

蛙跳式充电的无人机自主巡线技术与系统(一): 基于 GPS/RTK 的无人机自主定位

关家华, 孙广慧, 陆凯烨, 潘景志, 林晓璇, 肖 锋

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 530006)

摘 要:为解决无人机巡线过程中的续航难题,设计实现基于蛙跳式充电的无人机自主巡线系统。作为第一部分,本文基于 GPS/RTK 的无人机自主定位展开研究。首先,针对南方电网公司提出的无人机无人操控自主巡线目标,搭建了蛙跳式充电平台,以提高无人机的续航能力;然后,为保证无人机能按预设航迹进行自主导航,并准确降落到地面平台进行充电,对无人机 GPS/RTK 组合导航模块中自主巡线关键技术进行了研究;最后,分别对巡线技术中姿态解算、加速度补偿及延时补偿这 3 个主要环节进行实验仿真。实验结果表明:姿态解算算法可以准确地估计无人机在飞行中的飞行姿态,并能适时快捷地补偿运动加速度;延时补偿算法能有效地解决定位传感器延时的问题;在气压计输出高度数据不健康时,系统能识别数据的健康状况,并自动融合 GPS 输出的高度数据。因此本文提出的方法和研究结论对无人机的自主巡线有着重要的工程指导意义。

关 键 词:无人机;导航;延时补偿;姿态解算

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.024

中图分类号:TM755

文章编号:1673-9140(2021)05-0195-06

Technology and system of UAV autonomous line patrol based on leapfrog charging(I): autonomous positioning of UAV based on GPS/RTK

GUAN Jiahua, SUN Guanghui, LU Kaiye, PAN Jingzhi, LIN Xiaoxuan, XIAO Feng

(Foshan Electric Power Bureau of China Southern Power Grid, Foshan 530006, China)

Abstract: For the purpose of solving the endurance problem in the process of unmanned aerial vehicle(UAV) line patrol, an autonomous line patrol system of UAV based on leapfrog charging is designed and implemented. As the first part, the autonomous positioning of UAV based on Global Positioning System/Real-time Kinematic (GPS/RTK) is studied in this paper. Firstly, aiming at the goal of UAV autonomous line patrol proposed by China Southern Power Grid Corporation, a leapfrog charging platform is built to improve the endurance of UAV. Then, in order to ensure that the UAV can conduct autonomous navigation according to the preset track and accurately land on the ground platform for charging, the key technologies of autonomous line patrol in the UAV GPS / RTK integrated navigation module are studied. Finally, the three main links of attitude calculation, acceleration compensation and delay compensation in line patrol technology are experimentally simulated. Experimental results show the attitude calculation algorithm can accurately estimate the flight attitude of UAV in flight and can quickly compensate the motion acceleration in time. The delay compensation algorithm can effectively solve the problem of positioning sensor delay. When the

收稿日期:2019-09-24;修回日期:2019-11-20

基金项目:南方电网“智能配电网”科研项目(GDKJXM20180094)

通信作者:关家华(1979-),男,本科,高级工程师,主要从事电力线路设备运行维护及新型电力系统研究工作;E-mail:guanjiahua@126.com

barometer output altitude data is unhealthy, the system can identify the health status of the data and automatically fuse the GPS output altitude data. Therefore, the methods and research conclusions proposed in this paper have important engineering guiding significance for the autonomous line patrol of UAV.

Key words: UAV; navigation; delay compensation; attitude calculation

当前中国电网的建设已取得了丰硕的成果,完成建设了多个跨区电网工程,电网输电线路总里程长达 115 万公里。因此,如何有效地保障现有输电线路的安全可靠运行,了解输电线路缺陷及故障情况,对保障电力系统的安全可靠运行具有重要的实际意义。

目前,中国电网企业对输电线路的日常运维管理主要手段仍是人工巡检为主、直升机为辅的方式,这直接影响输电线路的运维质量、工作效率和经济效益^[1-2],难以满足当前及未来电力系统所追求的管理精细化、降本增效的战略发展需要^[3-5],因此,创新性地提出输电线路巡检新方法、开发线路巡检新工具显得尤为重要。

多旋翼无人机由于体积小、成本低、机动性强、不受地形制约等诸多优点,在输电走廊地形地貌光学图像的快速获取、输电线路规划、输电走廊灾情监测等方面得到了广泛的应用和推广^[6-8],已快速发展成为输电线路巡检的重要工具。其中,对于无人机在输电线路巡检方面的应用,国内外众多学者进行了深入研究和探讨,文献[9]提出了一种多旋翼无人机智能巡检输电线路的方法,该方法运用载波相位差分定位技术,将人工操控无人机开展的线路巡检时记录的巡检航迹,提取任务飞行轨迹点精确的经纬度、海拔高度等先要信息,制定出输电线路的自主巡检方案,为实现规范化、标准化的无人机安全巡线作业奠定了基础;文献[10]综合图像识别、激光雷达、无线专网等技术,提出了一种基于多旋翼无人机巡线系统,并对系统的构成和实现方式进行探讨,证实了该系统可通过多种传感器完成对输配电线路及其运行环境的三维图像等多种信息的精确采集,使无人机自主化、智能化巡线成为可能。

尽管利用无人机进行现代电力线路巡检相比于传统的人工巡线具有众多优势,但无人机自身的续航问题对巡检效率产生了很大的影响。电池电量用尽之后需要人为更换电池,不仅消耗人力,还延长了巡线时间。由于人员不能跟随无人机越过河流、山

川等地形,导致无法实现远程巡检,这些不足均制约了无人机在现代电力线路巡检中的实际应用^[10-13]。

该文通过在佛山供电公司的无人机智能巡线中的实践,对多旋翼无人机自主巡线过程中的续航问题进行了深入研究,提出了一种基于无人机自主起飞、自主降落和自动充电技术的“蛙跳式”自动巡检技术,研究成果为有效地解决无人机输电线路巡检中续航问题提供了理论和实践依据。

1 无人机蛙跳式自主定位方案设计

蛙跳式无人机自主巡线旨在实现电力线路的无人机全自动巡检,结合配电网架构和设备特点,在配电网沿途附近的配电房顶等开阔位置安装固定式地面充电平台,无人机巡视一段距离的线路后,若检测到动力电池的电量不足,可自主降落在沿线的充电平台上进行充电,或返回到原出发平台进行充电;充电完成后,再自动起飞并继续原来的巡检工作,实现远距离无人干预的全自主巡线,形成一种无人机模拟蛙跳的工作方式,从而能有效地节省人力物力的消耗,提高无人机巡检的工作效率。

1.1 系统结构及运行原理

该文所提出的蛙跳式充电平台的系统结构如图 1 所示,整体可以由无人机平台、无人机自动充电平台和地面控制系统 3 部分组成。

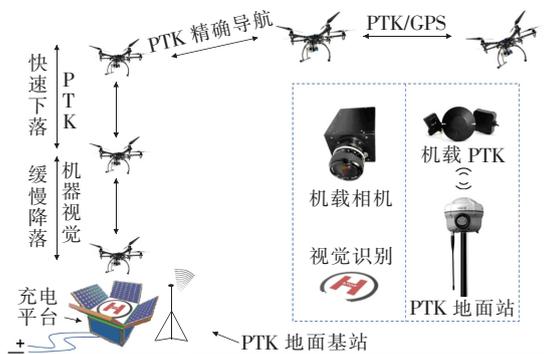


图 1 系统结构流程

Figure 1 Flow chart of system structure

系统运行原理如下所述:在配电网设施或沿线门房屋顶上设立固定式自动充电平台,通过采用 GPS/RTK 组合导航、机载摄像机和先进的模式识别算法,完成无人机高精度定位和智能精准降落;通过无人机与充电平台各自充电接口的互联,实现无人机动力电池的自动充电;结合智能控制技术和飞控算法,实现无人机自主起降、自动充电和不间断巡检。

1.2 无人机精准定位技术

为实现无人机的精准定位,主要运用了 GPS/RTK 组合导航及定位技术和图像组合高精度定位技术。

无人机 GPS/RTK 组合导航及定位技术是一种实时动态定位技术,能够通过载波相位观测值,实时提供三维定位,其定位精度可达厘米量级^[14];图像组合高精度定位技术即自动获取无人机下方景物图像,采用特征检测、机器学习、神经网络等算法,计算图像特征值,并与充电平台上方图案特征值进行对比,得到充电平台在图像中的位置,随后进行三维重构获得充电平台相对于无人机的三维相对位置,自主控制无人机精准降落于充电平台上,完成无人机的自主充电功能。其中无人机机载自动识别模块如图 2 所示。

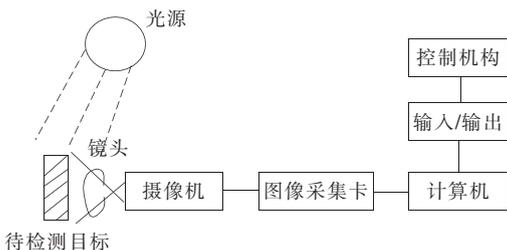


图 2 无人机自动识别模块

Figure 2 UAV automatic identification module

2 标定方法及目标定位

2.1 摄像头标定方法

相机标定采用棋盘格角点检测法^[15-18]。摄像头对一系列不同姿态的棋盘格图像进行拍摄所得到的标定图像如图 3 所示。

通过检测棋盘格的每个小方格的角点坐标,解算出摄像头的内外参数,包括摄像头的像距、主点坐标、径向和切向畸变系数、旋转和平移矩阵。旋转和平移矩阵是摄像头透镜组中心相对于世界坐标原点

的旋转和平移关系,如图 4 所示。

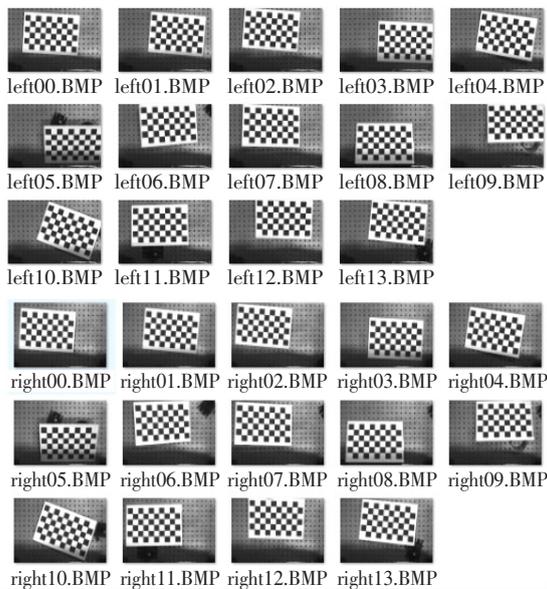


图 3 标定图像

Figure 3 Calibration image

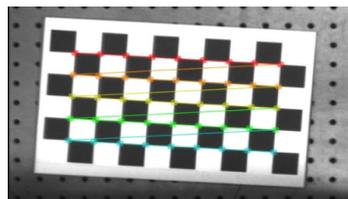


图 4 棋盘格角点检测

Figure 4 Chessboard lattice corner detection

2.2 目标定位

通过对目标的检测,得到图像的二维坐标,由 2.1 节中所得的相机标定值获取其三维的真实坐标。

摄像机的成像模型为

$$Z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 (u, v) 为图像的像素坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 为目标的世界坐标; f 为像距,且 (u, v) ; \mathbf{R} 为旋转矩阵,维度为 3×3 ; \mathbf{T} 为偏移向量,维度为 3×1 ; $\begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 为相机内参矩阵; Z_c 为尺度因子; $\begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为相机外参矩阵。

将检测到的目标图像的像素面积代入拟合后的摄像头高度函数 $H(S)$, 得到摄像头高度。代入(1)式, 结合摄像头的标定后的修正值, 得到像素坐标 (u, v) 所对应的三维真实的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 。

3 实验分析

3.1 姿态解算和加速度补偿

姿态算法作为各种导航方法组合导航的核心, 其估算出的姿态值会发布给姿态控制器, 控制飞行平稳, 是飞行稳定的重要保障^[19]。在试验中, 控制无人机朝某个特定方向加速 4~6 s 左右, 记录姿态算法计算得到的加速度, 以及 GPS 速度信息差分得到的加速度, 具体如图 5 所示。

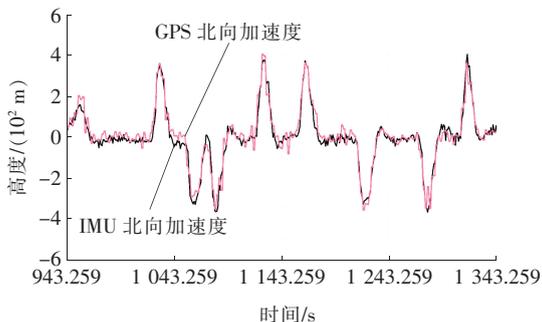


图 5 姿态解算及运动加速度补偿实验数据

Figure 5 Attitude calculation and acceleration compensation test data diagram

由图 5 可知, 曲线姿态解算得出的加速度与 GPS 得到的加速度的相关度接近 94%, 由此可以认为, 算法可以很好地补偿运动加速度并估计飞行器姿态。

3.2 延时补偿试验

无线网络控制系统是控制技术、计算机技术和无线网络通信技术的综合运用, 具有系统分布化、通信网络化、节点智能化等特点。然而, 由于网络节点能量有限, 信道快速变化和被控对象参数不确定等原因, 将导致信号延时、数据包丢失和节点失效等多方面和多层次的问题, 传统的控制方法难以完全适用于无人机场景的应用, 研究无线网络控制系统的网络随机延时、数据包丢失和功率控制等问题具有必要性和难度^[20-22]。

该文 GPS 型号延时为 0.2 s, 让无人机朝正南

做正弦运动, 记录 GPS 位置值及解算后的位置值, 试验结果如图 6 所示。

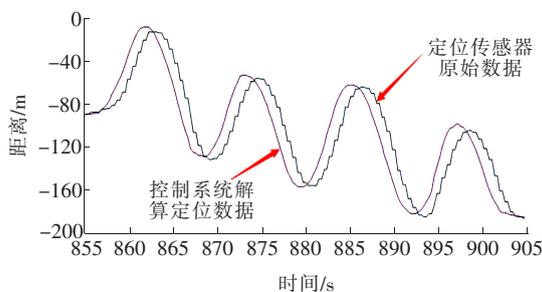


图 6 延时补偿实验结果

Figure 6 Diagram of delay compensation test results

由图 6 可知, 解算后的位置能无变形平移 0.2 s 到 GPS 位置, 说明解算能较准确地得到实时定位数据, 有效地补偿了定位传感器的延时。

3.3 传感器数据健康度和传感器智能切换

由于无人机在空中飞行的气象条件复杂多变, 将导致检测传感器的检测数据出现偏差。例如气压计受大风、强气流的影响导致检测数据突变。为解决这类问题, 该文运用模糊神经网络判断传感器数据健康度, 选择可信度最高的数据源, 利用卡尔曼滤波器融合各传感器的高度数据, 并开展现场试验。试验分别记录气压计输出的高度值、GPS 输出的高度值及经融合算法解算后的高度值, 测试结果如图 7 所示。

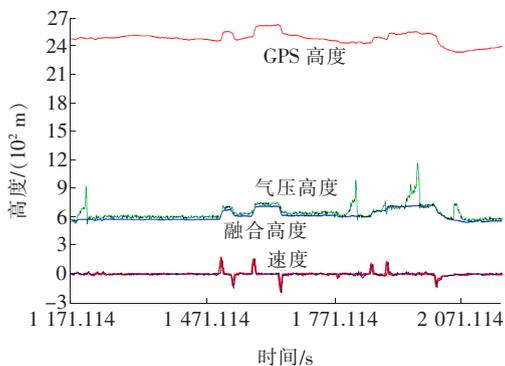


图 7 传感器数据健康度及传感器智能切换实验数据

Figure 7 Sensor data health and sensor intelligent switching test data graph

由图 7 可知, 在突然出现大风或强气流时, 融合算法解算后的高度值能消除气压计受到的气流干扰, 飞行器能够对传感器数据健康度进行智能判断, 在气压传感器输出数据不健康时, 能自动融合 GPS 的检测数据, 并对 GPS 漂移进行智能补偿, 得到准

确的高度信息。

4 结语

实现无人机自动起降充电和巡检,对提升作业效率、减小人力时间消耗具有重大意义。该文所述的蛙跳式充电平台在GPS/RTK组合导航下,通过如下3个实验可知。

1)通过姿态解算,无人机在飞行中算法能很好地补偿运动加速度并估计飞行器姿态。

2)无人机在延时解算后的位置能无变形平移0.2秒到GPS位置,由此算法能准确得到实时的定位值,解决了定位传感器延时补偿问题。

3)飞行器控制系统能自动判断关键传感器获取的数据的健康状况,在气压高度计数据不健康时,能自动切换到GPS进行修正,同时对GPS漂移进行智能修正,对位置信息得到高精度的融合结合。

参考文献:

- [1] 牛勃,马飞越,丁培,等. GIS局部放电智能巡检定位技术及应用[J]. 高压电器,2020,56(1):188-196.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Intelligent inspection and location technology of GIS partial discharge and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):188-196.
- [2] 王海鹏,文艳,李建祥,等. 基于全自动跟拍的多功能车载巡检技术[J]. 中国电力,2020,53(5):18-23.
WANG Haipeng, WEN Yan, LI Jianxiang, et al. Multifunctional vehicle inspection technology based on full-automatic tracking[J]. Electric Power, 2020, 53(5):18-23.
- [3] 据泽立,杨博,孙浩飞,等. 面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[J]. 智慧电力,2020,48(6):92-97.
JU Zeli, YANG Bo, SUN Haofei, et al. Collaborative path planning algorithm for multi robot system for power intelligent inspection[J]. Smart Power, 2020, 48(6):92-97.
- [4] 岳基隆,张庆杰,朱华勇,等. 微小型四旋翼无人机研究进展及关键技术浅析[J]. 电光与控制,2010,17(10):46-52.
YUE Jilong, ZHANG Qingjie, ZHU Huayong, et al. Research progress and key technologies of micro Quad-Rotor UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10):46-52.
- [5] 王振华,黄宵宁,梁焜,等. 基于四旋翼无人机的输电线路巡检系统研究[J]. 中国电力,2012,45(10):59-62.
WANG Zhenhua, HUANG Xiaoning, LIANG Kun, et al. Research on transmission line inspection system based on four-rotor UAV[J]. Electric Power, 2012, 45(10):59-62.
- [6] 吴立远,毕建刚,常文治,等. 配网架空输电线路无人机综合巡检技术[J]. 中国电力,2018,51(1):97-101+138.
WU Liyuan, BI Jiangang, CHANG Wenzhi, et al. Research of unmanned aerial vehicle comprehensive inspection for distribution network overhead transmission lines[J]. Electric Power, 2018, 51(1):97-101+138.
- [7] 胡志鹏,李忠魁,高峰,等. 考虑时变故障率的架空输电线路最优巡检策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(1):9-17.
HU Zhipeng, LI Zhongkui, GAO Feng, et al. Research on optimal inspection strategy for overhead transmission line considering time-varying failure rate[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1):9-17.
- [8] 顾晓东,唐丹宏,黄晓华. 基于深度学习的电网巡检图像缺陷检测与识别[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(5):91-97.
GU Xiaodong, TANG Danhong, HUANG Xiaohua. Deep learning-based defect detection and recognition of a power grid inspection image[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5):91-97.
- [9] 范承啸,韩俊,熊志军,等. 无人机遥感技术现状与应用[J]. 测绘科学,2009,34(5):214-215.
FAN Chenxiao, HAN Jun, XIONG Zhijun, et al. Application and status of unmanned aerial vehicle remote sensing technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5):214-215.
- [10] 宋慧娟. 基于混合现实的人工智能在电力巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源,2020,36(2):75-79.
SONG Huijuan. Application of artificial intelligence based on hybrid reality in power inspection[J]. Power grid and clean energy, 2020, 36(2):75-79.
- [11] 黄郑,王红星,王成亮,等. 一种适用于无人机的无线充电系统[J]. 电力电子技术,2020,54(9):51-53+94.
HUANG Zheng, WANG Hongxing, WANG Chengli-

- ang, et al. A wireless charging system for unmanned aerial vehicle[J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(9):51-53+94.
- [12] 谭金, 宇文旋, 钱金菊. 基于多旋翼无人机单目序列影像的导线安全距离检测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 107-112+124.
TAN Jin, YUWEN Xuan, QIAN Jinju. Security Distance detection of power line based on multi-rotor UAV with monocular camera[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5):107-112+124.
- [13] 王云哲, 徐国宁, 王生, 等. 蜂群无人机充电排队优化方法[J]. 航空学报, 2020, 41(10):292-302.
WANG Yunzhe, XU Guoning, WANG Sheng, et al. Optimization of charging queuing of UAV swarming [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2020, 41(10):292-302.
- [14] 麦晓明, 刘正军, 彭向阳, 等. 无人机电力线路安全巡检航线及任务规划软件系统设计[J]. 广东电力, 2013, 26(12):81-85.
MAI Xiaoming, LIU Zhengjun, PENG Xiangyang, et al. Design on safe inspection route and mission planning software system for unmanned aerial vehicle electric power circuit[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(12):81-85.
- [15] 伍明, 伍俊龙, 马帅, 等. 基于角点灰度分布特征的棋盘格角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 109-116.
WU Ming, WU Junlong, MA Shuai, et al. Chessboard corner detection based on corner gray distribution feature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1):109-116.
- [16] 申夏晶, 程梦娇, 肖江剑, 等. 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9):181-187.
SHEN Xiajing, CHENG Mengjiao, XIAO Jiangjian, et al. Corner detection of fisheye checkerboard image based on iterative correction[J]. Progress in laser and optoelectronics, 2016, 53(9):181-187.
- [17] 刘阳, 王福利, 常玉清, 等. 黑白棋盘格角点检测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8):1090-1093.
LIU Yang, WANG Fuli, CHANG Yuqing, et al. Corner detection algorithm of black and white chessboard[J]. Journal of Northeast University(Natural Science Edition), 2007, 28(8):1090-1093.
- [18] 刘俊杰, 谢春利, 王娟, 等. 棋盘格图像角点坐标亚像素提取方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(S1):170-172+177.
LIU Junjie, XIE Chunli, WANG Juan, et al. Sub-pixel corner coordinate positioning method of chessboard image[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(S1):170-172+177.
- [19] 李洪兵, 何丽, 袁亮, 等. 基于改进梯度下降法的移动机器人姿态解算[J]. 机床与液压, 2020, 48(21):1-5.
LI Hongbing, HE Li, YUAN Liang, et al. Attitude calculation of mobile robot based on improved gradient descent method[J]. Machine tools and hydraulics, 2020, 48(21):1-5.
- [20] 陈占海, 祝小平. 无人作战飞机数据链延时对攻击决策的影响及其补偿[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(9): 2043-2047.
CHEN Zhanhai, ZHU Xiaoping. Time delay of datalink effects on the decision of attack and its compensation [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(9): 2043-2047.
- [21] 丁有国. 直流微电网母线电压控制及 LCL 型并网逆变器延时补偿研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [22] 贺诗明, 熊健. 基于牛顿插值的 LCL 型并网逆变器机侧电流反馈延时补偿策略[J]. 电网技术, 2020, 44(12):4766-4772.
HE Shiming, XIONG Jian. Compensation strategy for machine side current feedback delay of LCL grid connected inverter based on Newton interpolation [J]. Power Grid Technology, 2020, 44(12):4766-4772.