

# 配网导线绝缘漆喷涂机器人及控制系统设计

郭锐<sup>1,2</sup>, 庞东泽<sup>3</sup>, 贾永刚<sup>2</sup>, 宋立博<sup>4</sup>

(1. 国网山东省电力公司 电力科学研究院, 济南 250002; 2 山东鲁能智能技术有限公司, 济南 250101;  
3. 华北电力大学, 北京 102206; 4. 上海交通大学 工程训练中心, 上海 200240)

**摘要:** 综合嵌入式系统、自动化、虚拟样机、无线通信、智能控制等技术、模块化设计及嵌入式系统方法, 设计了配网导线自动喷涂机器人系统; 该系统包括线上行走机器人机械移动本体、机载控制系统及地面站三部分, 机械本体采用模块化结构形式, 机载控制系统采用 ATmega 128A 8 位 MCU; 地面站软件采用 TurboDelphi 设计, 与机载控制系统之间采用 433 MHz 无线通信形式, 系统工作电压为 24 V; 实验表明, 该系统最大运行速度约 12 m/s, 最大涂漆厚度 2 mm, 鲁棒性强, 可稳定、高效地实现配网导线的绝缘漆自动喷涂作业。

**关键词:** 配网导线; 机器人; 无线通信; 嵌入式系统

## Development of Automatic Painting Robot and Its Control System for Over-head Electrical Power-line

Guo Rui<sup>1,2</sup>, Pang Dongze<sup>3</sup>, Jia Yonggang<sup>2</sup>, Song Libo<sup>4</sup>

(1. State Grid Shandong Electrical Power Company, Jinan 250002, China; 2. Shandong Luneng Intelligent Company, Jinan 250101, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
4. Engineering Training Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Combining such technologies as embedded control system, automation, virtual machine, wireless communication, intelligent control, modular design with embedded control method, an automatic insulation-painting robot was designed and developed. The robot consists of mechanical mobile carrier on the power-line, on-board MCU control system and station controller designed with TurboDelphi. Meanwhile, the modular method and embedded method were adopted to design the mechanical mobile carrier and the on-board ATmega128A 8-bit MCU control system respectively. The station controller connects with the on-board control system with 433MHz wireless module, and the motors run in 24V DC voltage. The site experiments indicate the robot moves in about 12m/s velocity, the paint thickness is 2mm, together with its robustness of the on-board MCU control system and high-performance of the painting robot.

**Key words:** over-head electrical power-line; mobile robot; wireless communication; embedded system

### 0 引言

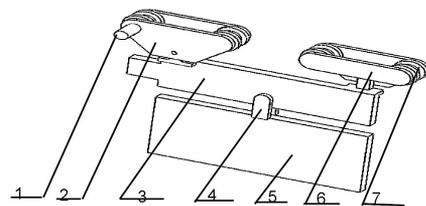
我国早期的部分架空电力线路采用裸线形式。为提高输电的安全性, 对配网导线进行清洗并敷设绝缘漆是一种可行的工程技术途径。但目前与电力线直接相关的机器人主要集中在巡检机器人<sup>[1-6]</sup>及除冰机器人<sup>[7-10]</sup>两个方面, 侧重控制系统设计、机构设计与分析及动力学分析等 3 个方向。

上海交通大学与山东省电力公司电力科学研究院、山东鲁能智能技术有限公司以裸线形式的配网导线为研究对象, 合作开展了配网导线自动清洗及喷涂方面的研究工作, 获得初步成果。本文研究配网导线绝缘漆自动喷涂机器人机械本体及控制系统设计方法。

### 1 自动喷涂机器人机械本体结构

自动喷涂机器人采用 3M 公司 B525 基料和相应的固化剂, 二者混合后即成为绝缘超过 110 kV 的高性能绝缘漆。为此, 自动喷涂机器人需要具有行走、搅拌、喷涂和遥控功能。

行走功能由移动车体完成。为避免搅拌装置随配网导线倾斜, 整个移动车体采用分段形式。采用滚轮对组成的行走装置实现平稳行走。一个与驱动电机相连的驱动轮与一个从动轮组成主动行走装置, 两个从动轮组成辅助行走装置, 如图 1 所示。



1. 驱动电机; 2. 主支撑板; 3. 上连板; 4. 中间连杆;  
5. 下连板; 6. 辅助支撑板; 7. 滚轮

图 1 行走装置示意图

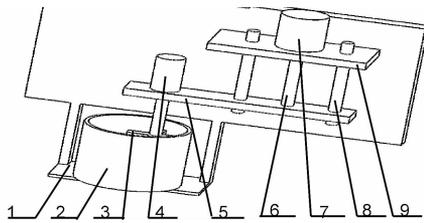
搅拌功能实现基料和固化剂之间的相互均与搅拌, 可由两个电机完成。上下运行电机带动搅拌头上下运动, 搅拌电机带动搅拌头匀速旋转, 在搅拌模块固定在下连板上时, 其结构如图 2 所示。

喷涂功能用于将搅拌好的绝缘漆送至配网导线, 并均速、均厚喷涂在配网导线上。因搅拌好的绝缘漆粘度较大, 设计由一较大功率的喷涂电机带动柱塞泵将绝缘漆通过管道送至横跨

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2014-01-13。

作者简介: 郭锐 (1978-), 男, 山东济南人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力机器人方向的研究。

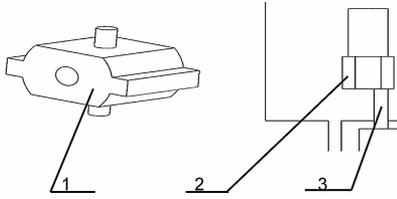
宋立博 (1973-), 男, 山东聊城人, 副研究员, 主要从事电力特种机器人方向的研究。



1. 油漆桶支架；2. 油漆桶；3. 搅拌头；4. 上下运行电机；  
5. 下活动板；6. 丝杠；7. 搅拌电机；8. 直线滑杆；9. 上固定板

图 2 搅拌模块示意图

在导线上的喷涂头上。喷涂头采用两半对称结构，配网导线从其机械结构中心穿过。其结构如图 3 所示。



1. 喷涂头；2. 喷涂电机；3. 柱塞泵

图 3 喷涂模块示意图

自动喷涂机器人在架空电力线上运行，还需要配置机载电源和机载控制系统。行走装置、搅拌模块、喷涂模块、机载电源及机载控制系统集成后，即成为在架空电力线上运行的绝缘漆自动喷涂机器人。

与文献 [11] 相比，本文设计的绝缘漆自动喷涂机器人具有如下特点：1) 采用分段结构形式，在导线倾斜时也可保持下连接板及搅拌模块的相对水平；2) 配网导线从喷涂头机械中心穿过，可实现绝缘漆的均速、匀厚自动喷涂。

## 2 控制系统设计

### 2.1 控制系统硬件设计

为提高系统可靠性，驱动电机、上下运行电机、搅拌电机及喷涂电机均采用 BL57 系列直流无刷电机，由配套的 BLDC-5015A 驱动器驱动。与控制器接口有 F/R（正反转）、EN-BL（使能）、AVI（速度）、SPEED（速度反馈，OC）及 GND 地线等信号，BRK（紧急刹车）、ALM（报警信号，OC）两个信号未使用。

考虑到 MCU 引脚的驱动能力，并为系统的 EMC/EMI 性能考虑，这些信号与 MCU 引脚需采用隔离形式，最常用的是光耦隔离和三极管隔离形式。在采用三极管隔离形式时，BLDC-5015A 驱动器与 MCU 之间的接口电路如图 4 所示。

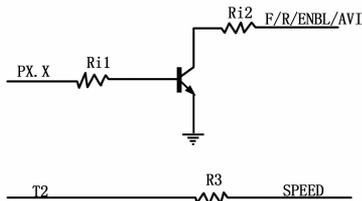


图 4 MCU 与驱动器接口电路

搅拌模块还需要 3 个传感器检测下活动板的位置，以实现上下运行电机和搅拌电机的运行、停止控制。为提高可靠性，采用 BES M12ML-NSC40F-BV00-002 接近开关作为位置

传感器。其与单片机接口电路如图 5 所示。

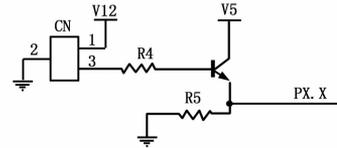


图 5 接近开关与 MCU 接口电路

无线通信采用 SM51 高速无线数传模块。

主控 MCU 采用 Atmel 公司的 ATmega128A 高性能 8 位 MCU。其主要性能参数：工作电压 2.7~5.5 V，最大运行频率 16 MHz，RISC 架构，128 k Flash，4 k EEPROM，4 k SRAM。此外，还具有 2 个 8 位定时/计数器，2 个 16 位定时/计数器，2 个 8 位 PWM 通道，8 个 10 位 ADC 通道，两个可编程的 UART，一个 I<sup>2</sup>C 接口，可工作于主/从模式的 SPI 接口，ISP 及 JTAG 性能。丰富的外设功能及 16 MIPS @ 16 MHz 的高速运算能力，使其成为配网导线绝缘漆喷涂清洗机器人的优先选择。

电路图设计采用 BSch 软件，PCB 设计采用 KiCAD 软件。

### 2.2 通信协议设计

为实现机载控制系统与地面站之间的通信，除二者工作于相同的频率外，还需要采用一致格式的通信协议。为简化对数据的处理要求，地面站发送给 ATmega128A 的控制数据采用如下格式：

R 1 C M D 0 x X

其中：R 代表机器人，2 代表喷涂机器人，CMD 代表指令，0 表示指令起始位，X 表示控制数据结束标志。x 表示具体的指令。例如，0 表示通信测试，1 表示反馈数据使能等。

ATmega128A 反馈给地面站的指令也采用 8 位形式，指令执行反馈数据格式如下：

R 2 D 0 x O K Y

其中：R 代表机器人，2 代表清洗机器人，D 代表指令，0 表示指令起始位，OK 表示指令执行结束，Y 表示指令数据执行结束标志。x 表示具体的指令。

检测数据反馈指令格式为：

R 2 P x x x x Y

其中：P 表示脉冲，xxxx 表示单位时间内检测到的脉冲数量。

### 2.3 控制系统软件设计

机载控制系统通过 UART 与地面站实现数据交互和通信功能。为提高机器人对控制指令的实时响应，采用前后台设计思路。其中，串口 1 采用中断接收、发送查询工作方式，主程序用于机器人前进、后退、停止、速度设置、开始清洗、停止清洗、使能数据反馈及禁止数据反馈等功能处理。

采用 WinAVR2010 编程时，其代码为：

```
# define UART1RXEnable UCSR1B |= _BV(RXCIE1) | _BV(RXEN1)
# define UART1RXDisable UCSR1B &= ~_BV(RXCIE1), UCSR1B &= ~_BV(RXEN1)
# define UART1TXEnable UCSR1B |= _BV(TXEN1)
# define UART1TXDisable UCSR1B &= ~_BV(TXEN1)
void uart1_init(void)
{
```

```

UCSR1B = 0x00;
UCSR1A |= _BV(U2X1);
UCSR1C |= _BV(UCSZ11) | _BV(UCSZ10);
UBRR1L=(fosc/16/(baud+1))%256;
UBRR1H=(fosc/16/(baud+1))/256;
UART1RXEnable;
UART1TXEnable;
}
ISR(USART1_RX_vect)
{
    UART1TXDisable;
    while(!(UCSR1A&(1<<RXC1)));
    tk = UDR1;
    datarcv[k++] = tk;
    if (tk=='Y')
    {
        k=0;   rcvhandle=1;
    }
    UART1TXEnable;
}

```

主程序实际进行数据处理工作, 其流程如图 6 所示。

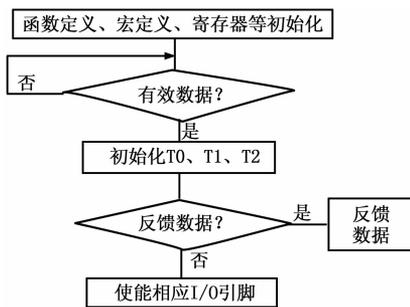


图 6 主控制程序流程图

例如, 用于数据反馈的软件代码为:

```

if(uSendData)
{
    for(i=0;i<=10;i++)
        _delay_ms(1000);
    adctemp = read_adc(0x40); //电压转换
    send_data_to_station(adctemp,K); //发送电压转换数据
    _delay_ms(1000);
    adctemp = read_adc(0x42); //导线倾角转换
    send_data_to_station(adctemp,L); //发送倾角数据
    TCNT2=0; T2START; _delay_ms(250);
    iTPulNum= TCNT2; T2STOP; TCNT2=0;
    send_data_to_station(iTPulNum,P); //发送转速数据
}

```

### 3 喷涂实验

在地面站控制下, 进行了绝缘漆自动喷涂机器人测试和实验。其中, 系统供电电压为直流 24 V。地面站操作系统为 Win XP, 运行使用 TurboDelphi Lite 开发的主控软件, 版本为 1.0。

地面站通过 UT-880 USB/RS232 转换器、SM51 高速无线数传模块及 433 Mhz 吸盘天线与机器人机载控制系统通信。机载控制系统异步通信格式为, 4 800 波特率, 8 位数据位, 1 位停止位, 无校验。在 PC 安装 UT-880 USB/RS232 转换器

驱动程序后, 虚拟的 COM4 串口通信格式也相应设为: 4800, 8N1。

在地面站控制下, 分别发送通信测试、速度设定、前进、停止、开始喷涂、停止喷涂、使能数据反馈及停止数据反馈等指令, 机器人均稳定、高效执行了相应操作指令, 圆满完成实验和测试目的, 无死机现象。

在最优喷涂效果下, 速度参数  $iMotion=8$ , 最大运行速度约 12 m/s。

### 4 结论

针对目前部分配网导线采用裸线形式需进行清洗和绝缘喷涂防护的客观需求, 设计了配网导线绝缘漆自动喷涂机器人系统。在地面站控制下, 进行通信、速度设定、前进、停止、开始喷涂、停止喷涂、使能数据反馈及停止数据反馈等测试。结果表明, 系统稳定、效率高, 可圆满完成配网导线绝缘漆自动喷涂作业。

#### 参考文献:

- [1] Montambault S, Pouliot N. Field experience with linescout technology for live-line robotic inspection and maintenance of overhead transmission networks [A]. Proc. 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry [C]. 2010; 255-256.
- [2] 曹雷, 郭锐, 张峰. 超高压多分裂输电线路巡检机器人研制与开发 [M]. 制造业自动化, 2012, 34 (12): 9-12.
- [3] Jaka Katrašnik, Franjo Pernuš, Boštjan Likar. A survey of mobile robots for distribution power line inspection [J]. IEEE PES Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (1): 485-493.
- [4] 杨德伟, 冯祖仁, 张翔. 新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析 [M]. 西安交通大学学报, 2012, 46 (9): 43-48.
- [5] 金珈成, 赵殿全, 龙志伟, 等. 巡线机器人末端执行机构的参数化设计与优化设计方法 [M]. 长春理工大学学报, 2012, 35 (2): 115-117.
- [6] Song Y F, Wang H G, Jiang Y, et al. AApe-D: a novel power transmission line maintenance robot for broken strand repair [A]. Proc. 2nd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry [C]. 117-122.
- [7] Zhao J, Guo R, Cao L, et al. Improvement of LineROver: a mobile robot for de-icing of transmission lines [A]. Proc. 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry [C]. 2010; 272-275.
- [8] Montambault S, Pouliot N. The HQ LineROver: Contributing to innovation in transmission line maintenance [A]. Proc. 2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance [C]. 2003; 33-40.
- [9] Pouliot N, Montambault S. Field-oriented developments for lineScout technology and its deployment on large water crossing transmission lines [J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29 (1): 25-46.
- [10] Pouliot N, Montambault S. Line scout technology: from inspection to robotic maintenance on live transmission power lines [A]. Proc. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2009; 2034-2040.
- [11] 北京深浪电子技术有限公司. 输电线路防覆冰遥控自动喷涂机器人 [P]; 中国, CN102228876B. 2011, 7-1.
- [12] Atmel Corporation ATmega128A: 8-bit AVR Microcontroller with 128k Bytes In-system Programmable Flash (Rev. 8151H - AVR-02/11) (EB/OL). <http://www.atmel.com>.