

# 基于磁斥力补充升力的巡线机器人结构分析

张智恒, 郑 嵘, 尹莉君, 朱小珑, 王毛毛

(国网襄阳供电公司, 湖北 襄阳 471002)

**摘要:** 针对我国国土面积辽阔, 远距离输电线路成为必然选择。输电线路常在深山中, 人迹罕至, 所以采用机器人巡检线路为当前主流方式。但目前巡线机器人电池容量限制, 导致工作效率不高, 针对此问题, 采用具有磁斥力补充升力功能的机器人巡检线路, 增强其续航能力, 提高工作效率。设计具有磁斥力补充升力功能机器人, 通过霍尔元器件感应高压直流输电线路周围存在的磁场, 反馈到中央处理器中, 根据处理结果, 对机器人下方的电磁铁充电, 产生与输电线路磁场相反方向磁力, 并通过动力学模型分析其飞行过程中的升力、排斥力与重力之间的关系, 使得机器人在飞行过程中, 减小机器人升力, 降低电池功率输出17.8%。通过仿真分析, 获取机器人飞行过程中的电池功耗曲线, 结果表明, 该机器人功耗小于传统机器人, 延长了机器人续航时间27 min。开发出样机且在输电线上试验运行成功, 验证了设计的实用性与合理性。

**关键词:** 高压输电线; 巡线机器人; 磁斥力; 力学分析; 现场试验运行

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0151-03

## Structural Analysis of Patrol Robot Based on Magnetic Coupling

ZHANG Zhi-heng, ZHENG Rong, YIN Li-jun, ZHU Xiao-long, WANG Mao-mao

(State Grid Xiangyang Power Supply Company, Xiangyang 471002 China)

**Abstract:** In view of the vast territory of our country, long-distance transmission line becomes an inevitable choice. Transmission lines are often located in deep mountains and rarely visited by people. Therefore, robot inspection line is the current mainstream mode. However, the battery capacity of the current line inspection robot is limited, resulting in low work efficiency. In view of this problem, the robot inspection line with magnetic coupling function is adopted to enhance its endurance and improve work efficiency. The robot with magnetic coupling function designed in this paper senses the magnetic field around the high-voltage DC transmission line through Hall components and feeds it back to the central processing unit. According to the processing results, the electromagnet under the robot is charged to generate the magnetic force in the opposite direction to the magnetic field of the transmission line. The relationship between the lifting force, repulsive force and gravity in the flight process is analyzed through the dynamic model. The lift of UAV is reduced, and the battery power output is reduced by 17.8%. Through simulation analysis, the battery power consumption curve of the robot during flight is obtained. The results show that the power consumption of the robot is less than that of the traditional robot, and the endurance time of the robot is extended by 2 min. The prototype is developed and successfully tested on the transmission line, which verified the practicality and rationality of the design.

**Keywords:** high voltage transmission line; line patrol robot; magnetic coupling; mechanical analysis; field test run

## 0 引言

为保证国民经济能够高速发展, 需要对全国各地敷设输电线路。2020年, 已经建成了六大电网区域。我国的电网规模远超美国, 已经到达了世界第一的位置。随着电网规模的扩大, 自动化巡线的重要性愈加凸显<sup>[1]</sup>。我国截至到2020年底, 由国家电网牵头, 各地方电网纷纷响应, 共配套四旋翼机器人1 800架, 仅一年时间巡检长度超过了21万千米, 提前或预测发现各类故障5万处。以我国目前建设的六大电网计算, 总输电线路长度预计达到159万公里, 机器人巡线的前景也愈加广泛<sup>[2]</sup>。

目前, 巡检机器人多为四旋翼机器人, 其主要依靠蓄电池驱动, 使用大容量蓄电池时, 其自身重量增加, 降低了机器人有效载荷, 所以续航能力较差<sup>[3]</sup>。现阶段机器人供电系统多为锂电池供电, 锂电池的重量占据其整体机器人重量的40%以上, 而动力与重量恰是评定机器人续航能力的两个重要因素。在延长机器人续航能力方面主要采用两种方式: 第一种是改变机器人电池, 主要分为两大类: 第一类为改变锂电池的研究, 研制出一种新型电池, 体积小, 供电能力强, 这项课题一直困扰着当今科学界; 第二类为对机器人飞行时采用无线充电技术。第二种是减轻机器人自身重量, 从而延长其续航时间。

马帅等人将实时无线充电技术与机器人相结合, 发出一套可以自适应无线充电的机器人<sup>[4]</sup>; 杨勇等人采用

\*基金项目: 国网湖北省电力有限公司科技成果孵化转化项目(B315D021000D)

收稿日期: 2023-10-17

多项式对杂波拖尾导致的虚警概率进行单独建模,获得的雷达检测门限高精度<sup>[5]</sup>;周峰等人对巡检机器人进行了研究,指出巡检机器人可以为城市输电线巡检,但难以直接应用于城市周边区域的输电线巡检,基于此设计了一款微型巡线机器人,减小了机器人的重量,提升了续航时间,扩大了机器人的巡检范围<sup>[6]</sup>;石万等人研究了机器人的充电装置,提出了一种磁斥力补充升力谐振式无线电能传输原理的机器人自主无线充电系统<sup>[7]</sup>。甘嵩等人在现有技术理论上提出了融合无线电能传输以及基于移动通信网络的机器人飞行管理技术的四旋翼机器人自动巡线方案,解决了四旋翼机器人在电力巡线过程中面临的航程短、控制范围小的问题<sup>[8]</sup>。王诗章等人研究了机器人飞行姿态,提出了负载摆动抑制系统<sup>[9-10]</sup>。上述诸多专家学者对无人机飞行过程中的问题进行了研究,但机器人的巡检范围还需进一步提高。

本文采用一种基于磁斥力补充升力动力滑翔技术的高压电力巡线小型机器人,因为磁斥力补充升力的动力滑翔技术相比于现有技术更加节能,不易受到外界因素的干扰,能极大地延长飞行时间,有效提高了巡检效率,为透明电网的数字化、自动化建设提供了支持。

### 1 巡线机器人的设计原理

机器人的硬件设计部分主要分为三个方面:数据采集模块、控制中心、舵机执行部分<sup>[11]</sup>。其中数据采集模块主要是分为气压计、陀螺仪、气压传感器和GPS组成;气压计是用于监测机器人的飞行高度;陀螺仪主要作用是分析机器人飞行过程中的姿态角;气压传感器功能是监测机器人的空速;GPS对机器人的位置进行定位;将上述信息传输到控制中心中,由STM32F429单片机处理信号,控制机器人飞行过程,并把执行的命令传输给舵机进行控制<sup>[11]</sup>。具体系统图如图1所示。

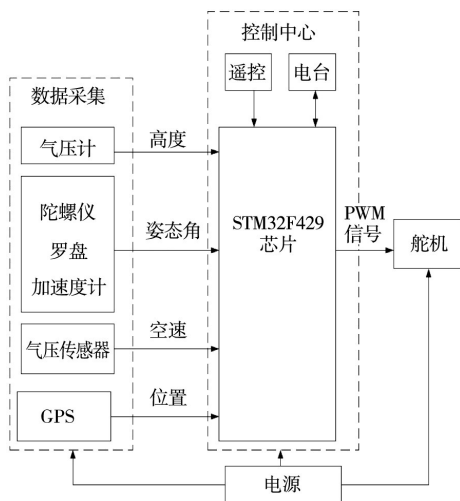


图1 硬件系统图

使用STM32单片机优点为电路简单、方便控制、价格较低。对比其他同类型的处理器,单片机STM32F429是现在市场主流的处理器。该芯片广泛地运用在机器人主控制芯片领域中,因其输出特性稳定、处理速度快、较为经济的优势,相对于其他型号的性能优越,除此之外,还包括稳压电路、振荡电路、时钟电路等I/O为核心的辅助电路。信号发生部分得到指令后会产生一个0或1的信号,通过外围电路转换后,变成一个恒定的低电平作用于电路。该电路被触发后,输出控制信号用于控制机器人各个部件。在巡线过程中会存在强电磁干扰,所以在主CPU的周围并联7个0.1 uF的电容器,作为滤波电路,为主CPU排除电磁干扰,对信号传输过程排除信号的杂质,为信号采集给与一定帮助。通过电源电路将+5 V电压作为工作电压给单片机输入端口和主处理器进行供电;将+3.3 V电压供给元器件工作电压和输出端工作电压。

### 2 磁斥力补充升力式机器人动力学模型

磁斥力补充升力的动力机器人通过改变发动机电流的大小来改变浮力和俯仰角来实现滑翔运动。图2为坐标系示意图,大地坐标系为自然坐标系 $O_a T_a W_a Z_a$ ,  $O_b T_b W_b Z_b$ 为机体坐标系,机器人机体正中心处 $O_b$ ,从机体向机头方向为 $x_b$ 轴,从机体沿机翼方向为 $y_b$ 轴,速度坐标轴为 $O_v T_v W_v Z_v$ ,速度中心点和机体坐标系的中心点重合,水平线与机体坐标系夹角为 $\delta$ ,机头方向和正北夹角为 $\theta$ ,如图2所示。

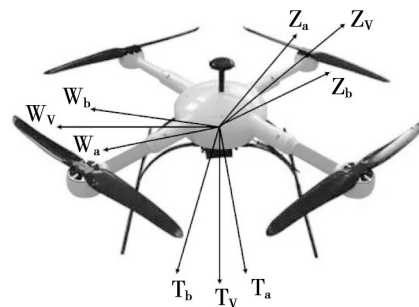


图2 机器人坐标系

当四旋翼机器人在水平飞行时,质量为 $m$ ,机器人所处的自然坐标系的坐标位置为 $b$ ,修正系数 $C$ ,机器人偏移距离为 $R$ ,飞行动量为 $M$ ,偏移动量为 $J$ ,磁悬浮力 $f$ , $x$ 为磁力作用于机器人的位置, $A$ 为误差量,由动力学定理有<sup>[8-12]</sup>:

$$\vec{b} = C\vec{R}\vartheta \tag{1}$$

$$\vec{R} = Rvt \tag{2}$$

$$\sum f = \frac{dm \times J}{dt} \tag{3}$$

$$\sum x \times f + \sum A = \frac{dm \times MJ}{dt} \quad (4)$$

机体坐标系  $B$  与自然坐标系的关系为:

$$B = \bar{R}\bar{b} \quad (5)$$

滑翔机器人动力学模型为:

$$\tilde{V} = M^{-1}((MV) \times W + m_a g R^T k + H) \quad (6)$$

$$W = J^{-1}(JW + MV + (m_a g r_a + m_b g r_b + m_v g r_v)(\tilde{R}^T k)) \quad (7)$$

式中,  $W$  为受外力矩的修正系数;  $H$  为误差补偿系数;  $V$  为滑翔机器人动力学模型;  $r_a$  为在自然坐标系中受力点和中心点的距离;  $r_b$  为在机体坐标系中受力点和中心点的距离;  $r_v$  为在速度坐标系中受力点和中心点的距离;  $k$  为方向矩阵,  $k = [k_1, k_2, k_3]$ 。

### 3 机器人主要部件设计

补充升力式机器人的磁力部分由前后两个径向、轴向磁轴承和发动机及其外围电路组成。如图3是机器人飞行状态下磁轴承支撑关系。

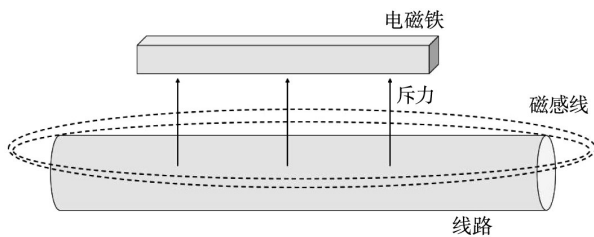


图3 磁轴承支撑关系

### 4 试验运行

本文选取3 kg、续航时间为180 min的以STM32F429芯片为主控芯片的四旋翼机器人作为实验对象。在对100 m长的输电线路进行巡检,进行多组试飞时间的试验,无人机配重从3 kg-8 kg,每隔0.5 kg进行三次试验,每次飞行耗电50%,获得平均飞行时间,如图4所示。根据图4机器人重量与飞行时间关系,可以得到机器人在经过磁斥力补充升力装置后,延长的续航时间。

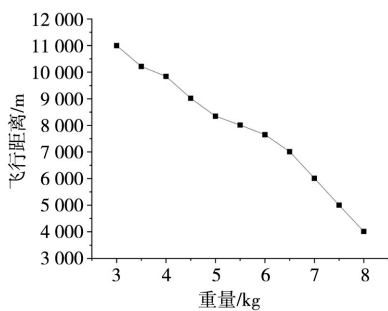


图4 机器人重量与飞行距离的关系

当  $U$  为固定磁矩,输电线路电压为110 kV,  $m_2$  其值为3.917 kg,使得机器人的飞行时间延长27 min。

### 5 结束语

本文研究并设计了一款具有磁斥力补充升力功能的电力巡线机器人,通过设计巡线机器人的硬件部分(主电路系统、实时定位系统、电源系统等),实现了对输电线路的巡检过程。在磁斥力补充升力作用下对高压直流输电线路周围的磁场进行分析,通过同性磁场相斥的原理,降低了机器人飞行过程中的升力输出,从而降低了机器人在巡线过程中电源损耗,延长了其续航时间。

#### 参考文献:

- [1] 王吉岱,谢永,王凤芹,等.高压输电线路巡检机器人机械本体设计[J].机械设计与制造,2007(8):124-126.
- [2] 徐其春,郭晨晨,刘志明,等.无人机线路自主巡检的动态轨迹规划方法[J].电力系统自动化学报,2022,34(10):24-31.
- [3] RINALDI F,GARGIOLI A,QUAGLIOTTI F.PID and LQ regulation of a multirotor attitude:mathematical modeling,simulations and experimental results[J].Journal of Intelligent&Robotic Systems,2014,73(14):33-50.
- [4] 闫寒,吴功平,曹琪,等.高压输电线路救援机器人结构设计与分析[J].机械设计与制造.2019(1):20-23,28.
- [5] 杨勇,王雪松.基于杂波拖尾分布的雷达无人机检测性能分析[J].系统工程与电子技术,2022:1-10.
- [6] 周峰.微型巡线无人机系统设计与实现[D].南京:南京信息工程大学,2023.
- [7] 石万.电力巡线无人机自主无线充电系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
- [8] 甘嵩,穆健伟,彭柏皓,等.无人机自动巡线系统的设计[J].设备监理,2019(8):40-42,50.
- [9] 王诗章,鲜斌,杨森.无人机吊挂飞行系统的减摆控制设计[J].自动化学报,2018,44(10):1771-1780.
- [10] 王诗章.四旋翼无人机吊挂系统的非线性控制研究[D].天津:天津大学,2018.
- [11] 刘杰荣,王伟冠,何其森,等.蛙跳式充电的无人机自主巡线技术与系统(二):基于机器视觉的自动充电控制[J].电力科学与技术,2021,36(6):182-188.
- [12] 张睿哲,周恺,叶宽,等.用于长距离电力巡线的轻型太阳能无人机设计[J].电力电子技术,2022,56(3):97-100.

作者简介:张智恒(1993-),男,本科,工程师,从事配网生产运行网理工作。

通信作者:王毛毛(1995-),男,硕士,中级工程师,研究方向:配网生产运行管理。