

附件 2

2019 年度国家虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	河南理工大学
实 验 教 学 项 目 名 称	电化学加工虚拟仿真实验
所 属 课 程 名 称	精密与特种加工技术
所 属 专 业 代 码	080202
实 验 教 学 项 目 负 责 人 姓 名	明平美
有 效 链 接 网 址	http://39.98.62.95:8080/experiment/h ome

教育部高等教育司制

二〇一九年七月

填写说明和要求

1. 以 Word 文档格式，如实填写各项。
2. 表格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。
3. 所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》填写 6 位代码。
4. 不宜大范围公开或部分群体不宜观看的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学项目教学服务团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况					
姓 名	明平美	性别	男	出生年月	197409
学 历	博士研究生	学位	博士	电 话	0391-3987530
专业技术职务	教授	行政职务	副院长	手 机	13633913368
院 系	机械与动力工程学院			电子邮箱	mingpingmei@163.com
地 址	河南省焦作世纪大道 2001 号			邮 编	454000
<p>教学研究情况：主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过 5 项）；作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过 10 项）；获得的教学表彰/奖励（不超过 5 项）。</p> <p>1. 主持的教学研究课题</p> <p>(1) 河南理工大学教育教学改革研究项目：面向“重基础、宽口径、广视野”的机械制造及其自动化专业改革思路，主持，2006 年；</p> <p>(2) 河南理工大学实验室开放基金（开放实验项目开发）：电化学加工可视化实验研究，主持，2007 年；</p> <p>(3) 河南理工大学实验室开放基金（开放实验项目开发）：UV-LIGA 技术实验开发，主持，2009 年；</p> <p>(4) “机械设计制造及其自动化”专业河南省普通高等学校本科工程教育人才培养模式改革试点专业建设，参与（4/11），2012；</p> <p>(5) 河南理工大学教育教学改革研究项目：基于国际接轨的机械类中外合作办学专业课程体系与教学模式的探索与实践，参与（3/10），2014。</p> <p>2. 教学研究与著作</p> <p>(1) 明平美等，精密与特种加工技术[M]，北京：电子工业出版社，2011；</p> <p>(2) 明平美等，精密与特种加工技术(第 2 版)[M]，北京：电子工业出版社，2019；</p> <p>(3) 明平美，张晓东等. 一种用于极间多孔介质填充型掩膜电解加工的引液装置，发明专利, ZL201510205346X；</p> <p>(4) 明平美，王俊涛等. 一种用于在薄壁圆筒上电解加工双面喇叭孔阵列的装置，发明专利, ZL2013100149990；</p> <p>(5) 明平美，周维海等. 一种喷雾片的制作方法，发明专利，ZL2016108601833；</p> <p>(6) 明平美，郝巧玲等. 一种表面超疏水的金属基复合镀层的制备方法，发明专利，</p>					

ZL2013104957845;

(7) 明平美, 李欣潮等. 一种活动掩膜电解加工装置与方法, 发明专利, ZL2016108601797;

(8) 明平美, 包晓慧等. 一种在金属表面上加工微坑阵列的方法, 发明专利, ZL201310495739X;

(9) 明平美, 包晓慧等. 一种超疏油表面的制备方法, 发明专利, ZL2015108634508;

(10) 明平美, 李慧娟等. 一种用于电镀平面薄片件的挂具, 发明专利, ZL2015101250225。

3. 教学表彰/奖励

(1) 2007~2019年, 教学质量评价“优秀”6次;

(2) 河南理工大学第六期和第八期“大学生科学研究训练计划”项目优秀指导老师;

(3) 2006~2010年, 5次被评为校级“优秀班主任”, 2010年被评为首批校“十佳班主任”;

(4) 2010~2018年, 7次被评为“河南省优秀硕士论文指导教师”;

(5) 2009~2017年, 先后被评为“河南省高等学校青年骨干教师”、“河南省教育厅学术技术带头人”、“河南省高校科技创新人才”、“河南省学术技术带头人”、“河南省高校科技创新团队带头人”、“河南省科技创新人才(河南省杰青)”、“河南省劳模创新人才”。

学术研究情况: 近五年来承担的学术研究课题(含课题名称、来源、年限、本人所起作用, 不超过5项); 在国内外公开发行人刊物上发表的学术论文(含题目、刊物名称、署名次序与时间, 不超过5项); 获得的学术研究表彰/奖励(含奖项名称、授予单位、署名次序、时间, 不超过5项)

1. 承担的科研项目

(1) 国家自然科学基金项目: 线阳极近接触扫描式掩膜电沉积加工技术[No.51875187], 2019.1~2022.12, 60万, **主持**, 国家自然科学基金委, 在研;

(2) 国家自然科学基金项目: 聚焦射流三维电化学沉积加工技术[No.51475149], 2015.1~2018.12, 90万, **主持**, 国家自然科学基金委, 结题;

(3) 国家自然科学基金项目: 真空微细电铸制造技术电极过程液相传质机理研究[No.51175152], 2012.1~2015.12, 62万, **主持**, 国家自然科学基金委, 结题;

(4) 国家自然科学基金项目: 基于磁场力驱动对流效应的微细电铸技术[No.50805077], 2009.1~2011.12, 21万, **主持**, 国家自然科学基金委, 结题;

(5) 河南科技创新人才支持计划项目: 极间柔性多孔物填充型掩膜电解加工技术[No.154100510008], 2015.1~2017.12, **主持**, 河南省科学技术厅, 结题;

2. 学术论文

[1]明平美, 周维海, 赵晨昊, 周红梅, 秦歌. 极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术, 中国科学: 技术科学, 46(10), pp1005-1015,2016. (封面文章, 中文权威学术期刊,一级学报)

[2]明平美, 吕文星, 李英杰, 商静瑜, 王俊涛. 电解液真空表面沸腾高速电沉积技术. 中国科学: 技术科学, 43(9), pp1034-1043, 2013. (中文权威学术期刊, 一级学报)

[3]Ming, Pingmei; Bao, Xiaohui; Hao, Qiaoling. Fabrication of through-hole with biconically shaped cross sections by using electroforming and inert metal mask electrochemical machining[J], INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2015, 76(1-4): 501-512 . (SCI, JCR-3)

[4]Ming Pingmei; Li Yingjie; Li Xinhua. Corrosin Resistance of Nickel Coating Electrodeposited under Negative Pressure and Temperature Gradient Conditions[J], RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2012, 41(2): 393-397. (SCI, JCR-4)

[5]Pingmei Ming, Wenxin Lv, Yingjie Li, et al. Electrodepositing nickel under electrolyte reduced-pressure boiling condition. Electrochimica Acta, 120, pp 6-15, 2014. (SCI, JCR-1)

3. 学术研究表彰/奖励

(1) “特殊形状功能微结构电化学加工技术”, 获 2019 年度河南省教育厅科技进步一等奖;

(2) 2006 年获国防科学技术一等奖, 名称为: 高性能精密电铸制造技术, 国防科学工作委员会, 排名: 10/18, 证书编号: 2006GFJ1053-10。

(3) 2015 年获“河南省学术技术带头人”称号, 河南省人民政府, 证书编号: 9412014138

1-2 实验教学项目教学服务团队情况

1-2-1 团队主要成员 (含负责人, 5 人以内)

序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	明平美	河南理工大学	教授	副院长	总体方案设计	
2	秦歌	河南理工大学	副教授	无	电解方案设计	
3	李瑜	河南理工大学	副教授	无	电铸方案设计	
4	马俊金	河南理工大学	讲师	无	在线教学设计	
5	童景琳	河南理工大学	副教授	无	实验平台管理	

1-2-2 团队其他成员						
序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	崔晓斌	河南理工大学	副教授	无	教学资源开发	
2	郑兴帅	河南理工大学	讲 师	无	网络资源维护	
3	闫 亮	河南理工大学	讲 师	无	教学资源开发	
4	丁 明	河南阿尔法科 技有限公司	项目经理		VR 软件/技 术支持	
5	闫 冲	河南阿尔法科 技有限公司	技术支持工程师		技术支持	
项目团队总人数： <u>10</u> （人）高校人员数量： <u>8</u> （人）企业人员数量： <u>2</u> （人）						

注：1.教学服务团队成员所在单位需如实填写，可与负责人不在同一单位。

2.教学服务团队须有在线教学服务人员和技术支持人员，请在备注中说明。

2. 实验教学项目描述

2-1 名称
电化学加工虚拟仿真实验
<p>2-2 实验目的</p> <p>《精密与特种加工技术》是河南理工大学机械设计制造及其自动化国家级特色专业的特色课程，为本科四年选修课（限选）。电化学加工实验是该课程4大实验项目之一，共4学时。</p> <p>特种加工是借助电、热、电化学等能量来实现材料的去除或堆叠进而达成零件成形或成材的非常规加工技术。它在先进制造领域作用独特且不可替代。电化学加工是应用广泛的特种加工技术之一。电铸加工和电解加工是电化学加工的两种主要应用形式。电化学加工是特种加工技术、先进制造技术、现代制造技术、微纳制造技术等课程的核心主讲内容。</p> <p>电化学加工是一种利用电场驱动下的氧化还原反应来实现材料转移（去除或叠加）成形的特种加工技术，是先进制造技术和微纳制造技术的重要组成部分。电化学加工是利用电化学反应（或称电化学腐蚀）对金属材料进行加工的方法。与机械加工相比，电化学加工不受材料硬度、韧性的限制，已广泛用于工业生产中。电铸加工和电解加工是电化学加工的两种主要应用形式。电化学加工是特种加工技术、先进制造技术、现代制造技术、微纳制造技术等课程的核心主讲内容。本项目旨在利用虚拟仿真技术，构建电化学加工实验室模型，模拟仿真真实电化学加工环境和成材成形过程，以让学生深刻理解电化学加工原理，学会根据需要选择合适的加工方式，掌握具体操作过程和工艺参数，弄清电化学加工由“无形反应”到“有形实物”的工艺过程实质。</p> <p>在特种加工的实践教学，由于教学对象的特殊性，存在以下问题：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 教学情景难感知，加工过程可大都在特殊形式的高强能场中进行，复杂多变，极

速无形，客观上无法真实感知加工过程，极难深入理解加工机理；

2. 现场教学组织难，涉及强电、高温、高压、危险药品、有害气体等方面，不宜现场实验教学和直接操作；
3. 教学内容多元松散，涉及十多种加工方法，如一一现场实验教学，时间和经济上都难以承受。

为此，《精密与特种加工技术》课程团队自 2007 年起，便在河南理工大学相关经费的资助下开展电化学加工实验可视化方面的研究（河南理工大学实验室开放基金（开放实验项目开发）：电化学加工可视化实验研究，主持，2007 年），在**信息化物理模型的基础上，将现代信息技术融入实验教学项目，坚持“虚实结合、能实不虚”的原则**，开发可视化、虚拟化实验教学系统。首先营造逼真的虚拟实验环境，按照真实设备操作台制作仿真实验操作台，然后按照实验项目的步骤、内容和要求，开发交互式仿真程序，使学生能够在沉浸式环境内开展相关的实验，并在后台如实记录学生的实验过程和操作步骤，完成对学生实验完成情况的考核。

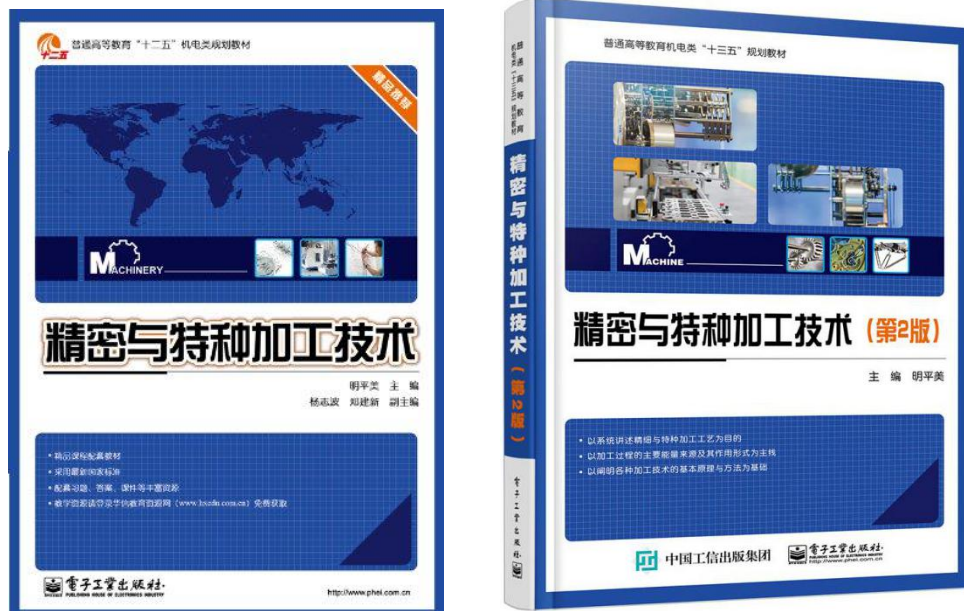


图 1 项目负责人主编的《精密与特种加工技术》教材（2011 年初版，2019 年第二版）

精密与特种加工领域是我校机械工程学科的特色研究领域，在河南省极具优势。“精密与特种加工”课程也是我校机械设计制造及其自动化专业的专业特色课程。项目负责人编写的《精密与特种加工技术》教材已经出版两版，深受其他高校欢迎。该课程是我校国家特色专业、河南省名牌专业——机械设计制造及其自动化专业的特色课程之一。电化学加工是该课程的必讲教学内容，并开设了一个单元（2 学时）的实验课程。需要学生理解电化学加工的原理，了解电化学加工的实施环境条件，掌握两类电化学加工（电解加工与电铸加工）的工艺过程、主要操作步骤与方法，理解电化学能量如何实现由“无形反应”到“有形实物”的工艺实质，培养和锻炼学生根据加工需要选择合适加工方式、搭建实验平台、选定合理操作步骤和工艺参数独立进行零件成形与分析的能力。前期，

主要通过模型讲解、flash 动画演示等手段展示和讲解，学生以参观和听讲为主，无法参与其中，学生自主学习和实验教学效果较差。为此，本课程教学团队将现代信息技术融入实验教学项目，开发了电化学加工虚拟仿真实验系统，以达到以下教学目的：

- (1) 使学生深刻理解电化学加工基本原理和电化学加工的基本知识；
- (2) 了解加工电压/电流、进给速度、时间等加工参数对电解/电铸加工结果的影响，掌握电化学加工的基本规律；
- (3) 学会根据需要选择适合的加工方式，掌握具体过程和工艺参数，了解典型零件的电解/电铸加工成形过程和加工结果。
- (4) 熟悉电化学加工的基本操作步骤，初步具有分析和解决电化学加工问题的能力。基于此，将取得如下教学效果。

(1) **拓展了实验教学内容广度和深度。**本实验项目采用交互式虚拟实验平台，为学生创建一个具有自主学习、模拟训练、实验操作、综合考核等功能综合平台，解决了“不宜开展现场实验教学、现场实验教学效果不好”的问题。学生在实验开始之前先通过视频教学资源讲解，使其完全清楚实验内容、步骤及要求，并可以进行模拟训练。通过自主学习后，再开展虚拟实验，后台会详细记录学生自主学习、模拟练习，以及实验操作痕迹，最后给出综合评价结果。通过虚拟实验，彻底改变了原来只能看视频或“教师做学生看”演示型实验教学方式，较好地拓展了实验教学内容广度和深度。

(2) **延伸了实验教学时间和空间。**通过线下虚拟实验系统开放实验，向机械类与材料加工类专业学生全面开放，同时也借助网络平台，实现向国内同类高校、机械制造企业培训机构开放；开发线上虚拟实验系统，使学生可以任何计算机终端访问实验教学资源，并开展虚拟教学仿真实验，完全打破了时间和空间限制。

(3) **提升了实验教学质量水平。**通过开发线下和线上虚拟仿真教学系统，极大程度提高了学生参与程度，实验教学信息量更加丰富，打破了实验教学时间和空间上的限制，完全改变前期主要通过模型参观的实验教学方式，学生参与程度提高，临场感增强，获得了良好的实验教学效果，提升了实验教学质量水平。

2-3 实验课时

- (1) 实验所属课程所占课时：32 学时
- (2) 该实验项目所占课时：4 学时

2-4 实验原理（简要阐述实验原理，并说明核心要素的仿真度）

电化学加工有两大类：电铸加工和电解加工。电铸加工是基于阴极还原反应把电解液中特定金属离子还原为原子而逐层堆积在阴极上来实现材料成材成形的增材式加工工艺；电解加工是基于阳极氧化反应把工件中的金属原子氧化成离子而溶解去除进而成形的减材式加工工艺。电化学加工原理明显有别于传统的车、磨、钻等机械切削加工和热成形加工，它在电解液中进行，成形成面原理巧妙、方式独特多样，以原子量级单位转移材料，加工过程工具与工件非接触、不可见、速度极快，无声无热无力，难以觉察，但对工艺条件与操作参数极其敏感。因此，电化学加工的工作原理、成材成形机制、工艺条件与成形结果的关系等一直是学生困惑、极难理解的重点和难点之处。



图2 电化学加工虚拟仿真实验界面

知识点：共 4 个

（1）电化学加工分类与工作原理解析

电化学加工可分为电解加工与电铸加工两大类。电解加工是基于阳极氧化反应把工件中的金属原子氧化成离子而溶解去除进而成形的减材式加工工艺。其显著特征是：工件接电源的正极；加工时工件材料不断被溶解，工具阴极不溶解；加工间歇小；工件不断向工具阴极进给。电铸加工是基于阴极还原反应把电解液中特定金属离子还原为原子而逐层堆积在阴极上来实现材料成材成形的增材式加工工艺。其显著特征是：阴极基底接电源的负极；阴极基底上金属层不断增厚；加工间歇大(10cm 以上)；阴极基底与阳极的间距一般不变。

电解加工原理

电解加工常用于航空发动机叶片、炮管膛线、深孔、齿轮、花键、零件抛光、去毛刺加工等，特别在加工高温合金、钛合金材料制造的复杂零件时具有较大的优势，目前已被广泛应用于航空航天、武器、汽车、医疗器械、仪表等制造行业。

电解加工时利用电解过程中的阳极溶解原理并借助成型阴极，将工件按一定形状和尺寸加工成型的一种工艺方法，加工原理如图4所示。在加工中，工件接电源正极，成型零件接电源负极，在工件与阴极在获嘉施加一定的电压，使阳极金属材料对应区域逐

渐被电解蚀除，电解产物被电解液带走，直到工件表面形成与工具表面基本相似的形状为止。



图3 电解加工实验原理界面

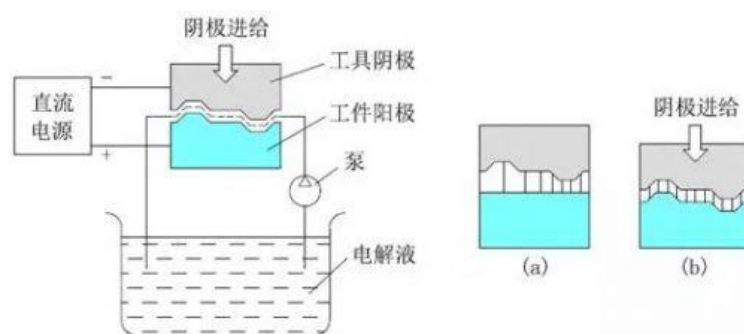


图4 电解加工基本原理

在加工中必须具备以下条件：

- 1) 工件阳极和成型阴极间保持很小的间隙（称作加工间隙），一般在 0.1-1mm 范围内。
- 2) 电解液从加工间隙中不断高速（6~30m/s）流过，以保证带走阳极溶解产物和电解电流通过电解液所产生的热量，并去极化。
- 3) 工件阳极、成型阴极分别和电源（一般为 10~24V）连接，在上述两项工艺条件下，则通过两级加工间隙的电流密度很高，高达 10~100A/cm² 数量级；
- 4) 阴极或工件按一定的速度做进给运动。随着阴极不断缓慢地向工件进给，工件不断地按阴极型面溶解，电解产物不断被高速流动的电解液带走，最终阴极的形状就“复制”在工件上。



图5 电化学加工虚拟仿真实验装置界面

电铸加工原理

电铸的基本原理和电镀相同，是通过电沉积的方式获得所需要的金属层。电铸是利用电沉积原理在铸模或金属表面沉积上一薄层其它金属或合金的过程。电铸时，以待镀物质为阳极、铸模为阴极，阴、阳极以待镀物的金属正离子组成的电解质溶液相连，通以电源后，阳极的金属会氧化（失去电子），溶液中的正离子则在阴极还原（得到电子）成原子并积聚在阴极表层，和铸模分离后以制造或复制金属制品。图6为电铸加工基本原理图。

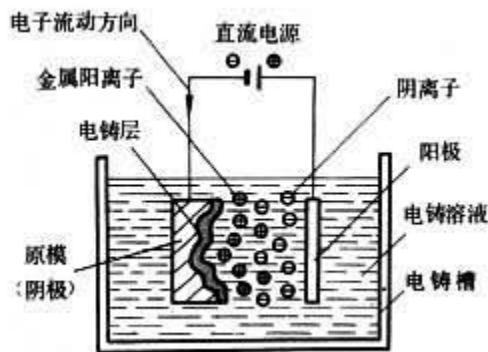


图6 电铸加工基本原理

电铸的主要用途是精确复制微细、复杂和某些难于用其他方法加工的特殊形状模具及工件等，例如制作纸币和邮票的印刷版、唱片压模、铅字字模、玩具滚塑模、模型模具、金属艺术品复制件、反射镜、表面粗糙度样块、微孔滤网、表盘、电火花成型加工用电极、高精度金刚石磨轮基体等。

电铸在加工中必须具备以下条件：

1) 合适的电流强度。

任何镀液都有一个获得良好镀层的电流强度范围，获得良好镀层的最小电流强度称

电流强度下限，获得良好镀层的最大电流密度称电流强度上限。采用氨基磺酸镍为电铸镍电解液时，电流密度一般为 $2\sim 30\text{A}/\text{dm}^2$ ；

2) 合适的电铸溶液温度。在固定的条件下，电镀溶液的温度升高，一般会加快阴极反应速度和离子扩散速度，降低阴极极化作用，故而也会使镀层结晶变粗。电镀镍时，温度一般为 $30\sim 60^\circ\text{C}$ ；

3) 电铸过程中一般需要搅拌和过滤。搅拌会加速电镀溶液的对流，加快阴极反应速度和离子扩散速度。采用搅拌的电镀液必须进行定期或连续过滤的去除溶液中各种杂质，防止造成镀层的结合力降低并使镀层粗糙、疏松、多孔。

4) 电源。电铸生产中常电流的波形对镀层的结晶结构、光亮度、镀液的分散能力和覆盖能力、合金成分比例、添加剂的消耗等方面都有明显的影响，通常采用整流器以及直流发电机来提供电源根据不同的情况对其进行调整形成各种最佳波形。

5) 合理的加工间隙（阴极与阳极间的距离），可选择范围为 $20\sim 30\text{cm}$ 。

(2) 电解加工系统组装、工艺参数选定与零件加工成形

电解加工设备主要包括由机床、电源、电解液系统等三大部分。

1) 电解加工机床主体

电解加工由于可以利用立体成形的阴极进行加工，从而大大简化了机床的成形运动机构。对于阴极固定式的专用加工机床，只需装夹固定好工件和工具的相互位置，并引入直流电源和电解液即可，它实际上是一套夹具。移动式阴极电解加工机床用得比较多。这时一般工件固定不动，阴极作直线进给移动，只有少数零件如膛线加工，以及要求较高的筒形零件等，才需要旋转进给运动。机床的形式主要有卧式和立式两类。卧式机床主要用于加工叶片、深孔及其他长筒形零件。立式机床主要用于加工模具、齿轮、型孔、短的花键及其他扁平零件。

电解加工机床目前大多采用机电传动方式，有的采用交流电动机经机械变速机构实现机械进给，它不能无极调速，在加工过程中也不能变速，一般用于产品比较固定的专用电解加工机床。目前大多数伺服电动机或直流电动机用无极调速进给系统，而且还容易实现自动控制。电解加工中所采用的进给速度都是比较低的，因此都需要有降速用的变速机构。由于降速比较大，故行星减速器、谐波减速器在电解加工机床中被更多地采用。为了保证进给系统的灵敏性，使低速进给时不发生爬行现象，广泛采用滚珠丝杠传动，用滚动导轨代替滑动导轨。图 7 为电解加工机床系统。

在电解加工机床上要安装夹具、工件与阴极工具并使它们实现设定的相对运动，另外，电解加工机床还需传送电流和电解液。与一般金属切削机床相比，有一定的特殊性。这些特殊要求如下：

① 机床的刚性

电解加工虽然没有机械切削力，但电解液有很高的压力。如果加工面积较大，则对机床主轴、工作台就有很大的作用力。因此，要求电解加工机床的工具与工件系统必须

有足够的刚性，以防由于机床零部件的过大变形，改变工具与工件的相互位置，甚至造成短路烧伤。

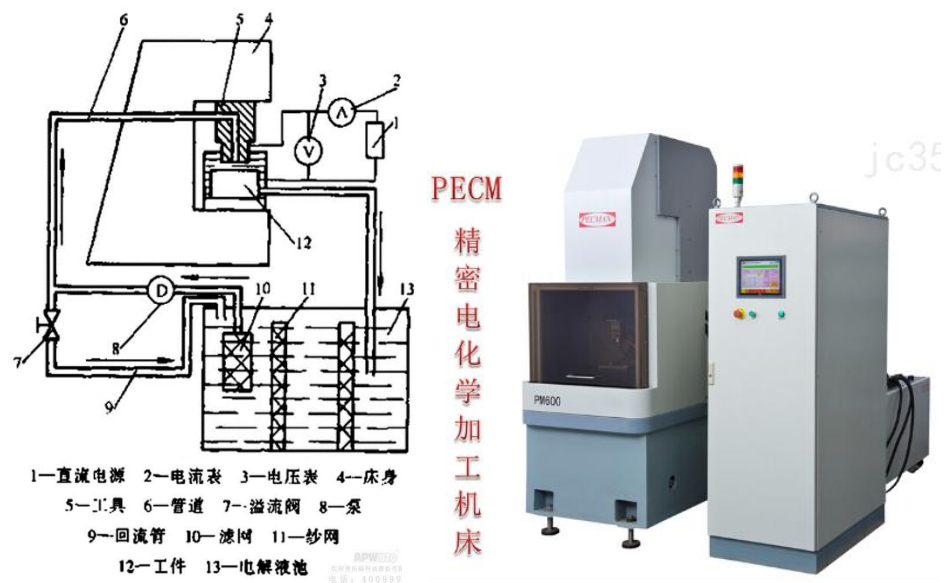


图7 电解加工机床系统

②进给速度的稳定性

若进给速度不稳定，就难以控制加工间隙的均匀、稳定，无法使加工区的电场、流场分布均匀、稳定。

③机床精度高

良好的机床精度，尤其是机械传动精度是提高电解加工精度的基础，同时利用人工控制或自动控制，可满足各种加工要求。

④防腐绝缘性能好

电解加工机床经常与有腐蚀性的电解液接触，所有外露的金属表面长期被电解液及其雾气所浸蚀，因此，必须采用耐腐蚀性的材料或采用隔离保护的方法，直流电源的正负两极除与工件和工具有良好的导电连接外，与机床其他部位应有可靠的绝缘。因为，若有部分电流通过，再与电解液相接触，将会发生严重腐蚀。

⑤安全保护

电解加工过程中将产生大量氢气，如果不能迅速排除，便有可能因火花短路等引起氢气爆炸，必须采取相应的排氢防爆措施。此外，电解加工中也可能析出其他气体，如果采用混气电解加工，对加工区逸出的大量氢气，要及时排除并防止扩散。对于一般电解加工机床应有密封的工作箱，以及必要的排气装置，这些劳动保护和安全生产措施都是必不可少的。

2) 电解加工电源

电解加工电源可分为直流电源和调制电源（包括脉冲电源、周期反向电源等）。由于电解加工所需的电流量大，电解加工电源一般为大电流、低电压量程类型。直流电源的极性有正、负两个，一般用红色标示正极性、黑色标示为负极性。

电解加工中常用的直流电源为硅整流电源及可控硅整流电源。硅整流电源中先用变压器把 380V 的交流电变为低电压的交流电，电压为 8~16V，电流为 10~1000A。而后用 2CZ 型的大功率硅二极管将交流电整流成直流。

为了能调节电压，最早依靠变压器次级绕组抽头，但这样只能分级跳跃地调节电压，而且不能在加工中调节，仅可用于功率较小，要求不高的场合。为了能无极调压，目前生产中采用的有：①扼流式饱和电抗器调压；②自饱和式电抗器调压；③可控硅调压。

在硅整流电源中，饱和电抗器调压与可控硅调压相比，前者的电控器都是由电磁铁材料制成的，因此，坚固、抗振、耐潮、寿命长、运行可靠，这就使维护工作大为减少，此外，由于在负载电路和控制电路之间没有电联系，抗干扰性能好，这些都是其优点。但铜、铁用量多，重量和体积大，制造工艺复杂，这是其不可避免的缺点。

可控硅调压则比电抗器节省大量铜、铁材料，减少了电源的体积和重量，也减少了电源的功率损耗。同时，可控硅是无惯性元件，控制速度快，灵敏度高，有利于进行自动控制以及火花和短路保护。其缺点是抗过载能力差，较易损坏。

为了进一步提高电解加工精度，生产中采用了脉冲电流电解加工，这时需采用脉冲电源。由于电解加工需要大电流，因而都采用可控硅脉冲电源。

3) 电解液及其循环过滤系统

在电解加工过程中，电解液的主要作用是：①作为导电介质传递电流；②在电场作用下进行电化学反应，使阳极溶解能顺利而有控制地进行；③将加工间隙内产生的电解产物及热量及时带走，起到更新和冷却作用。因此，正确选用电解液对保证电解加工的正常进行具有重要作用。

电解液可分为中性盐溶液、酸性溶液和碱性溶液三大类。酸性电解除用在高精度、小间隙、细长孔以及锆、钼、铌等难溶金属加工外，一般很少选用。碱性电解液对人体也有损害，且会生成难溶性阳极薄膜，因此，仅用于加工钨、钼等金属材料。由于中性盐溶液腐蚀性小，使用时较安全，故应用最普遍。最常用的有 NaCl、NaNO₃、NaClO₃ 三种电解液。

I. NaCl 电解液 NaCl 电解液中含有活性 Cl⁻ 离子，阳极工件表面不易生成钝化膜，所以具有较大的蚀除速度，而且没有或很少有析氧等副反应，电流效率高，加工表面的表面粗糙度值也小。NaCl 是强电解质，在水溶液中几乎完全电离，导电能力强，而且适用范围广，价格便宜，货源充足，所以是应用最广泛的一种电解液。NaCl 电解液的蚀除速度高，但其杂散腐蚀也严重，故复制精度较差。NaCl 电解液的质量分数常在 20% 以内，一般为 14%~18%。当要求较高的复制精度时，可采用较低的质量分数（5%~10%），以减少杂散腐蚀。常用的电解液温度为 25~35℃，但加工钛合金时，必须在 40℃ 以上。

II. NaNO₃ 电解液 NaNO₃ 电解液是一种钝化型电解液。NaNO₃ 或 NaClO₃ 电解液之所以具有切断间隙的特性，是由于它们是钝化型电解液，在阳极工件表面形成钝化膜，虽有电流通过，但阳极不溶解，此时的电流效率 $\eta=0$ 。只有当加工间隙小于切断间隙时，即电流密度大于切断电流密度时，钝化膜才被破坏而使工件被蚀除。图 5-8 所示为三种常用电解液的 $\eta-i$ 曲线。从图中可以看出，NaCl 电解液的电流效率接近于 100%，基本上是直

线，而 NaNO_3 与 NaClO_3 电解液的 η - i 关系呈曲线，当电流密度小于 i_a 时，电解停止作用，故有时将它们称为非线性（即电流密度不与溶解蚀除速度成线性关系）电解液。 NaNO_3 电解液在质量分数为 30% 以下时，有较好的非线性性能，成形精度高，而且对机床设备的腐蚀性小，使用安全，价格也不高（为 NaCl 的一倍）。它的主要缺点是电流效率低，生产效率也低，另外加工时在阴极有氨气析出，所以 NaNO_3 会被消耗。III. NaClO_3 电解液 NaClO_3 电解液也具有 NaNO_3 电解液的特点，杂散腐蚀作用小，加工精度高。据某些资料介绍，当加工间隙达到 1.25mm 以上时，阳极溶解几乎完全停止，而且有较小的加工表面粗糙度值。 NaClO_3 的另一个特点是具有很高的溶解度，在 20℃ 时可达 49%（此时 NaCl 为 26.5%），因而其导电能力强，可达到与 NaCl 相近的生产率。另外，它对机床、管道、水泵等的腐蚀作用很小。 NaClO_3 的缺点是价格较贵（为 NaCl 的 5 倍），而且由于它是一种强氧化剂，使用时要注意防火。

电解液系统是电解加工设备中不可缺少的组成部分，该系统的主要组成有液压泵、电解液槽、过滤装置、管道和阀等，如图 8 所示。目前生产中的电解液泵大多采用多级离心泵代替齿轮泵，因为离心泵的轴承室与泵腔是分开的，所以密封和防腐比较容易实现，故使用周期较长，压力为 0.5~2MPa。随着电解加工的进行，电解液中的电解产物（主要是氢氧化物）含量增加，严重时堵塞加工间隙，引起局部短路，故电解液的净化室是非常必要的。电解液的净化方法很多，目前用得比较广泛的是自然沉淀法。由于金属氢氧化物是成絮状存在于电解液中的，而且质量较轻，有些金属的氢氧化物的密度几乎与电解液差不多，因此自然沉淀速度很慢，必须有较大的沉淀面积，才能获得好的效果。在实际生产中往往采用一些加速沉淀的措施。

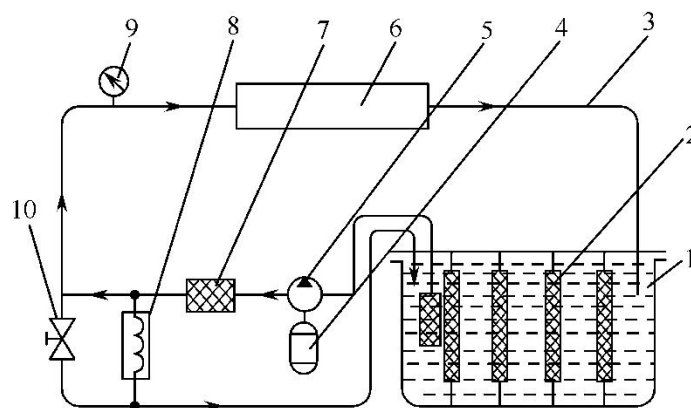


图 8 电解液循环过滤系统示意图

- 1—电解液槽；2—过滤网；3—管道；4—泵用电动机；5—离心泵；
6—加工区；7—过滤器；8—安全阀；9—压力表；10—阀门

介质过滤法也是常用的方法之一，过去采用钢丝网或不锈钢丝网过滤。由于塑料工业的发展，目前都采用 100~200 目的尼龙丝网过滤，成本低，效果好，制造和更换容易。实践证明，电解加工中最有害的不是氢氧化物沉淀，而是一些固体杂质碎屑或腐蚀冲刷下来的金属晶粒，必须将它们滤除。通常可用沉淀的方法，定期将池底或槽底的沉淀物抽掉。电解液的循环与上类似，但压力与流量可较低，小于 0.1MPa。

(3) 电铸加工系统组装、工艺参数选定与零件加工成形

电铸加工的主要设备有：电铸槽、直流电源、搅拌和循环过滤系统、加热和冷却系统。

1) 电铸槽

电铸槽应选用不易被电铸液腐蚀的材料制作，通常采用钢板焊接，内衬铅板、聚乙烯薄板或其他塑料，小型电铸槽也可以采用陶瓷、玻璃或搪瓷容器。

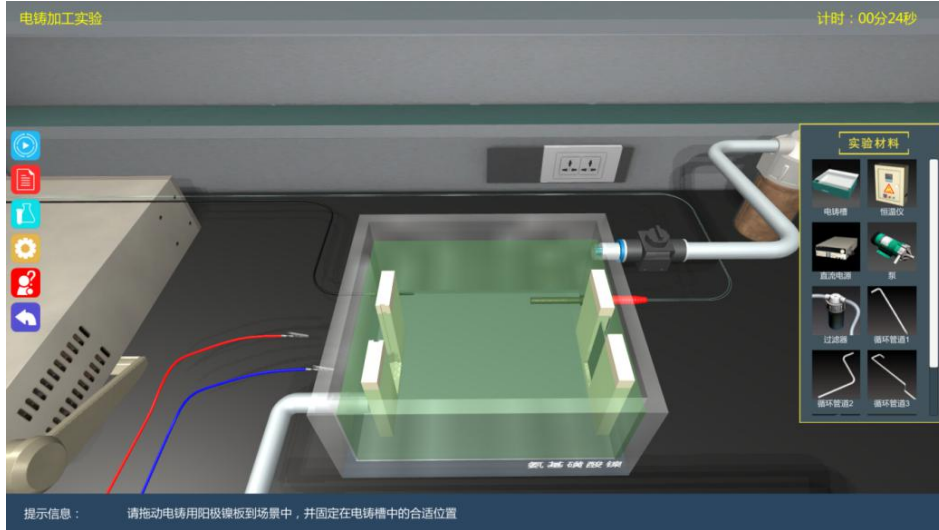


图9 电铸虚拟仿真实验电铸槽界面

2) 直流电源

直流电源与电解、电镀电源类似，通常采用低电压、大电流的直流电源。电压3~20V可调，电流和功率需满足15~30dm²，可采用硅整流或晶闸管直流电源。

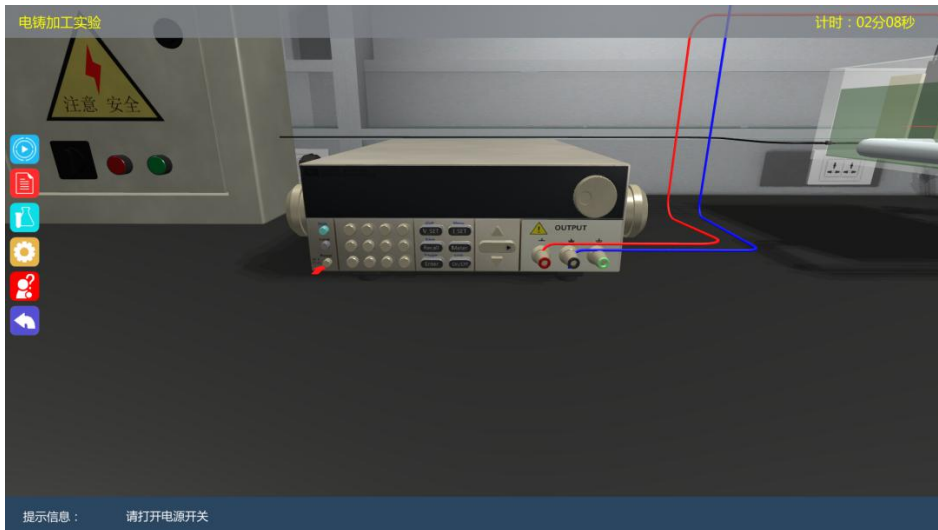


图10 电铸虚拟仿真实验直流电源界面

3) 搅拌和循环过滤系统

为了降低电铸液的浓度的浓差极化、加大电流密度、提高生产速度，应在阴极运动

的同时，加速搅拌器的搅拌。通常采用循环泵吸收槽底的溶液和杂质，连过滤带搅拌，也可以使工件振动或转动来实现搅拌。



图 11 电铸虚拟仿真实验搅拌和循环过滤界面

4) 加热和冷却装置

电铸的时间较长，为了使电镀液保持温度不变，需要加热、冷却和恒温控制装置。

电铸工艺流程

1) 原模设计及材料选用

根据脱模条件、产品复杂程度、要求精度以及生产量等，确定设计一次性原模或耐久性原模。耐久性原模常用材料有碳素钢、不锈钢、镍、黄铜、玻璃、环氧树脂或热固性塑料等。消耗性或一次性原模通常采用铝、石蜡、石膏及低熔点合金等，主要是利于加热后可熔化、分解或利用化学方法可进行分解。选用原模材料时应考虑材料的热稳定性、比热、热膨胀系数大的，否则在热电铸液中得到产品精度较差。

原模设计时应注意内外棱角，应取尽可能大的过渡圆角，以免电镀层内棱角处太薄而外棱角出过厚。原模应比电铸零件的长度长 8~12mm，以便脱模后切去交接面粗糙部分。

对耐久性原模，脱模斜度不应小于 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。如产品不允许有斜度，可选用与电铸金属热膨胀系数相差较大的材料制作原模，以便电铸后用加热或冷却的方法脱模。零件精度要求不高时，可在原模上涂覆或浸入一层蜡或易熔合金，在电铸后将涂层熔去脱模。

2) 原模的表面处理

预处理的目的是使原模能够电镀，而且使电镀后能够顺利脱模。因此，首先进行清洗，除去表面的脏物和油污，然后进行钝化或导电化处理。

3) 电铸溶液

常用的电铸金属有铜、镍和铁。通常对电铸溶液要求沉积速度快、成分简单且易于控制，另外，对溶液的净化处理要求高并且应易于获得均匀的电铸层。

4) 衬背

有些电铸件成形之后需要用其他材料衬背加固，如塑料模具型腔和印刷版等，然后再进行精加工。衬背的方法有浇注铝或铅—锡合金以及热固性塑料等，对结构零件可以在外表面包覆树脂进行加固。

5) 脱模

脱模方法视原材料不同而易，通常有敲击、加热或冷却、剥离等方法。如果对电铸件需要进行机械加工时，应在脱模之前进行，一方面原模可以加固电铸件以免加工变形，另一方面机械加工力能促使电铸件原模松动，以便脱模。

(4) 注意事项及安全

电解加工虚拟仿真实验注意事项与安全：

- 工件须接电源的正极，工具电极须接电源的负极
 - 加工前，须先启动电解液泵（循环系统开关须打开），让电解液在整个系统中循环过滤
 - 循环系统正常工作后，工具电极慢慢靠近，如此同时启动电源，不得在无电解液流出时启动电源
 - 停止加工时，须先关断电源，然后关闭电解液循环过滤系统，不得相反操作
- 电铸加工虚拟仿真实验注意事项与安全：

- 阴极基底须接电铸电源的负极，镍块须接电铸电源的正极；
- 须在电解液温度达到设定温度后才可启动电铸电源进行加工；
- 温度的设置须在电解液循环系统正常工作且电铸槽中的电解液开始流动后进行；
- 电解液的温度设置不得高于 65 度；
- 电铸加工结束后，须先关断电源。

2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

实验主要包括两个单元模块：电解加工虚拟仿真实验模块和电铸加工虚拟仿真实验模块。

1. 电解加工虚拟仿真实验

电解加工装置，工作槽，储液槽，电解加工电源，化工泵，恒温控制系统，过滤机，阴极，阳极，清洗槽，导线，输液管道， NaNO_3 电解液。

2. 电铸虚拟仿真实验

电铸槽，电铸电源，化工泵，过滤机，加热棒，温度传感器，恒温控制系统，烧杯，阴极基底，阳极，挂架，超声清洗槽，氨基磺酸镍电解液。

2-6 实验材料（或预设参数等）

1. 电解加工虚拟仿真单元

电解加工成形仿真实验主要运用仿真模拟软件中的电解加工模块。在仿真软件中熟

悉电解加工的基本原理和实验过程。在实验中搭建实验系统，输入电解加工参数，启动电源进行电解加工。在仿真中，可以给定不同的电解电压、进给速度等参数模拟加工结果并对加工结果进行比较。在实验中预定的参数有：

- (1) 阴、阳极的确定：不锈钢金属零件（阴极），不锈钢金属块（工件，阳极）；
- (2) 加工电压，电压范围在 20-30V 之间选择，最小设定单位为 1V；
- (3) 设定加工间隙（阴极与阳极间的距离），范围为 0.1-1mm；
- (4) 阴极进给速度，单位为 mm/min；
- (5) 加工温度，范围在 20~30°C 之间。

2. 电铸虚拟仿真单元

电铸加工成形仿真实验主要运用仿真模拟软件中的电铸加工模块。在仿真软件中熟悉电铸加工的基本原理和实验过程。在实验中搭建实验系统，输入电解加工参数，启动电源进行电解加工，电铸完成后，取出铸件，溶解掉胶膜，从金属基板上剥离铸件。在实验中预定的参数有：

- (1) 阴、阳极的确定：含有零件胶膜图案的金属板（阴极），镍板（阳极）；
- (2) 加工电流，范围在 2-5A/dm² 之间选择；
- (3) 加工温度，范围在 40-60°C 之间；

设定加工间隙（阴极与阳极间的距离），范围为 20~30cm。

2-7 实验教学方法（举例说明采用的教学方法的使用目的、实施过程与实施效果）

1. 使用目的

为了使学生在《精密与特种加工技术》等课程教学深入理解电化学加工的原理，利用电解加工仿虚拟真软件进行实验教学。在实验中，采用现场教学方法，由指导教师首先进行实验教学示范，进行仿真软件操作的教学，同时提示学生在操作中应注意的问题，让学生学会仿真软件的操作。在学生实验过程中，由教师讲解加工参数的选择方法，让学生选择加工参数进行实验，由学生分析实验结论。

在实验教学过程中主要采用了实验前的知识讲授、实验结果根据参数生成等方法，可合理安排网上的实验教学资源，加强对实验过程的全程监控、获得较好的实验效果。

2. 实施过程

(1) 实验前准备。在实验前充分预习实验指导书的实验内容，对实验的原理、实验方法、实验操作内容和步骤有一个全面的了解。

(2) 观看实验教学视频。教学视频全面介绍了仿真软件功能、实验操作步骤等，通过教学视频的学习使学生更加熟悉实验内容、实验步骤等。

(3) 互动答疑。学生预习实验内容中碰到问题，由网上指导老师通过互动方式解答。

(4) 选择加工参数，进行实验。在实验过程中，学生自主选择实验参数数据，由于参数设置不同，实验结果数据不同，因此在一定范围内不同学生的实验是不同的，避免

了学生实验雷同现象。

(5) 实验过程监控。在实验中，网上管理平台对学生的身份进行验证，记录实验的开始与结束时间，必要时传送终端的学生参加实验的场景。

3. 实施效果

电化学加工虚拟仿真实验在本校机制专业《精密与特种加工技术》课程中进行了试用，2016 级学生中有 100 多名学生申请了本课程的网上实验。从实施的效果来看，学生能够按要求进行网上实验，完成实验全部内容，达到以下教学效果：

(1) 在实验中，通过电化学加工虚拟仿真实验，学生更好地了解电化学加工过程、必备的加工条件、参数及变化对电解加工/电铸加工结果的影响等知识。学生通过仿真实验了解到从最初的加工状态一直到加工结束的整个过程，过程比较直观。在加工过程中可以选择不同的加工参数，了解到不同加工参数对电解加工/电铸加工结果的影响。

(2) 在实验中，通过电化学加工虚拟仿真系统模拟电化学加工的具体实现过程，对电化学加工设备和装置有了较深的认识，通过仿真实验使学生熟悉了电化学加工的操作步骤、电化学加工中参数的意义等。

电化学加工虚拟仿真实验实现了从电化学加工成形的全过程。两个实验单元模拟了电解加工实施和电铸加工实施两个过程。仿真软件具有自主知识产权，在国内是首次开发特种加工类型的仿真实验，校内外试用后效果较好。在今后实验项目的实施过程中，将通过试用的反馈意见对软件功能、实验内容，网络平台管理等方面进行改善。

2-8 实验方法与步骤要求（学生交互性操作步骤应不少于 10 步）

(1) 实验方法描述：

本实验包括电解加工成形虚拟仿真模块与电铸加工成形虚拟仿真模块。在实验过程中，首先了解电化学加工成形的基本原理，在对电化学加工成形有一个理性认识后，再进行电化学加工过程的虚拟仿真实验，以了解电化学加工的具体实现过程。从理论上和实际操两方面对电化学加工加深理解。

(2) 学生交互性操作步骤说明：

1. 电解加工实验步骤

(1) 把带有工作槽（透明可见，置于机床工作台上）的电解加工装置置于工作桌上，把装有适量 NaNO_3 电解液的储液槽（储液槽电解温度设定为 30 度，储液槽中配有恒温控制系统）置于临近电解加工装置的合适位置上（且比工作槽低）；

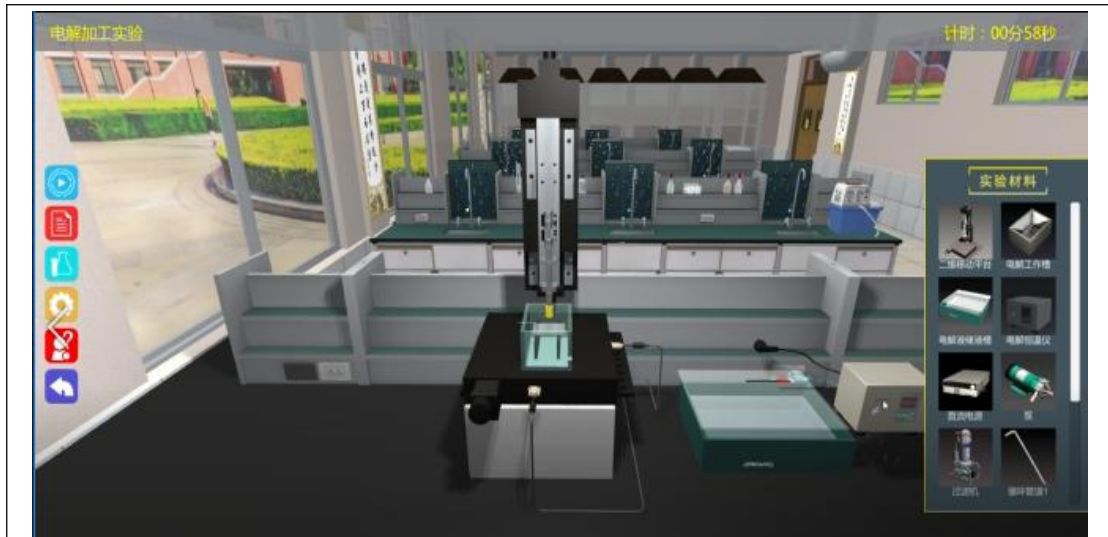


图 12 电解虚拟仿真实验工作槽界面

(2) 以不锈钢金属零件（齿轮）为阴极，以不锈钢金属块材（工件）为阳极，把阴极安装固定在电解加工装置的 Z 轴上，把阳极固定在工作槽底面上；



图 13 电解虚拟仿真实验电解加工装置界面

(3) 把电解液泵、过滤机放置适当位置，然后连接循环管道（管道 1：储液槽 ∇ 过滤机 ∇ 电解液泵 ∇ 阴极；管道 2：工作槽 ∇ 储液槽）；



图 14 电解虚拟仿真实验电解液泵和过滤机界面

(4) 把电解加工电源放置于工作桌适当位置，然后连接导线（线 1：电解加工电源负极∨阴极；线 2：电解加工电源正极∨工作槽接线柱；线 3：工作槽接线柱∨阳极）；

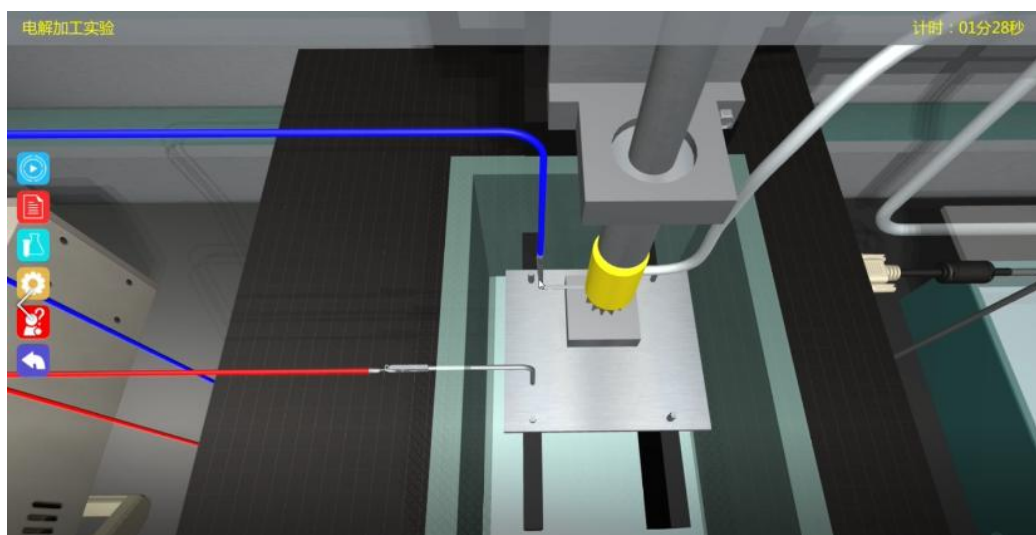


图 15 电解虚拟仿真实验循环联接界面

(5) 设定加工间隙（阴极与阳极间的距离）、加工电压和加工时间；

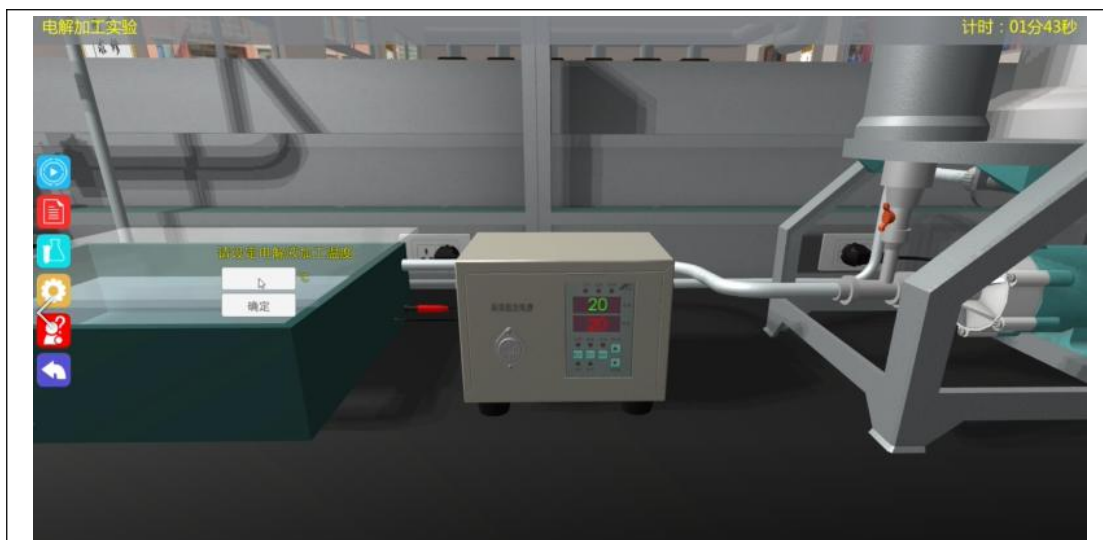


图 16 电解虚拟仿真实验温控仪参数设置界面

(6) 启动电解液泵，此时，电解液自储液槽流经过滤机、电解液泵达到阴极，并自阴极流出，然后流入工作槽中，接着自工作槽在重力作用下经管道 2 流回储液槽)；



图 17 电解虚拟仿真实验加工装置界面

(7) 启动电解加工电源，与此同时，电解加工装置 Z 轴向下移动带动阴极（齿轮）靠近阳极，当两电极（阴极和阳极）间的间隙达到设定加工间隙时，开始电解加工，并随着阴极的继续向下移动，工件不断地被加工，在此过程中，电解液的流动路径为：阴极（中心孔）▽端面加工间隙▽侧壁加工间隙)；

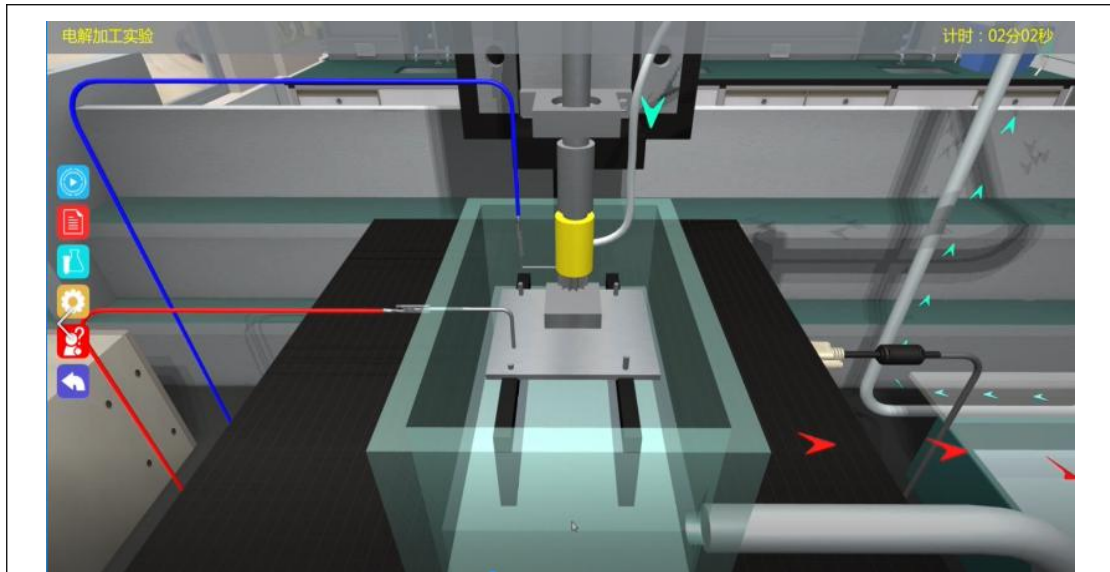


图 18 电解虚拟仿真实验液体循环界面

(8) 达到加工时间后，关断电解加工电源，关停电解液泵，上抬 Z 轴；



图 19 电解虚拟仿真实验关停电解液泵界面

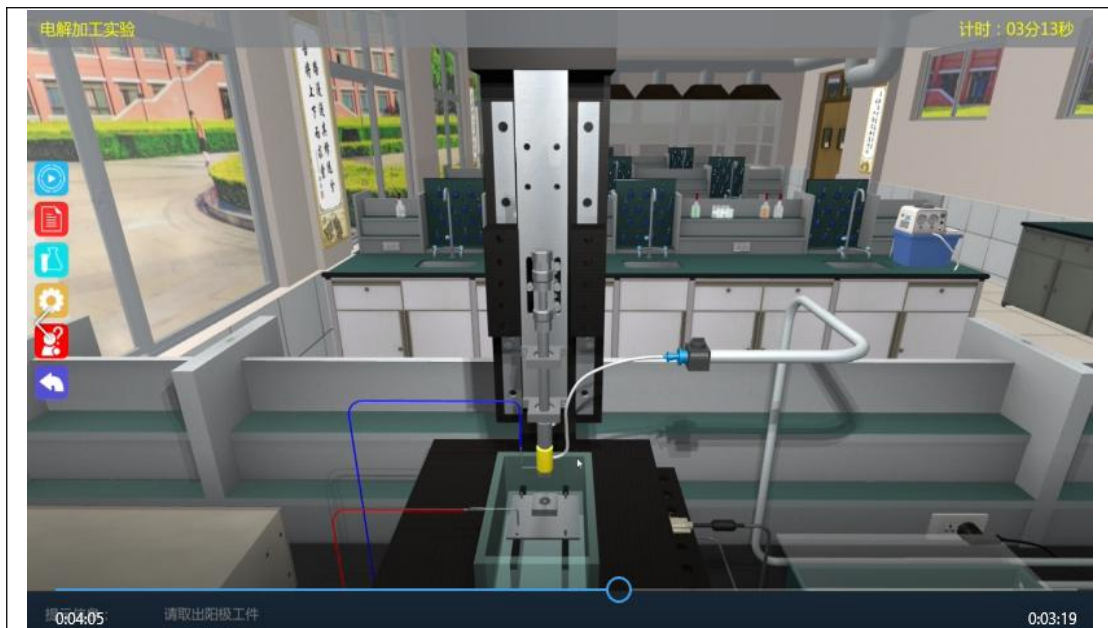


图 20 电解虚拟仿真实验抬起 Z 轴界面

(9) 取出阳极（工件），用水清洗，即得到所需最终工件；

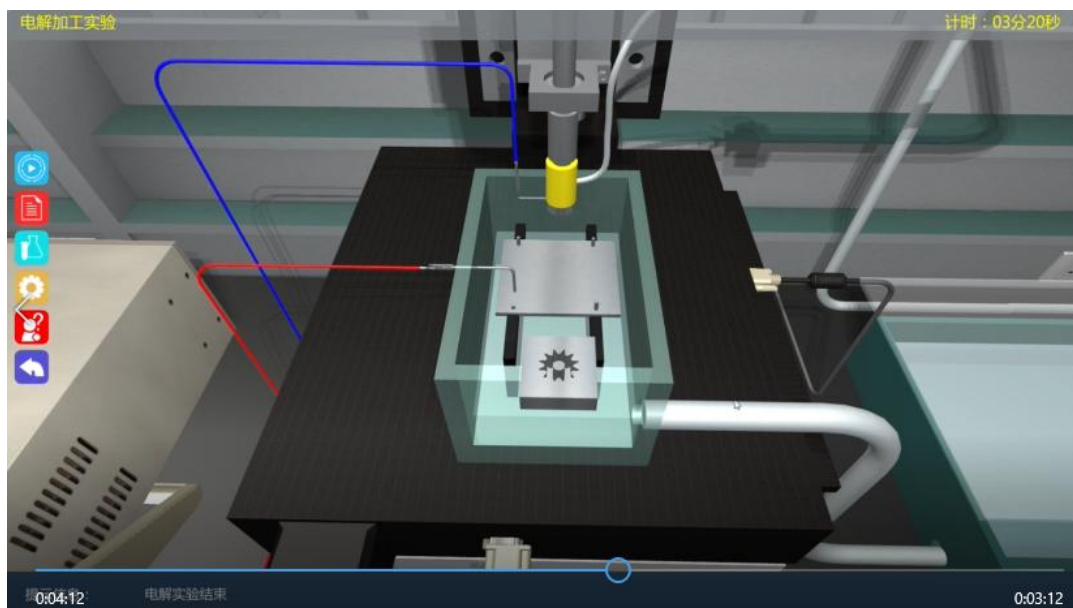


图 21 电解虚拟仿真实验取出工件界面

(10) 清理电解加工实验场地（各物品放回原处）。

2. 电铸加工实验步骤

(1) 把电铸槽、电铸电源、电铸液泵、过滤器、温控箱放置在工作桌适当位置上；



图 22 电铸虚拟仿真实验装配装置界面

(2) 连接管路（管路：电铸槽∨过滤器∨电铸液泵∨电铸槽）；

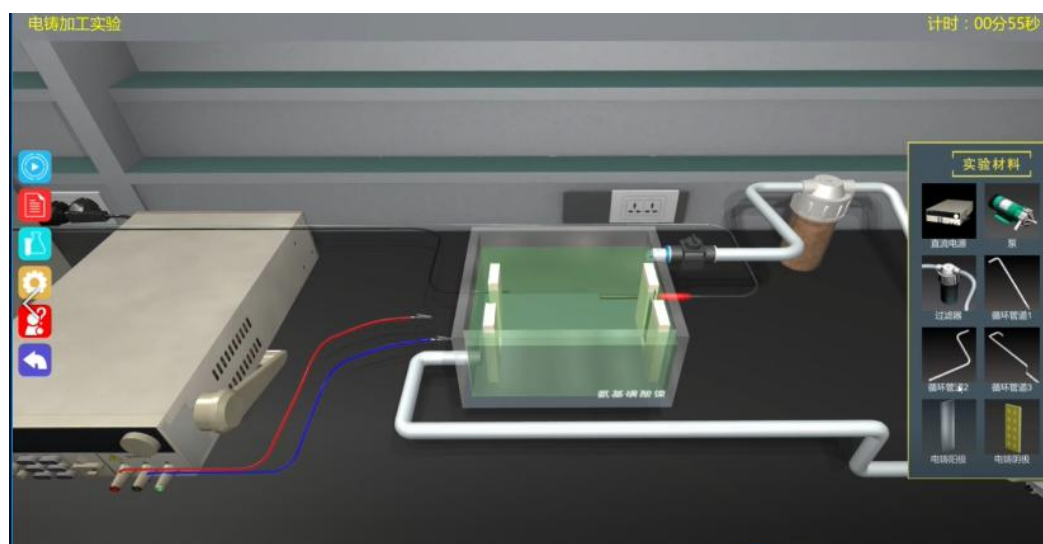


图 23 电铸虚拟仿真实验连接管道界面

(3) 把含有齿轮胶膜图案的阴极、板状镍阳极竖直地固定电铸槽的中部（固定方式可为插入既定槽中固定或吊挂在横杆上固定），调整阴极和阳极间的距离为 20~30cm；

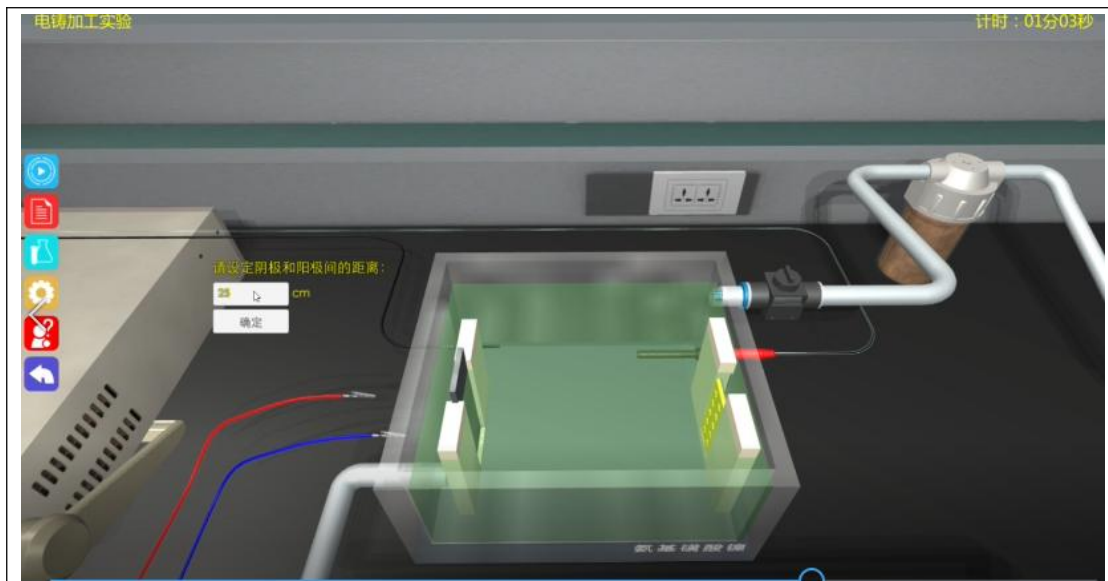


图 24 电铸虚拟仿真实验阴阳极固定界面

- (4) 连接导线（电铸电源正极接阳极，电铸电源负极接阴极）；
- (5) 把氨基磺酸镍电解液到电铸槽中，使电解液全部浸没阴阳极；

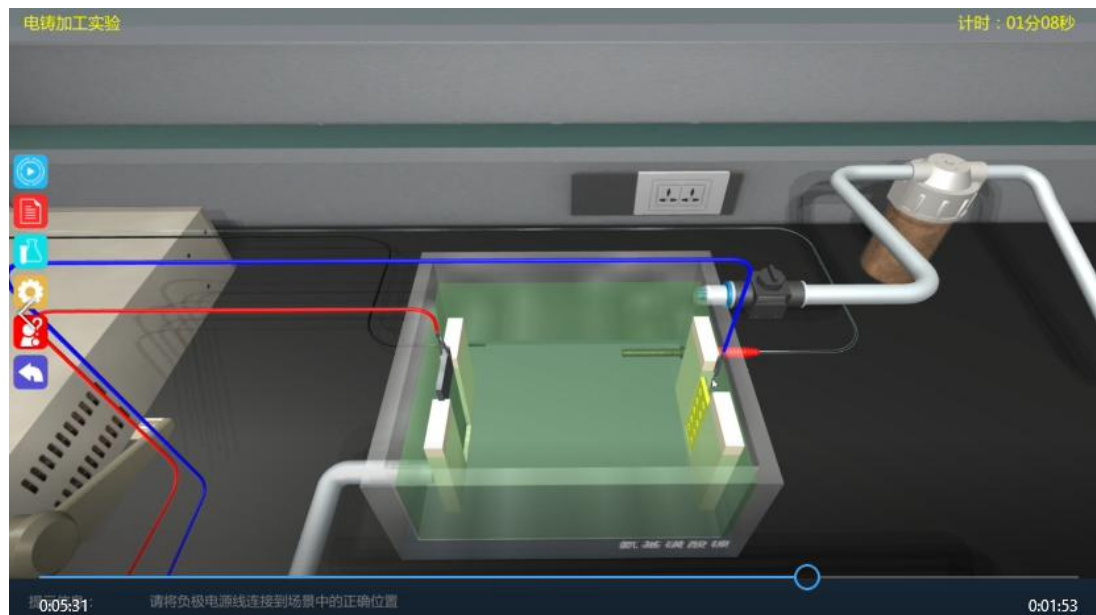


图 25 电铸虚拟仿真实验导线连接和倒入电铸液界面

- (6) 先启动电铸液泵，电铸液开始循环过滤，再启动温控系统（设定温度为 35 度），通过电铸电源设定所需电流值，设定加工时间；

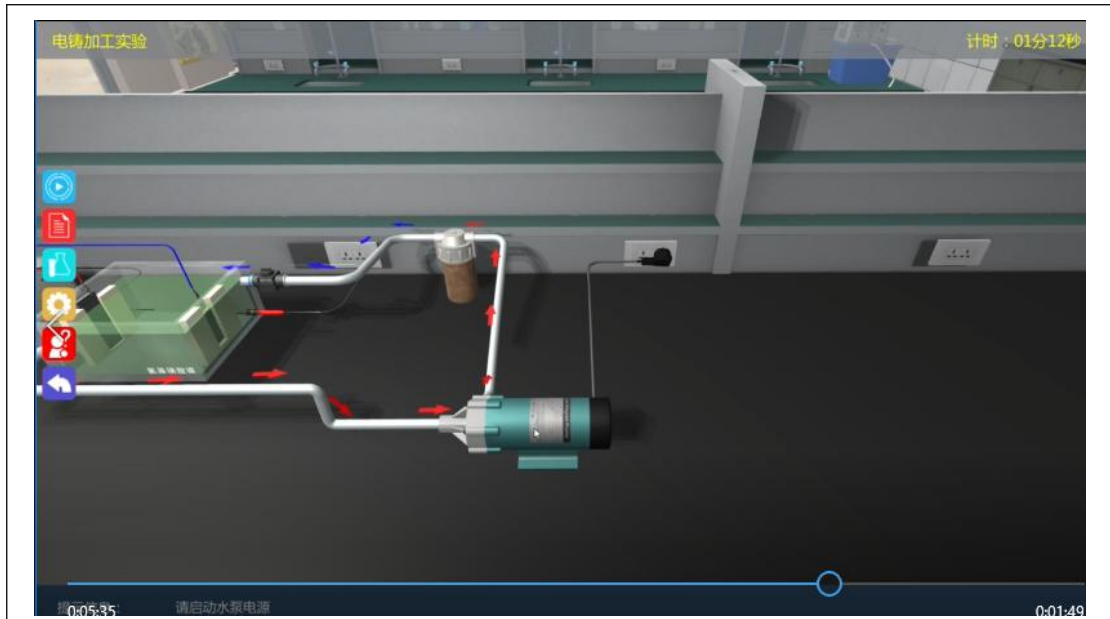


图 26 电铸虚拟仿真实验电铸液循环界面



图 27 电铸虚拟仿真实验电铸液整体循环界面

(7) 当温度达到设定值后，启动电铸电源开始电铸加工；



图 28 电铸虚拟仿真实验温控仪装置界面

(8) 当金属层厚度达到设定厚度后（即加工时间达到后）（金属层厚度稍薄于胶膜厚度），关断电铸电源，关停电铸液泵；

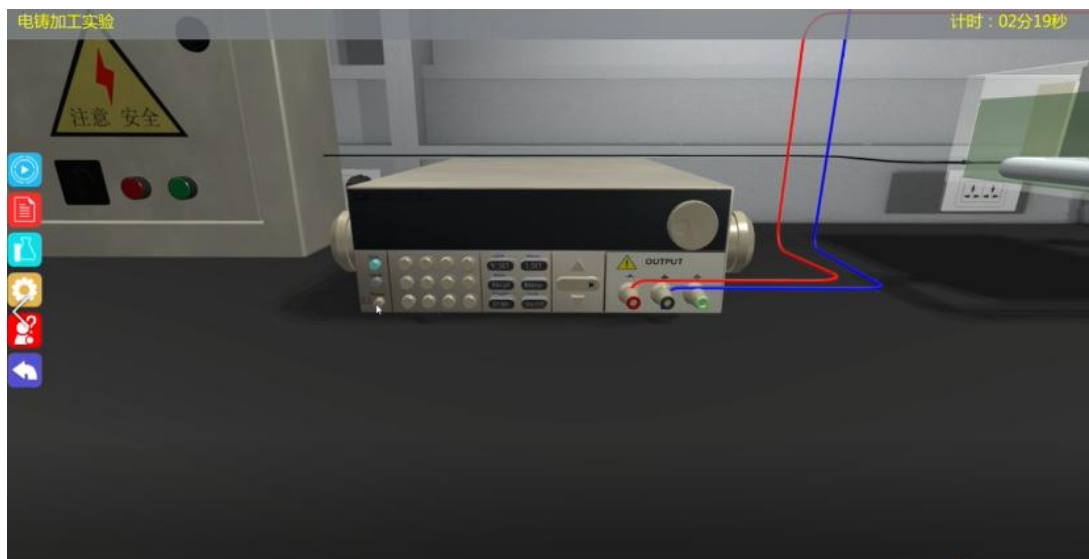


图 29 电铸虚拟仿真实验关停电源界面

(9) 拆掉导线，取出阴极；

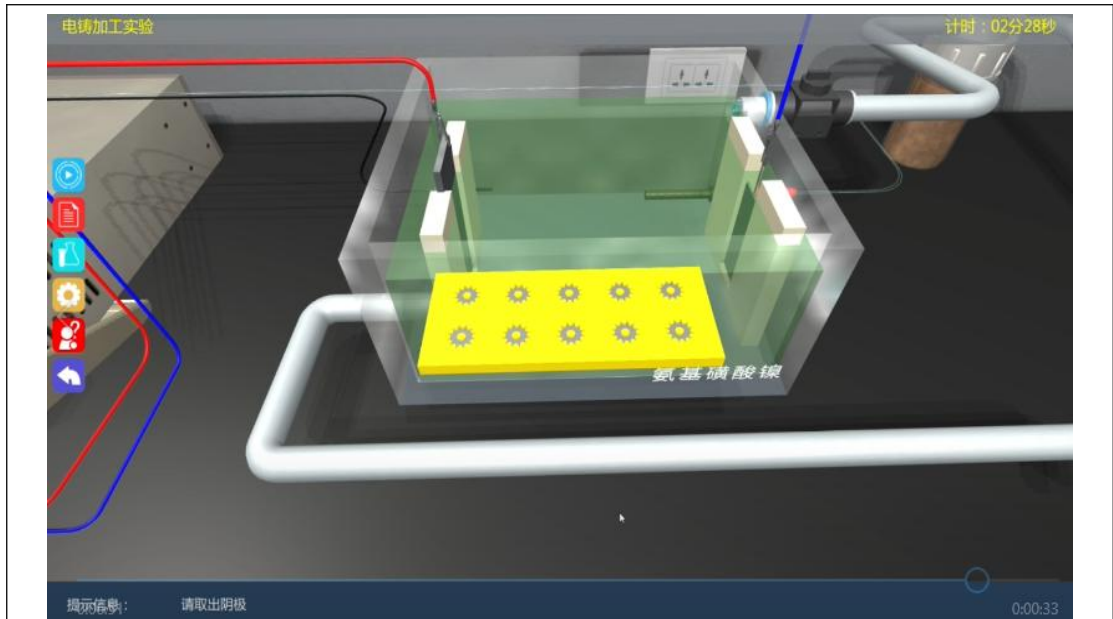


图 30 电铸虚拟仿真实验取出铸件界面

(10) 再清水中漂洗，然后放在脱膜液中脱膜（去掉光刻胶膜），胶膜去除后，取出电铸零件（至少 10 个以上），漂洗干净，得到最终的电铸零件；

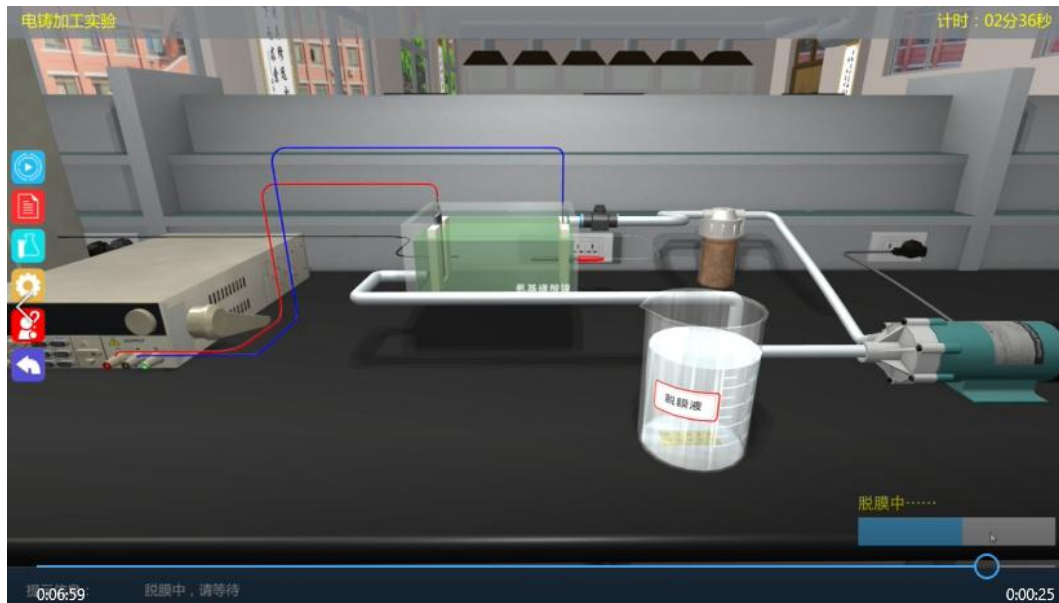


图 31 电铸虚拟仿真实验清洗铸件界面

(11) 清理电铸实验现场。



图 32 电铸虚拟仿真实验铸件界面

2-9 实验结果与结论要求

- (1) 是否记录每步实验结果：是 否
- (2) 实验结果与结论要求：实验报告 心得体会 其他根据实验考核内容给出得分，60 分以上为通过。
- (3) 其他描述：

整体实验分为两个模块：电解加工虚拟仿真实验模块与电铸加工虚拟仿真实验模块。

电解加工虚拟仿真实验模块：主要让学生理解与掌握电解加工的原理、工件阳极与工具阴极的工作状态；掌握电解加工系统的基本组成及各部分的作用；熟悉电解加工的操作顺序并掌握针对特定加工要求如何设定/选定合适的加工参数；理解电解加工零件成形的方式。

电铸加工虚拟仿真实验模块：主要让学生理解与掌握电铸加工的原理、阳极与阴极基底的工作状态；掌握电铸加工系统的基本组成及各部分的作用；熟悉电铸加工的操作顺序并掌握针对特定加工要求如何设定/选定合适的加工参数；理解电铸加工零件成形的方式与批量作业特征。

2-10 考核要求

考核包括三部分内容：线上学习和练习、实验操作、实验报告。具体考核评分办法如下表。

表 1 考核评分细则

考核内容	分项内容	分项评分	权重
线上学习和练习	实验目的、内容、步骤浏览与学习	10	0.3

	工作原理认知与理解	10	
	电解加工实验系统搭建	20	
	电解加工实验操作与参数设定练习	20	
	电铸加工实验系统搭建	20	
	电铸加工实验操作与参数设定练习	20	
实验操作	电化学加工原理解	10	0.5
	电解加工实验全过程完成(系统搭建、参数设定、零件加工完成、实验现场清理)	30	
	电铸加工实验全过程完成(系统搭建、参数设定、零件加工完成、实验现场清理)	30	
	实验过程的完整程度	10	
	关键知识点考核(多项选择题 10 题、判断题 10 题)	20	
实验报告	实验目的、原理、实验步骤是否完整	30	0.2
	对实验结果的分析、讨论	50	
	实验心得	20	

2-11 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

本实验适用于机械设计制造及其自动化、机械工程、机械电子工程、材料成型等机械类或材料加工类专业的三或四年级学生以及机械工程相关专业的研究生，在专业课中开设有《机械制造技术基础》、《精密与特种加工技术》、《先进制造技术》等课程。

(2) 基本知识和能力要求

知识要求：选修本实验的学生必须学习过《机械制造技术基础》、《精密与特种加工技术》等课程，了解电化学加工的基本原理，掌握电化学加工的基础知识和规律，对电化学加工机床有一定的了解。

能力要求：掌握计算机基础知识，对仿真软件有一定的了解；对计算机仿真的作用和一般实现方法有一定程度了解。

2-12 实验项目应用及共享情况

- (1) 本校上线时间：2018年10月
- (2) 已服务过的本校学生人数：105人
- (3) 是否纳入到教学计划：是 否
(勾选“是”，请附所属课程教学大纲)
- (4) 是否面向社会提供服务：是 否
- (5) 社会开放时间：2019年12月，已服务人数：153人

《精密与特种加工技术》课程教学大纲

课程编号：041912300

总学时：32，其中授课学时：28，实验学时：4

学分数：2

适用专业：机械设计制造及自动化专业

任课学院、系部：机械与动力工程学院机械制造及自动化系

课程负责人：明平美

编制日期：2016年11月

一、课程简介

课程的性质：选修（限选）

课程的类别：专业课程

课程在专业人才培养中的地位和作用：

本课程是机械设计制造及自动化专业机械制造专业方向的专业选修课。要求学生了解常用特种加工方法的基本原理、工艺规律、应用场合、常用精密加工与超精密加工的加工环境要求、加工原理与方法及其主要应用。它是本专业方向学生专业知识的拓展和深化，以期能适应现代制造工程技术的发展。

二、课程教学的目标

通过本课程的学习，使学生掌握精密与超精密加工、热作用特种加工、电化学作用特种加工、机械作用特种加工、化学作用特种加工、增材制造和微米级制造技术等加工方法与技术类的基本概念、原理、应用与优缺点。重点培养学生针对特殊加工难题合理选用特种加工方法与手段的能力，并通过本课程的理论教学与实验训练达到以下目标：

1. 掌握精密与超精密加工的评判标准、加工机理与主要实现手段；
2. 掌握主要特种加工方法的主要能量来源和作用机理，熟悉常用特种加工方法的工作原理、主要优缺点和代表性应用场合；
3. 掌握代表性增材制造工艺的工作原理、主要应用场合及其工艺局限性；
4. 初步具备能根据应用需要选用合适特种加工方法的能力。

三、课程教学的基本内容及教学安排

第1章 绪论（2学时）

精密超精密加工原理、产生与特点（0.5学时）；特种加工的产生与特点（0.5学时）；精密与特种加工的分类（0.25学时）；精密与特种加工对机械制造工艺的影响（0.5学时）；精密与特种加工的地位与发展趋势（0.25学时）。

第2章 金刚石刀具超精密切削加工（3学时）

金刚石刀具超精密切削加工机理（1学时）；金刚石刀具的设计与刃磨（1学时）；金刚石刀具超精密切削工艺（1学时）。

第3章 超精密磨削加工与光整加工（2学时）

精密和超精密磨削加工机理与特点（0.5学时）；砂轮修整（0.5学时）；砂带磨削（0.25学时）；精密光整加工（0.5学时）；曲面精密加工（0.25学时）。

第4章 热作用特种加工（5学时）

电火花加工的基本原理、分类与应用（2学时）；电火花线切割加工（1.5学时）；激光加工（0.5学时）；电子束加工（0.5学时）；等离子体弧加工（0.5学时）。

第5章 电化学反应特种加工（2学时）

电化学反应加工基本原理、分类与特点（0.5学时）；电解加工（1学时）；电沉积加工（0.5学时）

第6章 化学作用特种加工（1学时）

化学铣切加工（0.25学时）；化学抛光（0.25学时）；化学镀加工（0.25学时）；光化学腐蚀加工（0.25学时）。

第7章 机械作用特种加工（2学时）

超声加工（1学时）；水射流加工（0.25学时）；离子束加工（0.5学时）；挤压珩磨加工和磁性磨料加工（0.25学时）。

第8章 复合能量作用特种加工（自学）

第9章 增材制造技术（3学时）

金属材料增材制造工艺技术（1学时）；非金属材料增材制造工艺技术（1学时）； 增材制造技术的应用与发展（1学时）。

第10章 微细加工与纳米加工（1学时）

微细加工方法与应用（0.5学时）；纳米技术与纳米加工（0.5学时）。

具体实验安排表如下：

序号	实验项目名称	实验内容	学时	实验类别	实验类型	每组人数	必 / 选做	已开 / 未开	说明	承担实验室
1	超声加工	1)超声加工系统的认识； 2)超声辅助磨削陶瓷工件。	2	专业	综合性	10	必做	已开		机械制造实验室
2	电化学加工	1)加工原理演示； 2)电铸制备镍工件； 3)电解加工微孔或微坑实验。	2	专业	综合性	10	必做	已开		机械制造实验室

四、本课程与其他课程的联系（先修后续关系）

本课程的先修课程有《机械制造技术基础》、《大学物理》等。

五、建议使用教材与教学参考书

[1] 明平美主编.《精密与特种加工技术》.电子工业出版社,北京,2017.

[2] 张建华主编.《精密与特种加工技术》.机械工业出版社,北京,2011

[3] 刘志东主编.特种加工.北京大学出版社,北京,2012

[4] 白基成主编.特种加工.机械工业出版社,北京,2014

六、教学方法与学习建议（重点、难点及后续自主学习建议）

重点和难点：

本课程的重点是：精密超精密加工的定义，特种加工的定义，特种加工的作用及对制造工艺的影响，电火花加工，激光加工，增材制造技术等。

本课程的难点是：

电火花加工的成形机理；电火花线切割加工编程；电化学加工机理等。

后续自主学习建议：

重点掌握常用精密加工工艺的应用范围及其局限性；主要学习常用特种加工方法的机理、适用范围以及优缺点，特别是各特种加工工艺能实现的主要工艺技术能力参数，如表面粗糙度，加工速度，加工精度等。

七、课程考核及成绩评定方式

本课程采用闭卷的考试方式，课程总成绩由课堂出勤成绩、平时作业、期末考试成绩和课程实验成绩构成，其中：课堂出勤成绩占总成绩的 10%，平时作业占总成绩的 20%，期末考试占总成绩 70%。

3. 实验教学项目相关网络及安全要求描述

3-1 有效链接网址

<http://39.98.62.95:8080/experiment/home>

3-2 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) 基于公用云服务器部署的系统，5~10M 带宽；
- 2) 基于局域网服务器部署的系统，10~50M 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，则提示排队等候，前一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。

3-3 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

- 1) 客户端操作系统，要求 Win7 及以上。
- 2) 需要从中心网站按照提示下载相关插件。

(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

3-4 用户非操作系统软件配置要求（如浏览器、特定软件等）

(1) 需要特定插件 是 否

（勾选“是”，请填写）	插件名称	否	插件容量	否
	下载链接			否

(2) 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）

3-5 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

操作系统：Win7/8/10 简体中文版

CPU 主频：2.0GHz 以上

显存容量：2GB，独立显卡

内存容量：8GB 以上

硬盘容量：1TB

显示器分辨率：1920×1080

输入设备：鼠标、键盘

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无

3-6 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

3-7 网络安全

(1) 项目系统是否完成国家信息安全等级保护 是 否

（勾选“是”，请填写） 级

4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及简要说明	<p>基于“理论虚拟化”一体化教学思路，开展了虚拟仿真实验的建设工作。电化学加工虚拟仿真实验项目弥补了现有教学中在加工成形规律、工艺装备等知识教学与能力培养方面的不足，也避免了真实实验带来的危险性。本实验从实验的原理开始，学生自行装配实验装置、设置工艺参数，根据实际步骤进行实验，通过对实验过程中关键实验步骤的操作和实验数据的理解，增强学生对实验原理、操作和数据处理的理解及运用。通过对仪器和装置的认识、实验装置的安装，了解关键数据的设置和理解方面。</p> <p>该实验项目不但能够解决多数高校由于缺少实验设备无法开设实验的难题，而且能够解决即使通过加工实验也很难获得的加工成形规律等难题，节约教学成本，同时利用学生随时随地的学习，增强了学习的自主性。图 33 为系统框架图。</p>

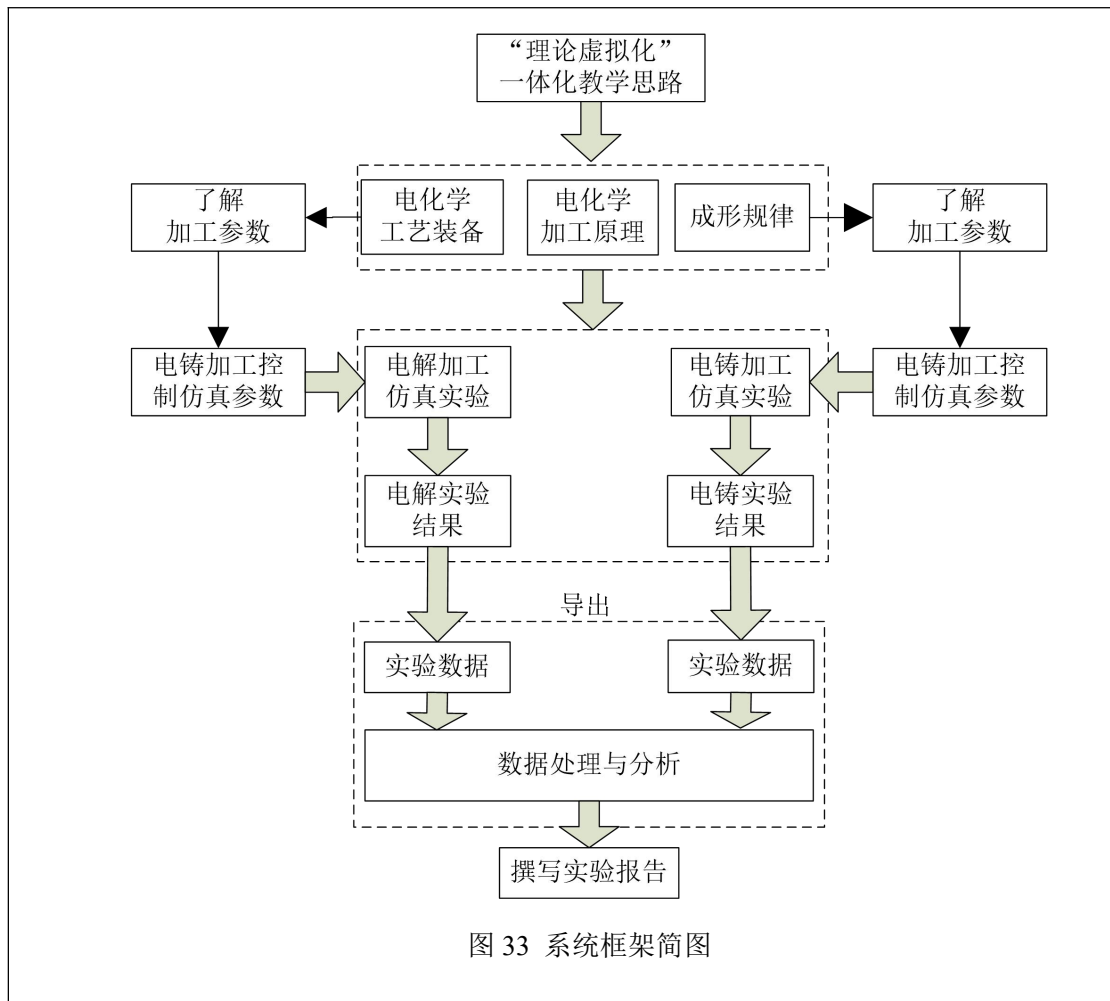


图 33 系统框架简图

实验教 学项目	开发技术	<input checked="" type="radio"/> VR <input checked="" type="radio"/> AR <input checked="" type="radio"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input checked="" type="radio"/> 二维动画 <input checked="" type="checkbox"/> HTML5 其他 <u>WebGL 技术</u>
	开发工具	<input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/> Maya <input checked="" type="radio"/> ZBrush <input checked="" type="radio"/> SketchUp <input checked="" type="radio"/> Adobe Flash <input checked="" type="radio"/> Unreal Development Kit <input checked="" type="radio"/> Animate CC <input checked="" type="radio"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input checked="" type="radio"/> 其他 <u>Photoshop</u>
	运行环境	服务器 CPU <u>六核</u> 、内存 <u>32</u> GB、磁盘 <u>100</u> GB、 显存 <u>0</u> GB、GPU 型号 <u>无</u> 操作系统 <input checked="" type="checkbox"/> Windows Server <input checked="" type="checkbox"/> Linux <input checked="" type="radio"/> 其他 <u>具体版</u>

		本_____ 数据库 <input type="checkbox"/> Mysql <input checked="" type="radio"/> SQL Server <input checked="" type="radio"/> Oracle 其他_____ 备注说明_____(需要其他硬件设备或服务器数量多于1台时请说明)_____
	项目品质 (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)	单场景模型总数: 900000 面; 贴图分辨率: 1024*1024; 动作反馈时间: 1 秒以内; 显示帧率: 高于每秒 30 帧; 刷新率: 高于 30Hz; 正常分辨率 1920*1080。

5. 实验教学项目特色

(体现虚拟仿真实验教学项目建设的必要性及先进性、教学方式方法、评价体系及对传统教学的延伸与拓展等方面的特色情况介绍。)

(1) 实验方案设计思路:

电解加工是《精密与特种加工技术》课程中教学单元之一,过去的教学方法主要是依靠课堂教学,而很少开设电化学加工实验,学生对它的认识仅仅停留在加工原理上,要掌握电解加工技术不仅需要了解它的加工原理,还要掌握成形规律,熟悉工艺装备等,仅仅靠课堂教学无法达到课程教学目的和要求。

为解决这些问题,基于“理论虚拟化”一体化教学思路,开展了虚拟仿真实验的建设工作。电化学加工虚拟仿真实验项目弥补了现有教学中在加工成形规律、工艺装备等知识教学与能力培养方面的不足,也避免了真实实验带来的危险性。该实验项目不但能够解决多数高校由于缺少实验设备无法开设实验的难题,而且能够解决即使通过加工实验也很难获得的加工成形规律等难题,节约教学成本,同时利用学生随时随地的学习,增强了学习的自主性。

本实验从实验的原理开始,学生自行装配实验装置、设置工艺参数,根据实际步骤进行实验,通过对实验过程中关键实验步骤的操作和实验数据的理解,增强学生对实验原理、操作和数据处理的理解及运用。互动环节主要设置在仪器和装置的认识、实验装置的安装,已经关键数据的设置和理解方面。最后,设置了对实验过程的一些思考题,以检验学生的学习效果。

(2) 教学方法创新:

在教学方式上,重点是能够让学生发挥实验的主动性。在实验中,学生可以设置不同的加工参数、选择加工类型等进行实验。学生还可以充分利用它研究电化学加工规律,辅助解决电解加工中的阴极设计、加工参数选择实际问题,获得解决实际问题的能力。

(3) 评价体系创新:

虚拟仿真实验集“教”“练”“考”于一体,通过对视频演示实验操作流程,让学生初步了解正确实验操作步骤。实验允许学生反复练习实验流程,对理论知识加强巩固。最后,通过实验过程中其实验操作的正确率、实验时间和生成的实验报告来检测学生掌握实验的程度。

(4) 对传统教学的延伸与拓展:

虚拟仿真实验能够帮助学生做好充足的课前准备,完成自主预习。学习本实验的课程内容后,可帮助学生熟悉实验设备和装置,加深实验原理的理解,并解决学习中可能出现的一些疑惑。同时,比较逼真的画面体验也可以增强学生学习的兴趣和主动性,激发学生学习先进制造技术的兴趣。

6. 实验教学项目持续建设服务计划

(本实验教学项目今后5年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

(1) 项目持续建设与服务计划:

在今后5年中,根据目前本项目已有资源情况,使仿真软件功能、实验内容、教学指导书、教学视频等资源更加丰富。具体的建设内容有:

(1) 整合两个模块的资源,使两个模块的功能划分更加合理;进一步扩展电化学加工综合仿真实验系统的功能。在仿真共享平台上建立统一的应用界面,使各模块的进入更加快捷方便。建立实验数据库,使用户的实验数据、实验结果数据、仿真软件中的使用的参数等数据能够以统一的形式存储。

(2) 使电化学加工成形仿真模块的功能标准化,进一步丰富仿真的对象,建立多个仿真应用模块;进一步修改模块中电解加工参数输入接口和几何模型数据接口,使模块各个功能的操作更加方便。

(3) 扩展特种加工技术中的其他加工虚拟仿真实验,如能束加工虚拟仿真、超声加工虚拟仿真、3D打印虚拟仿真、MEMS加工虚拟仿真和纳米加工虚拟仿真实验,形成一系列先进制造加工技术虚拟仿真实验。

(2) 面向高校的教学推广应用计划:

(1) 2019-2022年,向国内高校开放50%的教学资源。根据本实验项目的试用结果,搜集校内学生和教师的试用信息,对实验内容、仿真软件、实验指导书等教学资源进行改进。

(2) 2023-2025年,向国内高校开放系统中所有教学资源,借助江苏省级虚拟仿真

实验平台把本项目的资源向国内高校进行开放，同时搜集同行的使用意见，再对实验内容、仿真软件、实验指导书等教学资源进行改进。

(3) 面向社会的推广应用计划：

2023 年开始，借助于国家虚拟仿真实验平台向国内外高等院校开放，向国内公司和企业开放系统中的全部资源。

7. 知识产权

软件著作权登记情况	
软件著作权登记情况	<input checked="" type="radio"/> 已登记 <input type="checkbox"/> 未登记
完成软件著作权登记的，需填写以下内容	
软件名称	
是否与项目名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
著作权人	
权利范围	
登记号	

8. 诚信承诺

本人承诺：所申报的实验教学设计具有原创性，项目所属学校对本实验项目内容（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项目的一切资源）享有著作权，保证所申报的项目或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

本人已认真填写、检查申报材料，保证内容真实、准确、有效。

实验教学项目负责人（签字）：

年 月 日

9. 附件材料清单

1. 政治审查意见（必须提供）

（本校党委须对项目团队成员情况进行审查，并对项目内容的政治导向进行把关，确保项目正确的政治方向、价值取向。须由学校党委盖章。无统一格式要求。）

《电化学加工虚拟仿真实验》基于“理论虚拟化”一体化教学思路，弥补了现有教学中在加工成形规律、工艺装备等知识教学与能力培养方面的不足，也避免了真实实验带来的危险性。本实验从实验的原理开始，学生自行装配实验装置、设置工艺参数，根据实际步骤进行实验，通过对实验过程中关键实验步骤的操作和实验数据的理解，增强学生对实验原理、操作和数据处理的运用。通过对仪器和装置的认识、实验装置的安装，了解关键数据的设置和理解方面。该实验项目不但能够解决多数高校由于缺少实验设备无法开设实验的难题，而且能够解决即使通过加工实验也很难获得的加工成形规律等难题，节约教学成本，同时利用学生随时随地的学习，增强了学习的自主性。

经审查，该项目内容符合国家法律，没有违规内容，政治导向正确。项目负责人和团队成员政治立场坚定，拥护中国共产党的领导，认真学习马列主义、毛泽东思想、邓小平理论，积极实践“三个代表”重要思想，注重提高政治理论素质和水平，思想品德良好，热爱教育事业，在教书育人和日常生活中始终以教育工作事业为中心的工作导向，能坚持正确政治方向和价值取向，具有坚定的科学世界观和社会主义信念。

中共河南理工大学委员会

2019年9月2日

2. 校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为项目有关学术水平、项目质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由项目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。）

10 申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“国家虚拟仿真实验教学项目”，学校将严格贯彻《教育部高等教育司关于加强国家虚拟仿真实验教学项目持续服务和管理有关工作的通知》（教高司函〔2018〕56号）的要求，承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放，并提供教学服务不少于5年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

（其他需要说明的意见。）

主管校领导（签字）：

（学校公章）

年 月 日