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，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。

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。

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。

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，该机器人的绝缘等级为25kV。

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。

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、虚拟现实技术辅助，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、带电作业需求，并对机械臂进行运动学分析。

第三章 在线辅助操作系统。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点作业。

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。

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

2.3 遥操作的移动载体及多机械臂主从控制系统

2.3.1 概述

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。

2.4 局部自主的在线辅助智能遥操作系统

2.4.1 概述

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：

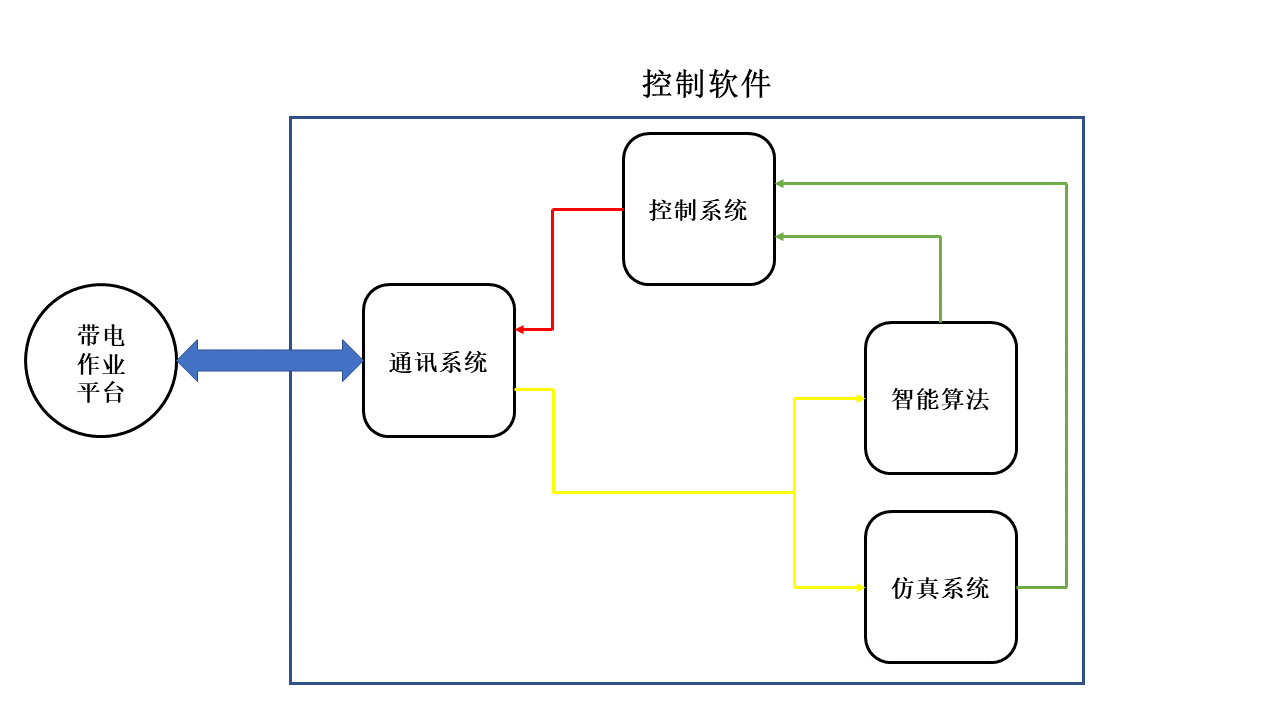
1. 基于Unity3D平台开发的虚拟现实仿真系统，能够给操作者带来强烈、逼真的感官冲击，使操作者获得身临其境的体验，这是只利用摄像头等传感器无可比拟的优势。
2. Unity3D引擎支持多个平台发布，兼容性好，可支持Windows、Android、Linux等多个主流平台，部分开源算法只能运行于Linux系统，Unity3D也可以很好地兼容开发。
3. 开发简单容易上手。Unity3D利用C#脚本编程，官方文档详细，降低了开发难度，缩短开发周期，而且便于维护。

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：

* 通讯系统：建立作业平台与控制器的稳定连接，相互传输数据；
* 控制系统：控制器发送指令给作业平台，实现控制运行；
* 虚拟现实仿真系统：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。
* 智能算法辅助系统：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 通讯系统设计

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 控制系统设计

3.5 虚拟现实仿真系统设计

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 |

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半径可变的球型区域，