

基于边界点云自动化提取算法的变电站 作业安全范围建模分析

路文婷 赵珊珊 张天龙
(国网浙江省电力有限公司培训中心)

摘要：变电站作业安全监测易受到作业对象的邻域特征点的影响，范围规划误差较大，为此，提出基于边界点云自动化提取算法的变电站作业安全范围建模分析。利用边界点云自动化提取算法通过计算点云高程与高差阈值识别电力线网格区域，并对区域中的邻域特征点进行标准化处理，剔除其中的噪声影响，根据变电站作业活动类型，估算作业工器具的运动轨迹，以此为依据，对作业范围的水平方向函数与垂直方向函数进行求取，以此实现变电站作业安全范围模型的构建。以实际变电站为研究案例，对构建模型的应用性能进行测试，结果表明，将该模型应用在变电站作业安全范围规划中，其规划的相对误差更小。

关键词：边界点云自动化提取；变电站；安全作业范围；运动轨迹

2025.09.DQGY
93

0 引言

电力行业作为经济发展的基础产业，随着电力基础设施规模和投资增加，变电站的数量也在增加，但如何保证变电站高空作业的安全性，降低作业人员与设备的风险，成为当前变电站生产管理面临的主要问题^[1]。为有效规划变电站作业安全范围，目前已有许多学者对作业安全范围建模方法展开研究，既有方法中应用效果较好的主要有两种，即基于UWB定位技术的建模方法与基于物联网技术的建模方法。UWB为超宽带技术，通过对作业范围进行测距与测向，并计算到达角度与信号接收强度，对作业范围进行定位，但此方法具有抗干扰能力差、不能适应特殊的工作环境要求等缺陷，实用性比较受限；基于物联网技术的主要范围建模方法是通过无线自组网技术对作业范围进行逼近限幅，对作业区域实现自动识别，但该

方法无法监测危险工区，使得在变电实施应用中的效果不理想。基于以上分析，本文结合边界点云自动化提取算法，对变电站作业安全范围进行建模分析，以实现精准规划作业安全范围，提高作业人员安全性与设备的稳定性。

1 变电站作业安全范围建模方法设计

1.1 基于边界点云自动化提取算法的电力线网格区域识别

在变电站作业安全范围建模过程中，电力线网格区域识别是其中的首要步骤，只有精准识别出电力线网格区域，确定电力线的坐标位置，并以该位置为作业半径，划定作业区域，才可实现安全作业范围建模^[2]。针对电力线网格区域识别的问题，本文利用边界点云自动化提取算法来完成。利用地面点与非地面点建立

空间规则化网格, 根据电力线的高程特征识别感兴趣区域, 并剔除区域中的噪声点, 从而实现电力线区域的精细化识别。

首先, 在空间中对非接地点进行规则的网格划分, 网格大小 s 取决于电力线的尺寸^[3]。如果网格尺寸太大, 则在识别区域内保留了太多不必要的点云, 如植被和电塔; 如果网格尺寸太小, 则很容易在识别中忽略电源线点。因此, 空间被划分为 $M \times N \times 1$ 网格, 点云规则网格被划分为:

$$\begin{cases} M = (x_{\max} - x_{\min}) / s \\ N = (y_{\max} - y_{\min}) / s \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为点云数据中特征最大值与特征最小值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 分别为点云数据中向量的最大值与最小值。

选取点云数据中的中心点记为 (x_i, y_i) , 则可根据此坐标得到该点在网格区域中的行向量与列向量, 即:

$$\begin{cases} m = (x_i - x_{\min}) / s \\ n = (y_i - y_{\min}) / s \end{cases} \quad (2)$$

式中, (x_i, y_i) 为 i 点的坐标值; m 、 n 分别为 i 点在规则网格中的行、列号。

利用下式计算某一个点云的协方差矩阵:

$$A = \sum_{i=0}^k (P_i - P') (P_i - P')^T \quad (3)$$

式中, P' 为邻域特征点; P_i 为当前点; T 为旋转矩阵。

为了比较不同点集的特征值属性, 对其进行标准化处理, 即:

$$A' = \frac{A \cdot \beta_i}{\sum \beta_i} \quad (4)$$

式中, β_i 为点云的归一化特征值。

利用上式计算点云数据的特征属性, 以区分电力线路与地面构筑物、植被或其他物体。根据变电站作业的规律可知, 电力线同时具有局部极高值与高程连

续性的特点^[4], 因此, 可充分利用这两个特点对电力线网格区域 (nDSM) 进行识别。而电力线网格区域识别包括电力线分形特征 (DSM) 识别与曲面特征 (DSM) 识别, 之后将两者进行拟合, 即可得到电力线最终网格区域^[5]。计算公式如下:

$$\begin{cases} V_{\text{DSM}} = A' \max z(m, n, i) \\ V_{\text{DEM}} = A' \min z(m, n, i) \\ V_{\text{nDSM}} = V_{\text{DSM}} - V_{\text{DEM}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $z(m, n, i)$ 为网格区域中第 m 行、 n 列的 i 点的三维坐标。

利用上式即可得到电力线网格区域, 根据电力线的高程特点, 将区域中离散型的数据点云予以剔除, 并合理设置高程区间 $[a, b]$, 则处于该区间的点云数据构成的区域即为精细化电力线网格区域。

根据电力线网格区域的高程特征, 利用其连续性与局部极高值的特点求取规则网格中的分形阈值与高差阈值, 进而识别出电力线网格区域, 为接下来电力作业工器具的运动轨迹计算提供了便利条件。

1.2 作业器具运动轨迹计算

根据现有的调查资料, 变电站作业活动主要包括四种类型, 即常规带电作业、邻近带电设备作业、大型电气施工作业、恢复性抢修作业^[6]。由于常规带电作业是电力工程中重要的作业方式, 因此, 本研究中将重点考虑常规带电作业过程中作业器具的运动轨迹。常规带电作业方式示意图如图 1 所示。

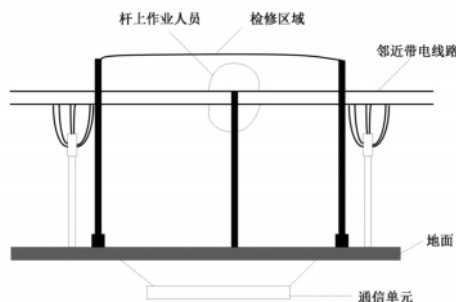


图 1 常规带电作业方式示意图

图1是电力现场日常带电作业的示例。分段开关的内侧为邻近带电线路，邻近带电线路的两侧为检修区域，电杆上的作业员在检修区域工作。

在对作业器具系统进行运动轨迹分析时，将器具系统的作业车辆、绝缘平台、作业杆、旁路作业设备及防护设施视为一个整体，通过研究器具系统在施工作用下的运动轨迹来确定以作业对象为中心的器具安全作业半径^[7]。具体流程：首先，建立作业对象和仪器系统的三维运动方程；然后，通过数值解验证数值模型的可靠性；分析影响参数，通过结合作业对象的结构参数、作业杆的长度和材料特性、作业仪器系统的质量和其他参数，获得仪器的安全作业范围半径。

建立作业对象和仪器系统的三维运动方程^[8]。基本假设包括：①由作业车、绝缘平台、作业杆组成的仪表系统；②由作业车辆、绝缘平台和作业杆、旁路作业设备和防护设施组成的仪表体系被视为一个整体，其质量为 m_1 ；③将作业杆设为弹性材料，其刚度系数为 K_w ，作业杆长度为 L_w ；④规定作业车辆沿半径为 R 的圆周行驶 180° 后，沿直线行驶 $1.5R$ ，行驶速度为 v ；⑤车辆与地面摩擦系数为 μ ；⑥器具系统不离开地面；⑦作业对象位于作业车辆半圆形轨迹的圆心位置^[9]。

则作业器具系统的力平衡方程为：

$$m_1 x = T_x + F_x + f_{x_i} \quad (6)$$

$$m_1 y = T_y + F_y + f_{y_i} \quad (7)$$

$$T_z = V_{\text{nDEM}} (m_1 x + m_1 y + N) \quad (8)$$

式中， V_{nDEM} 为电力线网格区域； T_x 、 T_y 、 T_z 分别为作业杆沿 x 、 y 、 z 三个方向的弹性力； f_{x_i} 、 f_{y_i} 分别表示器具在 t 时刻的位置； N 为地面对作业器具系统的支持力； F_x 、 F_y 分别为器具在移动过程中在 x 、 y 、 z 三个方向受到的阻力，并有：

$$F_x = T_x + C_d S_d \quad (9)$$

式中， C_d 为阻力系数； S_d 为作业杆的表面积。

在每一个计算的时间步，根据 z 方向受力平衡，求得地面对器具系统的支持力 N ；再利用摩擦力公式 $f=\mu N$ ，求得器具系统在水平和垂直方向受到的摩擦力。

器具系统运动方程为：

$$m_1 \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} + K_w \frac{L_t - L_w}{L_t} = C_d S_d \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式中， (x_i, y_i) 为器具系统在 t 时刻的坐标； K_w 为作业杆的刚度系数； L_t 为 t 时刻作业杆的长度； L_w 为作业杆的原始长度； $C_d S_d$ 为阻力。

对以上方程进行求解，即可得到电力作业工器具的运动轨迹，以该结果为数值依据，对电力作业的活动范围进行划定，为作业安全范围建模奠定基础。

1.3 变电站作业安全范围建模

在电力作业活动过程中，由于电力线点云以及作业车辆的运动特性，其作业范围是可变的^[10]。如图2所示，假设运行车辆以恒定速度直线行驶，沿 x 轴线和 y 轴线方向的矩形侧阵列为 $M \times N$ ，阵列元件在行和列方向上等距，间距为 d 。阵列的法线垂直于车辆的方向，并且每行子阵列平行于车辆的方向。

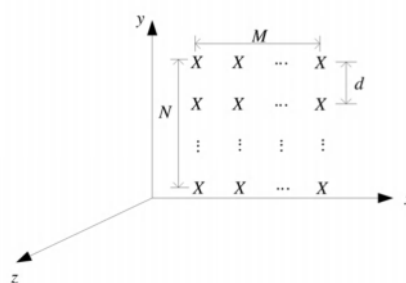


图2 作业车辆阵列几何关系

在确定各部件的工作行程和回转平台的回转角度范围的前提下，构建变电站工作安全范围模型^[11]。如图2所示，若行列子阵均不加权，可由其中的几何关系分别得到列子阵的方向图为：

$$F(\varphi) = \sum_{m=1}^M \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (M-1)(\sin \varphi - \sin \varphi_0) \right] \quad (11)$$

式中, j 为整机活动构件的自由度; λ 为整机高副数; $[\varphi, \varphi_0]$ 为整机左右角度转动范围。

行子阵的方向图为:

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \exp \left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (N-1)(\cos \varphi - \cos \varphi_0) \right] \quad (12)$$

实际仿真当中, 很难得到具体的阵列方向图函数表达式, 因此采用高斯方向图近似波束主瓣, 采用 sinc 方向图近似旁瓣^[12]。考虑到波束主瓣随波束指向展宽, 则:

$$\theta_d = \frac{F(\varphi)F(\theta, \varphi)}{\cos[\alpha_1, \alpha_2]} \quad (13)$$

式中, $[\alpha_1, \alpha_2]$ 为整机上下回转的角度。

整机水平方向图和垂直方向图表达式分别为:

$$F(\theta) = \begin{cases} \exp \left[-\left(\frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_d} \right)^2 \right], & |\theta_1 - \theta_0| \leq 2\theta_d \\ \left(\frac{\sin 2\pi(\theta_1 - \theta_0)}{\theta_d} \right), & |\theta_1 - \theta_0| > 2\theta_d \end{cases} \quad (14)$$

$$F(\varphi) = \begin{cases} \exp \left[-\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\theta_d} \right)^2 \right], & |\varphi_1 - \varphi_0| \leq 2\theta_d \\ \left(\frac{\sin 2\pi(\varphi_1 - \varphi_0)}{\theta_d} \right), & |\varphi_1 - \varphi_0| > 2\theta_d \end{cases} \quad (15)$$

式中, θ_1 、 θ_0 分别为基准点的左极限位置与右极限位置; φ_1 、 φ_0 为最大极限位置与最小极限位置。

作业机械的工作范围实际上取决于整个机器的最大工作范围、最小工作范围、俯仰角 φ 和方位角 θ 的扫描范围^[13]。因此, 工作机械的工作范围主要由其自身的水平方向函数 $F(\theta)$ 和垂直方向函数决定 $F(\varphi)$, 即:

$$R_0(\varphi_1, \theta_1) = R |F(\varphi_1)F(\theta_1)| \quad (16)$$

式中, R 为回转平台的质心点; $R_0(\varphi_1, \theta_1)$ 为整机扫过的最大面积。

要想得到电力作业水平安全范围图或垂直安全范围图, 只须将 φ 或 θ 设置为某一固定值即可。如果整机在水平方位上做旋转运动, 其覆盖的区域就是整机

的整个空间作业范围。则对应的模型为:

$$R_0(\varphi_1, \theta_1 - \theta_0) = R |F(\varphi_1)F(\theta_1 - \theta_0)| \quad (17)$$

根据电力线网格区域识别与专业工器具运动轨迹计算结果, 对作业机械的水平方向与垂直方向函数进行求取, 并将其进行拟合, 即可得到如式 (17) 所示的变电站安全作业范围模型。

2 实验论证

2.1 实验准备

以某地 500kV 变电站为例, 在使用 i5-4460 CPU 和 8GB 系统内存的 Windows-10 平台上对所提出的模型进行评估。利用 LH998V 型号的雷达, 对变电站电力线的边界点云数据进行采集。雷达参数如表 1 所示。

表 1 点云数据采集雷达技术参数

参数名称	数值
发射功率 (kW)	4000
工作频率 (MHz)	3000
天线增益 (dB)	40
天线副瓣增益 (dBi)	-10
脉冲重复频率 (Hz)	250
系统损耗 (dB)	15
检测概率	0.6
虚警概率	10^{-5}
波束宽度 (°)	30
仰角 (°)	30
天线转速 (°/s)	24

将激光雷达采集到的点云数据集按照 1:3 的比例划分为两部分, 记为数据 1 与数据 2。其中数据 1 中包括 4 条电力线路, 编号为 1#~4#, 包含 563 万点数据; 数据 2 包括 5 条电力线路, 编号为 5#~9#, 点云数据量为 487 万。对实验中的数据集进行增强与去噪处理, 得到地面点与非地面点, 以非地面点为基准, 构建电力线网格。根据电力线的实际尺寸, 设置网格大小为 $s=25.5\text{m}$, 高差阈值为 $H_{\max}=60\text{m}$, 高程连续区间为 $[40, 60]$, 识别出的电力线网格区域如图 3 所示。

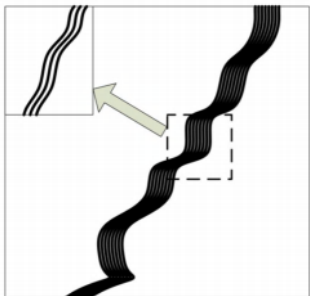


图3 电力线网格区域识别结果

如图3所示，输电导线穿越地形起伏较大区域时，电力线与周围地物一般保持相对较小的距离，在本例实验数据中，点云数据中存在档间高差大幅下降

的现象，缩短了大型作业根据及现场施工人员与带电设备的安全距离。

2.2 实验过程

由于本文的主要目的是对变电站作业安全范围进行建模，且边界点云提取算法的特征是以实数向量的形式来表达，识别出的特征点大小不一，因此，还需要对上述识别出的电力线网格区域进行归一化处理，并通过分配数值小的特征，降低计算的复杂度。由于本文样本计算出来的特征都是正值，因此，本文将特征都缩放到 [0,1]，并根据最终识别结果建立专业安全范围模型，实验流程图如图4所示。

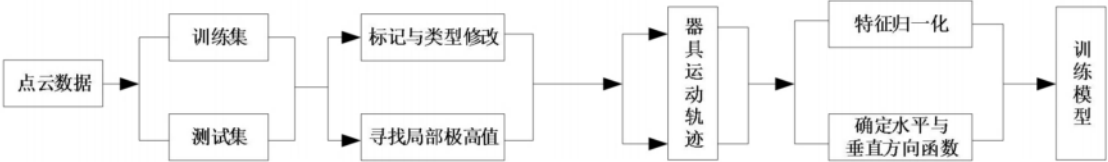


图4 实验流程图

以该变电站为研究对象，为便于安全作业范围模型的构建，考虑到工器具系统质量对其运动轨迹的影响可忽略不计，取地点作业的工器具系统质量 $m_1=500\text{kg}$ ，作业杆长度为 $L_w=300\text{m}$ ，刚度系数取 $K_w=87500\text{N/m}$ ，与地面摩擦系数为 $\mu=0.05$ ，作业车辆平均行驶速度 $v=12.5\text{m/s}$ 。假设作业对象位于作业车辆运行轨迹中心（坐标原点），可覆盖区域半径为 30m 。

2.3 应用结果

为方便分析，将变电站高空电力作业安全范围划定为竖向平面结构，包括地面与高空，并且将图2中识别出的电力网格区域作为坐标原点，基于这一点，右侧地面上的水平线被视为轴的正方向，而高空垂直于地面的垂直线则被视为轴线的正方向，利用构建的模型对作业安全范围进行划定，并与实际作业安全范围进行比较，以评估模型的应用性能。模型应用结果如表2所示。

表2 作业安全范围模型应用结果对比

仿真次数	模型输出值		实际值	
	x方向 距离/m	y方向 距离/m	x方向 距离/m	y方向 距离/m
1	250.2	368.6	250.4	368.1
2	-253.1	-152.4	-252.6	-152.1
3	126.0	226.6	159.7	226.7

如表2所示，对利用文中设计的变电站作业安全范围模型进行三次仿真实验，以高空电力线作为作业对象，对作业安全范围进行划定，通过比较可以看出，模型在 x 轴与 y 轴的输出值与实际值之间的误差较小，在 ± 0.5 范围内浮动。由此可以说明，文中设计的变电站作业安全范围模型是合理可行的，以此确定的工作范围是安全的。

2.4 对比分析

为进一步验证本文构建的专业安全范围模型的可靠性，分别采用1与本文模型进行对比分析。针对变

电站作业人员的专业特点,利用以上三种方法,分别在遮挡区域、干扰区域及正常区域(无遮挡物干扰)三种情况下对作业安全范围进行规划,记录模型在 x 轴与 y 轴的输出值,并求取面积,将最终结果与实际面积相比较,比较不同方法的规划准确性,对比结果如图5所示。

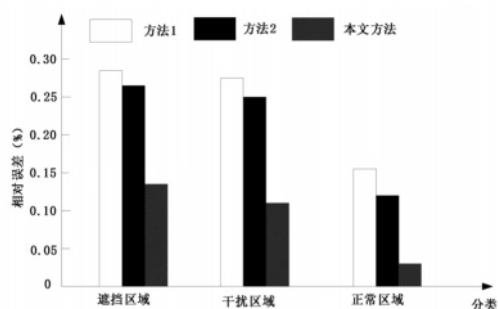


图5 不同模型作业安全范围规划准确性对比结果

从图5可直观看出,在正常区域,三种模型对于作业安全范围的规划误差均比较小,而在遮挡区域和干扰区域,三种模型的规划误差均有所增大。但通过对比发现,本文模型在三种作业情况下,对于作业范围的规划误差都要远小于其他两种模型。方法1在构建模型过程中,忽略了三维空间中点云在邻域中的距离阈值,所以范围规划误差较大;方法2构建的模型无法有效剔除作业区域中的噪声点和偏离电力线的空间分布特征,使得规划效果不理想。实验结果表明,文中所提建模方法能够准确规划变电站作业安全范围,提高变电站作业的安全性。

3 结束语

本课题将边界点云自动化提取算法引入到变电站作业安全范围建模中,并通过电力线网格区域识别与专业工器具运动轨迹的计算,构建出变电站作业安全范围模型。经过实例应用表明,本文构建的模型能够

更加准确地规划出变电站作业安全范围,实现高空安全作业的全面提升。

参考文献

- [1] 李金鑫,徐润,陈家辉,等.基于视频识别和UWB定位的变电站作业现场安全识别方法[J].电气技术与经济,2022(6):123-126.
- [2] 彭丽娜,史青录,张聪,等.三节臂液压挖掘机工作装置建模与作业范围分析[J].工程机械,2021,52(1):53-59,9-10.
- [3] 高伟,何搏洋,张婷,等.基于注意力机制的变电站作业场景三维目标检测[J].激光与光电子学进展,2022,59(22):165-173.
- [4] 赵峰,李洪彬,梁懿,等.一种基于边缘计算的变电站现场作业风险感知方法[J].机械设计与制造工程,2022,51(11):100-103.
- [5] 刘勇,李晓谔.冲击破岩掘进机工作机构作业范围及有限元分析[J].工程机械,2022,53(7):37-42,9.
- [6] 张一哲.基于故障树理论的电力作业风险态势感知方法[J].光源与照明,2022(6):169-171.
- [7] 刘欣宇.电力检修现场作业范围监护系统设计[J].电工技术,2022(12):158-159.
- [8] 张劲松,邓元实,常政威,等.基于旋转YOLOv5的电力作业车态势感知方法研究[J].四川电力技术,2022,45(3):29-34.
- [9] 盛鹏飞,尹琪,沈跃忠.变电站高压线缆安全作业距离检测报警技术研究[J].大众用电,2022,37(4):52-54.
- [10] 纪宏德,吴显德.基于人工智能的变电站现场作业预警技术研究[J].大众用电,2022,37(3):45-47.
- [11] 徐明,穆国平.变电站现场作业安全管控系统

(下转第112页)