

# 基于OPGW光缆的光纤环网无人机智能巡检技术研究

刘玺

(江苏祥泰电力实业有限公司,江苏泰州 225316)

**摘要:**以通信网络为基础,进行无人机智能巡检时,主要采用无线专网通信模式,使得智能巡检执行时间较长。因此,提出基于光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire,OPGW)光缆的光纤环网无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)智能巡检技术研究。通过Ansoft Maxwell电磁场仿真软件,模拟无人机巡检作业,计算安全巡检距离。根据巡检区域的杆塔位置进行分组和聚类分析,合理规划无人机机库选址。结合OPGW光缆的光纤资源和EPON网络设备,建立光缆通信组网,实现智能巡检信息的快速传输。最后,以机库作为连接点生成最优巡检路径,获取无人机智能巡检结果。实验结果表明,所提技术的平均智能巡检执行时间为4.25 min,与基于混合算法、基于差分定位的巡检技术相比,执行时间降低了56.94%、54%。

**关键词:**OPGW光缆;光纤环网;无人机;智能线路巡检

**中图分类号:**TP277;TP18 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7241(2025)07-0148-05

## Research on Intelligent Inspection Technology of UAV in Optical Fiber Ring Network Based on OPGW Optical Cable

LIU Xi

(Jiangsu Xiangtai Electric Power Industrial Co., Ltd., Taizhou 225316, China)

**Abstract:** Based on the communication network, the wireless private network communication mode is mainly used in the intelligent patrol inspection of unmanned aerial vehicle (UAV), which makes the execution time of intelligent patrol inspection longer. Therefore, the research on intelligent inspection technology of optical fiber ring network UAV based on optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) optical cable is proposed. Through Ansoft Maxwell electromagnetic field simulation software, it simulates the patrol operation of UAV and calculates the safe patrol distance. According to the tower position in the inspection area, group and cluster analysis are carried out to reasonably plan the location of UAV hangar. Combined with the optical fiber resources of OPGW optical cable and EPON network equipment, OPGW optical cable communication network is established to realize the rapid transmission of intelligent inspection information. Finally, the hangar is used as the connection point to generate the optimal inspection path and obtain the intelligent inspection results of UAV. The experimental results show that the average intelligent patrol execution time of the proposed technology is 4.25 min, which is 56.94% and 54% lower than that of the patrol technology based on hybrid algorithm and differential positioning.

**Keywords:** optical fiber composite overhead ground wire optical cable; optical fiber ring network; unmanned aerial vehicle; intelligent line inspection

## 0 引言

随着电力线路覆盖范围的扩展,复杂且偏远区域也开始存在输电线路<sup>[1]</sup>。但是,这部分区域内的线路极易受到自然环境和人为因素的影响,影响电网安全运行,而传统的电力巡检方式,在复杂的环境中也无法发挥较好的运维效果<sup>[2]</sup>。近年来,随着无人机制造领域的发展,无人机巡检技术的研究备受关注,在输电线路运维中,应用无人机巡检系统,有效提高了智能巡检效率。因此,如何设计高效的无人机智能巡检技术,也成为当前热点研究问题。

文献[3]深入分析了无人机智能巡检作业流程,引入人工智能技术,设计云雾边异构协同计算巡检策略,建立包含巡检路线规划、故障智能识别等功能的无人机智能巡检框架。但是,该方法运维成本较高。文献[4]采用激光点云精确定位技术,自主形成智能巡检路径,再运用高精度三维激光点云数据,实现无人机智能航行检查。但是,该方法抗干扰能力较差。文献[5]从无人机巡检技术的发展现状入手,设计合理的巡检模式。针对无人机续航时间、安全作业距离等方面,分别设置巡检约束条件,生成最终的智能巡检方案。但是,该方法巡检效率较低。

文中针对无人机智能巡检技术进行研究,提出以OPGW光缆为基础的新型巡检技术。与传统技术相比,采用

\*基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J20q21124)

收稿日期:2023-12-01

OPGW 光缆建立光纤环网,实现无人机巡检数据的高效传输。根据实验测试结果可知,所提技术的应用使得智能巡检执行时间有了大幅度降低,实现无人机智能巡检效率的提升。

## 1 光纤环网无人机智能巡检技术设计

### 1.1 无人机巡检安全距离计算

考虑到应用无人机进行智能巡检作业时,很多外界因素会影响无人机运行状态,使得无人机出现失控现象。整体来看,影响无人机航行能力的因素主要包括强电磁场干扰、高压电场干扰两方面<sup>[6]</sup>。为了实现无人机智能巡检工作的顺利完成,文中针对安全巡检距离进行计算。通过 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件,模拟无人机运行状态,分析巡航线路区域内电磁场强度,再结合无人机翼长、机头与主轴距离、机尾与主轴距离,得到无人机可承受的最大电磁场强度<sup>[7]</sup>,并以此为基础,生成无人机安全飞行距离计算公式:

$$D = \max \{l_1, l_2, l_3, l_4\} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + vt + \max \{c_1, c_2, c_3\} \quad (1)$$

式中,  $D$  表示巡检作业安全距离,  $\max$  表示最大值,  $l_1$  表示与机体工作磁场强度极限值相关的左侧相导线的水平距离,  $l_2$  表示与机体工作磁场强度极限值相关的右侧相导线的水平距离,  $l_3$  表示与机体工作电场强度极限值相关的左侧相导线的水平距离,  $l_4$  表示与机体工作电场强度极限值相关的右侧相导线的水平距离,  $\varepsilon_1$  表示无人机运行路线偏

差,  $\varepsilon_2$  表示允许最大偏航距离,  $\varepsilon_3$  表示末端设备测距误差,  $\varepsilon_4$  表示巡检规划路径与实际位置之间的偏差,  $v$  表示无人机飞行速度,  $t$  表示最长通信延时,  $c_1$  表示机翼长度,  $c_2$  表示机头与主轴之间的距离,  $c_3$  表示机尾与主轴之间的距离。

以无人机安全飞行距离为基础,进行后续无人机智能巡检技术的研究。

### 1.2 无人机机库选址规划

根据无人机最大续航时间,计算基杆塔巡检耗费时间,当无人机巡检多根基杆塔后,电池处于荷电状态<sup>[8]</sup>,需要搜索最近的机库更换无人机电池,这也是无人机智能巡检路线规划的依据。因此,文中在设计巡检技术时,需要合理规划无人机机库选址<sup>[9]</sup>。设置相邻的3根基杆塔为一组,完成巡检区域杆塔简单分组,如图1所示。设置初始簇中心位置为无人机机库选址结果,分别计算每个杆塔分组与簇中心之间的欧式距离<sup>[10]</sup>,标记与簇中心距离最近的分组模式,作为杆塔最终分组结果。其中,欧式距离计算公式为

$$d(C_i, X_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

式中,  $d$  表示欧式距离,  $C$  表示聚类簇,  $x$  表示分组数据集,  $i$  表示簇中心点,  $j$  表示分组样本中心点,  $(x_i, y_i)$  表示簇中心点坐标,  $(x_j, y_j)$  表示分组样本中心点坐标。

通过上述计算,不断更新簇的质心,直到达到最优收敛结果。结合无人机智能巡检区域的地理环境和安全冗余度,选定最优机库位置。杆塔分组和机库聚类的具体过程,如图1所示。

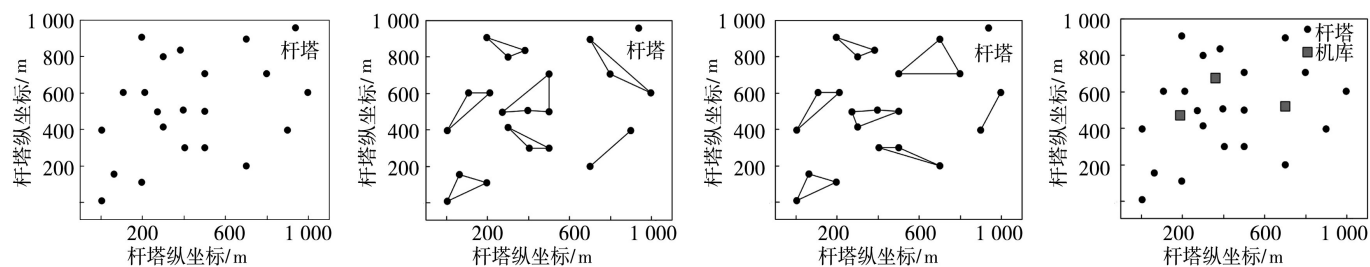


图1 杆塔分组和机库聚类

针对上述机库聚类结果,运用改进蚁群算法进行迭代搜索。文中将机库最优位置搜索问题,表述为启发函数,用以计算无人机巡检路径的长度。同时,本文引入风险概率因子,得到改进启发函数:

$$\eta_{ab} = \frac{P_b / P_a}{\theta_{ab}} \quad (3)$$

式中,  $a$ 、 $b$  表示两个杆塔,  $\eta$  表示启发函数,  $P$  表示风险概率,  $\theta$  表示两个杆塔之间的距离。

通过贝叶斯网络模型,求解上述启发函数,无人机智能巡检路径的可期望性计算,考虑当前函数包含内容的

同时,也需要参考下一段巡检道路的长度,保证最短时间内完成目标区域巡检。

### 1.3 OPGW 光缆通信组网建立

文中设计的无人机智能巡检技术,以 OPGW 光缆为基础,设置 OPGW 光缆合理分布在目标巡检区域内,依据其光纤资源,建立光纤传输通信组网。利用无源器件,连接无源光网络技术,保证无人机智能巡检信息高效传输的同时,具有良好的抗干扰能力。文中基于 OPGW 光缆,结合光线路终端、光网络单元、分光器等设备,建立图2所示的 EPON 系统结构。根据图2可知,以 OPGW 光缆为基

础的通信组网结构,仅由一根光纤连接,在不同波长条件下,实现数据的上行和下行传输。

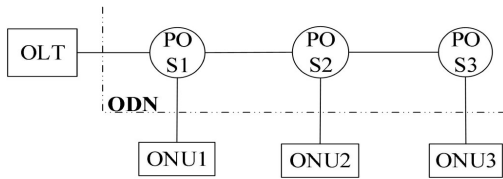


图2 EPON系统结构图

采用PX20+作为主流光模块,实现1:32和1:64的分光传输,应用EPON系统结构进行数据传输时,需要注意分光器、光纤和连接器的损耗。实际运行过程中,下行数据传输采用广播方式,上线数据传输则采用统一调度方式,如图3所示。以图3所示的上、下行传输原理为基础,文中建立智能巡检通信网络,该网络由后台主机层、监控子机层、杆塔终端接入层三个层面构成。文中选用SDH/MSTP技术组网,连接三个层次结构,生成OPGW光缆通信组网,并使得该组网随着巡检线路同步延伸,作为无人机智能巡检技术设计基础。

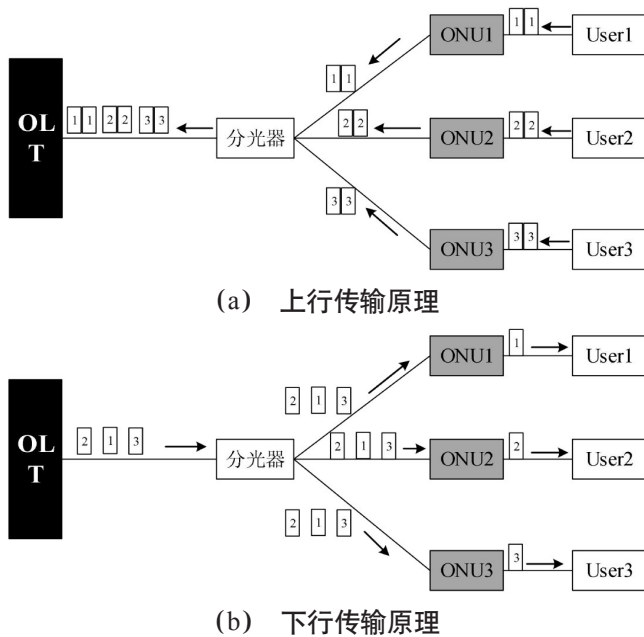


图3 上、下行传输原理示意图

### 1.4 智能巡检模型生成

在OPGW光缆通信组网的基础上,文中设计以无人机机库为连接点的智能巡检模型。根据杆塔坐标点位置,分析其与智慧机库之间的距离,设置最优巡检路径。再结合贝叶斯网络,对杆塔的风险概率值进行计算,选定高风险概率杆塔,搜索到最优目标函数值。文中设置无人机当前具有最大电量,无人机飞行速度恒定<sup>[1]</sup>,且无人机巡检距离和飞行耗电量成正比,则智能巡检目标函数为:

$$\min f = \beta \sum_{o=1}^N \sum_{u \in N} z_{ou} H_{ou} + \phi \sum_{t=1}^T \frac{P_{t+1}}{P_t} \quad (4)$$

式中,  $\min$  表示最小值,  $f$  表示目标函数,  $\beta$ 、 $\phi$  表示加权系数,  $N$  表示无人机机库集合,  $o, u$  表示无人机机库,  $z$  表示决策变量,  $H$  表示两个机库之间的距离,  $T$  表示杆塔节点集合,  $t$  表示杆塔节点。

在上述目标函数的基础上,提出如下所示约束函数:

$$\sum_{o \in N, u \in N} z_{ou} = 1, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{g \in W} \max_{k \in W} z_{gk} \leq |W| - 1 \quad (6)$$

$$W = T \cup N, |T| \geq 1, |N| \geq 1 \quad (7)$$

$$z_{gk} \in \{0, 1\}, \forall g, k \in W \quad (8)$$

$$S_t^2 = S_t^1, \forall t \in T \quad (9)$$

式中,  $W$  表示杆塔节点和智慧机库集合,  $g, k$  表示两个杆塔节点,  $S_t^1$  表示无人机到达塔杆点剩余电量,  $S_t^2$  表示无人机离开塔杆点剩余电量。

上述约束条件中,式(5)代表的是节点约束条件,用以保证目标区域内每根杆塔智能被巡检一次。式(6)与式(7)表示了改进子回路约束条件,具有两项主要功能,其一是判断子回路存在的集合,其二是更经典模型,确保无人机机库重入多次后,依旧保持为1。式(8)值是0-1范围内的任意变量值,代表了智能巡检模型所涉及的决策变量,式(9)表示到达某巡检点无人机电量与离开该点无人机电量相同,避免了电量损耗对智能巡检结果产生负面影响。综合上述约束条件,求解出智能巡检目标函数最优值。至此,完成以OPGW光缆为基础的光纤环网无人机智能巡检技术的整体设计。

## 2 仿真实验

### 2.1 实验环境

为了验证文中提出智能巡检技术的可行性,进行实验测试。选用大鹏CW-20固定翼无人机作为主要工具,在该无人机下方安装可见光摄像机、红外摄像机,针对某500V高压输电线路,截取1000m范围进行智能巡检。技术人员可以在安全位置,控制无人机运行方向,全方位获取电力线路的现场情况。本次实验期限为三天,无人机现场巡检情况如图4所示。

针对本次实验所应用的大鹏CW-20固定翼无人机进行分析,得出其主要参数如表1所示。

考虑到目标巡检区域地形仅包括平原和山区,不会对无人机飞行空域视线产生负面影响。因此,选定风力为0.5 m/s~1.0 m/s,且气温为25℃左右的晴朗天气,对无人机动力电池和遥控电池进行充电后,清点地面站联机装置、红外摄像机等设备,再运用所提技术进行电力线路智能巡检。

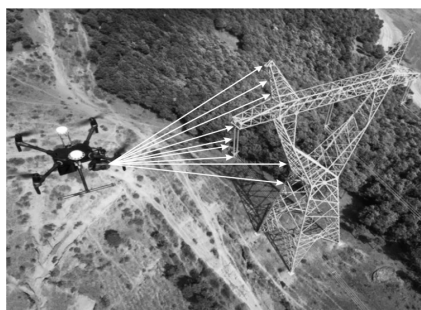


图4 无人机巡检示意图

表1 无人机主要参数表

序号	项目	参数值
1	起飞重量/kg	27
2	最大飞行速度/(km/h)	85
3	最佳巡航速度/(km/h)	30
4	飞行高度/m	3 600
5	最大航程/km	115
6	最大航行时间/h	≥5
7	翼展/m	3.5
8	机长/m	2.2
9	有效载荷/kg	≤2.3
10	抗风能力	6级
11	起降方式	垂直

## 2.2 巡检路径

根据文中研究内容,在试验区域内搜索最优机库地址,以此为核心进行无人机智能巡检路径规划。设置蚁群规模为100,且迭代次数为300次,在此基础上设置合理的权重系数,得到图5所示的巡检路径路线图。从图5可知,本次实验选定的电力巡检区域内共包含26根杆塔,综合每根杆塔的位置信息,设置三个无人机机库。通过迭代分析,最终形成四条智能巡检路径,覆盖整个研究区域。

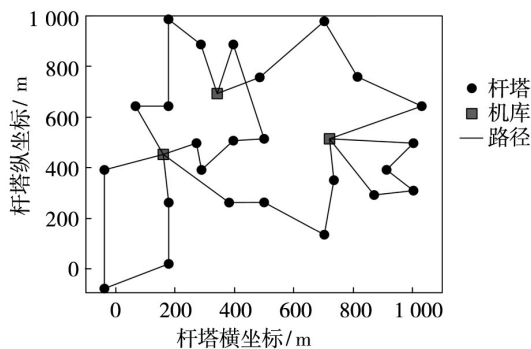


图5 智能巡检路线图

## 2.3 实验结果与分析

为了验证智能巡检技术的应用效果,按照上述生成的巡检路径进行9次无人机巡检,并在每次巡检之前,从交流接触器、接地故障继电器、变频驱动器和电敏曲线之中,人为随机设置故障问题。针对包含故障问题的电力线路,进行无人机智能巡检,得到表2所示的故障巡检结

果。从表2所示的故障巡检结果可以看出,应用文中提出的无人机智能巡检技术,可以准确提取出电力线路中包含的故障问题,从而保证电力稳定运行。但是,当无人机巡检距离为0.57 m、0.74 m时,无法获取故障信息,这表明当无人机飞行距离过大时,无法得到准确的巡检结果,为了保证该技术应用效果,需要在实际应用中确保无人机与待巡检线路之间的距离在0.5 m以内。

表2 故障巡检结果统计

次数(距离)	交流接触器	接地故障继电器	变频驱动器	电敏曲线
1(0.22 m)	无	无	有	无
2(0.31 m)	有	无	无	有
3(0.17 m)	无	有	无	无
4(0.16 m)	有	有	无	无
5(0.36 m)	无	无	无	有
6(0.57 m)	无	无	无	无
7(0.33 m)	无	有	无	有
8(0.74 m)	无	无	无	无
9(0.44 m)	无	无	有	无

## 2.4 性能对比

为了更加了解文中所提技术的优越性,分别采用基于混合算法的巡检技术、基于差分定位的巡检技术,同步开展电力线路智能巡检测试,记录不同技术的智能巡检执行时间,得到图6所示的对比结果。根据图6可知,基于混合算法、基于差分定位的技术,智能巡检执行时间分别为9.87 min、9.24 min,而文中提出技术的平均智能巡检执行时间为4.25 min。综上所述,所提技术与其他两种巡检技术相比,智能巡检执行时间降低了56.94%、54%,极大提升了无人机智能巡检效率。

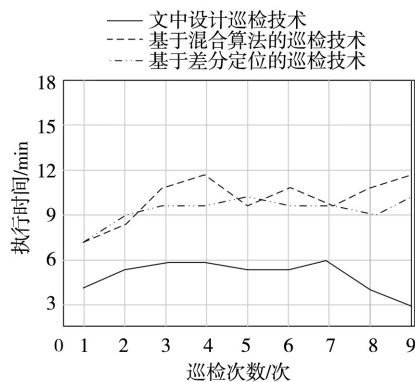


图6 不同技术的智能巡检执行时间对比

## 3 结束语

无人机远程操控技术的不断发展,使其在智能巡检领域得到了广泛应用。文中引入OPGW 光缆策略,建立OPGW 光缆通信组网,并结合无人机巡检安全距离和无人机机库选址结果,设计一种光纤环网无人机智能巡检

技术。根据实验验证结果可知,所提巡检技术与传统选件方式相比,加快了通信响应速度,使得智能巡检执行时间有了大幅度提升。但是,由于智能巡检技术研究过程中客观条件的限制,文中所提的技术未来还需要作进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 缪希仁,刘志颖,鄢齐晨. 无人机输电线路智能巡检技术综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 198-209.
- [2] 曾懿辉,何通,郭圣,等. 基于差分定位的输电线路多旋翼无人机智能巡检[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 24-30.
- [3] 彭福先,张玮,祝晓军,等. 基于激光点云精确定位的输电线路无人机自主巡检系统研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 117-122.
- [4] 黄郑,王永强,王红星,等. 基于云雾边异构协同的无人机智慧巡检系统[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 161-168.
- [5] 隋宇,宁平凡,牛萍娟,等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3636-3648.
- [6] 梁文勇,吴大伟,谷山强,等. 输电线路多旋翼无人机精细化自主巡检航迹优化方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3054-3061.

[7] 杨明博,周紫阳,游翔茗. 巡检无人机编队轨迹跟踪控制研究[J]. 飞行力学, 2021, 39(4): 39-44.

[8] 林志友,毛清华,田聪. 无人机全自主巡检系统在水电站的应用探讨[J]. 人民黄河, 2021, 43(S1): 194-195, 197.

[9] 邵瑰玮,刘壮,付晶,等. 架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 14-22.

[10] 黄郑,王红星,周航,等. 基于混合算法的电力杆塔巡检实时航迹规划[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 214-220.

[11] 李延波,李光. 基于深度强化学习的无人机飞行控制训练系统构建研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(10): 20-23, 166.

---

作者简介:刘奎(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向:输电线路。

(上接第123页)

信息安全共享方法在实际应用中有着更低的通信开销,更高的信息效用值,信息共享效果更好。

### 3 结束语

为提高医疗隐私信息的共享效率,保证信息共享效果,基于区块链技术设计了对应的医疗隐私信息安全共享方法,针对传统共享方法中存在的问题,制定了相应的解决方法,且在实际应用中取得了较为不错的应用效果。此外,本文设计的方法还存在些许不足,如信息共享的时间较长,在之后的研究中将会不断改善。

### 参考文献:

- [1] 余昕越,张艺锴,张勇,等. 基于混沌反向学习改进灰狼算法的移动网络调度运行信息共享方法[J]. 电信科学, 2023, 39(8): 82-90.
- [2] 王省,刘波,马强. 气象科普平台下山洪地质灾害信息共享方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(9): 73-75, 94.
- [3] 陈竞,杜杰,李宇远. 基于云平台的电力客户异地服务信息实时共享方法[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(8): 101-104.
- [4] 姚征. 基于文本信息增强的医疗大数据自动共享平台设计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(10): 141-143.
- [5] 夏肇元,程文美,刘菲,等. 基于区块链跨链的供应链信息共享方法[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(12): 189-191.
- [6] 郭海洲,褚全红,龚思扬,等. 基于区块链技术的柴油机电控系统数据共享平台研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(19): 173-177.
- [7] 甄武警,杨天开,常正,等. 基于区块链技术的数字身份链在政务服务场景中的应用探讨[J]. 中国工程咨询, 2023(9): 59-64.

[8] 李蒙,林棋. 基于区块链技术的城市轨道交通运营安全风险自动监测报警系统研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2023, 15(4): 127-133.

[9] 赵浩健,张焕春,刘宁,等. 基于区块链技术的订单农业体系构建与运营策略——以长沙市宁乡县宁乡猪为例[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(8): 202-206, 212.

[10] 刘春兰,唐天国,敬欢. 基于区块链技术的高职院校数字教学资源共享模型探究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(12): 254-256.

[11] 彭柳,张森,高杰欣. 基于区块链技术的电子档案安全存储与可信验证方案[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 728-733.

[12] 王彦华,赵廷磊,王顺晔,等. 基于区块链技术的光通信系统安全风险评价研究[J]. 激光杂志, 2022, 43(10): 197-201.

---

作者简介:蒋雪炳(1983—),男,本科,高级工程师,研究方向:信息化规划与发展。

通信作者:卢欣然(1980—),男,硕士,高级工程师,研究方向:医疗信息化。