

基于改进 A*算法的电缆布局方法研究

陈杰 宁芊

四川大学 电子信息学院 智能控制研究所, 四川成都, 610065;

摘要: 针对复杂建筑环境中电缆布局优化所面临的路径冗余、空间利用率低等难题, 本研究提出了一种基于 A*算法的高效系统化布线方法。该方法首先深入分析电缆敷设过程中的几何约束与工程规范, 构建以“至墙体距离”为关键度量的动态代价场, 以此引导路径搜索方向。同时, 通过引入改进的启发式函数对 A*算法进行增强, 有效平衡了路径长度与空间贴合度, 生成既满足工程约束又具备高空间利用率的最优路径。实验结果表明, 相较于传统的 A*、Dijkstra、BFS、最佳优先搜索及双向 A*等基准算法, 本方法在路径长度上平均缩短了 22.5%, 转弯次数显著减少约 9%, 大幅降低了布线成本与施工难度, 显著提升了布线效率与整体质量, 为复杂建筑环境下的电气布线提供了智能化解决方案。

关键词: 电缆布局; A*算法; 点云处理; 工程优化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.053

1 约束条件分析与处理

1.1 约束条件分析

根据电缆敷设准则文件和实际工程电缆约束要求, 本文所规划的电缆所考虑的约束条件分为三类: 电缆转弯角度、电缆与建筑墙体模型的距离、电缆安装规范。具体为:

关于电缆转弯角度:

- (1) 电缆在水平方向前进时的转弯角度;
- (2) 电缆在水平方向前进发生高度变化时的爬坡角度。

关于电缆与建筑墙体模型的距离:

- (3) 电缆应优先靠近建筑墙体布置。

关于电缆的安装规范:

- (4) 电缆起终点距离阀门或仪表的距离;
- (5) 电缆发生方向变化时, 需满足的最小弯曲半径;
- (6) 同类别电缆应尽可能成束放置, 为其他类别电缆预留出足够空间。

1.2 约束处理

1.2.1 电缆前进方向

电缆在水平方向前进时, 转弯角度不能大于 90° 。电缆爬坡的角度只能是 30° 、 45° 、 60° 、

90° 。因此定义电缆的前进方向有六个, 转弯角度和爬坡角度为 90° , 且一次只能选择一个方向前进。电缆的前进方向如图 1 所示, 红色方块表示当前节点, 绿色方块表示可以前进的节点, 灰色方块表示不可前进的节点。

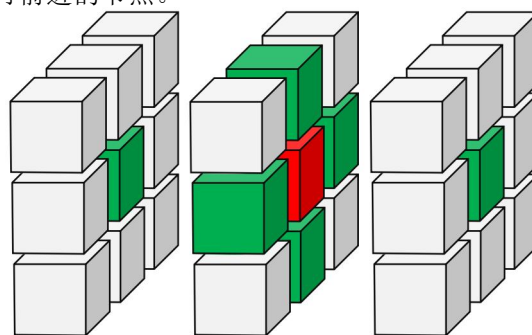


图 1 电缆前进方向示意图

1.2.2 起点和终点的计算

为满足电缆端点距阀门或仪表 3.5 米内的约束, 本文采用数据驱动的后处理策略确定起终点。首先从参数化数据库中提取设备全局坐标, 依据标识符与路径任务匹配, 并统一归一化为毫米单位以消除量纲误差。获得标准化设备坐标集 $D_{dev} = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_n\}$ 后, 通过在可布线空间 P_{free} 中执行最近邻搜索确定最佳映射点。设备点 D_i 对应的电缆端点 S_i^* 计算如下:

$$S_i^* = \arg \min_{p_i \in P_{free}} \|P_i - d_i\|_2 \quad (1)$$

该过程本质上是逻辑上的设备连接点投影至物理上可达的布线空间表面。公式(1)计算得到的 S_i^* 即为该设备在可布线网络中的实际接入点,分别被定义为电缆路径的起点或终点。

1.2.3 空间分辨率的确定

电缆在转弯时应满足最小转弯半径这一约束条件影响着空间分辨率的大小。电缆弯曲半径示意图如图2所示。

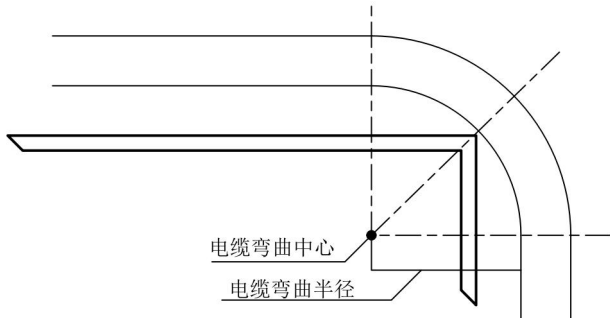


图2 电缆弯曲半径示意图

为了同时满足电缆敷设时的最小弯曲半径要求,并保证电缆能够在单一网格内完成布置而不跨越多个网格,所采用的空间分辨率需符合如下要求:

$$r \times r_{\text{times}} + r \leq \Delta r \quad (2)$$

其中, r 为电缆外径(10mm), r_{times} 为弯曲半径倍数(取10), Δr 为空间分辨率。由公式(2)可知, Δr 应不小于110mm, 故本文选取的空间分辨率为200mm。

2 空间建模与优化目标

2.1 模型离散化

为将模型分割为模型占用空间与可布线空间,首先对建筑墙体模型表面按一定密度进行点采样,随后计算轴对齐包围盒,考虑到电缆敷设需预留安全裕度以满足弯曲半径需求,将直径24米、高40米的圆柱形场景扩展为26米×26米×46米的规则立方体计算域,确保墙体边缘及顶部/底部区域存在有效可行路径搜索空间。

在该扩展域内,以200毫米的空间分辨率为步长生成均匀体素网格,通过最近邻欧几里得距离判别法将网格节点划分为模型墙体点集 P_{obs} 与可布线空间点集 P_{free} :对于任意节点 P_i ,计算其与墙体采样点集中最近点的欧几里得距离 d_i ,若 $d_i < 200\text{mm}$ 则标

记为模型墙体节点,若 $d_i \geq 200\text{mm}$ 则标记为可布线空间节点。场景模型如图3所示,分割后的模型点云如图4所示。

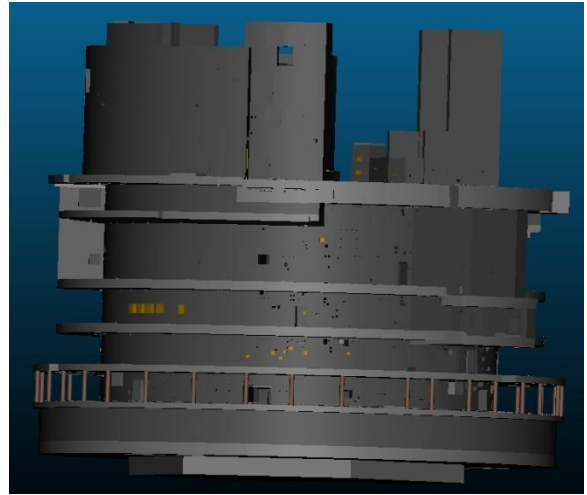


图3 模型示意图

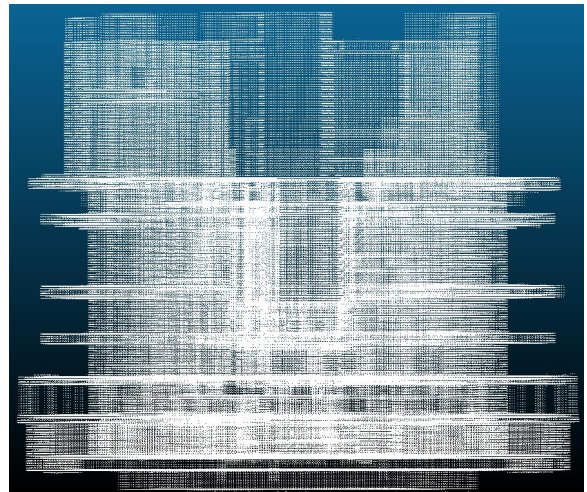


图4 模型墙体点云

2.2 综合优化目标

2.2.1 电缆长度

在实际电缆网络部署中,总布线长度作为路径规划目标函数的核心变量,对工程造价、材料消耗及空间利用率具有决定性影响。最小化布线长度不仅是控制预算与实现资源集约化的关键,更能有效压缩解空间规模、降低算法复杂度,同时减少因冗余走线引发的电磁干扰、热累积及维护难题。此外,在受限空间中,紧凑的布线方案有助于提升通道利用率并改善负载均衡。因此,将总布线长度作为首要优化目标,兼具经济性、功能性与可扩展性,是

电缆自动敷设路径规划的基础准则。鉴于此，本研究提出如下电缆长度计算公式：

$$L = \|P_i - P_{i-1}\|_2 \quad (3)$$

其中， P_i 表示当前节点， P_{i-1} 表示前一个节点。

2.2.2 电缆距离模型墙体的距离

在三维路径搜索中，将建筑墙体设定为优先依附面是一种高效的启发式策略。该策略基于“沿墙布线”的工程原则，引导算法优先探索结构边界区域，从而降低开放空间布线带来的支撑不足及施工成本风险。通过赋予邻近墙体节点更低的代价值，该策略显著缩小了有效搜索空间并提升收敛效率。同时，依托墙体良好的几何连续性，生成的路径更易满足弯曲半径与正交转角等工程约束。因此，这一建模方式实现了物理约束与算法设计的有机结合，增强了路径的可实施性。为此，使用如下公式计算电缆与墙壁的距离：

$$d_{\min}(p) = \min_{\phi \in \Phi_{\text{obs}}} \|p - \phi\|_2 \quad (4)$$

2.2.3 电缆成束敷设

利用同类电缆在功能与电气特性上的一致性，实施集聚成束协同布设是提升空间效率与经济性的关键策略。该策略不仅符合分类敷设与电磁兼容性规范，更能通过物理集成减少桥架占用截面，降低支撑材料用量并简化施工工序。在算法层面，将同类电缆视为耦合拓扑集合体，有助于构建多缆协同规划模型，同步优化共用段路由以避免冗余与干扰。为实现这一机制，本文引入节点属性优先级策略：当某节点被电缆选中后，自动提升其优先级，从而引导后续同类电缆优先复用该路径，最大化成束敷设效果。

2.3 改进 A*算法估价函数

A*算法的核心思想是从起点出发，依次遍历当前节点的所有有效邻居节点。在遍历所有有效邻居节点的过程中，A*算法会为每个节点计算一个相应的代价值并从中选择代价值最小的节点作为下一步的路径节点。该代价值通过一个称为估价函数的评估公式进行计算，其形式如下所示：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

公式(5)中的 $f(n)$ 表示当前节点的总代价值， $g(n)$

表示起点到当前节点的实际代价值， $h(n)$ 表示当前节点到终点的估计代价值，在本文中，为了使电缆尽快朝着终点的方向前进， $h(n)$ 为当前节点到终点的欧几里得距离， $h(n)$ 的计算方式为：

$$h(n) = \|P - P_g\|_2 \quad (6)$$

公式(6)中， P 为当前节点， P_g 为终点节点。此外，本文结合综合优化目标对 $g(n)$ 进行了改进：

$$g(n) = \alpha L + \beta d_{\min}(q) + \gamma C \quad (7)$$

公式(7)中， L 为电缆长度， $d_{\min}(q)$ 为电缆到模型墙体的距离， C 为节点的优先级， α 、 β 、 γ 为权重系数，经过自定义空间的实验确定，在自定义空间进行电缆路径最佳搜索，最中确定， α 、 β 、 γ 的值分别为 $\alpha = 0.25$ ， $\beta = 0.45$ ， $\gamma = 0.3$ 。

2.4 算法流程

至此，已完成对模型和算法的构建与优化。算法运行的流程图如图4所示。

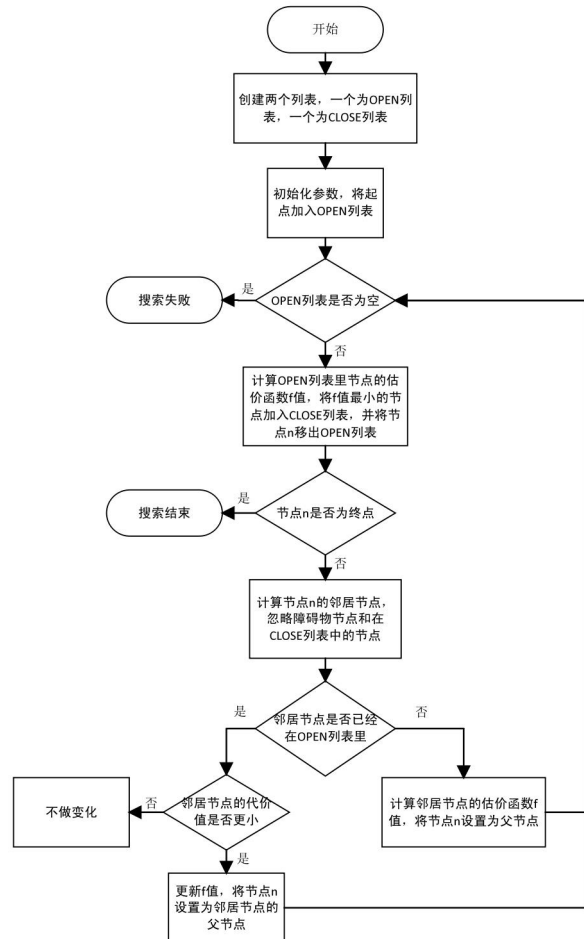


图5 算法流程图

2.5 算法实验

为了验证所提算法的有效性，实验在上述分割后的三维空间中进行，并与 A*、Dijkstra、BFS、双向 A* 和 Bestfirst 算法对比。共规划 26 条电缆路径，表 1 的结果为布线性能的平均值。为了直观看出各种算法布线结果的效果，定义综合计算评价指标 Cost 的计算公式 (13) 为：

$$Cost = \varepsilon \times \text{节点数量} + \epsilon \times \text{电缆长度} + \theta \times$$

$$\begin{aligned} & \text{电缆距离墙体距} + \vartheta \times \text{转弯个数} + \mu \times \\ & \text{共享路径长度} \end{aligned} \quad (13)$$

公式 (13) 中， $\varepsilon + \epsilon + \theta + \vartheta + \mu = 1$ ，在本文中，节点数量、电缆长度、电缆距离墙体距离和转弯数量指标都是越低越好，因此， $\varepsilon, \epsilon, \theta, \vartheta$ 取值分别为 0.4, 0.4, 0.3, 0.4，而共用路径段长度指标越大越好，因此， μ 为 -0.5，最终 Cost 值越小，说明电缆布局效果越好。

表 1 算法对比结果

路径指标	A*	Dijkstra	BFS	Bestfirst	双向 A*	改进 A*
节点数量/个	9512	6604	6604	9046	9302	6172
电缆长度/mm	1897200	1315600	1315600	1804000	1855200	1268633
电缆至墙体距离/mm	226.05	877.08	294.12	243.22	256.46	202.11
转弯数量/个	4423	726	2687	3404	3687	2715
共享路径长度/mm	53619	49836	50535	50535	34037	53416
Cost	1382694.6	2241927.5	1087392.4	1361374.6	1445938.9	858531.4

实验结果表明，改进 A* 算法在关键指标上显著优于基准算法：路径节点减少 10.59%，总长度缩短 22.5%，平均贴墙距离降低 49.72%。虽然因紧贴圆柱形障碍物轮廓导致转弯次数多于 Dijkstra 算法（后者最少为 726 次），但其共享路径长度显著高于其他算法且取得了最低综合代价值，证实了该算法在既定约束下具备最优的路径规划性能。

3 结论

针对大规模场景下的电缆自动布线难题，本研究提出了一种基于改进 A* 算法的电缆布局方法。该方法首先对三维模型进行表面采样并生成点云，依据布线约束构建均匀网格；进而通过计算采样点与网格节点的距离，精准划分墙体结构与可通行区域。在此基础上，利用区域间距离场增强 A* 算法的启发式函数，构建了具备三维感知能力的代价函数。实验表明，改进 A* 算法在自定义环境中性能显著优于原始 A*、Dijkstra、BFS 及双向 A* 等经典算法，

并在实际核岛工程中成功满足了严苛的工程约束。该研究不仅为复杂建筑项目提供了高效的布线解决方案，更证实了改进 A 算法在提升路径规划效率方面的巨大潜力及对多样化模型的优异适应性。

参考文献

[1] 崔钰萍, 郑国磊. 电缆布局设计技术研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(02): 268-280
 [2] 牛蕊. 航空产品电缆的数字化布局分析[J]. 山东工业技术, 2016(1): 133-133
 [3] 丁川. 飞行器电缆布线数字化技术与系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017
 [4] 杜伯学, 李忠磊, 周硕凡, 等. 聚丙烯高压直流电缆绝缘研究进展与展望[J]. 电气工程学报, 2021, 16(2): 2-11
 [5] 李纯军. 基于 A* 算法的多管线通道化自动敷设方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011