

城市地景更新视角下的山地慢行道路形态生成与优化方法研究

黄宇馨¹, 胡新艺², 张紫寰³, 郭喆⁴

摘要: 慢行交通系统对于改善城市交通流动性和居民出行体验, 提高城市可持续性起到重要作用。在城市更新实践中, 山地街区因其地形复杂, 交通可达性弱、改造难度大。本研究以山地街区慢行交通系统为基础, 以路径长度最短和道路功能多样化为目标, 结合羊毛算法、遗传算法和Dijkstra算法, 基于真实地形进行数字化路径生成与优化。实验结果表明该方法有效提升道路选线的精度与效率, 同时兼顾了道路的景观价值和功能多样性。研究为山地地区的慢行系统规划提供了有力的技术参考。

关键词: 山地街区; 慢行系统; 城市地景更新; 羊毛算法; 遗传算法; Dijkstra算法

Keywords: Mountain District; Pedestrian Priority System; Urban Landscape Renewal; Wool Algorithm; Genetic Algorithm; Dijkstra's Algorithm

资助项目情况: 国家级大学生创新创业项目(202210359064); 国家自然科学基金项目(52038007);

引言

在城市更新实践中, 山地街区因其地形复杂, 交通可达性弱、改造难度大。我国西南、东南存在较多山地街区改造更新需求。山地街区的交通改造, 尤其是公共交通体系和步行体系的建立, 对于提升空间品质和空间活力方面起到重要作用。

慢行系统, 即“非机动化交通系统”, 指以步行或自行车方式出行的交通方式^[1]。慢行交通系统对于改善城市交通流动性和居民出行体验, 提高城市可持续性起到重要作用。在城市更新过程中, 慢行系统对于提高城市活力、减轻交通符合、自然文化资源保护等有重要作用。此外, 慢行系统作为功能更加复合的系统, 有更多与文化、景观的结合点。在山地慢行系统的构建中, 存在多种慢性模式与活动模式融合的道路设计形式, 如梯道、盘山步道等。

1 研究背景

1.1 研究现状

山地道路设计对于地形、土方量、排水等有更加复杂的要求。总体而言, 山地道路优化的目标需要减少土方量、降低造价及对环境的影响。目前, 国内对于道路选线的研究集中在城市方

¹ 黄宇馨, 合肥工业大学建筑与艺术学院, 硕士研究生;

² 胡新艺, University of Washington(Seattle), 硕士研究生;

³ 张紫寰, 合肥工业大学建筑与艺术学院, 博士研究生;

⁴ 郭喆(✉), 合肥工业大学建筑与艺术学院, 助教, guogal@hotmail.com。

向,对于山地住区、风景区等情形研究较少。此外,目前山地道路选线方案对于山地道路的多元复合化功能考虑不足,如多交通工具并行、多道路形式串联等情况。

技术层面上,既定的参数化设计平台如 Arcgis 和 BIM,是目前较为常用的道路规划设计技术路径。汤国安通过设定目标点位置(源点、终点),运算形成一条路径选线^[2]。袁旻洋等设置多个道路起点、终点、控制点,并通过“1+N”多点多次选线方法,完成道路选线,并最终叠加得到路网^[3]。此外,崔星等通过 GIS 和 BIM 协同的方式,在单条路径选线上实现了道路、建筑、场地等关联管理,涉及了土方平衡计算、山地曲面等的优化设计^[4]。

基于自主编程的参数化设计能够满足更小尺度、高精度的道路规划要求。在中小型尺度的更新项目中,需要精度更高的建模软件,常用方法有 rhino+grasshopper 的协同选线。Manijeh Talebi 综合应用了 GIS 的 pegger 工具和 matlab 遗传算法,搜索空间被离散化为方形单元,同时创建固定和可变控制点,并设定坡度、道路适应性等作为变量优化 GIS 生成的道路结果^[5]。张弛经过道路分级,并依据道路设计规范,应用 Dijkstra 最短路径算法、遗传算法等,实现路径的精细化生成^[6]。

1.2 研究目标

城市地景更新的重点在于高效和准确,使用计算性生成方法创建道路有利于实现资源集约化。但现有研究的道路选线方法缺少基于现有道路的参数化优化与更新方案;对于新增空间节点与原有街区路网的连接,缺少基于全局路网优化的、设计师可协同调控的设计 workflow。

本次研究旨在整合参数化道路选线方法,实现设计师由平面点到道路连线和三维路网形态优化的道路规划 workflow,实现自然地景与人工地景的最大化结合。

2 路径形态生成的算法系统建立

2.1 基础算法

2.1.1 羊毛算法

弗雷奥托 FreiOtto 开创性地进行羊毛实验,将干燥松弛交错的羊毛浸入到水中并且缓慢提出,从而得到湿润的羊毛。湿润的羊毛由于彼此之间张力的作用吸附在一起,形成了多种转变为单一重叠的形态变化。这个实验的意图在于减少各个目的点的直接路径的总长度,同时让绕圈因素维持在一个比较低的范围。因此,羊毛算法将两点之间的直线变弯曲并适当重叠,会生成新的平面组合形式,若以此为城市的单元系统,会得到更具有体验性、由最短路径组成的城市细胞,也常用于减少各个目的点直接路径的总长度。

羊毛算法在传统二维道路规划的使用过程为:①根据初期想法与区位条件进行选取重要节点;②对选的点任意两点进行连线;③将连线带入羊毛算法;④调整合适的参数,获取羊毛线路;⑤根据羊毛线路提取道主要道路趋势。

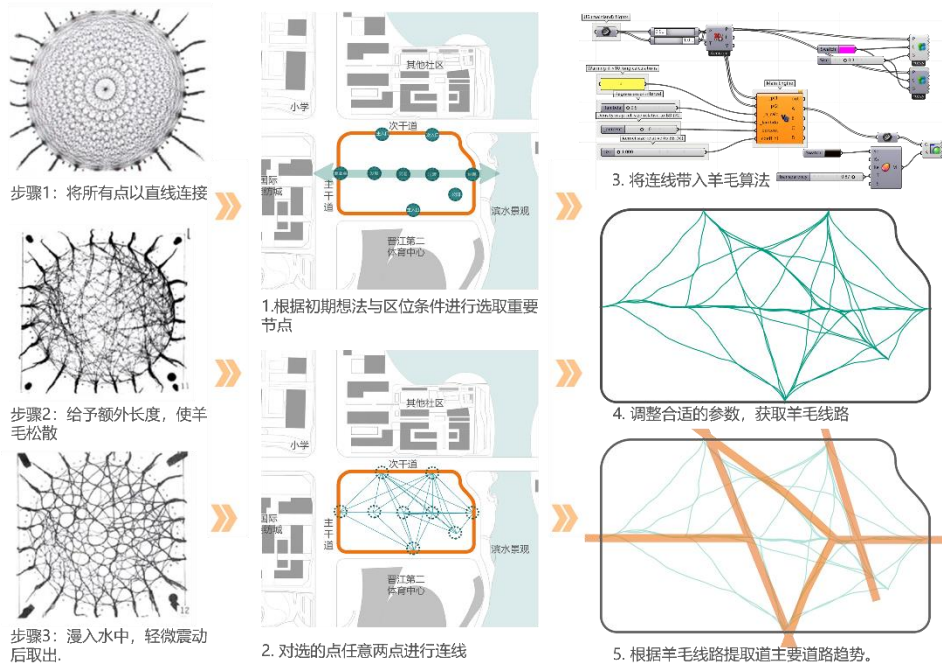


图1 羊毛算法的使用过程（图片来源：作者自绘）

2.1.2 遗传算法

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法，广泛应用于各种工程设计和优化问题中。其核心思想是通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和突变等操作，不断迭代搜索最优解^{[7][8]}。

2.1.3 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法是由荷兰计算机科学家狄杰斯特拉于 1959 年提出的，因此又叫狄克斯特拉算法，该算法可以算出从一个顶点到其余各顶点的最短路径，解决的是有权图中最短路径问题^[9]。

2.2 路径形态几何特征定义

两点之间的路径创建的过程中，依据理想的两个目标点连线路线与等高线的交叉关系，将情况划分为两类：

一类是连线穿过等高线一次(排线型)，对应实际地形的状况为两个目标点 A、B 位于山坡地形的上下端。该情况下，多因坡度限制形成“之”字形的路径。以起始点 A 为圆心，相邻等高线高差与目标坡度之商为半径画圆，与相邻等高线交点相交，在空间几何中，相邻等高线上任意两点高差为固定值，需让相邻等高线上两点的距离大于等高线高差与目标坡度之商，才能满足设定坡度，也就是说下一条等高线中位于绘制的圆形中的部分与圆心连线的坡度都会大于目标坡度，圆外部分的等高线连线的坡度较缓，但道路长度也会更大，因此将圆形与下一条等高线的交点连线，即为这一组等高线选线的最短路径。考虑到整体路线的最短化，选取两个交点中与理想的两点连线路线更为接近的交点为阶段点位，并以此为圆心，再次画圆寻找到与下一条等高线的交点。若该半径下的圆与下一条等高线无交点，说明该区域内地形较为平缓，可直接将该圆心与目标终点 B 相连，连线与下一条等高线的交点作为圆心做圆，重复该操作直到与目标终点 B 相连。

另一类是连线穿过等高线开两次或以上（穿越型），对应实际地形的状况为两个目标点 C、D 位于山脊或山谷的两侧。该情况下，道路多沿等高线布置，因此通过过程点与目标连线第一条穿过两次的等高线上的若干点连线形成多种路线形式，使用 Dijkstra 算法寻找到其中最短路径。

最后将两类连线整合投射到地形上，成为山地上任意两点的最短路径。在这个方法中，排线型与穿越型的路径生成可通过调整输入圆形半径的方式，调整输出不同的坡度。

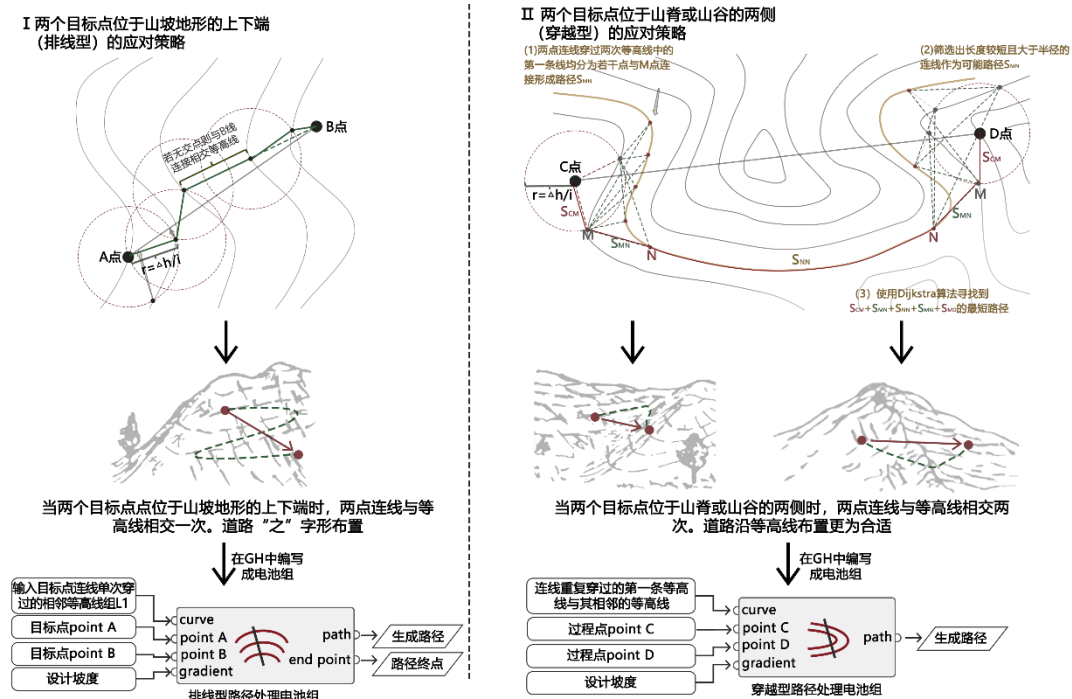


图 2 两点之间的路径创建原理（图片来源：作者自绘）

2.3 路径生成步骤

使用 Rhino+GH 平台运算器编写排线型与穿越型两种情况下生成最短路径的“程序包”，其内容各自包括输入端、计算端和生成输出端 3 个部分。输入环节的内容包含有现有的场地等高线数据、设计限制条件中道路两端的目标、道路坡度，然后将其整理为图形或数字信息，进入到计算环节使用。计算端和输出端的内容可按照现实中所遇到的情景分为排线型与穿越型两类进行使用。排线型电池组的使用需要在输入端输入目标点连线单次穿过的相邻等高线组（curve）、起始的两个目标点（起点为 point A、终点 point B）与设计坡度（gradient），其中单次穿过的相邻等高线组的选取需按照道路行进方向选取；输出端将输出该地形下起始目标点路径选线

（path），与等高线组中最后一条等高线上的转折点（end point）；值得注意的是，考虑到电池组合使用的情况，排线型生成的路径选线仅到最后一条等高线上的转折点（end point）为止，单独的 A、B 两点连线路径还需将转折点（end point）与终点 B 连接形成整体。穿越型电池组的使用需要在输入端输入该情况下的目标点 C、D 和设计坡度（gradient），以及连线重复穿过的第一条等高线与其上下相邻的连线单次穿过的两条等高线，由此形成穿越型的等高线组（curve）；若目标点连线不存在单次穿过的等高线组，可只单独选用连线重复穿过的第一条等高线；输出端将输出该地形下起始目标点路径选线（Path）。

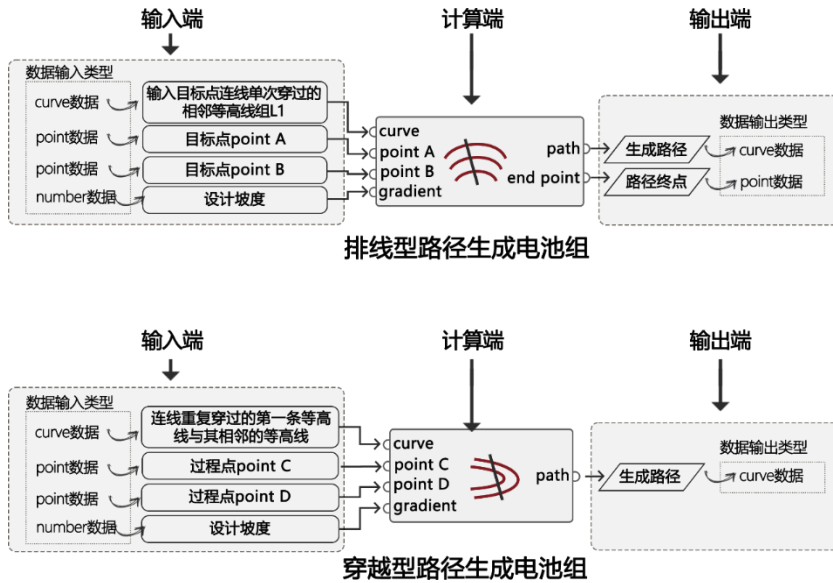


图3 电池组构成（图片来源：作者自绘）

在具体的应用中，设计师可结合设计，布置多个目标点对路径进行拆分控制。如图假设的地形中，在只设定目标点 A、B 下，两点连线穿过的等高线存在连线穿过一次与重复穿过两次的两类，无其他设计要求的前提下，需同时运用到穿越型与排线型两种电池组；而且连线穿过一次的等高线中，等高线所代表的高程并非为延续的，需分成两组 L1 与 L2 输入到两个排线型电池组中。结合目标点 A、B 输入到两个连续型电池组后生成两组等高线的部分路径与两个等高线组中最后一条等高线上的转折点（交点）A1 与 B1，同时也是排线型路径的终点。将 A1 与 B1 作为穿越型电池组运算的目标点，并沿路径生成方向选取穿越型电池组所需的等高线组，生成该阶段的路径，三段生成的路径进行连接。

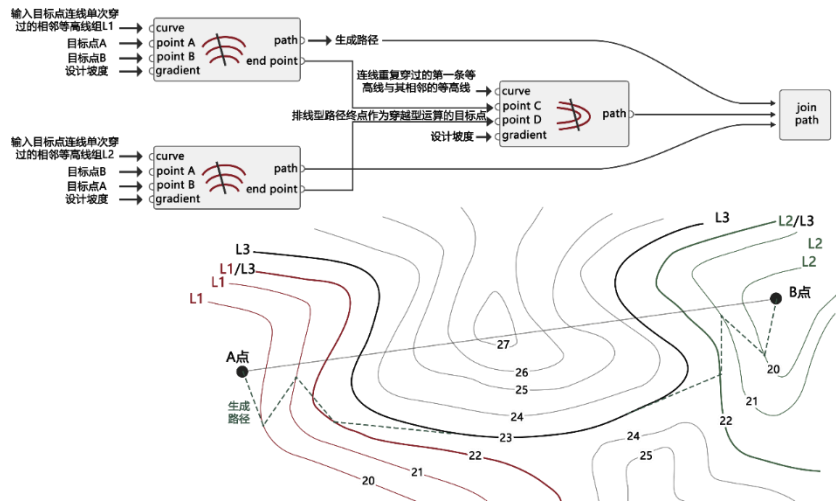


图4 电池组常规使用流程（图片来源：作者自绘）

若该地形的路径设计有登顶的需要，则可在山顶处增设目标点 C，将其拆分成两端排线型的连线问题，各自生成路径并连接成整体。

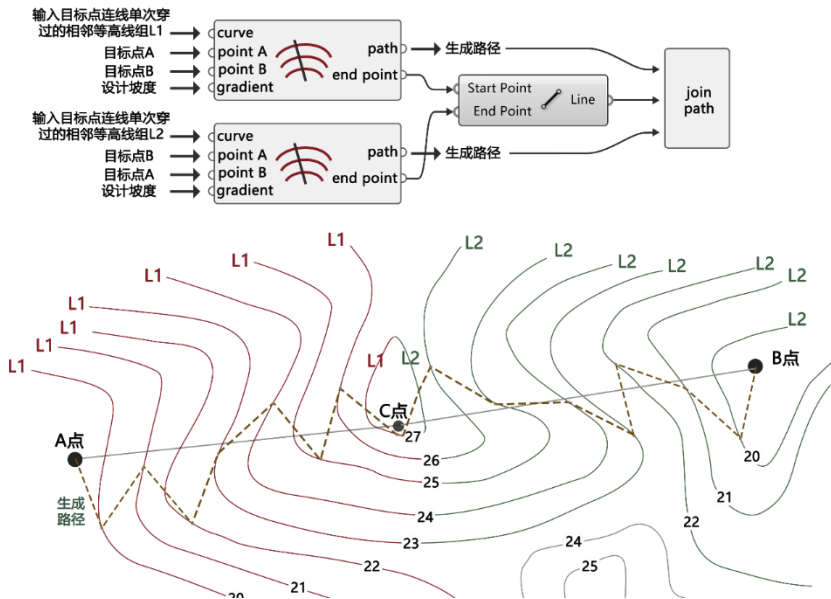


图 5 电池组特定设计下的使用流程（图片来源：作者自绘）

2.4 形态特征优化

道路骨架生成的目标是，在若干目标点与山地场地内主干道连线形成的道路中，任意目标点的联系的路径最短。在这个目标下，将目标点连接路径的羊毛算法结果与生成的道路骨架结合，利用遗传算法拟合出多点连接路径更短的道路骨架。根据羊毛算法使用的逻辑，先利用上述两点之间的路径创建的方式，求取山地目标点中任意两点的连接的空间最短路径，再利用羊毛算法对山地三维路径进行处理。

与此同时，在结构骨架上随机生成节点连接主干道与目标点形成道路骨架；根据 GH 平台生成道路骨架的逻辑，目标点与主干道连接处，在主干道上所形成的占比分割参数是遗传算法优化过程中主要的变动条件。在连接过程中，还应保证避免道路的交叉，以及相邻分割点的距离控制与目标点的支路归纳，因此程序对于目标点的前期处理与约束条件进行设置：

2.4.1 目标点的前期处理

该过程中，主要为目标点的分类与支路简化。首先，利用目标点到主干道最近点连接向量与最近点切线向量的夹角正负判断目标点在主干道的左右侧，进而将目标点分为两部分，再对每部分的目标点沿曲线前进方向进行重新排序，以避免出现一侧的支路连线相互交叉的情况。其次，对于一侧中，生成目标点与到主干道上的最近点，若存在 2 个及以上数量最近点（如：X1、Y1、Z1）距离小于主干道的 5%，可视对应目标点（如：X0、Y0、Z0）位于同一支路条件下，以简化道路结构。因此，对于这些目标点按照与主干道的距离依次连线，只保留最靠近主干道的目标点 X0 与其他目标点参与到道路骨架的遗传算法优化中。

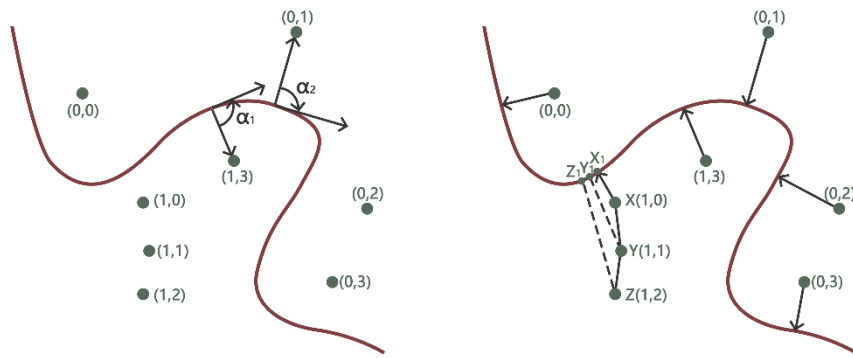


图6 目标点分类（图片来源：作者自绘） 图7 支路简化（图片来源：作者自绘）

2.4.2 基因与约束条件的设置

按照目标点顺序设置的对应连接点所在主干道位置占比的参数数组应逐级递增避免出现支路连线相互交叉的情况，且相邻连接点应有一定的距离限制。因此程序中设定了数组作为遗传算法的约束条件，k 值最大为连接点数加一，即为 n；将作为第 k 个连接点所在主干道上的按照目标点顺序设置的对应连接点所在主干道位置占比的参数数组应逐级递增避免出现支路连线相互交叉的情况，且相邻连接点应有一定的距离限制。因此程序中设定了数组作为遗传算法的约束条件，k 值最大为连接点数加一，即为 n；将 $\frac{\sum_{k=1}^k a_k}{\sum_{k=1}^n a_k}$ 作为第 k 个连接点所在主干道上的参数。因此可调整数组 a_k 的上下限来控制相邻连接点的距离限制，如现有程序内数组 a_k 的上下限分为为 0.1 与 2.0，因此相邻连接点的距离限制为 $0.1 / (2k-1)$ 。

表1 遗传算法适应度目标设计（图表来源：作者自绘）

序号	名称	目标	说明
1	FCdistance	道路骨架与羊毛算法拟合度	羊毛算法结果的数据曲线上以 5m 为间距设置断点，求得每个断点到生成道路骨架的最短距离。将距离数值进行累加计算：若距离总数值较小，说明生成道路骨架与羊毛算法的结果较为接近，拟合度较高，反之则拟合度较低。
2	FClength	路径总长度	目标点与主干道连线长度的总和。

基于道路骨架生成的目标，确定了遗传算法优化的目标为路径总长度（FClength）和道路骨架与羊毛算法拟合度（FCdistance）。接着将限制约束与优化目标，以及生成的道路骨架数据套入到遗传算法中迭代出优化结果。最后，使用上文中双目标点连接生成道路选线的方法，将优化的道路结构连线沿山体等高线生成最短路径的道路骨架。

3 基于景观点控制的路径选线生成实证

3.1 场地现状与构建场地环境信息模型

实验地块位于安徽省黄山市戴震公园东南侧的山地处，作为公园景观的延申，海拔在130m~180m之间，坡度较陡。实验地形数据由无人机扫描获得的高程点，在Rhino+GH平台中将高程点转化为TIN模型后，以3m高差生成等高线数据并沿Z轴拍平到工作平面上。地块内现有一条主要交通道路沿山谷布置，设计拟在多个山头的五处设置景观节点，需要通过人行观光步道进行与主要交通道路进行串联。

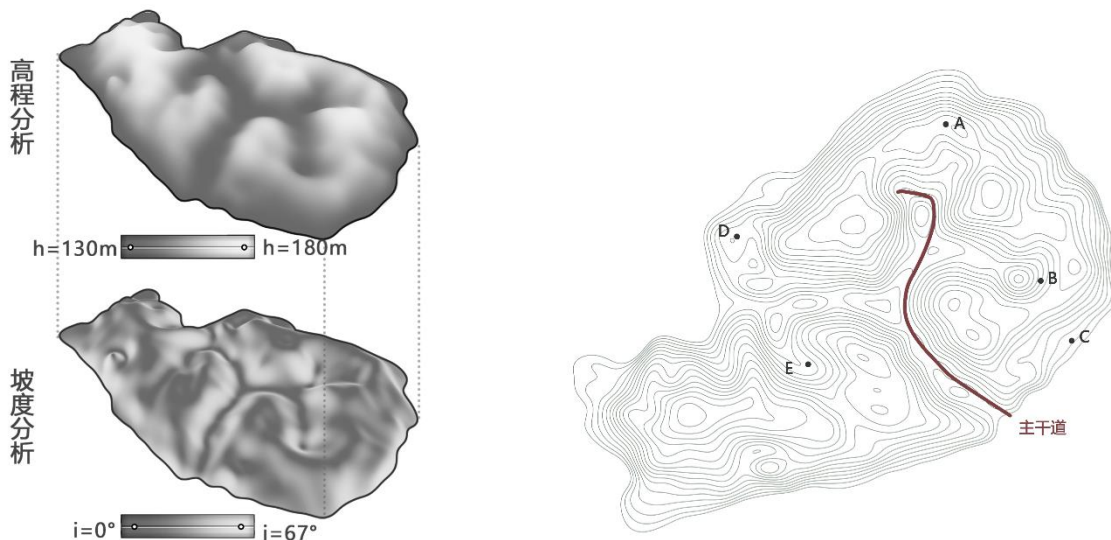


图8 场地地形分析与设计选点（图片来源：作者自绘）

3.2 使用算法生成道路选线

3.2.1 羊毛算法数据构建

将设计中的五处设置景观节点设置为算法的必经点A、B、C、D、E，将其任意两点相连套入到两点之间的路径创建的电池组中，以获取两点间的最短路径。电池组的输入端中，坡度按照人行观光步道要求设置为37.5%。将任意两点间的三维路径数据套入羊毛算法进行计算：其中，考虑到尽可能维持连线沿山体走势的特征，羊毛算法的参数设置如下：MagnetSnap 强度设置为1.0，Angle 强度设置为6.4，Length(Line)强度设置为65。

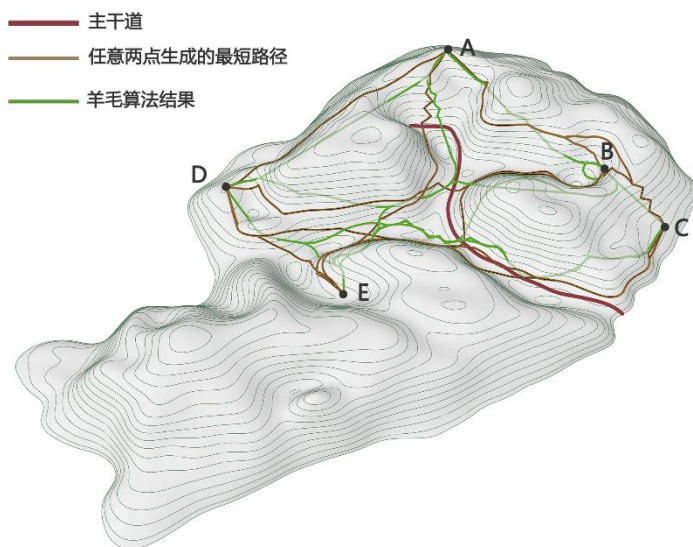


图9 任意两点生成的最短路径与羊毛算法结果（图片来源：作者自绘）

3.2.2 遗传算法迭代优化道路骨架

将目标点 A、B、C、D、E 带入算法后被划分为 A、B、C 和 D、E 两组，分别剪力数组。随机生成的道路骨架结合羊毛算法的数据，进入遗传算法迭代。以下设置（表 2）的模拟运行在消费级 PC 上，i5-9300H 2.40GHz 处理器，具有 16.0 GB 内存。在 Wallacei 中生成的图表中，道路骨架与羊毛算法拟合度（FCdistance）得到了一定程度的优化，路径总长度（FClength）的优化程度有限。将迭代的 50 代模型数据在散点分布在 FCdistance 和 FClength 形成的坐标轴中，通过无监督机器学习划分成五类，选取图中的第 4 类（黄色点位）的道路模型进行导出（图 11），再由人工筛选出契合设计想法的道路骨架（Gen: 40 | Ind: 32）

表 2 遗传算法模拟设置

序号	遗传算法参数	参数设置
1	迭代大小（Generation Size）	50
2	迭代次数（Generation Count）	50
3	总迭代数（Population Size）	2500
4	Crossover Probability	0.9
5	Crossover Distribution Index	20
6	Mutation Distribution Index	20
7	Simulation Runtime	31min 24sec

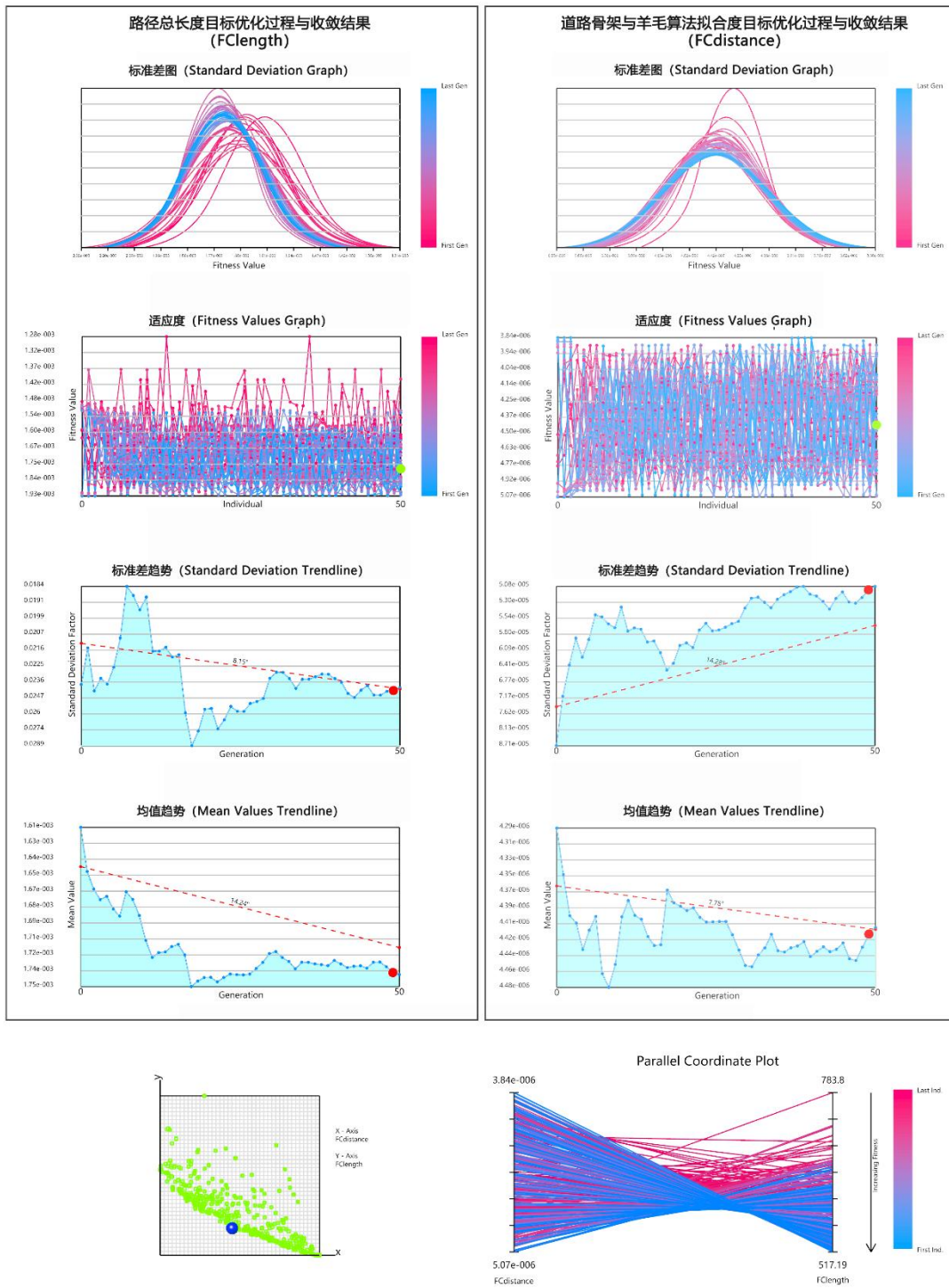


图 10 遗传算法迭代数据 (图片来源: 作者自绘)

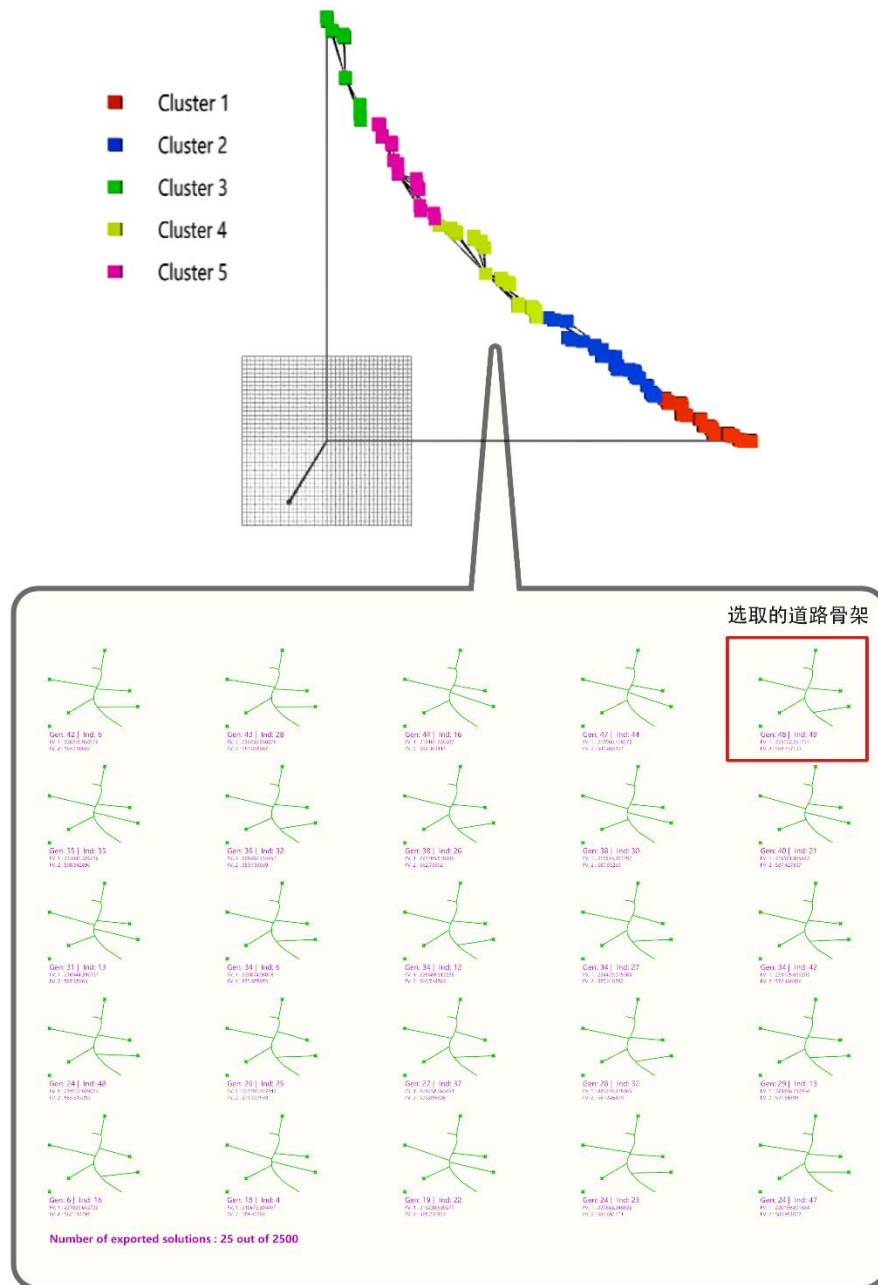


图 11 道路骨架筛选（图片来源：作者自绘）

3.2.3 根据道路骨架生成步行观光步道

根据筛选出的道路骨架，将目标点与对应的连接点代入到双目点连接生成道路选线的电池组内，生成初步的人行观光步道。根据现有生成的道路选线进行人为归纳调整，如：DD1，EE1 生成的道路比较接近，可将一部分道路进行合并；CC1 生成的道路与主干道的重叠部分较大，可转折处提前与主干道直接连接。最终生成的人行观光步道如图 12。

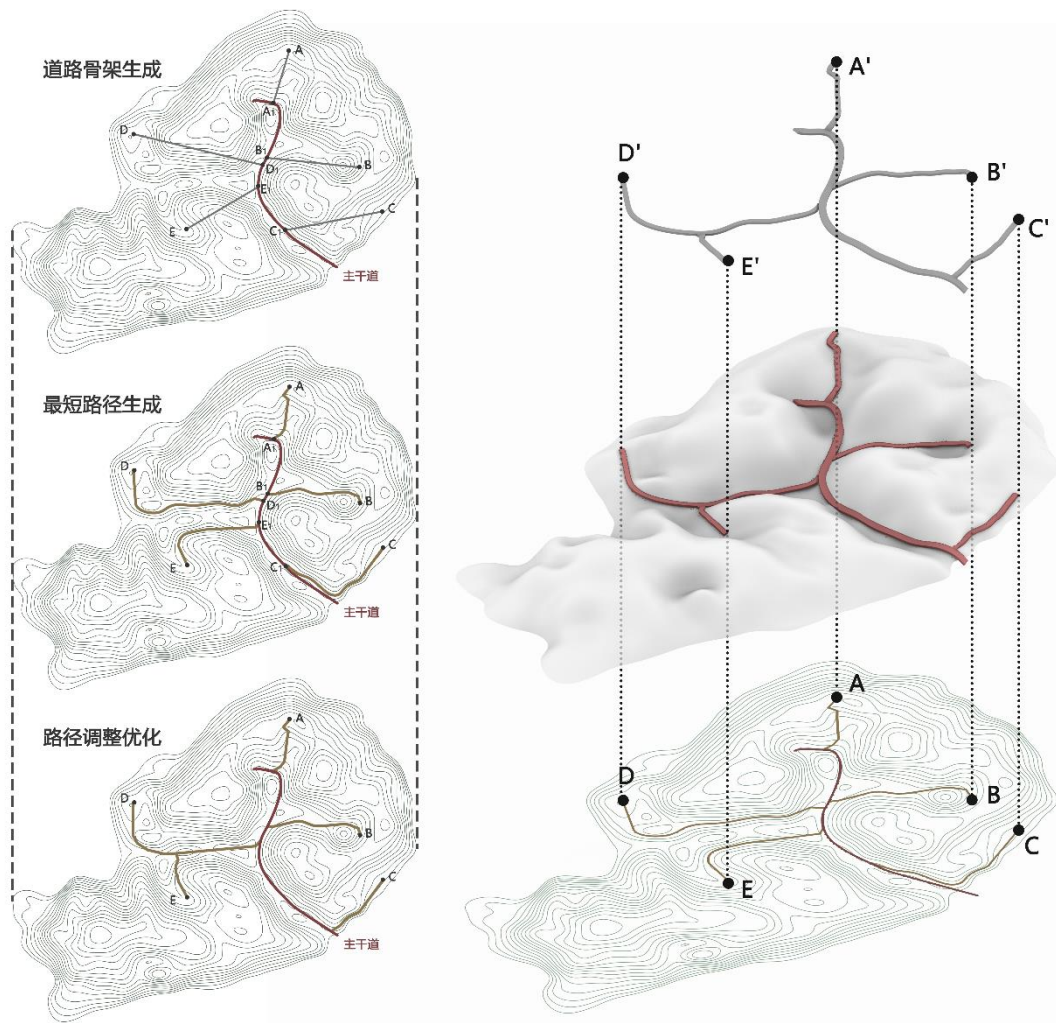


图 12 道路选线成果（图片来源：作者自绘）

结语

本研究基于羊毛算法、遗传算法和 Dijkstra 算法，提出了一种适用于山地街区慢行系统道路选线的参数化优化模型。该方法通过引入新建目标点，结合算法模型与实际地形数据，生成并优化原山地道路路径，实现基于现有道路、新建路网的整体优化。

该道路规划方法通过将三维地形数据以等高线数据转化构建算法逻辑，并将羊毛算法结果与遗传算法拟合，建立常见地形的路径生成工具。相较于传统路径规划工具，该工具对设计者经验要求较少，基于设计平台 rhino 和 grasshopper，输入等高线数据和规划选点代入，即可直观呈现道路选线结果。作为一种基于 Grasshopper 的算法工具，该系统展现出更优的协同性，允许设计师对目标点及基础地形进行动态调整，以适应不断变化的设计需求。研究表明该算法模型有效提升山地道路选线的精度和效率，兼顾了路径长度的最短化和道路功能的多样性。

未来的研究可以进一步优化算法参数，使其更好地适应不同的地形特征和设计需求。在算法结构方面，可以通过对于道路选线迭代方法的优化，降低算法复杂度；算法过程中，遗传算法结果与羊毛算法进行拟合时由于 actinia 无法在遗传算法中实现循环运算，而对遗传计算的内容

进行简化；在道路原型方面，除排线型和穿越型道路外，可以拓展更多道路形态及交通方式的结合，扩展应用范围，以更好地支持复杂地形条件下的设计决策。该研究为山地地区的城市更新和慢行交通系统规划提供了技术参考和支持。

参考文献

- [1] 黄红元,干晓宇,陈一.基于运动轨迹大数据的泸沽湖风景名胜区慢行系统优化研究[J].规划师,2020,36(22):19-24.
- [2] 阎波,李宗虎.山地滨水城市慢行系统设计探析——以渝中半岛为例[J].中国园林,2018,34(04):63-67
- [3] 袁旸洋,成玉宁.参数化风景环境道路选线研究[J].中国园林,2015,31(07):36-40.
- [4] 崔星,杜春兰.基于 GIS+BIM 信息协同的景观参数化设计研究——以山地风景环境道路规划设计实验为例[J].中国园林,2023,39(06):39-45.DOI:10.19775/j.cla.2023.06.0039.
- [5] Manijeh T., Ahmad N., Baris M.et al., Forest road planning to improve tourism accessibility: a comparison of different methods applied in a real case study[J]. Geocarto International, 2022, 37(3): 1-16. DOI: 10.1080/10106049.2022.2032389.
- [6] 张驰,杨雪松.基于 Rhino+Grasshopper 的风景环境复杂地形道路选线设计算法模型研究[J].中国园林,2021,37(03):77-82.DOI:10.19775/j.cla.2021.03.0077.
- [7] Zhai Y., Riederer E. Context Specific Evolutionary Design: An Analysis on Computational Abstraction of Modern Urban Complexity[C]. Architectural Association (AA) School of Architecture, London, United Kingdom
- [8] Randall M., Kordrostami T., Makki M. The Taikoo Shing Superblock: Addressing urban stresses through sequential evolutionary simulations[C]. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) Conference, August 2020, Bangkok, Thailand. DOI: 10.52842/conf.caadria.2020.1.415.
- [9] 叶颖诗,魏福义,蔡贤资.基于并行计算的快速 Dijkstra 算法研究[J].计算机工程与应用,2020,56(6):58-65. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1903-0119.