

# Study of “Design and Manufacture of MEMS” Virtual Experimental Teaching

Jian Dong, Li Zhang, Yanli Jin, Zhijian Long, li Sun

The MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Zhejiang University of Technology,  
Hangzhou Zhejiang  
Email: sunli2006312@qq.com, zjutdj@zjut.edu.cn

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2018; published: May 17<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper describes the teaching philosophy, content and method of “*Design and manufacture of MEMS*” virtual experimental teaching, and innovatively puts forward the construction scheme of virtual experimental platform. Based on LabVIEW which owns powerful network communication function, we exploit five virtual experiments. One school year educational practice contrastively proves that “*Design and manufacture of MEMS*” virtual experimental teaching system can better motivate students’ positivity, initiative and innovativeness, and enhance their understanding level. Virtual experimental teaching really has broad application prospect in contemporary diversity teaching field.

## Keywords

Design and Manufacture of MEMS, Virtual Experimental Teaching, LabVIEW

---

# 《微机械设计与制造》虚拟实验教学研究

董 健, 张 利, 金焱立, 龙芝剑, 孙 笠

浙江工业大学, 机械制造及自动化教育部重点实验室, 浙江 杭州  
Email: sunli2006312@qq.com, zjutdj@zjut.edu.cn

收稿日期: 2018年4月28日; 录用日期: 2018年5月10日; 发布日期: 2018年5月17日

---

## 摘 要

本文详细阐述了《微机械设计与制造》课程虚拟实验教学的教学理念、教学内容及教学方法, 创新性地提出了虚拟实验教学平台的构建方案。基于拥有强大网络通信功能的LabVIEW软件平台, 我们开发了5个虚拟实验用于实验教学。经过一学年教学实践对比证明, 《微机械设计与制造》虚拟实验教学更能从

声形方面激发学生学习的积极性、主动性和创新性,增强学生对课程的理解,在当代多元化教学领域中具有广阔的应用前景。

## 关键词

微机械设计与制造, 虚拟实验教学, LabVIEW

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 虚拟实验教学

虚拟实验教学是高等教育机构和研究中心的重要组成部分,它在引导学生建立基础实验研究能力[1] [2] [3]、开发创新性实验研究理念方面[4] [5]具有不可替代的地位。

教导者在计算机系统中通过虚拟-现实技术实现各种虚拟实验教学项目,根据实验数据和经验建立数据库,借助于计算机、多媒体、仿真软件和虚拟现实等技术,在计算机上营造出能够代替传统实验操作环节的相关操作环境,实验者可以像在真实的实验环境中一样完成各种实验项目,实现预定的实验目标[6]。虚拟实验教学是基于当代功能日益成熟的计算机技术譬如 Java + VRML、ActiveX、FLASH、LabVIEW 而建立起来的一种教学手段,具备即时启动和停止、人机交互、界面友好、资源高度共享等特点,使用者能够重复学习、实验和研究而不消耗资源,于此基础,使用者能够不断增强对课程的理解,为实际实验研究不断积累经验。

## 2. 虚拟实验教学的可行性分析

目前,虚拟实验教学已经拥有稳固、便捷的实现技术,例如 Java + VRML、ActiveX、FLASH、LabVIEW 等[7]。近些年,国内外知名学校、研究机构已经建立起网络虚拟教学实验室,发展迅速。在国内,随着国家资金的不断投入,有关虚拟实验教学类基金项目不断成立,虚拟实验教学发展快速、稳定,发展前景十分可观。

虚拟实验教学在当代科研教学中的可行性如下:

一、日益简单化、智能化和多功能化的虚拟实验工具开发为虚拟实验教学提供了优良的条件。早期的虚拟实验教学由于各种条件的限制,往往一个简单的虚拟实验教学平台的开发会花费研究人员大量的心血,而且这些虚拟实验教学平台还不能达到预想中的效果。随着虚拟实验开发工具的日益简单化、智能化和多功能化,进行复杂虚拟实验教学平台的开发不再是一件可望而不可即的事情,虚拟实验系统也越来越具有交互性和功能性。相信随着计算机技术的日益发展,将会出现更多、更好、更实用的虚拟实验教学平台开发工具。

二、数据库技术的不断完善为虚拟实验教学提供强大的技术支撑。一个功能完善的虚拟实验教学系统包括学生信息数据、实验知识数据、实验对象资料库和实验过程参数数据等庞大的数据体系,需要强大的数据库支持。目前,数据库种类繁多,其中,大中型的数据库系统如 oracle、SQL Sever、Sybase 和 DBZ 等,它们各具特色,可以满足不同的需求。因此,数据库建设也不再是难题。

三、前人经验给我们的启发,为我们顺利建立虚拟实验创造了有利条件。虚拟实验概念的提出至今仅二十余年,但其发展迅速,前景广阔,各国均在大力开发,并且已经取得了一定进展。目前,虚拟实

实验室的建设在发达国家已经相当普及,国外的一些大学和科研机构已组建了自己的远程虚拟实验室。近几年,我国对虚拟实验的建设也非常重视,一些院校与科研机构也开发了一些比较成熟的虚拟实验室。这些都为优质虚拟实验的建立创造了良好的条件。

以《微机械设计与制造》课程为例,微电子机械系统是建立在机械设计,微电子设计,微机械制造工艺和微纳器件检测基础上的一种高端前沿术。由于微机械设计与制造实验室建立及其实验过程中所需成本高、安全性能要求高等限制,很多高校目前还不具备建立微机械设计与制造实验室的良好基础。我们在进行这类科学研究的时候,往往需要前往特定的研究院和研究机构进行实验研究,需要花费巨大的人力、物力和财力,并且空间跨度过大,一次实验便需要做好相当充分的实验计划和实验准备,所需精力和时间与预期成果往往不成比例。因此,建立虚拟实验室,进行虚拟实验教学,以期解决各种不便和巨大代价,对于《微机械设计与制造》课程教育而言具有普遍教育意义的重要性和良好的可行性。

### 3. 虚拟实验教学的优势及意义

相比于传统实验教学,虚拟实验教学有其显著优越点。一、不受时间、地点限制,使用者可随时随地通过个人电脑进行虚拟实验学习;二、交互性更强,虚拟实验教学因具备网络通信功能,使用者可与不同地域的使用者和研究人员进行信息交流,分享经验;三、经济性与安全性,虚拟实验教学因其虚拟性,不存在物质消耗,也不会因为实验人员操作失误或其他不可预见性变化导致实验失败,造成经济损失,甚至发生安全事故;四、学习自主化、创新化,使用者可根据自身情况安排实验进程,任意调整实验参数,探索实验原理,验证理论知识[8]。虚拟实验教学以传统实验教学为模板,以现代化信息网络软件为基础,有其独特的优势,对推动教学改革,强化教学水平,健全教学体系有着重要意义[9]。

一、推广虚拟实验教学对推动理论与实践教学改革有重要意义。虚拟实验教学是应用计算机虚拟现实、仿真等技术构造虚拟实验环境进行实验教学的一种新型教学模式。这种教学模式是以计算机网络为中心,通过将虚拟仪器与网络联接,从而实现对数据的采集和分析。实物仿真类的虚拟实验教学主要是针对仪器设备操作等目的而开发,让学生可以身临其境地通过虚拟实验教学平台虚拟的仪器设备完成实验学习任务,通过虚拟实验教学平台,学生可以方便直观地理解并验证理论知识,做到理论与实践相结合。因此,建立起高水平的虚拟实验教学平台并推广到理论与实践教学中可以提高我们的教学水平,对教学改革具有重要意义。

二、建设虚拟实验教学平台可以完善传统教学的不足。例如《微机械设计与制造》课程是一门主要介绍微电子机械系统基本工作原理和微电子机械系统产品的设计、仿真、制造和封装方法的课程。它要求学生具有较强的设计能力和独立分析能力,这对该门课程的实验、实践教学提出了更高的要求。该课程实践部分往往需要老师组织学生前往特定的研究机构进行实验,受到了场地、实践以及人力物力等因素的制约,在很大程度上影响了教学工作。因此,建设例如《微机械设计与制造》课程的一系列虚拟实验教学平台可以完善传统教学的不足之处,有效解决传统教学模式中存在的实际问题,学生可以在学习理论知识的同时,通过虚拟实验教学平台进行虚拟实验,提高动手实践能力,为将来研究和工作做好充分准备。

三、应用虚拟实验教学平台可以提高课程教学质量。目前传统教学课程内容太偏重理论,与实践联系太少,以讲授为主的课程仍占主流,增强课程的实践性,强化理论与实践的联系是提高课程教学质量的重中之重。《微机械设计与制造》课程是一门实践操作性要求很高的课程,特别注重学生对知识综合运用能力以及实践操作的培养,在传统教学方式下,学生往往只能走马观花,无法对所学的理论知识产生完整、系统的认知。而且,学生在实践过程中难免会出现操作错误,这对传统教研教学模式的安全性提出了挑战。因此,虚拟实验教学这种安全、系统的教学方法既可以实现传统实验的教学目的,同时又最大程度上地允许学生在实践过程中可能出现的错误操作,并且,学生可以尽可能地发挥其独立思考

和分析能力,实现其个性化的实验计划。总之,虚拟实验教学平台可以突破传统实验室教学的限制,实现资源的最大化、安全性和共享性。因此,应用虚拟实验教学平台可以提高我们的教学质量。

#### 4. 微机械设计与制造虚拟实验平台

微电子机械系统是近些年来发展起来的一种以微纳米技术为基础，涉及到机械、电子、化学和生物等多种学科的新型高科技技术。《微机械设计制造》课程主要介绍微电子机械系统基本工作原理和微电子机械系统产品的设计、仿真、制造和封装的方法。其设计是一种基于二维半空间的层叠设计过程；其制造能力取决于微制造工艺水平。鉴于当前学校实验教学的条件和资源，无法进行微电子机械系统产品制造的实例实验教学，我们借助虚拟网络技术针对《微机械设计制造》课程设计虚拟实验教学系统，建立了虚拟实验教学平台，对学生进行虚拟教学。本虚拟实验教学系统包括以下基本内容：1) 版图设计；2) 三维建模；3) 机电耦合仿真；4) 硅各向异性原子级腐蚀仿真；5) 虚拟制造，对提高学生学习自主化、提高学生创新能力、培养学生实践和沟通合作能力具有重要意义。

#### 4.1. 虚拟实验教学平台搭建方案

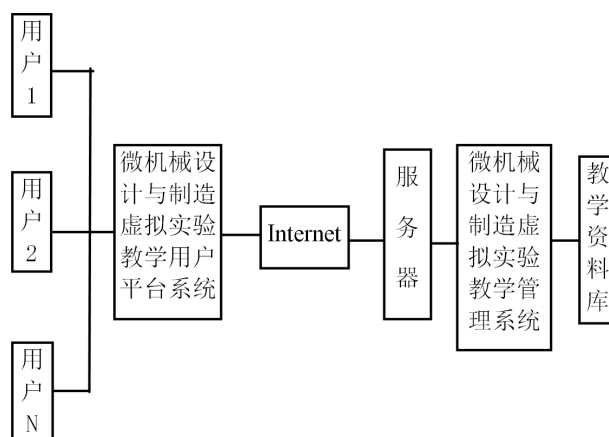
如图 1 所示,本虚拟实验教学平台由实验教学资料数据库、管理系统和用户平台系统构成;使用者可通过网络访问实验教学平台,进行《微机械设计制造》课程的设计学习、制造学习和知识交流。

通过 LabVIEW 简洁明了的流程框图式 G 语言特色, 建立亲近友好的人机界面, 使用者可自由控制交互, 选择要进行的实验项目。平台主界面由用户登录界面引入, 有演示型实验和仿真型实验两个选项, 每个选项下又都有版图设计、三维建模、机电耦合仿真、硅各向异性原子级腐蚀仿真和虚拟制造共五个子实验。其中演示型实验为各个子实验的教学视频, 仿真型实验为链接做各个子实验所需的专业软件工具, 方便使用者边学边用。图 2 和图 3 分别是实验系统的主前面板和主程序框图。

## 4.2. 实验一：版图设计

虚拟实验教学平台以双梁-岛结构微机械加速度传感器的工艺过程为实例,构建了一个微机械设计、仿真及制造的虚拟实验平台。首先根据需要设计特定的版图,虚拟实验平台在演示型实验中详细引导并解释了如何利用 BluePrint 软件进行版图设计的流程,使用基于单元的多层版图编辑精确绘制器件结构版图,操作简单,与 CAD 类似,可通过脚本编辑改变器件参数,快捷、方便地修改器件结构。

图4为以双梁-岛结构微机械加速度传感器为例的版图设计演示型实验界面,画有图层衬底(黄色线条)、



**Figure 1.** The formation of virtual experimental teaching platform

图 1. 虚拟实验教学平台构成

压阻条(深蓝色线条)以及导线(浅蓝色线条)。

### 4.3. 实验二：三维建模

虚拟实验平台设计好版图后，在 3D-builder 软件中导入已经设计好的版图，根据版图建立实体，并

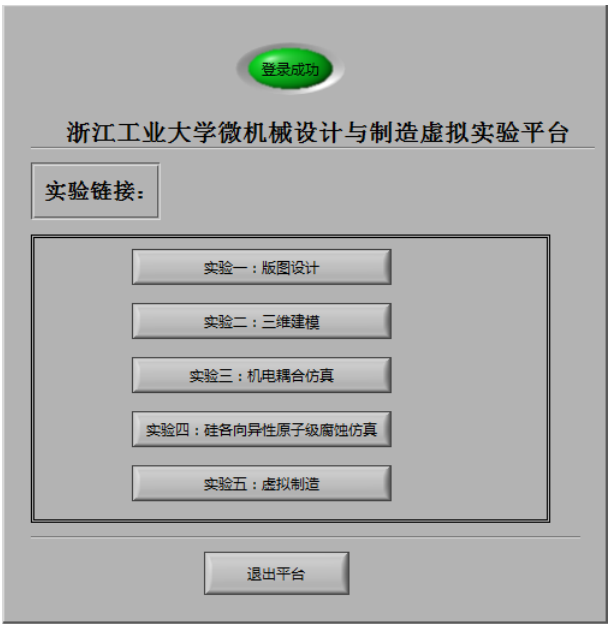


Figure 2. The main front panel of virtual experimental platform  
图 2. 虚拟实验平台主前面板

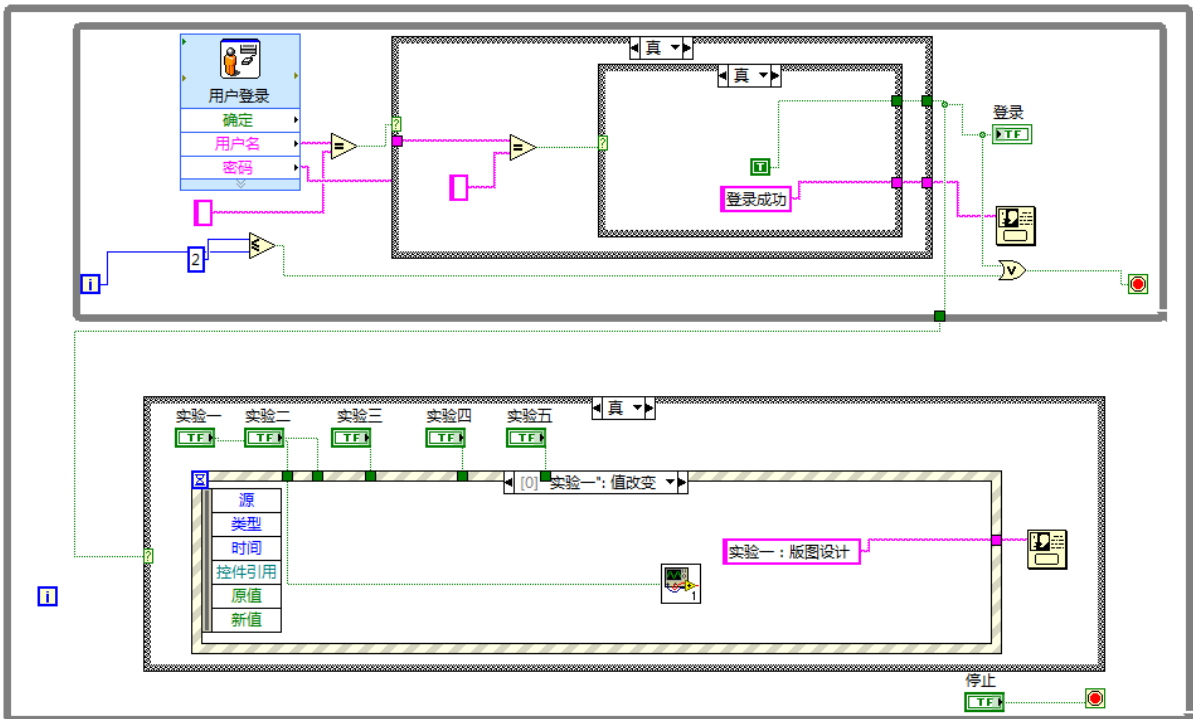


Figure 3. The main program chart of virtual experimental platform  
图 3. 虚拟实验平台主程序框图

对实体指定部分进行网格细化，如蛛网式、拉链式和散发式等，自动验证网格质量与正确性，为对该实体机电耦合仿真实验做好铺垫。

图 5 为以双梁 - 岛结构微机械加速度传感器为例的版图设计演示型实验界面，设计各层版图的厚度，

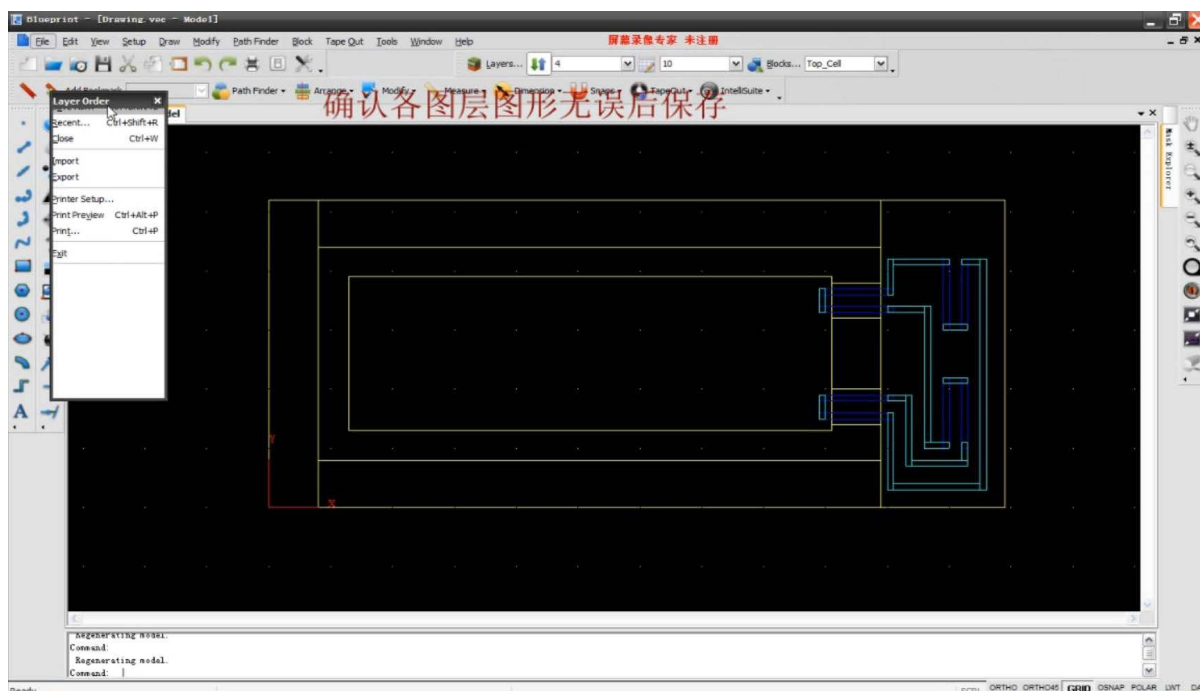


Figure 4. The demonstration experiment interface of layout design

图 4. 版图设计演示型实验界面

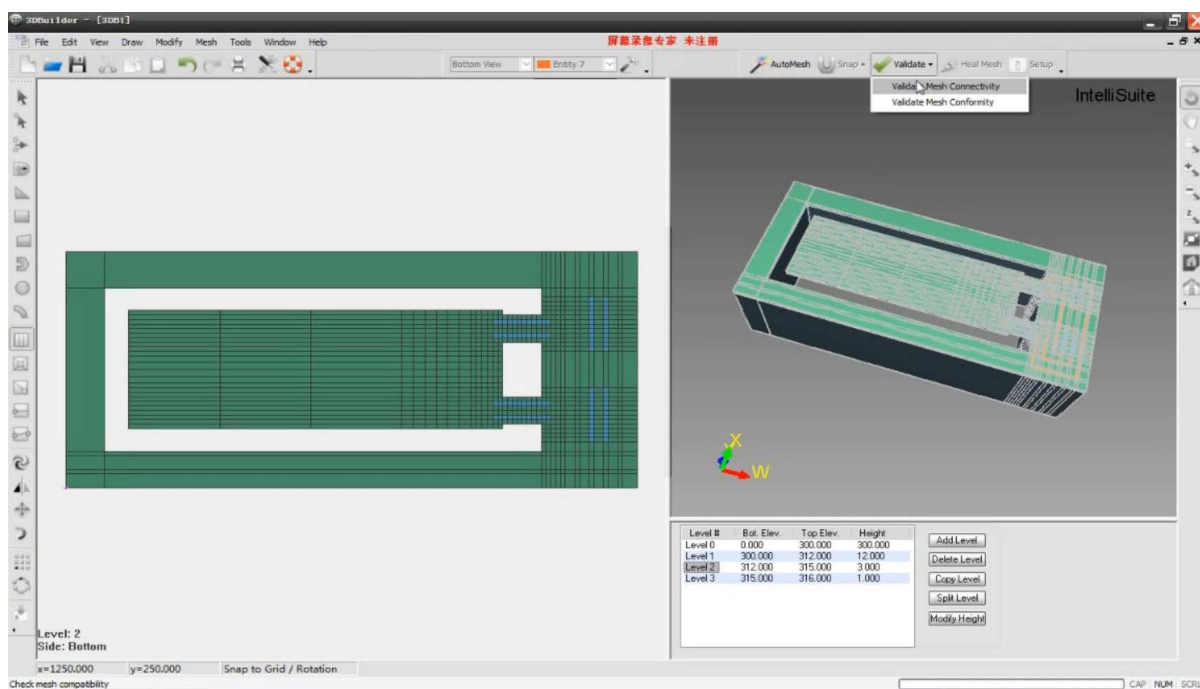


Figure 5. The demonstration experiment interface of 3D modeling

图 5. 三维建模演示型实验界面

建立了双梁-岛结构的三维模型；在此基础上对其进行了适宜的网格细化，并验证网格质量与正确性。

#### 4.4. 实验三：机电耦合仿真

虚拟实验平台在制作好实体并合理细化网格后，在 Thermo Electro Mechanical Analysis 软件中导入实体，进行仿真对象参数设置，设置好各层材料及定义材料属性，加载边界条件并加载载荷进行仿真[10]，查看位移量和应力分布；加载温度和电势进行电学仿真，查看压阻上电势分布和网络节点处的电势。

图 6 为以双梁-岛结构微机械加速度传感器为例的机电耦合仿真结果的演示型界面。其中图 6(a)加载载荷后的仿真演示型实验界面，图 6(b)为以双梁-岛结构微机械加速度传感器为例加载温度和电势后的仿真演示型实验界面。

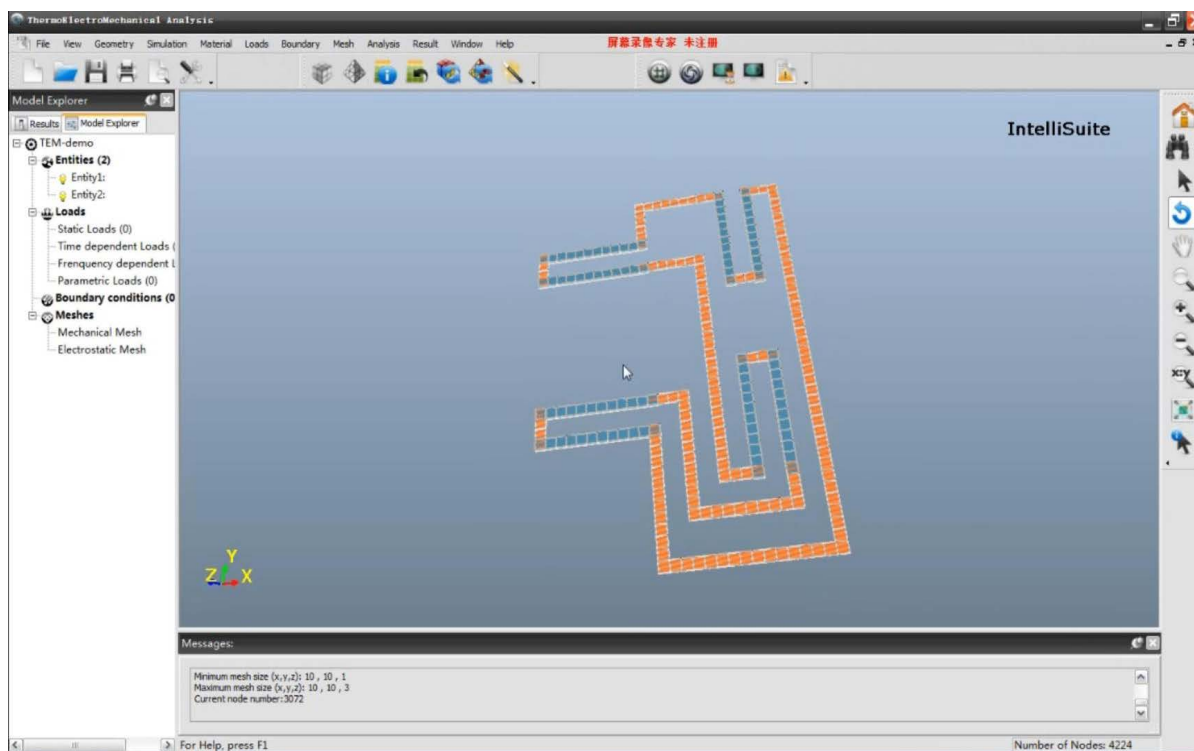
#### 4.5. 实验四：硅各向异性原子级腐蚀仿真

虚拟实验系统利用 IntelliEtch 软件作硅各向异性原子级腐蚀仿真。首先确认腐蚀采用的版图，选择指定晶向的单晶硅片，调整版图所在位置，确认光刻胶在版图所在区域，选择腐蚀液和腐蚀深度，逐步增加腐蚀深度。

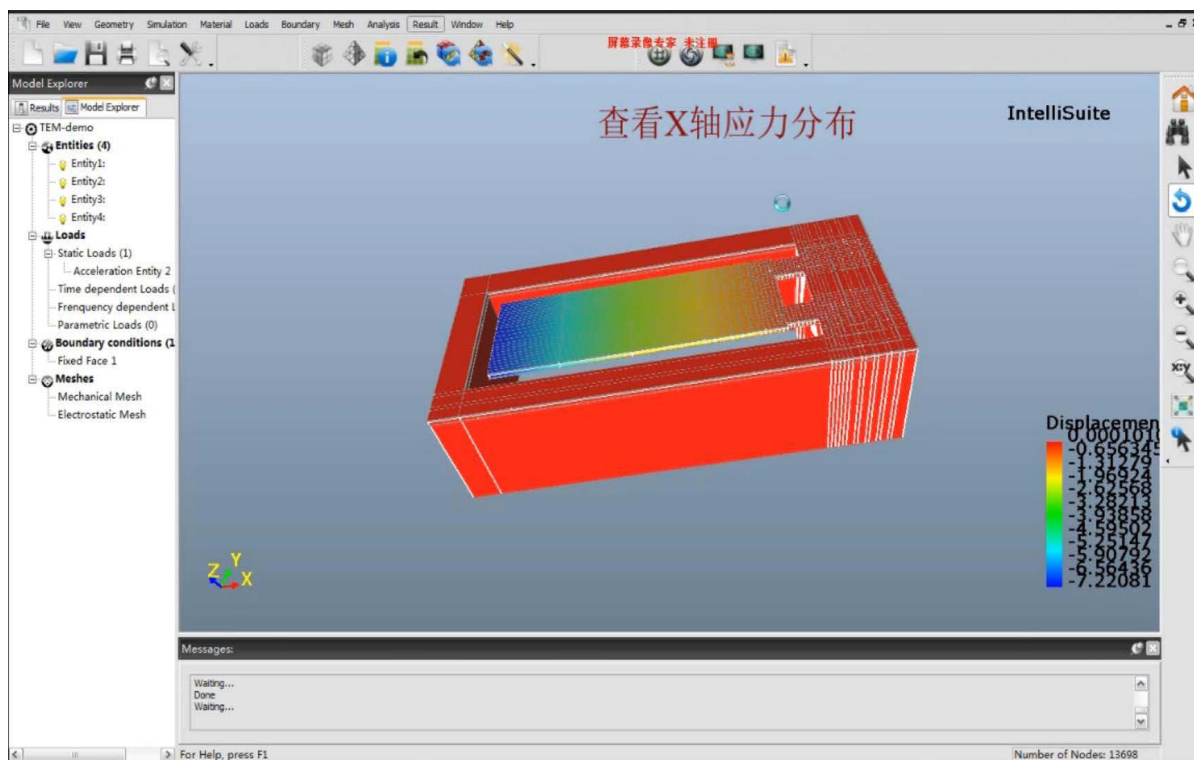
图 7 所示为以双梁-岛结构微机械加速度传感器为例的硅各向异性原子级腐蚀结果，腐蚀出底部呈类金字塔状的空间结构。

#### 4.6. 实验五：虚拟制造

虚拟实验系统利用 IntelliFAB 软件做虚拟制造实验。虚拟实验系统以双梁-岛结构微机械加速度传感器的工艺过程为实例，模拟出双梁-岛结构微机械加速度传感器的整个制造过程，包括薄膜淀积、离子注入、干法刻蚀、湿法刻蚀、硅玻璃键合等。最后虚拟实验系统给出上述工艺过程后的器件的三维图形，供用户体验器件工艺过程的正确性。



(a) 加载载荷后的仿真结果



(b) 加载温度和电势后的仿真结果

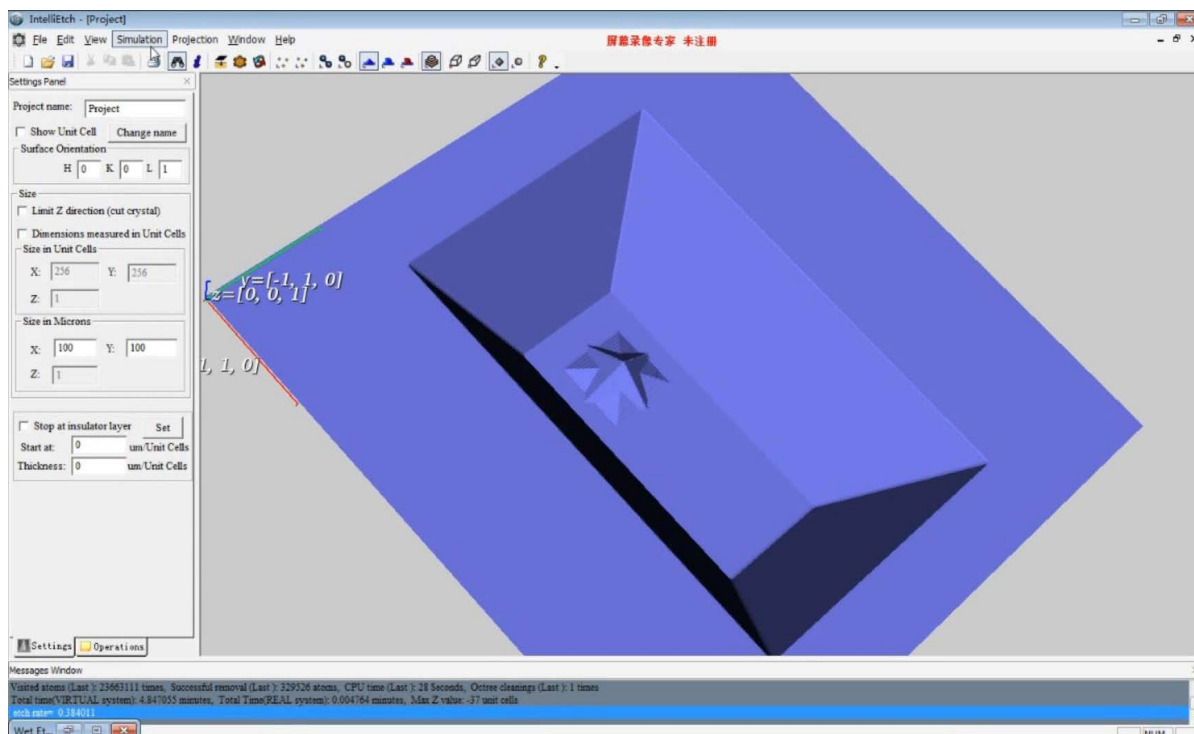
**Figure 6.** The demonstration experiment interface of electromechanical coupling simulation**图 6.** 机电耦合仿真演示型实验界面**Figure 7.** The demonstration experiment interface of anisotropic atomic corrosion simulation of silicon**图 7.** 硅各向异性原子级腐蚀仿真演示型实验界面

图 8 所示为以双梁 - 岛结构微机械加速度传感器为例的虚拟制造演示型实验界面。

## 5. 效果评价

教学评价[11]是一个评价判定课程教学实际效果的过程,收集教学效果数据,分析和评判教学活动过程的价值。当代教育重教学过程而轻教学效果评价,因此建立完整的教学效果评价体系是当前教育工作的首要之事。

以《微机械设计制造》课程为例,我们建立了基础教学效果评价体系,主要包括教师对学生知识掌握程度、对学生在虚拟实验平台上进行虚拟实验的操作独立性和创新性的教师评价,以及学生兴趣程度的自我评价,评价分值标准采取百分制。我们统计了传统实验教学模式下和增加虚拟实验教学后课程教学效果评价的评价结果,分别进行了一学期,最后做平均值处理。图 9 为传统实验教学下的教学效果评价结果和试行一学期虚拟实验教学后的教学效果评价结果的对比图。

结果显示,学生接受虚拟实验教学比接受传统实验教学更能增强理论知识的理解,更具实验操作独立性和创新性,并且对课程更感兴趣。由此可见,虚拟实验教学确实有其独到之处,作为传统实验教学的补充,它能够提升学生对课程的兴趣,增强理论知识的理解程度、实验操作的独立性和创新性。传统实验教学和虚拟实验教学两者相辅相成,相互促进,是提高当代教学水平行之有效的方法。

## 6. 总结

虚拟实验教学是当代教育研究的重要组成部分,它不能完全代替传统实验教学。但作为传统实验教学的补充,虚拟实验教学极大地促进了实验教学,也解决了虚拟网络教学中实验教学的瓶颈。虚拟实验教学是由计算机软硬件组成的虚拟环境,让使用者通过自由交互作用获得身临其境的体验,具有虚拟性、实践性、灵活性、多样性和开放性,虚拟实验教学基本可以解决我国当前传统实验教学设备和资金不足、缺乏创新,以及存在不可预测性和危险性等问题,在教育研究和科学研究领域中具有广阔的应用前景[12][13]。

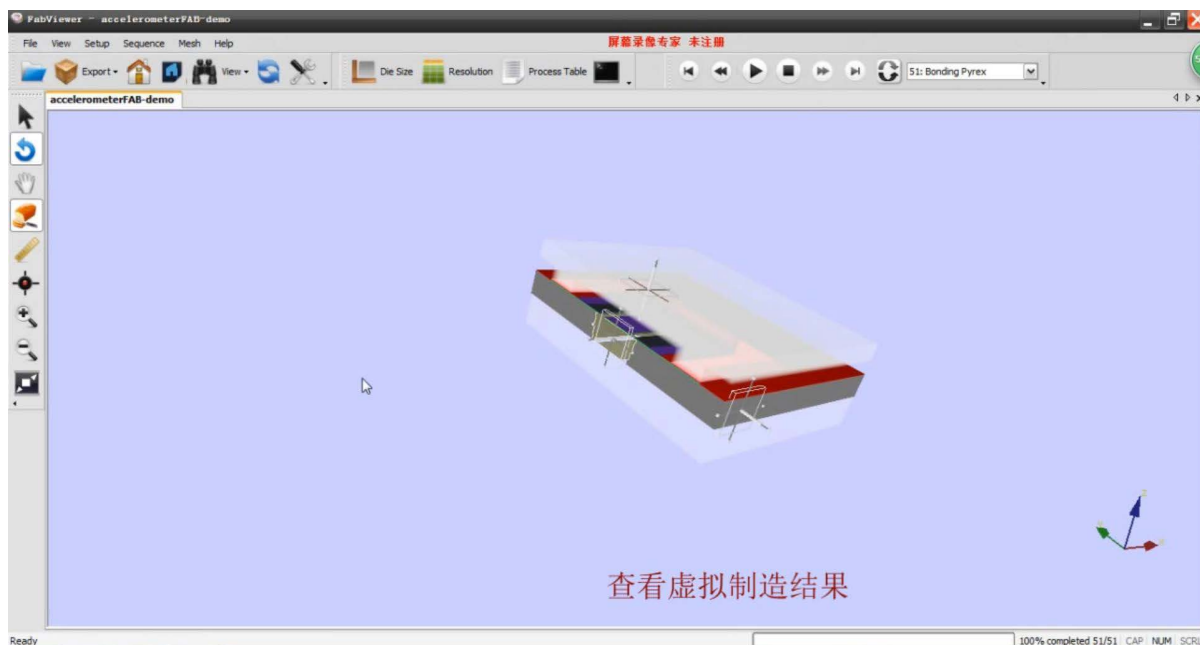
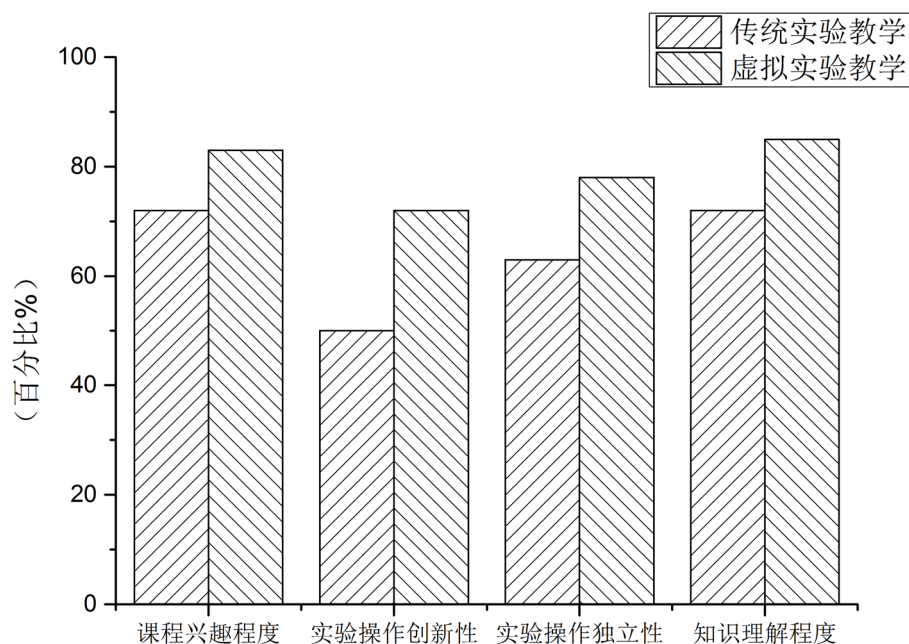


Figure 8. The demonstration experiment interface of virtual manufacturing  
图 8. 虚拟制造演示型实验界面



**Figure 9.** The teaching effect evaluation comparison of traditional experimental teaching and virtual experimental teaching

**图 9.** 传统实验教学与虚拟实验教学的教学效果评价对比

《微机械设计制造》虚拟教学借助虚拟实验教学实验平台的虚拟性、实践性、创新性和交互性，运用了软件技术、多媒体技术和网络技术创造了良好的学习环境，激发了学习者的求知欲，培养了学习者自主分析、解决问题的能力，加深了学习者对微电子机械系统的理解。采用传统实验教学和采用虚拟实验教学的教学效果比照结果表明学生的专业知识水平、实验操作的实践能力和创新能力都得到了提高。

未来，我们将进一步补充和完善该虚拟实验平台的建设，不断提高《微机械设计制造》课程的教学质量。

## 基金项目

浙江工业大学课堂教学改革项目(KG201502)。

## 参考文献

- [1] 廖旭梅. 以学习共同体模式促进大学生自主学习——基于文华学院学习指导工作坊的探索[J]. 中国高教研究, 2017(1): 91-94.
- [2] 王丽萍. 基于网络的虚拟实验教学系统研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2014(3): 213-214.
- [3] 刘继青, 王孙禺, 鄢一龙. 探寻高等教育强国的发展之路——中国高等教育现代化发展道路的历史与未来[J]. 中国高教研究, 2017(1): 21-26.
- [4] 凌轩, 刘江涛, 陈赛克, 等. 机械工程测试技术虚拟实验教学平台开发[J]. 装备制造技术, 2014(9): 224-226.
- [5] 潘雪涛, 邹华芝, 蔡建文, 等. 创新虚拟实验教学模式培养自主学习能力[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(11): 72-76.
- [6] 陈昌皓. 虚拟实验教学系统应用与研究[J]. 现代商贸工业, 2013(13): 136-137.
- [7] 冯玉帆, 魏方华, 马志研, 等. 虚拟实验教学软件的设计与开发[J]. 软件导刊(教育技术), 2013, 12(1): 89-90.
- [8] 李修荣. 基于虚拟现实技术的网络虚拟实验教学系统构建[J]. 计算机光盘软件与应用, 2011(3): 158.
- [9] 何克抗, 李文光. 教育技术学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2002: 6-8.

- 
- [10] 洪俊, 顾成军, 廖东斌, 等. 动荷载虚拟实验教学平台的开发与实践[J]. 教育教学论坛, 2015(14): 254-255.
- [11] 温泉, 孙晓颖, 刘玉娟, 等. 虚拟实验室教学评估指标体系的设计[J]. 实验室研究与探索, 2010, 175(10): 309-312.
- [12] 孙燕莲, 文福安. 虚拟实验教学的探索与实践[J]. 现代教育技术, 2009, 19(4): 131-132.
- [13] 高东锋, 王森虚. 拟现实技术发展对高校实验教学改革的影响与应对策略[J]. 中国高教研究, 2016(10): 56-59.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-729X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ae@hanspub.org](mailto:ae@hanspub.org)