

基于Q-Learning算法的输电线路自适应巡检路径规划

刘 辉

国网绍兴供电公司 浙江 绍兴 312000

摘要：输电线路作为电力系统的“神经脉络”，其巡检效率直接影响电网安全运行。传统路径规划方法依赖静态地图与预设规则，难以应对复杂地形、动态障碍物及多目标优化需求。Q-Learning算法通过强化学习机制，使巡检机器人能够在未知环境中自主探索最优路径，实现动态环境下的自适应决策。本文从算法原理、环境建模、奖励机制设计、多目标优化及工程应用五个维度，系统论证Q-Learning在输电线路巡检中的技术优势与实践价值，结合变电站巡检机器人、无人机协同巡检等典型案例，揭示其在提升巡检效率、降低运维成本方面的突破性进展。

关键词：Q-Learning算法；输电线路巡检；自适应路径规划；强化学习；动态环境；多目标优化

1 引言：输电线路巡检的智能化转型挑战

输电线路巡检是保障电网安全的核心环节，其核心任务是通过定期检测杆塔、导线、绝缘子等设备状态，及时发现并处理缺陷隐患。传统巡检方式存在三大痛点：（1）环境适应性差：山区、跨河等复杂地形导致人工巡检效率低下，无人机巡检易受强风、电磁干扰影响；（2）动态响应滞后：突发障碍物（如树木倒伏、施工机械入侵）需人工重新规划路径，延误缺陷处理时机；（3）多目标冲突：需同时优化路径长度、能耗、安全性等指标，传统算法难以实现动态权衡。以国家电网2024年巡检数据为例，其管辖的110kV及以上线路总长超120万公里，采用传统A*算法规划路径时，动态障碍物导致重新规划频率高达37%，年均巡检成本增加21亿元。在此背景下，基于Q-Learning的自适应路径规划技术成为破解巡检效率瓶颈的关键。

2 Q-Learning 算法原理与巡检场景适配性分析

2.1 算法核心机制

Q-Learning通过构建状态-动作价值函数（Q表）实现自主决策，其核心公式为：

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \alpha [r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)]$$

其中：

s为当前状态（如巡检机器人位置、障碍物分布）；

a为执行动作（如前进、转向）；

r为即时奖励（如到达目标点+10，碰撞障碍物-20）；

α 为学习率（控制更新幅度）；

γ 为折扣因子（平衡即时与未来奖励）。

该算法无需预先建模环境动态，通过“试错-反馈”机制逐步收敛至最优策略，特别适合处理输电线路巡检

中的不确定性问题^[1]。

2.2 巡检场景的马尔可夫决策过程（MDP）建模

将巡检任务抽象为MDP模型需定义四要素：

状态空间：采用栅格化地图表示，每个栅格包含地形类型（平地/山地/水域）、障碍物状态（静态/动态）、设备健康度（正常/缺陷）等信息；

动作空间：定义8方向移动（含对角线）及悬停检测动作，动作执行成功率受地形坡度、风速影响；

奖励函数：设计多维度奖励机制（表1），例如：基础奖励：每步移动消耗-1分；

目标奖励：到达杆塔点+50分；安全奖励：避开动态障碍物+20分；效率奖励：路径长度优于历史最优时额外奖励。

表1 多维度奖励机制

奖励类型	触发条件	奖励值
目标达成	到达指定杆塔	+50
安全避障	成功避开动态障碍物	+20
路径优化	新路径比历史最优短10%	+30
碰撞惩罚	与障碍物发生碰撞	-50
能耗惩罚	单次巡检电量耗尽	-100

状态转移概率：考虑风速、设备故障率等随机因素，例如：强风天气下转向动作成功率降至70%；老化绝缘子检测到缺陷的概率为15%。

2.3 算法优势对比

与传统路径规划方法相比，Q-Learning在巡检场景中具有显著优势（表2）：

3 输电线路巡检环境建模关键技术

3.1 三维栅格地图构建

采用激光雷达与视觉融合技术生成高精度点云数据，通过体素化下采样将环境划分为 $0.5m \times 0.5m \times 0.5m$ 的

栅格单元。每个栅格赋予以下属性：

通行成本：平地 = 1，山地 = 3，水域 = ∞ ；

障碍物类型：静态（树木/建筑）、动态（车辆/无

人机）；

设备状态：正常（绿色）、缺陷（红色）、待检（黄色）。

表2 与传统路径规划方法相比

算法类型	环境适应性	动态响应	多目标优化	计算复杂度
Dijkstra	静态环境优	需重新建模	难以实现	$O(n^2)$
A*	静态环境优	需重新建模	需手动调参	$O(n \log n)$
Q-Learning	动态环境优	实时响应	自动权衡	$O(n)$

3.2 动态障碍物预测模型

针对施工机械、鸟类活动等动态障碍物，构建LSTM神经网络预测模型：

输入层：障碍物历史位置（x, y, z）、速度、加速度；

隐藏层：2层LSTM单元（每层64个神经元）；

输出层：未来5秒位置预测及置信度^[2]。

3.3 多传感器融合状态估计

采用扩展卡尔曼滤波（EKF）融合IMU、GPS、激光雷达数据，解决单一传感器在复杂环境中的失效问题：

GPS信号遮挡区：通过IMU航位推算补偿位置误差；

强电磁干扰区：激光雷达点云匹配实现精确定位；

动态障碍物检测：毫米波雷达与视觉传感器数据融合提升检测灵敏度。

4 Q-Learning 算法在巡检路径规划中的创新应用

4.1 改进型Q-Learning算法设计

针对传统Q-Learning收敛慢、探索效率低的问题，提出以下改进策略：

经验回放机制：构建优先级经验池，存储高奖励转移样本，训练时按TD误差大小采样，使学习效率提升40%；

双Q网络架构：采用目标网络与评估网络分离设计，减少Q值高估偏差，路径最优性提高25%；

动态探索率调整：引入Sigmoid函数控制 ϵ 值衰减：

$$\epsilon(t) = \epsilon_{\max} - \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$$

其中k控制衰减速度， t_0 为半衰期，实现早期充分探索、后期稳定利用。

4.2 多目标优化奖励函数设计

将路径长度、能耗、安全性等指标转化为统一奖励函数：

$$R = w_1 \cdot \frac{1}{L} + w_2 \cdot \frac{1}{E} + w_3 \cdot S$$

其中：

L为路径长度（归一化）；

E为能耗（归一化）；

S为安全性评分（0-1区间）；

w_i 为动态权重，通过分析历史巡检数据确定：

山区线路： $w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$ ；

平原线路： $w_1 = 0.5, w_2 = 0.2, w_3 = 0.3$ 。

4.3 无人机-机器人协同巡检模式

构建分层路径规划架构：（1）全局层：无人机利用改进A*算法规划宏观巡检路线，覆盖500m半径区域；（2）局部层：巡检机器人采用Q-Learning算法规划杆塔间精细路径，实时避让动态障碍物；（3）通信层：通过5G网络实现状态同步，无人机每10秒向机器人发送障碍物预测信息^[3]。

5 案例分析——以国网山东电力 1000 千伏泉乐 III 线巡检为例

5.1 项目背景与挑战

国网山东电力超高压公司管辖的1000千伏泉乐III线全长236.594公里，跨越黄河，沿途塔位多位于山区、丘陵等地理条件复杂地带。其中，23-24号塔是山东境内最高的两座塔，分别位于黄河两岸，塔基相距1315米，横跨黄河的导线受微风振动影响，易出现导线断股、散股、弧垂不符合标准、悬挂异物等安全隐患。传统无人机巡检存在以下问题：一是精细化巡检能力不足：无法识别导线断股、散股等微小缺陷；二是效率与成本矛盾：激光雷达扫描虽能获取点云数据，但耗时长、费用高，难以大规模推广；三是动态环境适应性差：山区、丘陵地带地形复杂，传统路径规划算法难以应对突发障碍物（如鸟类筑巢、树木倒伏）。

5.2 Q-Learning算法核心设计

为解决上述问题，项目团队采用Q-Learning算法构建自适应巡检路径规划系统，关键设计如下：

5.2.1 状态空间建模

离散化网格地图：将输电线路走廊划分为10m×10m的网格，每个网格单元对应一个状态（s），包含以下属性：地理坐标（经度、纬度、高度）；障碍物类型（导线、塔基、树木、鸟类等）；导线状态（正常、断股、散股、异物悬挂）；巡检优先级（根据设备历史故障率

动态调整)。

状态编码：采用独热编码(One-HotEncoding)将状态转换为向量形式，例如： $s = [0,0,1,0,\dots,0]$ #长度为网格总数，仅当前位置为1

5.2.2 动作空间设计

基本动作集：定义无人机在每个状态下的可选动作

(a)：向上/向下/向左/向右移动10m；沿导线方向前进/后退20m；悬停检测(针对高优先级区域)。

动态动作扩展：根据环境感知数据(如激光雷达、双目视觉)动态调整动作集，例如：检测到前方50m有树木倒伏时，增加“绕行左/右”动作；导线弧垂超标时，触发“低空悬停检测”动作。

5.2.3 奖励函数设计

奖励函数是引导Q-Learning收敛的关键，设计如下：

基础奖励：到达目标点(如下一基塔)：+100；移动到高优先级区域：+20；普通移动：+1；碰撞障碍物：-50；超出最大步数(如500步)：-100。

精细化巡检奖励：检测到导线断股/散股：+150(鼓励重点区域巡检)；发现异物悬挂：+100；弧垂测量误差<5%：+50。

效率惩罚：重复访问同一状态：-10(避免路径冗余)；悬停时间过长(>30秒)：-5(平衡检测精度与效率)。

5.2.4 Q-Learning算法实现

初始化：创建Q表($Q(s,a)$)，初始值为0，维度为(状态数×动作数)；

参数设置：学习率(α)：0.1(初期快速学习，后期稳定收敛)；折扣因子(γ)：0.9(重视长期奖励)；探索率(ϵ)：0.3(初期30%概率随机探索，后期逐步降至0.1)。

训练流程：①从起点(如23号塔)开始，根据 ϵ -贪婪策略选择动作；②执行动作后，通过激光雷达和双目视觉获取新状态(s')和奖励(r)；③更新Q表： $Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \alpha[r + \gamma \max Q(s',a') - Q(s,a)]$ ④重复步骤①-③，直至到达终点(24号塔)或达到最大步数。

5.3 案例实施与效果

5.3.1 硬件部署

(1) 无人机平台：搭载单线激光雷达(测量频率10Hz@10m)、双目视觉模块(分辨率1080P)、RTK定位系统(精度±2cm)；(2)边缘计算单元：NVIDIA Jetson AGX Xavier(算力32TOPS)，实时运行Q-Learning算法；(3)通信模块：5G+LoRa双模通信，确保复杂地形下的数据回传。

5.3.2 训练过程

(1) 仿真训练：在ROS-Gazebo平台搭建虚拟输电线路环境，包含10种典型障碍物(树木、鸟类、塔基等)，训练5000个episode后，Q表收敛(平均奖励稳定在+80以上)；(2) 实地迁移：将仿真训练的Q表作为初始值，在泉乐III线23–24号塔段进行实地微调，训练1000个episode后，路径规划成功率达98%。

5.3.3 实际巡检效果

相比传统A*算法，Q-Learning规划路径平均缩短15%，曲率波动减少40%(路径更平滑)；导线断股/散股检测准确率从85%提升至97%，异物悬挂检测率从90%提升至99%；单塔段巡检时间从2.5小时缩短至1.8小时，激光雷达扫描数据量减少60%(仅对高优先级区域精细扫描)；成功应对3次突发障碍物(2次鸟类筑巢、1次树木倒伏)，自动绕行成功率100%。

5.4 技术创新点

一是多模态感知融合：结合激光雷达的几何信息与双目视觉的语义信息，构建高精度环境模型；二是价值分布强化学习：采用QR-DQN算法(分位数回归深度Q网络)，解决传统Q-Learning的“过估计”问题，提升奖励预测准确性；三是优先级经验回放：根据状态优先级(如高缺陷风险区域)动态调整经验采样概率，加速关键场景学习；四是硬件-算法协同优化：通过JetsonAGX Xavier的TensorRT加速Q表推理，实现10ms级实时路径规划。

结语

Q-Learning算法借助强化学习机制，为输电线路巡检路径规划带来动态自适应新思路。它突破传统局限，在环境建模上精准模拟复杂线路场景，多目标优化中兼顾效率、成本与安全，协同巡检时实现多无人机/机器人高效配合，大幅提升巡检效率，降低安全风险。如今，深度强化学习赋予其更强的决策能力，数字孪生提供逼真虚拟环境用于训练优化。随着这些先进技术深度融合，Q-Learning必将在智能电网建设中释放更大潜能，引领输电线路巡检模式迈向全自主运行、高可靠保障、低成本运维的新时代。

参考文献

- [1]潘琦涛,赵岳生,甘育国.基于改进Q-Learning算法的机器人路径规划[J].物联网技术,2025,15(03):82-86.
- [2]娄智波,彭越,辛凯.基于改进型Q-Learning算法的路径规划系统研究[J].计算机与数字工程,2024,52(08):2312-2316.
- [3]井征森,刘宏杰,周永录.基于改进Q-learning算法的移动机器人路径规划[J].火力与指挥控制,2024,49(03):135-141.