

基于激光传感器阵列的绝缘子识别定位方法

陈昊¹,陈玮光¹,徐鹏¹,徐伟伦²,叶俊杰³

- (1. 国网江苏省电力有限公司 检修分公司,江苏 南京 211102;
2. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司,江苏 南京 210019;
3. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:为了解决变电站绝缘子自动清扫的识别定位问题,提出一种基于特定分布结构的激光传感器阵列的柱状绝缘子识别定位方法。确定激光传感器阵列空间分布和位姿约束;提出基于竖直同轴传感器阵列测距结果处理绝缘子的检测方法;采用特定位姿变换中同轴传感器阵列记录的传感器测距结果的伞裙半径特征检测方法,提出基于同轴传感器阵列测距差的朝向校对方法,搭建仿真模型完成硬件设计与研制。现场试验结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:绝缘子清扫;激光传感器阵列;特征检测;自动定位

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0189-05

An Insulator Identification and Location Method Based on Laser Sensor Array

CHEN Hao¹, CHEN Weiguang¹, XU Peng¹, XU Weilun², YE Junjie³

- (1. Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance, Nanjing 211102, China;
2. Nanjing Power Supply Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To solve the problems of identifying and locating automatic insulator cleaning of transformer substation, a method based on ranging data from laser sensor array with specific distribution structure is proposed. The spatial distribution and pose constraints of laser sensor array are determined. A detection method based on the distance measurement results of vertical coaxial sensor array is put forward. A feature detection method aiming at shed radical of insulator based on the sensor ranging results recorded by coaxial sensor array in specific pose transformation is applied to design an orientation correction method based on the ranging error of coaxial sensor array, with which, a simulation model is built to complete hardware design and development. The field test results verify the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: insulator cleaning; laser sensor array; feature detection; automatic positioning

0 引言

随着我国超特高压电网建设的不断推进,超特高压变电站电气设备的安全运行水平日益为人瞩目^[1]。绝缘子作为电气设备的外绝缘,其性能直接关系到电气设备的健康水平。随着设备运行时间的增加,绝缘子表面上会逐渐附着污秽,造成绝缘水平降低,引发污闪,甚至造成设备损坏或停电。

绝缘子清扫是防污闪的重要措施^[2]。传统的清扫方式主要依靠人力进行绝缘子清扫,但是此方法清扫效率低、难度大、需要登高作业,清扫人员的安全性难以保障。目前围绕绝缘子清扫机器装置已经进行了许多研究,文献[3]实现免登高辅助清扫,仍然属于人工清扫范畴;文献[4-5]通过升降平台配合替代人力清扫,但是其不具备识别和检测绝缘子的能力,需要人工对准绝缘子。

为了进一步提高机器人的自动化,需要着手解决绝缘子机器人的绝缘子检测与定位问题,从而提升绝缘子清扫机器人的智能化水平^[6]。此外,为了保证清扫的有效性,应保证清扫刷头能够有效对准绝缘子伞裙之间的柱芯处。目前已有的绝缘子检测主流思路是通过机器视觉算法或其他模型训练检测算法^[7-10],基于可见光图像数据实现绝缘子的识别,但是其运算量较大且无法获取绝缘子相对于机器人的深度信息。

变电站中常见的立式陶瓷支柱绝缘子具备两个空间几何特征:1)伞裙分布高度间隔相等;2)伞裙半径近似相等。本文基于此研究了一种基于激光传感器^[11]阵列测距结果的绝缘子识别定位方法^[12],该方法首先将激光传感器在空间中按照特定位姿要求进行排布,而后通过读取阵列测距信息,结合绝缘子伞裙特征对阵列探测物体进行特征筛选,实现绝缘子的初步检测。而后激光传感器阵列进行特定位姿变换,并在此过程中持续记录激光测距传感器

基金项目:国家自然科学基金项目(51807028)

第一作者简介:陈昊(1980—),男,江苏南京人,研究员级高工,高级技师,博士,从事变电检修研究。

阵列数据并对结果进行分析,从而实现绝缘子的目标检测、绝缘子中心轴定位以及绝缘子截面圆最大半径对应高度的定位,并根据定位反馈结果校正清扫机械臂的位置,从而实现绝缘子附污的有效清扫。

1 绝缘子特征建模

针对本文所研究的变电站陶瓷支柱式绝缘子,其典型结构如图 1(a)所示,提取其空间结构几何特征及相关参数,其具备以下特征:

- 1) 绝缘子水平横截面可视作圆形;
- 2) 绝缘子水平截面圆半径与横截面离地高度呈现明显的周期性变化规律;
- 3) 绝缘子存在大小伞裙,故其水平截面圆的半径随高度变化存在交替的峰值,但谷值相同。

由于本方法的检测目标为伞裙的最小半径,与绝缘子纵截面曲线形状不直接相关。这里选取复合正弦函数对绝缘子侧面伞裙截面圆半径随高度的变化规律进行近似拟合,拟合公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} r = R_{\min} + \text{abs} \left[L \times \sin \left(\frac{h}{T} \times 2\pi \right) + l \right] + \varepsilon_i \\ L = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} + \frac{R_{\text{sec}} - R_{\min}}{2} \\ l = \frac{R_{\max} - R_{\text{sec}}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{\max} 、 R_{sec} 、 R_{\min} 依次表示绝缘子的最大半径、第二半径和最小半径; T 表示绝缘子相邻最大半径伞裙的高度差; r 表示伞裙高度为 h 时绝缘子横截面的圆形半径; ε_i 表示随机误差,服从密度函数为下式的广义 t 分布。

$$f_{CT}(\varepsilon_i; \nu, g) = \frac{\nu}{2\sigma_i b g^{\frac{1}{\nu}} B(\nu^{-1}, g) \left(1 + \frac{|\varepsilon_i|^\nu}{g b^\nu \sigma_i^\nu} \right)^{g + \frac{1}{\nu}}} \quad (2)$$

式中:参数 $\nu > 0, g > 0$ 且有 $\nu g > 2$;Beta函数 $B(\nu^{-1}, g) \equiv \Gamma(\nu^{-1})\Gamma(g)/\Gamma(\nu^{-1} + g)$; σ_i 为 ε_i 的标准差; $b \equiv \sqrt{\Gamma(\nu^{-1})\Gamma(g)/\Gamma(3\nu^{-1})\Gamma(g - 2\nu^{-1})}$;当 $\nu = 2$ 时,广义 t 分布退化为 t 分布,自由度为 $2g$;当 $\nu \rightarrow \infty$ 时,广义 t 分布退化为广义误差分布。

据此,建立绝缘子表面模型如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2(h) \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: h_{\max} 和 h_{\min} 分别是绝缘子的顶端高度和末端高度; x 和 y 分别为绝缘子水平剖面的径向和轴向的坐标位置。

本文选用的典型绝缘子特征数据如表 1 所示,设定相关参数后构建绝缘子数学模型如图 1(b)所示。

表 1 典型绝缘子参数 单位:cm

伞裙高度差	最大半径	第二半径	最小半径	最大高度	最低高度
10	24	22	16	200	0

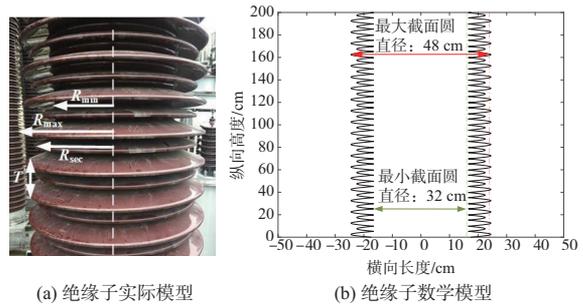


图 1 绝缘子建模结果

2 激光传感器阵列建模

本课题设计并研制相应的绝缘子清扫机器人如图 2 所示,其中配套相应的丝杠模组和电机驱动模块,可以控制清扫手爪进行平面移动或升降。清扫手爪安装于丝杠模组上,具备开合能力,且集成有两组清扫刷。通过清扫刷的旋转可以有效去除绝缘子表面的灰尘或污渍。

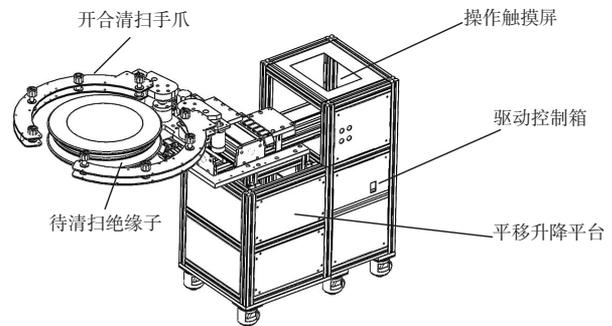


图 2 基于激光传感器阵列的绝缘子清扫机器人

激光传感器阵列由 5 个激光传感器组成,按照空间分布规律主要可以分为两部分:水平阵列和垂直阵列,如图 3 所示。为针对绝缘子识别定位过程进行仿真,首先需要确定激光阵列传感器的空间位置。以地面为基准面,以垂直传感器阵列的投影点为原点建立如图 3 所示的 $Oxyz$ 坐标系以描述该空间位置信息。由于激光传感器均安装于清扫手爪上,忽略激光传感器物理尺寸,采用 (x_i, y_i, z_i) 表示 5 个传感器的空间坐标位置,其中 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

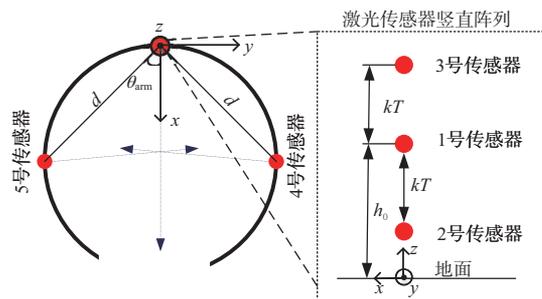


图 3 激光传感器阵列示意图

1) 垂直阵列

垂直阵列由 3 个激光测距传感器组成,其安装于开合

清扫手爪的根部。3个传感器位于同一竖直轴且朝向一致。根据安装位置从高到低分别为3号传感器、1号传感器和2号传感器。其中 h_0 为绝缘子特征检测过程中所得到的机器人清扫手爪离地的初始高度, k 为正整数, T 为竖直阵列传感器高度差。根据图3所建立的坐标系,1号传感器的初始坐标位置为 $(0, 0, h_0)$ 。进一步根据竖直分布特点,2号传感器的初始坐标可以表示为 $(0, 0, h_0 - kT)$,3号传感器的初始坐标可以表示为 $(0, 0, h_0 + kT)$ 。

2) 水平阵列

水平阵列由两个激光测距传感器组成,其安装于机械臂清扫手爪上,与1号传感器处于同一水平面内。为了便于表述,规定在俯视情况下安装于1号传感器左侧的为4号传感器,右侧为5号传感器。1号传感器到4号传感器、5号传感器距离为 d ,且其连线与竖直平面的夹角大小相等,均为 θ_{arm} 。同理,结合水平分布特点,4号传感器的初始坐标可以表示为 $(d\cos\theta_{\text{arm}}, d\sin\theta_{\text{arm}}, h_0)$,5号传感器的初始坐标可以表示为 $(d\cos\theta_{\text{arm}}, -d\sin\theta_{\text{arm}}, h_0)$ 。

根据上述传感器坐标定义,当绝缘子清扫机器人的清扫手爪进行平面开合动作时,1-3号传感器的位置保持不变。4号和5号传感器的高度保持不变,投影位置随开合角度 $\Delta\theta$ 产生变化,其位置坐标表示为式(4)所示。

$$\begin{cases} x_4 = x_5 = d\cos(\theta_{\text{arm}} + \Delta\theta) \\ y_4 = -y_5 = d\sin(\theta_{\text{arm}} + \Delta\theta) \\ z_4 = z_5 = h_0 \end{cases} \quad (4)$$

当绝缘子清扫机器人进行升降操作时,所有传感器的投影位置不变,高度同步增减,具体位姿描述如式(5)所示。

$$\begin{cases} x_i = x_i^0, & (i = 1, 2, 3, 4, 5) \\ y_i = y_i^0, & (i = 1, 2, 3, 4, 5) \\ z_i = z_i^0 + \Delta z, & (i = 1, 2, 3, 4, 5) \\ h_{\min} < z_i < h_{\max}, & (i = 1, 2, 3, 4, 5) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δz 表示上升高度; h_{\min} 和 h_{\max} 表示清扫装置升降允许的最小和最大高度。

3 绝缘子检测与定位方法

本文所用机械臂的手爪结构由两个可以开合的弧形刚体臂组成,如图4(a)所示。在进行绝缘子检测与定位时手爪处于打开状态,在完成绝缘子朝向校对和伞裙位置检测后手爪闭合,并开始清扫。需要注意的是,由于激光测距传感器为点对点测距,其波束很窄,相较于超声波测距方式而言并不会产生耦合效应。因此,只需要通过对各个传感器的测距结果进行综合判断即可。基于激光传感器阵列的绝缘子检测定位的具体工作流程如图5所示,主要步骤如下。

步骤1:读取1-3号传感器的测距结果,进行绝缘子初步检测;

步骤2:识别到可能是绝缘子的物件后,清扫机器人缓慢下降 $2T$ 高度(两倍绝缘子相邻最大半径伞裙的高度差),如图4(b)所示,记录激光传感器测距结果,进行绝缘子的特征检测并记录绝缘子伞裙半径的极大值所对应高度(简称为目标高度),即完成了清扫初始高度位置 h_0 的确定;

步骤3:确认物体为绝缘子后,根据步骤2的记录结果提取目标高度并归位至此高度,控制丝杠模组进行平移,读取1-3号传感器测距结果,在测距结果取得极小值时停下,使机械臂对准绝缘子竖直对称轴,清扫手爪移动至初始清扫位并进入后续抱合清扫流程;

步骤4:根据1号传感器测距结果控制机械臂靠近绝缘子并保留设定的安全距离,根据4-5号绝缘子的测距结果控制手爪闭合并保留对应安全距离,开始清扫作业。

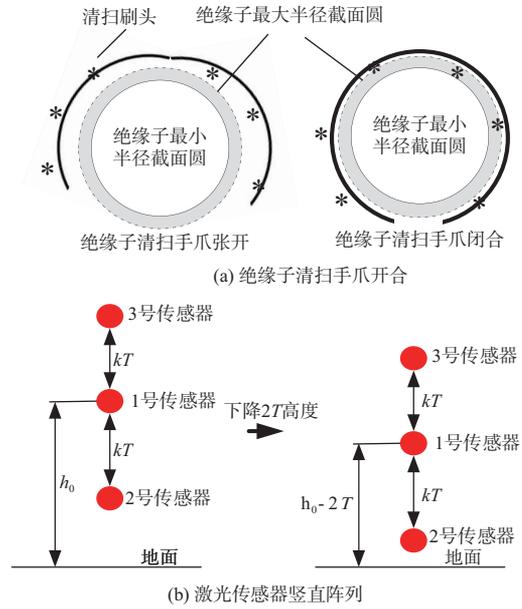


图4 绝缘子识别定位流程

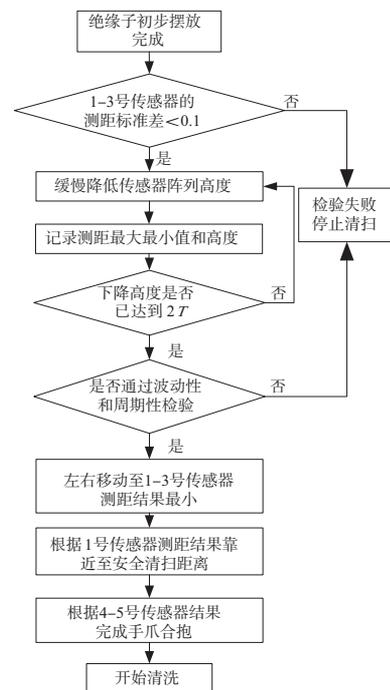


图5 绝缘子清扫机器人工作流程

3.1 绝缘子初步检测

针对绝缘子初步检测过程,激光传感器竖直阵列首先

原地转向,并读取 1-3 号传感器的测距结果。由于其高度差为绝缘子半径变化规律周期 T 的若干整数倍,激光传感器竖直阵列的测距结果应该近似相等。因此,若测距结果满足式(6)约束,则认为可能检测到绝缘子的器件。

$$\text{std}(\{d_i | i=1,2,3\}) < \alpha \quad (6)$$

式中: d_i 表示第 i 个传感器的测距结果; α 为初步检测判定阈值; $\text{std}(\cdot)$ 表示标准差。

3.2 绝缘子特征检测及目标高度提取

在完成初步检测后,需要针对绝缘子的伞裙特征进行进一步的特征提取,以验证并确定激光传感器阵列所朝向器件为绝缘子。检测过程可以划分为波动性检测和周期性检测两类,只有同时满足波动性和周期性特征时,才能确认其为绝缘子。

1) 绝缘子侧面波动性检测

绝缘子的伞裙结构势必会使得激光传感器在高度发生变化时的测距结果呈现明显的波动性,故完成初步检测后控制清扫手爪缓慢下降 $2T$ 高度,在此过程中读取竖直阵列中 3 个激光传感器测距结果。为降低数据存储量和运算量,只保留其各自测距结果的最大、最小值,而后根据下式进行波动性检测:

$$\min(d_m - d_{\min}) > \delta; \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

式中: $d_{\min}(i=1,2,3)$ 表示 1-3 号传感器在下降过程中测得的最小距离; d_m 表示测得的最大距离; $\min(\cdot)$ 表示取最小值; δ 表示波动性检测阈值,一般略小于绝缘子最大半径与最小半径差。

2) 绝缘子侧面周期性检测

绝缘子的伞裙结构除了呈现明显的波动性,还呈现明显的周期性,故依旧根据下降 $2T$ 高度过程中各个传感器测距结果的最大、最小值,进行如式(8)所示的绝缘子的周期性检测:

$$\|(\text{std}(d_{\min}), \text{std}(d_m))\|_2 < \xi; \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

式中: $d_{\min}(i=1,2,3)$ 表示 1-3 号传感器在 $2T$ 的下降过程中测得的最小距离; $d_m(i=1,2,3)$ 表示所测得的最大距离; $\text{std}(\cdot)$ 表示标准差; $\|\cdot\|_2$ 表示求取向量的 2 范数; ξ 表示设置的周期性检测阈值。

此外,在下降 $2T$ 高度的过程中,记录 1 号传感器测距结果最小值对应的高度作为对应的目标高度。在目标物体通过波动性和周期性检测后,控制机械臂归位至目标高度,进行后续清扫工作。

3.3 激光传感器阵列平移定位调整

由于圆形的高度对称性,单看传感器测距结果无法确定机械臂的平移调整方向,故将其分为位置判别和定位调整两个阶段。

1) 位置判别

由截面圆的几何性质可知,在机械臂左右平移过程中,机械臂朝向穿过截面圆心时测距结果最小如图 6(a)所示。在进行位置判别时,首先记录当前 1-3 号绝缘子的测距结果均值 rd_0 ,而后让机械臂向左平移 3 cm,记录测距结果为 rd_1 ,比较 rd_0 和 rd_1 的大小,若 $rd_0 > rd_1$,则圆心位于机械臂左侧,反之则圆心位于机械臂右侧,如图 6(b)所

示。考虑到有测量误差问题,本文使用 1-3 号传感器的测距均值作为参考,尽可能抵消误差影响。

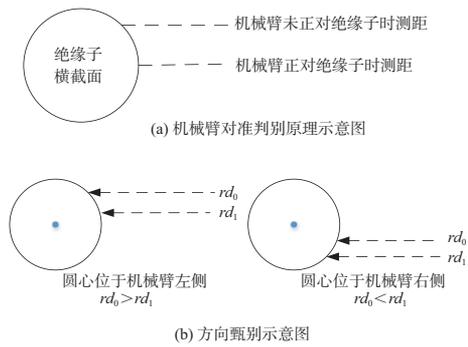


图 6 机械臂位置判别

2) 定位调整

确定移动方向后,控制机械臂进行水平方向的平移运动。由于机械臂的移动是通过平移丝杠模组实现的,因此模组的平移速度可以通过控制丝杠模组驱动电机的 PWM 脉冲来进行修改。为了保证运动过程的安全平稳,装置将移动速度设定为 2 mm/s,此时,可以忽略运动过程的加速和减速过程,将平移运动简化为匀速直线运动。持续记录 1-3 号传感器测距均值,当测距结果满足式(9)时停止运动。此时认为测距结果已经取得极小值,定位调整完成,机械臂与目标绝缘子完成对准。

$$\begin{cases} rd(t) - rd(t-1) > 0.05, & t > 1 \\ rd(t) = \text{average}(d_1, d_2, d_3) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $d_1 \sim d_3$ 表示 1-3 号传感器的测距值; $rd(t)$ 为 t 时刻测距参考量; $rd(t-1)$ 为前一时刻测距参考量。

3.4 机械臂靠近抱合

在机械臂对准圆心后,为了方便手爪抱合,需要控制机械臂向前水平运动靠近绝缘子至有效清扫范围。为保证机械臂不会触碰到绝缘子并加快机械臂的接近速度,本文采用 1 号传感器的测距结果与期望距离的差值设计对应的比例控制器。由截面圆的几何性质可知,即机械臂的单步前进距离计算公式如式(10)所示。

$$\Delta y = k_y (d_1 - d_{\text{safe}}) \quad (10)$$

式中: d_1 表示 1 号传感器的测距值; k_y 为比例常数,且为了避免损坏绝缘子,取值应当较小; Δy 表示机械臂单步前进步长; d_{safe} 为预设安全距离。

当机械臂已经运动至预设距离以后,进一步根据 4-5 号绝缘子的测距结果控制手爪闭合并保留对应安全距离。此时,机械臂已保证目标绝缘子位于抱合中心,确保了清扫的安全性和有效性。

4 实验结果

在 Matlab 中搭建数学模型验证算法的有效性,进而研制相应的绝缘子自动清扫机器人并配置相应的激光传感器阵列,通过现场实地测试进一步验证所提方法的可行性。

4.1 绝缘子特征检测仿真分析

绝缘子特征检测主要通过比对 3 个同轴激光传感器

(1-3号)测距结果的峰谷值的一致性和峰谷差的波动性来进行判定所朝向物体是否是绝缘子,如图7所示。表2为测距结果记录。该仿真结果表明本文提出的基于激光阵列传感器的绝缘子识别定位方法可以有效提取绝缘子的周期性波动特征数据,并为后续的定位调整提供参考。

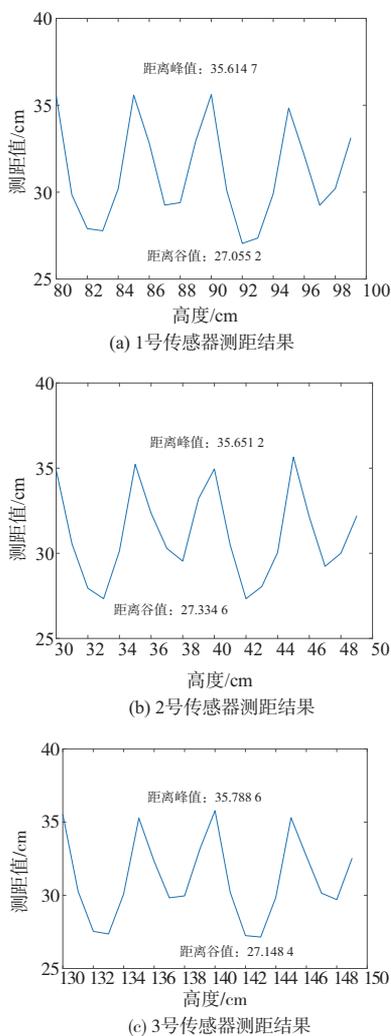


图7 特征检测过程传感器测距结果

表2 绝缘子特征检测结果 单位:cm

传感器编号	距离峰值	距离谷值
1	35.614 7	27.055 2
2	35.651 2	27.334 6
3	35.788 6	27.148 4

4.2 硬件实验

清扫装置的基本设计目标是实现绝缘子的安全可靠清扫。作业可靠性要求装置可以准确识别绝缘子并保证其基本处于清扫手爪的中心位置,而作业安全性则要求装置抱合及清扫过程不会与绝缘子本体发生碰撞。

上述建模与仿真过程并没有考虑实际定位过程中的精度问题,而在实际应用中,绝缘子识别定位的精度取决于激光测距传感器的精度。本文选用 WT-VL53L0 型激

光测距传感器,测距精度为 20 mm。对于绝缘子识别检测的过程,由于关注的重点在于测距峰谷值的一致性和峰谷差的波动性,因此激光测距传感器的精度并不会对结果造成影响。而对于装置的定位调整过程,由于柔软清扫毛刷所具备的容差裕度以及距离判别式所设定的安全距离裕度均大于 20 mm,因此同样可以有效保证抱合清扫作业的可靠性和安全性。

基于此,研制相应的绝缘子自动清扫机器人,部署激光传感器阵列,并在南京电网某 500 kV 设备现场进行试验测试,如图8所示。

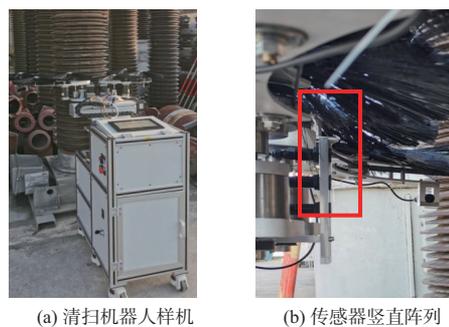


图8 绝缘子自动清扫机器人

绝缘子清扫机器人可以通过触摸屏选择手动或自动工作模式。手动工作模式下可以控制清扫手爪移动或开合,实时显示并记录相应的测距数据,为自动模式提供参考。自动模式下需预先设定的绝缘子参数和动作参数,机器人将以此为参考量自动调整清扫手爪位置,实现对绝缘子的定位抱合以及清扫。针对绝缘子的每一伞裙,清扫手爪首先进行定位调整并抱合,清扫电机动作,控制清扫刷旋转完成清扫,然后手爪打开并上升设定距离,进行下一伞裙的清扫工作。

经过现场实验,清扫手爪的平移调整时间约为 10 s,调整过程的测距关键数据如图9所示。绝缘子接近过程总时间约为 20 s,机械臂平滑接近绝缘子,没有超过预设的安全距离(5 cm),保证了后续清扫的可靠性与安全性。清扫机器人具体的动作速度可以根据预设的运动参数进行灵活调整,通过多次调试以保证整个清扫过程具有良好的平稳性与一致性。

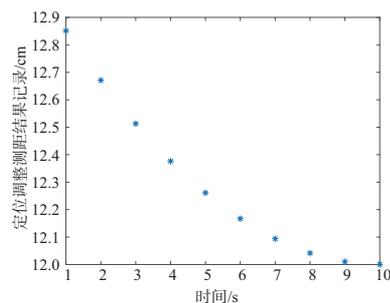


图9 机械臂定位调整测距结果

试验结果表明:该绝缘子清扫机器人具有良好的绝缘子清扫能力;能有效实现伞裙半径极值高度检测和绝缘子定位抱合,适用性强稳定性好。

(下转第 203 页)

下,电机跟随误差随负载的增大而增大。

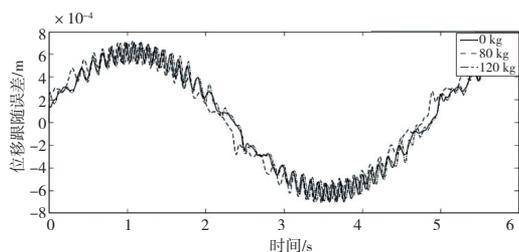


图 16 频率 0.2 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

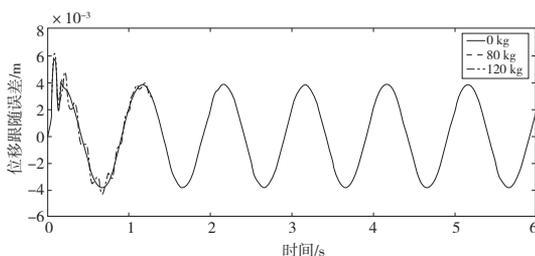


图 17 频率 1.0 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

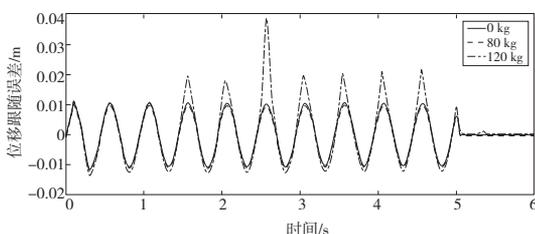


图 18 频率 2.0 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

4 结语

本文通过理论分析,建立了直线电机的动力学模型和

控制系统模型,采用传递函数算法与衰减曲线调整法相结合的方法对直线电机的控制系统理论模型进行参数整定。先通过传递函数算法初步得到控制器参数,以此为基础,在仿真模型上采用衰减曲线调整法对控制器参数进行调整优化确定控制器最终参数。通过实验进行了整定参数的对比分析,验证了该方法的有效性。通过此方法可以节省直线电机控制器参数的人工调整时间,避免因参数设置不当带来的调试风险,并通过实验分析得到了不同负载和不同速度对直线电机跟随误差的影响规律,这对后续控制系统优化具有指导意义。

参考文献:

- [1] 郭雷涛. $\Phi 1$ 米高超声速风洞动数试验技术研究[D]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2013.
- [2] 李翔. 高速高精度直线电机伺服控制系统设计[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [3] 袁登科,徐延东,李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [4] 陶昆,王春梅,张利琼. 永磁同步直线电机控制系统综述[J]. 煤矿机械,2014,35(5):14-16.
- [5] 解小刚,陈进. 采用 $i_d = 0$ 的永磁同步电机矢量控制系统 MATLAB/Simulink 仿真[J]. 新型工业化,2016,6(5):47-54.
- [6] 仇静. 基于 PID 的直线电机控制方法及实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- [7] 孙宇贞,郭腾,潘晖. 基于 VRFT 算法的直线电机 PID 控制[J]. 自动化应用,2017(4):25-28.
- [8] TING C S, LIEU J F, LIU C S, et al. An adaptive FNN control design of PMLSM in stationary reference frame[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2016, 27(4):391-405.
- [9] 隋延飞,李旭,李星占,等. 基于模糊自抗扰的精密直线电机运动控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(6):6-11.

收稿日期:2021-10-11

(上接第 193 页)

5 结语

本文提出了一种基于特定分布的激光传感器阵列测距信息的绝缘子识别定位方法,并通过仿真建模和硬件现场测试证明了方法的有效性。该方法计算量低,可靠性高,不受复杂的外部环境干扰,且在定位的同时可以有效获取深度信息。现场试验结果表明,使用该识别定位方法的清扫机器人可以高效安全地完成绝缘子清扫工作。

参考文献:

- [1] 陈昊,邓广静,王玉荣,等. 电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(18):122-126.
- [2] 张晋,汲胜昌,曹涛,等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望[J]. 绝缘材料,2009,42(2):63-66.
- [3] 张涛,毕睿华,张云翔,等. 基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电清扫技术的研究[J]. 四川电力技术,2015,38(3):12-14,22.
- [4] 陈昊,陈玮光,叶昱媛,等.500 kV 瓷套清扫机械臂的研制[J].

- 机械制造与自动化,2021,50(2):168-170,193.
- [5] 王林,王洪光,景凤仁,等. 一种垂悬绝缘子带电清扫机器人机构设计[J]. 机械设计与制造,2019(1):232-235.
- [6] HUANG X N, XIE Y W, MA C J, et al. Design and application of insulator detection robot system for UHVDC transmission line[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2019, 7(4):106.
- [7] 吉志朋,张国伟,卢秋红. 基于感受野模块的绝缘子实时识别定位方法[J]. 电工电气,2020(9):19-22,32.
- [8] 吴君鹏,唐少博,李相磊,等. 一种改进的基于卷积神经网络的绝缘子检测算法研究[J]. 电测与仪表,2022,59(5):116-122.
- [9] 申泽浩,牛萍娟,石浩,等. 融合多层卷积特征的绝缘子目标检测[J]. 中国科技论文,2020,15(7):807-813.
- [10] TOMASZEWSKI M, MICHALSKI P, OSUCHOWSKI J. Evaluation of power insulator detection efficiency with the use of limited training dataset[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6):2104.
- [11] 阎成勇,高旭东,邢宗义,等. 基于激光传感器的高铁雪深多点测量研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):214-218.
- [12] 刘理民,王金宇,毛文华,等. 基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊1):347-353,359.

收稿日期:2021-04-29