

10kV 配电线路带电作业临界安全距离 实时监测方法研究

郑 韬 曹光锋

(浙江图盛输变电工程有限公司)

摘要：10kV 配电线路通常线路长度较长，存在多个支线和分支，电流和电压的变化不均匀。这给安全距离实时监测带来了挑战。为此，本文研究 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测方法。GPS 定位技术下带电作业位置定位，设计带电作业电压滤波器。设计流程步骤，去除电压的无关项。基于此，获取变电站的电场边界条件，实时监测电磁分布规律，获取对应磁场的带电作业临界安全距离测量方程，实现 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测。实验结果证明，研究方法得到的带电作业安全距离与实际距离具有较高一致性。

关键词：10kV 配电线路；带电作业；临界安全距离；实时监测

0 引言

对带电作业人员的安全需求以及高电压环境下潜在危险的关注，带电作业安全距离监测问题已经被广泛研究。10kV 配电线路是常见的电力系统之一，具有较高的工作电压水平。在进行带电作业时，接近线路可能会存在电击和电弧等危险，因此确保带电作业人员的安全成为重要课题。传统的带电作业安全管理依靠经验和规章制度，通常通过规定安全距离来控制 and 限制作业人员接近电力设备的范围^[1]。然而，这种静态的安全距离规定不一定能充分考虑实际情况、环境变化和电力参数的变化，存在一定的局限性。

因此，需要开展针对 10kV 配电线路带电作业的临界安全距离实时监测研究，以提高带电作业的安全性和效率。通过实时监测电力参数和环境条件的变

化，探索与电场、电压、电流等相关的安全指标，可以更准确地评估带电作业过程中的潜在危险和安全距离。最近的研究主要涉及带电作业临界安全距离监测方法的开发与优化，包括基于 GPS 定位、传感器技术以及数据处理和分析等方面。通过实时采集和分析电力参数，结合地理信息系统和无线通信技术，可以实现对带电作业人员位置和周围环境的实时监测与评估^[2]。这将为安全管理人员提供更准确、可视化的信息，帮助其做出合理的决策，并采取必要的措施保障带电作业的安全。文献 [3] 提出了以电场感应、回波反射、视觉识别等多物理量传感为手段，多传感数据同步测量、互为补充，建立了顾及运动状态参数及抗差估计思想的滤波解算方法。文献 [4] 建立了 ±1100kV 耐张塔耐张串双人带电作业电场计算模

型，获取了最小安全距离。

以上述研究为基础，研究了新的 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测方法。

1 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测

1.1 GPS 定位技术下带电作业位置定位

GPS 定位技术通过接收来自卫星的信号，确定接收器所在的位置。具体原理是，GPS 接收器同时接收多颗卫星发射的信号，通过测量信号传输时间和来自不同卫星的信号之间的差异，计算出接收器与每颗卫星之间的距离。通过三角定位法，将这些距离转化为坐标，从而确定接收器的位置。这个过程需要至少 3 颗卫星的信号，通常使用 4 颗以上卫星的信号以提高定位准确度。在带电作业中，可以将 GPS 定位设备安装在作业人员的装备、设备或工具上，通过接收卫星信号，确定带电作业位置并实时更新。这样，监控人员可以了解到作业人员当前的位置，以便进行实时监控和管理。GPS 定位设备相对便携，可以方便地安装在作业人员的装备、设备或工具上。作业人员只需携带设备，并确保设备接收卫星信号即可。除了定位功能，现代的 GPS 定位设备还可以提供其他有用的功能，如轨迹记录、报警功能等。这些功能可以进一步提高带电作业的管理水平和安全性。无人机 GPS 定位系统框架如图 1 所示。

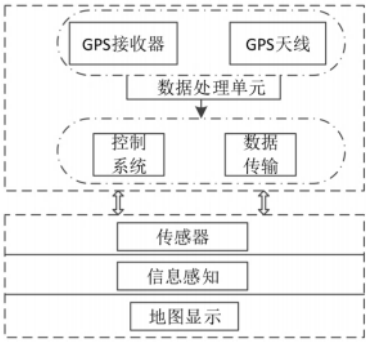


图 1 无人机 GPS 定位系统框架图

根据图 1 可知，建立的无人机 GPS 定位系统框架包括 GPS 接收器、GPS 天线、数据处理单元、控制系统、数据传输以及地图显示。

GPS 接收器：GPS 接收器是无人机上的设备，用于接收卫星发射的 GPS 信号。它能够计算无人机与卫星之间的距离，并推断无人机的具体位置。

GPS 天线：GPS 天线负责接收卫星信号并将其传输给 GPS 接收器。良好的 GPS 天线能够提供更强的信号接收和更准确的定位结果。

数据处理单元：数据处理单元负责处理从 GPS 接收器获取的位置信息。它会对原始数据进行解码、计算和处理，以生成无人机的准确位置信息。

控制系统：GPS 定位系统还包括一个控制系统，用于实时监控和管理无人机的位置。控制系统通常由地面控制站或移动设备提供，可以让操作人员远程监视无人机的位置，并进行实时控制。

数据传输：GPS 定位系统会通过无线信号或其他通讯方式，将无人机的位置信息传输到地面控制站或相关设备上。这样，操作人员可以实时获取和处理无人机的位置数据。

地图显示：为了更直观地呈现无人机的位置和行动轨迹，GPS 定位系统通常会将无人机的位置信息与地图数据相结合，提供可视化的地图显示界面。这样地面操作人员可以更清晰地了解无人机在空中的位置和运动状态。

利用 GPS 定位技术先对 10kV 配电线路中需要带电作业的位置完成定位，以此为依据，完成以下研究。

1.2 输电线路带电作业时电压去噪处理

在研究 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测方法时，对输电线路带电作业时电压进行去噪处理的目的是准确获取实际的电压数据，排除噪声干扰，以保证监测结果的准确性和可靠性。实时监测带电作业时的电压变化是确定临界安全距离的重要指标

之一。然而，在输电线路附近进行带电作业时，由于环境干扰、电力设备运行等因素的存在，电压信号常常会被各种噪声干扰所掩盖。这些噪声干扰可能来自外界电磁场干扰、电力设备自身产生的干扰，或者其他不可预知的因素。

为了准确地了解输电线路上的电压情况，去噪处理是必要的。去噪处理可以滤除杂乱的噪声信号，使得监测到的电压数据更加准确、可靠。通过去除噪声干扰，能够更精确地分析电压变化，以便有效判断带电作业的安全距离。

为了准确检测 10kV 配电网带电作业电压，设计滤波器，原理图如图 2 所示。

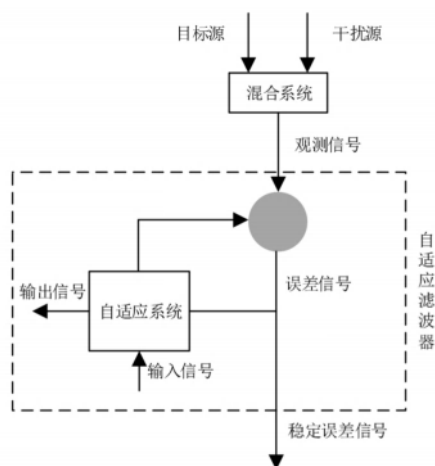


图 2 实时滤波器原理

除了滤波操作之外，去除电压的无关项也是十分必要的，即去除噪声和自然剩余电压，设计流程如图 3 所示。

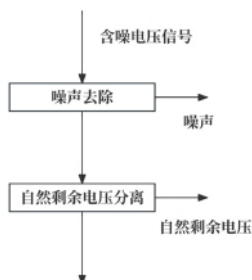


图 3 去除无关项电压流程

1.3 带电作业临界安全距离实时监测

10kV 配电线路的工作电压相对较高，使得带电作业涉及的电场强度较大。这增加了对临界安全距离的准确性和精度要求，同时也增加了监测设备对高压信号的敏感性和可靠性的要求。10kV 配电线路常常处于密集的城市或人口稠密的区域，周围环境复杂多变。这种复杂的环境可能会引起电磁干扰、多路径传播等问题，导致信号衰减和失真。这使得带电作业临界安全距离监测的信号处理和分析变得更加困难。

电场是评估带电作业安全距离的重要参数之一。电场是描述电力系统中电荷间相互作用的物理量，它反映了电荷分布对周围空间产生的力场影响。在 10kV 配电线路带电作业过程中，存在带电导线和接地体之间的电荷分布和电场分布。这个电场的分布情况直接影响着带电作业人员附近的电压和电势差，进而关系到带电作业人员的安全。

通过计算 10kV 配电线路的电场，可以定量评估带电作业人员所处位置电场的大小和分布情况。根据相关的安全标准和规范，可以确定各个工作环境下的电场安全限值。将实际计算得到的电场与安全限值进行比较，可以判断带电作业的临界安全距离是否达到要求，从而保障带电作业人员的安全。

设定电站包裹空间中任意一点电位为 E ，空气边界以及地面的和零电位导体为 ∞ ，获取变电站的电场边界条件：

$$E|_{\infty} = \Re U \quad (1)$$

式中， $\Re$ 为配电站内部高电位导体，且 $k=1, 2, \dots, n$ ； U 为 Laplace 方程。

10kV 配电线路有限元模型如图 4 所示。

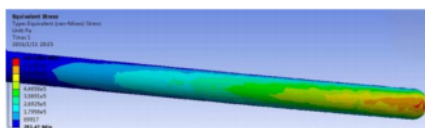


图 4 线路有限元模型

电场获取方程为：

$$B = K + \frac{E \mid_{\kappa} \partial C}{\partial t} / \Im \tag{2}$$

式中， K 为电站电场强度； C 为磁感应强度； $\Im$ 为自由电荷体密度。

实时监测电磁分布规律，获取对应磁场的带电作业临界安全距离测量方程，结果如下所示：

$$D = IB / E_{\text{MIN-MAX}} C \tag{3}$$

式中， I 为带电作业时的导线电流； $E_{\text{MIN-MAX}}$ 为带电作业能够承受的电场阈值。

2 实验分析

为了验证带电作业临界安全距离实时监测方法的整体有效性，选择一条位于城市郊区的 10kV 配电线路作为实验环境。该配电线主要用于供电给附近的工业区和居民区。这条线路起始于变电站，经过一系列的铁塔和电缆支架，最终连接到负荷接入点。该配电线路采用架空线路形式，使用高强度的电杆和横跨的导线以承载和传输电能。线路的总长度约为 5km，包括直线段、转角段和铁塔间的跨越段。配电线路服务于附近的工业区和居民区，向其提供稳定的电力供应。因此，在不同时间段，该线路的负荷有明显的变化，包括日间高峰期和夜间低谷期。带电作业临界安全距离的监测需要考虑该配电线路的电压等级、变动情况以及周围环境的影响。为确保带电作业过程中的安全，需适时更新监测结果，并根据具体位置和作业类型确定合适的安全距离。

验证带电作业安全距离监测方法的数据拟合度是为了评估监测方法的准确性和可靠性。数据拟合度表明监测方法所得到的结果与实际情况的一致程度。通过对监测方法预测的安全距离与实际现场测试或实测数据进行对比，可以判断监测方法是否能够准确预测出带电作业的临界安全距离。在所提方法下带电作业安全距离监测数据拟合度测试结果如图 5 所示。

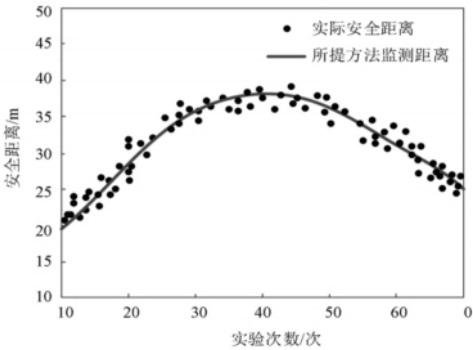


图 5 所提方法下带电作业安全距离监测数据拟合度

根据图 5 分析，研究方法下带电作业安全距离监测数据与实际数据的拟合度非常高，说明研究方法得到的结果具有较高准确性。

设置输电电场强度从 2.0kV/cm 不断增强至 10.0kV/cm，在此变化下，利用所提方法、文献 [3] 方法以及文献 [4] 方法开展带电作业安全距离监测，所得结果如下表所示。

表 不同方法安全距离监测结果对比

变电站 电场强度 (kV/cm)	实际配电站 临界安全 距离/m	临界安全距离实时监测 实际效果测试结果/m		
		所提 方法	文献[3] 方法	文献[4] 方法
2.0	16	16.1	17.2	16.9
3.0	18	18.0	19.6	18.5
4.0	21	21.0	20.7	21.7
5.0	25	25.0	25.8	25.1
6.0	27	27.2	27.9	29.1
7.0	29	29.0	29.5	30.4
8.0	31	31.1	31.7	31.7
9.0	33	33.0	33.9	33.4
10.0	38	38.0	37.5	38.6

根据上表，文献方法的安全距离监测结果与实际结果出现较大误差。相比之前，研究方法得到的带电作业安全距离与实际距离具有较高一致性，虽然出现了些许误差，但是 0.2m 的误差不影响实际的带电作业操作。实验结果表明了研究方法更具有应用性。

(下转第 74 页)

3 结束语

研究基于 GPS 定位技术和带电作业电滤波器的设计,旨在实现 10kV 配电线路带电作业临界安全距离的实时监测。通过去除电压的无关项并获取变电站的电场边界条件,实时监测电磁分布规律,得出了相应磁场下的带电作业临界安全距离测量方程。该研究方法为 10kV 配电线路带电作业临界安全距离实时监测提供了一种有效途径,具有广阔的应用前景。未来,可以进一步完善监测方法和设备,探索更多的参数和环境因素对带电作业安全距离的影响,以及如何更好地利用实时监测数据进行安全预警和风险评估。这将为电力系统运维人员和带电作业人员提供更可靠的技术支持,保障他们的工作安全。

参考文献

- [1] 吴田,付道睿,彭勇,等. 1000kV 输电线路耐张塔带电作业电位转移电流脉冲波形特征参数研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 2009-2016.
- [2] 马爱清,王洁,毕永翔. 500 kV 交流线路对并行 ± 800 kV 直流线路带电作业人员安全防护的影响[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 128-136.
- [3] 袁宸胤,陈泉智,陈力. 多物理量传感的输电线路安全距离测量及数据在线融合处理技术[J]. 电子器件, 2023, 46(2): 548-556.
- [4] 丁玉剑,李嘉伟,苏宇,等. ± 1100 kV 耐张串双人带电作业安全距离试验和电场分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 2011-2020.

(收稿日期: 2024-01-15)