

面向复杂空间的电气管线智能化布置算法应用研究

梁锦华

广东金林建设工程有限公司 广东茂名 525100

摘要：复杂空间环境中，电气管线布置存在空间受限、交叉干扰和精度要求高等挑战，传统人工设计手段已难以满足高效与智能化需求，依托智能化算法的布置方法借助三维建模、启发式搜索与优化策略，实现管线路径自动生成与冲突规避，相关研究结果表明，该方法可有效提高布置效率、减少资源浪费，还能为建筑机电系统的数字化与智能化转型提供理论与技术支持。

关键词：电气管线；智能化布置；复杂空间；优化算法；三维建模

引言

现代建筑空间结构日趋复杂，电气管线在有限环境中的高效布置已成为机电安装的核心难题，传统依赖经验的设计方式难以统筹空间利用率、施工精度与系统安全性，往往造成冲突频发与资源浪费，智能化算法的出现为这一问题提供了全新解决途径，借助三维建模、路径优化与自动化冲突检测，能够实现管线路径的动态规划与高效布局，针对复杂空间下的电气管线布置问题，本文将从建模方法、优化算法与实现机制等方面开展研究，为建筑机电系统的数字化和智能化发展提供理论支撑与技术借鉴。

一、电气管线智能化布置问题建模

1. 复杂空间环境特征分析

现代建筑里，空间环境表现出多维度约束特点，层高限制直接影响管线的排布方式，常见公共建筑层高大约在3.5m—5.0m，却要同时容纳电气、给排水、暖通等多类管线，净空不足常会引发布置冲突，设备密集度的提升对空间分配提出更高要求，大型综合体或医院机电间的设备安装率能超过70%，电气管线需在有限余量中实现高密度敷设，结构梁柱的分布也是关键约束条件，梁截面宽度达到0.8m以上时，管线需通过绕行或穿孔套管处理，由此增加设计复杂度。

电气管线布置还面临多目标需求，安全性是首要指标，布置要满足电气防火分区、回路隔离及漏电保护等

要求，经济性体现在减少材料消耗与施工工时，相同功能条件下，路径长度缩短10%可节约约8%的电缆成本，可维护性要求在检修通道和设备接口处留有足够的操作空间，一般规范建议主干管线两侧至少保持0.5m检修距离，这在空间有限的建筑中格外难以实现。

2. 布置约束条件的形式化表达

进行电气管线布置的算法建模时，需将实际施工中的物理和规范约束转化为形式化表达，以便在优化过程中调用，几何约束最为基础，包含路径长度、弯曲半径和净空要求，电缆管道弯曲半径一般不得小于电缆直径的6倍，水平路径应尽可能减少超过90°的转折，净空要求上，电缆桥架与顶棚之间要保持不小于200mm的距离，确保散热与检修。借助数学建模，可将路径长度最小化公式化为优化目标函数，弯曲半径与净空条件则转化为边界约束。

功能约束体现电气系统的运行逻辑，不同分区的配电回路必须独立，防止故障蔓延；大容量回路需依据负荷分配进行分层分路，保障供电可靠性，大型商业建筑中，单一回路的负荷不应超过400kVA，超过则需自动分解为多条供电路径，负荷分配约束可通过矩阵表达式建模，让算法在布置时自动识别超负荷风险并调整管线方案，施工约束涉及工艺规范与可实施性，施工图审查规范通常要求管线布置预留检修空间，管井和桥架的宽度不得超过设计极限。

安装工艺方面，金属桥架需接地，支吊架间距不应超过2m，否则会影响结构稳定性，这类约束在建模中通常以硬约束条件加入优化目标，即不满足就直接判定方案无效，将几何、功能和施工约束进行统一的形式化表

作者简介：梁锦华（1977—），男，汉族，广东湛江，中专，研究方向：建筑机电设备安装。

达, 能为后续智能化布置算法提供完整的计算约束环境, 保证优化结果在工程上具备可实施性。

二、智能化布置算法框架设计

1. 三维建模与空间数据结构

智能化布置算法里, 三维建模是基础环节, 借助BIM (Building Information Modeling) 平台, 能通过IFC (Industry Foundation Classes) 接口实现建筑几何信息与管线参数的交互, 几何建模既要表达建筑的空间边界 (如梁柱、墙体), 也要精确描述管线截面形状与布置高度, 电缆桥架宽度一般在200~800mm之间, 高度间距需满足不小于150mm的规范要求, 为方便算法计算, 空间数据需进行网格化与体素化处理, 把建筑空间划分为边长50mm~100mm的三维体素单元, 可有效降低计算复杂度。

体素化后的数据结构能快速识别可行布置区域与障碍物分布, 某体素被梁体占据则其值设为1 (障碍), 为空闲空间则为0, 以此为路径搜索提供离散化环境, 和传统CAD线框模型相比, 体素化不仅便于自动化计算, 还能与约束条件结合, 实现快速冲突检测, 在此基础上, 可构建管线候选路径集。

候选路径生成遵循“起点一目标点”模式, 利用多源最短路径算法生成若干条可行路径, 再经筛选剔除不满足约束的路径, 候选路径集不仅为后续优化提供参考, 还能在仿真中进行多方案对比, 引入权重参数对路径长度、转弯次数和净空利用率进行综合评价, 可为优化算法提供更精细的初始解空间, 显著提升后续全局优化的收敛速度与布置效果。

2. 优化算法体系构建

路径规划过程中, 启发式搜索算法应用范围较广。

A*算法借助评价函数

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

其中, $g(n)$ 代表从起点到当前节点的实际代价, $h(n)$ 代表到达目标点的估计代价, 设计出适宜的启发函数, 能在复杂空间里实现快速收敛, Dijkstra算法适用于全局最优路径搜索, 遗传算法则在多管线耦合及复杂约束条件下, 展现出更强的全局优化能力, 管线布置不仅要寻求最短路径, 还得兼顾最少交叉与最低成本, 由此构成典型的多目标优化问题。其优化目标可形式化为:

$$\text{Min } F = \alpha L + \beta C + \gamma N$$

其中, L 代表路径总长度, C 代表交叉冲突次数, N 代表材料与安装成本; α , β , γ 分别为权重系数, 调

整权重能够在不同优化目标之间达成平衡, 医院机电安装时, 安全性权重通常设定在0.5以上, 用以保障系统稳定性, 约束处理方面, 需要构建软约束与硬约束的协调机制, 弯曲半径、净空距离等硬约束必须严格满足, 不然方案便会失效; 路径平直度、安装便利性等软约束则可借助罚函数进行惩罚调整。净距小于150mm时罚值设定为100, 路径长度超标10%时罚值设定为50, 通过这种方式实现算法的自适应收敛, 电气管线布置优化指标如表1所示。

表1 电气管线布置优化指标示例

指标类别	参数名称	数值范围/要求	权重系数
几何约束	路径长度 L	$\leq 120\text{m}$	0.3
几何约束	弯曲半径 R	$\geq 6 \times \text{电缆直径}$	硬约束
功能约束	负荷容量 Q	$\leq 400\text{kVA/回路}$	0.2
经济约束	材料成本 N	单位长度 $\leq 350\text{元}$	0.3
安全约束	净空距离 D	$\geq 150\text{mm}$	硬约束
综合优化	冲突次数 C	$\leq 5\text{次}/100\text{m}$	0.2

三、智能化布置算法实现机制

1. 管线路径生成与冲突检测

复杂空间里, 管线路径的生成需要在效率和精度之间找到平衡, 依托搜索算法的候选路径生成机制, 能通过对三维空间数据进行离散化, 快速确定起点与终点间的可行路径集, 系统先在体素化空间中检索可通行区域, 结合BIM模型的几何约束筛选出初步路径, 建筑机电井内, 候选路径数量一般可控制在5~10条之间, 方便后续优化, 这种候选路径生成既保证了多样性, 又能为后续优化算法提供良好的初始解, 提高计算收敛速度。

多类管线同时布置时, 动态冲突检测机制十分关键, 通过实时扫描路径节点与空间体素的重叠情况, 能识别电气管线与风管、水管的潜在干涉, 桥架中心线与风管边界的净距小于150mm时, 系统自动标记为冲突点, 冲突检测还需结合运行安全要求, 高压电缆与弱电光纤之间应保持不小于300mm的间距, 防止电磁干扰, 这种基于多维度的检测方式, 能在布置初期提前发现隐患, 避免施工后返工。

2. 优化迭代与智能调度

初步路径生成与冲突检测完成后, 需进一步通过优化迭代实现全局方案的提升, 依托进化计算的优化方法能在大规模路径集合中不断筛选和改良, 逐步提高布置方案的整体质量, 经过多轮迭代, 最终输出的路径不仅满足几何和功能约束, 还能在成本、长度和施工便利性

方面保持平衡，100条候选路径中，系统可在5~8轮迭代后将有效方案收敛至10条以内，且其平均冲突率降低至2%以下，多层次权重调节机制是实现动态优化的关键。

不同工程阶段对优化目标的侧重点存在差异：设计阶段更注重空间利用率、净空达标率及冲突率控制；施工阶段则更强调工期压缩与材料成本降低，引入动态权重系数后，系统可在不同目标之间自动调整优先级，施工进度延误超过10%时，算法会自动提升工期目标的权重至0.5以上，优先输出更利于施工周期控制的方案，这种灵活性保证了布置方案能随工程阶段演变而自适应优化，智能调度与实时反馈机制借助仿真平台实现。

四、研究成果与学术价值

1. 算法性能与适用性分析

智能化布置算法在运算效率方面展现出较强适配性，借助空间体素化与候选路径筛选机制，管线路径生成的平均时间能控制在3~5秒/回路，比人工布置时间缩短约80%，大型公共建筑中，管线路径数量可达数百条，采用并行计算框架时，整体布置效率仍能维持在可接受范围，显示算法在大规模空间环境中具备良好适应性，算法的稳定性与布置质量通过多维度指标评价，常用指标包含路径平均长度、冲突率和净空达标率。

模拟实验里，路径长度控制在最优解的±5%范围内，冲突率低于3%，净空达标率达到95%以上，这些结果说明算法在不同建筑模型下都能保持较高可靠性与一致性，避免了传统人工设计因设计者水平差异引发的质量波动，可扩展性上，该算法不只适用于普通住宅与办公楼，还能推广到医院、数据中心、机场等高复杂度建筑场景。

电气系统规模扩展至数千米管线路径时，算法依旧能通过分区优化与分层调度实现有效布置，数据中心的高压供电与弱电综合布线中，系统可依据不同电压等级与屏蔽要求自动分区，显著减少人工干预。

2. 理论意义与工程参考价值

研究成果在理论层面促进了电气管线布置模式的转型，传统方法依靠设计经验与规范手册，难以形成定量化决策依据，智能化算法则通过数学建模与优化迭代，

将管线布置过程转变为数据驱动与算法驱动的求解过程，拓展了建筑机电布置的理论边界。

工程应用层面，该算法为智能建造与数字孪生提供了关键技术支撑，通过与BIM平台的无缝对接，能将设计方案与施工阶段的实时数据相结合，实现虚拟空间与物理施工的联动，未来与物联网监测系统结合，还可实现管线路径状态的动态更新与运维预测，提升建筑全生命周期的管理水平，研究对建筑机电系统的标准化、信息化与智能化发展具有显著借鉴意义。

智能化布置算法不仅能提高设计的可复制性，还能为行业制定统一的评价指标提供理论依据，以冲突率低于5%、净空率高于90%作为标准化指标，可为后续行业规范的修订提供数据支撑，这一成果为机电工程数字化转型奠定了方法论基础，具有较大的推广潜力。

结束语

复杂空间电气管线的布置是建筑机电系统设计中的重点与难点，智能化算法框架在空间建模、路径优化与冲突检测等方面表现出较高效率与稳定性，有效提高了设计质量与资源利用率，研究成果既拓展了智能化布置的理论基础，也为工程应用提供了可操作的技术路径，未来与人工智能及数字孪生相结合，能够进一步推动管线设计向自动化、智能化发展，为智慧建筑建设提供有力支撑。

参考文献

- [1] 蓝新刚.高层建筑机电安装工程施工技术优化与应用[J].产业创新研究, 2024 (24): 130-132.
- [2] 祁政.基于BIM技术的建筑工程大型机电安装施工技术研究[J].智慧城市, 2025, 11 (02): 146-148.
- [3] 薛景隆.建筑机电安装工程施工技术及质量控制研究[J].产业创新研究, 2024 (24): 109-111.
- [4] 唐新财.建筑工程中机电设备安装工程施工中技术与质量管理[J].居业, 2024 (11): 190-192.
- [5] 郭玉鹏.建筑工程机电安装工程施工技术应用研究[J].科学技术创新, 2025 (07): 185-188.