
申报编号：2021-207001

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：列车电力牵引传动与故障诊断虚拟仿真实验

专业类代码：0806

负责人：李蔚

联系电话：13873378709

申报学校：中南大学

填表日期：2021-07-11

推荐单位：中南大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

1. 实验描述

1-1 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）

1) 实验的必要性及实用性

列车电力牵引传动系统被喻为“机车之芯”，掌握列车电力牵引传动控制与故障诊断技术是解决该领域复杂工程问题的必备技能，通过大量具有真实背景的实验是获得此技能的有效途径，但高速、高电压、高能耗、不可试错、运行工况复杂、故障复现难等因素使列车电力牵引传动的实车实验的开展非常困难，借助虚拟仿真平台再现实车实验场景，通过沉浸式自主学习，提升学生解决复杂工程问题的综合能力，就势所必然地成为首选。

2) 教学设计的合理性

依托互联网技术，采用线上线下结合的实验教学模式，开展学生为主体、教师为主导的自主学习，培养学生分析问题、设计实验的能力。采用自主学习的教学方法，引导学生通过对电力牵引传动系统关键部件的参数设计，掌握系统的工作原理。引入案例式的教学方法，将部分故障作为实验案例，让学生通过正向的故障现象体验，总结故障诊断的一般方法，再通过随机故障诊断实践，反向考核学生的故障分析诊断能力，检测学生的学习效果。正反双向的实验模式，能培养学生的归纳总结和逆向思维的能力。设置线上线下的师生双向互动，鼓励学生积极思考，引导学生对实验现象进行讨论交流，培养学生综合运用所学知识分析和解决实际工程问题的能力，为从事相关领域专业技术工作打下专业基础。

3) 实验系统的先进性

本实验通过三维虚拟仿真和多维可视化技术，全景呈现列车电力牵引传动系统运行时的真实场景，形象复现系统工作及故障发生时牵引逆变器、中间直流环节、四象限脉冲整流器能量流动的全过程，让学生身临其境地体验系统正常工作时的场景，感受因能量突变导致器件损害的真实故障状态。通过数据驱动型自主探究过程，为学生提供实验路线选择、实验方案设计、实验参数优化、实验系统构建等个性化虚拟仿真实验项目，方便学生利用虚拟手段模拟列车电力牵引传动系统的真实工程问题，开展对应的虚拟仿真实验，引导学生用科学原理与方法分析、解释实验结果，最终得出影响实验现象的深层因素，并通过信息综合自主形成实验报告。

1-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

本虚拟仿真实验基于列车牵引电传动系统的真实背景，在培养学生系统的综合分析能力、实验设计能力、解决复杂故障能力等方面达到如下目的：

1) 设计不同工况下，四象限脉冲整流器的能量转换、功率因素调整、多重四象限的谐波抑制机理探究实验，并可视化呈现实验结果，揭示四象限脉冲整流器的关键工作机理；

2) 设计牵引驱动的动态调节过程，可视化呈现中间直流环节的过压、过流、斩波保护、二次谐波吸收现象，得出中间直流环节的关键影响因素；

3) 在电力机车运行线路及工况变化条件下，针对逆变器及电机的实验设计可选择不同电力电子器件、不同结构参数及调制方式，研究电机转矩及转速控制机理，并可视化呈现实验结果，探明逆变器调制、电机转矩及转速控制的核心思想；

4) 针对列车牵引传动系统的元件故障、相构件故障、高电压下的过压、过流、逆变击穿、逆变失败、变压器过压、过流、过温及短路等难以实车实验的系列故障，设计故障仿真和虚拟诊断实验，引导学生分析故障根源及可能导致的严重后果，并可视化呈现故障演化全过程，形象揭示导致严重后果的问题关键，分析实车运营中将由此导致的重大损失，激励学生的责任感和担当感。

1-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：40 学时

(2) 该实验所占课时：2 学时

1-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

1) 系统结构直观体验：应用电力机车牵引传动系统基本结构知识和 3D 建模技术，虚拟机车场景，再现司机驾驶控制、电气系统设备的实际结构、电力牵引传动系统的安装位置、外观结构、部件之间的连接方式，并通过对各关键模块的 3D 模型进行放大、缩小、旋转等操作，多视角浏览系统及部件结构，沉浸式体验机车电力牵引交流传动系统的基本概况。

2) 参数影响自主习得：应用交流传动系统核心部件的工作原理、运行特性和控制方法等知识，在人机交互界面设置运行工况和关键参数，驱动云端建立的牵引变压器、四象限变流器、中间直流回路、PWM 逆变器和牵引电机 5 个核心部件的离散数学模型进行仿真，通过直观呈现的各部件输入输出电压电流波形，分析牵引和电制动工况下、电网电压变化下、关键参数变化时的各环节能量流动及变化状况、暂态及输出指标的变化规律，从而掌握机车电力牵引交流传动系统原理及控制方法。

3) 拓扑结构深度探究：应用轨道交通电力牵引传动控制系统的一般设计原则和方法，调用虚拟模块设计四象限变流器、中间直流回路、PWM 逆变器的拓扑结构，系统自动将其转化为数学模型并呈现仿真结果，分析拓扑结构变化对能量转换、功率因数变化、谐波抑制、电机转矩转速变化的影响，得出牵引传动系统各核心部件的作用及电机转矩及转速控制的理想拓扑结构及关键影响因素，从而掌握交流传动系统的拓扑设计方法。

4) 故障诊断寻因导究：应用轨道交通电力牵引传动控制系统的典型故障及发生机理的知识，从实时故障模型库中选择核心部件的故障类型，修改实验参数后仿真，观察列车牵引传动系统的元件故障、相构件故障、高电压下的过压、过流、逆变击穿、逆变失败、变压器过压、过流、过温及短路所造成的电流或电压突变，并利用因果关系总结出不同观测点信号间的因果关系，进而建立体现时空特性的系统故障传播模型，使观测点故障特征和故障传播时间与对应观测点的时空特性相匹配，从而确定故障类型与位置，实现故障诊断。

知识点：共 4 个

1. 电力机车、高速动车组以及城轨车辆等交流传动系统的组成结构；
2. 牵引变压器、四象限变流器、中间直流回路、PWM 逆变器和牵引电机等牵引传动系统核心部件的工作原理、运行特性和控制方法；
3. 轨道交通电力牵引传动控制系统的拓扑结构设计和优化方法；
4. 轨道交通电力牵引传动控制系统典型故障的发生机理及故障诊断方法。

(2) 核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限 500 字以内）

该实验本着“核心工程要素引入、实际运行数据驱动、真实工程问题复现”的原则，模拟列车电力牵引传动系统的运行调节特性及故障现象和处理过程，按照实际列车运行数据库通过云平台以列

车电力牵引传动系统核心部件 VR 实景呈现、系统拓扑结构设计、参数影响分析及故障诊断处理的逻辑构架展开，以“虚”的手段，解决“实”的问题。

仿真平台建立列车牵引传动系统三维缩比模型，提供机车实际运行模拟环境，使实验者建立对系统整体及核心部件内部结构的立体感知。以实际大功率机车牵引传动系统为背景，实验者根据其主要设备器件参数设计相应的系统拓扑结构，利用实际运行数据构建数据驱动的多参数全工况仿真模型，分析不同模块参数变化对系统输出的影响规律。

基于真实工程问题，以声、光、动画等方式再现列车实际运行中的典型故障发生全过程，实验者通过故障现象分析出故障原因，根据故障原理不断调整参数找出故障解决方法并对故障系统做出优化。

1-5 实验教学过程与实验方法

(1) 实验教学实施过程

1) 预习阶段

学生通过自主学习的方式，在实验平台上观看虚拟仿真实验引导视频，将理论学习阶段所掌握的机车电力牵引传动系统的组成结构、工作原理、运行与控制特性等内容，与实验中的各环节相关联，明确实验目的、原理、实验操作规范、要求及评分依据。

2) 线上实验阶段

学生登陆列车电力牵引传动与故障诊断虚拟仿真实验后，按“系统结构直观感受、参数影响自主习得、拓扑结构深度探究、故障诊断有章可循”四个阶段开展试验。在每个阶段，学生根据交互式引导完成实验，保证高的实验完成度和良好的实验效果。

3) 在线研讨阶段

在系统故障诊断环节，利用 QQ、微信等工具，进行师生互动，教师在线上组织学生以小组为单位开展创新性研讨，探讨故障机理及排除方法。

4) 总结评价阶段

系统将自动跟踪、记录、评价学生虚拟仿真实验的过程，根据得分点自动给出实验操作成绩。教师调用后台数据找出自评评分与系统评分相差较大的学生，并分析其分差产生的原因，加强学生诚信意识及自我认识能力。在创新性研讨环节，采用组内、组间互评及指导教师评价的方式，评估学生分析解决复杂问题的能力、团结协作能力，以便学生后续改进，提高学生综合素质。

(2) 实验方法描述

1) 数据驱动式方法

本项目配备大量的实验数据及虚拟实验环境，为学生提供进行列车参数设计的机会。学生在虚拟环境中，通过对系统整体以及各关键模块进行参数设计，可视化地观察到参数变化对机车性能的整体影响，实现多参数下的全工况仿真。

2) 情景体验式方法

本项目为学生提供多种案例场景，对列车正常运行状态以及故障状态进行模拟实验。学生可沉浸其中，利用视觉、听觉的多感官融合，可立体、生动地获知机车电力牵引传动系统的结构布局、设备设施、关键元器件的选取原则和工作原理等。

3) 任务驱动式方法

本项目以列车电力牵引传动故障诊断为核心任务，引导学生根据任务要求，采用闯关方法，通过分析牵引传动系统各模块工作状态，对列车出现的故障类型进行判断，并分析不同情境下列车故障的产生原因，提出对应的故障修复措施。培养学生设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效结论的能力。

1-6 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）

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	完成 HXD1 型机车车内场景漫游	5	以实验完成度为赋分依据，完成一个场景的漫游得 1 分，共计 5 分	5	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 预习成绩
2	完成 HXD1 型机车总体结构辨识	4	以实验完成度为赋分依据，能准确点击相应设备 3D 模型，并查看相关介绍得 1 分，共计 5 分	5	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 预习成绩
3	掌握电力牵引传动系统主电路拓扑结构及各主要环节的输入输出波形	5	以主电路拓扑搭建操作的正确度为赋分依据，若学生搭出完整电路计 6 分；若未能搭出完整电路，正确放置一个器件计 1 分，上限计 6 分	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告
4	探究主变压器电路中的元件参数对电路输出波形的影响	5	设置正确范围内的接触网压及变压器匝数比。若参数设置正确，每提交一次记 2 分，最高得 6 分	6	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告
5	掌握四象限整流电路的拓扑结构	5	以电路拓扑搭建操作的正确度为赋分依据，若学生搭出完整电路计 3 分，否则不计分	3	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告
6	探究四象限整流电路的各元件参数对其输出波形的影响	10	以参数输入次数与分析结论为赋分依据。每组元件参数每次输入计 1 分，上限 3 分。三组实验上限共计 9 分	9	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告
7	掌握三相逆变电路的拓扑结构	5	以电路拓扑搭建操作的正确度为赋分依据，若学生搭出完整电路计 3 分，否则不计分	3	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 教师评价报告

8	掌握电机工作原理，探究控制参数对电机输出的影响	5	以不同参数输入后查看波形的次数为赋分依据，观察波形1次记1分，上限为3分	3	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
9	探究各个电路模块在不同拓扑组合下对电力牵引传动系统输出特性的影响	15	以电路拓扑搭建操作的正确度作为赋分依据，学生每搭出一个完整的电路模块计3分，否则不计分	9	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
10	通过对设定故障结果的观察，分析故障发生的原因	10	以故障波形及现象的观察和故障机理的分析作为赋分依据。每点击查看一个故障波形计1分，上限为3分，准确分析设定故障发生的原因计5分。两个设定故障机理分析实验共计16分	16	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
11	通过对故障发生后，电力牵引传动系统各处电压、电流波形的观察，判断故障发生的位置及原因	5	以故障波形及现象的观察、故障位置的诊断、故障机理的分析作为赋分依据。每点击查看一个故障波形计1分，上限为5分；准确诊断出故障发生的位置，计5分；准确分析故障发生的原因，计5分。共计15分	15	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
12	完成客观题，检测学生在实验完成后对电力牵引传动系统相关知识的掌握程度	10	以回答问题的正误作为赋分依据，每答对一道问题计2分，多选题答错或者少答均不计分，共计20分	20	<input checked="" type="checkbox"/> 操作成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 实验报告 <input checked="" type="checkbox"/> 预习成绩 <input checked="" type="checkbox"/> 教师评价报告

1-7 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

交通设备与控制工程·大三年级；
轨道交通信号与控制·大三年级

(2) 基本知识和能力要求

先修课程：“电工技术”、“电子技术”、“控制工程基础”、“电力电子技术基础”、“电机及电力拖动”等。

能力要求：实验设计与分析能力、熟练运用电路相关知识的能力、简单故障分析及解决能力、小组合作与协同工作能力、文献检索能力。

2. 实验教学相关网络及安全要求描述

2-1 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 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）
100 人

2-2 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

Windows®7 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

2-3 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

(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）

浏览器支持：Firefox 火狐浏览器 64 位版本（可提供相关软件下载服务）

2-4 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

配件配置需求（最低）

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

配件配置需求（推荐）

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。

2-5 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：

第二批国家级一流本科课程推荐