[带电作业机器人]

10 kV配电网带电作业机器人的关键技术及仿真实验研究

文/朱军城
广州德晟电力科技有限公司

带电作业机器人的定位性能和路径规划性能，直接影响定位准确度和工作效率。为此，针对10 kV配电网环境，研究设计了新的带电作业机器人关键技术，主要包括绝缘技术、目标识别及定位技术以及智能化决策与规划技术三个方面。在绝缘技术方面，采用复合纤维材料作为绝缘外壳，并集成绝缘监测系统，确保机器人在高压环境中的安全运行；目标识别及定位技术方面，通过引入单目摄像机和3D计算机视觉软件，结合光纤通信和立体坐标系构建，提高机器人的定位准确度；智能化决策与规划技术方面，采用蚁群算法优化机器人决策模块，实现高效的路线规划和任务分配。

配电网作为智能电力系统的重要组成部分，主要负责将输电网或发电站输送的电能分配给各个用户，确保电能的稳定、可靠和经济供应。为保证配电网的电力运行能力，日常状态下会进行配电网检修，而高压线路产生的高强度磁场会影响工作人员的工作效率与身体健康，电磁反应严重时，会对人们的身体造成不可逆转的影响。为提升带电检测工作的效率与安全性，降低安全隐患，大量的专家学者开始有关带电作业机器人领域的研究，并针对当前的带电检测中存在的相关问题，对带电作业机器人的相关内容展开针对性优化。因此，本研究面向10 kV配电网作业环境，结合带电作业机器人的工作特征，提出带电作业机器人的关键技术，并设计仿真实验本项技术的可行性与科学性。

10 kV配电网带电作业机器人关键技术设计

将10 kV配电网带电作业机器人关键技术划分为3部分，具体组成内容如图1所示。

本研究将按照图1所示内容，从绝缘技术、目标识别及定位技术以及智能化决策与规划技术3个角度出发，逐一展开设计，并将以上环节有序连接，得到机器人关键控制技术。

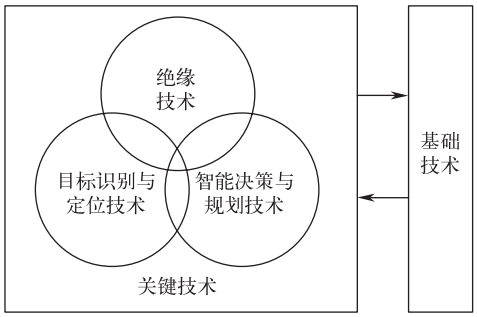

图1　10 kV配电网带电作业机器人关键技术组成部分

1. 绝缘技术

绝缘能力是影响带电工作机器人日常工作进度的重要因素之一。在高压电力系统中进行作业时，机器人需要直接或间接接触带电设备。具备良好的绝缘能力可以有效防止电流从带电设备泄漏到机器人本身，从而避免机器人成为导电通路，保护机器人内部电路及元件不受损坏。为此，采用复合纤维材料作为机器人的绝缘外壳。相关参数设定：耐压率为20%，电阻率为$3.0\times10^{12}\ \Omega/m^2$，表面电阻率为

$1.5\times10^{13}\ \Omega/m^2$，介电常数为4.05 F/m，耗损因数为0.035。

带电机器人主要由金属器件与绝缘材料组成，绝缘材料的电阻值直接影响机器人的绝缘性能，需对其电阻值进行设定，具体计算过程为

$$R=\rho\frac{l}{s} \tag{1}$$

式中，R为电阻值；ρ为绝缘材料的电阻率；l为绝缘材料的长度；s为带电作业机器人的表面积。

在此基础上，为确保带电作业机器人的长期稳定运行，集成绝缘监测系统，实时监测机器人的绝缘状态，并在绝缘性能下降时提供预警和保护措施。设计采样阻抗监测法，通过向机器人外表的绝缘材料施加一个已知频率的交流电压，测量由此产生的电流，从而计算出绝缘阻抗。根据阻抗值的变化来评估绝缘性能，过程为

$$Z=\frac{V}{I} \tag{2}$$

式中，Z为绝缘阻抗；V为施加的交流电压幅值；I为由此产生的电流幅值。

当监测到绝缘性能下降（绝缘阻抗降低）时，发出预警信号，提醒操作人员注意。在预警的同时，控制中心应自动或手动启动保护措施，如切断电源、停止作业或启动备用机器人等，以防止事故扩大。

2. 目标识别及定位技术

在日常带电作业中，机器人通过现场摄像机传输视频至主控台，但这种方式存在准确度不足的问题，特别是在高准确度位置作业时，仅凭目测判断作业目标点极易导致位置错误，降低作业效率与质量。为解决这一问题，对机器人定位技术进行优化，通过引入单目摄像机与3D计算机视觉软件，结合光纤通信与立体坐标系构建，提升机器人的目标识别与定位能力。

在原有的带电作业机器人结构中增加单目摄像机，提升图像采集的准确度与实时性，并在机器人软件框架中集成3D计算机视觉软件，用于处理和分析摄像机捕捉到的图像。然后，在作业主控室与作业平台之间构建光纤通信通路，将现场摄像机获取的视频信号转化为电-光信号，再通过光通信转化为电通信，确保信号传输的稳定性与速度，减少信号衰减与电磁干扰。

由于上述获取到图像多为二维图像，在作业过程中容易存在坐标差。对此，构建立体坐标系对二维图像展开优化处理。通过多个相机（包括新增的单目摄像机）在同一平面上采集的图像，利用特征点的一致性，统一坐标系。设定多个相机的焦距为f，根据三角几何关系可以得到

$$S=\frac{fB}{d} \tag{3}$$

式中，S为目标点到相机的距离；B为任意两个相机之间的基线距离；d为任意两个相机图像中目标点的视差。

根据视觉差计算原理，更新三维坐标系，将S值转化到机器人坐标系中，保证机器人运动到目标点位置，提升机器人的定位准确度，确保高准确度位置作业的准确性。

3. 智能化决策与规划技术

带电作业机器人工作时，需具备自我路线规划能力，并根据实际环境以及配电网情况设定最为合理的抢修方案。针对此要求，本次研究使用蚁群算法优化机器人决策模块。

1）根据实际作业环境，设定蚁群算法的初始参数。其中，最大迭代次数为100次，出事信息素浓度为0.5。

2）构建机器人运动解空间，包括所有可能的路径和目标点。计算机器人访问全部目标点后移动到下一目标点的概率，确保机器人能够遍历所有目标点并回到出发点。

3）记录机器人可使用路径的位移数据，包括路径长度和时间成本，并记录在当前迭代中找到的最优路径。

4）重复上述环节，更新信息素浓度和路径选择概率，在达到最大迭代次数后，停止运算。

信息素更新过程为

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\lambda)\times\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t) \tag{4}$$

式中，$\tau_{ij}(t)$为在时间为t时路径$i\to j$上的信息素浓度；λ为信息素挥发系数；$\Delta\tau_{ij}(t)$为新增加的信息素量。

路径选择概率公式更新过程为

$$P_{ij}^{k}(t)=\frac{(\tau_{ij}(t))^{\alpha}\times(\eta_{ij})^{\beta}}{\sum_{l\in\text{allowed}_k}(\tau_{ij}(t))^{\alpha}\times(\eta_{ij})^{\beta}} \tag{5}$$

式中，$P_{ij}^{k}(t)$为第k只蚂蚁在时间为t时选择路径$i \to j$的概率；η_{ij}为路径$i \to j$的启发式信息；α和β分别为信息素重要性和启发式信息重要性的权重。

5）输出最终计算结果，并根据此结果指挥机器人完成巡检工作。

仿真实验与结果分析

为验证上述设计技术在实际工作中的应用效果，设计如下仿真实验，并对结果展开分析。

1. 实验准备

机器人在进行带电作业时，作业臂前端可能会接触到高压电线，为保证机器人能够将可能泄露的电流控制在1 mA内，需对其进行实验，并通过仿真计算的形式，确定文中技术符合此项设计要求。

仿真实验将三相交流电源电压设定为14.00 kV，频率设定为60 Hz。根据以往研究结果，机器人的等效电阻为1 000 Ω左右，在本次研究中将其计算值设定为800 Ω。对于机器人绝缘材料，本次实验设定为电阻率3.0×10^{12} Ω·m、长度为1.5 cm、半径为5.0 cm的复合纤维材料，计算其实际电阻值，用等效电阻替代。以上计算完成后，将仿真数据带入ATP-EMTP软件中，完成实验操作过程。

与此同时，根据10 kV配电线路的实际情况，构建较为详细的仿真模型。此模型中包含线路结构、故障类型、作业环境和作业方式等参数，并导入ATP-EMTP软件中。

2. 实验指标设定

本次研究中，将实验指标设定为两部分，分别针对带电作业机器人应具备的相关性能。实验指标分别为定位准确度以及规划控制耗时。

1）定位准确度反映机器人对作业目标的辨识和定位能力，是确保作业准确性和安全性的关键指标。高准确度定位有助于减少误操作风险，提高作业效率。

2）规划控制耗时可以衡量机器人从接收任务到开始执行作业的准备时间，反映了智能化决策与规划系统的效率。较短的耗时意味着机器人能更快地响应作业需求，提升整体作业效率。

实验共设定5种不同的线路，将文中技术与机器视觉技术、机器学习技术进行对比。

3. 实验结果分析

（1）定位准确度实验结果分析

表1　定位准确度实验结果

线路序号	文中技术准确度（%）	机器学习技术准确度（%）	机器视觉技术准确度（%）
1	98.5	92.5	96.5
2	98.0	93.0	96.7
3	97.5	91.5	94.1
4	97.8	96.2	95.7
5	97.6	94.8	95.6

由表1中的数据可以看出，三种技术均具有相应的定位能力，但文中技术的定位能力相对较高，可在一定程度上为检修工作提供高质量的定位数据，进一步解决配电网带电作业中定位效果不佳的问题。与此同时，通过横向对比可以看出，文中技术整体数据波动较为稳定，可见其定位能力良好。

（2）机器人控制耗时实验结果分析

表2　机器人控制耗时实验结果

线路序号	文中技术耗时/s	机器学习技术耗时/s	机器视觉技术耗时/s
1	5.25	10.2	10.0
2	6.71	11.4	8.15
3	5.84	12.0	9.20
4	5.61	11.6	8.15
5	6.02	13.0	9.25

分析表2中的数据可以发现，在应用文中技术控制后，带电作业机器人的工作耗时最短，说明文中技术可以有效保证机器人的工作效率。与文中技术相比，机器学习技术与机器视觉技术难以在最短的时间内完成机器人动作的控制工作，当10 kV配电网带电作业范围较大且内容较多时，耗时较长，容易造成资源浪费，需要进行针对性修改。

结束语

针对当前带电作业机器人日常工作中存在的问题，大量的研究指出机器人的绝缘能力、定位能力以及决策规划能力都影响着机器人的工作性能，为此提出本次研究。通过仿真实验研究验证本次研究中设定的技术，对于提升机器人的性能和作业效率有直接帮助，可以为电力行业的智能化发展提供有力支持。EA