

基于机器学习的电缆自适应敷设技术研究

张华 李菲 张力 杨晓雷

山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013

摘要：随着业主对热控仪表布置安装及热控电缆布线设计深度需求不断的增加，如何实现热控专业设备的准确定位、热控电缆布线合理和有效的控制施工材料的要求越来越迫切。热控电缆布线涉及需要布线的控制仪表比较分散，专业配合多，工作量大，工作繁杂，纯粹人工的方法解决上述问题，会耗费大量的时间和精力，即使如此，布线的效果也不尽人意。因此，如何是设计人员从繁杂的电缆布线的整理工作中解脱出来，成为目前需要亟待解决的问题。

关键词：电缆敷设；机器学习；自适应；优化算法

1. 前言

在火力发电厂建设中，电缆敷设作为电力传输与信号传递的关键环节，其设计与实施的质量直接影响到整个系统的稳定性、可靠性与经济性。传统的手工电缆敷设方式，主要依赖人工经验进行路径规划与设计，在面对日益复杂的工程环境与大规模的电缆敷设需求时，暴露出诸多弊端。手工设计不仅效率低下，难以满足工程进度要求，而且容易出现人为误差，导致电缆路径不合理，增加材料成本与施工难度，甚至可能引发安全隐患。

针对这些问题，本研究致力于开发一种基于机器学习的电缆自适应敷设技术，旨在利用先进的智能算法与信息技术，实现电缆敷设的自动化、智能化与最优化。通过集成国际公认的优化算法，如 Dijkstra 算法、A* 算法等，结合自主研发的空间索引机制，本技术能够对海量的电缆数据进行高效处理与分析，快速生成满足多种工程约束条件的电缆敷设方案。同时，借助二维与三维可视化视图技术，设计人员可以直观地对电缆敷设方案进行评估与调整，充分考虑工艺设备布置、管道走向等复杂环境因素，确保最终方案的可行性与最优性。最终生成满足工程实际需要的成品，取代现有的手工实现电缆敷设的状况，大大减少热控电缆布线的工作量，提高图纸的设计质量，缩短设计周期，降低工程造价。

2. 电缆自适应敷设技术路线

基于机器学习的电缆自适应敷设技术构建了一个数据驱动的全流程规划框架，涵盖输入层、处理层和输出层三个关键部分，实现了从原始数据采集到最终施工方案生成的高效转化。

1) 输入层：系统首先读取工艺设备布置图，通过先进的图像识别与数据提取技术，精确获取受控设备的坐标信息。这些坐标数据不仅确定了设备在物理空间中的位置，还为后续电缆路径规划提供了关键的起点和终点参考。同时，系统读取电缆清册，其中包含了详细的逻辑连接关系，明确了不同设备之间的电缆连接需求，为构建完整的电缆敷设网络奠定了基础。通过对这些初始数据的整合，系统构建了一个包含设备位置与连接关系的初始数据模型，为后续的处理过程提供了全面而准确的数据支持。

2) 处理层：在处理层，自主研发的数据库连接池发挥了核心作用。它能够高效地管理和调度数据，确保在不同布线规则组合下，系统能够快速响应并进行优化布线。布线规则涵盖了电缆敷设过程中的各种约束条件，如电缆的最小弯曲半径约束，确保电缆在敷设过程中不会因过度弯曲而损坏；电磁屏蔽要求，保证不同类型的电缆之间不会产生电磁干扰，从而影响信号传输质量。系统调用各种优化算法，如 Dijkstra 算法、A* 算法等，根据这些布线规则对电缆路径进行精确规划。在规划过程中，算法会综合考虑路径长度、施工难度、成本等因素，生成最优的电缆路径。同时，系统还会生成设备连接表，详细记录每个设备与电缆的连接关系；断面汇总表，统计不同断面处电缆的分布情况，为施工过程中的材料采购与资源分配提供依据。

3) 输出层：在 AUTOCAD 环境中，系统实现了设备、桥架、保护管等图形元素与属性数据的深度融合。设计人员可以通过直观的图形界面，实时查询和修改电缆敷设方案的各种属性信息，如电缆的型号、规格、敷设路径等。通过与 PDMS

系统的无缝对接，系统能够将电缆敷设方案转化为三维可视化模型，实现热控电缆布线的可视化施工模拟。在模拟过程中，施工人员可以提前预览电缆敷设的实际效果，发现潜在的问题，如电缆与其他设备或管道的碰撞、桥架空间不足等，并及时进行调整，从而大大提高了施工的准确性和效率^[1]。

3. 核心基础算法：Dijkstra 算法的工程化应用

在电缆自适应敷设技术中，Dijkstra 算法作为路径优化的核心基础算法，其核心原理基于贪心策略，通过构建加权无向图模型，有效解决了从电缆起点到终点的最短路径规划问题。

Dijkstra 算法本质是通过“贪心策略”逐步筛选出从单个起点到图中所有其他节点的最短路径，核心逻辑如下：

图模型抽象：将待敷设区域的物理空间（如桥架、隧道）

抽象为加权无向图 $G=(V, E)$ ：

节点 V ：代表物理空间中的关键位置（如桥架的转折点、电缆井）。

边 E ：代表两个节点之间可敷设电缆的路径（如两段桥架之间的通道、隧道内的直线段）。

权重 W ：每条边的“成本值”，需结合电缆敷设的实际约束量化。

贪心迭代逻辑：

初始化：设定起点 S 的距离为 0，其他所有节点的距离为“无穷大”（表示暂未可达），并维护一个“未访问节点集”。

迭代筛选：每次从“未访问节点集”中选择当前距离起点最近的节点 U ，标记为“已访问”；

路径松弛：遍历节点 U 的所有邻接节点 V ，计算“起点 $\rightarrow U \rightarrow V$ ”的路径成本（起点到 U 的距离 + U 到 V 的边权重），若该成本小于“起点 $\rightarrow V$ ”的当前记录距离，则更新 V 的距离（即“松弛”操作）。

终止：当“未访问节点集”为空，或目标节点（如电缆终端设备）被标记为“已访问”时，算法终止，此时起点到目标节点的距离即为“最短路径成本”，回溯路径即可得到具体敷设路线。

4. 多场景适配算法体系

在电缆自适应敷设技术中，路径规划、动态调整、多目标优化等需求并非单一算法可完全覆盖。除 Dijkstra 算法外，需根据场景特点（如动态环境、多约束、多目标、多路径协同）选择适配算法，围绕“工程约束满足”“实时性”“全

局最优”三大目标。以下分类介绍关键算法及其场景适配，结合电缆敷设的工程需求说明核心逻辑与改造方向：

1)单源最短路径优化: 比 Dijkstra 更高效的“启发式算法”

这类算法在“单起点 \rightarrow 单终点”的路径规划中，通过引入启发函数或简化逻辑，比 Dijkstra 更高效，尤其适合大型场景（如城市管廊、跨厂区电缆敷设）。

A * 算法 (A-Star Algorithm)

核心原理：

在 Dijkstra 贪心筛选最近节点”的基础上，增加启发函数 $h(n)$ （预估节点 n 到终点的“代价下界”），总评估函数为 $f(n) = g(n) + h(n)$ ，其中：

$g(n)$ ：起点到节点 n 的实际成本（与 Dijkstra 的“距离”一致）；

$h(n)$ ：节点 n 到终点的预估成本（需满足“非过估计”，即 $h(n) \leq$ 实际成本，确保算法最优性）。

场景适配：

电缆敷设中， $h(n)$ 可结合物理空间特性设计，例如：

若桥架为“网格状”（如数据中心机房）， $h(n)$ 采用曼哈顿距离 ($|x_n - x_{end}| + |y_n - y_{end}|$)，适配直角转弯的桥架约束；

若为户外架空电缆， $h(n)$ 采用欧氏距离 ($\sqrt{[(x_n - x_{end})^2 + (y_n - y_{end})^2]}$)，贴合直线敷设需求。

优势与改造：

效率比 Dijkstra 高 30%–50%（减少无效节点遍历），尤其适合三维空间路径规划（如垂直桥架 + 水平桥架的立体路由）。改造点：在 $h(n)$ 中加入“合规性惩罚项”，例如若节点 n 附近有高压管线， $h(n)$ 额外增加 0.5–1.0，引导路径避开风险区域。

2)多源 / 多路径规划：解决“多条电缆协同敷设”问题

电缆敷设常需同时规划多条电缆（如同一机房的动力电缆、控制电缆、信号电缆），需避免路径冲突（如桥架容量超限、电磁干扰），此时需多路径优化算法。

a) K – 最短路径算法 (K-Shortest Paths Algorithm)

核心原理：求解从起点到终点的前 K 条最优路径（ K 为预设值，如 3–5 条），避免单一路径因突发障碍（如施工中发现桥架损坏）失效，核心思路是“基于最短路径迭代生成次优路径”（如 Yen 算法、Eppstein 算法）。

场景适配：

电缆敷设中，K – 最短路径用于“路径备份”和“多电缆分流”：

路径备份：规划主路径(第1优)和2条备用路径(第2、3优)，若主路径因障碍物无法施工，直接切换至备用路径，无需重新计算；

多电缆分流：多条电缆需从同一起点(如配电柜)敷设至不同终点(如设备群)，通过K – 最短路径分配不同路径，避免多条电缆挤入同一桥架(容量超限)。

改造要点：

在路径筛选中加入“互斥约束”——若两条路径共享某段桥架，且该桥架剩余容量<两条电缆截面积之和，则剔除其中一条路径；例如，Yen 算法生成次优路径时，优先避开已被占用的高容量负荷桥架。

b) 多路径协同优化算法(基于图着色理论)

核心原理：将多条电缆视为“图中的节点”，电缆间的冲突(如共享桥架、电磁干扰)视为“边”，通过“图着色”为不同电缆分配“无冲突路径”(同一颜色的电缆无冲突)。

场景适配：

针对“强电磁干扰约束”的场景(如高压动力电缆与信号电缆需保持 $\geq 100\text{mm}$ 间距)：

第一步：将动力电缆、信号电缆分为两类“节点”，两类节点间存在“冲突边”(需保持间距)；

第二步：通过图着色算法(如贪心着色法)为两类电缆分配不同“路径色”，确保同色路径无冲突(如动力电缆走上层桥架，信号电缆走下层桥架)。

优势：

直接解决“多电缆冲突”问题，比单纯的K-最短路径更贴合“协同敷设”需求，尤其适合高密度电缆场景(如数据中心机柜间布线)。

5. 基于机器学习的软件开发与实现

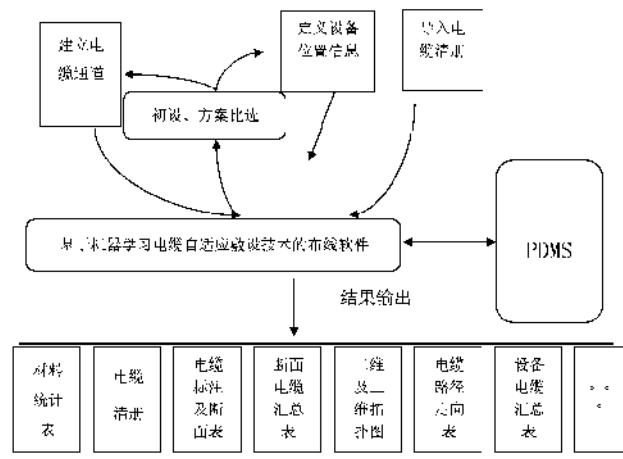
本软件开发基于Windows平台，充分利用AutoCAD强大的图形处理能力，通过二次开发实现与电缆自适应敷设技术的深度融合。在开发过程中，集成了自主研发的表格生成组件，该组件具有独特的无限嵌套表格功能，能够满足电缆敷设工程中复杂报表的生成需求。同时，引入多线程数据处理模块，有效提升了大数据量处理时的系统性能，确保在处

理海量设备与桥架数据时，软件能够保持流畅运行，不会出现卡顿或响应迟缓的情况^[2]。

采用最优设计流程，即结合电厂热控专业的布线特点，通过读取电缆清册的逻辑信息，根据平面设备布置及路径信息，自动进行电缆优化敷设。软件将设备平面布置图与敷设数据库相结合，所有设计信息如受控设备和仪表测点等空间位置均能从已有设计结果中自动提取，无需手工输入。

能够根据不同的敷设规则组合进行优化敷设，电缆长度统计精确，在综合考虑各种余量的基础上进行汇总，节约了成本，避免浪费。快速生成所有电缆敷设设计成品：电缆桥架布置图，电缆路径走向图，电缆敷设图，电缆清册，电缆路径走向表，设备电缆汇总表，断面电缆汇总表，设计深度满足工程施工要求^[3]。

软件数据流图



6. 结论

本研究成功构建了一套完整的基于机器学习的电缆自适应敷设技术体系，涵盖了从数据建模、算法优化、软件开发到工程验证的全流程创新。通过将机器学习技术与传统优化算法深度融合，有效解决了复杂工程环境下电缆敷设路径规划的难题，实现了电缆敷设的智能化、自动化与最优化。在算法层面，深入研究了Dijkstra算法、A算法、K-最短路径算法、图着色算法、D Lite算法、强化学习算法等多种经典算法在电缆敷设场景中的应用，通过对这些算法的改进与适配，使其能够充分考虑电缆敷设过程中的各种工程约束条件，如施工难度、合规风险、桥架容量、电磁干扰等，从而生成更加符合实际工程需求的电缆敷设方案。在软件开发方面，基于Windows平台和AutoCAD环境，开发了具有自主知识产权的电缆自适应敷设软件，实现了二维平面与三维立

体双视图的可视化设计、智能报表生成、数据高效存储与检索等核心功能，大大提高了电缆敷设设计的效率和质量。通过在百万千瓦级火电厂、燃机联合循环项目中的实际应用，验证了本技术在缩短设计周期、降低成本、提高施工质量等方面的优势，为电缆敷设领域的技术升级和工程实践提供了重要的理论支持和实践经验。

参考文献：

- [1] 陈志强, 王海军, 马建伦. SDEPCI 电厂热控电缆数字化布线 [J]. 中国仪器仪表, 2021, 7:50–54.
- [2] 董宇, 白歌乐, 曹晓宇. 三维电缆敷设软件的开发与应用 [J]. 内蒙古电力技术, 2008, 26(2):39–42.

[3] 长缆电工科技股份有限公司. 电缆自适应敷设系统及方法 :CN202311167451.X[P]. 2024-04-19.

作者简介：

姓名: 张华
出生年月: 1982.07.06
性别: 男
民族: 汉
籍贯: 山东济南
学历: 本科学士
职称: 高级工程师
工作领域: 仪表与控制