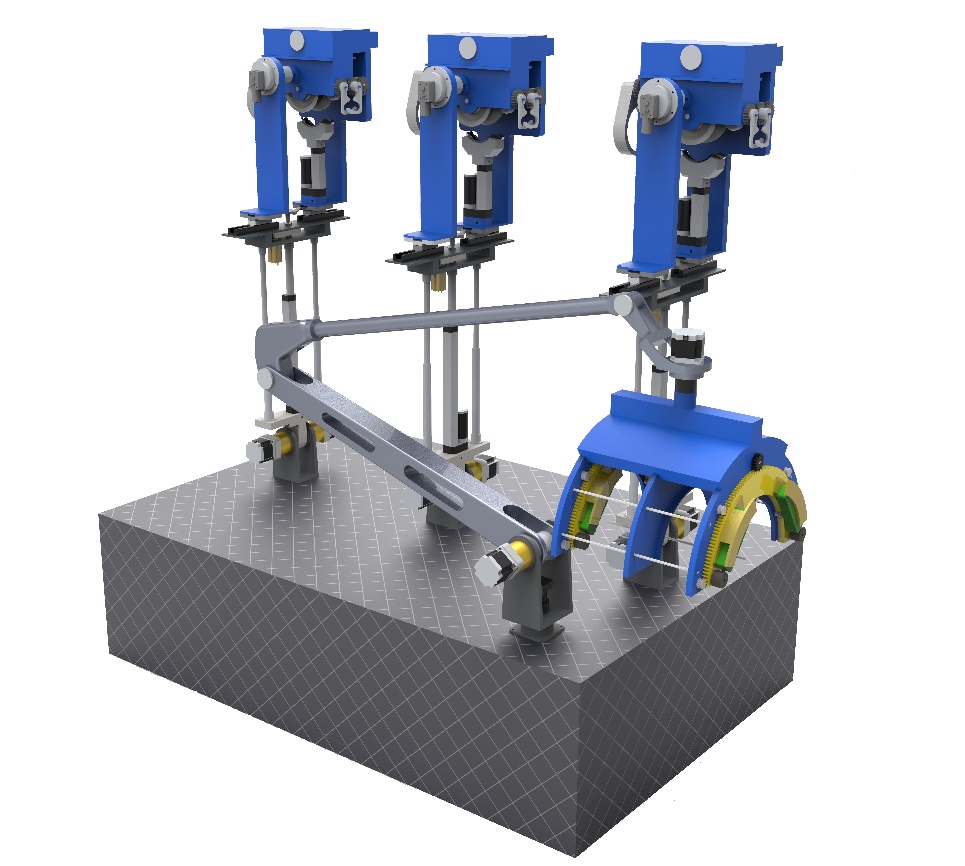
**第十六届“创新杯”大学生课外学术科技作品竞赛**

**架空高压输电线路绝缘子清扫机器人**

**设计说明书**

****

**学院名称：** 物流工程学院

**项目名称：** 架空高压输电线路绝缘子清扫机器人

**指导教师：** 李波 副教授 陈定方 教授、博导

**参赛人员：** 陈万鑫 潘 思 范嘉玮

黄天豪 魏 翔 张祖林

**------------武汉理工大学------------**

**摘 要**

电力工业是国民经济的基础产业，绝缘子作为电力环节中增加爬电距离的绝缘控件，在整体电力架构上不可或缺，但因表面污垢积累而导致其电导率降低，从而产生的“污闪”事故屡见不鲜，造成了严重的电力经济影响与社会安全影响。

基于当前人工清扫绝缘子难度大、机器清扫智能程度低的现状，项目组结合机器人控制与模式识别方法设计了一种架空高压输电线路绝缘子清扫机器人，以完成绝缘子的日常维护清理与高压线路检修工作。

绝缘子清扫机器人由机械结构模块、控制模块和模式识别模块构成。

机械结构模块包括行走越障臂、清扫臂、检测模块及耦合取电装置。行走越障臂采用三臂越障方法越过架空线，并通过行走越障臂的自分离对输电线上的防振锤及线夹进行越障；清扫臂设计有非完全齿轮机构，用来驱动两侧毛刷旋转从而全角度清洁绝缘子表面；检测模块设有热像仪，用于实时检测零值绝缘子并反馈信息；耦合取电模块采用CT感应取电和蓄电池双供电方案，通过切换电源与行进充电实现长久续航。

控制模块结合专家系统与决策动作函数库，实现不同识别模式下行走越障的机电控制；搭建分布式协同控制系统，由多闭环控制与PID算法保证多自由度清扫臂的姿态调整；自动控制与在线控制相结合，实现整机自主避障与检测清扫。

模式识别模块通过结合机器视觉与机器学习，应用ARM-FPGA并行硬件架构对环境信息高效处理；采用贝叶斯网络算法进行工作模式识别，以适应越障时的复杂情形。

综上所述，本项目根据当前绝缘子清扫困难的问题，采用机电一体化思想，考虑冗余并联机构设计，实现了机器人在高压线上完成自主越障与自动清扫。其具有图像识别与模式识别功能，并采用双电源模式，续航能力强，使清扫效率极大提升，具有巨大的研究意义与应用前景。

**关键词：**绝缘子清扫，三臂越障，CT感应取电，机器视觉，机器学习

**目 录**

[1.项目背景与研究意义 1](#_Toc464399956)

[1.1项目背景 1](#_Toc464399957)

[1.1.1高压输电线路环境介绍 3](#_Toc464399958)

[1.1.2绝缘子清扫研究 8](#_Toc464399959)

[1.2项目研究意义 14](#_Toc464399960)

[2.总体设计方案 15](#_Toc464399961)

[3.机械结构模块设计 17](#_Toc464399962)

[3.1机器人整机介绍 17](#_Toc464399963)

[3.2行走越障模块 17](#_Toc464399964)

[3.2.1越障机械臂 18](#_Toc464399965)

[3.2.2驱动装置 23](#_Toc464399966)

[3.3清扫模块 23](#_Toc464399967)

[3.4检测模块 25](#_Toc464399968)

[3.5耦合供电模块 26](#_Toc464399969)

[4.控制模块设计 27](#_Toc464399970)

[4.1行走越障控制设计 27](#_Toc464399971)

[4.1.1行走越障臂动作决策 27](#_Toc464399972)

[4.1.2行走越障臂动作控制 31](#_Toc464399973)

[4.1.3行走越障臂闭环控制 32](#_Toc464399974)

[4.2清扫动作控制设计 33](#_Toc464399975)

[4.2.1绝缘子清扫臂控制原理 34](#_Toc464399976)

[4.2.2清扫臂闭环控制方法 35](#_Toc464399977)

[4.2.3清扫臂数字PID算法 36](#_Toc464399978)

[4.2.4清扫头清扫动作控制 37](#_Toc464399979)

[4.3耦合供电模块控制设计 38](#_Toc464399980)

[5.模式识别模块设计 40](#_Toc464399981)

[5.1图像获取部分 40](#_Toc464399982)

[5.2图像处理部分 41](#_Toc464399983)

[5.2.1图像预处理 42](#_Toc464399984)

[5.2.2图像识别 43](#_Toc464399985)

[5.3机器学习算法 44](#_Toc464399986)

[6.上位机设计 46](#_Toc464399987)

[6.1远程监测模式 46](#_Toc464399988)

[6.1.1清扫机器人姿态的三维显示 46](#_Toc464399989)

[6.1.2清扫机器人参数显示 47](#_Toc464399990)

[6.1.3工作情况显示 48](#_Toc464399991)

[6.2远程控制模式 48](#_Toc464399992)

[6.3远程预警模式 49](#_Toc464399993)

[7.关键机构优化分析 50](#_Toc464399994)

[7.1清扫臂的强度校核 50](#_Toc464399995)

[7.2行走轮轮轴的静力学分析 52](#_Toc464399996)

[7.3清扫头的运动学分析 54](#_Toc464399997)

[7.4其他安全校核 55](#_Toc464399998)

[8.创新点及作品优势 56](#_Toc464399999)

[8.1创新点 56](#_Toc464400000)

[8.2作品优势 56](#_Toc464400001)

[9.前景展望 58](#_Toc464400002)

[9.1应用前景 58](#_Toc464400003)

[9.2市场前景 58](#_Toc464400004)

[10.经济性分析 59](#_Toc464400005)

[11.参考文献 61](#_Toc464400006)

1.项目背景与研究意义

1.1项目背景

电力工业是国民经济的基础产业，电力企业具有社会公用事业和企业行为双重性质。电力工业为各行各业提供电力、为人民日常生活提供光明与便利，因事故造成供电中断，就可能造成各行各业的生产停顿或瘫痪；工业化进程加速带来的是污染物种类多样化和污染程度越来越高，污秽对电力系统的安全运行造成的影响越明显。当遇到大雾等不良天气时，绝缘子表面上附着的污秽很容易发生污闪，造成大面积线路短路或者多数变电站跳闸等现象，相比停电，严重时甚至造成人员伤亡，如图1为绝缘子污闪而造成的火灾。



图1 绝缘子发生污闪

近年来我国有多起大面积污闪事故发生。例如，1996年12月27—30日华东地区出现罕见的大雾，华东电网23条500kV线路中就有11条发生闪络，跳闸77次；220kV线路中24条线路闪络，跳闸58次。1996年12月，安徽省35条220kV线路有8条发生污闪事故，跳闸35次；8条500kV线路有2条发生闪络事故，跳闸6次。据不完全统计，1971—1980年我国输电线路发生的污闪事故1126次，变电所设备的事故有761次，到了1981—1990年，输电线路发生的污闪事故1907次，变电所设备的事故达695次。后10年的污闪事故次数比前10年又有增加，且事故严重。20世纪90年代后大面积污闪事故更为突出，1990年华北地区发生大面积的污闪事故，1996—1997年华东地区出现大面积的污闪事故，以及2000年辽宁、华北、河南等地同时出现大面积污闪事故。进入21世纪后情况并没有得到太多好转，2001年初春，华北电网1月至2月，河北、河南、京津唐地区发生严重大范围污闪现象，场、铁路和多种工矿企业的重要用户停运停产，供电局电铁牵引站面临解列危险，直接电量损失超过10000MWh；2011年初春，疆南电网发生了一起较为严重的污闪事故，造成8个110kV变电站和一个220kV变电站的110kV母线失压停电；总的切除负荷155MWh，造成疆南地区大面积停电，疆南地区电网和新疆大网解裂。由此可见，污闪事故都具有事故影响范围大、持续时间长、经济损失严重等特点，并且跨地区、跨省市的大面积污闪开不断始出现，给国民经济带来的损失愈来愈大。

污闪事故造成的直接电能损失，以及给国民经济到来的损失是十分惊人的。一次污闪事故的发生，小则造成区域性突发停电，大则导致整个电网供电中断。所以解决污闪问题一直是我国电网的重点难题。污闪事故的主要原因是绝缘子表面遭受污染，绝缘子长期暴露在空气中，灰尘和其他污染物集聚在绝缘子表面，当空气湿度较大时，绝缘子表面污染物吸收水分，使得绝缘子表面的电导率增大，绝缘子的电气绝缘性大大降低，输电线路配置的外绝缘水平相对于设备表面实际污染程度对外绝缘的要求相差太多的缘故，从而导致污闪事故。

为预防污闪事故的发生，绝缘子表面的清理成为了高压电网巡检的重要项目，一般地区一年清扫一次，污秽区每年清扫两次。现有的清理方式有停电清扫、不停电清扫和带电水冲洗三种。其中停电清扫因需要停电作业目前已少有采用。

带电水冲洗包括固定式水冲洗和移动式水冲洗两种。固定式水冲洗一般应用于环境污染严重地区，在绝缘子附近都有固定的水枪用于实时冲洗；移动式水冲洗多使用移动水冲洗设备（如消防车或轮式带电水冲洗车），采用人工手持水枪的方式对绝缘子进行带电水冲洗，如图2所示。这种方式对冲洗操作人员的技术水平和操作流程要求较高，并且需要较高的安全防护措施，但有些类型的绝缘子污秽沉积物不溶于水，比如水泥等化工产品，导致冲洗效果不佳。



图2 带电水清洗绝缘子

不停电清扫主要是人工清扫。对于那些不能用高压水冲洗除掉的绝缘子表面污秽沉积物，一般采用工人手持干燥媒质的方式进行清除，但采用这些方式清除污秽沉积物的成本较高，而且对绝缘子表层会造成一定程度的损坏。这种方式的清扫结果虽然较为全面彻底，但劳动强度很高并且危险性较大，难以保证工作人员的生命安全。对于重型车辆不易到达地方的变电站绝缘子，对其进行人工清扫则是唯一选择。人工清扫如图3所示。



图3 人工清扫绝缘子

涂防污闪材料也是提高绝缘子抗污闪能力的有效手段，这种涂料的憎水性和憎水的迁移性是显著提高污闪电压等级的关键。但由于涂料在几年使用后抗污能力会显著降低，仍然需要定时人工清理绝缘子的污秽。下图4为涂有RTV防污闪涂料的绝缘子。



图4 RTV防污闪涂料

1.1.1高压输电线路环境介绍

**1、高压输电定义**

从发电站发出的电能，一般都要通过输电线路送到各个用电地方。根据输送电能距离的远近，采用不同的高电压。从我国的电力情况来看，送电距离在200～300公里时采用220千伏的电压输电；在100公里左右时采用110千伏。一般称220千伏以下的输电电压叫做高压输电，330到765千伏的输电电压叫做超高压输电，1000千伏以上的输电电压叫做特高压输电。

**2、架空线路介绍**

架空线路是由导线、避雷针、杆塔、绝缘子和金具等原件组成。输电铁塔最顶端顶着的是避雷线。雷暴多地区或电压等级高的线路是两根避雷线，雷暴不严重或电压等级低的线路可以减少到一根避雷线，避雷线都是跟铁塔相连的，为的是把雷击时的电流能顺着铁塔引到地里面去。不过在接的时候，避雷线和杆塔中间是有段绝缘体或绝缘子的，其之间设有跳线。这样的目的是可以在雷击时方便击穿泄流，同时在平时减少输电损耗。架空线路的简化图如图5所示。

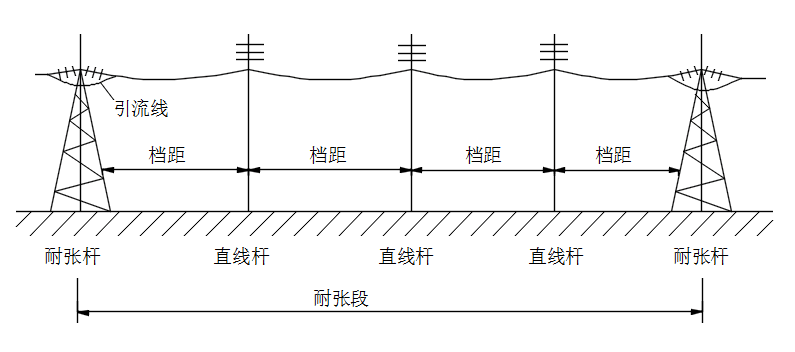


图5 架空线路简化图

**3、高压线介绍**

高压线的专业名称叫架空线，是指一种无绝缘、裸露的金属导体，在空中架设，以绝缘子串固定在铁塔上，以空气为绝缘。其主要优点是成本低，而缺点是占用土地资源（线路走廊）较多，影响城市市容。

同样作为电力传动的还有电力电缆，其采用绝缘介质将金属导体与外界隔离，敷设在地面或地下，它的主要优点是敷设较方便，占用土地资源较少，不影响城市市容，而缺点是成本太高。

就安全性方面来说，目前行内认为，由于材料和制造工艺等方面的原因，架空线的安全性优于电力电缆，同时其故障率也远远低于电力电缆，而且具有节省投资、施工维护和投资检修比较方便的优点，所以电力网中绝大多数的线路都采用架空线路。

**（1）架空线材料**

现在架空输电线路导线主要采用钢芯铝绞线，如图6所示。其主要特点如下：

① 通流能力大，取决于铝股的横截面的大小；

② 允许承受的拉力大，主要取决于钢芯的横截面积。

钢芯铝绞线按其铝、钢截面比的不同，分为正常型（LGJ）、加强型（LGJJ）、轻型（LGJQ）三种。在高压输电线路中，采用正常型较多。在超高压线路中采用轻型较多。在机械强度高的地区，如大跨越、重冰区等，采用加强型的较多。



2

1

图6 钢芯铝绞线

附注1：钢芯 附注2：铝线

**（2）架空线垂度f**

垂度f通常指导线中一个档距内最低点与连接两悬挂点水平线（或斜线）之间的垂直距离。影响垂度f值大小的因素有导线材料的容重、覆冰情况、环境温度和档距大小等。

架空线垂度的计算通常有三种方法：平抛物线法、斜抛物线法和悬链线法。悬链线法的使用范围是适合架空线任何情况，且未对载荷作任何假定，因此它是求垂度的最精确的方法。

**4、杆塔**

杆塔主要是用于支持导线和避雷针的。按用途不同可以分：直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔和特种杆塔五种，当前运用最广泛的是耐张杆塔和直线杆塔。

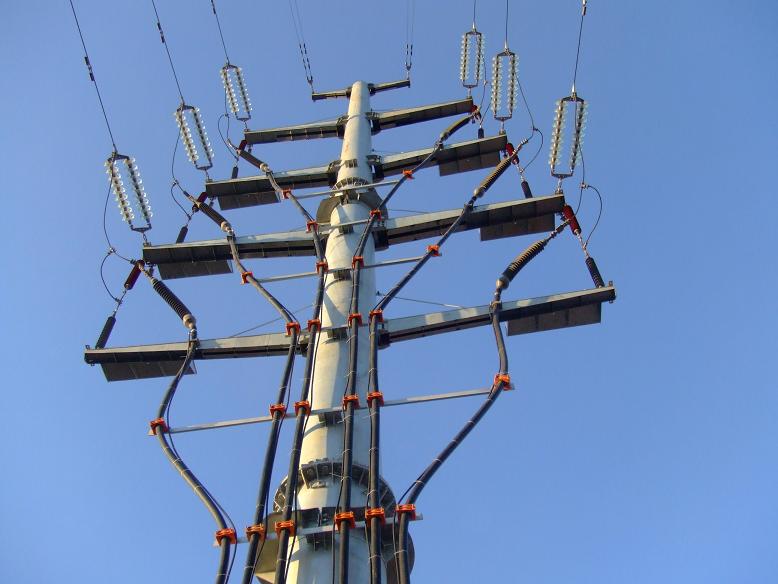
 

图7 耐张杆塔 图8 直线杆塔

避雷线下方就是输电线路，根数都是3的倍数，3根线的叫一回线，6根线的叫两回线，12根的叫四回线，每一回里都有ABC三相的三根线。杆塔的结构简化图如图9所示。

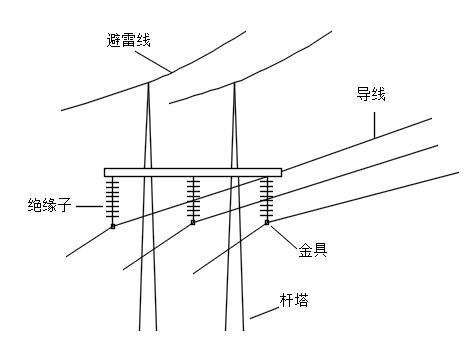


图9 杆塔结构简化图

输电导线是由输电杆塔一段一段撑起来的，高电压等级的用“铁塔”，低电压等级的比如居民区里见的一般用“木头杆”或“水泥杆”，合起来统称“杆塔”。高电压等级的线路需要有更大的安全距离，所以要架得很高。

虽然设计规程上没有规定杆塔要多高，但非常详细地规定了输电导线距离其他物体的最小距离。输电线路一档大约500米，导线是要下垂的，尤其是天气热和用电负荷大的时候，导线热胀冷缩，会下垂的更厉害。所以规定中明确写了各电压等级的输电线路的导线对各种物体的最小距离。例如在居民区导线对地面最小距离分别为35~110kV是7米，220kV是7.5米，330kV是8.5米，500kV是14米，750kV为19.5米。如果考虑导线弧垂和绝缘子长度，则110kV大概离地面十几米，220kV和330kV是二十几米，500kV是三四十米，750kV是五十几米，1000kV是七八十米。

杆塔配电线路的档距取决于三个方面：

（1）导线材质：目前常见的钢芯铝绞线也分为多芯和单芯，所以能够承受的导线质量也就不同，最大档距也就不同，芯数越多承重越大、档距越大；

（2）杆塔类型：按照杆塔的功能通常分为直线杆、耐张杆、转角杆等，其中耐张杆能够承受的拉力最大、造价最高，因此使用耐张杆能架设的档距最大；

（3）气候条件：温差越小、风力越小、敷冰越小的气候环境可以架设的档距越大，反之越小，外界对架空线的影响是很明显的。

6~10KV的电压档距一般为100m以下，110~220kv电压如果用钢筋混凝土时为150~400m如果用铁塔时为250~500m。

**5、绝缘子**

绝缘子是一种特殊的绝缘控件， 能够在架空输电线路中起到重要作用。早年间绝缘子多用于电线杆，慢慢发展于高型高压电线连接塔的一端挂了很多盘状的绝缘体，它是为了增加爬电距离的，通常由玻璃或陶瓷制成，就叫绝缘子。绝缘子不应该由于环境和电负荷条件发生变化导致的各种机电应力而失效，否则绝缘子就不会产生重大的作用，就会损害整条线路的使用和运行寿命。

绝缘子主要用于支持导线，并使导线与杆塔可靠绝缘以及承受导线垂直荷载和水平荷载的作用。根据多种性质，绝缘子的分类如下：

（1）按介质分类：盘形悬式瓷质绝缘子、盘形悬式玻璃绝缘子、半导体釉和棒形悬式复合绝缘子，如下图10、11、12所示。

（2）按连接方式分类：球型和槽型；

（3）按承载能力大小分为：40、60、70、100、160、210、300kN七个等级；

（4）按形状不同可以分为：针式绝缘子、悬式绝缘子、瓷衡担绝院子及棒型绝缘子；

（5）按表面性质可分为：普通型、耐污型、空气动力型和球面型等类型。

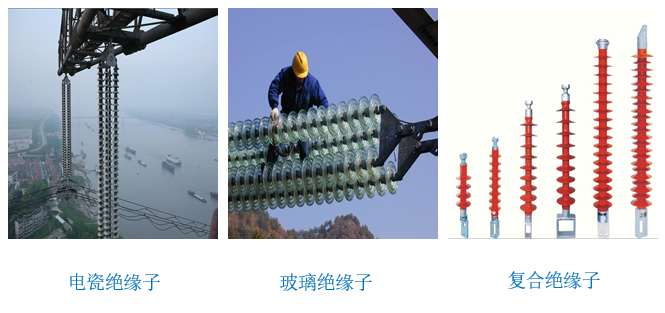


图10 电瓷绝缘子 图11 玻璃绝缘子 图12 复合绝缘子

绝缘子是光滑的，可以减少电线之间的容抗作用，以减少电流的流失。线路导线的绝缘依赖于绝缘子串，由于制造缺陷或外界的作用，绝缘子的绝缘性能会不断劣化，当绝缘电阻降低或为零时称为低值或零值绝缘子。在长期使用的线路中，零值或低值绝缘子的比例竟高达9%左右，这是线路雷击跳闸率高的另一主要原因。当前绝缘子上出现的主要问题分为上述的零值绝缘子问题和污闪问题，这两种问题绝缘子都极造成污闪现象。

**6、防振锤**

在高压架空线路上，靠近绝缘子两侧的导线上常挂一个小锤，这种小锤叫防振锤，是为了减少导线因风力扯起振动。导线振动时，导线悬挂处的工作条件最为不利。由于多次振动，导线因周期性的弯折会发生疲劳破坏。当架空线路档距大于120米时，一般采用防振锤防震。如下图13所示。

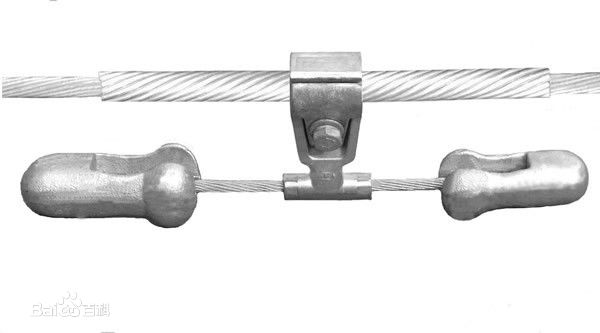


图13 防振锤

对于钢芯铝线，防振锤重量为：M = 0.4d - 2.2（kg）

式中d为导线外径（mm）

1.1.2绝缘子清扫研究

**1、国内研究现状**

由于国内电力污闪情况严重的原因，国内针对绝缘子污秽清扫的研究起步较早。在上世纪五十年代，变电站设备的除污主要采用的是人工停电清扫的方式。在1962年，北京供电局开始了有关带电水冲洗绝缘子的研究。在1970年初步制造了人工手持的带电水冲洗设备，但由于当时环境与水供应困难的问题并没有得到太大的普及，直到上世纪八十年代停电人工清扫仍然是国内绝缘子清扫的主要方式。

1995年，襄樊分局襄樊轨道车辆厂面向国内电气化铁路市场，参与国际招标，与法国吉斯玛公司合作，引进国外先进技术，于4月30日研制成功国内第一台绝缘子清洗车。

2001年，西北电力公司研发了一种叉车装配超高压带电自动清扫机，其由绝缘清扫器由动力箱、绝缘升降梯、绝缘传动杆、可张合的蟹钳形毛刷盘等系统组成。绝缘清扫器安装在叉车的货叉上。清扫用的蟹钳形毛刷盘安装在绝缘梯的顶端。毛刷盘通过绝缘传动杆、齿轮带动作高速旋转，完成对设备的清扫工作。

2003年，山西省运城供电分公司赵树海研制成功了一种绝缘子风力清扫环，它由一个绝缘环和风力推动碗、毛尉环、刮板等组成，如图14所示。利用风力使清扫环在绝缘子上旋转，扫除和刮去绝缘子表面上的污垢，使绝缘子保持清洁。



图14 实装的绝缘子清扫环

2005年，上海交通大学机器人研究所研制除了一种车载式工作于高电压环境下绝缘设计的绝缘子清扫机器人，其采用了剪叉式绝缘升降机构、绝缘液压系统、两级控制光纤及无线通讯等绝缘方法，整个机器人集合了高电压绝缘液压绝缘材料无线通讯、视觉和自动控制等许多方面的技术。其整机如图15所示。

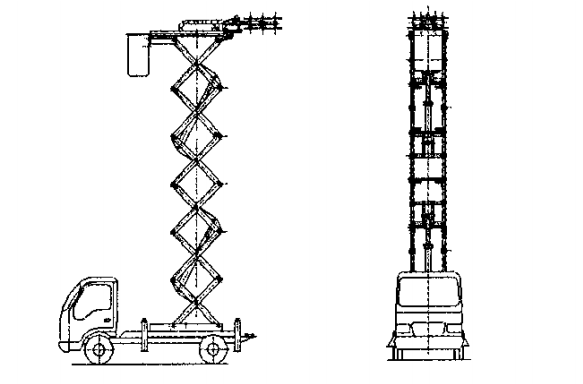


图15 车载式高压绝缘子清扫机器人

2011年，内蒙古电力科学研究院的唐术锋博士等发明了一种变电站垂直绝缘子带电干冰清洗设备，该设备解决了人工清扫需要停电、带电水冲洗污染环境、带电气吹清扫和带电机械干清扫易造成二次污染、涂防污涂料难清除等问题。该设备通过从末端清洗工具处喷射干冰颗粒到绝缘子表面，到达非接触清洗绝缘子的目的。其整机如图16所示。



图16 干冰清洗绝缘子机器人

2014年，国家电网申请了一项关于绝缘子清扫机器人的专利，其包括爬行机构、清扫机构、锁紧机构、检测机构及电池控制系统，爬行机构为闭合圆周形结构，包围绝缘子串，带动机器人沿绝缘子串连续移动；清扫机构为闭合圆周形结构，环绕绝缘子串，锁紧机构均匀设置于爬行机构上，爬行机构通过锁紧机构与清扫机构连接；检测机构布置在锁紧机构一侧，电池控制系统安装于爬行机构上。但其需要人工将其放置在绝缘子上才可进行清扫，无法完成独立在高压线越障行走的问题。其整机如图17所示。

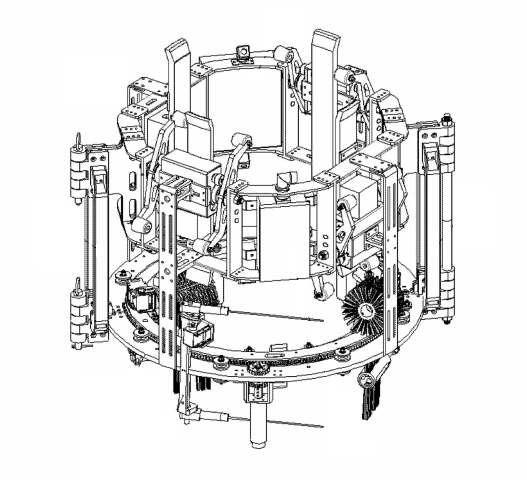


图17 圆柱形绝缘子清扫机器人

2015年西南交通大学机械工程学院姚波等人设计研究了一种变电所绝缘子水冲洗机器人，该机器人主要包括行走机构、冲洗机构、管路系统。在铁路变电所狭小环境下，该冲洗机器人与水冲洗车相结合，可代替人工实现绝缘子冲洗作业，提高冲洗安全性。其整机结构如图18所示。

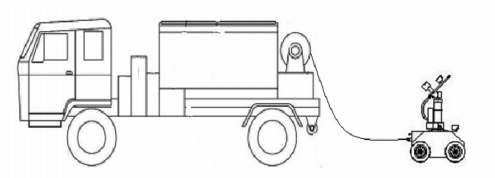


图18 自动冲洗机器人

综上所述，目前国内的绝缘子清洗仍处于人工车洗阶段，主要由工作人员驾驶车辆到需要进行绝缘子清洗的地点，然后使用带电水喷洒或干冰冲洗来清理绝缘子，这两种方法均存在耗能较大、清理效率较低的问题。而国内多数对绝缘子清扫机器人的研究依然处于实验室阶段，没有任何绝缘子清扫型机器人投入市场使用。

**2、国外研究现状**

污闪情况在上世纪五十年代就已经成为西方电力系统的大问题，美国和西欧从上世纪七十年代初开始研究防污闪绝缘子RTV涂料，美国太平洋煤气电力公司于1973年开始了涂料的现场试运行。日本于1975年着手解决绝缘子的除污问题，开始的十年在绝缘子涂料和新型材料绝缘子上都进行了大量的尝试，但仍没有效地解决绝缘子的除污问题。

1979年，直升机带电作业技术最先由美国进行了尝试。其后几年间，澳大利亚、以色列、西班牙和意大利在直升机水冲洗绝缘子作业方面开展时间相对较早，设备主要由直升机、喷嘴和水箱等组成，有效地提高了电网运行过程中的绝缘水平和可靠性。下图为直升机定位带电清扫绝缘子实况。清理实况如图19所示。



图19 直升机清理绝缘子

在日本，九州电力公司和安川机器人公司合作于1984年开始了高压带电作业机器人的研究。到目前为止，日本的高空高压带电作业机器人研究已经进入第三代(Phase III，研究计划为1996—2006年)。到1993年仅日本九州地区就已经有85个带电作业机器人在现场工作。美国、加拿大也是在80年代中期开展了高空带电作业机械手的研究。西班牙在1990年首次开展了带电作业机械手的研制，并于1994年完成了第一个阶段的工作。前两代Phase机器人如图20、21所示。

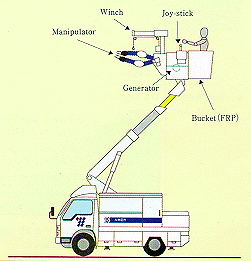
 

图20 Phase Ⅰ机器人 图21 Phase Ⅱ机器人

2006年，韩国电力研究院研制了一种绝缘子清扫的机器人。该机器人采用的机制是通过伺服电机的旋转来驱动支架上面的齿轮机构工作，齿轮机构带动圆周导轨运动，作为支撑刷盘的导轨完成刷盘相应的展开与回缩工作，同时直流电机带动刷盘开始旋转，刷盘即可在绝缘子内部进行360°的旋转清扫，完成对绝缘子表面污垢的清洗。整个工作过程中可以覆盖绝缘子整个表面。下图所示为该绝缘子清洗机器人的机构图。其清洗结构示意图如图22所示，外形结构图如图23所示。

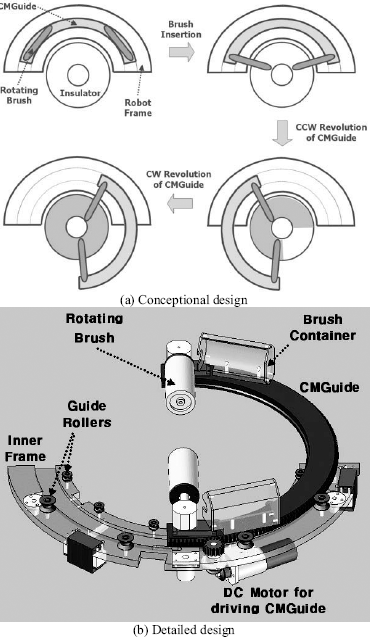
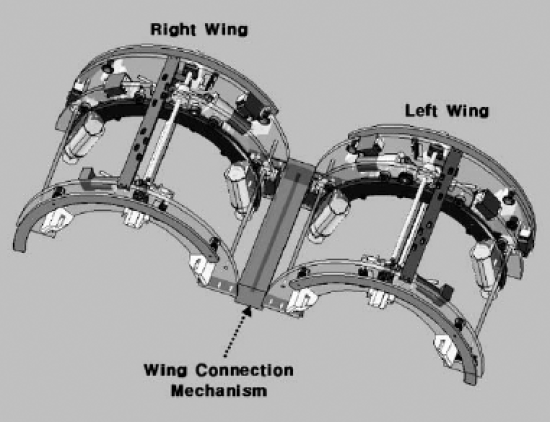
 

图22 清洗机构结构图 图23 机器人外形结构图

综上所述，当前国外的绝缘子人工车洗清扫已经远超国内，已经存在了高效率的人工车洗清扫方式，但其绝缘子清扫机器人的研究仍未实现全自动化，仅在韩国完成了单个卸载绝缘子的自动清扫，没有任何全自动清扫型的绝缘子清扫机器人投入市场使用。

1.2项目研究意义

随着城市的一步步发展，大城市中的电路需求将会越来越考验电网传输的效率和稳定性，每一次断电都会造成越来越大的经济损失，而绝缘子的污闪问题一直都是城市断电的重点问题。针对当前绝缘子人工清扫方式耗能太大、机器清扫效率太低且清扫效果不理想的问题，为了有效地减少绝缘子污闪发生频率，降低国民的经济损失，本项目组研究设计了一款架空高压输电线路绝缘子清扫机器人。

本作品具有如下现实意义：

**（1）在高压输电线上完成自主越障与自动清扫**

本作品通过机械结构模块中的多种机构协同配合，实现高压线上多种不同情况的越障功能，使机器人能在高压线上迅速灵活地移动；通过清扫模块实现对绝缘子的自动清扫，能快速、高效地扫除绝缘子上的多种污垢，有效延缓其电容率下降问题，降低高压线污闪事故频率。

**（2）为高空输电线机器人提供了新的电源方式**

本作品通过CT取电装置和电源管理系统组成供电系统，在越障过程中由电源管理系统的蓄电池完成电源供给，在运行与清扫过程中由CT取电装置完成电源供给，同时也完成对蓄电池的充电。这种新型电源方式能保证机器在高压输电线上的长久续航，并较于其他清扫方式具有最低的能源消耗。

**（3）提供了一种输电线路模式识别的新型算法思路**

贝叶斯网络算法是一种能自生长与挖掘特征数据的算法，本作品针对机器图像识别过程中人工智能及机器学习的难点，通过采用贝叶斯网络算法实现机器的学习功能，使机器能针对不同环境检测物进行分类，以得出不同的工作情景。这种新型算法具有较高的准确度，能运用于其他所有高空输电线机器人的模式识别模块中。因此本作品为输电线路上的机器越障学习提供一种新的算法解决方式。

2.总体设计方案

****

图24 总体设计框架图

为实现在架空高压输电线上绝缘子的清扫工作，项目组设计了机械结构模块、控制模块和模式识别模块三大模块。其总体设计框架图如图24所示。

机械结构模块主要由行走越障模块、清扫模块、检测模块和耦合供电模块四部分组成。

**行走越障模块：**是机器的运动模块，由电力驱动三条机械臂上的行走轮在电线上移动，并通过三条机械臂的交替运动越过各种障碍物；

**清扫模块：**是机器的主要功能模块，多自由度机械臂通过半环形结构清扫头实现绝缘子清扫，带动其上的毛刷环绕清扫绝缘子腔内的污秽；

**检测模块：**是机器的信息模块，通过对输电线路的在线检测与对绝缘子的非接触检测完成高压线上信息的接受过程；

**耦合供电模块：**是机器的供能模块，采用互感CT取电与蓄电池供电的双重供电方式实现长时间续航前行。这些模块相互配合，实现整体的功能。

控制模块分为行走越障模块控制、清扫模块控制和耦合供电模块控制三部分。

**行走越障模块控制：**用于调节整机的行动速度以及控制机械臂分步运动，实现越障功能。整机通过其上的多种感应方式实现环境分辨，控制行走越障臂的行走电机，采用位置、速度、电流三闭环控制保证行走动作正常完成；越障臂旋转动作控制使用积分分离的PID控制算法，闭环控制机械臂振动在允许范围内；

**清扫模块：**其主要分为对绝缘子的定位控制和对绝缘子的清扫控制，前者通过传感器测距实现，后者通过清扫臂前端的清扫头伸出毛刷清扫实现，清扫臂采用底层主、协处理器结合上位机在线控制的方法调整机械臂姿态，使用ARM+FPGA动作控制卡完成关节动作实现，清扫头使用双计时器双缓冲模式对旋转平台控制，采取相频修正PWM模式，保证旋转运动精度与速度；

**耦合供电模块：**用于控制CT取电系统的整体运作，其通过控制CT取电装置上的半环开合，完成对高压电线的取电与断开。

模式识别模块分为图像获取部分、图像处理部分和机器学习算法三部分。

**图像获取部分：**其通过CCD传感器件完成图像采集工作，从而获得路段上的图像数据；

**图像处理部分：**包括图像预处理和图像识别，图像预处理即为对系统处理的目标对象进行阈值分割、噪声滤波、二值化处理，提高图像处理的整体效率的过程，而图像识别即为对预处理后的图像进行边缘检测相关函数计算，得到所需的图像元素信息，进而综合为处理图像的轮廓边缘信息的过程；

**机器学习算法：**通过运用贝叶斯网络算法，针对图像的边缘检测后得到图像的主体轮廓，通过对所得轮廓进行模式识别，对不同环境检测物进行分类，以得出不同的工作情景，从而对机械控制部分发送模式指令以完成相应机械动作。

3.机械结构模块设计

3.1机器人整机介绍

根据清扫机器人特殊的工作环境和功能需求，设计清扫机器人的类型为三臂式机器人，包括行走越障模块、清扫模块、检测模块和耦合供电模块，整体结构如图25所示。其中行走越障模块由前中后三臂组成，三臂均为越障机械臂，其上均安装有一个行走轮、制动装置和齿轮副抱线机构，同时也装有激光传感器和摄像头用于观察前方线缆，用于实现整机在电线上的运行以及越障功能；清扫模块能实现各个方向的移动，从而完成对绝缘子全面的清扫；检测模块分为绝缘子的检测和输电线路的检测；耦合供电模块由取电装置和电源管理系统组成，与蓄电池双重供电实现整机的供电功能。

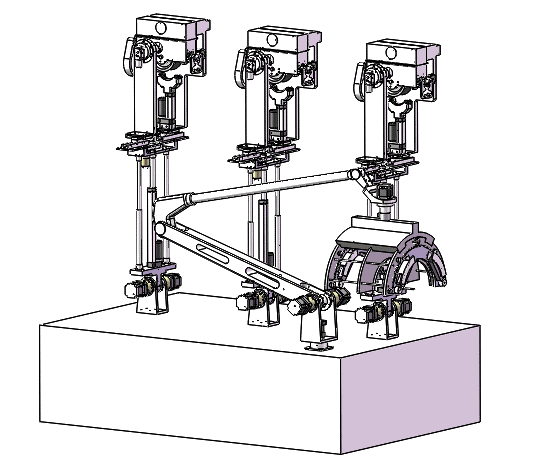


图25 绝缘子清扫机器人整体机构图

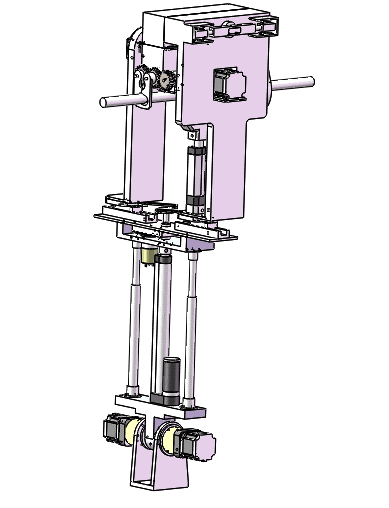
3.2行走越障模块

机器人的行走越障模块由越障机械臂、驱动装置和刹车制动装置三部分组成，其中机器人的驱动装置通过带动三个机械臂交替运动完成前进功能，驱动装置通过带动三个机械臂进行跨越障碍异步完成越障动作。行走越障模块是机器人在输电线路及引流线上正常运动作业的核心模块。

3.2.1越障机械臂

本作品的越障机械臂由开合式行走轮、对心滑块夹紧机构、十字锁合机构、坡度适应导向机构、直线推杆制动机构以及齿轮副抱线机构组成。根据机械臂内各机构与输电线的相对位置，将整臂分为上下工作平面：上工作平面包括越障行走轮、十字锁合机构、坡度适应导向机构和齿轮副抱线机构；下工作平面包括直线推杆制动机构和对心滑块夹紧机构。

机械臂的主运动为电动推杆牵引直线运动，副运动为底部旋转台的空间姿态调整，在行进过程中结合主副运动的协同变换，实现复杂的越障运动，并降低了对多自由度机械臂的依赖。机械臂结构如图26所示。



对心滑块机构

齿轮副抱线机构

坡度适应导向机构

推杆制动机构

图26 越障机械臂结构

**（1）侧置越障行走轮**

项目组针对绝缘子工作环境的特殊性，将行走轮设计为开合式，以便于完成行走过程中的越障脱线和越线动作。行走轮轮沿选取H形轮沿，并使用新型聚胺酯材料制作其表面防滑层，保证机构的绝缘性与电线适应性，同时利用该材料的高弹性来增加与导线间接触的压力，也消除了对铝裸电线的磨损。

侧置行走轮通过十字锁合机构和对心滑块机构，完成行走轮水平方向移动与固定；通过电动推杆牵引整臂，完成行走轮竖直方向脱线与上线。在行走轮前后安装有弹簧导轮，进行倾角爬行时对行走轮姿态进行自适应调整，保证行走轮与导线的相对空间关系不变。如图27所示。

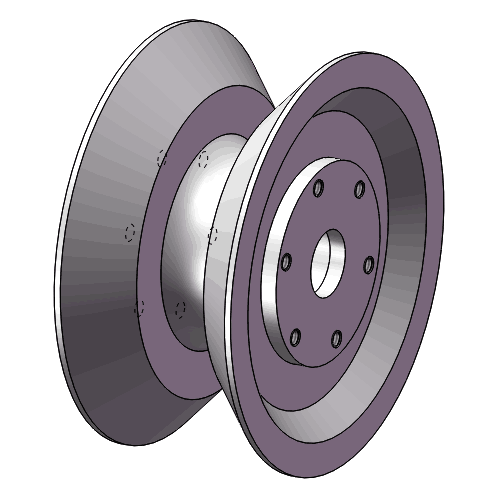


图27 行走轮

**（2）十字锁合机构**

十字锁合机构通过设计十字卡槽，对越障行走轮的支撑架固定锁合，保证运行过程中机器整体的安全可靠与稳定。卡槽设计为双层槽结构，锁芯为一字型，通过锁芯在卡槽内先后完成前进、旋转和退回动作以完成卡紧工作，同理完成解锁工作。

十字锁合机构由能精准控制旋转角度的小型舵机驱动锁芯旋转，锁芯的前进和退回动作由下工作平面内的对心滑块机构带动支撑架完成调整。锁合动作完成后，系统使结构约束使其具有自锁性，在断电异常等特殊条件下也不会松开，保证机器的安全性。机构外部示意图如图28，十字卡槽如图29所示。

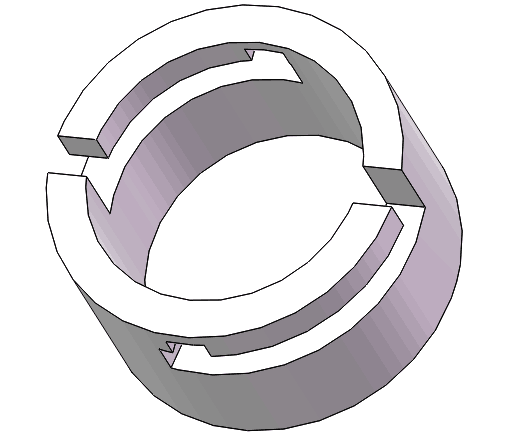
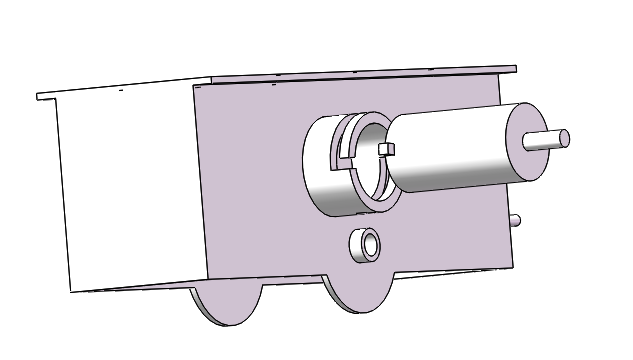
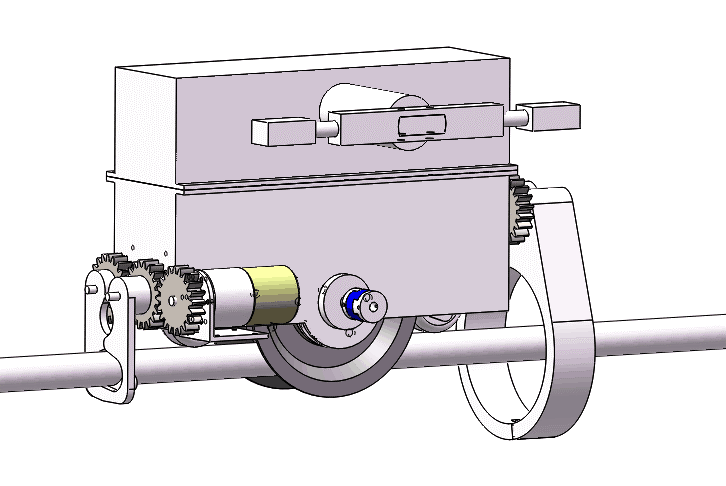


图28 十字锁合机构外部示意图 图29 十字卡槽

**（3）齿轮副抱线机构**

齿轮副抱线机构由一对外啮合齿轮与勾线夹组成，用于完成对高压线缆的抱紧动作，保护运行过程的安全。其同时适应于刚柔耦合运动状态。

抱线机构由单个步进电机驱动，通过一对外啮合齿轮带动勾线夹向内收紧。勾线夹为圆形槽，能良好适应高压导线外形，其机构原理为：当机器正常运行时，勾线夹收紧角度较小且不与导线接触，此时勾线夹不影响行走轮的运动，但整体轮廓下导线方向产生约束；当机器进行倾角爬行时，此时勾线夹收紧角度较大，由表面聚氨酯材料对导线进行刚性摩擦，防止滑坡现象的发生。齿轮副抱线机构的示意图如图30和图31所示。



外啮合齿轮

勾线夹

行走轮

高压线

图30 齿轮副抱线机构

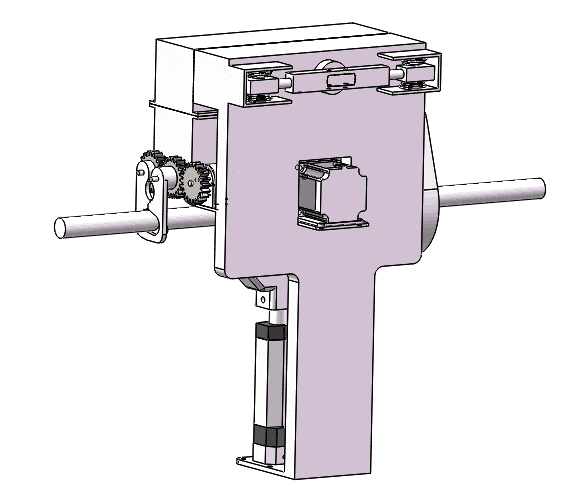


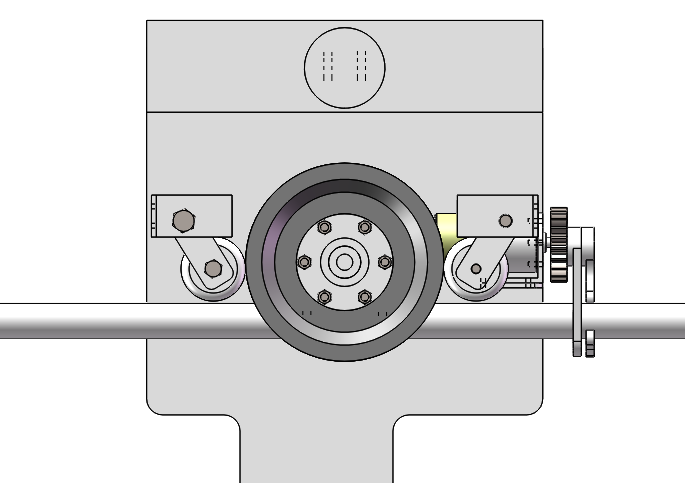
图31 齿轮副抱线机构外部示意图

**（4）坡度适应导向机构**

坡度适应导向机构由行走轮内部两侧的双导轮、外侧的导向弹簧以及机架组成，实现越障过程中对不同坡度引流线的运动自适应，保持机箱空间平稳性。

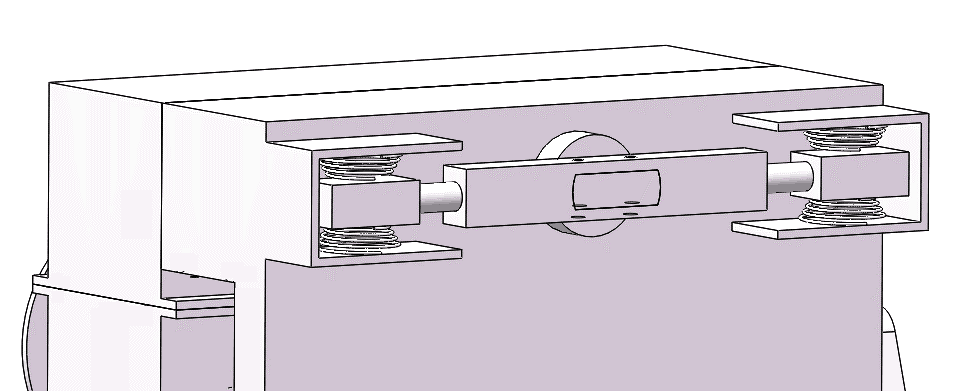
双导轮与行走轮同向，分别布置于行走轮前后。当行走臂运行至坡度引流线时，导轮弹簧受力压缩而带动轮夹盖旋转至与引流线平行，此时行走臂下工作平面与机箱部分保持原有空间姿态。双导轮结构如图32所示。

外侧导向弹簧安装于机架两侧。机架与行走臂连接方式为铰连接，外侧弹簧固定越障过程中行走轮脱离时机架的姿态，防止机架自由翻转导致再次上线时的对齐问题。如图33所示。



导向轮

图32 双导向轮机构



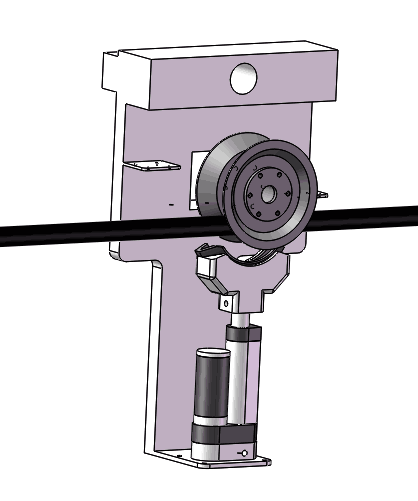
导向弹簧

图33 外侧导向弹簧

**（5）推杆制动机构**

推杆制动机构由电动推杆和制动卡槽组成，用于实现行走动作的制动。

电动推杆选取100mm的短行程电动推杆，利用推杆内部螺纹连接的自锁性，保证在制动受力条件下推杆的稳定。制动卡槽位于电动推杆的上方，其截面与高压导线轮廓相同，均依靠摩擦力进行接触式制动。制动卡槽上装有刹车片，用于辅助整机的刹车动作。整体机构如图34所示。



电动推杆

制动卡槽

图34 推杆制动机构

**（6）对心滑块机构**

对心滑块机构由下部舵机驱动，其带动下工作平面内的曲柄转动使两滑块向中间运动，进而使两滑块与机械臂支撑架相连接，完成行走轮的水平运动。

对心滑块机构的控制顺序为“收缩—伸展—收缩”三步，通过其周期性的循环运动完成行走轮的锁合。如图35所示。

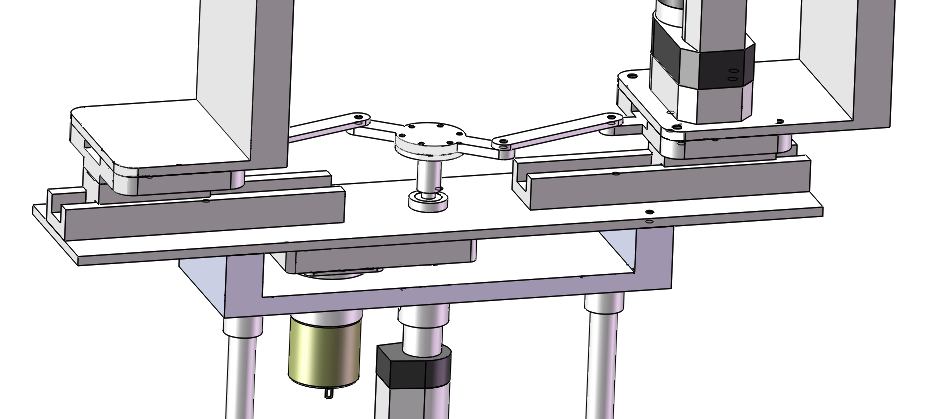


图35 对心滑块机构

3.2.2驱动装置

驱动装置包括行走轮驱动部分和机械臂驱动部分两部分，前者用于完成机器的行走动作，后者用于完成机械臂的越障动作。

**（1）行走轮驱动装置**

行走轮驱动装置由驱动轮和直流伺服电机传动轴组成。

驱动轮为一端偏置式，使行走轮在跨越线夹及跳线时能够及时打开，实现障碍的跨越。

直流伺服电机选用MAXON大扭矩减速伺服电机，其能满足运行过程中的扭矩需求和速度需求，通过结合推杆制动机构与齿轮副抱线机构，保证机器人在坡度不大于60°的挡间相线上正常行走，并能实现爬越倾角近80°的跳线。

**（2）机械臂驱动装置**

机械臂驱动装置为满足机械臂自由度要求，按运动类型分为横向平面旋转驱动部分、纵向平面旋转驱动部分和直线驱动部分。

横向平面旋转驱动部分采用大扭矩步进电机对机械臂底座平台进行驱动，底座平台采用蜗轮蜗杆机构实现传动与自锁，保证机械臂在调整旋转运动姿态后的稳定性。

纵向平面驱动部分的旋转关节采用大扭矩低速步进电机进行驱动，该电机能对角度进行细分调节，并利用其自锁扭矩完成关节自锁；连接关节通过电磁铁和弹簧来实现刚性和柔性转换，其工作机理为：当清扫机器人在不需要精确控制连接关节时，连接关节变成柔性关节，使清扫机器人本体可在输电线上对其连接关节处的相对位置和姿态进行自适应调整。

直线驱动部分使用电动推杆作为驱动动力，使机械臂工作平台可以向前移动。由于电动推杆本身承受载荷有限，项目组对其进行了改进，将电动推杆顶端与两根平行侧光轴相固定连接，降低电动推杆所承受的正压力。

3.3清扫模块

机器人的机箱上装有两段式清扫臂，其第一段与机箱连接，第二段的末端连接旋转清扫头，该清扫臂能实现各个方向的移动，从而完成对绝缘子全面的清扫。如图36所示为本清扫臂的机械结构示意图。

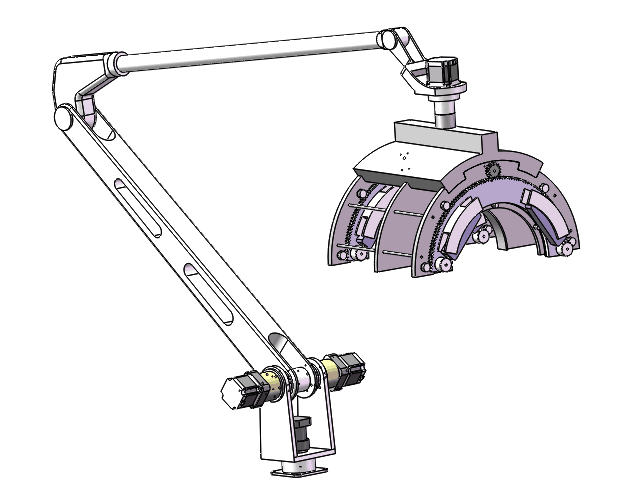
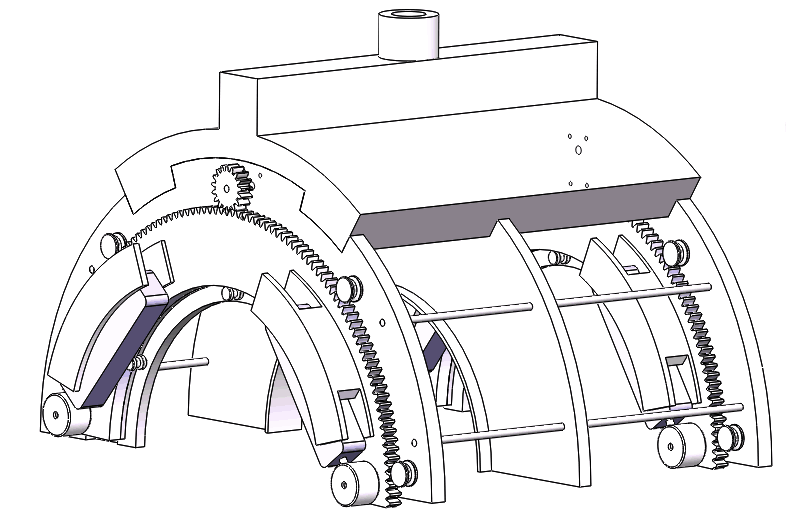


图36 清扫机械臂结构

本清扫机械臂的清扫头结构主要由驱动齿轮、毛刷容器、毛刷、电机、连接盖、半环形结构组成。其中前后两环用于清扫绝缘子表面，中间半环用于支撑清扫头。清扫头上设有一个旋转圆导轨，由电机带动驱动齿轮驱动从动轮选择，从动轮两端配备有两个旋转毛刷，内侧各设有一个毛刷容器用于容纳旋转毛刷，直流电机通过旋转毛刷来实现毛刷的收放。如下图37所示。



1

4

5

6

7

3

8

2

9

图37 清扫头结构

附注1：驱动齿轮 附注2：从动轮 附注3：内导向轮 附注4：毛刷容器 附注5：毛刷

附注6：电机 附注7：连接盖 附注8：外导向轮 附注9：半环形结构

3.4检测模块

检测模块分为绝缘子的检测和输电线路的检测。输电线路检测系统与绝缘子检测系统均在清扫臂上，在机器人行进过程中对输电线进行在线检测，当机器人到达绝缘子附近时，先进行对绝缘子进行检测，再进行对绝缘子的清扫工作，所有检测结果都将实时反馈给远程控制端；绝缘子检测系统则在清扫臂上，当机器人到达绝缘子附近时，先进行对绝缘子进行检测，将检测结果反馈给远程控制端后，再进行对绝缘子的清扫工作。

绝缘子检测系统采用红外线热像仪，其操作方法简单方便，能快速高效地检测出不同质量的绝缘子。正常情况下，由于不良绝缘子电压低于正常绝缘子，导致该不良绝缘子的表面温度低于正常绝缘子，利用红外热像仪可以测量出这种温度的差异，并将表面的温度分布以直观、形象的热像图显示出来。根据调查显示，红外热像测试技术对于涂有半导体釉的防污绝缘子的遥测相当顺利，因为这种绝缘子表面电流较大、温升较高，一旦出现零值绝缘子，该片绝缘子的温度将比其他正常绝缘子低几摄氏度，易于用红外热像仪识别；而对于玻璃绝缘子或普通釉的瓷绝缘子，正常时温升就很小，当出现不良绝缘子时，其温度只比其他正常的绝缘子低约一摄氏度，在实际使用时，有一定的测量难度。因此本机器人适合于安装了防污绝缘子的输电线路。

电线路检测系统仍使用绝缘子检测系统的红外线热像仪。当其不检测绝缘子时，用于检测输电线温度是否正常、相线接头处是否接触良好和相线有无烧伤、断股、锈蚀，引流线有无过热变色等输电线常见问题发生。拟采用的红外线热像仪如图38所示。



图38 拟采用的红外线热像仪

3.5耦合供电模块

耦合供电模块由取电装置和电源管理系统组成。取电装置设置在行走轮机架背面，与输电线非接触感应，电源管理系统置于机箱内。取电装置通过电流互感器从输电线路中获取电能，并能实现越障前后脱离和结合输电线的功能。在取电的过程中，由电源管理系统将所获取的电能分配用于电池充电及整机工作用电。如下图39所示为取电装置的机构示意图。



1

2

图39 取电装置机构示意图

附注1：取电左半环 附注2：取电右半环

4.控制模块设计

4.1行走越障控制设计

对机械臂的稳定控制只是清扫机器人实现在输电线路上安全可靠地工作的开端。在此基础上，清扫机器人还需具有对其周围工作环境感知的能力：第一能够识别输电线路，保证清扫机器人能够正常在线工作，不至于发生脱线、坠毁等事故；第二能够区分和识别电气设备；第三能根据识别的周围环境信息，做出安全性判断并规划出清扫机器人的动作序列，进而驱动清扫机器人平稳、安全、有效地工作和越障。

4.1.1行走越障臂动作决策



图40 感知系统流程

绝缘子清扫机器人在运行过程中需要对运行路况进行采集和分析，从而做出相应动作决策以实现对障碍的自适应。针对行走越障臂的工作环境，项目组设计导航系统以分析路况，对相应动作做出决策方法。其流程图如图40所示。

导航模块通过对清扫机器人上所安装的各种传感器的信息进行处理，从而获取机器人当前所处环境信息，为机器人的自主动作规划提供准确、可靠的导航信息。导航模块由光电开关和摄像头实现，其具体实现过程如图41所示。导航模块的工作机理如下：由前臂上的光电开关进行粗略判断，若光电开关检测到前方存在障碍物，再对摄像头采集的图像进行处理与分析，进一步对障碍物进行模式识别。在该导航模块中摄像头视觉检测对基于图像的导航部分起着至关重要的作用，其处理结果直接决定着控制决策的正确性和准确性。同时在该模块中只有当光电传感器检测到障碍物后再进行视觉检测过程，减少对主控制器CPU的占用进而提高系统处理效率。



图41 导航模块流程

自主越障模块根据导航模块中提供的清扫机器人在输电线路上的环境信息，确定不同的越障策略，使机器人执行相应的规划动作。该动作模块采用基于机器行为的体系结构设计，处理流程如图42所示。目前线路上存在的障碍物包括防振锤、悬垂线夹和耐张绝缘子线夹。通常悬垂线夹位于输电线路的直线段，而耐张绝缘子线夹所连接的两根输电线的状态较为复杂，包括直线跳线和拐弯跳线。因此根据耐张绝缘子线夹的连接方向可判断出输电线路的转弯情况。针对以上几种典型的障碍物类型，需采取不同的越障策略，而这些越障策略就构成了动作规划模块的各种行为。行走臂动作控制采用粗略和精确双级控制方式。粗略控制采用离线规划的方式，即通过大量实验获取清扫机器人跨越各种障碍物的大致动作序列，包括各关节的运动顺序、位移和速度等参数的设置。在程序实现中，将离线规划的各种越障动作集合在越障知识库中，当清扫机器人运行于自动控制状态下时，通过传感和图像采集设备与主控制器的数据交换，调用行为规划库并对行为命令进行解释和调用，发送动作命令序列至机械臂驱动系统，通过驱动电机实现机械臂动作。精准控制即启用行走越障臂双目摄像头后，通过图像采集卡和无线传输方式与上位机或工控机平台进行信息交换，通过位移传感器闭环反馈控制实现机械臂越障时锁合装置开合动作、行走轮抬升动作、行走臂仰角/方位角旋转动作，完成在线控制。



图42 环境信息处理流程

以机器人跨越左转弯耐张绝缘子线夹为例。如图为机器人跨越左转弯耐张绝缘子线夹时所产生的行为规划序列。未越障之前，机器人对整个越障行为过程进行了第一次规划，但在实际动作过程中，不妨假设传感器检测到线路并不在前臂的抓手内，而在抓手的右方，此时机器人重新进行规划。在第二次规划运动过程中，传感器检测到输电线在抓手的左方，又进行了第三次规划。因此在线行为规划需要在实际动作过程中不断调整，通过驱动系统的反馈控制完成对行走臂姿态的调整，完成越障动作。其流程图如图43所示。



图43 自主越障流程

在线路情况比较复杂的地方，为提高运行的效率和保障安全，需要在这些地方转换机器人的工作模式，即由自主控制方式转到在线控制方式是非常有必要的。当遇到某些特别复杂的环境中，机器人靠自身的传感器和本体控制系统实现自主越障困难或根本无法实现时，机器人本体控制主机将向地面基站监控主机发出应急信号，基站工作人员在机器人本体传回的视频图像的引导下，通过无线收发模块对其进行远程控制，协助机器人顺利越过障碍物，确保机器人能够高效、安全地对线路进行检查。清扫机器人的主从控制可分关节命令方式和宏命令方式两种。

关节命令方式是操作人员对每个运动关节发出控制命令，设定各关节运动的方向和行程。机器人主机接收到命令后直接下发给下位机，由下位机来控制完成关节的运动。

宏命令方式是指操作人员不直接对关节操作，而是给出整体运动命令，如前臂脱线、中臂抓线等宏命令。机器人主控计算机接收到宏命令后，根据机器人当前的状态，自主规划出各个关节运动的顺序、方向和行程，然后分别下发给下位机，控制相应关节运动，直到完成指定的宏命令。

4.1.2行走越障臂动作控制

该绝缘子清扫机器人使用CAN总线与主控制器进行数据通信，在行走越障臂控制中通过CAN总线传给底层的伺服系统，由伺服系统完成对行走轮、对心滑块、伸缩推杆的闭环控制。

绝缘子清扫机器人在清扫过程中由于需要翻越防振锤、绝缘子线夹等障碍物，越障动作的多样性与复杂性对清扫机器人的运动控制系统提出了较高的要求。基于其工作特点，项目组采用转速、电流和位置三闭环控制系统结构的无刷直流电动机伺服系统。

系统由主电路和控制电路两部分组成，主回路由IR2130驱动芯片，三相逆变桥、霍尔位置信号检测电路、数字测速电路等模块组成；控制电路使用STM32F103VET作为控制器。霍尔电流传感器CASR对三相电流与直流母线电流进行检测；三通道增量式光电编码器对电动机转速进行检测；安装在电机内部的三个霍尔位置传感器对无刷直流电动机转子位置进行检测。项目组选取MAXON无刷直流电动机以驱动三臂行走轮。

伺服系统的控制程序中，主程序为对STM32F103VET各模块的初始化和IR2130自举电容的充电、无刷直流电动机初始位置的检测以及启动；位置控制子程序通过获得的光电码盘累计发出脉冲数来判断电动机的当前位置，将该脉冲数与实际要求脉冲数做比较，实现对系统位置环的控制；测速子程序采用M/T法完成对电动机的速度检测，以实现系统的转速闭环；A/D转换子程序完成对相电流的检测，用于系统对电流环的控制。

控制程序中针对故障问题采取软件强制中断保护，封闭PWM输出从而是电动机停转。当电动机转动到某个位置时，由霍尔位置传感器采样到的霍尔序列表示当前位置，当霍尔序列跳变时触发PWM中断，若检测到的霍尔序列与期望霍尔序列相符合则输出新的调制序列，完成一次换相；如果检测到错误的霍尔序列，则需要重新对电动机的磁极位置进行检测，让电动机回到正常的运行状态。

换相中断子程序流程图如图44所示。



图44 换相中断子程序流程图

4.1.3行走越障臂闭环控制

行走越障臂在动作执行过程中，针对不同的障碍物需要进行相应的姿态调整，其中对整臂系统影响最大的动作为行走臂旋转和行走臂伸缩。

在机器人行走越障的过程中，由于输电线路坡度的变化，机箱可能存在基座不稳定性的问题，通过机箱内安置的三轴加速度计与陀螺仪，对机箱的空间姿态做调整，当其整体空间坐标偏移量过大时，行走越障臂伸缩以修正整体空间坐标，通过空间并联协作的三只机械臂维持运动基座稳定性。其流程图如图45所示。



图45 基座稳定控制流程图

行走臂伸缩拟采取结合直流电动推杆和直线光轴的改进臂完成较大负荷操作，直流推杆内部为滚珠丝杆由直流电机驱动，利用螺纹传动自锁性确保伸缩动作稳定性。选取STC89C52单片机通过继电器控制丝杆伸缩运动，结合限位传感器对推杆运动的极限位置进行半闭环控制；

行走臂旋转拟采用无刷直流电动机作为旋转关节驱动电机，使用IR2130作为电动机驱动芯片。IR2130是三相逆变器专用驱动芯片，只需一个供电电源即可启动驱动三相桥式逆变电路的6个功率管，可对同一桥臂上下两个功率器件的栅极驱动信号产生互锁延迟，使得系统的可靠性提高。

行走臂旋转运动闭环控制系统的软件主要由旋转程序与中断程序组成。旋转主程序流程图如图所示。系统自检通过后进行外设初始化和数据初始化，对机械臂主控制器发动的CAN总线指令报文进行解包，并根据解包内容更新指令，切换控制工作状态，并将电动机状态信息进行打包放进缓冲区。中断函数为PWM中断函数，根据霍尔信号值控制电动机换相；其次将上位机给定的位置目标值进过AD转换与角位移传感器检测到的实际位置值进行比较，得到误差值，调用PID计算函数计算控制输出，通过占空比限幅修改PWM占空比寄存器的值从而控制电动机转速，使电动机的实际位置尽可能的接近理想位置。

积分分离PID控制算法是PID计算函数的使用算法，其基本原理是：被控量和给定量的偏差大于人为设定的阈值时，取消积分控制作用，以免产生过大超调，被控量与给定量的偏差小于设定阈值时，投入积分控制作用，以消除静态误差，积分分离的PID控制算法可表示为：



式中，*e(k)*，*u(k)*分别为第*k*次采样时刻的输入偏差值和输出值：、、分别为比例、积分、微分系数；为开关系数，当时取1，当时取0，为根据实际情况人为设定的阈值。

4.2清扫动作控制设计

由导航信息完成区分悬垂绝缘子和耐张绝缘子等工作后，清扫臂和清扫头先后完成空间位置的粗细定位，通过机械臂旋转关节驱动其位置与姿态调整；通过清扫头旋转云台实现清扫头位置准确对齐以进行清扫作业。绝缘子定位的实现可以通过切换远程在线清扫和自动清扫模式完成对绝缘子的清扫工作：当切换至自动清扫模式时，清扫臂通过光电开关和双目摄像机对绝缘子距离与图像的获取对其定位，从而开展清扫工作；当切换至远程在线清扫模式时，双目摄像机通过图像采集卡经过网络传输至上位机平台，通过上位机遥控完成对绝缘子的定位。

依据分布式控制理论，控制系统通常由一个或多个主控制器和许多节电控制器组成，两者均具有信息处理能力，不同之处在于，主控制器主要针对系统总体进行判断、决策，结点控制器主要用于信息采集与控制。绝缘子清扫臂由电气部件、控制驱动部件、总线通信接口、嵌入式操作系统、软件中间件等部分组成。其中电气部件由具有一定功能的通用部件组成；驱动控制部件用于控制驱动相应电气部件；总线通信接口用于各控制驱动部件之间进行信息交换与传输；嵌入式操作系统负责各控制驱动部件硬件资源的分配与管理；软件中间件屏蔽了底层硬件和应用软件信息，以实现不同功能控件的软件连接支持。上述按模块化思想开发的功能构件具有标准的硬件和软件接口，便于系统集成，可以降低设计、集成与制造的难度。

4.2.1绝缘子清扫臂控制原理

绝缘子清扫臂控制系统采用底层主处理器、底层协处理器、上位远程控制机的协同结构，该机械臂控制系统原理图如图46所示。



图46 清扫机器人机械臂控制系统原理图

该协同结构中，底层主处理器与行走越障臂控制系统中主处理器为同一主体，用于接受上位机平台模式识别信息并转换为相应步进电机驱动器指令，调用运动决策库完成自主控制，当工作模式切换至在线控制时使机械臂执行上位机的运动控制。同时与底层协处理器通信，获取并处理机械臂上各类传感器的信息；底层协处理器主要负责清扫头上安装的各类传感器所获取信息的预处理工作。

主控制器芯片采用STM32F103VET芯片，基于Cortex-M3架构具有2个12位16通道AD转换器，多达80个通用GPIO接口、7个定时器、包含I2C、USART、SPI、CAN、USB在内的9个通信接口，芯片的硬件配置完全能满足主控制器的设计要求；协控制器采用STC89C52单片机用于控制各类机器人常用传感器与执行器，同时采用FPGA用于实现机械臂各关节位姿状态的转换和计算能工，通过并行串口与主控器进行通信，通过将主控制器的地址总线、数据总线和控制总线连接到FPGA的相应引脚上，通过其内部逻辑利用宏单元构造相应寄存器，主控制器通过读写寄存器完成对FPGA的控制，实现清扫臂和清扫头关节位姿的调整。

4.2.2清扫臂闭环控制方法

绝缘子清扫臂是一个相对独立的机构，清扫臂的每个关节内安装一个对相邻连杆施加转矩的伺服直流电动机和一个用以测量关节转角的编码传感器，可以实时获得各关节的位置矢量与速度矢量，由动力学方程，可计算出理想条件下施加在清扫臂各关节上的力矩矢量T，如下图所示：

T = M () + V () + G()

式中，M ()为清扫臂质量矩阵；V ()为离心力及哥氏力矢量；G()为重力矢量。

实际设计中由于动力学模型的不完备和不可避免的干扰，需要通过比较期望位置与实际位置之差、期望速度与实际速度之差来计算伺服误差：

控制系统由上两式根据伺服误差函数计算驱动器所需转矩，该清扫控制系统利用传感器的反馈信息来减少伺服误差，实现闭环控制。系统框图如图47所示。



图47 机械臂单关节闭环控制系统框图

如图46所示，所有信号线表示维矢量，由运动学和动力学理论可知，对于N个关节的机械臂可以等效为N个独立的单输入输出系统叠加，根据伺服控制定律，建立伺服误差的二阶微分方程：

式中e为伺服误差，为期望轨迹与实际轨迹之差。轨迹跟踪控制器原理如图48所示。



图48 机械臂轨迹跟踪器控制原理图

式中，。系统即使存在误差，该误差在闭环控制系统中收到抑制，随之系统准确跟踪期望轨迹。

4.2.3清扫臂数字PID算法

在上述伺服控制系统中，运动控制微处理器需要对电动机完成闭环控制，抑制运动过程产生的机械误差积累，通过将编码出来的反馈值与指令值进行比较，再按一定算法计算电动机下一步的位置速度，项目组采取PID算法对受控电机进行位置、速度的调整，PID算法的原理如图49所示。

图49 PID控制原理图

根据公式：

式中为比例常数；为积分常数；为微分常数。

在PID控制器中，比例环节的作用是对偏差的瞬间做出快速反应。偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用；积分环节作用是将偏差累积起来输出，积分环节的存在将使系统达到稳定的时间变长，限制系统的快速性；微分环节将对偏差立即纠正，并根据偏差的变化趋势预先给予纠正，使系统趋于稳定，加快系统跟踪速度。

项目组选取LM629作为伺服控制调节器，除接受STM32指令集位置、速度、加速度三个运动参数和滤波器PID的参数外，同时还对输出信号进行处理，获得位置信号，经过PID计算后输出PWM和反向控制信号，将其送给直流电动机驱动芯片H桥驱动器L298N上，单个直流电动机的反馈采用增量式编码器，编码器A、B两相正交信号经LM629内部电路完成4倍频，C相信号是电动机每转一圈产生的脉冲信号，用于电动机的精确回零。

4.2.4清扫头清扫动作控制

清扫头在实际运行过程中，由于其工作条件特殊性，要求旋转电机能够快速启动、高速运行、立即停止。为防止运行速度过快、停止冲击过大，旋转平台驱动电机需要进行精准PWM脉冲控制。

旋转平台以STC89C52单片机为控制核心，采用相频修正PWM模式控制步进电机的速度，为使步进电动机从起始速度平稳加速至目标速度，需要周期性均匀改变当前速度，使用两个定时器，一个是速度定时器，用于产生精准的PWM脉冲，控制每秒步进电机速度；另一个是加速度定时器，用于周期性地改变速度定时器。速度定时器工作在相频修正PWM模式时，其OCR寄存器通过双缓冲方式得到更新的同一个时钟周期内溢出标志置位。根据溢出中断进行脉冲技术，可以确定步进电机的相对步进数，根据原点位置和相对步进数即可确定绝对位置。步进电机断电后位置可能发生变化，所以每次上电时旋转平台电机进行自检。

旋转平台速度控制由STC89C52单片机自行完成，而位置控制由STM32主控制器通过蓝牙发送位置控制指令。STM32位置指令基于摄像头模式识别和光电开关的传感信息，在清扫臂控制原理中给出其映射关系，在此不再赘述。

清扫头不完全齿轮机构的驱动控制选取直流电机与限位传感器，保证清扫过程中不完全齿轮不超过极限位置，保证其运行安全。

若检测为双串绝缘子串，则横向移动一定距离后，反向重复上述过程。清扫臂清扫绝缘子时的情况如图50所示。

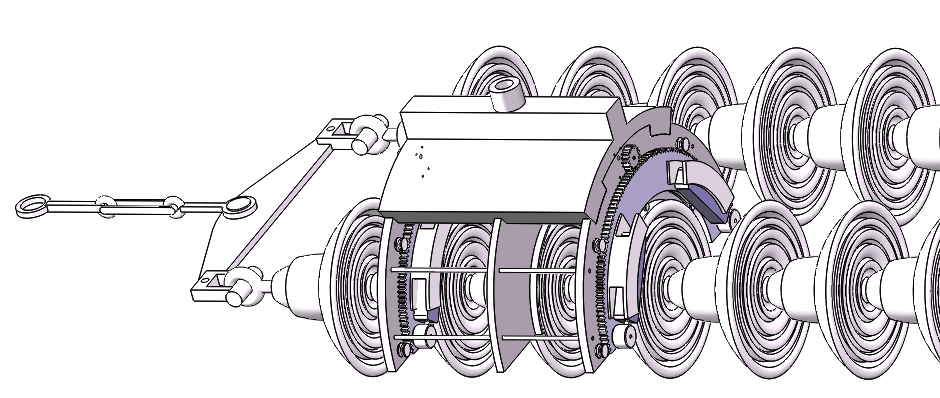


图50 清扫臂清扫时示意图

4.3耦合供电模块控制设计

取电装置是可以开合的环形结构，分为左右两个半环。取电装置的开合由单个步进电机驱动，通过两组外啮合齿轮带动。当前方遇到防振锤等障碍物时，电机旋转使两个半环打开，取电装置随行走轮一同抬升，脱离输电线；在完成越障后，取电装置随行走轮一同下降，一定时间后电机反向旋转使两个半环闭合，从而实现越障前后脱离/结合输电线的功能。当前方遇到绝缘子等障碍物，重复上述类似动作，取电装置还会随行走轮完成相应的避障动作。

本装置通过取能互感器从输电导线上获取电能，然后输入取能电源模块。其中取能电源模块用于对其进行整流滤波处理并实现隔离稳压输出。取能电源模块内含取电调节保护电路，可以实时的调节和限制输入模块的电能，吸收因雷击等特殊情况引起的瞬间大电流，保证模块能在输电导线电流不稳定时仍能输出稳定的电压。

取能互感器从输电导线上抽取的能量大小与输电导线上的电流大小有关，同时也与取能互感器和取能电源模块的型号有关：输电导线的电流越大，取能装置可以输出的功率也越大。输电线路取能装置的额定输出功率指的是在输电导线上的电流足够大时，装置能够提供的最大功率输出。取能装置安装在工作期间会根据导线的电流大小和负载所需的功率自行调节工作模式。

其中取电装置的工作模式如下：

**（1）待机模式**

当输电导线上的电流非常小，甚至无法提供模块启动所需消耗的电能时，取电装置会处于待机状态，不输出功率，此时输出电压为零。

**（2）间断工作模式**

当输电线路的电流增大到一定值，抽取的电能可以支持模块启动，但不足以支持负载正常工作时，取电装置会处于间断工作状态，断续对负载输出功率，此时输出电压为额定输出电压和零伏跳跃变化的方波。

**（3）正常工作模式**

当输电线路的电流足够大，抽取的电能可以支持负载工作时，取电装置正常输出负载所需的功率，并限制输入取能电源模块的多余能量，输出稳定的电压。

取电装置在所有工作模式下都不会输出额定电压值和零伏以外的异常电压值，以确保负载的安全工作。如下图50所示为本模块的原理图。



图51 输电线取电原理图

5.模式识别模块设计

绝缘子清扫机器人在执行带电清扫作业时，需要对所处运行状态进行信息采集，即应具有对其周围工作环境感知，并针对其工作环境进行人工智能的模式识别。项目组所规划的环境感知包括以下三方面的模式识别：第一能够识别输电线路，保证清扫机器人能够正常在线工作，避免发生脱线、坠毁等事故；第二能够区分和识别电气设备，对不同类型的金具和障碍物做出识别；第三能根据识别的周围环境信息，做出安全性判断并规划出清扫机器人的动作序列，进而驱动清扫机器人平稳、安全、有效地工作和越障。

项目组根据所述模式识别的特征，提出模式识别模块，即设计一种基于贝叶斯网络算法的模式识别系统。结合软件图像识别的低效率、高要求特点，利用FPGA高效率并行处理的特性对图像算法进行硬件实现。

5.1图像获取部分

电荷藕合器件（Charge-Couple-Device）简称CCD，是一种集光电转换、电荷储存和电荷转移为一体的传感器件。一个完整的CCD器件由光敏单元、转移栅、移位寄存器及一些辅助输入和输出电路组成。它的工作过程主要包含信号电荷产生、存储、传输和检测4个过程：在曝光时间内将光信号转换成电信号，然后将其转移到移位寄存器中，并在系统时钟的作用下，使电信号经输出端传递到信号处理设备中，也可以通过示波器对信号进行观察。目前CCD已经成为国际上机器视觉系统中的主流传感器，适用范围广泛。CCD相机如图52所示。



图52 CCD相机实物图

对于普通的线扫描相机，在触发脉冲的作用下，相机将以每次一个像元的长度扫描检测对象，进行一次曝光，其中扫描一行只进行一次积分。然后系统将采集到的一行图像送入相机读出寄存器，并同时将其从传感器中移出，此时下一次曝光伴随着第一行像素的移出同步进行，通过重复采集的过程实现多行图像的读取。而对于线扫描相机，在第一次采集的像素读取的同时也可以进行第二次曝光，这样对于运行的检测对象来说不会存在未被采集的区域，但是为了形成二维图像，相机与被测对象之间需要产生相对运动，这样就要求两者之间必须同步。针对此问题，项目组采取旋转编码器进行信号同步，其能使单位时间内线阵CCD相机所采集的图像总和与所对应的物体实际尺寸和相机行进速度相同。

线扫描同步是线阵CCD扫描测量二维图形轮廓的关键技术，也是影响系统测量进度的最主要因素，因为当扫描同步时没有发生物体变形，对其进行处理的结果最接近实际物体尺寸，最能反映出物体轮廓。其控制时序如图53所示。



图53 线扫描相机同步控制时序

5.2图像处理部分

图像处理过程包括图像预处理和图像识别，图像预处理即为对系统处理的目标对象进行优化，提高图像处理的整体效率的过程；图像识别即为对预处理后的图像进行算法函数计算，得到所需的图像元素信息，进而综合为处理图像的轮廓边缘信息的过程。处理流程如图54所示。

****

图54 图像处理流程图

5.2.1图像预处理

**1、阈值分割**

阈值分割法的基本思想是首先确定一个阈值，然后将图像中每个像素点的灰度值与该阈值进行比较，根据比较的结果将每个像素点划分为两类——前景或背景。因此阈值的选取最为关键，将直接影响到图像分割的效果以及后续图像描述与分析的准确性。项目组选择迭代阈值法作为阈值分割方法：首先选择一个阈值作为图像的初始阈值，通常选择图像的灰度均值作为图像的初始阈值，然后通过分割图像和修改阈值的迭代过程获得图像的最佳阈值。其过程可描述如下：

（1）遍历灰度数据，求出最大灰度和最小灰度，令阈值初值：

（2）根据阈值初值*T*分割图像为*、*：

（3）对区域计算平均灰度值、：

其中，为图像上点灰度值，为图像上点权重系数，一般取1。迭代计算过程至*T*为常数，即为最佳阈值。

**2、噪音滤波**

由于图像在形成﹑传输﹑接收和处理的过程中，不可避免的会存在一些干扰，如成像传感器噪声、相片颗粒噪声以及传输过程中的通道传输误差等，导致图像上会出现一些随机的、离散和孤立的像素点，即图像噪声。现场采集图片中的噪声通常都是高斯白噪声或者椒盐噪声，因此对获取图像的去噪过程也就是消除这两类噪声的过程。消除高斯白噪声或者椒盐噪声从原理上讲使用的都是低通滤波的方波，而低通滤波在消除图像噪声的同时，也会消除图像中有用的高频信息。因此，图像去噪方法在本质上其实是在去除噪声和保留高频信息之间的一种权衡。

中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术，中值滤波的基本原理是把数字图像或数字序列中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代替，使周围的像素值接近真实值，从而消除孤立的噪声点。其实现方法是用[3 3]二维滑动模板照像素值的大小进行排序，生成单调上升（或下降）的为二维数据序列。二维中值滤波输出为：

其中，，分别为原始图像和处理后的图像。

同时，受环境因素、光照变化等影响，所采集到的目标图像会出现明暗度不同，将导致图像识别区域的一些细节无法很好地辨识，影响识别的准确性。因此在进行下一步识别前需要对目标图像进行对比度增强的处理。

5.2.2图像识别

边缘是指图像中灰度值急剧变化的地方，它是图像最基本的特征之一。边缘检测在计算机视觉系统中有着重要作用，这是因为图像边缘往往包含了用于识别的有用信息，可以作为图像分析和模式识别的主要特征提取手段。

常用方向和幅度来描述图像的边缘特性。一般来说，图像的灰度值沿边缘走向变化幅度较平缓，而沿垂直于边缘的方向上图像灰度变化则通常比较剧烈。这种剧烈的变化或者表现为阶跃状，或者表现为屋顶状，前者被称为阶跃状边缘（Stepedge），后者被称为屋顶状边缘（Roofedge）。在阶跃状边缘两侧图像灰度值会有明显的变化，而屋顶状边缘则位于图像灰度从增加到减少的变化转折点处。还有一种脉冲状边缘，是由阶跃状边缘组合而成，主要对应于细条状的灰度值突变区域。边缘函数图如图55所示。



图55 典型边缘检测函数

现有的边缘检测技术主要基于Matlab等数学分析软件进行算法实现，由于其系统的复杂性和大型化，项目组使用基于FPGA的Sobel算子实时图像边缘检测，轻量化、仪器化检测模块，以此来提高模式识别系统的整体效率。

Sobel边缘检测的硬件实现系统包含梯度计算模块和门限处理模块，其中梯度计算模块可分为图像行缓冲模块和卷积计算模块。此外，各个模块功能的实现可通过调用QuartusⅡ软件提供的各种宏功能模块（Mega-functions）来实现，

梯度计算模块主要完成两个Sobel算子分别与3×3窗口图像像素矩阵的卷积运算。首先构造3×3图像像素矩阵，引入一个容量足够大的存储单元来缓冲串行输入的图像数据流，并把串行图像数据转化为并行的3行图像数据，这样在3个像素时钟后就可以得到3×3图像像素矩阵。以往常使用先入先出栈（FIFO）作为图像数据的缓冲器，但由于对FIFO的读写操作较为复杂。项目组选择调用QuartusⅡ软件提供的基于RAM移位寄存器宏模块的ALTSHIFT\_TAPS来实现功能。卷积运算的具体实现是垂直算子和水平算子使用并行结构，与ALTSHIFT\_TAPS宏功能模块输出的数据同时相乘并相加，过程中需用到6个可编程乘加器ALTMULT\_ADD模块，而得到的6个数据可分为水平数据和垂直数据两组，每边各3个。再将这两组数据分别送往可编程多路并行加法器PARALLEL\_ADD模块，得到两个数据。最后通过调用浮点平方根ALTFP\_SQRT模块来计算这两个数据的均方根，即得到3×3窗口中心点像素的梯度值。该方法可以保证每个周期输出一个像素点的Sobel梯度值。Sobel算法的输出是以3×3像素输出的颜色矩阵，对预处理的图像进行逐矩阵像素复制和标记，以完成对轮廓的提取。

5.3机器学习算法

针对图像的边缘检测后得到图像的主体轮廓，项目组拟采用机器学习的方式，通过对所得轮廓进行模式识别，即针对不同环境检测物进行分类，以得出不同的工作情景，从而对机械控制部分发送模式指令。机械控制部分根据模式指令调用动作库的宏命令，完成相应机械动作。

近年来，有关人工智能及机器学习的算法研究自2007年起放弃了对专家系统的研究，转而展开了诸如神经网络系统和支持向量机等算法的研究。传统神经网络算法对主观意见的独立性要求较强，常常导致因果倒置，对工程应用的识别问题产生了较大干扰，并且传统神经网络系统对样本敏感性过高、要求计算量过大；支持向量机对核函数的选取难度大且数理知识依赖性过高，两者均难以满足多关联变量的工程实际问题。贝叶斯网络算法是一种基于朴素贝叶斯分类的改进，由于其算法核心的特性，是一种自生长的特征数据挖掘方法，被广泛应用于多关联变量的工程问题。项目组基于贝叶斯网络的算法特性，用于对项目中绝缘子清扫机器人在其工作环境下的模式识别。

绝缘子清扫机器人在运行过程中获取的环境信息模式包括：绝缘子障碍物、防振锤障碍物、右转弯跳线、左转弯跳线、无障碍物直线。由此可以将贝叶斯网络元素中辨识元素根据其物理特性分为：方向向量、包络面积、灰度特征。其中方向向量表征了跳线的偏向、障碍物相对于中心线的上下位置关系、有无障碍物；包络面积表征了是否为跳线、障碍物类型；灰度特征表征了障碍物材质、跳线材质；决策对象为所处工作环境的模式类型。按照物理关系可以得到主观贝叶斯初级网路，并针对于该网络进行正确样本训练，最终训练得到可靠度较高的贝叶斯网络模型。方向向量在XOY平面内按照90°分为四象限区域，按模糊隶属度函数对图像方向向量做概率分析；包络面积按小于防振锤面积、防振锤与绝缘子面积、大于绝缘子面积分为三种观测转态；灰度特征按低灰度、中灰度、高灰度也分为三种观测状态以判断金属、陶瓷、线材。基于观测分类方法，该贝叶斯网络概率空间向量为36项，减少了对计算量的需求，满足实际分析情景。

本贝叶斯算法实现依靠于MATLAB的BNT Toolbox，在模式识别模块中，项目组采用ARM+FPGA的联合开发平台，使用ALTERA的Cyclone系列FPGA作为硬件加速处理方法，结合Cortex-M3内核的STM32F103VET作为嵌入式芯片，通过千兆以太网完成信息高速交互，在Window条件下的MATLAB 2014a中完成算法实现。

6.上位机设计

上位机采用WPF进行开发，让用户可以从图像和数据两个方面了解清扫机器人实时的运动状态，通过采集清扫机器人上各传感器的数据，实现对清扫机器人情况与位置的实时监测。

在该机器人的控制方案中设置有自动控制和远程监控系统，用于实现机器人在输电线路上的安全运行，使清扫机器人在基本无需人工干预的情况下完成作业与远程监控系统的交互。相应的上位机也具有两种工作模式，分别是远程监测模式和远程控制模式。

6.1远程监测模式

在远程监测模式下，操作人员可以查看清扫机器人所处的位置、前进方向和运行状态等机器人自身的数据，以及检测情况和清扫情况等工作数据。对检测出的问题进行提醒，方便安排工作人员及时处理。远程监测界面如下图56所示。

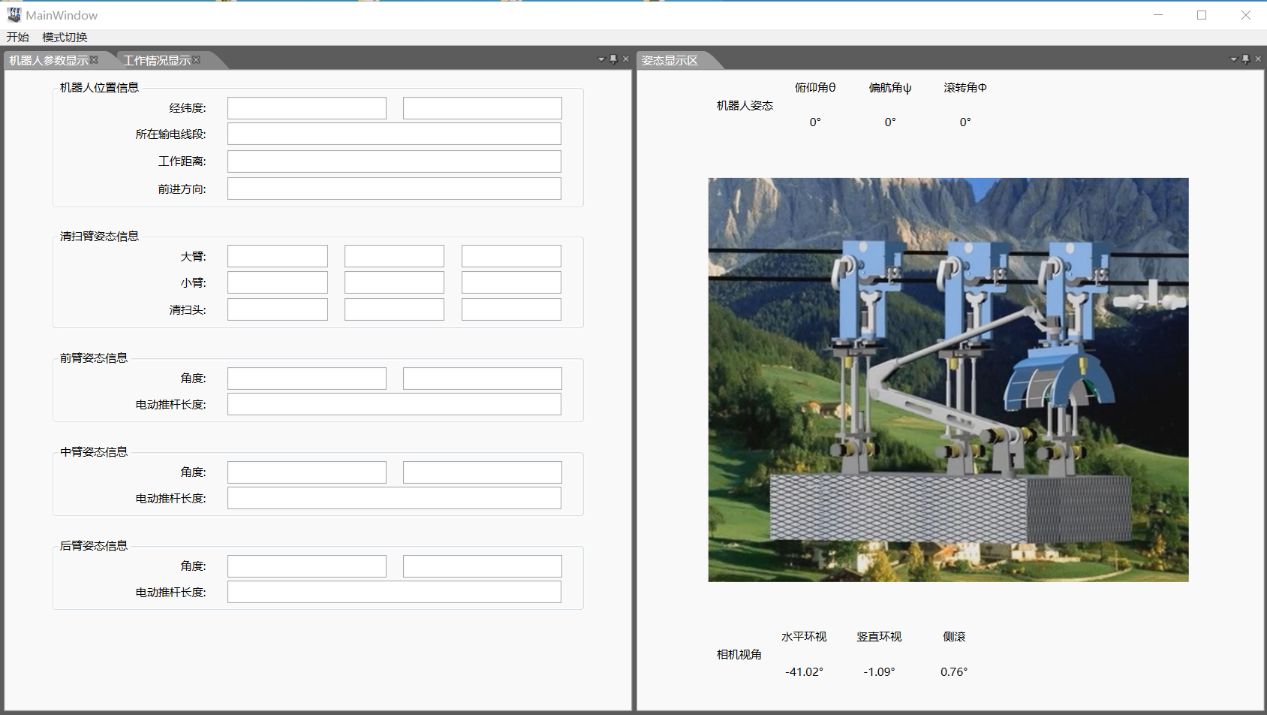


图56 远程监测界面

6.1.1清扫机器人姿态的三维显示

清扫机器人的姿态测量采用陀螺仪和加速度计传感器，然而陀螺仪会产生静态漂移误差以及积分后的积累误差；加速度计动态特性较差，不利于测量快速变化的角度，且输出会受自身加速度影响，同时无法测量偏航方向的角度变化。为了消除误差，应用卡尔曼滤波融合算法将加速度计与陀螺仪数据融合，以获得准确的角度信息。上位机通过分析接收到的“俯仰角θ”、“偏航角ψ”与“滚转角Φ”三组数据，不断更新下位机的信息，进而调整“姿态显示区”中清扫机器人三维姿态的实时显示。三维显示界面如下图57所示。



图57 三维姿态现实界面

6.1.2清扫机器人参数显示

在参数显示区对清扫机器人姿态、所处的位置、前进方向和运行状态等数据进行显示。其显示界面如下图58所示。



图58 整机参数显示区

6.1.3工作情况显示

在工作情况显示区对检测情况和清扫情况等工作数据进行显示。其界面如下图59所示。



图59 工作情况显示区

6.2远程控制模式

当需要对机器人进行远程控制时，操作人员发出“切换至远程控制模式”宏命令，机器人停止自主运行，等待远程控制命令。操作人员根据传回的图像，通过下发宏命令或关节命令对机器人进行远程控制。

越障完成以后，对机器人下发“切换至自动控制方式”宏命令，机器人启动自主运行程序，恢复在线路上的自主运行。在主从控制方式下，地面监控计算机不仅对机器人的运动状态进行控制，还要对图像传输的启停、摄像机的切换、采集图像的尺寸、传输图像的帧速率和图像质量等进行控制。

当机器人向监控中心发出遇障报警信号时，监控人员下发“启动导航图像传输”命令，使监控主机可以得到机器人所处环境的图像信息以便对其进行远程控制。当运动手臂超出当前所选摄像机的视野范围时，下发“切换摄像机”命令来选择适当的摄像机继续进行监控。如果需要调整传输图像的尺寸大小，可以调整采集窗口的大小以便于监控。

6.3远程预警模式

绝缘子清扫机器人机箱检测模块中设置有温度传感器、风速传感器及雨滴传感器，与远程上位机平台进行实时数据交换。上位机平台通过A/D转换对传感器获取信息进行综合，判断机器人所处环境条件，制定相应预警模式：

温度传感器通过使用LM3911对环境温度进行检测，由于清扫机器人作业于高空环境，环境温度相对较低，当环境温度过低至不适合于机电控制器正常工作时，整机将进入休眠状态，向上位机发出低温中断信号仅保留通信与定位功能；

风速传感器内部有一个光电子风速计，中心有不锈钢转动轴，不锈钢转动轴带动光盘转动，切割红外来实现计算风速。光盘每转动一次切割红外14次，从而有光电晶体产生一个脉冲链，实现信号的发生。脉冲链的速率与风速成正比。当风速超过由风载荷计算最大承受速度时，向上位机发出风速中断信号，并请求地面基站工作人员进行人工协助，保留通信与定位功能；

雨滴传感器由振动板、压电元件、放大电路、壳体及阻尼橡胶构成。振动板的功用是接收雨滴冲击的能量，按自身固有振动频率进行弯曲振动，并将振动传递给内侧压电元件上，压电元件把从振动板传递来的变形转换成电压。当压电元件上出现机械变形时，在两侧的电极上就会产生电压，电压大小与加到振动板上的雨滴能量成正比，一般为0.5mV至300mV。雨滴传感器安装在机箱外部，其壳体密封要求良好，并用不锈钢材料制成。当雨滴传感器感应降雨天气时，想上位机发出降雨中断信号，请求地面基站工作人员进行人工协助，保留通信与定位功能。

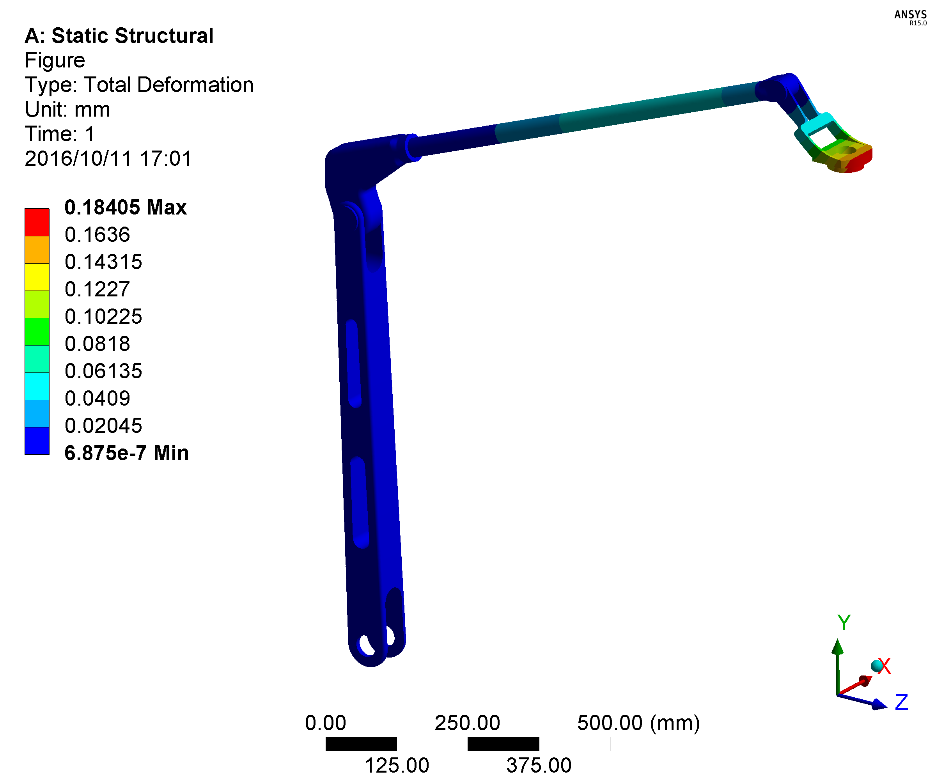
7.关键机构优化分析

在绝缘子清扫机器人的运行过程中，清扫臂在移动过程中的负载较大，其旋转头上的应力与变形需要一定的校核；运行过程中整机的重力基本集中于三个行走轮上的支撑轮轴上，其支撑强度同样是本机器人运行过程中的隐患。

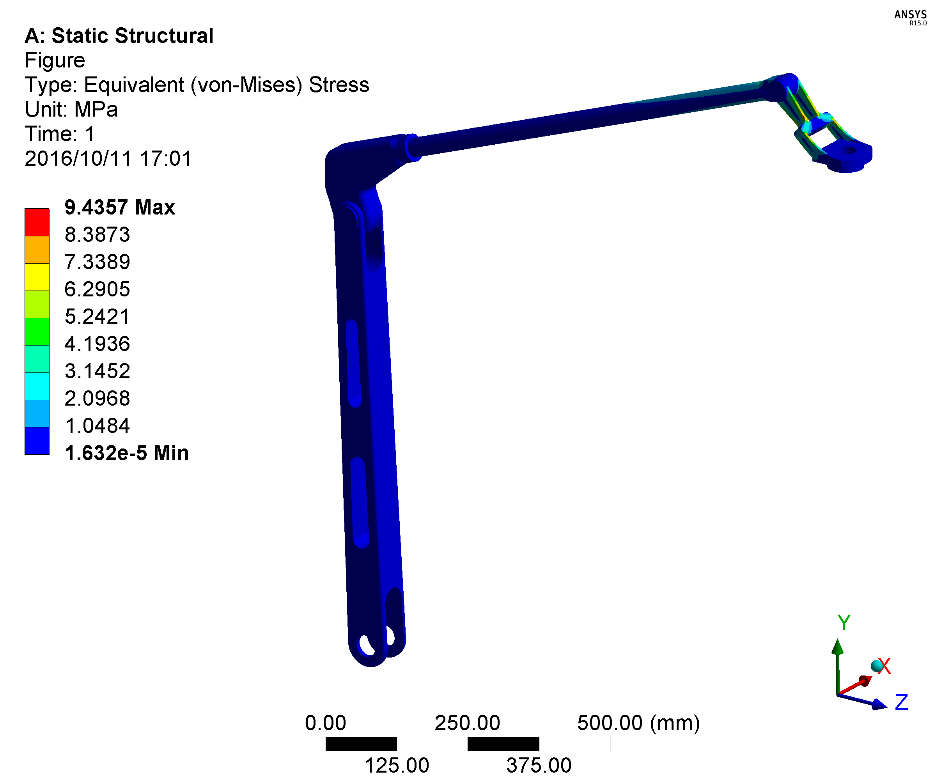
7.1清扫臂的强度校核

对于绝缘子清扫机器人的清扫臂，本项目组在ANSYS软件中对其进行了强度的校核：首先在SolidWorks软件中进行模型结构的简化，然后在ANSYS软件中建立Static Structural静力学分析流程，再将本轴模型转换格式导入该流程中，同时打开插件DesignModeler为导入的清扫臂模型通过Imprint Faces功能添加定位面。本清扫臂所选材质为铝合金，其弹性模量为7.2×1010 Pa，密度为2702kg/m3，泊松比为0.32。

本清扫臂的支撑主要通过底部支座进行支撑，其底部只能进行上下转动，则需在其底部限制Remote Displacement进行约束，只放开了其X轴向的转动自由度；同时其上方两处的销连接均只有X轴向的转动自由度，进行同样的Remote Displacement进行约束。由于清扫臂头所受负载为清扫头重量，在清扫臂头的圆孔上施加载荷即可。由此可得本清扫臂的总变形图和应力云图如图60、61所示。

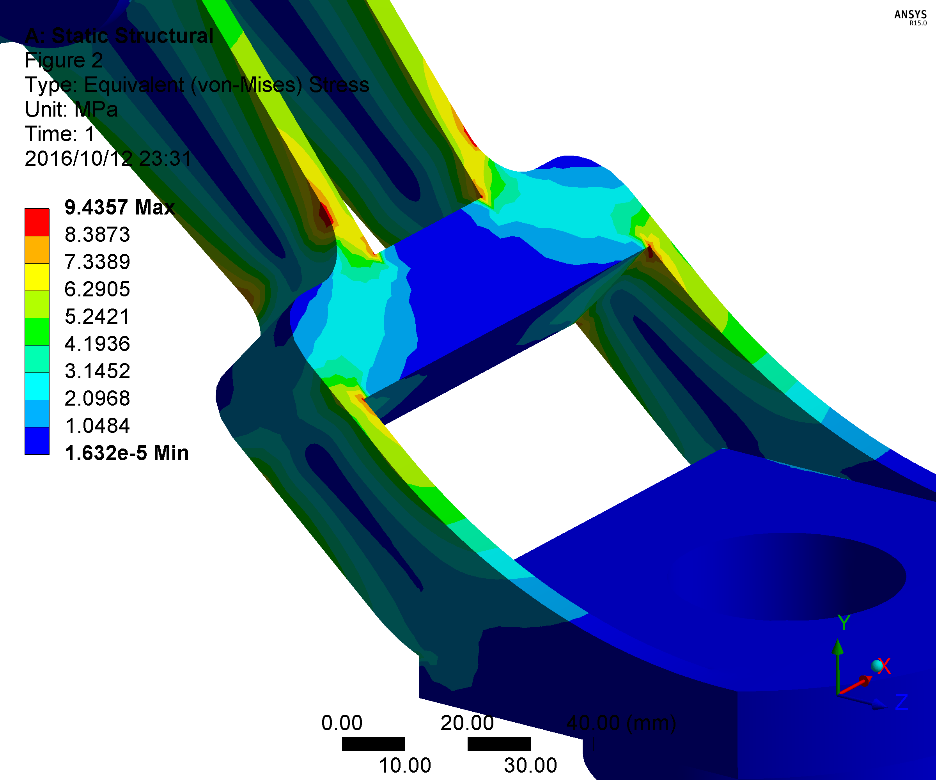


**图60 清扫臂总变形云图**

****

**图61 清扫臂应力云图**

经过ANSYS仿真分析，得出轴上最大变形为0.18405mm，位于清扫臂头的最前端，但因其变形较小，对于整个绝缘子清扫机器人的运行没有太大影响；清扫臂上最大应力为9.4357MPa，应力主要集中在两侧夹角处，此区域的最大应力局部放大结果如图62所示。



**图62 清扫臂头两侧夹角处局部应力图**

选取不稳定载荷情况的安全系数为3~5，铝合金常温情况下的许用应力为：

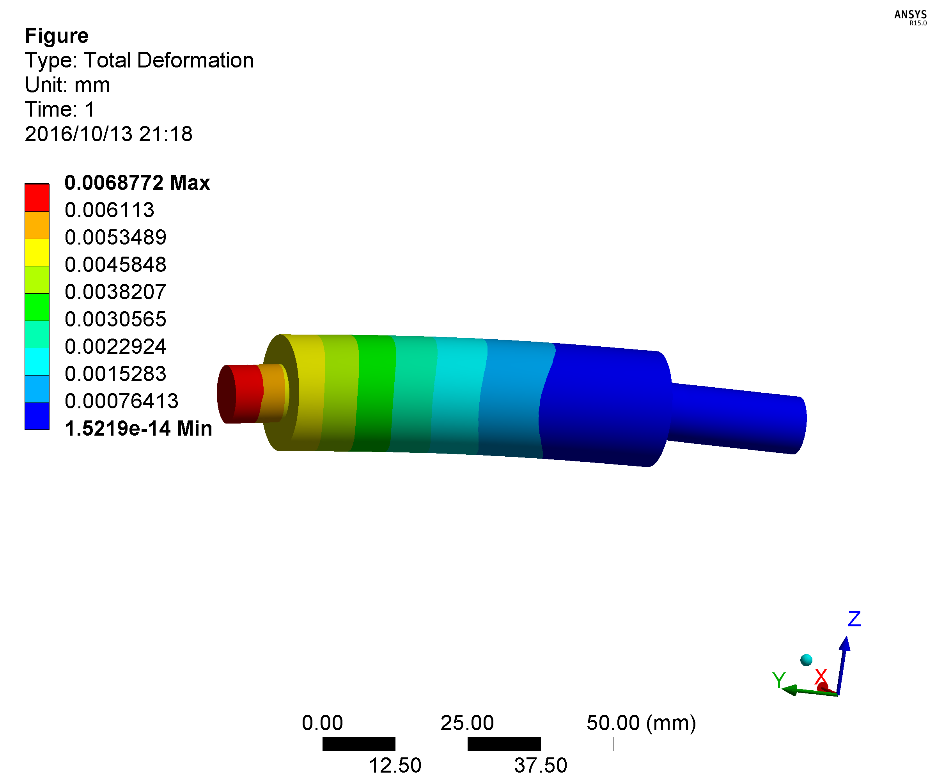
MPa

其大于本清扫臂的最大应力9.4357MPa，故本清扫臂的强度符合要求。

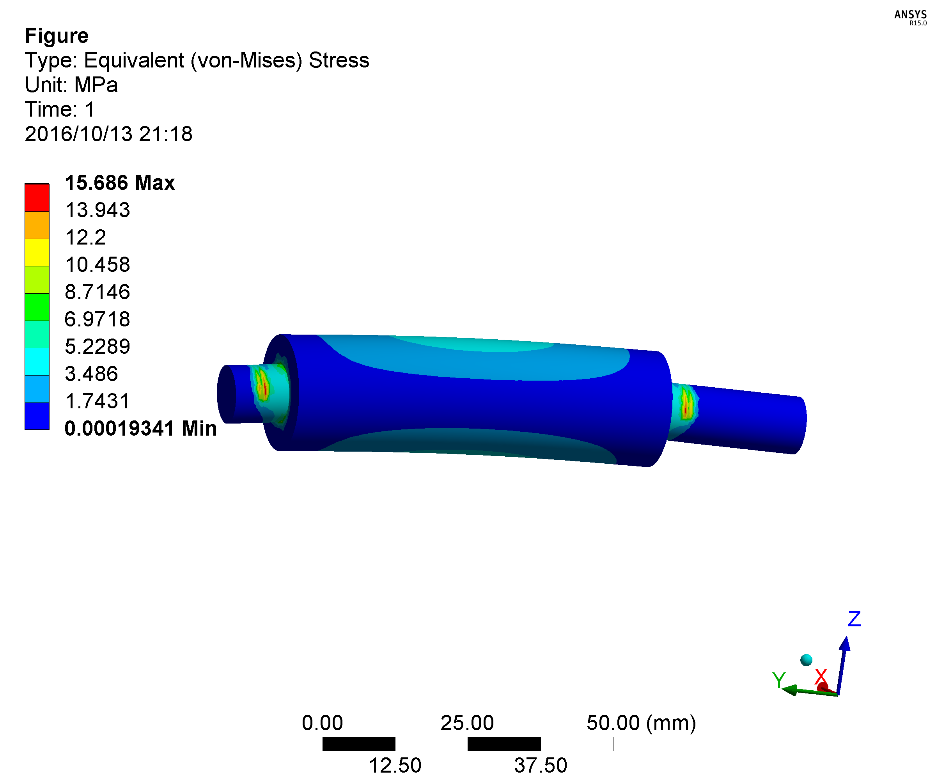
7.2行走轮轮轴的静力学分析

对于支撑行走轮的轮轴，本项目组通过ANSYS软件对其进行了静力学分析：首先在Solidworks软件中对该轮轴的模型进行简化，并进行所受载荷与转矩计算。然后在ANSYS软件中建立Static Structural静力学分析流程，再将本轮轴的简化模型转换为x\_t格式后导入流程中，同时启动DesignModeler插件在轮轴模型中通过Imprint Faces功能添加三个轴向定位面，作为联轴器的替代面以及两侧支撑杆的受力面。本行走轮轮轴采用材料为45钢，其杨氏模量为2.09×1011 Pa，密度为7800kg/m3，泊松比为0.269。

行走轮轮轴主要通过联轴器完成其自由度的限制，因此，将轮轴侧边设有替代联轴器的面，施加Cylindrical Support约束条件，限制其轴向与径向运动，并放开切向自由度。然后在支撑杆受力替代面施加整机载荷，并在轮轴中部施加支撑力，最后在联轴器侧施加转矩，从而实现整轴的载荷分布，由此进行静力学分析，得到的轮轴的总变形云图与应力分布云图如图63与图64所示。

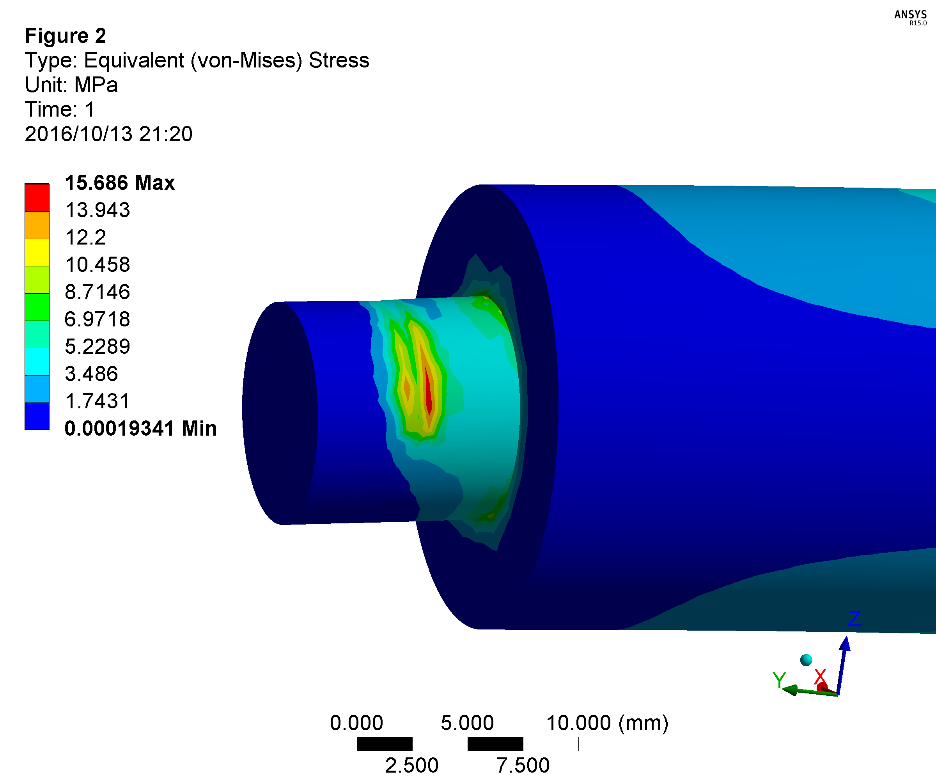


**图63 轮轴总变形云图**



**图64 轮轴应力云图**

经过ANSYS仿真分析，得出轮轴上最大变形为0.0068772mm，位于轮轴Y轴向最边缘，但因其变形极小，对于整个轮轴的稳定性影响极低；轮轴上最大应力为15.686MPa，应力主要集中在轮轴两侧支撑杆受力面上，此区域的最大应力局部放大结果如图65所示。



**图65 轮轴局部应力图**

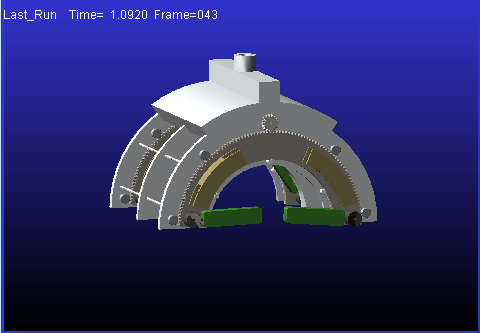
选取在不稳定载荷情况的下安全系数为3~5，此时通过计算可得45号钢在常温情况下的许用应力为：

MPa

由此可得本轮轴的最大应力15.686MPa，其小于许用应力61MPa，则本轮轴的强度满足要求，同时根据整体结构总变形极小，确定本轮轴满足支撑需求。

7.3清扫头的运动学分析

清扫头部分，蜗轮蜗杆减速直流电机驱动小齿轮转动，小齿轮与不完全齿轮啮合，从而使不完全齿轮及固定在其上的毛刷做旋转运动，清扫绝缘子的表面。两端的毛刷由直流电机驱动，绕各自的轴心旋转，实现毛刷的展开与收回。由于清扫头部分运动复杂，可以将三维模型导入到Adams中，对清扫头部分清扫绝缘子时不完全齿轮的旋转和毛刷的展开与收回动作进行运动学仿真，后处理结果如图66、67所示。

![F:\用户安装\QQ\1792702792\Image\C2C\KJK(HV%JW$O1]]](ZF4MJDX.png](data:image/png;base64,)

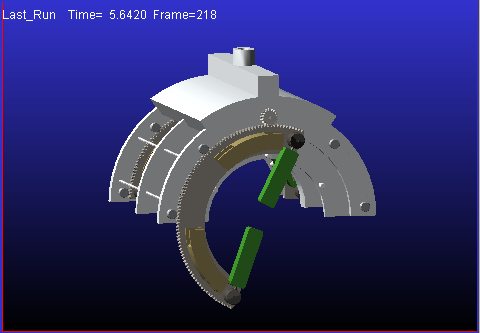
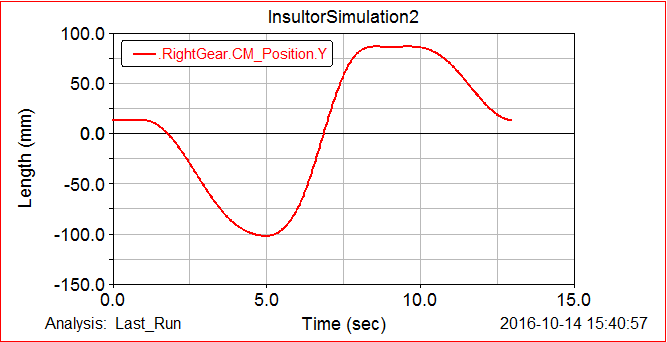
图66 毛刷伸展与收回运动学仿真

图67 不完全齿轮旋转清扫的运动仿真

其中，图65为毛刷的角速度随时间的变化曲线，当清扫头工作时，毛刷先从容器中伸展出来，然后保持伸展状态，并随不完全齿轮一起绕绝缘子的轴心旋转，实现清扫过程。

图66为不完全齿轮的质心沿Y轴即径向的位置变化图，当清扫头工作时，不完全齿轮先沿一个方向旋转至最大角度，再沿反方向旋转至最大角度，从而对绝缘子的整周进行全面清扫。

综上所述，该机构设计合理，能实现预定的运动要求。

7.4其他安全校核

整机风载荷计算：绝缘子清扫机器人工作于高压输电线之上，处于露天空旷处，工作环境特殊，一般伴随有较大的风力作用。为了理论验证机械的可行性，项目组参照起重机风载荷计算，模拟计算了高压输电线上本机器的风载大小。首先，假定风载荷是沿绝缘子清扫机器人最不利的方向作用的水平静力载荷。

根据：

式中：——作用在机器上的风载荷(N)

——风压高度变换系数

C——风力系数

P——计算风压(N/m2)

——机器人最大迎风面(m2)

参数选取及计算：

查建筑结构荷载规范GB50009-2001中的全国基本风压表知，湖北省武汉市地区，在距地面20米高空时，风压p=0.275kN/m2，取其它系数=1.32，C=1.4，经计算得：Pf=479.44N。

故强度满足，在一般风压状况安全可靠。

8.创新点及作品优势

8.1创新点

本作品以使用者的角度开发设计，具有良好的实用性与创新性，作品具有以下几个创新点：

**（1）考虑冗余并联机构，设计多创新机构的越障机械臂解决行走越障问题**

针对当前输电线上障碍较多、路况较复杂的现状，本作品通过考虑冗余并联机构设计，创新设计了由开合式行走轮、对心滑块夹紧机构、十字锁合机构、直线推杆制动机构以及齿轮副抱线机构组成的三根特殊越障机械臂，其通过将电动推杆牵引的直线运动与旋转台的空间姿态调整运动相结合，利用两种运动的协同变换完成复杂的越障运动。其同时通过行走轮基于电线倾角的适应调节与开合机构对电线的夹紧，保证了整机的稳定性，使用机构设计降低了对多自由度机械臂的依赖，使行走越障运动更灵活巧妙。

**（2）改进半环形清扫头，使用不完全齿轮完成绝缘子清扫工作**

针对绝缘子当前清扫方法的特点，本作品改进设计了半环形清扫头，利用不完全齿轮机构作为传动机构，在驱动齿轮带动下完成清扫轨迹动作的实现；清扫头中清扫毛刷与直流电机结合，实现毛刷的自旋和展开，完成对绝缘子表面进行清扫；清扫毛刷选用螺旋硬质刷毛，既提高表面清扫效果又降低清扫后污秽堆积，使清扫工作能够长时间进行。

**（3）集成高空绝缘子清扫与巡线检测，结合机器视觉完成双重工作**

项目组采用了在线控制与自动控制结合的控制系统，编写了相应上位机交互应用，集线路检测与绝缘子维护于一体，实时反映线路检测信息；自动控制方法采用基于机器图像识别的模式识别算法，实现机器人动作智能控制；在线控制方法采用图像采集卡与无线数据通讯，实现远距离清扫机械臂的遥控。

8.2作品优势

该架空高压输电线绝缘子清扫机器人与同类产品比较，具有以下几点优势：

**（1）设计了一种高压线上的全自动机器人实现自主越障与自动清扫**

本机器人能够解决当今绝缘子清扫机器人需要人工放置与无法自动行进的问题，采用三臂连锁机构完成输电线上的行走与越障，前臂上的机械手附属的环状机构完成绝缘子的清扫。同时机器人在清扫过程中对输电线与绝缘子进行多指标的检查，指标数据均采用输电线国家检查标准。机器人的控制系统包括自动智能化控制与人工远程操控，数据中心能实时监控机器人的位置与工作状态作出一系列的操作调整。该机器人智能化程度高，功能适应性强，能适合当今大量输电线路的绝缘子清扫工作，具有很大的作品优势。

**（2）采用了低功耗与双电源的供能模块，实现了机器人的长时间续航**

本机器人使用了CT电流取电装置来实现机器人在运行过程中的供能，其能适应220KV下的任何输电线路，将电压转换为电流作为电路电能。在机器人越障的过程中由于机械臂无法与输电线相接触即无法再使用互感供电，此时采用蓄电池供电的方式。当在机器人接下里运行的过程中，由于机器人三臂移动耗能较少，多余的电量将充入蓄电池中，实现机器人的长时间续航。双重供能系统价格低廉实用性强，能有效地运用在绝缘子清扫机器人上。

**（3）运用基于贝叶斯网络算法的运行路况识别，实现了自适应学习功能**

基于机器图像识别过程中人工智能及机器学习的算法难点，项目组采用了自生长的能够挖掘特征数据的贝叶斯网络算法，其通过MATLAB的BNT Toolbox实现学习功能，并在模式识别模块中采用ARM+FPGA的联合开发平台，使用ALTERA的Cyclone系列FPGA作为硬件加速处理方法，结合Cortex-M3内核的STM32F103VET作为嵌入式芯片，通过千兆以太网完成信息高速交互，在Window条件下的MATLAB 2014a中完成算法实现。

9.前景展望

9.1应用前景

绝缘子清扫是中国电网检修工程中最重要的问题之一，从上世纪五十年代以来由于绝缘子污秽积累导致的污闪断电问题一直是国内电网建设中的困难点，而直到1990年国内基本都是采用人工清扫的方法。由于绝缘子清扫存在一定的危险性，绝缘子清扫的机械化成为了本世纪研发的重点项目，并被加入了“863”计划。当今绝缘子清扫机器人主要分为喷带电水清洗型和人工放置清扫型，前者虽操作灵活但耗能较大，后者需要人工操作比较麻烦，两种清扫机器人都无法有效地解决绝缘子清扫的效率问题。因此，我们设计了这种新型的架空高压输电线绝缘子清扫机器人，该机器人能实现在输电线上的自主行进与自主避障的功能，能够高效地完成输电线上绝缘子的清扫与检查工作，并采用自主CT充电双重供能模式，很大程度上地节省物力和人力，具有很广阔的应用前景。

9.2市场前景

当今绝缘子清扫机器人市场十分广阔，目前国内存在大量的清扫机器人的研究，但具有实质性效果的实物依然很少，投入实际使用的产品寥寥无几。项目组所设计的架空高压输电线绝缘子清扫机器人，采用锂电池供电与互感CT取电的供电设备，对比国内的同类设计，具有耗能低续航时间长的特点。同时采用远程信息监控设计，能够集线路检测和清扫功能于一体。该清扫机不仅能快速高效地清洁绝缘子，还具有智能行驶与灵巧越障的功能，并根据当前国内绝缘子清扫的人工危险性较大的问题，能实现单人单机单线的最佳清理形式，充分改变之前因效率低下导致的一年一清的绝缘子清扫标准。该绝缘子清扫机器人定能在解决国内污闪处理问题起到突破性的创新，具有强大的市场竞争力和十分良好的市场前景。

10.经济性分析

项目组通过对市场进行调研与相关架空高压输电线路绝缘子清扫项目标书的参考，现阶段工程清扫上绝缘子清扫机器人只应用于地面变电站，而架空输电塔的清扫和检测工作完全由人工完成。由于当前没有任何同类型的架空线自行走绝缘子清扫机器人成品产出，故本经济型分析将与现有的两种人工清扫方式进行经济型对比。

经调查标书，当前广东电网佛山供电局某绝缘子清扫项目标书参考如下表：

表1 广东电网佛山供电局某绝缘子清扫项目标书

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目名称 | 招标范围 | 估算金额（万元） |
| 1 | 220Kv鹤高乙线绝缘子清扫 | 每年清扫一次  耐张绝缘子708串  紧固耐张线夹354组 | 71.00 |
| 2 | 110Kv高明甲线绝缘子清扫 | 每年清扫一次  耐张绝缘子1850串  紧固耐张线夹1850组 |

涉及绝缘子2558串，绝缘子清扫费用项目占比80%，即每串绝缘子清扫费用单价：

M = 71 × 80% ÷ 25.58 = 0.022（万元）

目前绝缘子人工清扫使用带电清扫工作，即清扫工作开展时不需对电网进行分段断电，但清扫效率并不高。平均每串（组）绝缘子清扫需要两人同时进行作业，清扫时间视绝缘子清扫路段条件有所变化，通常一组绝缘子清扫花费时间为1至2小时，在天气环境恶劣，路线危险时甚至需要3小时才能完成一组清扫。

以武汉阳逻港跨长江146米输电铁塔大修项目为例，中间输电线路跨度1538米，离江面最短的距离80米，绝缘子清扫工作开展前工作人员需花费20至30分钟攀爬至目标位置，仅绝缘子清扫这一项工作，每组绝缘子需2人配合作业，耗时达3小时。为了检测长江上方的输电导线的运行状态，国网武汉供电公司出动了一架无人机配合此次检修，由塔基下的工作人员遥控指挥，在塔顶四面监测。

长距离绝缘子清扫项目工期为200至250天，由于本身清扫工作的困难实施，维护频率不高而单次维护时间较长。

项目组设计的新型架空高压输电线绝缘子清扫机器人运行于高压线路之上，由剪叉车实现整机上下塔工作。本作品在钢芯铝绞线上运行速度为，而架空输电塔间距为500至1000m，每次两塔间运行时间为：

T1 = 1 ÷ 1.8 = 0.56 h = 33.6 min

本作品清扫头不完全齿轮与驱动齿轮齿数比为180：17，不完全齿轮左右两向分别旋转180°即完成一次旋转清扫作业。通过减速电机每次清扫作业用时80s，清扫头单次定位同时清扫2片绝缘子，需要进行四次定位完成整串（8片）绝缘子的清扫，以2串绝缘子为单位的1组绝缘子完成一次清扫总共用时：

T2 = 80 × 4 × 2 = 640 s = 10.7 min

总共花费时间：

T = T1 + T2 = 10.7 + 33.6 = 44.3 min

与平均清扫时间1.5小时相比，效率提升约2倍。

本作品清扫过程中供电主要由耦合供电模块通过CT感应自取电，电量消耗可以忽略；整个项目清扫时间按8小时每日计算供需100余天，每年维护周期可以由原本一年一次提升至一年两次，为输电安全提供更可靠的保证。

本作品制造成本约为1.8万元，只需要1名工作人员非全日制遥控，每日工作成本（按100天工作周期计算）为200元，而传统人工清扫方式每日需2名工作人员全日制清扫，按使用环境不同可能会加入无人机等高额花销，每日工作成本为1000元，成本减少80%。

11.参考文献

[1] 车立新, 杨汝清, 顾毅. 220/330kV变电设备高压带电清扫机器人设计[J]. 机器人, 2005, 27(2): 102-107.

[2] 董磊. CT取电测控装置的设计与实现[D]. 山东大学, 2014.

[3] 姚波, 于兰英, 吴文海, 等. 变电所绝缘子水冲洗机器人设计[J]. 机械设计与制造工程, 2015(8):65-68.

[4] 李华雷. 变电站带电绝缘子干冰清洗机器人的研制[D]. 内蒙古工业大学, 2014.

[5] 王吉岱. 电力输电线路巡线机器人机械本体结构的研究[D]. 山东科技大学, 2005.

[6] 王鹏. 防污闪技术的现状与发展趋势研究[J]. 科学与财富, 2015(27):22-22.

[7] 贺博, 林辉. 高压绝缘子污闪过程特征量的分类和判别[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 172-175.

[8] 周风余, 温龙旺, 苏鹏, 等. 高压输电线路巡检机器人能源在线补给装置的研制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 18-23.

[9] 李正. 高压输电线路自主巡检机器人的研究[D]. 上海大学, 2013.

[10] 刘亚东, 曾奕, 李振家, 等. 基于功率控制法的高压输电线路ct取电装置: CN 2009.

[11] 赵树海. 绝缘子风力清扫环的研究[J]. 湖北电力, 2003, 36(4): 85-86.

[12] 陈彦杰. 输电线路除冰机器人越障规划与跟踪方法研究[D]. 湖南大学, 2013.

[13] 王佩, 于兰英, 王国志, 等. 铁路牵引变电所轮式带电水冲洗车设计[J]. 中国铁路, 2013(1): 79-81.

[14] 崔彦岭. 一种高压感应取电装置: CN202206196U[P]. 2012.

[15] 解勇. 一种高压线除冰机器人行走越障系统的研究[D]. 北京林业大学, 2014.

[16] 贾娟, 仲亮, 郭锐, 等. 一种绝缘子清扫机器人: CN104438164A[P]. 2015.

[17] Zhang J, Yang R. Insulators Recognition for 220kv/330kv High-voltage Live-line Cleaning Robot[C]// International Conference on Pattern Recognition. IEEE, 2006: 630-633.

[18] Park J Y, Cho B H, Byun S H. Development of Automatic Cleaning Robot for Live-line Insulators[C]// IEEE, International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. IEEE, 2006.

[19] Byun S H, Cho B H, Park J Y, et al. Implementation of Control System for Insulator Cleaning Robot[C]// SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference. IEEE, 2006: 47-55.