

垂直变速变负载直线电机控制系统研究

冯立文,陈春桦,伍广

(西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

摘要:以飞行器动导数实验装置上的直线电机为研究对象,针对电机在垂直方向上的变负载、变频率正弦振荡运动情况,通过理论与仿真分析,整定控制系统参数以获得较高的动态控制精度。推导直线电机动力学方程,建立直线电机的矢量控制模型;通过理论推导和MATLAB/simulink仿真对控制系统的参数进行整定;再通过实验对参数进行验证。实验结果表明:该方法得到的参数具有较高参考价值,并通过实验探究了速度和负载变化对电机跟随误差的影响规律。

关键词:直线电机;伺服控制;变速;变负载;MATLAB/simulink;参数整定;跟随误差

中图分类号:TP273+.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0199-05

Research on Control System of Vertical Variable Speed and Variable Load Linear Motor

FENG Liwen, CHEN Chunhua, WU Guang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the linear motor in aircraft dynamic derivative experimental device as the research object and aimed at the motor movement with variable load and variable frequency sinusoidal oscillation in the vertical direction, the control system parameters, through theoretical and simulation analysis, are adjusted to obtain higher dynamic control accuracy. The dynamic equation of linear motor is derived to establish the vector control model of linear motor. The control system parameters are adjusted by theoretical derivation and MATLAB/simulink simulation, and finally verified by experiments. The experimental results show that the parameters obtained by this method have high reference value. And the influence law of speed and load change on motor following error is explored through the experiments.

Keywords: linear motor; servo control; variable speed; variable load; MATLAB/Simulink; parameter tuning; following error

0 引言

战斗机在大迎角过失速飞行时会产生分离、旋涡等复杂流动,其气动力呈现出高度的非线性和非正常特性。飞机的气动力特性除了与飞机迎角、侧滑角等参数的瞬时值有关,还与这些参数随时间的变化率以及当前的运动历程有关。这些因素会对空气动力的非线性、空气动力交叉耦合、空气动力与时间的相关性、空气动力迟滞等特性产生影响。为了获取准确的战斗机过失速机动等动态气动力特性数据,需要进行动导数试验和大振幅振荡试验^[1]。

永磁同步直线电机能将电能直接转化为直线运动的机械能,不需要中间传动装置,具有结构简单、工作效率高、动态精度高、响应快、抗冲击等特点^[2],因此飞机动导数实验装置采用直线电机实现大振幅、高频率正弦振荡运动。直线电机在垂直方向上进行变负载、变频率正弦振荡运动,且最大负载和最大速度都很高,为了控制电机振荡曲线精度,需要对直线电机控制系统的参数进行整定。

永磁同步直线电机由旋转电机演变而来,控制原理与旋转电机类似。针对矢量控制系统的参数整定优化已有

大量研究^[3-4],主要包括传递函数算法^[5]、曲线整定法^[6]和智能优化算法^[7-9]。传递函数算法是指通过对闭环控制系统的传递函数进行分析与变换,转换成标准传递函数,对PI参数进行计算。使用该方法必须建立控制系统的精确传递函数模型,且传递函数不能过于复杂,否则难以进行推导且计算得到的参数误差较大。PID控制参数整定是指控制系统已知,根据某控制对象确定控制器参数,以满足控制要求。由于调节实际控制器的参数需要花费一定时间,且具有危险性,所以可利用PID整定方法在控制器仿真模型上获得一组粗略的PID参数,在此基础上进行实际控制器参数的人工调节,这样可以在较短时间内获得较优的控制参数。

1 直线电机的矢量控制数学模型

直线电机类型丰富、安装简单,但对安装精度要求较高。本文研究对象为平板式直线电机,电机型号为1FN3450-4WE00-0BA3。实验装置直线电机的安装方式为垂直安装,图1为永磁同步直线电机垂直布局的受力分析。

基金项目:四川省科技项目(2020YFN0062)

第一作者简介:冯立文(1996—),男,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制设计。

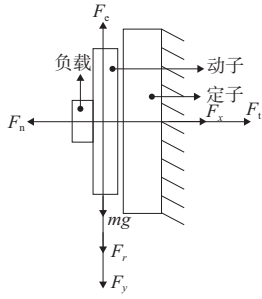


图1 永磁同步直线电机的受力分析

由图1可得永磁同步直线电机的机械系统动力学方程为

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - F_r - F_y - mg \quad (1)$$

$$F_n = F_x + F_t \quad (2)$$

式中： m 为动子与负载总质量； F_e 为电磁推力； F_r 为摩擦力； F_y 为垂直方向气动载荷； F_x 为水平方向气动载荷； F_t 为初级和次级间的吸引力； F_n 为支持力。

在 $d-q$ 坐标系下永磁同步直线电机的模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_{PM} \end{cases} \quad (3)$$

式中： u_d 和 u_q 为 d 和 q 轴电压； i_d 和 i_q 为 d 和 q 轴电流； L_d 和 L_q 为 d 和 q 轴同步电感系数； R_s 为定子绕组的电阻； ψ_d 和 ψ_q 为 d 和 q 轴磁链； ψ_{PM} 为永磁体在绕组中产生的磁链； $\omega = P_n \omega_r$ 为动子电角速度， P_n 为极对数， $\omega_r = \pi v / \tau$ 为机械角速度， v 为动子线速度， τ 为极距。

假定不存在任何干扰时，永磁同步直线电机的输入总功率为

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) + P_n \omega_r (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (4)$$

上式中最后一项为电机的电磁功率。

$$P_e = F_e v = \frac{3}{2} P_n \omega_r (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5)$$

由此可得电机电磁推力为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} P_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (6)$$

当忽略磁路饱和的影响时，磁链可由直轴和交轴电流线性表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

代入上式可得

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} P_n (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (8)$$

当直线电机气隙均匀时，直轴和交轴的同步电感系数相同，即 $L_d = L_q = L$ ，则可得直线电机电磁推力为：

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} P_n (\psi_{PM} i_q) = K_t i_q \quad (9)$$

$$K_t = \frac{3\pi}{2\tau} P_n \psi_{PM} \quad (10)$$

式中 K_t 为电磁推力系数，为直线电机常量系数。

综上，永磁同步直线电机的简略控制模型为：

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_{PM} \\ K_t i_q = m \ddot{x} + B \dot{x} + F_d \end{cases} \quad (11)$$

式中： F_d 为外部作用力合力， $F_d = F_r + F_y + mg$ 。

采用 $i_d = 0$ 的控制策略时，经过拉普拉斯变换可得到无铁芯永磁同步直线电机的传递函数模型如图2所示。图中 K_e 为永磁同步直线电机的反电动势常数。

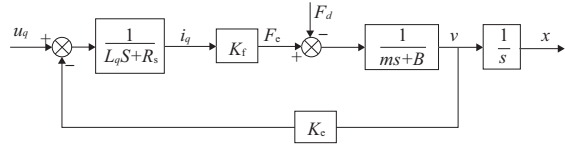


图2 直线电机传递函数模型

2 控制系统参数整定与仿真优化

2.1 电流环参数整定与仿真优化

矢量控制的是动子电流，进而能控制电机的电磁力。如果电流环设计合理，可以达到减弱电压波动，加快动态的跟踪响应，稳定控制系统运行的效果。直线电机电流环传递函数模型如图3所示。

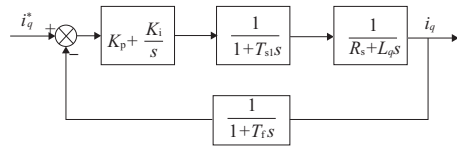


图3 电流环传递函数模型

为了得到最佳PI参数，一般有两种方法：传递函数分析法和曲线整定法。由于难以建立系统精确的传递环数，两者都难以得到最优值。因此，先采用传递函数分析法对参数进行初步确定，再通过Simulink仿真使用曲线整定法对参数进行调整。

常用的PI调节传递函数为

$$G_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (12)$$

式中 $K_i = K_p / T_i$ 。

根据图3，令 $T_i = L_q / R_s$ ，忽略电流滤波延时 T_r ，电流环模型可被调整成标准的二阶系统。

$$G_i(s)_{close} = \frac{K_g}{s^2 + \frac{2}{3T_{s1}}s + K_g} \quad (13)$$

式中 $K_g = 2K_p / (3L_q T_{s1})$ 。

对比标准的二阶系统传递函数：

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (14)$$

可得:

$$\omega_n = \sqrt{K_g} \quad (15)$$

$$\xi = \frac{1}{3T_{s1}\sqrt{K_g}} = \frac{1}{\sqrt{6K_p T_{s1}/L_q}} \quad (16)$$

PI 调节器的理想阻尼系数一般取 0.707,由此可得 PI 参数为:

$$K_p \approx \frac{L_q}{6\xi^2 T_{s1}} \quad (17)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{R_s}{6\xi^2 T_{s1}} \quad (18)$$

直线电机定子电阻 $R_s = 0.381 \Omega$, 电感 $L_q = 1.8 \text{ mH}$, $K_f = 56.8 \text{ N/A}$, $K_e = 18.9 \text{ V/(m/s)}$, 极对数为 $P_n = 3$, 转子磁链黏滞摩擦系数 $B = 0.2 \text{ N/(m/s)}$, 动子及负载总质量 $m = 114 \text{ kg}$, 系统延时 $T_{s1} = 0.000\ 062\ 5 \text{ s}$ 。

由式(17)、式(18)计算得 $K_p = 9.6$, $K_i = 2\ 032.6$ 。在 Simulink 中建立电流环控制系统仿真模型如图 4 所示。将计算出来的 PI 参数代入系统阶跃响应如图 5 中虚线所示,再经过衰减曲线法整定后的阶跃响应曲线如图 5 中实线所示。超调量、调整时间、稳态误差都达到了较好的效果。

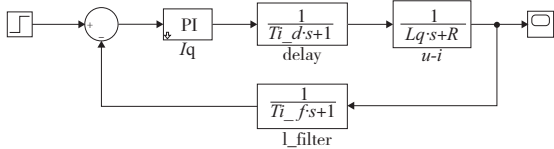


图 4 电流环仿真模型

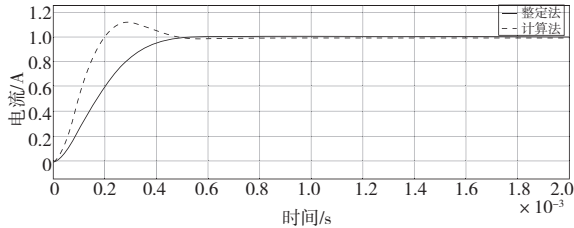


图 5 电流环阶跃信号响应曲线

2.2 速度环仿真与参数优化

直线电机速度环模型如图 6 所示,如果速度外环设计合理,可以减少扰动对系统的影响、减小速度波动,使得系统工作在稳定的状态。同电流环的分析过程,通过传递函数计算得到速度环 PI 参数为 $K_p = 44\ 000$ 。

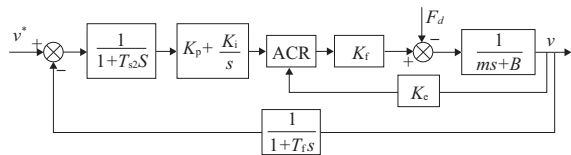


图 6 速度环传递函数模型

直线电机速度环 Simulink 仿真模型如图 7 所示, $T_{s2} = 0.000\ 125 \text{ s}$, 将计算得到的 PI 参数代入仿真模型中,阶跃

响应曲线如图 8 中虚线所示。经过衰减曲线法调整后的阶跃响应曲线如图 8 中实线所示,超调量、调整时间、稳态误差都达到了较好的效果。

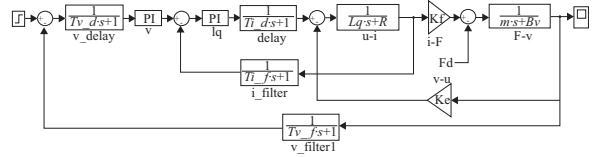


图 7 速度环仿真模型

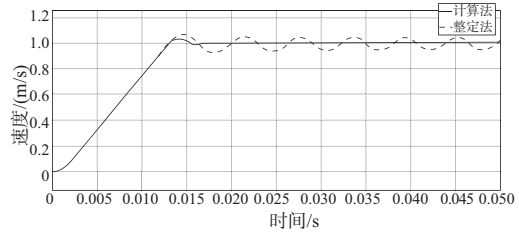


图 8 速度环阶跃信号响应曲线

2.3 位置环仿真与参数优化

直线电机位置环模型如图 9 所示,如果位置外环设计合理,可以实现较高的位移控制精度,使得系统工作在稳定的状态。

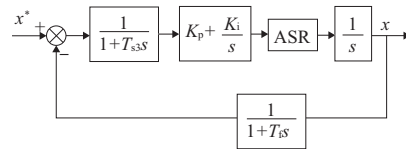


图 9 位置环传递函数模型

位置环在速度环上引入了积分环节和延时环节,属于高阶系统,难以通过传递函数计算得到精确的 PI 参数,这里直接通过曲线衰减法进行参数整定。在 Simulink 中建立仿真模型如图 10 所示;通过衰减曲线法整定后的位置环阶跃响应曲线如图 11 所示,超调量、调整时间、稳态误差都达到了较好的效果。

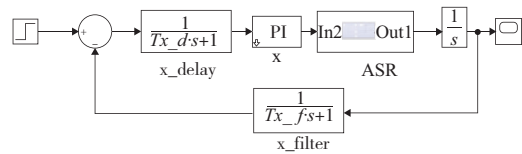


图 10 位置环仿真模型

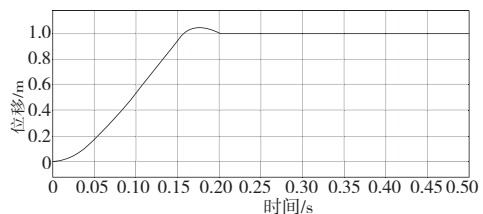


图 11 位置环阶跃信号响应曲线

3 实验与分析

3.1 实验装置介绍

实验装置的名称为飞行器升沉平移动导数试验装置,如图 12 所示。主要由直线电机定子及其支撑结构、直线电机定子及其负载组成。直线电机垂直安装,采用光栅尺进行信号反馈,总行程为 500 mm。控制系统采用西门子 Smotion 运动控制器和 S120 驱动系统。调试软件为 SCOUT,在该软件中对直线电机控制系统的电流环、速度环和位置环进行单独调试优化,通过该软件的 trace 功能对直线电机的各项参数进行记录显示和保存。直线电机控制系统主要指标如表 1 所示。



图 12 动导数实验装置实物图

表 1 直线电机控制系统主要指标

最大振幅/mm	控制振幅精度/mm	最大振荡频率/Hz	位移测量精度/ μm	最大负载/kg
200	0.5	2	1	120

3.2 直线电机实验分析

1) 电流环实验分析

在上位机给定直线电机电流环幅值为 4 A 的阶跃信号,电流环在不同 PI 参数下的响应如图 13 所示。最佳响应曲线如图 13 中粗虚线(响应电流 2),PI 参数为 $K_p = 8.05, K_i = 2\ 025$ (表 2)。由表 2 可知实际 PI 参数值与理论整定值比较接近,表明了上述整定方法的有效性。

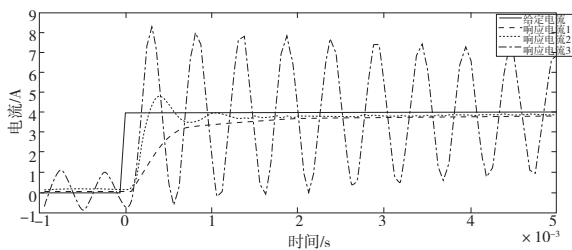


图 13 电流环实验阶跃信号响应曲线

表 2 电流环 PI 参数对比

参数	计算值	衰减曲线法整定值	实际整定值
K_p	9.60	15.00	8.05
K_i	2 032.6	3 000	2 025

2) 速度环实验分析

在上位机给定直线电机速度环幅值为 0.01 m/s 的阶跃信号,速度环在不同 PI 参数下的响应如图 14 所示。最佳响应曲线如图 14 中粗虚线(响应速度 2)所示,PI 参数为 $K_p = 10\ 426.5, K_i = 10$ (表 3)。由表 3 可知实际值与理论整定值有一定差距,这是因为理论模型与实际系统存在偏差,且公式化简计算过程中也有误差。

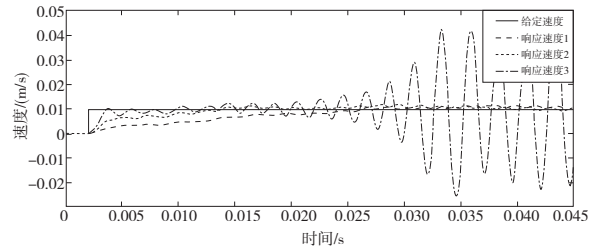


图 14 速度环实验阶跃信号响应曲线

表 3 速度环 PI 参数对比

参数	计算值	衰减曲线法整定值	实际整定值
K_p	44 000.0	4 000.0	10 426.5
K_i	—	30.0	10.0

3) 位置环实验分析

位置环参数经过调试优化后确定为 $K_p = 26$ (表 4)。由表 4 可知位置环参数实际值与理论整定值具有较大差距,说明位置环理论模型与实际系统具有较大偏差,理论模型参数整定法难以得到有效值。

表 4 位置环 PI 参数对比

参数	计算值	曲线衰减法整定值	实际整定值
K_p	—	80	26
K_i	—	—	—

4) 相同负载不同频率下位移跟随误差分析

图 15 为直线电机在不同频率(行程 0.4 m, 负载 80 kg)正弦运动下,位移曲线的跟随误差。从图 15 中可以看出:跟随误差曲线接近正弦曲线,速度反向时误差最大,因为该处冲击载荷最大;随着频率(速度)的增加,跟随误差也增加。

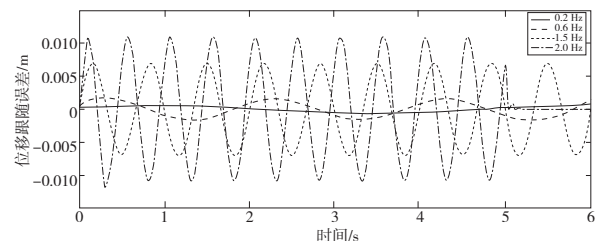


图 15 负载 80 kg 不同频率下电机位移跟随误差

5) 相同频率不同负载下位移跟随误差分析

图 16-图 18 为直线电机在相同频率、不同负载下,正弦位移曲线的跟随误差,行程 0.4 m, 负载分别为 0 kg、80 kg、120 kg。从图中可以看出:低频(低速)情况下,负载的变化对电机跟随误差的影响不明显;高频(高速)情况

下,电机跟随误差随负载的增大而增大。

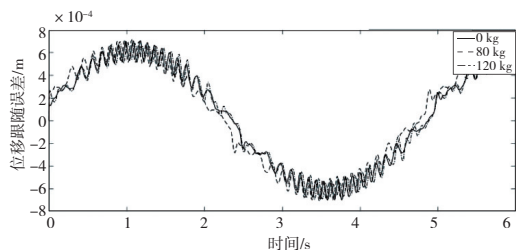


图 16 频率 0.2 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

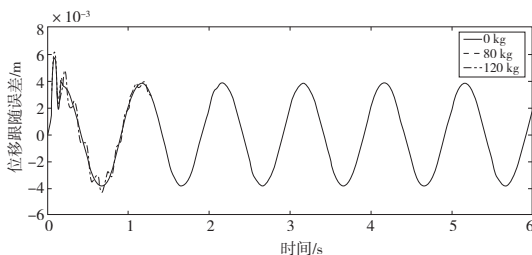


图 17 频率 1.0 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

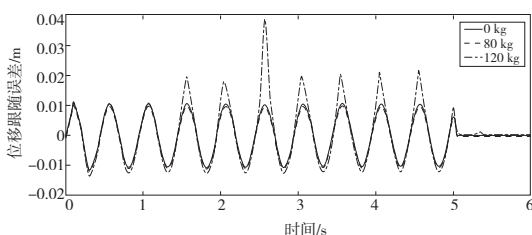


图 18 频率 2.0 Hz 不同负载下电机位移跟随误差

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