第一章 绪论

1.1 论文研究背景和意义

带电作业是电力设备测试、检修、改造的重要手段，它为提高供电可靠性、减少停电损失、保证电网安全做出了巨大贡献。随着我国社会经济不断发展、人民生活质量不断提高，配电网络要实现不间断输电，就必须开展带电作业。

在带电作业技术发展阶段中带电作业方式都可以说是人工带电作业，即操作人员作业时都时刻处于高电压、强电场的威胁中。人工带电作业一般情况下是高空作业，登杆作业频繁、作业条件恶劣、劳动强度大、精神紧张，容易引发人身伤亡事故。据1995年全国100次典型带电作业事故统计中，配电带电作业事故达55次，达55%，在死亡的39人中有19人死于配电带电作业事故，占61%。所以，在过去很长的一段时间内，对配电带电作业进行了限制，致使配电线路停电作业频繁，配电可靠性指标不能完成，从而给电力企业带来了很大的经济损失，给人民生活和生产带来了很大的不便。因此，在1987年召开的全国带电作业会议上，又提出了必须大力加强配电带电作业的要求。

目前，配电线路带电作业在各地区开展的程度和作业水平有很大的差别。由于我国的配电网络不规范、线路复杂，有些线路相间距离短，人工带电作业安全距离不够，存在安全隐患；气候的原因也会限制人工带电作业的进行，气温低于0℃、高于38℃的天气，雨天、相对空气湿度超过80% 的天气不能进行带电作业；气温过高时作业人员穿绝缘服、带绝缘手套、穿绝缘鞋出汗多，体能消耗大，劳动强度过大。另外，人工带电作业安全防护、遮蔽要求非常严格，稍不注意就会出现短路电流，造成重大的安全事故。

配网系统带电作业现场广泛采用绝缘斗臂车中间电位作业方法，操作人员使用手动工具完成带电作业任务，劳动强度大，效率低，自动化水平低，最重要是操作人员直接接触导线，容易引发人身伤亡事故，存在很大的安全隐患。人工带电作业有其困难与局限性，因此研制具有更强的安全性和适应性的配网带电作业机器人，克服人工带电作业的困难和局限性，代替人进行带电作业非常必要，而且符合时代的要求。

1.2 课题研究现状

1.2.1 带电作业机器人国外研究现状

为了提高带电作业的自动化水平和安全性，减轻操作人员的劳动强度和强电磁场对操作人员的人身威胁，从80年代起许多国家都先后开展了带电作业机器人的研究，如日本、西班牙、美国、加拿大、法国等国家先后开展了对带电作业机器人的研究。

日本是国外对机器人研究起步较早，研究成果和使用化程度都比较好的国家之一。在80年代初，日本九州电力公司就开始了第一代带电作业机器人——主从操纵式机器人系统 Phase I的研究工作，如图1-1所示，其研究工作涉及电线的连接、切断、输送等硬件的模块化和机器人化。现在，其Phase I机器人业已达到了使用化。目前，九州电力公司从1990年就开始进行研究的适用于AC6kv及AC22kv电压等级的第二代带电作业机器人—半自动式的 Phase II 也已经研制出了实验样机。



图1-1日本九州主从操纵式机器人系统

Fig.1-1 Master slave robot system in Kyushu, Japan

在80年代末和90年代初，日本爱知公司和日本四国电力公司也分别开发出了基本液压驱动机械臂的带电作业机器人，所适用的作业对象均为6.6KV的配电系统，也都是操作人员在升降机构末端的绝缘斗内以遥控方式来控制机器人完成相应的带电作业，如图1-2所示。



图1-1日本液压驱动机械臂的带电作业机器人

Fig.1-1 Live working robot of hydraulic driven manipulator in Japan

西班牙在1990年开展了带电作业机器人的研制，以半自主控制方式完成该国69KV及以下电压等级的带电作业工作。它主要由升降作业平台和控制室两大部分。在升降平台上安装着两个6自由度的Kraft力反馈型机械臂，一个三自由度辅助臂；以及摄像机等；控制室中有一对主手、监视器、主控和图像处理系统；作业平台和主控系统之间通过光纤通信。

在80年代中期，美国电力研究院也开始了带电作业机器人的研究，其第一代机器人只有一个液压驱动的机械臂，操作人员在地面操作机械臂可以完成50KV至345KV的架空线路上的带电作业。现在已经研制出了第二代半自主机器人，升降平台上安装两台液压机械臂，如图1-3所示。

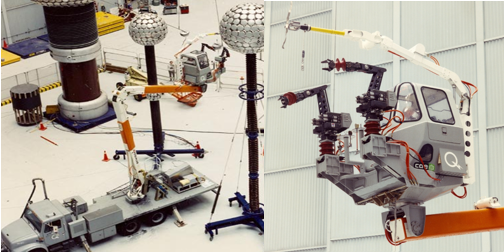


图1-3美国第二代半自主机器人

Fig.1-3 The second generation of semi autonomous robots in the United States

加拿大也在80年代中期开展了高空带电作业机器人的研究，他们研制的带电作业机器人的机械臂也是液压驱动的，操作人员在升降机构末端的绝缘斗内进行遥控作业，如图1-4suoshi ，该机器人的绝缘等级为25kV。



图1-4加拿大高空带电作业机器人

Fig.1-4 Canadian aerial live working robot

纵观20多年来带电作业机器人的发展历史，可以将其分为三代：

第一代，主从控制机器人。这也是国外正在广泛使用的形式，采取主从控制，有两个作业机械臂，人在操作斗内控制机械臂的动作来完成带电作业工作。

第二代，半自主机器人。操作人员在地面控制机器人作业，应用了一些视觉、激光测距等传感器，能识别作业目标的大体位置，通过人机交互来精确定位，不能识别较为复杂的环境。

第三代，全自主机器人。目前尚未研制出样机，具有较高的智能，具有对环境的三维识别、自身控制以及自主作业决策的功能，这种全自主的机器人研制尚需一定的时日。

1.2.2 带电作业机器人国内研究现状

国内在机器人方面的研究，自80年代中后期，由于国家高技术研究发展计划（即863计划）专项支持，得到了极大发展，已成为世界上研究机器人的主要国家之一。从我国已经形成的研究体系看，基本形成了工业机器人和特种机器人两大主要门类，尤其是特种机器人的研究已成为国内的研究热点。特种机器人主要是指工作极限环境和危险环境及危害人身健康环境的机器人，由于这些环境对机器人要求的必要性和迫切性强，因而市场前景好。

国内电力机器人近几年来发展迅速，特别是在变电领域成果显著。2002年在国家科技部“863”计划和山东省电力公司科技计划支持下，山东电力研究院和山东鲁能智能技术有限公司率先开展了变电站设备巡检机器人的研究。2005年完成了变电站巡检机器人功能样机的研制，并通过了国家“863”计划专家组的验收；同年10月又完成了国内首台变电站巡检机器人产品样机的研制，并在山东电力超高压公司500kV长清变电站投入实际运行。2010年以后，国内先后涌现出沈自所、浙江国自、深圳朗驰等具有自主研发产品厂家，其产品也已经实际应用于变电站场所。上海交通大学于2002年开始了绝缘子清扫机器人的研究，该机器人主要通过剪叉式升降机构实现机器人的伸缩移动。陕西银河电气防污技术有限公司开发的自动清扫装置，是通过叉车载运清扫装置完成作业任务。

在配电系统领域带电检修作业机器人起步稍晚。在2002年山东电力研究院最早开展了高压带电作业机器人的研究，采用两台MOTOMAN机械臂，操作人员进行作业时通过键盘控制机械臂运动，由于控制系统不开放，不能实现主从控制。山东鲁能智能技术公司开展高压带电作业机器人研究多年，在带电作业方面积累了丰富经验。在2012年完成高压带电作业机器人研究研制，采用两台自主研发的电机机械臂，控制系统采用主从控制方式。操作人员进行作业时通过主手和键盘控制机械臂运动，实现了机器人系统的主从/自主控制，由于自身重量大，不能适合绝缘斗臂车作业要求。在2012年，山东电力研究院在国家“863”计划的支持下开展了“面向电力带电抢修作业机器人研究开发与应用”，所研发的配网带电作业机器人，应该是目前国内较成熟的、为数不多的可以实现带电设备检修作业的机器人。但其研究成果受制于人机配合操作，处于样机研发阶段。

南方电网公司在人工带电作业技术领域，始终走在了全国的前列。带电作业的历史可以追溯到1960年代。从2006年起，南方电网公司开始大规模开展配网带电作业。在这个过程中，南方电网区域不少省、市已经掌握了配网带电作业的技术和技能，并具备自主研发带电作业工具和项目的能力，部分单位还根据实际情况探索适合本地的带电作业模式。以广州供电局为例，该局成功研发了国内第一台不停电更换配变的10千伏旁路作业车，实现由以人工为主的带电作业模式向专用设备为主的带电作业模式的突破。

2016年南方电网公司凯里供电局与山东电力研究院联合进行了配网带电作业机器人技术的研究，该项目研制的机器人能在高压带电状态下，可利用多种机器人带电作业专用工具，包括电动剥皮器、破螺母工具、电动扳手、压线钳、断线钳等，完成修补导线、断接引线、跌落保险、异物清除等作业项目。该机器人在机器人特别是机械臂的应用上取得了不错的成果，但该机器人作业时，采用主从遥控方式，如图1-5所示，操作人员仍处在高空作业环境下，作业危险性无法保证，另外由于受机械臂的控制技术的瓶颈限制，该机器人无法满足一些自动化、智能化的需求。



图1-5南方电网带电作业机器人作业图

Fig.1-5 Working drawing of live working robot in China Southern Power Grid

1.2.3 配网线路机器人带电作业技术瓶颈

目前，在配网线路机器人带电作业技术方面，还存在以下技术瓶颈：

1. 配网线路三相线距小，城市电线杆上面往往还有其他线路，对于机器人来讲，操作空间狭小，完全依赖人工避碰，使操作变得异常繁琐，效率低。因此需要针对线路环境特点，结合虚拟现实技术，进行离线路径规划，研究协调控制和实时避碰算法，提高机器人的智能化水平。
2. 配网带电作业种类多，作业形式复杂，且作业对象不标准，如何设计出适应机器人携带，便于完成相应动作的作业工具，是保证作业质量和速度的重要条件。面向机器人带电作业需求，需要研制具有较高作业效率、安全性的电动的，系列化复合作业工具，包括剥线器、扳手、断线钳、破螺母工具。各种作业工具具有统一的快速插接/锁紧机械接口。
3. 配网机器人系统工作在高压环境下，必须保证人员和设备的安全性，而且不能造成线路短路等断电事故。因此系统的绝缘防护、电气隔离和抗电磁干扰是必须解决的问题。首先要做到与线路直接接触的工具、机械臂等是绝缘的，工具和机械臂彼此间也是绝缘的，即使出现同时与两根线路接触的情况，也不会造成短路，因此在耐高压击穿和爬电距离上要满足10kV配网需求。另外控制系统在配网形成的强电磁场下工作，因此必须对控制系统进行抗电磁干扰设计，保证在电磁环境下可靠工作。
4. 在智能人机交互操作机器人研究中，遥控操作机器人手臂的位置控制和力觉临场感的实现是一项关键技术，这一问题的解决将直接影响机器人工作的准确性和效率。
5. 配网带电作业一般都选择合适的已商业化的绝缘斗臂车，采用机器人进行作业，必须对绝缘斗、支撑绝缘臂进行适当的改造，增加平台承载能力和车体平衡能力，满足承载要求。同时开展适合带电作业机器人的作业方法，并执行相应的作业规范，为系统推广应用奠定基础。

现代化配网发展对于引入先进带电检修作业机器人技术有非常迫切需求。在开展机器人带电作业时，操作人员在地面通过主手遥控加局部自主控制方式，操作机器人从手进行作业。该作业方式既可保障人员安全，同时减少停电时间，又具有对环境的感知能力，能极大提高操作的灵活性、准确性，大幅度提高作业效率，减轻作业人员的劳动强度，使作业人员与高压电场完全隔离，最大限度的保证作业人员的安全，降低劳动强度，提高作业效率，创造更多的经济和社会效益。

1.3 论文主要内容和章节安排

本课题来源是上海交通大学和云南电网有限责任公司昆明供电局合作的“配网带电作业智能机械臂关键技术及应用研究”项目。首先分析带电作业平台与系统架构；然后基于Unity3D平台开发在线辅助控制软件实现对机械臂控制，完成指定任务；然后对任务过程中需要智能自主实现的动作进行控制优化，利用视觉算法、运动学规划算法、虚拟现实仿真技术辅助，实现局部自主，使得带电作业更加智能；最后通过实验对论文中提到的在线辅助软件以及算法进行验证。

本文一共分为六章，最后一章是对课题的总结和展望，其余五章的关系如图所示。

第一章 绪论。通过查阅大量文献，了解目前高压带电作业情况，对国内外高压带电机器人研究现状以及带电作业机器人技术要求进行分析。

第二章 高压带电平台搭建。介绍整个高压带电平台结构和控制系统，并对机械臂进行运动学分析。

第三章 在线辅助操作系统设计。介绍基于Unity3D平台开发的多机械臂在线辅助操作系统，控制多个机械臂完成高压带电作业。

第四章 局部自主作业系统。利用视觉算法，运动学规划，虚拟现实辅助技术，解决在高压带电作业流程中出现的复杂，不易由人工遥控操作的任务，完善作业流程，突出在线辅助操作系统的智能性和用户友好性。

第五章 实验验证和分析。将在线辅助操作系统部署至带电作业控制台，远程遥控作业平台完成带电作业，验证在线辅助系统以及自主作业算法。

第六章 总结与展望。对研究内容进行了总结，指出研究中的不足，提出一些改进方案。

第二章 高压带电平台搭建

2.1 引言

高压带电作业机器人系统架构如图2-1所示。系统总体由三大功能模块组成，分别为基于高压环境带电作业的移动载体及多机械臂机械系统、遥操作的移动载体及多机械臂控制系统和基于多传感信息的局部自主智能作业系统及辅助仿真软件。由操作人员在驾驶室，利用控制系统远程控制移动载体和多个机械臂，在在线辅助控制系统的帮助下，完成高压带电作业任务。

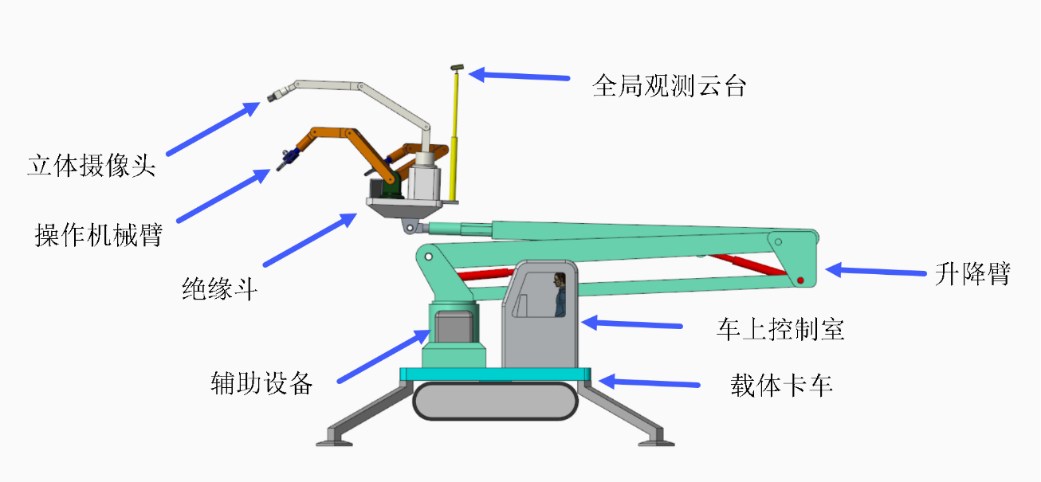


图2-1系统总体设计图

Fig.2-1 Overall design drawing of the system

2.2 基于高压环境带电作业的移动载体及多机械臂系统

2.2.1 概述

整个带电作业平台可以分为移动载体、多机械臂和末端工具三大部分。其中需针对机器人使用的山地、丘陵等作业环境，设计履带式移动载体实现多机械臂以及升降平台的移动及稳定承载，基于绝缘技术设计多机械臂的升降平台；在升降平台之上设计双机械臂精细作业系统实现多种维护作业，另外设计独立的轻载观察机械臂扩大观察范围，提高临场感；还需设计多种末端作业工具及快换装置实现精细维护操作。

2.2.2 移动载体

移动升降机构由履带车改装，车斗内搭载独立供电系统、升降机构、主控制室、平衡装置。操作人员在主控制室内进行操作，采用人机交互主从控制和自主控制相结合的方式控制作业机械臂完成各种带电作业。10kV配电架空线路大多距地面15m左右，所以机器人使用了可旋转的基座以及可俯仰的推杆伸缩臂作为升降机构。伸缩臂大臂俯仰角为65°，小臂伸缩，配合作业机械臂，使最高作业高度达18m，同时通过控制升降平台各个自由度的运动保证了机械臂作业平台的水平。伸缩臂末端负载300kg，除去绝缘斗的自重，末端安装机械臂平台约200kg。机械臂平台上配置两个6自由度机械臂、一个多自由度三维立体观察摄像头、一个全方位广角摄像云台系统，以及机械臂运动控制系统，机械臂末端可安装各种专用工具来完成带电维修作业，摄像机作为遥控操作时现场视频采集设备和自主控制时机器视觉前端采集设备。整个系统供电由移动平台上搭载的隔离电池组系统提供。为保证绝缘等级，主控制系统与运动控制系统间采用光纤通讯，供电线路采用隔离变压器进行电气隔离。

2.2.3 高功率密度机械臂

因升降机构完全伸展之后距地面高度较高，机器人整机的平衡就显得非常重要。移动车体有配重及平衡机构，但仍需考虑尽量减少顶端作业机械臂的重量。有很多带电作业需要大扭力或大扭矩，因此功率重量比就成为一个重要的指标。另外作业过程中应尽量减少升降机构的振动，这就要求机械臂作业过程中传递运动要平稳，且运动方向改变时要减少换向冲击。

采用交流伺服电机驱动作业机械臂，可以提高作业精度、动态特性及负载自重比。操控主手与机械臂间仅通过光纤通讯，这样操作人员操控主手控制机械臂作业时，隔离高压电场对作业人员造成的人身伤害，这也是配网带电作业机器人作业最为突出的优点。

机械臂机电控制系统主要由工控机、交流伺服驱动器、交流伺服电机、电机编码器、制动器、限位开关等以及其他一些闭环伺服控制系统必要元器件构成，工控机通过计算给伺服驱动器发出动作指令，再由驱动器控制电机，驱动各节机械臂运动。

执行部件共包括1个谐波减速机和3个电动推杆机构，2个行星齿轮减速机构对应作业机械臂的腰部旋转、大臂俯仰、小臂俯仰、腕部俯仰、腕部摇摆以及腕部旋转。各关节执行部件均装有位移传感器和限位开关，实时测量各执行部件的运动参数，并反馈至运动控制系统和主控制系统。因机械臂使用主手控制操作，为了提供高保真的力觉临场感，应尽量减小机械臂的运动阻抗，并使其结构紧凑、重量轻，因此电动推杆选用滚珠丝杆结构，该种推杆具有驱动效率高，传动比大的特点。

由于带电作业机器人系统需要完成配网带电设备或导线上的异物清除、带电断接引线、带电修补导线、带电更换跌落保险等精细作业，因此要求机器人负载自重比大，机构轻量化、灵巧化、精确化、摩擦力低，提高输出功率系数。从设计环节，选用碳纤维、铝合金等轻质材料，臂架采用中空设计，方便走线及减重，采用工字形、箱型等中截面形状，提高承载刚度；在传动件上，选用高精度行星、谐波及RV减速器，减小传动间隙，提高末端作业精度和刚度，在装配阶段，保证传动轴的同心度，接触端面的垂直度等关键装配尺寸，提高传动效率；在控制系统设计中，采用高精度编码器和末端感知双闭环设计以及多种先进控制算法及多阶连续的轨迹规划方法，提高机械臂的末端的动态精度。

2.2.4 专用工具

带电作业机器人工作任务多样，但无论进行何种作业，左臂的作用都为抓取部件，右臂任务根据不同作业内容而变化。如更换跌落开关时，在任务的不同阶段，左臂的抓持对象分别为上引线、跌落开关、横担、下引线等，而右臂的任务则分别为断线、拧螺母、夹持绝缘子、接线等。因此左臂末端安装一个具有一定机械自适应能力的夹持手，能抓住不同形状的物体，且抓持力大、传动效率高、结构简单、重量轻。夹持手如图4所示。

为便于夹持，夹持位置两侧开有半圆弧形凸面。夹持手为夹持导线做了专门的设计，设置了引流线预固定压接装置和主导线固定压接装置。引流线预固定压接装置将引流线固定螺栓紧固连接，加装弹簧垫圈起到螺栓放松作用，通过固定支撑侧面的定位槽来配合完成定位安装。主导线固定压接装置，将主导线由导向尼龙槽连接螺栓压紧在上置压块的半圆弧面和下置固定支撑块的半圆弧面之间。

右臂末端也安装夹持手，并根据任务内容更换不同的专用工具，包括多功能分体式扳手、绝缘线自动剥皮装置、分体式液压接线钳、液压圆弧断线钳、断接线绝缘牵引工具、导线提升可调装置等。专用工具均采用快速接头工艺、分离式液压驱动、绝缘油管供油，保证了操作的高效性和安全性。

2.3 遥操作的多机械臂主从控制系统

针对平台中使用的三个机械臂设计控制系统。其中两只机械臂为主要的操作臂，完成带电作业任务，另外一只为观测臂，承载相机等传感器，主要任务是完成对其余机械臂以及作业环境的灵活观测，反馈现场图像信息采集。区别于人工带电作业的近距离操作，系统采用操作者在下面控制室，基于虚拟现实和视频监控反馈对机械臂进行遥控操作的模式，遥操作系统采用主从机械臂配合的方式进行，可以保证驱动方式的简单化以及降低人员对于遥操作系统的适应难度，减少虚拟现实场景带来的不适性。

带电作业机器人控制系统可以划分为主控制系统和从控制系统。

主控制系统负责整体任务规划、图形计算和人机交互，从控制系统负责机械臂各关节运动控制。主控系统由主机械臂、主控制器、主计算机(工控机)、图形处理器、显示器、VR显示设备。主控制程序运行在主计算机上，分为任务规划模块、基础人机交互模块、异常处理模块、日志管理模块。主臂控制程序运行在主控制器上，分为运动学模块、柔顺控制模块、主从通信模块。图形和三维计算的程序运行在图形控制器上，分为标准三维模型库、机器视觉模块、实时场景目标识别模块、实时在线仿真模块、智能辅助作业模块、虚拟现实模块等。操作员可以通过主手操作机械臂，也可以使用键盘、鼠标在人机界面中操作。主控制系统和从控制系统之间使用光纤通讯，保证图像信息和控制信息的实时高速传输。设备间通讯采用ZeroMQ通讯协议，采用发布-订阅机制，保证多设备之间的交互通讯顺利完成。

主机械臂的位置信息通过实时通讯发送到从机械臂，由从臂控制器从机械臂复现主臂的位置姿态，同时把从臂的位置、力矩信息发送到主控制器。操作员牵引主臂末端运动时，从臂会复制主臂运动位置和速度。同时，主臂根据从臂反馈的力矩信息会反馈给主臂操作者一定的反作用力，提示操作者当前从臂的受力状态。

带电作业机器人并发执行的任务很多，因此本系统采用分布式机构，根据任务性质将不同模块运行在不同的计算机或控制器中。主程序运行在可靠性高的工控机上，保证整体系统的管理和应急处理。机械臂的实时控制任务，通过两个实时控制器完成。计算量巨大的图形处理和三维仿真任务有高性能图形计算器完成。计算机或控制器的通讯采用多对多的ZMQ通讯方式，降低通讯设计的复杂性，进而提高可靠性。图像数据与控制数据采用不同的物理网络，提高通讯带宽的同时，降低通讯的延时。图像数据与控制数据采用不同的物理网络，提高通讯带宽的同时，降低通讯的延时。主从臂通讯采用光纤通讯+无线通讯冗余结构，硬件延时<10ms。控制软件内部采用等待-触发模式降低数据收发等待。机械臂控制平均延时控制在0.1s，最大延时不超过0.5s。图像部分采用光纤传输模拟量数据，减少数据解压缩时间，降低画面延时，使视频延时小于1s.

主控系统软件运行在通用的Windows操作系统上，使用UML分析和设计，建立了系统软件模型，采用Ｃ＋＋语言编写程序，以开源的MYSQL作为数据库管理系统。运行主从臂运动控制程序的控制器采用实时控制系统（RTS，Real Time Syetem）。图形处理程勋运行在windows平台，采用OpenCV，OpenGL的开源库进行开发。

2.4 机械臂运动学分析

平台所用的主、从机械臂均采用6自由度机械臂设计，机械臂末端有快换装置，可快速安装或拆卸所需的工具。机械臂外观如图所示。除了简单的单轴控制，控制系统还需要机械臂多轴联动，直接控制末端位姿的功能，这需要对机械臂模型进行运动学分析。首先简化机械臂模型，建立各个关节与末端执行器之间的位姿映射关系，使用D-H发，计算各个关节的旋转矩阵。机械臂运动学解算可以分为正、逆运动学，正运动学是利用机械臂的各个关节角度计算末端的位姿，用于显示目标位置与机械臂末端之间的相对关系，逆运动学是指利用末端位姿计算各个关节的角度，以求得控制机械臂末端运动时各个关节所需的速度。

2.4.1 正运动学分析

机械臂正运动学是根据机械臂的各个关节角度计算末端位置的过程，根据机械臂的关节分布特性绘制的各个局部坐标系分布如图所示，关节1-6分别对应机械臂的腰、大臂、中臂、小臂、手腕1、手腕2。根据图建立D-H参数如表所示，从而得到两两相邻连杆的变换矩阵，其中为连杆转角，为连杆长度，为连杆偏距，为关节角。

表2-1 机械臂D-H参数表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 1 | 90 | 0 |  |  |
| 2 | 0 |  | 0 |  |
| 3 | 0 |  | 0 |  |
| 4 | 90 | 0 |  |  |
| 5 | -90 | 0 |  |  |
| 6 | 0 | 0 |  |  |

变换矩阵T是一个4×4的齐次变换矩阵，代表相对坐标系相对于参考坐标系的位姿变化，通过矩阵连乘，就能得到机械臂末端坐标系相对于基坐标系的变换关系。如式(2-21)所示，矩阵T由4个小矩阵组成，其中R代表坐标系旋转关系，P代表坐标系原点位置平移关系，O是透视矩阵，元素都为0，I是比例变化，元素都为1。旋转关系矩阵R由3个向量组成，即，分别是相对坐标系的x轴、y轴、z轴在参考坐标系下的方向余弦，平移关系矩阵是一个向量，即。



根据D-H分析法的原理，坐标系i相对于坐标系i-1的变换矩阵如式(2-22)所示，表示坐标系i绕坐标系i-1的x轴旋转 ，表示坐标系i沿坐标系i-1z轴方向平移，表示坐标系i绕坐标系i-1的x轴旋转，表示坐标系i沿坐标系i-1的z轴方向平移的距离。



根据表(2-1)的参数，得到机械臂各个连杆的位置变换矩阵如(2-23)所示。

 ; ;

;;

;

可以得到机械臂末端相对于基坐标系的变换矩阵为：



展开得到：









利用机械臂各个关节的电机编码器读取到的电机角度，即关节角，按上述公式可推导出机械臂末端的位置和姿态，再通过坐标系变换转换到全局，显示在屏幕上，可以让操作者对于机械臂末端位姿有更直观的理解，也可利用这部分数据，推算机械臂末端与作业目标相对位置关系，引导操作者完成作业。

2.4.2 逆运动学分析

机械臂的逆运动学解算是指利用末端的位姿反解各个关节角的大小，由于机械机构的限制，机械臂在空间中的运动范围是有限的，所以在求解机械臂逆运动学时需要考虑解的存在性，当指定的点不在机械臂运动范围内时，逆解不存在，便可提示机械臂无法运动到指定点。同时，机械臂逆运动学可能会出现多个解的情况，即机械臂可以有多种不同的姿态使末端到达指定点，为更好地辅助操作者完成机械臂指定的运动，需要解算出最佳的逆运动学的解，使机械臂的运动尽可能地平滑，减少机械振动，保障安全。

逆解的方法有解析法，迭代法和几何法。其中解析法用数学推导，可以得到全部根，但是计算复杂。有的机械臂可以得到无穷解，本文所用的6轴机械臂是有有限解的。首先计算求变换矩阵T过程中的一些中间矩阵。







由 得到。

求解得式中的 ，。

可以得到：



等式两边矩阵的行列应该分别相等，由第三行第四列得到：





即解出第一个轴的关节值 ，有两个解。

由第三行第三列得：





即解出第五个轴的关节值 ，有两个解。

由第三行第二列得到：





即解出第六个轴的关节值 ，有一个解。

接着由

 ，

可以得到：



令两式左侧分别为m和n。可得到：





即解出第三个轴的关节值 ，有两个解。

将代入m和n，可以求得第二个轴的关节值



由

求得第四个轴的关节值。

综合有两个解的情况，机械臂逆解总共由8组解。在操作过程中，在线辅助系统如何抉择至关重要。

2.5 本章小结

第三章 基于Unity3D的在线辅助遥操作系统设计

3.1 Unity3D介绍

Unity3D是由Unity Technologies开发的一个让玩家轻松创建诸如三维视频游戏、建筑可视化、实时三维动画等类型互动内容的多平台的综合型游戏开发工具，是一个全面整合的专业游戏引擎。从Unity Technologies在2005年发布Unity1.0版本，至今已然过去将近15年，在这期间，IT技术风起云涌，Unity的运用也逐渐从单一的游戏领域，开始向互联网、教育、医学等领域延伸，越来越多不同专业、不同目的的开发者，利用Unity3D平台开发系统。

利用Unity3D平台开发带电作业项目的控制系统，具有以下几点优势：

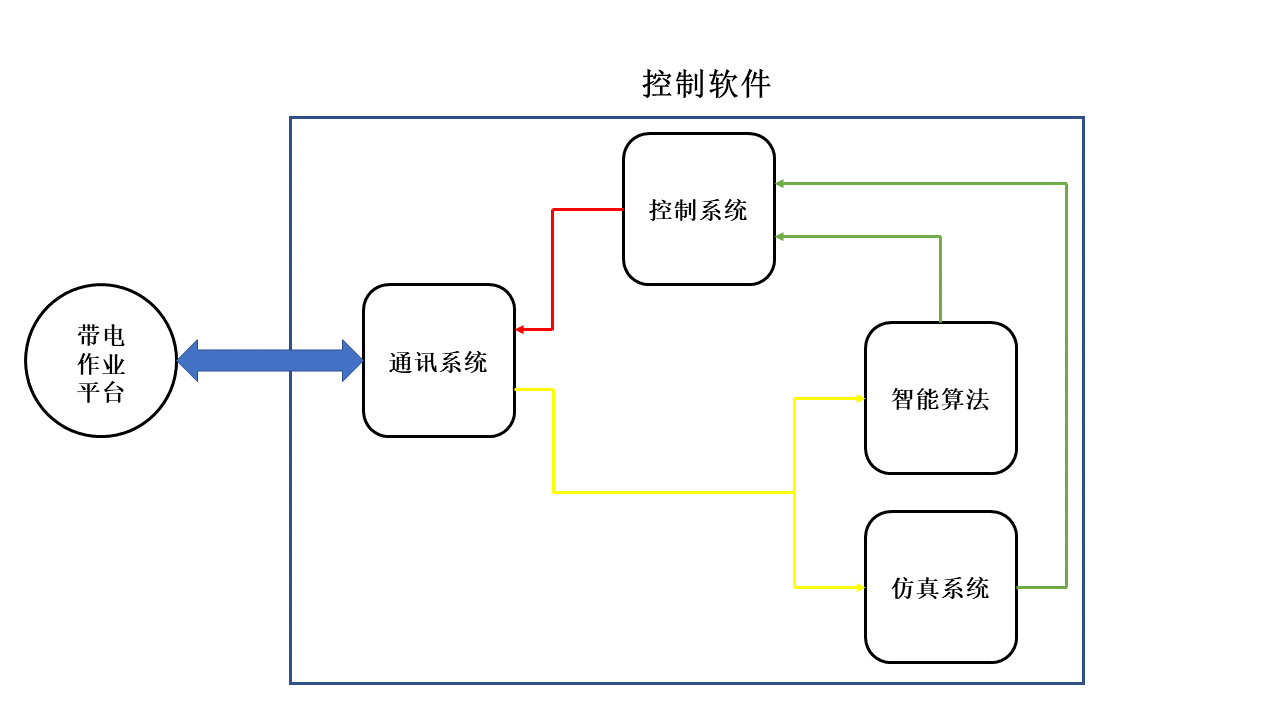
1. 基于Unity3D平台开发的虚拟现实仿真系统，能够给操作者带来强烈、逼真的感官冲击，使操作者获得身临其境的体验，这是只利用摄像头等传感器无可比拟的优势。
2. Unity3D引擎支持多个平台发布，兼容性好，可支持Windows、Android、Linux等多个主流平台，部分开源算法只能运行于Linux系统，Unity3D也可以很好地兼容开发。
3. 开发简单容易上手。Unity3D利用C#脚本编程，官方文档详细，降低了开发难度，缩短开发周期，而且便于维护。

3.2 系统框架

整个系统软件由四个部分构成，各部分功能和任务如下：

* 通讯模块：建立作业平台与控制器的稳定连接，相互传输数据；
* 控制模块：控制器发送指令给作业平台，实现控制运行；
* 虚拟现实仿真模块：收集作业平台返回的信息，实时显示在控制器界面中，辅助控制。
* 智能算法辅助模块：利用视觉、运动学规划等算法，处理作业平台返回的信息，解算出最优的控制命令，辅助控制系统完成控制。

这四个部分相互之间的关系如图所示。



3.3 通讯模块设计

为实现遥控操作，控制系统软件需要与带电作业平台建立连接，使得作业平台处于在线状态，按一定周期向控制软件返回位置、状态等信息，并可以接收控制软件发送的控制命令，实现运动。通讯系统采用基于TCP/IP的Socket网络通讯协议，利用多线程开发非阻塞的长连接通讯。

3.3.1 套接字介绍

套接字是支持TCP/IP的网络通信的基本操作单元，可以看作是不同主机之间的进程进行双向通信的端面点。利用通讯目标的IP地址、所用的端口号和传输层协议(TCP或UDP)就可以实现不同终端不同应用程序进程之间的连接和网络通信，实现数据传输的并发服务。

Socket可以看成在两个程序进行通讯连接中的一个端点，是连接应用程序和网络驱动程序的桥梁，Socket在应用程序中创建，通过绑定与网络驱动建立关系。此后，应用程序送给Socket的数据，由Socket交网络驱动程序向网络上发送出去。计算机从网络上收到与该Socket绑定IP地址和端口号相关的数据后，由网络驱动程序交给Socket，应用程序便可从该Socket中提取接收到得数据，网络应用程序就是这样通过Socket进行数据的发送与接收的。

套接字有三种类型：流套接字用于提供面向连接、可靠的数据传输服务，保证数据能够实现无差错、无重复发送，并按顺序接收；数据报套接字提供一种无连接的服务，不能保证数据传输的可靠性，数据有可能在传输过程中丢失或出现数据重复，且无法保证顺序地接收到数据；原始套接字主要用于访问其他协议发送数据。

3.3.2 通讯协议设计

TCP协议是面向数据流的可靠传输层协议，相较于UDP协议，TCP协议具有更加安全、简便等优势，由于作业平台与控制器之间使用光纤通信，极少数情况才会出现网络波动或者拥塞，所以选择TCP/IP协议作为通讯的基本协议。

控制的三个机械臂需要在下位机中设定不同的IP地址和端口，如下表所示。

表3-1 机械臂网络信息配置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 机械臂名称 | IP地址 | 端口号 |
| 主操作臂 | 192.168.1.1 | 30001 |
| 从操作臂 | 192.168.1.2 | 30001 |
| 观察臂 | 192.168.1.3 | 30001 |

从程序的封装性和可复用性角度出发，由于三个机械臂的网络通信部分大致相同，所以只需要设计一个脚本，由上表所述的不同IP地址和端口号分别进行初始化，就可以实现对不同机械臂的通讯，无需大量重复代码的编写。

建立连接后，为实现非阻塞长连接通信，需要将接收数据和发送命令设置为两个独立的线程并发运行。和一问一答式的阻塞通信模式不同，非阻塞模式可以将收、发线程独立开，更好地利用系统资源，提高效率，但编程难度也会有所提高。

通讯系统会将控制系统最后输出的控制命令进行再一次地封装，传输给作业平台中的上位机，发送的数据包格式如下表所示，由上位机中的通讯系统进行解包，确认发送过来的控制指令没有问题后再执行数据包中的指令。如果上位机数据包校验出问题，立即丢弃这个数据包，并发出警报，机械臂也马上停止，直至警报解除。

表3-2 发送数据包格式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 位置 | 数据格式 | 说明 |
| 第0、1个字节 | 7777(16进制) | 起始数据位，用于校验 |
| 第2个字节 | Int型 | 指令号，用于确定模式 |
| 第3到15个字节 | 自定义格式 | 具体控制指令 |
| 第16、17个字节 | FFFF(16进制) | 终止数据位，用于校验 |

控制系统中创建一个独立的线程用于循环发送请求上位机发送状态信息的指令，当上位机接收到这个指令后，就会将请求的机械臂状态、位置封装后返回给下位机，下位机接收到这部分信息后，对其中的数据进行解包，数据格式如下表所示，借由校验位验证数据的有序性和完整性，说明数据包有效，再传入仿真系统和智能算法部分。如果校验不通过，说明读入了脏数据，可能是通讯发生了异常，系统将马上发出警报，提示作业平台可能离线，通讯系统检查连接是否还持续的同时，循环发送紧急停止指令，防止作业平台失去控制，引发危险。

表3-3 接收数据包格式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 位置 | 数据格式 | 说明 |
| 第0、1个字节 | FFFF(16进制) | 起始数据位，用于校验 |
| 第2个字节 | 布尔型 | 7个关节的状态信息，剩余一位用0填充 |
| 第3到9个字节 | Double型 | 7个关节的位置信息 |
| 第10到15个字节 | Double型 | 末端6个自由度信息 |
| 第16、17个字节 | 7777(16进制) | 终止数据位，用于校验 |

为实现长连接，上位机和下位机之间需设定心跳包机制，在通讯双方传输数据中独立再相互传输一个数据包，按一定频率循环发送和接收，这个数据包即心跳检测包，传输格式如下表所示

表3-2 心跳检测包格式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 位置 | 数据格式 | 说明 |
| 第0、1个字节 | FF00(16进制) | 起始数据位，用于校验 |
| 第2个字节 | Int型 | 心跳包计数 |
| 第3、4个字节 | 字符串型 | 记录当前日期中的时 |
| 第5、6个字节 | 字符串型 | 记录当前日期中的分 |
| 第7、8个字节 | 字符串型 | 记录当前日期中的秒 |
| 第9、10个字节 | 0077(16进制) | 终止数据位，用于校验 |

心跳检测包中主要传输的是对方系统的时间，格式为XX：XX：XX，再与自身系统当前时间相对比，即可获得通信延时，当延时过大，即采取紧急措施，系统发出警报，作业平台紧急停止，保障安全，再由人工进行检查，排除故障后系统方可继续运行。

3.4 控制模块设计

3.4.1 任务细化

带电作业任务大致可以分为四个子任务：

1. 夹线；
2. 剥线；
3. 放置线夹；
4. 拧螺栓。

整个作业流程如下图所示。

主机械臂负责剥线和拧螺栓任务，从机械臂负责剥线和放置线夹的辅助任务。

首先获取到高压线的位置信息后，从机械臂需要换取手爪1，用于夹线，从机械臂需要运动到高压线附近，手爪1闭合，将高压线固定，如图所示，防止在剥线过程中高压线的错误位移和转动。

第二步，主机械臂换取剥线器，运动到指定位置，启动剥线流程，将高压线上指定位置进行剥线操作，剥除12cm的高压线外皮，用于放置线夹。然后剥线器撤离，从机械臂的手爪1松开，也撤离高压线，准备下一步作业。

第三步，从机械臂换取手爪2，抓取线夹，运动到上一步剥皮的位置，将线夹放置在高压线裸露部分，手爪2保持抓取状态，等待下一步作业完成。

第四步，主机械臂换取拧螺栓机，运动到线夹底部螺栓的下方，调整好位姿后，启动拧螺栓机，将线夹上的螺栓拧紧。

最后，先主机械臂撤离拧螺栓机，从机械臂再撤离手爪2，线夹平稳地固定在高压线上，机械臂回到初始位置，带电作业完成。

上述作业流程可以分为两类，一类是预先可以通过示教，可重复完成的确定作业流程，另一类是需要根据临场环境，实时修正的不确定作业流程。

可确定的作业流程如下图所示，主要为机械臂运动到指定位置，去换取任务所需的专用工具，再运动到预备位置，为下一步任务做准备。由于机械臂与平台、专用工具之间的相对位置是固定的，所以可以这部分作业流程是可重复的，不需要操作者通过遥控的方式完成，而是通过示教模式，将任务保存为文件格式，控制模块只需读取文件，即可控制机械臂完成指定动作。相较于遥控作业，示教操作模式更加高效、安全，还可以省去操作者的重复作业，简化操作流程。

当机械臂运动到预备位置后，由于作业环境的不确定性，无法通过示教预先设定这部分的作业流程。主要涉及到夹线、剥线器放置、线夹放置、拧螺栓机固定四个作业步骤，操作者可以在智能辅助模块的帮助下，远程遥控作业完成这些步骤，以应对不同的作业情况，使得系统具有极强的适应性。

3.4.2 既定任务实现

3.5 虚拟现实仿真模块设计

虚拟现实是以计算机技术为基础而生成的一种虚拟化的模拟系统，通过对真实情景的模拟和对虚拟环境的控制，增强了人机的交互性，获得身临其境的体念。在带电作业过程中，因为操作者远离作业平台，远程进行操作，单凭全局摄像头、末端摄像头等搭载在平台上的传感器传输回来的信息，无法对作业情况有一个全局的掌握，并且这些传感器不可避免地存在死角，这些因素都可能产生很大的安全隐患。所以如何使用虚拟现实仿真技术，有效利用现场数据，更好地辅助操作者完成带电作业是本节的主要内容。

3.5.1 模型与虚拟环境的搭建

带电作业过程中涉及到的物件可以分为两种，已知物体和未知物体。已知物体指的是知晓其尺寸、位置、形状等信息的物体，可以由三维画图软件明确绘制出来，然后可以在虚拟环境中预先设定好，例如作业平台、机械臂、末端工具。而未知物体在带电作业中很重要的一个就是高压线，由于高压线与作业平台的相对关系由现场作业情况决定，在虚拟环境中无法实现确定。

这些所要用到的模型皆由3Dmax软件按现实尺寸绘制，然后以obj格式导出，可以被Unity3D平台支持，最后用于组合成与现实环境一一对应的虚拟环境，所用到的组件如下表所示

表3-2 虚拟模型明细表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 名称 | 数量 | 说明 |
| 载体平台 | 1 | 底座平台 |
| 机械臂 | 3 | 操纵臂每个有7个关节 |
| 夹爪1 | 1 | 用于夹线的末端手爪 |
| 夹爪2 | 1 | 用于夹线夹的末端手爪 |
| 剥线器 | 1 | 剥线工具 |
| 拧螺栓机 | 1 | 用于拧紧线夹上的螺栓的机构 |

这些模型导出时，都以各自的几何中心为原点设定基坐标系，除机械臂之外的模型不涉及运动，所以导出后可以直接使用。但机械臂模型导出后需要重新设定坐标系，才可实现与现实仿真的运动。

机械臂不可直接导出，因为机械臂具有7个关节，倘若直接导出，3Dmax会自动将模型中上万个顶点直接打包为一个独立的整体，后续需要将这7个关节分离开，这一步将会添加无谓的工作量，所以需要将机械臂中的7个关节分别导出，为腰关节、大臂、中臂、小臂、手腕1、手腕2、手腕3，并且要重新设定基坐标系中的旋转轴，由现实的电机旋转轴确定，这样模型按轴旋转时才可表现地和现实中一样。部分导出的模型如下图所示。将这些关节模型导入Unity3D后，需要重新进行组装成机械臂，在场景中新建一个Gameobject，命名为Robot，位置为(0,0,0)，约定这就是现实中机械臂的原点。然后将腰关节设定为这个Robot的子物体，按现实中的相对位置确定腰的位置，设定X轴为旋转轴，只改变绕X轴的旋转角度，虚拟模型的运动与现实中的运动对齐，说明设置成功。由于大臂位置由腰决定，中臂位置由大臂决定，以此类推，所以需要将大臂设置为腰的子物体，中臂设置为大臂的子物体……设置完毕的机械臂关节关系图和模型如下图所示。

在设定机械臂模型时，各关节的旋转角度都设置为0，可以将真实的机械臂各关节旋转一定角度，然后机械臂也旋转一定角度，检查两者是否对其，验证模型的正确性和有效性。结果如下图所示，说明模型可用，将其保存为预制体(Prefab)，可被主、从操纵臂和观察臂共用。

作业平台中的物体相对位置已经固定，可经测量输入至场景中，将平台中心设置为原点，两边为X、Y轴，空间中上下为Z轴，剩余的机械臂、末端工具摆布方案都可确定，最终创建的虚拟环境与现实环境对比图如下图所示。

3.5.2 观察模式设计

虚拟现实仿真系统中的主摄像头(Main Camera)设定为透视模式(Perspective)，相机将用完全透视的方式来渲染对象，物体会显现出近小远大的效果，完全模拟人眼的观察效果。

虚拟现实仿真系统的最大优势就是可以以任意角度观察虚拟环境，所以相机不能是静止的，而是可以由人操控，变换相机位置、角度、深度等参数，实现全方位观察。整个的观察范围可以抽象为一个以平台几何中心为原点的半径可变的球型区域，3D模型经过渲染呈现于屏幕之上。

操作者可利用鼠标的上下、左右平移，加上鼠标滚轮的滑动实现视角的变换，从而全面观察虚拟环境。将观察范围分为6个区域，在不同的区域鼠标的移动对应不同的相机移动，如下图所示。

在不同区域的鼠标运动所对应的相机运动设置如下表所示，再利用鼠标滚轮的滑动改变相机的深度值，对应着观测环境时的远近表现，方便操作者观察，在系统连接正常的情况下，虚拟环境与真实情景高度对齐，操作者可观察虚拟环境进行一些精细作业。

3.5.3 实时显示

虚拟环境搭建完毕后，系统与平台建立连接，系统获取平台反馈的信息，需要实时地提供给操作者，若是单纯地显示数据，面对操作者，显得过于单调，而用图像、模型的形式显示，操作者会有更加直观的体验，也是本系统的优势之一。

通讯系统按固定频率接收到平台反馈的信息，显示到屏幕上的主要是机械臂的位置信息，将其拆解成每个机械臂的7个关节的位置信息，用脚本的形式设置虚拟模型7个对应关节的位置，实现虚拟现实对齐。

任务过程中，涉及到工具的抓取和转换，由于是既定动作，当控制气阀的IO口信号发出，即认定工具安装或者拆卸完成。工具的模型原本置于全局环境中，当机械臂完成对工具的抓取后，虚拟环境中工具需要变成机械臂末端关节的子物体，这样才可以实现模型的跟随移动。工具的拆卸流程相反，也需从机械臂末端子物体返回成全局物体，脱离机械臂运动关系。

高压线的相对位置由视觉算法决定，系统由视觉算法获取高压线的起点、终点的位置信息，再经由坐标系转换，在虚拟环境中的对应位置初始化高压线的预制体就可将高压线显示出来，高压线模型的精确度由相机的精度、得到的位置点位数量等因素共同决定。

3.6 本章小结

第四章 自主作业系统研究

4.1 概述