

第二批国家级一流本科课程申报书  
(虚拟仿真实验教学课程)

课程名称： 工业机器人本体校准虚拟仿真实验

专业类代码： 080801

负责人： 张松慧

联系电话： 13706511777

申报学校： 中国计量大学

填表日期： 2021. 6. 6

推荐单位： 工训中心

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

## 填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.文中○为单选；□可多选。

3.团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

## 1. 基本情况

实验名称	工业机器人本体校准虚拟仿真实验	是否曾被推荐	<input type="radio"/> 是 <input checked="" type="radio"/> 否
实验所属课程 (可填多个)	《金工实习》		
性质	<input checked="" type="radio"/> 独立实验课 <input type="radio"/> 课程实验		
实验对应专业	自动化		
实验类型	<input type="radio"/> 基础练习型 <input type="radio"/> 综合设计型 <input checked="" type="radio"/> 研究探索型 <input type="radio"/> 其他		
虚拟仿真必要性	<input type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	<input checked="" type="radio"/> 中文 <input type="radio"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="radio"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 0 次： 1. 时间、人数 2. 时间、人数		
有效链接网址	<a href="http://gxzx.cjlu.owvlab.net/vlab/gyjqr.html">http://gxzx.cjlu.owvlab.net/vlab/gyjqr.html</a>		

## 2. 教学服务团队情况

2-1 团队主要成员(含负责人, 总人数限5人以内)								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	张松慧	1976.10	工训中心	副主任	高级实验师	13706511777	zsh@cjlu.edu.cn	项目总体设计 (在线服务)
2	王凌	1980.4	机电学院	自动化系副主任	副教授	18968149030	wangling@cjlu.edu.cn	实验内容设计 (在线服务)
3	朱永乐	1987.6	工训中心	一线教师	实验师	15356719355	273778582@qq.com	实验内容设计 (在线服务)
4	崔小红	1982.12	机电学院	一线教师	讲师	1825888115	cucui@cjlu.edu.cn	实验内容设计 (在线服务)
5	王斌锐	1978.6	机电	部长	教授	13857177664	Wangbinrui@163.com	实验内容设计

2-2 团队其他成员						
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务
1	邵铁锋	1982.3	工训中心	电子部副主任	讲师	在线服务
2	翁煜	1980.12	工训中心	教务员	助理 研究员	教学管理 (在线服务)
3	高雁凤	1980.3	机电学院	实验中心 副主任	实验师	实验网络平台建设(在线服务)
4	闫勇	1977.9	现教中心	无	工程师	技术支持
5	王佳龙	19930624	润尼尔	产品经理	/	技术支持
6	霍昌明	19850112	润尼尔	项目经理	/	技术支持
7	穆红月	19970123	润尼尔	研发经理	/	技术支持
团队总人数：12人 其中高校人员数量：9人 企业人员数量：3人						
2-3 团队主要成员教学情况（限500字以内）						
<p>（近5年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）</p> <p>教学工作：主讲《电学计量与电测仪器》、《现场总线》、《控制理论》、《可编程控制及其应用》等课程的理论和实验教学。</p> <p>教学研究：</p> <p>[1] 工程训练线上线下混合式教学模式改革与探索（教改课题），浙江省高等教育学会，项目编号：KT2020396（2020年度），1/11.</p> <p>[2] 智能制造中车削数字孪生虚拟仿真实验，省级虚拟仿真实验教学项目，排名2/10.</p> <p>[3] “十三五”浙江省重点建设实验教学示范中心，工程训练中心，2019年，主要参与建设者.</p> <p>[4] 校一流课程《工程综合实践》，2020年，排名5/5.</p> <p>学术研究：</p> <p>[1] 基于云平台的能源与安全管理系统（横向），项目编号03112-191304：2/3.</p> <p>[2] 起重机状态综合监管系统及其附件开发（横向），项目编号H181195:3/3.</p> <p>[3] 中国纤维质量监测中心桑蚕丝基本性智能化辨别技术研究项目（OITC-G190281303103-191595:4/4.</p>						

注：必要的技术支持人员可作为团队主要成员；“承担任务”中除填写任务分工内容外，请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

### 3. 实验描述

3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

#### **必要性：**

（1） 机器人本体校准虚拟仿真实验体现了工业自动化领域发展的重点。工业机器人技术是我国《中国制造 2025》列为重点发展领域，也是我国实现“工业 4.0”的关键。国务院于 2015 年印发了《中国制造 2025》的通知，指出要推进制造过程智能化。其中，在智能制造过程中，工业机器人凭借其高效灵活、高精度、高稳定性等特点，迅速成为人们关注和研究的焦点。工业机器人在汽车、电子、塑胶、食品、制药、机械加工等多种工业领域应用广泛，能够承担点焊、弧焊、喷漆、装配、搬运、涂胶、打磨、码垛等各类自动生产任务。工业机器人运动学校准是机器人学研究的重要内容，工业机器人校准是一个集建模、测量、机器人实际参数辨识、误差补偿实现与一体的过程。在机器人产业化的背景下有重要的理论和工程意义。

（2） 工业机器人本体校准虚拟仿真实验解决了机器人校准对设备精度、工作人员技术以及环境的高标准要求。工业机器人本体校准虚拟仿真实验解决了工业机器人本体校准工作是一项精密化的测量工作，其测量设备的精度、操作人员的素质和技术、操作环境的要求都比较高。智能制造技术发展的逐渐深入，工业生产对机器人的绝对定位精度提高了，当前工业机器人的绝对定位精度较低，而且会随着机器人的长期工作和磨损而急剧下降，无法满足精密加工的要求，极大限制了机器人在高精度制造场合的进一步应用。机器人校准是确保其性能指标合理的前提和基础，尤其是工业机器人正在向多自由度高柔性加工单元方向发展，其工作方式也从单纯的手动示教向具备高度自由化的离线编程方式发展。实现工业机器人离线编程的前提是工业机器人具备较高的位姿精度。

#### **实用性：**

（1） 本虚拟仿真实验项目在华东地区的工程训练中心具备一定的示范效应。本实验项目建设单位中国计量大学工程训练中心是浙江省高等教育学会工程训练教学委员会副主任单位、华东地区高校工程训练教学学会理事单位，且是浙江省重点建设实验教学示范中心。建设此虚拟项目受益不仅是本校在工程训练中心开展实践教学的 30 多个本科专业，以及相关研究方向的研究生，更重要的通过实验教学示范中心的辐射作用可以辐射到其他高校中。

（2） 工业机器人本体校准虚拟仿真实验的开发有利于促进国内工业机器人行业中小企业的发展。目前国内外对机器人坐标系标定方法有一定的研究成果，但是大多数还是靠机器人技术人员来进行手动标定。工业机器人本体校准虚拟仿真

实验的开发是基于对机器人标定技术的相关研究，此研究有利于有效提高机器人的绝对定位精度，对缩短与国外技术水平差距、促进社会智能制造业发展具有重要的理论意义和应用价值。

### **教学设计合理性：**

自从1962年第一台工业机器人在美国面世以来，数十年的发展，人们对工业机器人的性能提出了更高的要求。工业机器人本体校准虚拟仿真实验是根据国家标准《工业机器人性能规范及其试验方法》(GB/T12642-2013)相关规定设计实验。工业机器人的性能指标主要包括位姿准确度和位姿重复性、轨迹准确度和轨迹重复性、位姿漂移特性、互换性等14个性能指标。在机器人实际使用过程中，人们关注的重点是机器人的定位精度。机器人的定位精度可以分为重复定位精度和绝对定位精度，也就是本实验的重点**位姿重复性和位姿准确度**两个性能指标的校准和标定。

### **实验系统先进性：**

本虚拟仿真实验综合运用了自动化控制和机器人领域的感知技术等多学科的研究成果。在真实场景的基础上创建了智能实验室，运用三维建模、动画等技术手段，高度仿真了工业机器人本体校准实验，使实验场景和实验对象更加直观，同时大幅度减少实验成本，让学生学习更具有趣味性和高效性。通过模拟获取自动化控制和机器人系统内部状态信息和外部环境信息，可以为控制系统自主分析与智能决策提供依据。将虚拟仿真技术和实验建模方法相结合，构建可视化的虚拟仿真实验教学平台，通过键盘和鼠标使实验者双手在虚拟场景中操作，让学生如同亲临实境，感受互动。此实验可满足自动化和机器人相关专业的教学需求，我校拥有该软件的自主知识产权。

### **3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）**

- 1、巩固学过的理论知识：**以六自由度工业机器人为例，了解工业机器人的安装流程，掌握机器人的主要结构，了解工业机器人的校准测量设备，掌握机器人的校准方法和校准流程等。
- 2、掌握科学的实验方法：**本实验运用三维建模和动画等技术手段，创建了仿真实验室。学生通过人机互动，通过建立运动学模型、测量、参数辨识和误差补偿等方法实现机器人的校准，以提高机器人的性能指标。
- 3、培养严谨的科学态度：**本实验通过“虚实结合、以虚补实”的原则，学生可以得到全面的训练。基于实验结果的多样性，允许学生重复性实验，通过多次试验，在大量数据的基础上分析、思考并得出合理的结论，从而培养学生严谨的科学态度。
- 4、增强计量标准意识：**通过模拟机器人校准的各个环节，掌握包括测量设备的

选择，测试条件、操作和环境的要求，性能指标的测试方法，重复性、准确度、偏差概念等，引导学生增强计量标准意识。

### 3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：36 学时

(2) 该实验所占课时：2 学时

### 3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

MD-H 模型建模：

建模是完成机器人运动学标定首先要解决的问题，选择一个合适的模型对于提高机器人绝对定位精度起到至关重要作用。机器人运动学模型就是用数学方法建立机器人末端位姿和各连杆参数关系的模型。按照 D-H 模型建立各连杆坐标系如图 1 所示。首先，确定 z 轴，将坐标系 {i} 固定在连杆 i 的近端，此时关节 i 的轴线即为该坐标系的 z 轴；其次，确定 x 轴和远点， $z_{i-1}$  轴与  $z_i$  轴的公垂线即为  $x_{i-1}$  轴，方向为连杆 i-1 指向连杆 i，此时，z 轴和 x 轴的交点为原点，最后，利用右手定则 y 轴。

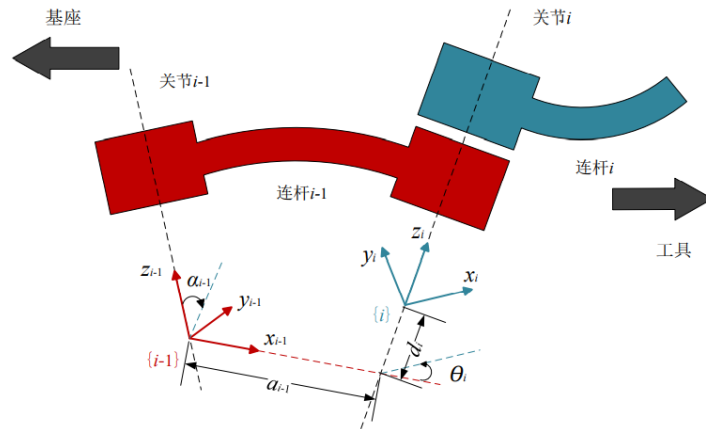


图 1 D-H 模型连杆参数定义

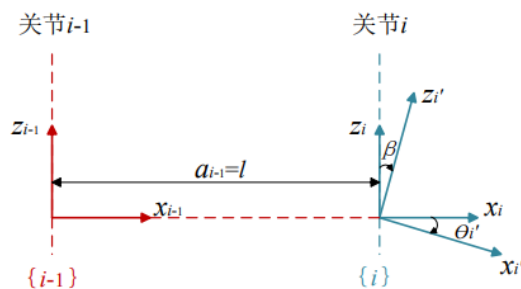


图 2 存在微小夹角的相邻连杆坐标系

在存在微小偏差角  $\beta$  时， $z_i$  轴移动至  $z_i'$  轴位置，同  $z_{i-1}$  轴轴线相交，此时连杆参数发生了明显变化，由  $a_{i-1}=0$ 、 $\alpha_{i-1}=1$ 、 $\theta_i=0$  突变为  $a_{i-1}=\beta$ 、 $\alpha_{i-1}=0$ 、

$\theta_i = \theta_i'$ 。在 D-H 模型的基础上增加一个绕 y 轴旋转的转角  $\beta$ ，从而达到对机器人平行公法线位置进行修正，此为 MD-H 模型。

正逆运动学：

根据 MD-H 模型建立方法，对机器人进行运动学分析。首先在机器人各关节处建立坐标系，再根据各个坐标轴之间的齐次变换得出相邻连杆之间的关系，最后分析机器人的正逆运动学。其中在正运动学中通过给定的关节角求得末端位姿；在逆运动学中通过已知的末端位姿来求解关节角。公式 3-1 为机器人相邻连杆间齐次变换矩阵。

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(x_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x_{i-1}, a_{i-1}) \text{Rot}(z_i, \theta_i) \text{Trans}(z_i, d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

根据正运动学方程，对于任意自由度机器人，将式 (3-1) 得到的 6 个变换矩阵进行推算，只要给定任意一组关节角，就可以确定一个唯一的位姿矩阵与之对应。

逆运动学求解是机器人研究的重点问题之一。所谓机器人运动学逆解，即根据已知的各关节的连杆长度  $a_i$ ，连杆扭角  $\alpha_i$ ，关节偏移  $d_i$ ，以及要求的工业机器人末端或者 TCP 工具中心点的位置和姿态，计算各关节转角  $\theta_i$ 。机器人逆解有时候非唯一，需要根据关节转角的运动范围或者适合位姿进行舍取。具体推算公式不在此详解。

误差模型：

理想情况下，机器人末端的实际位姿和控制器中的名义位姿相一致，但由于制造、装配等过程中存在一定的偏差，使得机器人各连杆几何参数  $\alpha_{i-1}$ 、 $\theta_{i-1}$ 、 $d_{i-1}$ 、 $\beta_{i-1}$  存在的相应误差  $\Delta \alpha_{i-1}$ 、 $\Delta \theta_{i-1}$ 、 $\Delta d_{i-1}$ 、 $\Delta \beta_{i-1}$ 。

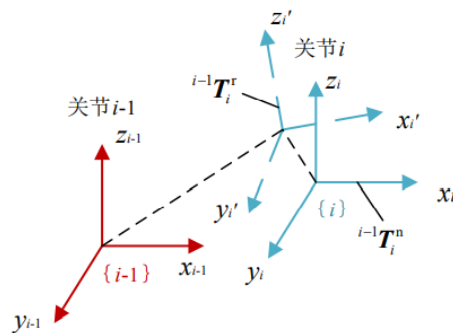


图 3 相邻连杆坐标系位姿偏差

根据机器人学中微分变换的方法，通过正运动学将各关节坐标系间的微小变化转换到末端坐标系，建立机器人的几何误差模型，找到机器人各连杆几何参数误差和末端位姿偏差间的相关转换关系。根据式 (3-1)，建立误差模型时，在机器人第 2 轴处需增加绕  $y_2$  周旋转  $\beta_2$ 。可表示为公式 (3-2)



$$\begin{cases} {}^{i-1}\mathbf{T}_i = \text{Rot}(x_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x_{i-1}, a_{i-1}) \text{Rot}(z_i, \theta_i) \text{Trans}(z_i, d_i), & i=1,3,4,5,6 \\ {}^{i-1}\mathbf{T}_i = \text{Rot}(x_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x_{i-1}, a_{i-1}) \text{Rot}(z_i, \theta_i) \text{Trans}(z_i, d_i) \text{Rot}(y_i, \beta_i), & i=2 \end{cases} \quad (3-2)$$

立

通过建  
机器人关节

$i$  的微分误差模型，而机器人末端位姿误差是由机器人各关节误差叠加而成，又因为在实际测量中得到的是机器人末端位姿，所以需要将机器人各关节误差变换到机器人末端。最终在各连杆待辨识参数误差列矢量集合中包含了 25 个待辨识误差参数。

参数辨识与补偿：

机器人运动学参数标定的最终目的是提高机器人的绝对定位精度。建立好运动学和误差模型后，完成末端位姿的精确测量，还要根据误差模型和测量结果辨识出机器人运动学误差参数。本实验采用 L-M 算法进行机器人运动学误差参数的辨识。L-M 算法是梯度下降法和 Gauss-Newton 法的结合，相对于最小二乘法，L-M 算法具有快速收敛性和全局特性。

知识点：共 9 个

- 1 六自由度工业机器人本体结构及各个关节运动特点；
- 2 MD-H 建模法及相应的运动学参数及数量的分析；
- 3 测量坐标系与机器人基坐标系的转换，机器人法兰盘坐标系与工具坐标系的转换；
- 4 正逆运动学的建模，根据机器人正运动学方程，对于任意六自由度机器人，确定机器人末端位姿矩阵（正运动学），反之，根据末端位姿，获得各关节角度（逆运动学）；
5. 基于误差模型的最小二乘法参数辨识；
- 6 机器人的定位精度分类：重复定位精度和绝对定位精度，即 GB/T 12642-2013 标准中提出的位姿重复性和位姿准确度两个性能指标；
- 7 基于选取的位姿准确度（AP）作为评价指标，确定绝对定位精度；
- 8 机器人运动学标定及机器人标定技术步骤；
- 9 基于惯性测量原理的机器人自适应姿态测量算法

(2) 核心要素仿真设计

### 1、实验场景模拟

实验场景加入了中国计量大学工程训练中心的元素，实验场景高度仿真机器人校准实验室的精测高端的特点。实验室配置六自由度被检工业机器人，以及高精度的测量设备激光跟踪仪，测量电脑以及有关工业机器人校准的墙体设计。



图 4 高仿真度实验场景

## 2、高度仿真实验对象-工业机器人

以 ABB ER3A—C60 机器人为模型，高度仿真了其基本结构，机器人关节角变化，关节位置变化，运动轨迹等。



图 4 高仿真度实验对象

## 3、实验交互的实现

实验交互主要包括以动画、视频结合语音介绍等模拟数学建模的过程等，误差的预设，末端位姿坐标值的模拟测量，误差模型的软件嵌入，以及在模型中可输入数据等，并在适当的节点加入知识点的问答，以判断对实验过程的掌握程度。

## 4、实验数据结果的呈现

实验数据包括过程中数据的测量结果、实验过程中需要输入的数据，以及实

验报告中需要记录的数据。实验报告包括实验过程的数据和实验结果的记录，以及对结果的讨论和本实验的改进意见和建议等。软件中自定义界面，灵活度高，并配以第三方软件的仿真图，测量结果仿真度高。

### 3-5 实验教学过程与实验方法

#### (1) 实验教学过程

本实验为 2 学时，纳入《金工实习》的教学大纲中，属于机器人教学环节的教学内容之一。实验教学过程是以问题引导和驱动下的探究式教学模式为基础设计的。

在实习动员课上，我们将教学任务布置下去，并将虚拟实验涉及到的知识点，以及知识点的学习资料库信息发布给学生。学生在实验前通过了解实验任务，以及实验指导书、线上平台资料、慕课资源等进行自主学习，同时在线下实习过程有着重点。教师在实践授课过程中，会有针对性的知识点讲授，并给予适当的引导和推进。学生在开始实验前会有一定的知识储备，更有利于实验的有效实施，更能突出“虚实结合，以虚补实”的原则。教学过程如下：

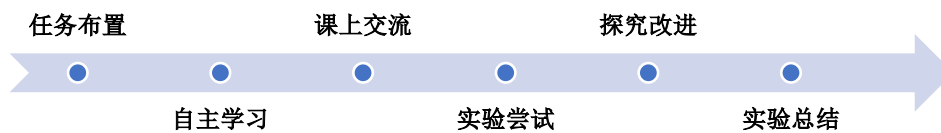


图 5 教学过程示意图

实验教学过程中教师提供学生足够的自主学习的资源，强调了“以学生为中心”的教学理念，强化学生的自主学习能力。

#### (2) 实验方法

本项目综合了搭建机器人校准场景、机器人组装、构建数学模型，通过坐标系变换，参数辨识算法和误差补偿方法实现对机器人位姿精度的测量。通过沉浸认知，交互学习，自主探索与设计等学习方法，全面培养学生将理论知识与实验相统一，自主探索理论指导实践的方法；通过机器人运动学正解的唯一性和运动学逆解的多样性，培养学生善于分析和思考的求学态度；实验以国家标准《工业机器人性能规范及其试验方法》(GB/T12642-2013) 为主要依据，实现了工业机器人的主要性能指标的校准，增强了学生计量、标准、检定的意识。

**3-6 步骤要求**（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共步

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	预习实验	5	正确掌握基础知识，客观题的正确率*5	5	√操作成绩 √实验报告 ♡预习成绩 √教师评价报告
2	了解机器人本体结构	10	组装正确率*5	5	√操作成绩 √实验报告 ♡预习成绩 √教师评价报告
3	掌握 MD-H 模型建立的方法	10	构建的 MD-H 模型正确与否，正确则得分。	10	
4	了解从运动学正解概念，掌握机器人末端位姿变化	10	输入关节角度，通过运动学正解方法，得到正确的末端位姿。正确则得分。	10	
5	了解运动学逆解概念，掌握机器人末端位姿变化与关节角度的关系	10	根据给定机器人末端位姿坐标值，利用运动学逆解方法，得出正确的 6 个关节角度。正确率*10	10	
6	掌握校准测量设备的选用原则	5	能够正确辨析不同的测量设备在机器人校准中作用。准确率*5	5	

7	掌握激光跟踪仪校准机器人的方法	5	正确选择激光跟踪仪作为测量设备。正确则得分。	5	
8	测量机器人末端位姿坐标	10	完成 50 组测量数据，则得分。	10	
9	掌握误差模型的概念以及模型建立的方法	10	误差的重要来源分析，正确率*10	10	
10	掌握误差辨识的概念以及误差辨识方法	10	辨识误差参数，记录误差参数（25 个），记录完整率*10	10	
11	掌握误差补偿的方法	10	比较误差补偿前后的机器人末端定位精度，并判断误差补偿的有效性。	10	
12	实验报告	20	记录实验数据，误差分析是否合理，对实验的评价和建议等是否完整。对实验结果的分析、讨论是否充分。根据实验报告的完备性酌情给分。	10	√操作成绩 ♡实验报告 √预习成绩 √教师评价报告
备注：实验结束后分别记录预习分、操作分和实验报告分，实验成绩按照五级制。					

## (2) 交互性步骤详细说明

1、实验预习：介绍本实验的主要理论知识点，在开始实验前学生需要了解实

验目标，校准的概念，机器人校准的流程以及本实验校准的主要参数和知识点；

2、通过拆装机器人本体，了解工业机器人主要部件，包括基座、腰部、大臂、小臂、手部、碗部，以及六个关节。实验提供多款机器人的选择。

3. 通过动画、视频等手段展示 MD-H 模型概念以及模型建立的方法。

4. 动画展示运动学：了解建模公式推导过程，并观察通过调节关节角度，了解末端的位姿变化。输入不同的关节角度，得到不同的机器人末端位姿。

5. 动画展示运动学逆解：由末端位姿变换展示各关节角度。给定一组末端位姿坐标数据，利用反变换法求解得到六个关节角。

6. 学习机器人校准的高精密测量系统，掌握测量系统的主要测量设备以及原理。掌握不同的测量仪器及配套装置，并通过客观题来确定掌握的程度：

7、选择适合于本实验的测量设备，并说明选择依据。激光跟踪仪和靶球构成的测量系统的测量方法、设备的精度要求等。本实验选择以激光跟踪仪为测量设备，所有数据以激光跟踪仪的测量数据为准。

8. 调节关节角度，变换末端位姿，测出末端位姿坐标，并记录数据（50 组）；仿真出对应的数据（6 个转角+3 位置坐标，可以列出 3 个方程）

9. 分析误差来源，误差模型知识点展示。通过开源的 Python 软件，导入正确的程序模板。

10. 输入测量数据值，根据误差模型辨识出误差参数（25 个误差参数），25 个名义值事先系统设定；

11. 通过误差补偿，按照国标（GB/T12642-2013）要求，比较补偿前后的机械臂末端位姿的定位精度。

12. 完成实验报告。

**3-7 实验结果与结论**（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

1、误差补偿前后，定位精度的提高；

2、辨识后的 25 个误差参数与系统设定值（本体名义值）的一致性。

**3-8 面向学生要求**

（1）专业与年级要求

面向自动化专业，辐射电气工程及其自动化专业，机械设计制造及其自动化以及机械电子工程等 30 多个理工类专业大二下以上的学生

（2）基本知识和能力要求

先修或自学《高等数学》《自动控制原理》、《机器人原理》、《测试技术》。

### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2021 年 6 月 30 日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校人 0 人，外校人 0 人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：《金工实习》之工业机器人工种；《机器人技术》、《机器人运动控制》（研究生课程）

纳入教学计划的专业数：33，具体专业：，自动化、计算机、电气、机械电子、机械、测控、光电、质量等

教学周期：，学习人数：

(4) 是否面向社会提供服务：是否

(5) 社会开放时间：2021 年 9 月 1 日

(6) 已服务过的社会学习者人数：0 人

## 4. 实验教学特色

(1) 实验方案设计思路：

(A) 按照以学生为中心、以产出为导向的新工科工程教育理念，虚拟结合，以虚补实的方式，实现线上线下共享服务，培养学生解决复杂工程问题的能力；

(B) 通过 3D 仿真技术，再现了机器人本体的真实场景，虚拟仿真避免了真实的机器人校准的精密性对技术人员的技术、环境的高标准要求，实现了对机器人校准更直观的认识；学习者通过该项目，不仅全面地了解和掌握机器人的校准方法，而且还能熟练掌握机器人结构。通过设备认知、原理学习、数据交互、实施控制四个实验环节进行实验展示。

(2) 教学方法创新：

(A) 虚实结合、理论与实践并行：将理论教学与实验教学相结合、科学原理与工程应用相结合，技术和应用有机结合。在教学实训时，学生能够掌握自动专

业相关课程的基础理论知识及其应用原理，达到教学与工程实训并行、实物实验与仿真实验相结合的虚实结合、通过仿真模块中的理论介绍、问答式培训、线上线下信息技术共享培训的方式，实现了解理论，并应用于实践的目的。(B) 个性化与多元化：实验教学应以人为本，兼顾普适性与个性，允许学生有选择性地实验参数、实验技术，并能够随时进行实验的理论指导、答疑、在线寻求解决方案等，学生利用多元化的教学形式，运用所学知识思索实验过程中出现的问题，探求现象背后原理，寻求问题解决的多元化方法。

### (3) 评价体系创新：

机器人本体校准虚拟仿真实验能够对参加实验学生的全过程进行记录，对于学生理论掌握、实验步骤以及实验成绩评价都具备完善的评价标准，提高评价的公正性。平台建立完善的反馈机制，对参加实验学生各方面的建议、评价与反馈信息，进行全面系统的统计分析，为指导教师改进和完善实验提供参考，提高教学效果。同时，以 OBE 理念为基础，根据实验目标对应的毕业要求指标点来指导实验教学的开展，以学生为中心，在四大实验模块（建模、测量、误差补偿、参数辨识）均建立实验目标、评价标准，其中每个模块均包含过程完成度考核（占比 40%）、实验结果考核（占比 50%）、综合报告考核（占比 10%），并将在综合报告中侧重于评价结果用于项目实验过程的改进，以鼓励持续改进的机制，培养学生的创新探索能力。



## 5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：■ 教学指导书√教学视频√电子教材√课程教案

(申报系统上传)√课件(演示文稿)√其他

(2) 实验指导资源：■ 教学指导书√教学视频√知识点课件库√习题库

(申报系统上传)√测试卷√考试系统√其他

(3) 在线教学支持方式：■ 热线电话√实验系统即时通讯工具√论坛

√支持与服务群√其他

(4) 9名提供在线教学服务的团队成员；4名提供在线技术支持的技术人员；教学团队保证工作日期间提供8小时/日的在线服务

## 6. 实验教学相关网络及安全要求描述

### 6-1 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求(需提供测试带宽服务)

1) 基于公有云服务器部署的系统, 5M-10M 带宽

2) 基于局域网服务器部署的系统, 10M-50M 带宽

(2) 说明能够支持的同时在线人数(需提供在线排队提示服务)

支持100个学生同时在线并发访问和请求, 如果单个实验被占用, 则提示后面进行在线等待, 等待前面一个预约实验结束后, 进入下一个预约队列。如图6所示。

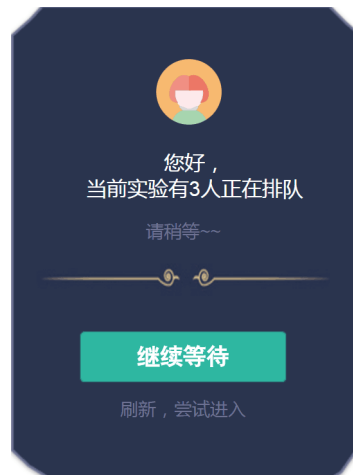


图 6 在线预约

### 6-2 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

- (1) 计算机操作系统和版本要求  
Windows7 及以上 64 位操作系统
- (2) 其他计算终端操作系统和版本要求  
无。
- (3) 支持移动端：是 否

### 6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

- (1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）  
谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他
- (2) 需要特定插件 是 否  
如勾选“是”，请填写：  
插件名称：（插件全称）  
插件容量：M  
下载链接：
- (3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

#### 6-4 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

##### (1) 计算机硬件配置要求

表 3-5-1 计算机硬件配置要求表

软件配置需求（最低）	软件配置需求（推荐）
操作系统：Windows7 64 位及以上 浏览器：Firefox 64 位	操作系统：Win7 64 位及以上 浏览器：Firefox 64 位
配件配置需求（最低）	配件配置需求（推荐）
处理器：Intel i5 2.2GHz 及以上 内存：4GB 及以上 硬盘空间：80G 显卡：分辨率 1920x1080 像素及以上 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：2M 以上	处理器：Intel i7 2.5GHz 内存：8GB 及以上 硬盘空间：160G 显卡：分辨率 1920x1080 像素及以上 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：4M

##### (2) 其他计算终端硬件配置要求

无。

#### 6-5 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

##### (1) 计算机特殊外置硬件要求

无

##### (2) 其他计算终端特殊外置硬件要求： 无 有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

#### 6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

##### (1) 证书编号：

No: 33000043033-00007

##### (2) 请附信息系统安全等级保护备案证明

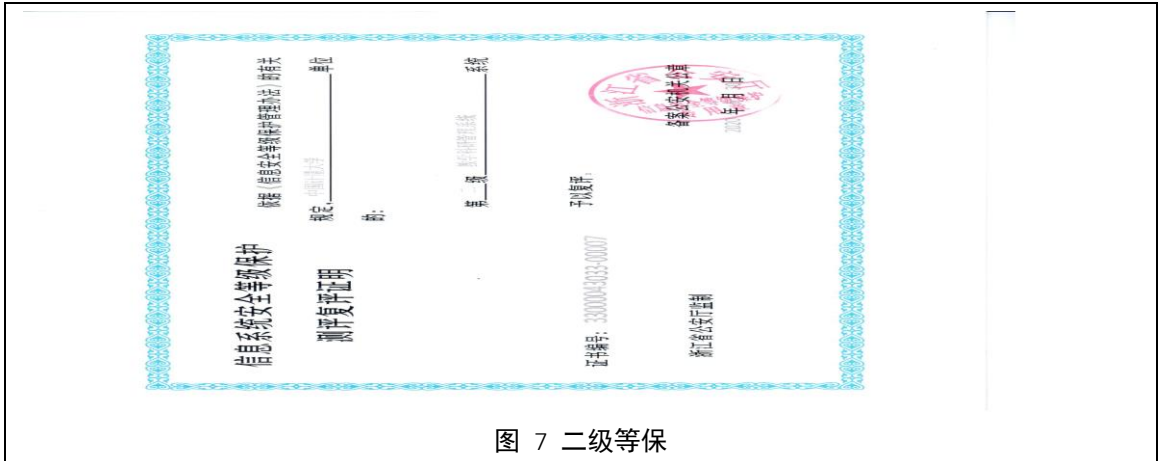


图 7 二级等保

## 7. 实验教学技术架构及主要研发技术

指标	内容
<p style="text-align: center;">系统架构图及简要说明</p>	<p>城市典型智能供配电站虚拟仿真实验平台的开放运行依托于开放式虚拟仿真实验教学管理平台的支撑，二者通过数据接口无缝对接，保证用户能够随时随地的通过浏览器访问该项目，并通过平台提供的面向用户的智能指导、自动批改服务功能，尽可能帮助用户实现自主的实验，加强实验项目的开放服务能力，提升开放服务效果。</p> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体，是具有良好的自主性、交互性和可扩展性的虚拟实验教学平台。系统总体架构图如图 7-1 所示。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">图 8 系统总体架构</p> <p style="text-align: center;">支撑项目运行的平台及项目运行的架构共分</p>

	<p>为五层，每一层都为其上层提供服务，直到完成具体虚拟实验教学环境的构建。下面将按照从下至上的顺序分别阐述各层的具体功能。</p> <p><b>(1) 数据层</b></p> <p>雷电危害模拟及电力系统防雷设计虚拟仿真实验平台涉及到多种类型虚拟实验组件及数据，这里分别设置虚拟实验的基础元件库、实验课程库、典型实验库、标准答案库、规则库、实验数据、用户信息等来实现对相应数据的存放和管理。</p> <p><b>(2) 支撑层</b></p> <p>支撑层是虚拟仿真实验教学与开放共享平台的核心框架，是实验项目正常开放运行的基础，负责整个基础系统的运行、维护和管理。支撑平台包括以下几个功能子系统：安全管理、服务容器、数据管理、资源管理与监控、域管理、域间信息服务等。</p> <p><b>(3) 通用服务层</b></p> <p>通用服务层即开放式虚拟仿真实验教学管理平台，提供虚拟实验教学环境的一些通用支持组件，以使用户能够快速在虚拟实验环境完成虚拟仿真实验。通用服务包括：实验教务管理、实验教学管理、理论知识学习、实验资源管理、互动交流、实验报告管理、教学效果评、项目开放与共等，同时提供相应集成接口工具，以便该平台能够方便集成第三方的虚拟实验软件进入统一管理。</p> <p><b>(4) 仿真层</b></p> <p>仿真层主要针对该项目进行相应的器材建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、提供通用的仿真器，最后为上层提供实验结果数据的格式化输出。</p> <p><b>(5) 应用层</b></p> <p>基于底层的服服务，最终雷电危害模拟系统及防雷设计虚拟仿真实验项目教学与开放共享。该框架的应用层具有良好的扩展性，实验教师可根据教学需要，利用服务层提供的各种工具和仿真层提供的相应的器材模型，设计各种典型实验实例，最后面向学校开展实验教学应用。</p>	
实验 教学	开发技术	√VR √AR √MR √3D 仿真 √二维动画√HTML5 √其他

<p>开发工具</p>	<p> <input type="checkbox"/>Unity3D <input type="checkbox"/>3D Studio Max <input type="checkbox"/>Maya  <input checked="" type="checkbox"/>ZBrush <input checked="" type="checkbox"/>SketchUp <input checked="" type="checkbox"/>Adobe Flash  <input checked="" type="checkbox"/>Unreal Development Kit <input checked="" type="checkbox"/>Animate CC  <input checked="" type="checkbox"/>Blender <input checked="" type="checkbox"/>Visual Studio  <input checked="" type="checkbox"/>其他         </p>
<p>运行环境</p>	<p> <b>服务器</b>            CPU 4 核、内存 8 GB、磁盘 300*2 GB、            显存 2 GB、GPU NVIDIA 型号  <b>操作系统</b>  <input type="checkbox"/>Windows Server <input checked="" type="checkbox"/>Linux <input checked="" type="checkbox"/>其他            具体版本：  <b>数据库</b>  <input type="checkbox"/>Mysql <input checked="" type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle  <input checked="" type="checkbox"/>其他  <b>备注说明</b>（需要其他硬件设备或服务器数量            多于 1 台时请说明）  <b>是否支持云渲染：</b> <input checked="" type="checkbox"/>是 <input type="checkbox"/>否         </p>
<p>实验品质（如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等）</p>	<p> <b>单场景模型总数：800000 面</b>  <b>贴图分辨率：1024*1024</b>  <b>显示帧率：高于每秒 30 帧</b>  <b>刷新率：高于 30Hz</b>  <b>正常分辨率 960*540</b> </p>

## 8. 实验教学课程持续建设服务计划

（本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数）

### （1）课程持续建设

日期	描述
第一年	加强虚拟仿真实验教学项目对外联通和服务情况的管理，避免出现不能联通或免费开放服务内容未达标的情况。根据学生和教师反馈，持续改进相关教学评价机制。服务人数达 1000 人次以上。
第二年	持续改进项目内容，不断优化评价机制，全面开放服务内容，服务人数达 1500 人次以上。；

第三年	加强实验项目管理，全面开放服务内容，服务人数达 2000 人次以上。
第四年	加强实验项目管理，全面开放服务内容，服务人数达 2000 人次以上。
第五年	加强实验项目管理，全面开放服务内容，服务人数达 2000 人次以上。

其他描述：

- 1、持续改进项目内容和评价机制，持续加强管理，持续开放服务。
- 2、坚持从学生的需求出发，注重对学生学习探究能力、科学态度、计量标准意识以及实践能力的综合培养，注重知识传授、能力培养和素质提高协同实施。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	2	200	1	100
第二年	2	200	2	200
第三年	3	500	2	300
第四年	3	500	2	300
第五年	3	500	2	300

其他描述：

- 1、面向高校的教学推广应用计划：探索建立高校间实验教学项目成绩互认、学分转换机制。
- 2、面向社会的推广应用计划：联合相关企业，作为企业培训基地。
- 3、持续完善后，可商业化。

## 9. 知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	

是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
<p>每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作人填写栏进行填报。</p>	
著作权人	著作权人类型
中国计量大学	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	全部属于
软件著作登记号	
<p>如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。</p>	
受理流水号	2021R111L1996495

## 10. 诚信承诺

<p>本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。</p> <p>实验教学课程负责人（签字）：</p> <p style="text-align: right;">年    月    日</p>
---

## 11. 附件材料清单



### **1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）**

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

### **2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）**

〔由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于3名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。〕

### **3. 校外评价意见（可选提供）**

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）