

虚拟仿真实验教学课程 建设与共享应用规范

(试用版 • 2020)

虚拟仿真实验教学创新联盟技术工作委员会

目 录

1	概述	6
2	实验设计原则.....	8
2.1	基本原则.....	8
2.2	选题必要性.....	8
2.3	选题粒度.....	9
2.4	实验设计层次及内容要求	9
2.5	实验内容构成要素	10
3	仿真模型的建立与设计实现	12
3.1	实验内容选择和模型建立	12
3.2	仿真模型设计和技术实现	13
3.3	调试修改.....	14
4	实验场景呈现.....	15
4.1	模型的制作要求.....	15
4.2	场景呈现的要求	16

5	实验过程设计.....	18
5.1	实验交互操作.....	18
5.2	实验过程现象.....	19
5.3	实验结果.....	20
5.4	知识帮助与指导.....	21
5.5	操作指引.....	21
6	实验考核设计.....	22
6.1	考核方式与方法.....	22
6.2	考核内容.....	23
6.3	考核结果评分.....	23
7	实验记录与分析.....	25
7.1	输入信息.....	25
7.2	输出结果.....	25
7.3	操作记录.....	26
7.4	结果保存与恢复.....	26

8	实验报告	28
8.1	实验报告基本信息	28
8.2	学生实验报告	28
8.3	实验评价报告	28
9	教学支持与服务	30
9.1	实验指导文件	30
9.2	在线教学指导	31
9.3	在线技术支持	31
10	共享应用与用户体验	33
10.1	系统性能要求	33
10.2	连通访问要求	34
10.3	用户体验要求	34
10.4	技术接口接入	36
10.5	教学应用规范	37
10.6	共享应用评价	37

11	网络安全与知识产权	39
11.1	网络安全要求	39
11.2	知识产权要求	39
11.3	社会开放承诺	40
12	研发技术规范	41
12.1	技术特征	41
12.2	系统组成	43
12.3	研发流程	46
12.4	技术架构	48
12.4.1	C/S 型虚拟仿真实验教学系统	49
12.4.2	B/S 型虚拟仿真实验教学系统	50
12.4.3	云 VR 型虚拟仿真实验教学系统	51
12.5	研发工具	52
12.5.1	素材制作工具	53
12.5.2	素材编辑工具	54

12.5.3 系统集成开发工具	54
12.6 系统运行.....	55
12.6.1 虚拟仿真实验教学系统运行.....	55
12.6.2 虚拟仿真实验教学系统运行环境.....	60
12.6.3 虚拟仿真实验资源开发	64
12.6.4 虚拟仿真实验教学管理	68
12.7 外部设备.....	71
12.7.1 交互输入设备	71
12.7.2 交互输出设备	72

1. 概述

2017 年，在高校实验教学改革和实验教学项目信息化建设的基础上，教育部决定开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作，计划在 2017-2020 年认定涵盖 60 个专业类的 1000 个国家级虚拟仿真实验教学项目。2019 年，教育部发布《关于一流本科课程建设的实施意见》（教高〔2019〕8 号），将国家虚拟仿真实验教学项目纳入一流本科课程建设，计划到 2021 年建设 1500 门左右国家虚拟仿真实验教学一流课程，明确推荐认定办法继续按有关文件实施。

经过前期三年多的建设，目前已认定为“国家虚拟仿真实验教学一流课程”的项目有 700 余个，覆盖了 41 个专业类，168 个专业；已经初步建成全球第一个汇聚全部学科专业、覆盖各个层次高校、直接服务于学生和社会学习者使用的实验教学公共服务平台，国家虚拟仿真实验教学项目共享平台——实验空间

（www.ilab-x.com）。同时，不断探索在线虚拟仿真实验教学项目可持续运行的有效模式，拓展实验教学内容广度和深度、延伸实验教学时间和空间、提升实验教学质量水平，推进现代信息技术与实验教学深度融合。

虚拟仿真实验教学创新联盟（以下简称“联盟”）是在教育部高教司指导下，由高等院校、相关企事业单位和专家共同组建的非盈利性社会团体。联盟开展虚拟仿真实验教学研究、咨询、指导、评估和服务，推动形成专业布局合理、教学效果优良、开放共享有效的高等教育信息化实验教学项目新体系。联盟的主要工作任务是：1）推动虚拟仿真实验教学项目的共享应用；2）制定虚拟仿真实验教

学项目建设指导框架；3）实施实验教学队伍教师能力提升计划；4）建立在线实验教学体系认证标准；5）推进虚拟仿真实验教学产教融合。

为进一步规范虚拟仿真实验教学项目建设，加强项目应用与共享，在教育部高教司指导下，虚拟仿真实验教学创新联盟技术工作委员会受联盟委托，组织高校和行业专家共同编制“虚拟仿真实验教学课程建设与共享应用规范”（以下简称“规范”）。本规范主要包括实验设计原则、仿真模型设计与场景呈现要求、实验过程设计与实验结果分析、实验考核与实验报告设计、教学支持与服务要求、共享应用与用户体验、网络安全与知识产权、研发技术规范等内容，旨在对虚拟仿真实验教学项目建设与应用提供指导，推动建立虚拟仿真实验教学项目在内容建设、教学实践与效果、服务质量等方面的技术评价体系，促进实现学校教学、行业应用与技术创新的融合发展。

需要强调和引起重视的是，高校应该首先是为满足自身的教学需要来开展虚拟仿真实验教学项目建设，实验项目的选择应根据专业人才培养方案，对应专业教学计划学分课程中的实验教学基本单元；在学校高质量项目建设、高水平项目应用的基础上，鼓励高校教学团队将优秀的虚拟仿真实验教学项目申报认定国家虚拟仿真实验教学一流课程。

2. 实验设计原则

实验设计原则包括项目的基本定位和内容要求，是确保项目建设质量的前提和保障。

2.1 基本原则

实验设计要能够激发学生的学习兴趣，要体现基本要求基础上的研究与探索，凸显高阶性、创新性与挑战度，提高学生自主学习与探究的能力，培养学生发现问题和解决问题的能力。实验设计内容要突出学科专业特色，发挥虚拟仿真技术优势，符合学校的定位及专业人才培养特点；实验设计要符合客观规律，有明确的科学依据。仿真模型有科学性、推演性和交互性；实验过程要体现探究知识和解决问题，要有生生、师生互动的教学机制；实验考核要突出对实验核心知识和能力要素的过程考核，以便评价学生的达成度，实现对学生能力结构分析，并达到以此基础不断持续完善实验设计的要求。

2.2 选题必要性

虚拟仿真实验教学项目建设的必要性首先强调实验教学的必要性，进一步体现出实体实验项目条件不具备或实际运行困难，涉及高危或极端环境，高成本、高消耗、不可逆操作、大型综合训练等物理或实体实验做不了、做不好的实验。

2.3 选题粒度

实验选题需要对应实验教学的基本单元，针对某门课程的单个实验而不是由多个实验组成的实验课程体系。选题粒度要适当，既不能过大，直接对应一门课程或一个工具，也不能过小，不能支撑一定的实验教学目标。基础要求是 2 个学时，10 个步骤：学时要求包括实验准备、实验原理学习、实验操作、完成实验报告等教学过程；10 个步骤指学生实际参与的交互性实验操作不得少于 10 步，每一步交互操作都要求有教学意义，产生符合客观规律的有效反应。

2.4 实验设计层次及内容要求

虚拟仿真实验环节设计需遵循学生的学习习惯，环节构成及知识内容需层层递进，体现基本要求基础上的研究和探索，以综合设计型实验和研究探索型实验为主。综合设计型实验要包含多门课程原理、方法和技术，培养学生融会贯通专业课程、应用相关知识通过自主设计解决实际问题的能力；研究探索型实验以学科或行业发展前沿问题为选题，以学生自主设计为基本要求，面向前沿领域开设窗口，增加学生兴趣选择的灵活性，引导学生洞悉、探索学科前沿；综合设计型实验和研究探索型实验中，可以适当设计专业基本知识认知和实验验证的环节，以便学生顺利完成实验的后续环节。虚拟仿真实验环节构成要完整，各个环节占比要合理，既要体现学生知识、能力、素质训练的基础性，又要体现提升项目的高阶性、突出教学的创新性、增加学生的挑战度。实验设计需注重实验过程中的总结和反思，在操作过程中，系统会给予不同程度提示和反馈，对进一步理解实

验、深化实验、完善实验起着重要的作用、达到在虚拟环境下做真实实验的要求。

2.5 实验内容构成要素

构成要素是项目的必备模块，要综合考虑实验教学要素和仿真对象要素。一个完整的虚拟仿真实验教学项目应主要包含以下要素：

- 实验简介：能够清晰说明实验的基本情况，比如：实验背景、实验目的等；
- 实验指南：要详细展示实验的操作步骤，学生可以在线随时查看，指导学生完成实验；
- 实验对象：要以符合实验教学要求的仿真度实现仿真对象的客观运动规律，必要的要建设相应的仪器设备和材料库；
- 实验操作：要有结构完整、逻辑严密、层层递进的有机体系，要有灵活可变、内涵明确的操作内容，要有及时有效、客观真实的反馈输出；
- 知识提示：在实验过程中，要有对主要实验操作步骤、过程以及算法、公式的原理的解释说明；
- 实验提示：实验环节和步骤要能够在操作界面中进行详细展示，正确引导用户进行实验操作；
- 实验数据：实验数据要真实，有记录，可评判，可回溯，并支持用户随时查看；
- 实验考核：考核点设置需结合实验的操作步骤及实验内容，且能够与实验操作步骤相关联，能对学生的实验操作和知识学习起到考核作用；要能够

支持生成考核报告；

- 实验报告：实验报告需展现学生实验的主要过程、简要的实验结果和成绩，学生也可以在线编辑实验总结；
- 实验评价：要支持学生对本实验进行在线评价；
- 在线讨论：要支持学生针对本实验进行线上交流、沟通。

3. 仿真模型的建立与设计实现

虚拟仿真项目建设要“以虚仿实，以实为基”。仿真模型是利用计算机建立的关于研究对象的逻辑模型，是系统或者对象本质的简化和抽象，是实现虚拟仿真的核心和基础。仿真模型使用便捷安全，不受自然环境限制，更可以调节时间进程，是研究、分析、设计、运行和评价系统（特别是复杂系统）的有效工具。依据实验目的，对系统或者对象进行虚拟仿真，要抓住主要矛盾，也就是核心要素，建立和开发仿真模型。仿真模型要体现系统或者对象的客观结构、功能及其运动规律。场景呈现则要以核心要素为基础，选择适当的内容和形式，以实验教学目的为标尺真实反映实验场景，涉及运动关系的要符合客观规律。仿真模型建立和开发要点如下：

3.1 实验内容选择和模型建立

以教学大纲和教学目标为依据，确认建设虚拟仿真实验教学课程（项目）的必要性，考虑虚拟仿真技术的特点和教学方式需要，确定虚拟仿真的核心要素作为仿真模型的建设内容。

建立仿真模型要从客观系统或者对象出发，选择合适的层面和角度，抓住本质特征，舍弃非本质特征或者次要因素，以数学形式或者其它逻辑形式定性或者定量描述客观系统或者对象。建立仿真模型可以自主开发，也可以利用已有模型进行二次开发或者修改。

3.2 仿真模型设计和技术实现

仿真模型设计是将已经建立的数学或者逻辑模型转变成为可以使用计算机语言表示并实现控制和处理的仿真模型。仿真模型设计要在科学建模的基础上，考虑控制交互、过程和结果呈现等问题。仿真模型要在做好设计的基础上，利用合适的软硬件平台，开发建立具有一定情景、可直接使用的实验对象和环境。

具体原则和注意事项如下：

1) 科学真实性

科学真实性是模型建立就应遵循的原则，在模型设计和技术实现过程中要特别重视计算逻辑符合客观规律，参数或者数据库具有真实性，输入、输出和加工处理具有无歧义性。最终实现的实验对象和环境要反映客观对象的复杂性，体现项目建设的必要性，供给实验者以真实感。

2) 推进推演性

空间结构和时间推演是复杂对象的必要属性，或者兼而有之，或者侧重一面。实验对象要体现逻辑推进推演过程，根据不同的实验行为作出相应的真实有效反应。

3) 开放可控性

逻辑推进推演过程要开放可控，允许实验者自由设置参数、变量及其它需要

的操作，以控制实验过程，实现多路径实验。

4) 过程可溯性

逻辑推进推演过程要有关键记录，允许查看和复盘，以及相关的分析研究。

5) 健壮可靠性

系统要具有一定的健壮性和可靠性，对于规范以外的数据输入，要能够判断是否合乎规范或者其他的异常处理逻辑，保证稳定运行。

6) 趣味友好性

实验过程要发挥虚拟仿真技术的优势，有助于改进教学方式，有趣味，有吸引力；功能界面要友好。

7) 简易高效性

系统设计要提高运算效率，减少运算时间，优化逻辑，尽量减少内存和外部硬盘储存空间的占用。

3.3 调试修改

调试修改是建设虚拟仿真实验教学项目的重要环节，要比较虚拟仿真输出与实际系统或对象信息，对已有的虚拟仿真模型进行迭代改进。

4. 实验场景呈现

实验场景呈现依据核心要素的不同分为**实验对象场景**和**沉浸场景**。实验对象场景是指反映实验对象运动过程和结果的场景，其呈现情况要按照模型建立和设计实现的要求，特别是科学真实性的要求。沉浸场景是指不直接反映实验对象运动过程和结果、主要提供直观体现环境的场景。此处主要规范沉浸场景的呈现要求。

虚拟仿真项目沉浸场景的呈现是指以虚拟仿真的手段，营造逼真、易感知的三维场景，为学生提供高危险、高难度、高成本、现实不可及的虚拟学习环境，激发学生的学习兴趣。核心要素要求包括模型的制作、场景呈现以及场景互动三个方面。

4.1 模型的制作要求

一般来说，构建三维模型主要采用三角面片的方法，面片的数量越多，模型越精细，计算量就越大，对运算性能的要求就越高，因此，三维模型的制作需要折衷考虑模型的精致程度与计算性能，主要包括以下几个方面：

1) 模型的面片制作要求：面片数不宜过多，也不宜过少，没有多余面片，可交互模型要求模型精致。模型不允许有拉伸、漏面、漏缝、重叠面、重线、闪烁面等现象。结构复杂的大型模型，可采用简单模型拼装的方法，消减贴合面，从而减少面片数量。

2) 材质、贴图制作要求：写实贴图纹理，通过材质颜色贴图、高光贴图、法线贴图，真实还原物体表面质感纹理信息。采用漫反射贴图、法线贴图、高光贴图、凹凸贴图进行纹理渲染。光线信息不变的场景，可以把光照效果直接渲染到模型贴图中，减少实时渲染的性能需求。

3) 展 UVW 规范要求：棋盘格大小应统一，UV 应完全铺平，避免重叠、拉伸、扭曲、遗漏，最大化提高 UV 的利用率。

4) 模型的动画与特效：特效应当尽量采用逼真的效果，实现雨、雾、燃烧等效果，如果真实特效过于复杂，如烟雾、毒气等粒子特效，计算性能较高，可采取适当夸张的艺术表现形式；虚拟仿真项目注重交互，模型的动画不宜过多，主要用于展示操作过程或操作结果。

4.2 场景呈现的要求

使用模型搭建的场景应遵循真实世界的比例关系，场景越复杂，对计算机的性能要求就越高，应重点考虑如下方面：

1) 多个场景宜采用关卡式加载方式，实现动态加载，以减少场景的复杂度；一般采用上帝视角观察整个场景，采用第一人称视角进行场景互动；

2) 场景中逐渐由远及近的模型可采用图片、简单模型、精致模型的方式进行动态轮换替代，以减少整个场景的面片数；场景中多次出现重复的模型只需要做 1 个，由程序控制场景中重复模型的处理；

3) 特殊场景的设计要遵从客观规律，如水下、太空，核化等环境应当符合实际情况，应增加场景特效以示区别；物体的固态、液态、气化的转换过程要合理；历史场景要符合历史原貌；

5) 在人与场景模型互动时，场景中的模型运动应当遵循物理运动科学，符合生活常识，需要设计合理的碰撞阻挡；互动中的误操作应该有物品、人员损伤的逻辑；涉及到特殊微观、宏观场景，场景与人的比例关系可以适当发生变化，但场景内部比例关系要固定不变，应同时增加人物特效，以示区别；

4) 场景中的光照渲染应采取主体光、环境光、轮廓光的顺序进行渲染。

5. 实验过程设计

主要针对实验过程中涉及的交互操作要求、实验现象、实验结果、知识帮助与指导以及操作指引等方面提出设计规范要求。

5.1 实验交互操作

实验的交互操作是实验设计的核心和重点。通过实验的交互操作，印证实验目的和能力培养目标是否达成。

1) 交互操作设计要求

交互操作指的是实验者与实验项目之间的一种互动方式，是指实验者操纵实验设定的变量、参数、行为、材料等从而产生某种结果的过程。

2) 交互操作说明

对实验交互操作的说明，应包括如下几个方面：

- 操作目的：即需说明设计这一交互操作的目的是什么，包括解决什么问题，培养或考察哪些方面的技能或能力。
- 操作过程：详细说明操作的过程，包括操作方式、参数设置、材料预设、应答行为等。并附截图加以佐证。
- 操作结果：通过交互操作得到什么样的结果，包括结果形式、分值转换与计算、结果记录与保存等。

3) 交互操作方式

实验交互操作的方式，用于说明实验者需使用何种输入设备与实验场景进行交互，以完成实验操作。

实验交互操作的方式，目前主要有以下几种方式可供选择运用：

- 键盘交互：通过电脑键盘与实验场景进行交互，方便网络版共享。
- 鼠标交互：通过电脑鼠标与实验场景进行交互，方便网络版共享。
- 语音交互：通过计算机外接麦克风，依靠语音识别与实验场景进行交互。
语音识别需要有市面上有偿或无偿使用的语音识别软件支持。
- 平板/手机交互：通过手机、平板等移动设备的触摸屏直接进行交互，比如使用 AR 技术建构的虚拟仿真实验教学项目。
- VR 手柄交互：通过虚拟现实 VR 等技术自带的操作手柄等特定输入设备进行交互，适合用 VR 技术构建的项目，该交互不能互联网共享使用。

5.2 实验过程现象

实验特效、音响、动画等素材与设计脚本所述的真实世界中实验现象的相似性程度越高，实验者在操作过程中的沉浸感与真实感越强，实验教学效果越好。实验现象要明显且逼近现实实验现象。

- 最低要求：要求特效等素材呈现的内容必须和设计脚本所述的真实实验现象相似，并能够表现设计脚本所述的真实世界的特征，不得出现错位、过

度抽象、逻辑错误、过度失真等问题。

- 推荐要求：要求特效等素材呈现的实验现象根据设计脚本所述的真实世界实地取景，高度还原真实场景的实验现象。
- 要求说明：在虚拟仿真实验中，虚拟的仍然是真实的场景，所以不能使用比例、颜色等与真实世界严重不符的模型，同时也不能使用声音过度失真的音响或过度夸张的特效和动画，应该从真实世界中获取素材，保证实验过程的真实性，提高实验者的沉浸性。例如：能够根据实时操作变化产生实时动态效果、关键操作的对象产生符合常识的光、火、烟或形变等特效、有小窗或镜头特写跟随或对准实验现象等等。

5.3 实验结果

实验者可以通过实验结果明确自己在虚拟仿真实验的过程中是否操作得当。

- 最低要求：虚拟仿真实验产生的实验结果必须符合设计者的预期，实验者进行虚拟仿真实验产生的实验结果必须能够正确无误的显示
- 推荐要求：在保证实验结果正确的基础上，使用丰富的颜色、音效、文字等方法体现实验结果；对于实验过程出现的严重错误要给予明显的警告
- 要求说明：虚拟仿真实验是教学软件，必须对实验过程和结果给予客观、真实、正确的评价，结果通常包括正确的、错误的、可以但不建议的三种操作行为，软件应该对这三种行为给出正确反应。

5.4 知识帮助与指导

实验前置知识：使用实验系统前，各自完成所对应课程或知识的学习，否则难以理解实验知识或对实验内容无法把握。

实验过程知识提示：实验过程中重要知识点进行有提示与指导。提示形式可多样，例如弹框加文字的形式、视频形式、动画人物解说的形式等。

实验在线指导：学生在实验过程中有疑问可获取在线指导。为了便于学生在实验过程中及时得到指导，系统应该给学生提供快捷准确的指导和反馈功能，以减少学习阻碍，提高学生的学习兴趣和兴趣。推荐采用人工智能技术为学生提供在线智能指导，不仅能够很好的满足学生的实时答疑需求，也能极大程度降低教师的工作量。

5.5 操作指引

新手操作引导：实验开始时应考虑新手对系统不熟悉，引导其快速进行操作，增加对其的友好性。

功能按钮指示：引导用户对实验的重要功能按钮进行熟悉。

软件基本操作提示：对软件的基本操作方式进行提示。例如：键盘 **W** 键控制向前移动、键盘 **A** 键控制向左移动、键盘 **D** 键控制向右移动，鼠标左键单击选择、右键长按对物体 360 度旋转等。

6. 实验考核设计

实验分为教学示教、学习和考核学习方式，是学习过程的递增方式。教学示教让学生学会实验方法、理论知识、教学内容。学习指学生可以充分发挥自己的主观能动性，根据自己的思路 and 判断完成实验。考核指根据老师设置的考核内容，学生完成指定考核目标的方式。

6.1 考核方式与方法

考核方式分为过程型考核、总结型考核和综合型考核三种模式。

- 过程型考核：主要考核实验流程，重点考察操作顺序、操作条件和分步实验结果。
- 总结性考核：应当结合真实实验流程，特别是自由型、开放型和搭建型仿真实验，成绩可以最后生成，允许没有步骤性评分。
- 综合型考核：主要针对学生实验设计思想和方案的新意性等要素进行考察，并综合实验过程的预习、表现、操作熟练程度以及实验报告等，给予综合评分。

考核方法分为操作考核和答题考核。

- 操作考核：是对学生操作过程中的操作步骤和对应的结果进行考核。
- 答题考核：是通过选择题、填空题等形式对知识掌握程度进行考核。

6.2 考核内容

实验考核包括实验操作评价、实验观察与记录评价、实验思维与创新评价、实验结果评价及实验报告评价。

- 实验操作评价：指标包含学生实验操作实验过程中体现出来的心理因素、实验熟悉程度、操作规范性、实验步骤合理性、操作速度等。
- 实验观察与记录评价：指标包括科学态度、敏感力、记录习惯等。
- 实验思维与创新评价：指标包括学生发现问题与解决问题的情况、实验过程现象及结果的分析情况、实验的比较和推理以及概括情况、实验的新颖和创意等。
- 实验结果评价：指标包括实验分步数据以及实验最终结果数据准确程度。
- 实验报告评价：指标包含实事求是的态度、实验报告的规范性和表达情况、实验绘图(表)情况、实验数据处理情况等。

6.3 考核结果评分

学生的实验过程和结果应该能够进行评分，评分使用百分制，评分以分项分数表的形式展示。

系统提供实验的成绩单、及格率、平均分、实验成绩分布情况。

- 最低要求：系统支持教师在线人工评分，并能提供后续成绩单查询
- 推荐要求：系统能够自动评分，同时支持教师在线人工评分，并能提供后

续成绩单查询

- 要求说明：为了让教师对学生的实验过程和结果进行考评，系统应提供实验过程和结果的详细记录，并允许教师进行人工评分。“自动评分”是指系统从实验中自动提取评分点，自动匹配评分规则，生成实验成绩。

7. 实验记录与分析

主要针对实验过程中需要进行记录的数据提出规范要求，包括四个部分：输入信息、输出结果、操作记录、结果保存与恢复。

7.1 输入信息

交互操作输入的信息（含语音识别的结果）、设置的参数等。

输入信息是在实验过程中根据实验需要输入的一些必要和非必要的参数信息来完成一个实验。

例如：虚拟仿真实验操作输入信息，操作有实验名称、实验时间、实验对象、实验场景、时间环境、实验脚本等一些参数信息。

7.2 输出结果

由交互输入操作直接产生的反馈结果，包括数值、对错、分值、等级等方面。

输出结果是在根据实验时输入的信息参数，得到一个结果数据或效果图提供给用户作为参考依据。

例如：虚拟仿真实验输出结果根据实验时输入实验名称、实验时间、实验场景、实验环境、实验对象状态参数以及实验对象或部件之间建立的关系，输出实验结果，得到实验的结果数据或效果展现给用户作为参考依据。

7.3 操作记录

记录每一步操作的过程信息，包括操作次数、操作的经过等。学生的操作步骤应该作为一种记录进行保存。

- 最低要求：操作步骤能够保存、恢复当前步骤
- 推荐要求：操作步骤能够保存到服务器，并可恢复当前步骤、全程回放，且能控制回放速度、暂停/继续回放
- 要求说明：为了便于教师对学生的实验过程进行考评，系统应该允许学生在当前的实验步骤进行保存（即存档），并在下次登录时可恢复到存档的步骤。全程回放是指从操作开始到结果一系列操作的回放。用户在虚拟仿真实验平台有价值的实验操作，在实验的过程中记录每一步实验的操作步骤，包含最基本的命令名称、相应的命令参数和实验场景等，保存该实验操作记录脚本，以便在遇到突发情况下或后续观看实验操作记录有哪些时，可以继续以前未完成的实验和操作过程查看。

7.4 结果保存与恢复

实验最终结果保存的具体内容，及其保存输出的形式。学生的实验结果应该作为一种记录进行保存。

- 最低要求：实验结果能够保存、恢复
- 推荐要求：实验结果能够保存到服务器，并可恢复

- 要求说明：为了便于教师对学生的实验结果进行考评，系统应该允许学生对实验结果进行保存（即存档），并在下次登录时可恢复实验结果。结果保存在实验完成后，根据实验时输入的实验名称、实验时间、实验场景、实验环境、实验对象等一些参数信息，将实验记录结果或实验报告内容按指定的形式（例如：**word** 或 **txt**）保存到指定的服务器中，便于查找查看结果保存。

8. 实验报告

系统能够提供实验报告的基本信息，以及根据学生的实验操作过程和实验数据生成学生实验报告和实验评价报告，实验报告由实验报告基本信息、学生实验报告、实验评价报告三部分组成。

8.1 实验报告基本信息

实验报告基本信息包含实验名称、实验者姓名、学号、实验目的等，是固定数据格式。

8.2 学生实验报告

学生实验报告是系统根据学生的操作过程自动提取关键过程与参数、实验结果等数据，系统辅助记录的图形图像，以及可能涉及到学生填写的分析与思考等，包括文字性描述、实验截图、数据表格等信息，以及语音、视频等附件资料。

8.3 实验评价报告

实验评价报告是指系统从学生的实验操作中自动提取评分点，自动匹配评分规则，生成详细得分、总成绩和评语的报告，并可后续查询。格式规范

实验报告需要上传 PDF 格式，其中实验名称、实验者姓名、学号、实验目的等是固定数据格式，学生实验报告、实验评价报告是自定义数据格式。

实验报告主要内容要素参考下表：

实验名称			
姓名		学号	
一、实验目的			
二、自定义学生实验报告（根据实验和学科内容自拟实验报告格式，建议包括实验关键过程与参数、实验结果、分析与思考等。包括文字性描述、实验截图、表格等信息）			
三、自定义实验评价报告（根据实验和学科内容自拟实验评价格式，包括实验得分项细节、总成绩、评语，以及可考虑采用评价教师电子签名）			

9. 教学支持与服务

为大力推进虚拟仿真实验教学项目的共享应用，解决虚拟仿真实验教学项目在实际教学中遇到的学生实验操作难、教师教学指导难、实验环境运行难等问题，提高虚拟仿真实验教学项目的支持服务质量，进一步加大虚拟仿真实验教学项目的教学支持力度，制订实验教学项目支持服务规范。

9.1 实验指导文件

实验指导文件主要包括实验指导书、视频讲解示范和教学指导书等。

1) 实验指导书。以文档的形式，指导学生进行实验项目的操作，作为实验前的辅助知识学习材料。要求知识点全面，与实验紧密结合，具有很强的指导性和针对性。包含但不限于：基本理论知识、实验目的说明、实验要求说明、实验步骤说明、实验相关问题防范预案和措施。要求知识点覆盖实验项目，阐述清晰易懂，条理清楚、图文并茂。

2) 视频讲解示范。以视频讲解及演示的形式，指导学生的实验操作，并对重点难点进行透彻讲解，在必要的情况下，提供实验的示范演示。包含但不限于：实验重点难点讲解、实验步骤演示、仪器使用方法示范、操作规程讲解。要求语言简洁、讲解准确、重点突出。

3) 教学指导书。以文档的形式,指导教师进行实验教学,作为教师实验教学的参考指南。包括但不限于:教学目的、教学内容、教学重点难点、教学组织、实验考核参考、实验报告编制参考、教师准备事项、学生准备事项、实验教材参考等。

9.2 在线教学指导

在线教学指导主要包括建立在线教学支持团队、发布学习资源和信息内容监督等工作。

1) 建立在线教学支持团队。组织与实验项目有关的专业教师形成在线教学支持团队,并制定详细的支持服务计划。团队成员在线时长不少于 2 小时/周,并在实验项目首页公开 1 个热线支持电话(或联系方式)。

2) 发布最新学习资源。按预先公告的教学进程,及时发布实验相关的最新学习资源,帮助学生丰富实验所需的知识。

3) 信息内容监督。密切跟踪相关评论、讨论等动向,对讨论和发言进行正确引导和监控,避免无用信息侵占资源,防止违法违规信息传播。

9.3 在线技术支持

在线技术支持主要包括建立技术支持团队、开展实验项目维护和软硬件环境配置咨询服务等工作。

1) 技术支持团队。组织实验项目相关专业教师和实验项目开发企业技术人员，形成在线技术支持团队，并制定详细的支持服务任务计划安排。至少指定一名教学团队成员和一名技术人员，联合提供技术支持，并在实验项目首页公开 1 个热线支持电话（或联系方式）。对于技术问题的响应时间不超过 48 小时。

2) 实验项目维护。保证实验网址可顺利打开，并满足实验空间接口规范的要求。在网址变动时，需提前 24 小时公布新网址，并及时以公告的形式告知；在实验项目系统发生升级或者维护等技术变动时，需要至少提前 24 小时以公告形式告知升级维护及系统恢复的时间。

3) 软硬件环境配置。解决教师、学生遇到的实验项目操作软硬件环境问题，包括但不限于：硬件配置、浏览器兼容、插件安装、软件下载运行、移动设备使用等。

10 共享应用与用户体验

虚拟仿真实验教学项目应满足校内教学与校外共享应用的基本需求，并提供良好的用户体验。

10.1 系统性能要求

项目的系统性能应能满足基本教学单位（教学班）的实际应用需求；保证足够的有效访问时间可供开放共享应用；用户体验应满足系统易用性、使用便利性、界面友好性等原则；技术接口应符合与共享平台实现用户认证与实验数据交互的要求；教学应用应提供规范化的服务界面；共享应用符合应用评价标准。

系统性能应满足一个基本教学单元的教学应用需求，即支持一个教学班的用户同时在线进行实验，保证同时在线用户的使用流畅、无卡滞，并能最终完成实验项目。一般情况下，C/S、B/S 型系统应支持不少于 100 人同时使用，云 VR 型系统应支持不少于 30 人同时使用。

如同时申请参与实验的用户人数高于系统性能上限时，应提供排队或预约机制。如采用排队机制应显示该用户排队等候的预计时长，时长误差应小于正负 30 分钟；如采用预约机制，用户在预约时间再次访问实验项目时，应保证其可以进行实验。

10.2 连通访问要求

满足互联网访问，正常情况下，每半年中断服务次数不超过 10 次，每次中断时长不超过 4 小时。如需停止服务，需在停止服务前 48 小时予以公告，公告内容包括停止服务的原因和起止日期及时间，停止服务期间应以公告静态页的方式替代原实验项目首页，以使用户知晓其服务状态。

10.3 用户体验要求

用户体验要求主要包括易用性、便利性和友好性等几个方面。

1) 易用性

系统易用性是指在特定条件下使用时，实验项目被理解、学习、使用和吸引用户的能力，是交互的适应性、功能性和有效性的集中体现。应包含易理解性、易学习性和易操作性三个方面。

系统界面设计应逻辑清晰，符合大多数互联用户使用习惯，主要功能按钮应用突出的颜色和形状加以标识，以使用户快速掌握使用实验的方法和路径。系统访问界面应将最核心的信息放在最突出的位置显示，比如进入实验的按钮。如有需要提前预装的插件，应自动提示用户点击下载。用户点击按钮进行完一步操作之后系统应给予用户相应的反馈信息，例如“信息传输中……”、“已成功×××”等等，包括一些错误的提示等。

2) 便利性

用户从实验项目共享平台点击项目链接跳转到实验项目时，应自动带入用户身份信息，不应再次输入用户名、密码等身份信息即可直接使用实验项目。

用户跳转到实验项目时，应直接访问实验项目自身的首页，而不是学校实验中心页面或者是实验项目目录页等其他页面。

实验结束后应第一时间将实验数据回传给共享平台，实现实验数据的有效反馈，以使用户可以在第一时间获取实验成绩。

3) 友好性

项目应支持用户不少于 3 种主流浏览器访问，并在页面显著位置提示对浏览器的支持信息。

应尽量避免插件的安装，应选择轻量级插件进行安装，且应在明显位置提供插件下载地址，同时说明下载后的安装方法，以及安装后需要哪些配置，降低用户使用软件的难度。应将所需所有插件打包为一个压缩文件供用户下载使用，无需多次下载。

系统应具备系统进度加载条，让用户对于等待时间有预期。

10.4 技术接口接入

实验教学项目在申报时，应按照《国家虚拟仿真实验教学项目技术接口规范》最新版的规范完成接入，并保障接口接入的质量：

1) 接口调用完整准确。从用户通过实验空间进入实验教学项目，一直到完成实验的整个周期中，应该在正确的时间节点分别调用用户识别、实验操作状态及实验结果数据的回传等，确保每个接口调用的成功，及上传记录的完整，做到不遗漏不重复。

2) 用户访问顺畅体验友好。用户通过实验空间前往实验教学项目平台时，在完成身份识别和用户认证后，应自动进入到实验项目的页面，避免强制用户填写额外信息或进行其他非必要的操作，并在明显位置准确显示当前用户信息，完成实验时显示实验结果、提示用户实验数据上传至实验空间等。

3) 实验数据真实有效。实验数据的记录要真实有效，返回的各项数据需要符合用户做实验的实际情况，实验报告的内容客观准确，严禁利用技术手段上报虚假实验记录。

4) 接口接入质量管理。实验项目完成接口的技术接入后，为保证接口的接入质量，至少需要验证 3 个以上用户不少于 10 次的实验结果返回记录。实验空间将在联盟技术工作委员会指导下，进行接口接入的验证支持与质量管理。

10.5 教学应用规范

为充分发挥虚拟仿真实验教学项目资源的功能，实现预期的教学效果，各校在使用虚拟仿真实验教学项目过程中，应做好以下几方面的准备：

- 1) 学校应在确定使用前，与虚拟仿真实验教学项目资源拥有方明确使用方式、使用人数及使用频率等基本信息，以便资源拥有方做好必要的准备；
- 2) 学校应以实际教学班为单位建立基本教学单位（实验班级），并按照班级组织教学活动，以便进行教学组织与教学评价；
- 3) 学校应具备对实验系统回传的实验数据进行统计、分类和应用的能力，以便利用这些数据对学生的学习效果进行评价。

10.6 共享应用评价

共享应用评价从虚拟仿真实验教学项目应用的强度、广度、效度和保障机制等四个维度进行考量。其中：

- 1) 强度指标：主要考量学校对于虚拟仿真实验教学资源建设的重视程度和资源实际用于教学的情况，包括本校应用和社会应用；
- 2) 广度指标：主要考量资源的应用范围和实际用途，即资源在多方范围内得到了认可和应用；

3) 效度指标：主要考量虚拟仿真实验教学项目在教学应用中发挥的切实作用，即是否加强了已有的实验教学环节、实现了教学环节的信息化与智能化重塑；

4) 保障机制：主要考量项目单位的虚拟仿真实验教学项目建设工作的重视与认可程度，是否能够保障此项工作的持续开展。

各项指标可分设二级指标和具体观察点，以便定性或定量评价各指标的实现程度。

11 网络安全与知识产权

项目建设应注重对相关实验教学项目自有或共有知识产权的保护，注重对学生个人信息等的保护，严格遵守我国教育、知识产权、互联网等相关法律法规，按照“谁开发、谁负责，谁使用、谁负责”的原则确定基本安全责任。

11.1 网络安全要求

按照国家虚拟仿真实验教学一流课程的申报要求，申报项目应符合《信息安全等级保护管理办法》中二级等保的相关要求。虚拟仿真实验教学项目的网络安全责任主体为高校，当参与一流课程申报时，高校应提供由第三方专业测评机构出具的相关申报项目及其依托平台的证明材料。

如场景取材于国家重点工程或重点单位、特殊的地理环境及山川形貌，要进行解密处理。

在数据库管理方面，应制定完整的安全策略。例如在操作系统级，要规定详细的文件访问权限，并要求管理人员对其依次检查，以确保正确的数据文件访问限制。在数据库，对每个表空间、用户角色等，都要规定适当的访问权限。

11.2 知识产权要求

项目的知识产权清晰，申报项目的实验教学设计需具有原创性；项目所属学校须对本实验项目全部内容独有或共有著作权，并确保项目内容及使用项目内容

的行为不侵犯任何第三方的合法权益。为保障获得认定后的共享服务工作，共有著作权的项目须经全部共有方同意，在项目获得认定后可按照相关规定进行免费共享及进行其他符合项目需求的使用。同时，学校应进行与项目相关的软件著作权登记。

虚拟仿真实验教学项目为教学服务，场景中不应当出现具体的商品型号及商标，以免出现商业纠纷。

鼓励使用拥有自主知识产权的技术、引擎、工具等，鼓励开放共享。

11.3 社会开放承诺

对认定的“国家虚拟仿真实验教学一流课程”，相关高校要确保项目被认定后5年内面向高校和社会免费开放并提供教学服务。高校同时还承担了项目推广应用的任务，应按照项目申报时承诺的推广计划实施推广工作。

12 研发技术规范

虚拟仿真实验教学项目中设计并实现的承载实验教学目标的软硬件技术系统，简称虚拟仿真实验教学系统，需要面向实验教学需求，基于实验设计，以及实验教学过程、操作、场景等相关数据，依托虚拟现实、人工智能、仿真建模、数字媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术，在数字空间中构建出高度拟真的实验环境、实验对象、实验器具和实验材料等，再遵循精心设计的实验方案，通过实时人机交互方式，在虚拟空间或虚实结合空间中实施可动态配置的教学实验过程，最后能够对实验效果进行量化评价和分析。虚拟仿真实验教学系统的核心目标，是为参与实验的学生获得等同现实实验的过程、操作、结果、知识、能力等提供系统平台和技术支撑。

12.1 技术特征

虚拟仿真实验教学系统的技术特征主要包括仿真沉浸感、快速推演性、实时交互性和仿真可信性多个方面。

1) 仿真沉浸感

系统的仿真沉浸感是能使参与者产生“身临其境”、“感同身受”体验的一类技术特征，主要取决于实验场景、实验过程、实验装置、实验操作、实验现象以及实验数据变化等作用于参与者的视、听、触等多通道感官上的拟真度。要求构建虚拟仿真实验系统时，不仅要关注对内容及其运行时的状态参数等进行建模仿

真，同时也要关注模型及场景对参与者在其中通过视、听、嗅、味、运动等获取的感知的拟真呈现。

2) 快速推演性

系统的快速推演性是指仿真实验可以接受同户的可变的多种输入，产生与输入对应的正确的实验过程，并能快速运算并即时呈现直观的结果，以便学生能够通过反复多次的对比分析，达到学生获取知识和提升能力的目的。要求构建的虚拟仿真实验教学系统要能够围绕教学策略，通过改变实验输入，能够在一定程度上表现或推演展现各种理论和实验过程，并实现对实验内容及实验教学过程的反复实验和论证。

3) 实时交互性

系统的实时交互性是指虚拟仿真实验中的各种交互操作和行为能够实时地得到反馈或响应。不仅包括参与者对仿真实验系统内对象的可操作性和从虚拟仿真实验系统得到反馈的过程，还包括教学讲授和教学研讨、学习过程的跟踪分析、学习反馈与激励、学习工具、学习伙伴、帮助系统等。通过与实验对象、实验过程及学习支持系统的交互，使学生不仅能够便捷地实施、操作、干预实验过程，产生多分支路径不同操控下的对应变化，以及合理的不同实验结果，还能通过实验的系统平台支持，提高个体与集体的学习能力、实验能力。

4) 仿真可信性

系统的仿真可信性是指仿真系统与被仿真的现实系统之间的相似性或接近程度，用来表述仿真结果被认可或被采纳的程度，由仿真模型、算法、通讯、数据库等软硬件及应用环境诸多因素的可信度综合决定。要求构建的虚拟仿真实验教学系统，不仅要从提高仿真可信性的角度提升仿真实验的可用性，还要设计并实现教学评价环节，实现对实验过程全要素精确评价，客观记录所有实验操作和对应的实验结果，支持实验中的纠错指导、实验质量和进度排名、实验综合考核等评估评价功能。

12.2 系统组成

一个完整的“虚拟仿真实验教学系统”通常包含但不限于运行虚拟仿真实验应用的服务器、保存实验资源及相关数据的数据库、相关网络环境、客户端运行设备、显示设备、实验交互设备、其他相关设备，以及虚拟仿真教学软件和相关接口软件。虚拟仿真实验教学系统软硬件系统典型构成如图 1 所示，其中各组成部分仅为典型示例。

服务器是系统的核心，主要运行相关应用服务，通常利用各院校现有网络中心服务器，也可采购硬件设备部署，或者采用商业云服务器（如阿里云、华为云、腾讯云、百度云等）部署。

数据库主要为实验应用提供数据存储和读写访问服务，主要包括实验资源数

据、账户数据、实验业务数据、成绩数据等。可利用各院校现有网络中心的数据库提供服务，也可重新采购硬件设备及数据库系统进行部署，或者采用商业云数据库提供服务。

网络环境主要使用各院校已经建设的校园网络，由于虚拟仿真实验内容大多涉及三维模型和精细纹理数据，因此通常需要较大的网络带宽，同时需要配置防火墙等安全设备以提高网络安全性。



图 1 虚拟仿真实验教学系统软硬件系统典型构成

客户端运行设备主要是指图形工作站、个人计算机、平板电脑、手机等运行硬件设备，由于虚拟仿真实验普遍以三维形式呈现，因此对设备的中央处理器和显卡配置有相对较高的要求。

显示设备除了最常见的电脑显示器之外，可选配的其他高端显示设备主要包括虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）等头盔型显示终端，以及立体显示器、投影球幕、环幕、透明屏、互动式 LED 大屏幕、立体投影等等，这些可供选择的扩展设备虽然能带来更为良好的画质体验，但也存在价格和维护成本高等问题，一般设置在相对集中的场所内供多人共同使用。

交互设备最常用的主要还是鼠标和键盘。但对于一些临场沉浸感要求较高、交互复杂的实验课程，还可选配数据手套、力反馈装置，以及位置追踪、空间定位、动作捕捉、眼动跟踪、脑电交互等设备。

其他可选配的设备还包括：3D 打印设备、大空间多人协同系统、5G 云推流系统等等。

目前，已获得国家称号的虚拟仿真实验教学项目均集中通过“实验空间——国家虚拟仿真实验教学项目共享服务平台”（www.ilab-x.com）面向全国高校提供共享服务，各项目都设计并实现了与“实验空间”对接的必要的数据和应用接口。系统的典型部署结构如图 2 所示。

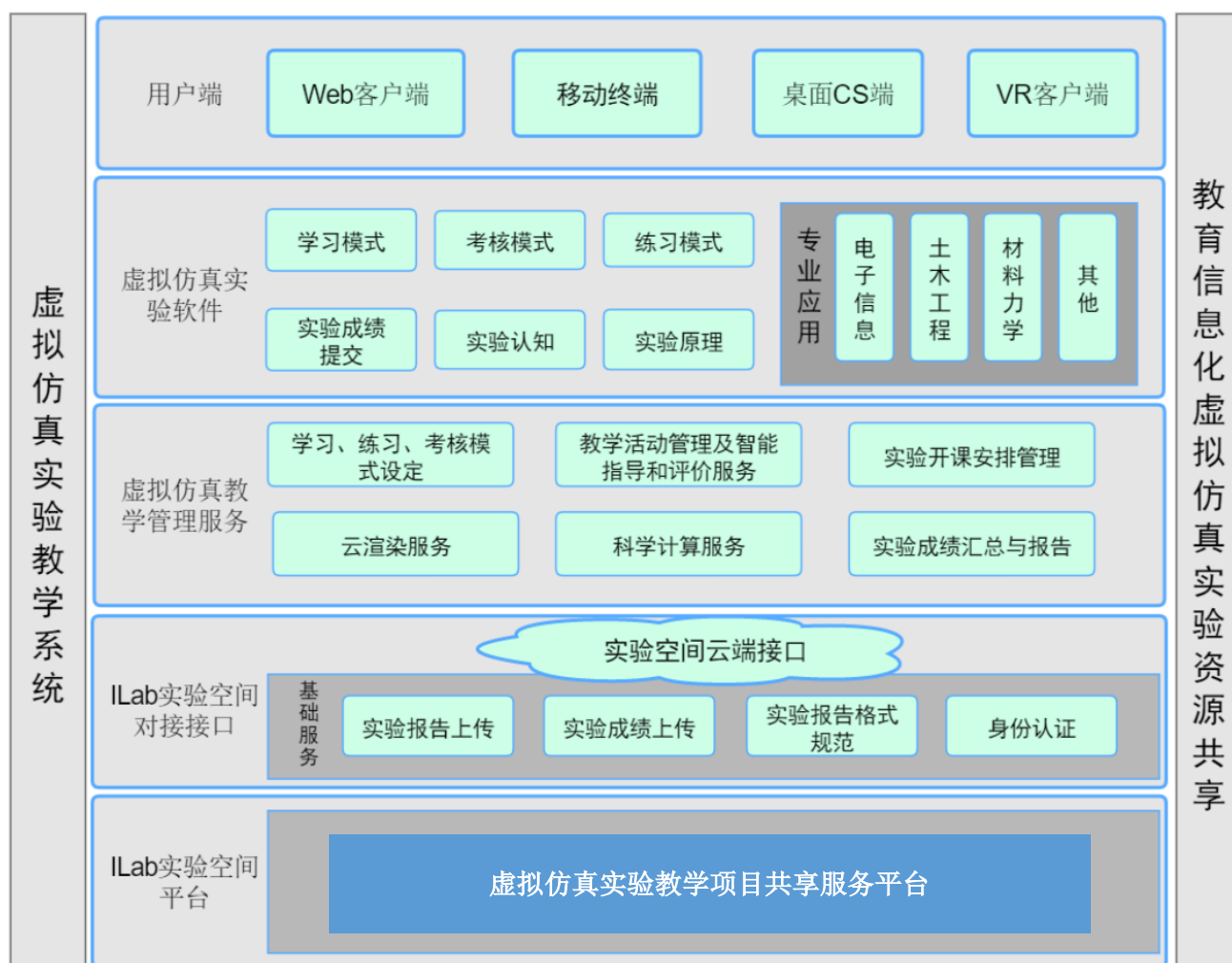


图2 虚拟仿真实验教学系统典型部署示例

12.3 研发流程

虚拟仿真实验教学项目研发流程主要分为四个阶段，分别为：项目立项、方案设计、系统研发以及测试部署。

1) 项目立项阶段主要由项目负责人牵头撰写项目计划书，并确定技术合作单位，进而与合作单位进行业务对接，最后形成系统开发需求文档。

2) 方案设计阶段主要是先形成设计思维导图, 然后进行 UI 界面设计和技术方案设计, 并且通过方案评审会等形式予以确认。

3) 系统研发阶段主要由技术合作单位开展美术模型及动画制作、程序开发等工作, 同时院校方提供业务咨询保障, 协助技术合作方完成系统初版的制作。

4) 测试部署阶段主要由院校方和技术合作方分别进行业务和技术的全面测试, 技术合作方对发现的问题进行修改直至解决所有问题, 即可进行线上正式部署和试运行, 并记录实验数据。

5) 试运行结束且问题归零后, 即可开展项目整体验收工作, 至此, 项目的研发上线工作完成, 进入后续的运行、使用和维护阶段。项目研发通常采用的典型流程如图 3 所示。

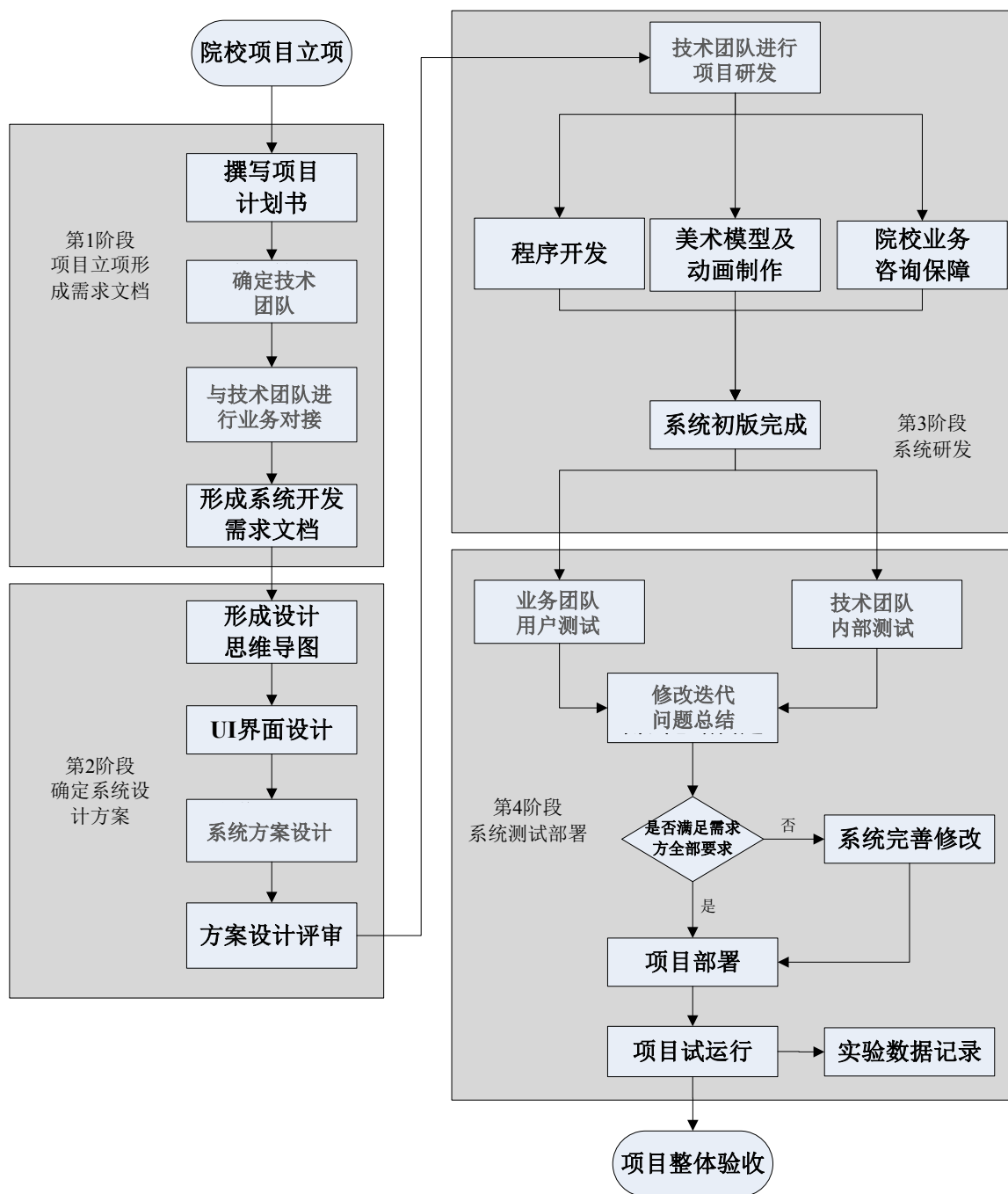


图 3 虚拟仿真实验教学系统研发通常采用的研发流程

12.4 技术架构

虚拟仿真实验教学系统中的软件系统架构，一般有四种类型，即单机型、客

户端-服务器（C/S）型、浏览器-服务器（B/S）型、云 VR 型。单机型是安装在客户端 PC 电脑或其他设备上的，不依赖网络环境即可独立运行的虚拟仿真实验教学系统，因缺少配套的教学活动流程管理服务，不适用于国家虚拟仿真实验教学项目共享应用需求；客户端-服务器型架构适用于实验资源较大或无法避免安装第三方支持软件（或插件）的需求；浏览器-服务器型架构与教学活动管理有较好的融合性，具备良好共享性和较低的运行环境要求，是当前主流推荐的软件架构，适用于较大规模开展虚拟仿真实验教学活动的需求；云 VR 型架构作为最新技术潮流，综合了虚拟仿真技术、云渲染技术、VR 技术、5G 技术，适用于大型三维虚拟仿真 VR 软件的开放共享。

12.4.1 C/S 型虚拟仿真实验教学系统

客户端-服务器，即 Client-Server(C/S)结构，支持师生教学互动和教学活动管理功能的虚拟仿真实验教学软件系统，一般包含虚拟仿真实验教学软件和管理服务两部分内容。服务器负责教学流程管理、实验数据存储、辅助教师完成实验安排和教学反馈，同时还负责与 iLab 实现数据对接。客户端为用户提供完整的人机交互式的实验过程。在 C/S 型架构中，虚拟仿真实验教学软件运行在客户端操作系统之上，通过常用网络协议与服务器端建立连接，一般认为是带有网络连接功能并且能与服务器端完成交互的软件系统。

适用于：

- 需要安装第三方应用软件支持虚拟仿真实验软件运行，并且第三方应用软

件无法实现 B/S 部署或 B/S 对接的教学需求。

- 虚拟仿真实验软件资源包大于 500MB，在实验过程中需要 5 分钟以上下载时间的教学业务。
- 同时在线人数较多的教学环境，特别是并发超 300 以上的教学业务。
- 上课前有充分的时间下载并安装客户端环境，在校内局域网络上可以有效解决各类资源接入，不需要广域网络资源的教学业务。

12.4.2 B/S 型虚拟仿真实验教学系统

B/S（Browser/Server）型架构也被称为浏览器/服务器体系结构，是 C/S 体系结构的改进型，支持师生教学互动和教学活动管理功能的虚拟仿真实验教学，一般包含虚拟仿真实验软件和教学管理服务两部分内容。服务器负责教学流程管理、实验数据存储、辅助教师完成实验安排和教学反馈、与 iLab 实现数据对接等。B/S 型架构客户端无需安装虚拟仿真实验软件，只需安装浏览器即可，用户通过浏览器完成虚拟仿真实验的操作过程。在 B/S 架构中，一般要求客户端浏览器支持最新的 WebGL/Web3D 等 HTML5 特性，以便支持虚拟仿真实验教学软件的三维功能在浏览器上的正常运行。

适用于：

- 虚拟仿真实验教学软件的所有功能和效果都能浏览器中实现，无需安装第三方支撑软件或插件的教学业务。
- 虚拟仿真实验教学软件资源包小于 500MB 以下，在实验过程中能够在 5

分钟以内完成下载的情况。

- 分布在不同地点的同时在线人数较多的教学业务，一般可以支持 100 以上并发。
- 轻量化教学业务，对教学规模和运行效率的限制主要在于主机和网络的性能。

12.4.3 云 VR 型虚拟仿真实验教学系统

实时云渲染是将云计算、云渲染、实时视频流技术及虚拟仿真实验相关技术引入到虚拟仿真实验教学应用中。在云端提供虚拟仿真实验教学运行环境和高速网络传输环境，经过对虚拟仿真实验资源的显示和声音输出、编解码压缩后，传输到用户的各类终端设备，实现云计算与虚拟仿真技术的有机结合。

针对不同课程类型，实时云渲染型虚拟仿真实验教学系统具有以下特点：

1) 可将 C/S 型桌面级虚拟仿真实验教学系统无缝转为 B/S 型，在发挥 C/S 型课程画面精细度高、课程内容丰富的优势基础上，兼顾 B/S 架构浏览器轻量化使用的特点，避免 B/S 架构对软件资源包和课程精细度的限制。

2) 可将 PCVR 头戴式虚拟仿真实验教学系统快速简便的转为适用 VR 一体机的使用模式，解决 PCVR 头戴式对终端要求高、使用不便捷、难以适应规模化集群化教学场景的弊端。

适用于：

- 网络：①对于桌面级虚拟仿真实验教学系统：网络时延低于 60 毫秒，网络带宽不低于 10M；②对于头戴式虚拟仿真实验教学系统：网络时延低于 20 毫秒，网络带宽不低于 30M。
- 适合在云渲染环境部署的、使用终端包括桌面级 PC、移动端及 VR 一体机等各类终端的虚拟仿真实验教学系统。
- 支持规模化部署、弹性伸缩，同时在线人数取决于云资源环境的建设。

12.5 研发工具

虚拟仿真实验教学系统研发涉及的研发工具，包括但不限于系统集成开发工具、素材编辑工具、素材制作工具等。主要工具如图 4 所示。

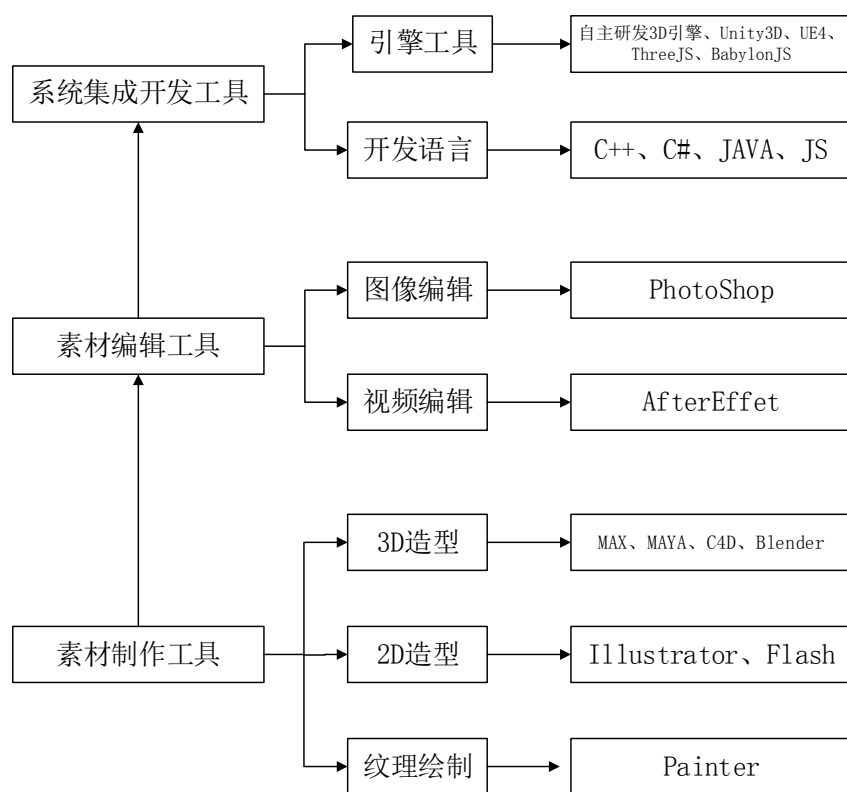


图 4 虚拟仿真实验教学系统研发涉及的主要工具

12.5.1 素材制作工具

素材制作工具主要包括 3D 造型工具、2D 造型工具和纹理绘制工具三类。

1) 3D 造型工具包括但不限于：

- **3DS MAX、MAYA、C4D、Softimage：**提供 3D 模型创建、编辑、表面材质设定、动画制作等功能，模型创建具有多种方式，如基本几何形体及其组合、旋转体、3D 放样等。
- **Rhino：**具有强大的 NURBS 建模功能，适用于自由曲面造型。
- **ZBrush：**数字雕刻工具，支持对人物等复杂造型的 3D 自由创作。

2) 2D 造型工具包括但不限于:

- **Adobe Illustrator:** 基于矢量的 2D 图形创作。
- **Flash:** 2D 图形绘制及 2D 动画的设计。

3) 纹理绘制工具

- **Paint:** 提供各种笔触, 用于绘制各种材质纹理。

12.5.2 素材编辑工具

素材编辑工具主要包括图像编辑处理工具和视频编辑处理工具。

1) 图像编辑处理工具包括但不限于:

- **Photoshop:** 提供色彩、色调、亮度、对比度等各种图像处理功能, 以及多种滤镜效果。

2) 视频编辑处理工具包括但不限于:

- **AfterEffect:** 视频剪辑和各种特效制作。

12.5.3 系统集成开发工具

系统集成开发工作包括但不限于引擎工具和开发语言等。

1) 引擎工具

- 国产开发 3D 引擎、Unity3D、UE4、ThreeJS、BabylonJS：集成 3D 造型、视频、声音等各种素材，提供场景编辑、交互流程的设定、渲染等功能，实现系统开发的目标。

2) 开发语言

- C++、JAVA：用于底层支撑模块的开发。
- C#、JavaScript：用于任务层应用模块的开发。

12.6 系统运行

从虚拟仿真实验教学系统运行、支撑环境、资源开发、教学管理四方面，提出建设要求和技术规范。

12.6.1 虚拟仿真实验教学系统运行

1) 首次运行等待时长

用户首次通过浏览器从开始下载虚拟仿真实验资源到下载完成并进入可实验状态，所需的平均等待时长。

- 最低要求：不超过 5 分钟。
- 推荐要求：不宜超过 60 秒。

- 要求说明：下载等待时间直接影响用户的使用体验，过长的等待甚至使得教学进度无法按时完成。同时需要考虑现有技术条件的限制，达到研发条件与使用要求的平衡。根据对实验空间“iLab-x.com”上的 500 余个 2019 年申报国家虚拟仿真实验项目样本的测试和统计结果，资源包下载首次较慢，从第二次起下载时长相对缩短一半左右。在客户端平均 6.87Mbps 网速的条件下，测试得出首次运行等待平均时长在 120 秒以内的占 75.4%，在 20 秒以内的占 31.0%。

2) 再次运行等待时长

用户第二次及以后通过浏览器从开始下载虚拟仿真实验资源到下载完成并进入可实验状态，所需的平均等待时长。

- 最低要求：不超过 90 秒。
- 推荐要求：不宜超过 20 秒。
- 要求说明：根据对实验空间“iLab-x.com”上的 500 余个 2019 年申报国家虚拟仿真实验项目样本的测试和统计结果，资源包下载首次较慢，从第二次起加载时长相对缩短一半左右。在客户端平均 6.87Mbps 网速条件下，测试得出再次下载等待平均时长在 60 秒以内占 75.2%，在 10 秒以内占 25.5%。

3) 实验中单次推演过程等待时长

针对具有仿真计算的实验，系统通过仿真计算，获取计算结果所等待的时长。

- 最低要求：不超过 10 秒。
- 推荐要求：不宜超过 1 秒。
- 要求说明：在虚拟仿真实验过程中，系统某个单次推演过程导致的用户等待时间过长，即实验过程中遇到系统进行复杂的仿真计算导致用户长时间等待结果（此时用户无法获得有效反馈）。进行一次仿真计算时间过长时，系统需要进行优化。过长的等待时间会使用户体验严重降低，并严重影响用户进行再次数据输入和下一步操作来获得新的仿真实验结果的效率。根据对实验空间“iLab-x.com”上的 500 余个 2019 年申报国家虚拟仿真实验项目样本的测试和统计结果，单次仿真计算等待时长在 10 秒的以内占的占 87.8%，在 1 秒以内的占 67.1%。

4) 人机交互响应速度

虚拟仿真实验教学系统操作后的响应时长。

- 最低要求：不超过 1 秒。
- 推荐要求：不超过 0.5 秒。
- 要求说明：响应速度是用户与虚拟仿真实验对象的交互过程中，反映虚拟仿真实验教学系统响应性能的一项指标。人机交互响应速度是评价虚拟仿

真实实验教学项目的重要指标，反应速度快则能够减少用户的等待时间，若反应速度过慢，则会极大降低用户体验，影响虚拟仿真实验教学项目的质量。根据对实验空间“iLab-x.com”上的 500 余个 2019 年申报国家虚拟仿真实验项目样本的测试和统计结果，实验操作人机交互响应时长在 1 秒以内的占 86.1%。

5) 实验操作提示信息

在进行虚拟仿真实验的过程中，虚拟仿真软件以文字、图像等形式展现给实验者的有效实验提醒、提示和注意事项等信息。

- 最低要求：关键操作有提示信息。
- 推荐要求：实验总体流程、关键操作步骤、软件操作方法有提示信息，并且教师可设置提示程度，能根据教学需要自动出现和禁止。
- 要求说明：虚拟仿真实验软件要求在示教和训练模式下，每个操作均有明确的提醒、提示和注意事项等引导信息，须具备专业性强、指示作用明显等特点。

6) 并发数

虚拟仿真实验教学实验要求的服务器同时响应虚拟仿真实验资源下载或实验操作请求的数量，以满足同时开展实验教学的需求。

- 最低并发：30。

- 推荐并发：100。
- 要求说明：并发是指多个用户同时访问及下载资源、或进行实验操作、或进行服务器端仿真计算等，实质占用服务器性能及其网络带宽等服务器端系统资源的最大允许用户数量，并不是指仅仅同时在线这种几乎不占用服务器端系统资源的情况。并发访问不能超过服务器及网络的承载能力。

7) 并发访问排队提示

当服务器的带宽资源不够满足新的请求时，系统应给出明确的排队等待提示。

- 最低要求：系统能给出排队提示。
- 推荐要求：系统能给出排队提示及队列人数。
- 要求说明：当访问用户量过多时，系统的反应速度较慢，若没有相应的提示，将会导致用户放弃等待。在用户发送访问请求后，系统明确给出队列中的人数和时间，能够使用户进行有针对性的选择，缓解用户的排队时的焦虑，提高用户使用体验。

8) 共享必备条件

虚拟仿真实验教学系统通常要求能够在互联网环境下运行和服务。需要在网络服务器上软硬件的配置和部署，并持续进行服务。

- 最低要求：满足互联网访问，正常情况下，每半年中断服务次数不超过 10 次，每次中断时长不超过 24 小时。

- 推荐要求：满足互联网访问，正常情况下，每半年中断服务次数不超过 5 次，每次中断时长不超过 24 小时。
- 要求说明：要求实验项目的开放共享服务能够持续稳定运行，保证服务器对外连通。中断服务包括服务器宕机、网络不通、拒绝服务等外部用户不能访问的情况。

12.6.2 虚拟仿真实验教学系统运行环境

1) 中央处理器

虚拟仿真实验需要相应的计算能力保障，对客户端处理器计算能力有相应的要求。

- 最低配置：Intel Core i5-7400 同等或更高配置。
- 推荐配置：Intel Core i7-9700k 同等或更高配置。
- 要求说明：虚拟仿真实验教学项目要求客户端 CPU 运算能力至少达到最低配置，才能保证虚拟仿真实验能够较为流畅的运行。

2) 图形处理器

虚拟仿真实验过程中需要进行较为复杂的图形运算，因此对客户端的显卡性能有较高的要求。

- 最低配置：NVIDIA GeForce GTX 960 / AMD Radeon R9 290 同等或更高配置。

- 推荐配置：NVIDIA GeForce GTX 1060 / AMD Radeon RX 480 同等或更高配置。
- 要求说明：虚拟仿真实验教学项目要求客户端 GPU 算力超过最低配置，才能保证虚拟仿真实验能够较为流畅的运行。虚拟现实设备官方网站均提供了相关的硬件检测程序，以便测试硬件是否满足配置要求。

3) 内存

计算机中的所有程序的运行都在内存中进行。虚拟仿真实验需要在客户端上配置足够的内存。

- 最低配置：8GB。
- 推荐配置：16GB 及以上。
- 要求说明：为保证虚拟仿真实验流畅运行，客户端内存不能太低。如果虚拟仿真实验教学项目基于三维的环境搭建，其运行所需的存储空间也相对较高。

4) 外存

虚拟仿真实验数据缓存在本地时需要占用外存，主要是硬盘。

- 最低剩余空间：10GB。
- 推荐剩余空间：40GB 及以上。
- 要求说明：客户端的剩余空间是指在外存储器上空余的存储容量，单位为

千兆字节（GB）。虚拟仿真实验运行时所需的内存不足时将导致运行缓慢甚至无法运行。

5) 显示设备

在虚拟仿真实验的教学过程中，需要通过显示器对虚拟场景、虚拟仿真实验仪器等进行展示。实验在普通显示器全屏显示时的分辨率不能过低。

- 最低配置：分辨率 1024*768。
- 推荐配置：分辨率 1920*1080。
- 要求说明：显示分辨率表示的是屏幕图像的精密程度，是指显示器所能显示的像素有多少。高分辨率是保证彩色显示器清晰度的重要前提，它不仅意味着较高的清晰度，也意味着在同样的显示区域内能够显示更多的内容。

6) 动作输入

在虚拟仿真实验教学项目中的主要使用鼠标和键盘进行交互操作。

- 最低要求：三键鼠标（含滚轮）
- 要求说明：在使用某些实验项目时，中间滚轮键也会起一些作用。三键鼠标使用中间滚轮键在某些实验项目中往往能起到事半功倍的作用，例如在三维场景中就可利用中键快速拉近推远视角，简化了操作。

7) 语音输入

在虚拟仿真实验教学项目中提供语音输入。

- 推荐要求：语音识别输入。
- 要求说明：在使用某些实验项目时，会需要语音输入设备，甚至对声音定位提出要求。

8) 客户端连接带宽

从客户端到服务器端的全程网络连接，能够达到所需访问的实验项目的下载和数据交换的带宽。

- 最低配置：20Mb/s。
- 推荐配置：50Mb/s。
- 要求说明：连接带宽是指单台客户端访问服务器所获取的最高网速，单位为兆位 Mb。网速过低会导致用户更多的等待时长。指标值是考虑大多数实验资源包大小及一般服务器带宽和用户侧带宽条件下，所需的下载速度。

9) 服务器带宽

提供虚拟仿真实验资源的实验室服务器支持的下载带宽。

- 最低配置：1Gb/s（局域网）；100Mb/s（广域网）。
- 推荐配置：1Gb/s（局域网）；200Mb/s（广域网）。

- 要求说明：需要满足用户在可接受的时长范围内下载实验资源包和流畅进行实验数据交换的要求。

10) 浏览器

在虚拟仿真实验的教学过程中，需要使用浏览器环境运行各类虚拟仿真实验资源，浏览器是学生与虚拟仿真实验环境进行交互的界面。

- 推荐配置：支持 HTML5 技术，无需安装插件。
- 要求说明：目前各种浏览器的厂家和版本繁多，主流版本主要基于三种内核，即 IE、Chrome 和 Firefox 内核。其中 IE 内核的浏览器兼容的发布技术比较多，可以安装插件。但是新推出的一些浏览器，例如 Chrome、Firefox 等，支持基于通用 HTML5 技术发布的内容，不支持插件安装，这是一种新趋势。例如，主流的虚拟仿真实验开发工具 Unity3D 以 WebGL 方式发布的内容支持在 Chrome 内核的浏览器上使用，而无需安装插件。

12.6.3 虚拟仿真实验资源开发

1) 资源包首次下载容量

虚拟仿真实验系统提供用户见到实验场景之前首次下载的虚拟仿真实验资源包大小。

- 最低要求：500MB 以内。

- 推荐要求：100MB 以内。
- 要求说明：过大的虚拟仿真资源包需要较长的下载和渲染时间，开发人员应对其进行适当优化，明确虚拟仿真实验的主要内容，将其做得小而精，达到实验内容、项目质量、下载时长、运行性能的综合平衡。根据初始准备等待时长 120 秒以内要求，按首次下载 20Mbps 带宽计算，资源包首次下载容量应该在 300MB 以内，或者使用同等效果的分步式下载、云渲染等先进技术处理。

此项内容，视应用场景不同，可适当放宽要求。

2) 显示刷新率

用户在动态浏览或操作虚拟仿真实验场景时，输出在显示器上的每秒刷新显示画面数量，反映虚拟仿真实验场景在计算机中运行的流畅性。

- 最低刷新率：16 帧/秒。
- 推荐刷新率：30 帧/秒。
- 要求说明：显示刷新率是指在虚拟仿真实验的过程中，用户动态浏览或操作虚拟仿真实验场景时，输出在显示设备上的每秒刷新显示画面数量的最低值，反映其在视觉上的流畅性。用户在浏览虚拟仿真实验场景时不希望出现卡顿或不流畅现象。过低的显示刷新率甚至影响用户操作虚拟仿真实验场景。因此，显示刷新率应依据人类视觉系统进行最优匹配，为用户提供最佳的动态视觉体验。根据人体视觉研究以及参照视频的规定，刷新率

在 16 帧/秒以上低速状态下能够感觉基本连贯，刷新率在 30 帧/秒以上能够感觉到顺畅。

3) 实验环境逼真度

计算机生成的实验周边环境与设计脚本所述的真实实验环境的一致性程度直接影响实验者在操作虚拟仿真实验过程的体验。

- 最低要求：要求实验环境符合实际情况和公共常识。
- 推荐要求：实验环境在符合实际情况和公共常识的基础上，高度还原设计脚本所述的真实实验周边环境。
- 要求说明：场景必须符合实际情况和公共常识，否则该场景不能真实的表现虚拟仿真实验所要求的实验周边环境，影响学生的体验；另外，简化和粗糙的三维建模和程序设计也直接影响场景的拟真度，从而间接影响实验者进行虚拟仿真实验的学习效果。

4) 实验对象逼真度

计算机生成的实验对象与设计脚本所述的真实实验对象的一致性程度直接影响实验者在操作虚拟仿真实验过程的体验。

- 最低要求：要求实验对象符合实际情况和公共常识，实验对象的物理属性必须和设计脚本所述的真实对象的物理属性一致。
- 推荐要求：实验对象在符合实际情况和公共常识的基础上，高度还原设计

脚本所述的真实设备或装置，包括表面装饰等细节特征。

- 要求说明：实验对象必须符合实际情况和公共常识，否则该实验对象不能真实的表现虚拟仿真实验所要求的实验环境，从而间接影响实验者进行虚拟仿真实验的学习效果。

5) 实验现象逼真度

特效、音响、动画等素材与设计脚本所述的真实世界中实验现象的相似性程度越高，实验者在操作过程中的沉浸感越强，实验教学效果越好。

- 最低要求：要求特效等素材呈现的内容必须和设计脚本所述的真实实验现象相似，并能够表现设计脚本所述的真实世界的特征，不得出现错位、过度抽象、逻辑错误、过度失真等问题。
- 推荐要求：要求特效等素材呈现的实验现象根据设计脚本所述的真实世界实地取景，高度还原真实场景的实验现象。
- 要求说明：在虚拟仿真实验中，虚拟的仍然是真实的场景，所以不能使用比例、颜色等与真实世界严重不符的模型，同时也不能使用声音过度失真的音响或过度夸张的特效和动画，应该从真实世界中获取素材，保证实验过程的真实性，提高实验者的沉浸性。

6) 实验结果输出

实验者可以通过实验结果明确自己在虚拟仿真实验的过程中是否操作得当。

- 最低要求：虚拟仿真实验产生的实验结果必须符合设计者的预期，实验者进行虚拟仿真实验产生的实验结果必须能够正确无误的显示。
- 推荐要求：在保证实验结果正确的基础上，使用颜色、音效、文字等方法体现实验结果；对于实验过程出现的严重错误要给予明显的警告。
- 要求说明：虚拟仿真实验是教学软件，必须对实验过程和结果给予客观、真实、正确的评价，结果通常包括正确的、错误的、可以但不建议的三种操作行为，软件应该对这三种行为给出正确反应。

12.6.4 虚拟仿真实验教学管理

1) 用户登录

系统对学生的身份进行识别。

- 最低要求：能够通过账号密码登录进行身份识别。
- 推荐要求：手机等移动端能够通过生物特征及账号密码进行身份识别。
- 要求说明：“生物识别”是指通过指纹、人脸、瞳孔识别等生物活体检测技术手段进行严格验证。

2) 实验结果的保存和恢复

学生的实验结果应该作为一种记录进行保存。

- 最低要求：实验结果能够保存、恢复。

- 推荐要求：实验结果能够保存到服务器，并可恢复。
- 要求说明：为了便于教师对学生的实验结果进行考评，系统应该允许学生对实验结果进行保存（即存档），并在下次登录时可恢复实验结果。

3) 在线指导

学生在实验过程中有疑问可获取在线指导。

- 最低要求：系统支持教师在线指导。
- 推荐要求：系统能够实时智能指导，有条件的可实现教师可在线指导。
- 要求说明：为了便于学生在实验过程中及时得到指导，系统应该给学生提供快捷准确的指导和反馈功能，以减少学习阻碍，提高学生的学习兴趣。
“智能指导”是指采用人工智能技术为学生提供的及时在线指导。

4) 实验报告

学生在实验中可在线提交实验报告。

- 最低要求：系统提供在线实验报告编辑功能。
- 推荐要求：系统能够自动生成实验报告中的关键数据，并提供在线实验报告编辑功能，以及上传、查看或下载实验报告功能。
- 要求说明：在线编辑实验报告功能可以减少学习阻碍，提高学生的学习兴趣。“实验报告中的关键数据”是指从实验中提取的重要参数和结果，可以自动插入实验报告模板，生成实验报告数据。

5) 实验评分

学生的实验过程和结果应该能够进行评分。

- 最低要求：系统支持教师在线人工评分，并能提供后续成绩单查询。
- 推荐要求：系统能够自动评分，同时支持教师在线人工评分，并能提供后续成绩单查询。

6) 后台管理

教师、管理人员能够通过教学管理后台，对虚拟仿真资源建设情况、学生在线完成虚拟仿真实验情况进行不同程度、不同层面的监管和查询。

- 最低要求：在线查看学生的仿真实验操作时间、结果、成绩，可以对成绩进行统计及分析。
- 推荐要求：在线维护虚拟仿真资源、实时查看学生在线学习、仿真操作的时间、过程、结果、成绩。可根据教师、管理人员的不同权限，查询不同范围的统计及报表信息。
- 要求说明：对学生的仿真实验情况进行跟踪落实，从管理者角度去全局关注仿真实验的建设情况、应用情况，通过数据分析，报表形式进行可视化直观展示。

12.7 外部设备

虚拟仿真实验教学系统的外部设备主要包括输出设备和输入设备两大类。典型的输入/输出设备如图 5 所示。

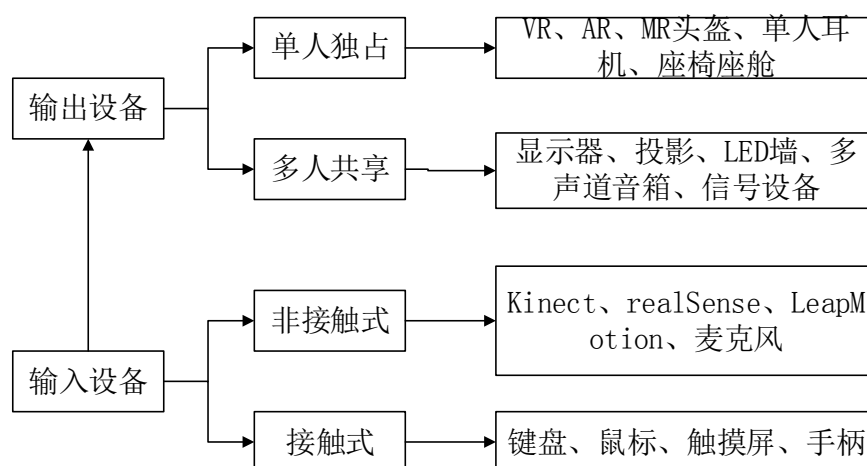


图 5 虚拟仿真实验教学系统研发涉及的主要输入/输出设备

12.7.1 交互输入设备

1) 接触式包括但不限于：

- 键盘：用于文本信息输入。
- 鼠标：用于选择信息和位置信息输入。
- 触摸屏：有电容式触摸屏、红外触摸框等，支持单点或多点输入方式，适用于选择和位置信息输入。
- 手柄：有含定位的控制手柄、不含定位的控制手柄等。

2) 非接触式包括但不限于：

- 肢体感知：有 Kinect、realSense、LeapMotion 等，可获取人体的关节、姿势、动作等信息。
- 声音输入：单麦克风、阵列麦克风等。

12.7.2 交互输出设备

1) 多人共享输出设备包括但不限于：

- 显示器、投影、LED 墙：适合多人参与，尺寸大小变化范围大，部分含立体显示。
- 音响设备：多声道音箱设备，适合多人参与。
- 其它信号设备：信号灯等其它信号设备。

2) 单人独占输出设备包括但不限于：

- 头盔、眼镜：VR 头盔、AR 头盔、MR 头盔、桌面立体（Zspace）等，观看时具有排他性，不适合多人同时观看。
- 耳机：两声道声场定位效果，不适合多人同时使用。
- 座椅座舱：多自由度运动座椅或座舱，适合单人或小组等。