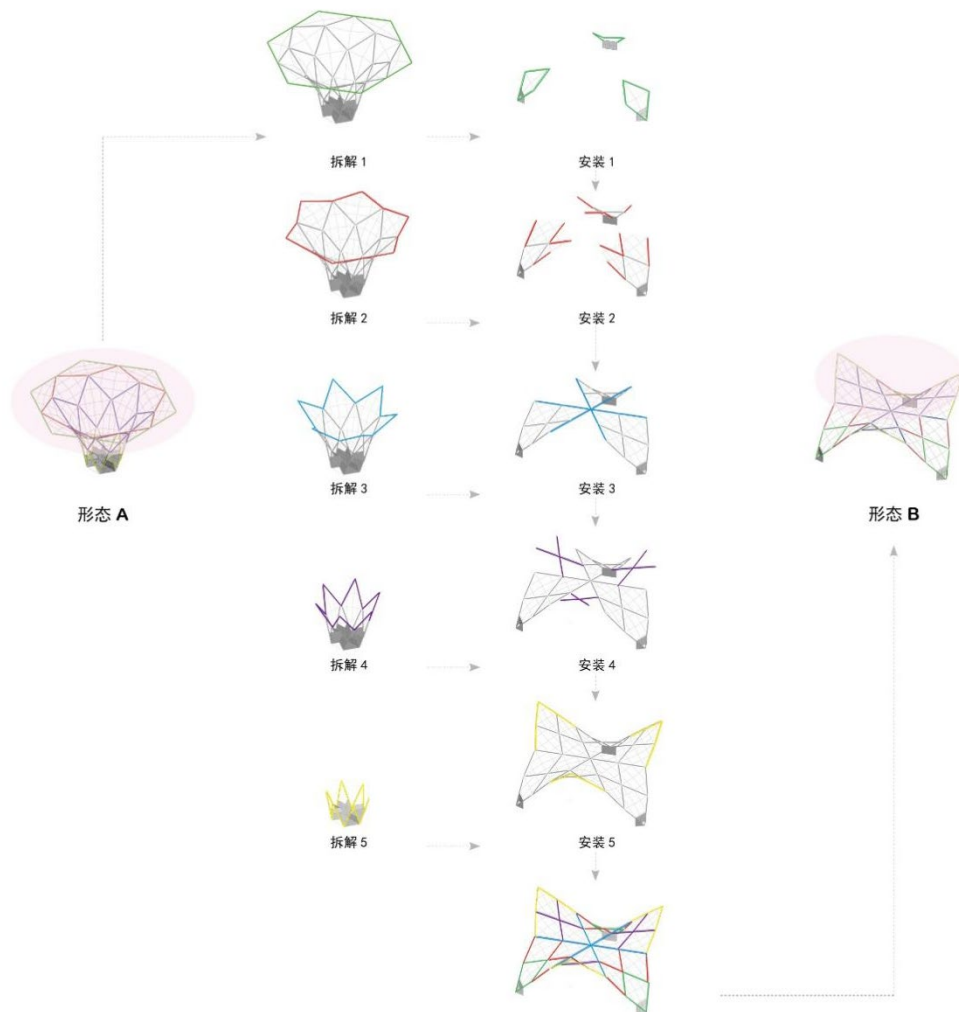


图 7: 结构形态 A 按照拆解拼装顺序组装结构形态 B;

3.3 节点优化设计

本研究在节点再利用方面改进了三维球形节点的缺陷。依据复合光滑双曲面共面原则，曲面交于上一点的直线总是共面。因而可以将杆件连接处设计为二维平面节点。如图 8 所示，平面节点通过螺栓连接，多个杆件在节点处相交于一点，因此，每个节点的形状和尺寸都是相同的，便于节点的重复利用。在本研究的案例中，杆件端部经过压平处理，厚度较薄，因此可以忽略杆件在节点处叠加产生的厚度增加问题。如图 8 所示，杆件端部压平接头部分和杆身之间用螺纹旋扭拧紧。由于杆件优化允许 2cm 杆长阈值，在结构拆解安装时可以通过螺纹的旋转实现杆

件 2cm 内的长度调整。

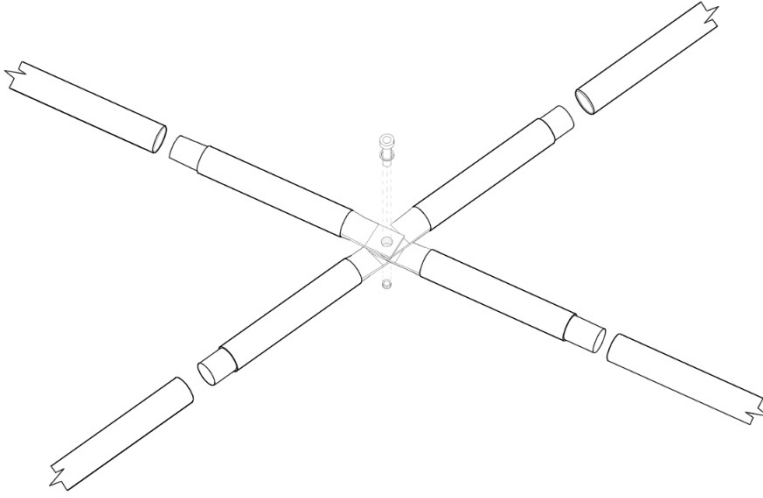


图 8：共面处节点连接细节；杆身与节点的连接

这种设计不同于传统的三维立体节点或球体，具有三项优势：易于建造和安装，降低了施工难度和成本的优势；标准化节点便于再利用，符合可持续设计理念；提高结构的美观性，避免大型球形节点可能带来的视觉影响。

4. 讨论和未来工作

通过构建不同形态的家具尺度构筑物，本文初步验证符合光滑复合双曲面原理、基于标准化平面节点的可再利用结构设计方法。这一成果为建筑结构可再利用研究领域提供了新思路。除去家具尺度构筑物，本文提出的研究方法在应用范围上还有进一步拓展的空间。未来研究可以探索可以从以下几个方面进行拓展：

- [1] 结构体系的多样化：将此方法推广至其他类型的结构体系，如网壳、桁架等，以验证其在更广泛场景中的适用性。
- [2] 优化算法的改进：本文采用遗传算法对每组杆件长度差值进行最小化优化，虽然得到了满意的计算结果，但随着优化数据的增多，算法可能会陷入局部最优解。未来可以考虑开发多目标优化方法，将杆件长度分组以及结构形态调整等多个优化目标整合为一个多目标优化问题。通过这种方式，最终得到的结果通常是一个折衷的解决方案，每个几何目标都能够一定程度上得到实现，从而获得更加全面和综合的优化结果。

[3] 在构件设计扩展方面：除杆件和节点，屋面板和索、膜等其他构件同样存在重复利用的潜力。未来工作应该将这些构件纳入整体优化设计中，以期进一步提高结构的可重复利用性和施工便利性。

[4] 平面连接构件优化：未来在实际工程中，将重点关注构件在节点处高度叠加的问题。随着结构尺度的增加，同一平面连接构件处的杆件结构尺寸也将增大，厚度叠加积累问题将带来构件拼装层面的潜在问题。需要研究同一节点上构件叠加的顺序先后问题，从而避免节点构件厚度积累带来的拼装误差问题

5. 结论

本文提出了一种基于平面节点限制、构件可再利用的光滑复合双曲面结构设计方法。该方法基于光滑复合双曲面原理，利用参数化建模工具和专用插件，快速生成满足平面节点限制的结构形态 A 和结构形态 B。针对构件再利用问题，本研究开发了相应的优化算法，根据结构拆解和重组顺序对构件进行聚类，并采用遗传算法优化各组内构件长度，以实现不同形态构件之间的拆解再利用。与传统三维节点相比，本文提出的平面节点设计更易于建造、多次重复利用，不仅降低了施工难度和成本，也提高了结构的美观性。

为验证该方法的可行性，本研究以家具尺度构筑物为例进行了案例分析。结果表明，所有杆件都实现了重复利用，长度差异控制在 2cm 以内，满足设计要求。这一成果不仅为建筑结构再利用研究提供了新思路，也为推动建筑业的可持续发展提供了新方法。与传统的一次性结构建造方式相比，该设计方法能够显著降低材料浪费，推动建筑材料的循环利用。

总的来说，本研究融合了计算设计和低技建造技术，为解决建筑构件重复利用问题提供了一种新的理论框架和实施路径。尽管目前研究还局限于家具尺度构筑物，但该方法具有良好的灵活性和适应性，未来可进一步拓展至更复杂、更大跨度的结构体系。此外，优化算法的改进、更多构件类型的考虑以及节点构件叠加问题的解决，都是值得深入探索的方向。相信通过不断完善和发展，该方法能够为建筑行业的可持续发展提供更有力的支持。

参考文献

Alegria Mira, L., Thrall, A. P., & Temmerman, N. D. (2014). Deployable scissor arch for transitional shelters. *Automation in Construction*, 43, 123–131.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.014>

- Bechthold, M. (2008). *Innovative Surface Structures: Technology and Applications*. Taylor & Francis.
- Boller, G., & Schwartz, J. (2020). *Modelling the form. Heinz Isler, Frei Otto and their approaches to form-finding*. 555–576.
- Candela, F. (1955). Structural Application of Hyperbolic Paraboloidal Shell. *The American Concrete Institute*, 397–415.
- Candela, F. (1960). General Formulas for Membrane Stress in Hyperbolic Paraboloidal Shells. *The American Concrete Institute*, 353–371.
- Cao, T. (December). *Smooth Poly-Hypar Surface Structures A new approach to design freeform surfaces by combining hyperbolic paraboloids* [Doctoral Thesis].
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000404744>
- Cao, T., D'Acunto, P., Castellón, J. J., Tellini, T., Schwartz, J., & Zhang, H. (2021). Design of prestressed gridshells as smooth poly-hypar surface structures. *Structures*, 30(4), 973–984. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.047>
- Hu, M. (2022). Embodied Carbon Emissions of the Residential Building Stock in the United States and the Effectiveness of Mitigation Strategies. *Climate*, 10(10), 135. <https://doi.org/10.3390/cli10100135>
- Jan, B., Gennaro, S., & Corentin, F. (2021). Design and fabrication of a reusable kit of parts for diverse structures. *Automation in Construction*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103614>.
- LANIK. (2018). *Structural turnkey solutions. We Make Your Project a Reality*.
<https://www.lanik.com/en/home-18>
- Li, Y. L., Han, M. Y., Liu, S. Y., & Chen, G. Q. (2019). Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multi scale perspective. *Building and Environment*, 151, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.003>
- Temmerman, N. D., Alegria Mira, L., & Vergauwen, A. (2012). Feasibility of the Universal Scissor Component (USC): Building a full-scale deployable dome. *The International Association for Shell and Spatial Structures*, 53(4), 227–236.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105547>
- Zou, Q., Zeng, G. P., Zou, F., & Zhou, S. F. (2024). Carbon emissions path of public buildings based on LEAP model in Changsha city (China). *Sustainable Futures*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100231>