

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—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 ≤ 350 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 $\pm 5\%$ 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,还能作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].智能城市,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.