DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0180-05

10 kV配电网带电作业机器人进入等电位的路径规划方法

张自勤[1]，庞 峰[2]，陈 睿[1]，王 腾[1]，杨 韩[1]

（1.云南电网有限责任公司德宏供电局，云南 芒市 678400；
2.云南电网有限责任公司输电分公司，云南 昆明 650000）

摘 要：为提高配电网作业机器人工作效率和安全性，提出一种10 kV配电网带电作业机器人进入等电位的路径规划方法。基于进出等电位分析配电网廊道及环境，建立线性函数描述配电网拓扑结构，利用二进制变量明确线路连通状态，设定路径规划约束条件。利用遗传算法完成路径节点分配，定位路径初始节点，在随机函数计算下实现种群初始化，多目标函数根据机器人实际行走路径完成适应度计算，并优化路径平滑度，最终完成带电作业机器人的安全路径规划。实验证明，所提方法的路径规划结果最短，机器人与障碍物之间保持了一定距离，路径平滑，鲁棒性较好。

关键词：带电作业；检修机器人；等电位；路径规划；环境建模；配电网

中图分类号：TP183；TP242 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)06−0180−05

Path Planning Method of Live Working Robot Entering Equipotential in 10 kV Distribution Network

ZHANG Zi-qin[1], PANG Feng[2], CHEN Rui[1], WANG Teng[1], YANG Han[1]

(1. Dehong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Mangshi 678400, China;
2. Transmission Branch of Yunnan Electric Power Company, CSG, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to improve the working efficiency and safety of the working robot in the distribution network, a path planning method for the live working robot in the 10kV distribution network to enter the equipotential is proposed. Based on the in and out equipotential analysis of the distribution network corridor and environment, a linear function is established to describe the topology of the distribution network. Binary variables are used to determine the connection state of the lines and set the constraint conditions for path planning. The genetic algorithm is used to complete the path node assignment, locate the initial node of the path, and realize the population initialization under the calculation of random functions. The multi-objective function completes the fitness calculation according to the actual walking path of the robot, and optimizes the path smoothness to finally complete the safe path planning of the live working robot. Experiments show that the proposed method has the shortest path planning result, maintains a certain distance between the robot and the obstacle, and has smooth path and good robustness.

Keywords: live working; maintenance robot; equipotential; path planning; environment modeling; distribution network

0 引言

配电网作为电力输送的重要环节，其中包含了大量的电力设备和线路，电力作为人类社会主要生活生产能源，其用量相当之庞大，这也就给电力系统造成了一定的负担，长时间高负荷的作业，会导致相关设备及线路出现故障，但若停电检修将会对人民生活和生产造成很大影响，因此，机器人带电作业应运而生，经过逐年发展技术已经非常完善，机器人带电作业是在不停电的基础上完成电力设备及线路的检修，减少停电状态下的经济损耗。

但是受到绝缘子带电检测技术、地理环境等很多因素的限制，传统的带电作业相对繁琐，工作强度大且具有一定的风险，为保证带电作业机器人进入等电位时的安全状态，不仅对其绝缘状态要求较高，更重要的是机器人行走的路径规划，需要尽量避免机器人与电力设备及线路的碰撞。针对路径规划方案，李靖等[1]通过对真实环境建模，凭借灰狼优化算法计算全局任务搜索，丰富初始化种群，控制参数完成路径调整策略，在平均权重状态下实现最终的路径规划。但该方法需要的计算任务量较大，无法在固定的迭代次数内得出最优解；汪四新等[2]基于全局安全问题，结合人工势场法引力思想建立路径中心虚拟目标点，考虑机器人运动状态下的全向性特点，加入适当的权值函数，在提高算法收敛性的同时选择最优路径。但得出的路径未能经过平滑处理，因此机器人的行

*基金项目：云南省电网科技项目（YNKJXM20210123）

收稿日期：2024-01-18

走路线相对不稳定；Liu Z等[3]提出了一种反向分割和局部插值的方法，以去除机器人冗余路径节点并优化运动轨迹。在MATLAB机器人工具箱中模拟了架空配电线路带电作业机器人的工作场景，实验证明所提出的方法可以获取最优路径，但该方法的计算过程较复杂。

所提方法首先分析带电作业机器人在进出等电位时的相关条件，分析配电网廊道环境及机器人检测环境，根据配电网环境条件考虑机器人的带电作业安全约束，完成最终的路径规划和优化。经模拟实验表明，所提方法规划路径短，令机器人与障碍物间保持一定距离，且路径相对平滑，避免了机器人在带电作业过程中与电力设备及线路发生碰撞的可能，提高带电作业安全性。

1 机器人进出等电位的配电网廊道辐射情况分析

配电网带电作业机器人进出等电位的关键，是需要防止带电体对机器人放电造成机器人损坏，并且保证带电作业机器人与配电网带电体之间保持足够的绝缘强度，还需要使带电机器人与带电体之间处于相同电位，根据带电机器人自身电位，共可分为地电位法、中间电位法和等电位法，前两种电位法主要是保证机器人和带电体之间，能够维持足够的安全距离和一定程度的绝缘间隙，而等电位法主要是为了使二者时间处于统一电位。

分析等电位进出条件后，针对配电网电力；廊道的特点进行对应分析，配电网电力走廊受城市土地资源紧缺的约束，多数电缆的铺设都是多供电回路同沟状态，此种状态下同一条供电走廊承载了多个供电走线，结构更加精简。

配电网线路在进行敷设的过程中，需要电力廊道提供足够的空间，并且在满足负荷需求的情况下，完成配电网网架规划，设计时允许配电网的电力廊道存在冗余，且需要满足辐射约束匹配条件[4]。

在考虑配电网布局规划的情况下，从实际地理约束条件出发，通过对配电网地理信息的可视化处理，调研分析配电网内的建设廊道，并完成相关道路编号处理，利用$R_k(k=1,2,\cdots,n)$表示配电网各个廊道信息，确定廊道具体的建设情况，假设廊道总数为n，配电网实行规划阶段的待选廊道集合表示为J_c，其满足条件为：

$$J_c=\{R_1,R_2,\cdots,R_k,\cdots,R_n\} \tag{1}$$

为了描述出配电网廊道的实际情况，通过二进制变量[5]M_k进行对应状态描述：

$$M_k=\begin{cases}1 & \text{建设廊道}\\ 0 & \text{不建设廊道}\end{cases} \tag{2}$$

配电网的拓扑结构中，包含电源式和负荷式两种不同的节点结构，通常情况下，负荷节点的供电路径选择更为广泛，而在分布式系统中，每一个负载节点只能有一个固定的电源通路，此时可以通过供电路径集合完成对拓扑结构的描述，在支路概念基础上，建立了线性函数公式，用于描述辐射状态的配电网拓扑结构，通过设定负荷节点i中包含的电源节点对应路径，将所有符合条件的路径集合通过$II_{i,L}$表示：

$$II_{i,L}=\{P_{i,1},P_{i,2},\cdots,P_{i,k},\cdots,P_{i,L}\} \tag{3}$$

式中，$P_{i,k}$表示第i个负荷节点在供电路径k上。

配电网在设计时需要考虑闭环状态，但在运行时则要符合开环特点，运行过程中，路径集合$II_{i,L}$中包含的所有路径只有一条具备连通属性，在二进制变量$W_{i,k}$的基础上对$P_{i,k}$进行对应的状态描述：

$$W_{i,k}=\begin{cases}1 & P_{i,k}\text{连通}\\ 0 & P_{i,k}\text{不连通}\end{cases} \tag{4}$$

针对配电网的线路辐射运行情况进行相应的约束：

(1) 随机负荷节点i所处的路径所在的集合中，只存在一条对应通路：

$$\sum_{P_{i,k}\in II_{i,L}} W_{i,k}=1\,\forall_i \tag{5}$$

(2) 假设$P_{i,k}$属于连通状态，证明此时归属于$P_{i,k}$的任意路径$P_{d,h}$也属于连通状态[6]：

$$W_{i,k}\le W_{d,h}\ \forall P_{d,h}\subset P_{i,k} \tag{6}$$

为了方便研究机器人带电作业过程中配电网移动约束问题，针对配电网运行状态以及多阶段的规划行为进行深度探讨，根据配电廊道的开合状态，确定路径集合条件：

$$II_{m,s}=\{\text{从电源}m\text{出发的所有路径}\} \tag{7}$$

$$II_{j,B}=\{\text{经过廊道}j\text{的所有路径}\} \tag{8}$$

式中，$II_{m,s}$表示配电网中的电源容量约束，$II_{j,B}$表示配电网廊道中馈线的载流量约束，同时可以计算并描述出约束条件下的节点电压和运行成本的约束条件。

2 考虑带电作业安全性的10 kV配电网环境建模

配电网检修机器人带电作业的安全路径规划要求基于后台任务，系统可以自动设定最佳维修路线，从而确保作业机器人能够在最短的时间内，完成分配的维修工作。

机器人在配电网内执行带电维修任务时，在带电状态下查找安全路径这一环节非常重要，使用笛卡尔坐标系处理这一问题会更简单，算法将路径规划问题变成了空间路径搜索，通过求解多条路径的最小路径，使之能得到最优的路径方案，将作业中各种带电维修作业的最短路径设定为一个集合，寻找维修机器人在配电网中进入

等电位带电作业的路径最优解[7]。

在路径搜寻过程中，真实环境会更加复杂，会对机器人行进结果产生很大的影响，所以，规划机器人带电作业安全路径时，必须要根据配电站内的实际状况，对规划路线进行优化和修改，提高机器人带电作业的运行效率和安全性。

在研究配电网机器人带电作业安全路径规划问题时，环境建模需考虑到全局因素，建模的好坏直接影响到机器人路径规划速度和质量，通过直角坐标系建立场景坐标，在几何建模中提出假设，首先假设配电网带电作业机器人的移动空间为二维，其次，假定机器人为粒子，其相应的几何尺寸可以被忽略，并且将配电网内的相关障碍物假设成规则的凸状多边形，此时可形成对照实际的路径点集[8]。

通过实数对路径种群和个体进行对应的初始化编码，为了提高路径规划求解的精度，对于路径的初始化，首先利用遗传算法进行路径节点的随机分配，实现初始节点的定位，过程如下：

(1) 利用随机函数计算初始化种群的染色体长度，将其长度范围设定在 $C\in[2,M]$，2 和 M 分别表示染色体的最小和最大长度；

(2) 通过随机函数生成对应的节点，总数为 $C-2$ 个，主要位置分布在种群的首末节点之间。

此时生成的初始化路径可行性是未知的，后续可凭借机器人带电作业的适应度来实现优化。

根据配电网机器人带电作业的实际需要，计算多目标函数下适应度值，其不仅要满足路径最短化，还要考虑机器人的运动物理局限等问题，保证最终的规划路径具备较好的平滑度，并在现实规划路线应用中，必须确保机器人与障碍物的安全距离，利用适应度这一指标区分规划路径的可行性：

$$f_f(p)=w_d\cdot d(p)+w_s\cdot s(p)+w_c\cdot c(p) \tag{9}$$

$$f_u(p_k)=u(p_k)+\mu(p_k)+\max_{p_j\in F} f_f(p_j) \tag{10}$$

其中，式(9)表示的是可行路径所对应的适应度函数，式中：

$$d(p)=\sum_{i=1}^{n-1} d(n_i,n_{i+1}) \tag{11}$$

计算可行路径的实际长度。

$$s(p)=\sum_{i=2}^{n=1} e^{a(\theta_i-\alpha)} \tag{12}$$

式中，表示函数计算中的平滑系数[9]，θ 为路径 p 中包含的转角，α 表示最终规划路径的期望平滑度。$\mu(p_k)$ 表示的是可行路径的实际应用可靠性和可靠距离，g_i 表示第 i 个负荷节点上机器人与障碍物之间的最短距离，τ 表示机器人带电作业时与障碍物间的理想间隔距离。w_s、w_d、w_c 表示可行路径适应度函数中的三个优化目标权重[10]。

式(10)表示的是不可行路径适应度函数，式中：$u(p_k)$ 为规划路径与障碍物间存在的交叉点数量，$\eta(p_k)$ 为不可行路段和障碍物之间存在的交叉点数量。$\max_{p_j\in F} f_f(p_j)$ 为可行路径对应的最大适应度，F 表示可行路径的数量集合，$f_f(p_j)$ 表述路径 p 的可行性适应度。基于对所有规划出来的可行路径进行适应度评估，可有效地减少路径规划耗时。

3 带电作业机器人进入等电位的路径规划方法

基于笛卡尔坐标系得到的最佳路线属于两个坐标点的最小间距，一方面提高带电作业机器人的工作效率，另一方面减小机器人的碰撞概率，通过对每个最短距离路径的查找和整理，形成对应的路径集合，对路径集合中相关的参数和平滑度进行优化选择，筛选符合机器人关节角度和安全边缘距离的路径集合，形成一组可到达的目标点路径[11]。但是直接输出会导致线路过于死板，不仅无法应对突发情况，还浪费机器人作业时间。为此利用遗传算法进行优化，将机器人看作是质点，但机器人本身是有体积的，当机器人经过路径拐点时，机器人自身会发生内切圆弧运动，这一过程会缩小机器人与障碍物间的安全距离，为保证机器人的安全行动，需要对算法进行相应改进。

通过分析位姿空间法的计算原理，考虑带电作业机器人的体积大小和姿势，在一定程度上扩大配电网中障碍物的体积，这样一来就符合机器人作为质点的假设，简化问题[12]。

将障碍物体积扩大之后会导致路径的搜索和规划范围相对变小，这时路径搜寻失败，所以在实际的路线规划中，障碍物的扩大范围只能是相对的，需要经过参数进行适当调节。

为了扩大带电作业机器人的移动路径选择，利用间隔度公式来计算二者之间的距离变化：

$$c(p)=\sum_{i=1}^{n-2} e^{a(g_i-\tau)} \tag{13}$$

计算结果表明，当机器人与障碍物间的距离越小时，规划路径的适应度也相对越小，路径的择优期望度越高，寿命间隔越小的情况下，规划出的最优路径中，机器人行走路线紧靠着障碍物，而经过优化修改后的间隔度计算公式为：

$$c(p)=\sum_{i=1}^{n-2} e^{a(\tau-g_i)} \tag{14}$$

此时式(14)的计算结果中，机器人和障碍物的间距越

小，规划出的路径适应度越大，对于路径的最优期望间隔来说越大越好，但是受到机器人对规划路径适应度的限制，二者的间距也不会过大。

在加大间距的各类考量中，针对性地加大间隔度加权系数e，并且保证平滑系数a能维持稳定，使规划路线最终呈现的结果适应带电作业机器人的实际行动力。

4 路径规划方法性能实验

当配电网中存在安全隐患的情况下，相关变电设备的工作危险性将会增大，配电网带电作业机器人在进行电力巡检工作过程中，往往会受到不同程度的损坏，所以，构建机器人的安全作业路径规划方法后，对方法进行仿真试验是有必要的，通过实验路线行走检查规划方法的有效性。实验中在计算机上对带电作业机器人所有可能遇到的问题进行仿真，并模拟电网带电运行时可能受到的影响。

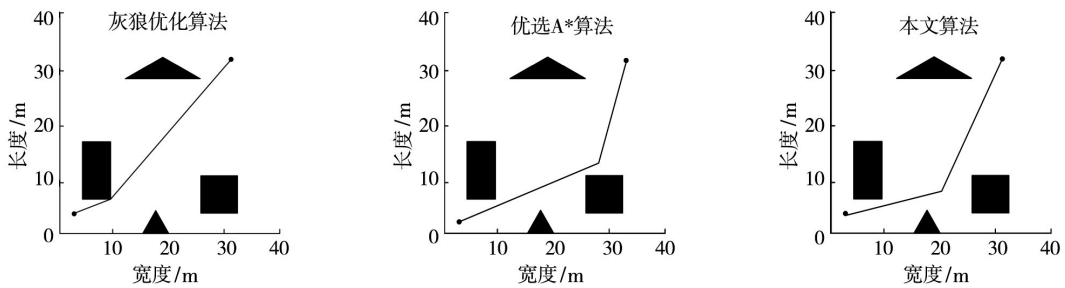
同时，在计算机中模拟设定配电网设备的固定电场，在实际的应力场中，由于带电作业机器人的加入，配电网设备电场也会发生一定程度的变化，这就要求进行模拟实验的时候，要考虑到这一点，多次对空气击穿场强的大小进行试验，判定带电作业机器人在规划好的作业路径中的安全性，双重确认规划路径的安全性。

在模拟实验中，分别在a、b、c三种不同环境下进行带电作业机器人的安全路径规划，在对障碍物进行适当扩大的基础上，结合扩大机器人的安全距离，实现安全路径的最优规划。

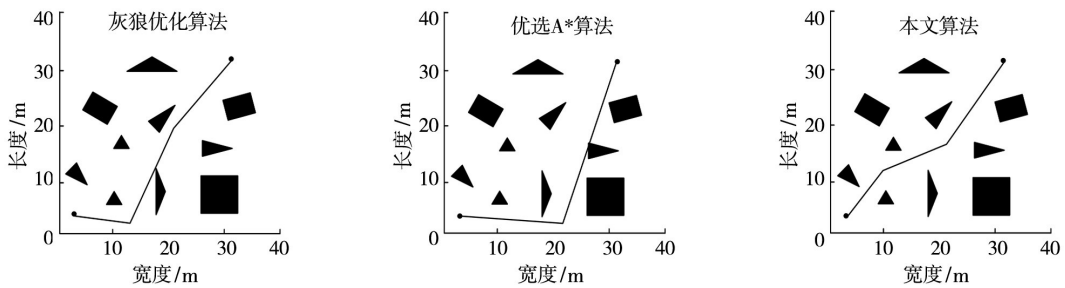
表1 地图环境信息及参数设置

地图序号	a	b	c
地图尺寸	40×40	40×40	40×40
OA/O	13.68%	13.05%	15.00%
起始位置	(3,3)	(3,3)	(5,22)
目标位置	(35,35)	(35,35)	(38,20)

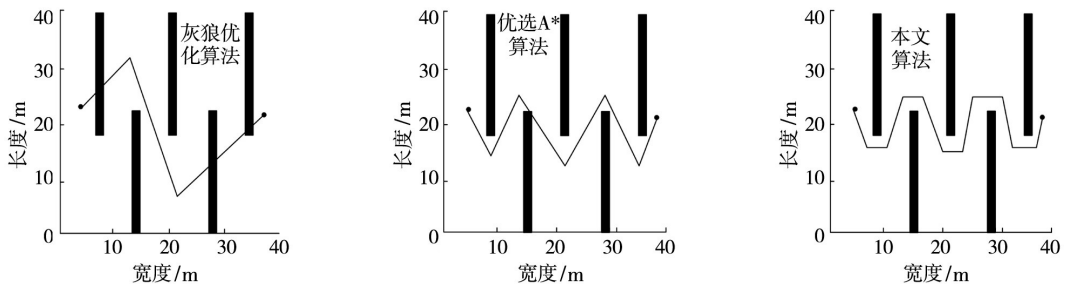
为了验证所提路径规划方法的正确性和有效性，在多种地图环境中进行路径规划测试，表1中给出对应的地图映射信息，包括地图大小、障碍物占空比、初始位置以及结束位置信息，其中OA/O代表全部障碍的面积占地



(a) 简单环境状态



(b) 复杂环境状态



(c) 转角次数多的环境状态

图1 不同迭代次数下的最优规划路径

图总面积的比例。

在电脑系统中利用混合编程技术完成对应的实验环境设定，遗传算法具备随机搜索的特征性，为了能得到最优规划路径，通过编程手段连续运行50次，并从中选出最优设定，得到相关参数值的具体设定。遗传算法的种群大小为20，初始交叉率和变异率分别为0.5和0.1，设定最大的运行迭代次数为60，期望间隔度和角度分别为2和45，在此基础上，分别通过灰狼优化算法、优选A*算法以及所提方法对不同环境地图下的机器人带电作业进行规划路径，结果如图1所示。

从图1中可以清晰看出，灰狼优化算法和优选A*算法得出的最优路径具有一定的局限性，障碍物与机器人之间的间隔较小，很容易发生碰撞。且从图1(c)中看出，灰狼优化算法的路径规划不完全合理，存在路径规划漏洞，而所提方法下机器人行走路径基本符合障碍物最大化和间隔最大化的要求，路径相对更平滑，没有发生碰撞的可能，路径安全可视为最优路径规划方案。

5 结束语

配电网是一个复杂的系统，对其内的电力设施稳定性要求很高，为保证配电网工作系统的安全稳定，电网带电作业机器人在运行过程中，需要实现高规格的带电保护和合理的路径规划，在分析带电作业和配电网基础环境的基础上，通过遗传算法完成对最优路径的规划，减少机器人碰撞，在最佳安全规划路径条件下作业，能使其更好地完成巡检及检修等相关作业，具有很高的实用价值，值得在变电站中推广使用。

参考文献：

[1] 李靖，杨帆.基于改进灰狼优化算法的区域监测机器人路径规划[J].科学技术与工程，2020，20(15)：6122-6129.

[2] 汪四新，谭功全，蒋沁，等.基于改进A～*算法的移动机器人路径规划[J].计算机仿真，2021，38(9)：386-389，404.

[3] Liu Z，Pan A，Jiang A，et al.Research on Motion Path Planning Method of Live Working Robot Manipulator Based on Reverse Splitting Calculation[C]//Journal of Physics：Conference Series.London：IOP Publishing，2022，2213(1)：012031.

[4] 李稳，顾苏，汪志刚，等.基于ToF技术的带电作业安全监测与预警系统[J].中国电力，2020，53(2)：63-68.

[5] 陶留海，孙超，李雪奎，等.±1 100 kV特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J].中国电机工程学报，2020，40(S1)：134-139.

[6] 董翔宇，季坤，朱俊，等.对特高压变电站巡检机器人路径规划改进蚁群算法的研究[J].电力系统保护与控制，2021，49(18)：154-160.

[7] 李艳生，万勇，张毅，等.基于人工蜂群-自适应遗传算法的仓储机器人路径规划[J].仪器仪表学报，2022，43(4)：282-290.

[8] 黎鹏，刘畅，李慧慧，等.高温对配电线路带电作业用绝缘毯沿面闪络特性的影响[J].电网技术，2021，45(12)：4971-4978.

[9] 闫冬，陈盛，彭国政，等.基于层次深度强化学习的带电作业机械臂控制技术[J].高电压技术，2020，46(2)：459-471.

[10] 魏博，杨茸，舒思豪，等.基于离子运动-人工蜂群算法的移动机器人路径规划[J].计算机应用，2021，41(2)：379-383.

[11] 龚正，涂福泉，李圣伟.基于改进狼群算法的焊接机器人路径规划[J].传感器与微系统，2022，41(12)：122-125.

[12] 李葳挺.变电站巡检机器人越障视觉伺服路径规划[J].自动化技术与应用，2024，43(6)：10-14.

作者简介：张自勤(1990—)，男，本科，工程师，研究方向：配网生产运行及配网不停电作业技术。

(上接第37页)

[4] Said D，Mouftah H T.A Novel Elctric Vehicles Charging/Discharging Management Protocol Based on Queuing-Model[J].IEEE Transactions on Intelligent Vehicles，2020，5(1)：100-111.

[5] 范晋衡，邱朝明，曲大鹏，等.基于集群电动汽车接入区域配电网电压的综合优化控制[J].机电工程技术，2022，51(3)：137-140.

[6] 颜勤，涂晓帆.新型电力系统下综合电动汽车充电站的优化运行[J].湖南大学学报(自然科学版)，2022，49(2)：176-182.

[7] Patwal R S，Narang N.Multi objective generation scheduling of integrated energy system using fuzzy based surrogate worth trade-off approach[J].Renewable Energy，2020(156)：864-882.

[8] 董燕，张明明，朱永胜，等.混合场景下考虑用户综合需求的电动汽车调度策略[J].中原工学院学报，2021，32(6)：14-20，29.

[9] 王鹤，余中枢，李筱婧，等.基于主成分分析方法的多类型电动汽车接入配电网的综合风险评估[J].电力自动化设备，2021，41(11)：57-65.

作者简介：程旭(1992—)，男，硕士，工程师，研究方向：综合能源系统优化。