

# 基于图论及改进 A\*算法的屋面设备检修动线设计智能分析

何瑞琦<sup>1,2</sup>, 曹盈<sup>1</sup>, 许璟琳<sup>1,3</sup>, 余芳强<sup>4</sup>

1. 上海建工四建集团有限公司, 上海 201103;
2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
3. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015;
4. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080)

**摘要:** 在屋面工程设计中, 设备检修动线的合理性直接影响检修效率与安全性, 传统设计方法常依赖经验判断, 难以在设计阶段充分评估动线设计的合理性。针对此问题, 提出了一种基于图论及改进 A\*算法结合的混合算法, 并结合建筑信息模型(BIM)技术, 开发了一种基于该算法的屋面设备检修动线智能分析设计工具, 通过数字化模型进行动线分析, 弥补传统设计的不足。首先, 采用碰撞检测与八叉树算法将屋面转化为带有权重的等效网格图; 然后采用改进 A\*算法优化检修路径, 综合考虑设备碰撞体积和空间限制, 计算最优检修动线并评估动线区域深化设计合理性; 最后, 使用以该算法为基础的检修动线智能分析设计工具对实际项目进行实验。实验结果表明, 该算法不仅能够精准揭示设计中可能存在的空间冲突和不合理布局, 为优化设计提供数据支持, 提高了设计的合理性和可操作性, 且比传统人工设计效率提高了5倍以上。目前基于该算法的智能分析工具已在上海建工四建集团的多项实际项目中使用。

**关键词:** 屋面检修; BIM; 动线优化; A\*算法; 图论; 八叉树算法

中图分类号: R 575; TP 391.41; TP 18 DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2026010216

文献标识码: A 文章编号: 2095-302X(2026)01-0216-07

## Intelligent analysis of design about roof equipment inspection paths based on graph theory and improved A\* algorithm

HE Ruiqi<sup>1,2</sup>, CAO Ying<sup>1</sup>, XU Jinglin<sup>1,3</sup>, YU Fangqiang<sup>4</sup>

1. Shanghai Construction No.4(Group) Co. Ltd, Shanghai, 201103, China;
2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310015, China;
4. Shanghai Construction Group Co. Ltd, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** In roof engineering design, the rationality of equipment maintenance circulation routes directly impacts maintenance efficiency and safety. Traditional design methods often rely on empirical judgment, making it difficult to sufficiently evaluate the rationality of these routes during the design phase. To address this, a hybrid algorithm combining graph theory with an improved A\* algorithm was developed. Integrated with Building Information Modeling (BIM) technology, an intelligent analysis and design tool for roof equipment maintenance circulation routes was created to address the shortcomings of traditional design via digital model-based route analysis. First, the roof was converted into a weighted equivalent grid map using collision detection and an octree algorithm. Next, an improved A\* algorithm was employed to optimize the maintenance paths, comprehensively considering equipment

收稿日期: 2025-04-11; 定稿日期: 2025-07-01; 通信作者: 许璟琳, E-mail: jinglin.xu@qq.com

Received: 11 April, 2025; Finalized: 1 July, 2025; Corresponding author: XU Jinglin, E-mail: jinglin.xu@qq.com

基金项目: 上海市东方英才计划青年项目(QNKJ2024047)

Foundation items: Shanghai Eastern Talent Plan (QNKJ2024047)

collision volumes and spatial constraints to calculate the optimal maintenance circulation route and evaluate the rationality of detailed route-area design. Finally, the intelligent analysis and design tool based on this algorithm was tested on an actual project. Experimental results demonstrated that the algorithm accurately revealed potential spatial conflicts and irrational layouts, providing data to support design optimization, and enhanced design rationality and operability; it also improved efficiency by more than five times compared with traditional manual design. The intelligent analysis tool based on this algorithm is currently in use in several projects by the Shanghai Construction (No.4) Group Co., Ltd.

**Keywords:** roof maintenance; BIM; route optimization; A\* algorithm; graph theory; octree algorithm

屋面工程作为建筑全生命周期中的重要环节,其深化设计与管线排布的合理性直接影响施工效率、运维成本及建筑安全性<sup>[1]</sup>。随着建筑功能复杂化,屋面机电管线系统日益呈现三维空间交错、多专业协同的特点,传统二维设计模式无法有效应对管线碰撞、安装冲突及后期运维空间预留不足等问题<sup>[2]</sup>。在此背景下, BIM (Building Information Modeling) 技术通过构建信息集成的三维可视化模型,实现了管线空间定位的精准映射与专业协同优化<sup>[2]</sup>。BIM 技术能够在三维空间中模拟屋面设计,进行虚拟检查与碰撞检测,避免传统设计方式中易出现的遗漏和错误<sup>[3-4]</sup>。

然而, BIM 在解决设备检修动线分析等非实体构件分析方面仍存在显著局限性<sup>[5-6]</sup>, 而智能算法与自动化工具的引入可有效优化屋面设计与施工流程。如翟晓卉和史健勇<sup>[7]</sup>尝试引入三维 GIS 与 BIM 结合, 以实现屋面模型数据的数字化集成; 郭瑞荣等<sup>[8]</sup>则结合层次图思想, 使用栅格抽象映射得到地图并使用 Dijkstra 算法获取最优路径; 陶志远等<sup>[9]</sup>利用 A\*算法在 110 kV 变电站构型空间内以机器人危险性指标最低为目标进行路径搜索, 实现检修机器人的路径规划。Dijkstra 与 Floyd 算法作为经典路径规划理论, 虽具备数学严谨性, 但面对高维复杂场景存在计算效率瓶颈。随着需求的升级, 启发式算法成为研究热点, 其中 A\*算法因其搜索效率高和路径最优性而备受关注<sup>[10-13]</sup>。改进的 A\*算法通过引入动态权重和环境因子, 进一步优化了路径搜索过程<sup>[14]</sup>。在此基础上, 梁裕卿等<sup>[15]</sup>在人员疏散设计中从提高设计效率出发, 提出了一种基于深度 Q 学习(Deep Q-Network, DQN)与 A\*结合的混合算法, 在房间内外使用不同的算法并增加奖励矩阵验证机制以提高绘制正确性和绘制效率。

本文针对特定领域——建筑屋面深化设计中设备检修动线优化存在的 3 个技术瓶颈: ①当前屋面工程市场缺少基于 BIM 模型的动线检查工具,

人工检查工作量大、耗时长; ②现有路径搜索方法在模型维度转换时, 由于未考虑检修人员与设备三维体积参数, 导致传统网格模型无法真实映射建筑空间的可通行区域; ③BIM 模型图论转换过程中, 传统节点权重计算忽略非结构构件的影响, 致使疏散门、连续设备遮挡等情况未被有效纳入通行性评价体系。结合实际调研规则, 如图 1 所示, 本文提出了一种基于图论和改进 A\*算法的屋面设备检修动线智能分析方法。基于 BIM 模型, 将屋面楼板转换为初始网格图; 综合考虑结构构件与非结构构件, 根据通行规则与构件位置计算网格节点权重, 将实际模型抽象为包含权重的屋面等效网格图, 并基于通行体积改进 A\*算法, 解决屋面设备检修动线快速优化的问题, 提高屋面管线深化设计的效率。

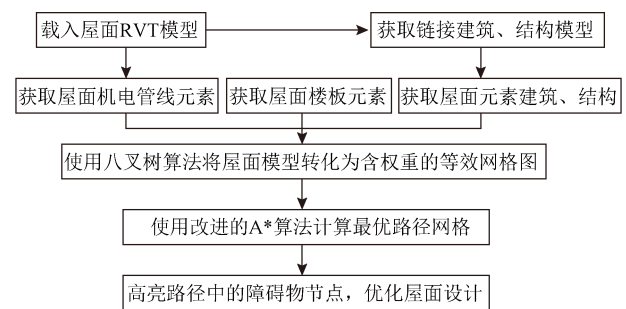


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

## 1 屋面模型等效网格图

屋面 BIM 模型是屋面深化设计的重要基础, 涵盖多种模块, 包括建筑模型(建筑墙、门等)、结构模型(结构柱、梁等)、机电模型(机电设备、管道等), 各模块间相互依存。机电设备与管道是屋面 BIM 模型的重要组成部分, 包括通风系统、空调设备、雨水排水管道、供电电缆及信号线等, 机电设备的位置与尺寸相对固定, 而设备间的管道可通过支架、桥架或嵌入层互相连接。设备检修动线为检

修人员在屋面检修机电设备所行走的路线;动线检查即是对影响行走路线的管道、支架等深化设计内容进行检查,判断设计是否合理。

在图论中,网格图(Grid graph)是一种用于表示规则划分空间的特殊图结构。由一组节点(顶点)和连接节点边(线段)的构成,节点通常排列成矩形或其他规则网格的形式。屋面空间通常较为复杂,设备分布、检修通道、防护设施和其他构件彼此交错,直接通过三维模型进行路径分析可能涉及大量繁

琐的几何计算。而通过将屋面模型转化为网格图,将问题抽象为数学模型进行处理,检修动线问题可简化为图论中的路径规划问题,例如最短路径或避障路径,障碍物对动线的影响也更易量化,可使用成熟的算法求解。

屋面等效网格图(Roof Grid Graph, RGG)的生成过程主要包括:边界确定与网格划分、碰撞检测与权重计算以及数据可视化与结果应用 3 个关键步骤,如图 2 所示。

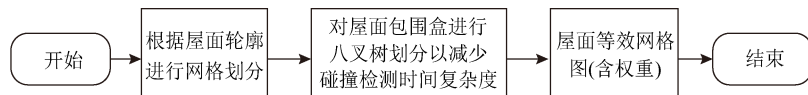


图 2 屋面等效网格计算流程

Fig. 2 Roof equivalent grid computation workflow

首先,提取屋面几何边界并划分规则网格,将复杂的屋面问题转化为可量化的基础模型。网格划分是生成等效网格图的基础,基于屋面楼板的几何特性进行规则的二维网格化处理。网格尺寸的确定采用双重约束机制:

1) 基于 BIM 模型的最小可通行宽度,从《中国成年人人体尺寸》标准中获取一般肩宽为 339~435 mm,取最大值并考虑携带工具包,则近似最小通行宽度为 600 mm;

2) 在路径规划算法的工程适用性优化过程中,预实验发现:采用本文改进 A\*算法时,网格单元数量从 2 900 个(粗网格 600 mm)增至 25 800 个(细网格 200 mm)后,计算耗时呈现线性增长特征(图 3);当网格尺寸小于 100 mm 时,边际效益急剧下降,精度提升比率(0.33% → 0.08%)仅为时间成本增长的 19%。在标准测试场景(30%障碍覆盖率屋面)中,200 mm 网格可实现平均 0.82%的网格划分准确率(即网格仅属于唯一类型构件),同时将

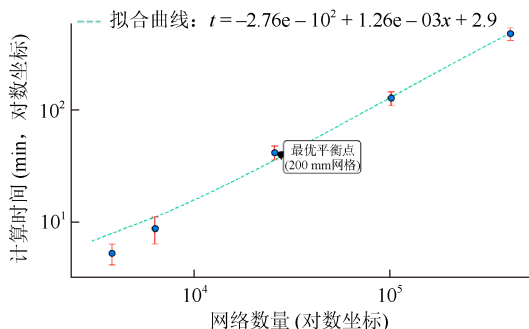


图 3 网格计算时间图(横轴为网格数量的对数,竖轴为计算时间的对数)

Fig. 3 Mesh computing time graph (with the number of mesh elements on the logarithmic x-axis and computation time on the logarithmic y-axis)

计算时间控制在(40 ± 15) min 区间,满足设计人员对时效性的要求。通过网格划分,屋面被分解为若干独立的单元,每个单元代表屋面区域的一个基础模块。

网格划分完成后,需将每个网格单元扩展为三维长方体体元(图 4 和图 5),用以模拟该网格位置屋面区域的空间范围。长方体体元的高度设定通常依据屋面设备和管线的实际空间需求,如人员通行高度范围或管线排布的允许范围。长方体体元的构建为后续的碰撞检测提供了空间参考,也为权重计

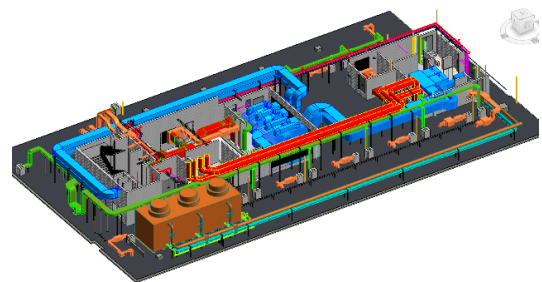


图 4 屋面 BIM 模型

Fig. 4 Roof BIM model

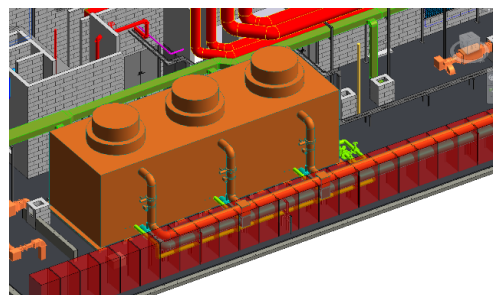


图 5 网格扩展后的长方体体元(下方红色立方体为网格在三维空间中的展现形式)

Fig. 5 Cuboid voxel units after grid expansion (the red cube is the representation of the grid in 3D space)

算奠定了基础。当每个网格的三维空间范围被明确, 可以直观地对构件的空间布局和彼此之间的关系进行分析。

碰撞检测与权重计算是生成等效网格图的核心步骤, 用以评估每个网格区域内设计复杂性和施工优先级。碰撞检测通过分析每个长方体体元与屋面构件之间的交叠情况, 量化空间利用情况。具体来说, 可采用几何算法(如包围盒检测)计算长方体体元与构件的交叠体积。每个网格的碰撞检测结果记录了与构件的交叠位置、体积大小等信息, 为权重计算提供数据支持。每个网格的权重计算可表示为

$$W_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} \cdot P_j \quad (1)$$

式中:  $W_i$  表示第  $i$  个网格的权重;  $V_{ij}$  表示第  $i$  个网格与第  $j$  个构件的碰撞体积;  $P_j$  表示第  $j$  个构件的重要性系数。

通过引入权重系数  $P_j$ , 可有效反映不同类型构件对设计复杂性的不同影响。权重系数通过项目调研规则以及人工测试来确定, 根据多个项目调研将权重属性分为障碍物、低管道、中管道、高管道、支架和地面等 6 类, 并将所有构件分类进这 6 大权重中, 如建筑墙与设备基础输入障碍物。同时, 通过控制变量法, 多次调整权重系数计算网格最优路径并人工判断路径优劣, 以避免出现权重系数差距太小导致路线经过管道的情况。最终确定 6 大最优权重系数分别为 -2, 20, 100, 20, 50 和 10。如图 6 所示, 通过权重计算, 设计人员能够直观了解每个网格的复杂程度, 为后续优化提供明确的方向。



图 6 屋面等效网格图

(绿色为普通网格, 红色为高权重网格)

Fig. 6 Roof equivalent grid graph (green represents ordinary grids, red indicates high-weight grids)

在屋面模型参数化权重计算中, 面对网格数量达到  $10^5$  量级、含 2 万多个异形构件的大型工程时, 传统全空间遍历方法的  $O(n^2)$  时间复杂度将导致计

算效率崩溃。为解决这一性能瓶颈, 本研究基于八叉树空间划分策略提出碰撞检测优化方案, 以实现降维计算。通过八叉树算法的参数敏感性正交实验, 确定  $10^5$  量级中较优的参数, 见表 1, 当构件数量阈值  $M > 30$  时, 计算时间对参数的敏感性降低; 而最小单元尺寸从  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  升到  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ , 计算时间下降但误差却急剧增大, 综合考虑本研究将构建数量阈值  $M$  取 10, 最小单元尺寸取  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。

表 1 算法性能对比表

Table 1 Algorithm performance comparison table

参数组合	构件阈值	单元尺寸/mm	耗时/min	碰撞检测误差率/%
C1	10	300	128	0.12
C2	10	600	75	0.35
C3	10	1 200	41	1.22
C4	30	300	106	0.09
C5	30	600	63	0.28
C6	30	1 200	35	0.95
C7	50	300	92	0.07
C8	50	600	55	0.21
C9	50	1 200	29	0.78

优化方案技术路径如图 7 所示, 首先需要对整个空间进行初始八叉划分, 将屋面模型的包围盒作为根节点, 划分为 8 个初始立方体单元(图 8), 并判断长方体体元与屋面立方体单元是否存在空间碰撞, 排除不可能发生碰撞的立方体单元。接着, 根据剩余立方体单元中的构件数量是否少于阈值或几何尺度是否过小, 判断是否需要继续细分。如果构件数量超出阈值或立方体单元的体积大于预设的最小单元(预设最小单元为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ), 则进一步将当前立方体单元划分为下一级 8 个单元。通过递归直至每个立方体单元中的构件数量或立方体单元大小满足条件为止。实验数据表明: 本算法较传统方法在  $10^5$  数量级网格计算时将时间复杂度从  $O(n^2)$  降至  $O(n \log n)$ , 计算耗时由 6 h 缩至 58 min。关键性能提升体现在: ①空间剪枝率均值达到 74.3%; ②动态内存消耗降低 82%; ③支持并行化分块计算, 可扩展性提升 400%。

## 2 设备检修动线智能分析算法设计

对于屋面等效网格图 RGG, 具有如下性质:

1) 节点以矩形网格为例, 边相交与顶点相交均视作可通行。

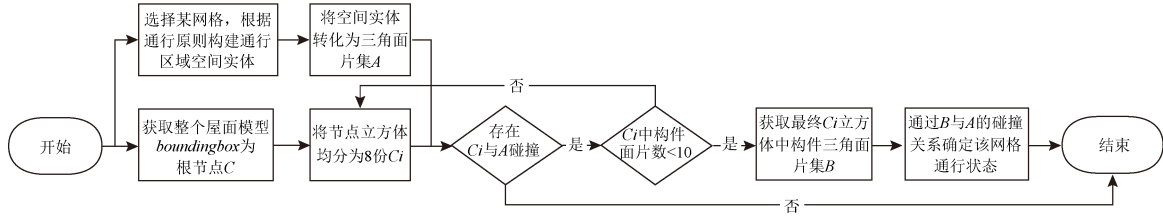


图 7 八叉树算法计算流程

Fig. 7 Octree algorithm computation workflow

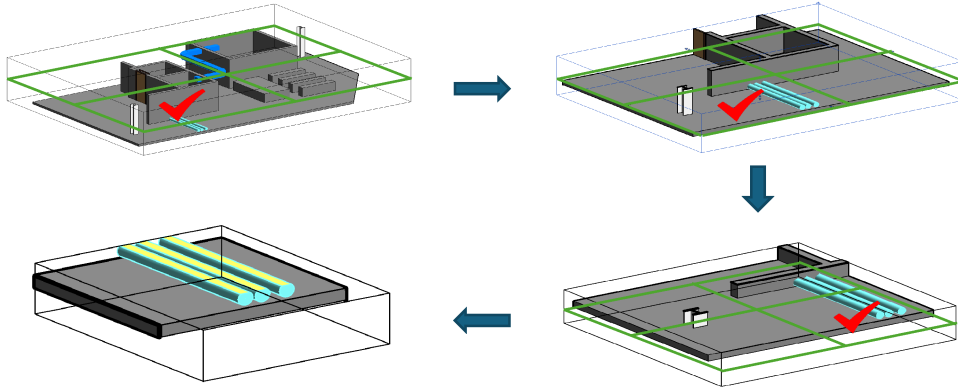


图 8 八叉树算法示意图(红色对勾处为八叉树中满足碰撞要求的一支)

Fig. 8 Octree algorithm schematic diagram (the red mark indicates a branch that meets collision requirement)

2) 斜向节点间的步长为正向(横向或竖向)为节点间步长的 $\sqrt{2}$ 倍。

从屋面模型中提取屋面等效网格图的算法流程如图 2 所示。基于屋面等效网格图 RGG, 设备检修动线检查问题可简化为最优路线查找问题, 考虑通行体积的最优路线查找过程如图 9 所示。

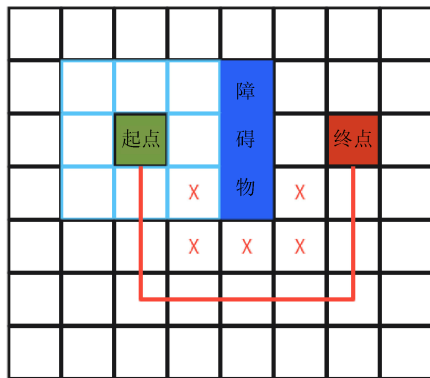


图 9 考虑通行体积的设备检修动线计算流程

Fig. 9 Equipment maintenance inspection route calculation workflow considering navigable volume

在标准 A\*算法中, 节点通常表示单个网格的中心点, 邻居节点为 8 个方向相邻的网格。但在考虑 3×3 的行走网格时, 每个节点不仅要表示网格中心点, 还需覆盖该节点为中心的 3×3 区域。这意味着每次移动前, 算法需确保目标区域内的所有子网格均不被障碍物占据。具体步骤如下:

输入: 屋面等效网格图 RGG。

输出: 最优路线网格坐标集及路线顺序。

步骤 1. 确定起始网格和目标网格。将门所在的网格作为起始网格节点 StartNode。人工点选需要检修的点作为目标网格 EndNode, 通常为设备一侧、阀门和屋顶机房间门的位置。

步骤 2. 搜索循环。首先从“开放列表”中选择评估值最小的节点作为当前节点。如果当前节点即为目标节点, 则算法停止, 进入路径回溯阶段; 否则, 将当前节点从“开放列表”移至“关闭列表”, 避免重复访问。在每一轮搜索中, 算法会检查当前节点的所有相邻节点。相邻节点在体积感知的情况下并非单一网格, 而是中心点相邻的 3×3 区域。在检查邻居节点时, 算法必须验证目标区域内的每个子网格是否可通过。如果存在任何一个子网格被障碍物占据, 则该邻居节点被视为不可行, 直接跳过。对于可通过的邻居节点, 根据总代价函数计算该节点代价。

A\*算法的评价函数可表示为

$$F(x) = G(x) + H(x) \quad (2)$$

式中:  $x$  表示当前节点;  $F(x)$  表示当前节点的总代价;  $G(x)$  表示当前节点的实际代价;  $H(x)$  表示当前节点的启发式估计代价。

$G(x)$  表示从当前节点到开始节点的实际移动距离, 沿着生成的路径进行移动, 即

$$G(x) = \sum RGG[i][j] \cdot weight \quad (3)$$

式中:  $i$  和  $j$  表示该节点的横纵坐标。

$H(x)$  表示从当前节点到终点的估计移动距离, 可采用欧几里得距离计算得到, 即

$$H(x) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4)$$

式中:  $(x_1, y_1)$  表示当前节点的坐标;  $(x_2, y_2)$  表示终点节点的坐标。

完成代价计算后, 算法将邻居节点的状态进行更新。如果该节点尚未在“开放列表”中, 则将其加入, 同时记录其父节点为当前节点, 并更新其  $G(x)$ ,  $H(x)$  和  $F(x)$  值。如果该节点已存在于“开放列表”中且新路径的  $G(x)$  值更小, 则更新其父节点及代价值。

按照步骤 2 内容进行重复搜索, 从“开放列表”中选择下一个具有最小  $F(x)$  值的节点进行处理。

**步骤 3. 路径回溯。**当目标节点被选为当前节点时, 算法停止, 并从目标节点开始, 逐步回溯其父节点, 直到起始节点。输出所有路径节点, 形成完整的最优路径。对于  $3 \times 3$  的行走网格, 路径上每个节点的实际范围应覆盖其中心周围的  $3 \times 3$  子网格。

**步骤 4. 标记障碍。**判断最优路径中每个节点的权重, 标记高权重网格为最优路线中的可优化网格。

### 3 应用案例

利用本文提出的基于图论的屋面设备检修动线分析方法, 在上海某三甲医院新院区(简称项目 A)、某电子产业园(项目 B)及某专科医院大楼(项目 C)等多个场景中进行了应用验证。

各项目均处于屋面结构完工、机电管道深化阶段, 采用同样的参数进行设备检修路线智能分析。首先, 将屋面区域划分为等效网格, 每个网格代表  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的实际空间, 障碍物不可通行高度范围为  $300 \sim 2000 \text{ mm}$ , 通过属性赋值对网格功能进行标识, 包括通行网格、障碍网格和高权重网格。设备基础和建筑结构构件被标记为障碍网格, 而管线则作为高权重网格。为了充分考虑设备检修人员的行走宽度, 使用  $3 \times 3$  的网格区域(即  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ )作为动线评估区域, 确保设计过程兼顾实际操作需求。最终结果如图 10 所示, 某设备最优检修路线绿色段中红色部分为可优化设计的部分,

可能存在可移动的管道、支架等。深化设计人员根据最优路线提示修改管线排布路径, 使该设备的检修路径更加通畅, 并交付机电施工, 该红色障碍物区域最终现场实际施工情况如图 11 所示。

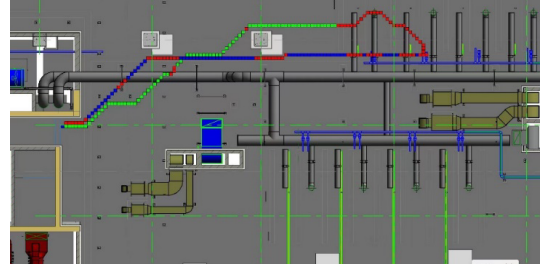


图 10 项目 A 中某设备最优检修路线(绿色为最优路径中普通网格, 红色为最优路径中障碍物网格)

Fig. 10 Optimal maintenance route for equipment in project A (green is the normal grid in the optimal path, and red is the obstacle grid in the optimal path)



图 11 项目 A 中某设备实际检修空间

Fig. 11 Actual maintenance space for equipment in project A

在路径优化阶段, 改进的 A\*算法通过结合实际代价与动态启发式代价, 快速生成从屋面入口到目标设备的最优检修路径, 同时自动避开障碍区域。相比传统的人工设计, 算法能够动态调整路径, 快速响应复杂屋面空间的变化。其核心改进包括: ①通过特殊权重网格减少冗余节点扩展, 将 A\*算法时间复杂度从  $O((n+m)\log n)$  降至  $O(n\log n)$  ( $n$  为有效网格节点数,  $m$  为障碍物边数); ②通过二叉树算法降低计算时间复杂度; ③增加路径搜索参数适应项目实际。

路径优化率的算法较人工计算动线权重的优化程度表现为, 动线总权重越小, 则动线更便捷。表 2 为针对不同规模项目开展的对比实验。与传统人工设计相比, 算法在路径可行性验证、避障响应速度等关键指标上均具有显著优势。当屋面面积增至  $4300 \text{ m}^2$  时(项目 B), 算法仍能在  $40 \text{ min}$  内完成多设备并行路径规划, 较人工设计效率提升  $95.3\%$ 。

表 2 算法性能对比表(以较远检修设备为例)

Table 2 Algorithm performance comparison table (Taking remotely located maintenance equipment as an example)

项目	屋面面积 /m <sup>2</sup>	网格划分 (大小/数量)	障碍 密度	算法路径长度 /m	人工路径长度 /m	算法转 折/次数	人工转 折/次数	算法耗时 /min	人工耗时 /h
A	2 400	0.2 m×0.2 m/60 000	0.12	218.4	283.6	9	21	28	10.0
B	4 300	0.2 m×0.2 m/107 500	0.28	419.7	491.3	12	25	40	14.0
C	1 850	0.2 m×0.2 m/46 250	0.35	193.2	242.3	14	22	15	6.5

## 4 结束语

针对非实体的设备检修动线的设计无法做出有效的障碍物位置优化,导致复杂管网区域的检修动线规划不合理。本文提出了一种基于图论的屋面设备检修动线分析方法,并通过实际项目测试了本方法的可行性和准确性。通过将深化设计过程数字化,本方法显著提高了设备检修动线设计的效率与精确度。应用结果表明,改进 A\*算法生成的检修路径更短且无碰撞区域,同时减少了施工阶段因设计疏漏引发的现场协调工作,可给类似的屋面深化设计提供借鉴。

但本方法对屋面模型建模要求较高,模型的优劣对后续的计算存在极大影响;同时本文采用的矩形网格图在复杂构件的边缘计算时会形成最大一个单元尺寸的误差,使得障碍物范围对比实际范围增加,影响后续算法计算。在未来的研究中将着重于探索使用三角形网格合理划分屋面及在三角网格集中应用 A\*算法等寻路算法分析最优路线的问题。

## 参考文献 (References)

- [1] 郑琪,丁烈云. 建筑机电系统管道协同设计研究[J]. 建筑科学, 2024, 40(1): 1-12, 33.  
ZHENG Q, DING L Y. Research on pipeline collaborative design of building electromechanical system[J]. Building Science, 2024, 40(1): 1-12, 33 (in Chinese).
- [2] 谢婷,张晓玲,孙亦军,等. BIM 技术在机电管线综合深化设计中的应用[J]. 建筑技术, 2016, 47(8): 727-729.  
XIE T, ZHANG X L, SUN Y J, et al. Application of BIM technique in general in-depth design of electromechanical pipeline[J]. Architecture Technology, 2016, 47(8): 727-729 (in Chinese).
- [3] 邢振华,胡明娟,周斌科,等. BIM 技术在大型商业综合体中机电深化设计的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 1225-1229.  
XING Z H, HU M M, ZHOU B K, et al. Research and application of BIM technology for the mechanical-electrical detailed design in large commercial complex projects[J]. Construction Technology, 2017, 46(S2): 1225-1229 (in Chinese).
- [4] 周勇,骆发江,李鹏,等. 基于 BIM 技术的屋面深化设计应用[J]. 施工技术, 2016, 45(S1): 802-804.  
ZHOU Y, LUO F J, LI P, et al. Detailed design of the roof based on BIM[J]. Construction Technology, 2016, 45(S1): 802-804 (in Chinese).
- [5] 刘子毅,李铁军,孙晨昭,等. 基于 BIM 的建筑机器人自主导航策略优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(15): 302-308.  
LIU Z Y, LI T J, SUN C Z, et al. Research on optimization of

autonomous navigation strategy of construction robot based on BIM[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(15): 302-308 (in Chinese).

- [6] 王凡,李铁军,刘今越,等. 基于 BIM 的建筑机器人自主路径规划及避障研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(17): 224-230.  
WANG F, LI T J, LIU J Y, et al. Research on autonomous path planning and obstacle avoidance of building robot based on BIM[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(17): 224-230 (in Chinese).
- [7] 翟晓卉,史健勇. BIM 和 GIS 的空间语义数据集成方法及应用研究[J]. 图学学报, 2020, 41(1): 148-157.  
ZHAI X H, SHI J Y. Spatial and semantic data integration method and application of BIM and GIS[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(1): 148-157 (in Chinese).
- [8] 郭瑞荣,李朝奎,李豪,等. 面向 BIM 的室内拓扑-栅格分层路径规划方法[J]. 测绘通报, 2024(3): 81-87.  
GUO R R, LI C K, LI H, et al. BIM-oriented indoor topology-grid hierarchical path planning method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(3): 81-87 (in Chinese).
- [9] 陶志远,徐蔚青,王石刚,等. 110kV 智能变电站检修机器人带电作业路径规划[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 17-20, 25.  
TAO Z Y, XU W Q, WANG S G, et al. Path planning applied on a field robot for hot-line working in 110kV intelligent substation[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(1): 17-20, 25 (in Chinese).
- [10] 赖李洋,郑铭骏,梁海成,等. 路径规划算法的高层综合设计研究[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(11): 4132-4140.  
LAI L Y, ZHENG P J, LIANG H C, et al. Case study of high level synthesis on path planning algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(11): 4132-4140 (in Chinese).
- [11] 朱永辉,张胜文,支辰羽,等. 基于改进 A\*算法的三维智能布线技术研究[J]. 制造技术与机床, 2023(10): 48-53.  
ZHU Y H, ZHANG S W, ZHI C Y, et al. Research on 3D intelligent wiring technology based on improved A\* algorithm[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(10): 48-53 (in Chinese).
- [12] 苏锦成,王振中,贾小攀,等. 基于 A\*算法的核电厂工艺管道自动布局方法[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 129-135.  
SU J C, WANG Z Z, JIA X P, et al. Automatic layout of pipelines for process systems of nuclear power plant based on A\* algorithm[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(1): 129-135 (in Chinese).
- [13] 乔道迹,张艳兵. 多障碍环境下巡检机器人路径规划优化研究[J]. 现代电子技术, 2025, 48(1): 130-134.  
QIAO D J, ZHANG Y B. Research on path planning optimization of inspection robot in multi-obstacle environment[J]. Modern Electronics Technique, 2025, 48(1): 130-134 (in Chinese).
- [14] 贾明超,冯斌,吴鹏,等. 一种融合改进 A\*算法与改进动态窗口法的文旅服务机器人路径规划[J]. 图学学报, 2024, 45(3): 505-515.  
JIA M C, FENG B, WU P, et al. A path planning for cultural tourism service robot combining improved A\* algorithm and improved dynamic window approach[J]. Journal of Graphics, 2024, 45(3): 505-515 (in Chinese).
- [15] 梁裕勤,吉久茂,杨佳蕾,等. 基于人工智能的 BIM 疏散设计自动化方法[J]. 图学学报, 2021, 42(2): 299-306.  
LIANG Y Q, JI J M, YANG J L, et al. BIM evacuation design automation based on artificial intelligence[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(2): 299-306 (in Chinese).