

# 北京交通大学校内金课申报书

## 虚拟仿真实验教学项目

( 2020 年 )

实验教学项目名称：城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真  
实验项目

所属课程名称：电力系统分析/智能电网

所属专业代码：080601

实验教学项目负责人姓名：许寅

有效链接网址：<http://ee.bjtu.owvlab.net/virexp/znpd>

申报学院：电气工程学院

填表日期：2020年9月21日

## 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	许寅	性别	男	出生年月	1986年6月
学历	博士研究生	学位	博士	电话	010-51687316
专业技术职务	教授	行政职务	无	手机	18519004061
院系	电气工程学院			电子邮箱	xuyin@bjtu.edu.cn
地址	北京市海淀区上园村3号		邮编	100044	
<p><b>教学研究情况：</b></p> <p>教学研究项目（含课题名称、来源、年限，不超过5项）：</p> <p>（1）基于科教融合的智能电网前沿课程建设，北京交通大学，2020-2021；</p> <p>（2）研究生写作能力培训课程建设，北京交通大学，2020-2021；</p> <p>（3）智能电网高性能半实物综合仿真实验平台建设，北京交通大学，2019。</p> <p>（4）电路实验教学改革探究，北京交通大学，2018-2019；</p> <p>获得教学研究奖项（不超过5项）：</p> <p>（1）2020 北京交通大学智瑾奖教金（优秀青年教师奖）；</p> <p>（2）2019 北京交通大学优秀主讲教师；</p> <p>（3）2017 北京市高等教育教学成果二等奖。</p>					
<p><b>学术研究情况：</b></p> <p>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）：</p> <p>（1）考虑暂态约束的配电网关键负荷恢复优化决策与风险限制方法研究，国家自然科学基金“青年基金”，2019-2021，负责人。</p> <p>（2）基于微型同步相量测量的智能配电网运行关键技术研究-课题4：智能配电网信息集成分析与协调控制技术，国家重点研发计划，2017-2020，子课题负责人。</p> <p>（3）电网信息物理系统分析与控制的基础理论与方法-课题5：电网CPS综合仿真平台研制与关键技术验证，2017-2021，子课题负责人。</p> <p>（4）分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范-课题2：梯级水光互补系统运行及稳定特性分析与控制，2018-2021，骨干人员。</p> <p>（5）大电网智能调度与安全预警关键技术研究及应用-课题4：大电网一体化在线安全风险防控和智能决策技术，2017-2020，骨干人员。</p> <p>在国内外公开发行人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）：</p> <p>（1）Y. Xu, C.-C. Liu, Z. Wang, K. Mo, K. Schneider, F. Tuffner, and D. Ton. DGs for Service Restoration to Critical Load in a Secondary Network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):435-447.(一区，影响因子 8.267, ESI 高被引论文)</p>					

- (2) **Y. Xu**, C.-C. Liu, K. Schneider, F. Tuffner, and D. Ton. Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437. (一区, 影响因子 8.267, ESI 高被引论文)
- (3) S. Chen (#), Q. Chen, **Y. Xu**. Strategic Bidding and Compensation Mechanism for a Load Aggregator with Direct Thermostat Control Capabilities [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2327-2336. (一区, 影响因子 8.267, ESI 高被引论文)
- (4) Y. Wang, **Y. Xu**, J. He, C.-C. Liu, K. P. Schneider, M. Hong, D. T. Ton. Coordinating Multiple Sources for Service Restoration to Enhance Resilience of Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5781-5793. (一区, 影响因子 8.267)
- (5) Z. Wang, C. Shen, **Y. Xu**, F. Liu, X. Wu, C.-C. Liu. Risk-limiting load restoration for resilience enhancement with intermittent energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2507-2522. (一区, 影响因子 8.267, ESI 高被引论文)

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) 中国电工技术学会科技进步一等奖, 中国电工技术学会, 排名 2, 2019;
- (2) 中国电力优秀科技青年人才奖, 中国电机工程学会, 排名 1, 2019;
- (3) 西藏自治区科学技术一等奖, 西藏自治区人民政府, 排名 18, 2019;
- (4) 第 46 届日内瓦国际发明银奖, 瑞士联邦政府, 排名 2, 2017。

## 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	许寅	北京交通大学	教授	无	实验项目规划设计	
2	王喜莲	北京交通大学	教授	电气工程学院副院长	实验方案及实验流程	
3	和敬涵	北京交通大学	教授	电气工程学院党委书记	实验项目规范设计	
4	王小君	北京交通大学	教授	电气工程学院党委副书记	后台模型计算	
5	王颖	北京交通大学	师资博士后	无	在线教学服务指导	在线教学服务人员

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	吴翔宇	北京交通大学	副教授	无	在线教学服务指导	在线教学服务人员
2	刘翌	北京交通大学	师资博士后	无	在线教学服务指导	在线教学服务人员
	倪平浩	北京交通大学	高级工程师	实验支部书记	设备认知模块设计	技术支持人员
3	张大海	北京交通大学	副教授	无	模型搭建模块设计	技术支持人员
4	李猛	北京交通大学	师资博士后	无	轨道交通模块设计	技术支持人员
5	张放	北京交通大学	副教授	无	电动汽车模块设计	技术支持人员
项目团队总人数： <u>10</u> （人） 高校人员数量： <u>10</u> （人） 企业人员数量： <u>0</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

<p><b>2-1 名称</b></p> <p>城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目</p>
<p><b>2-2 实验目的</b></p> <p>当前，全球新一轮科技革命和产业变革蓬勃发展，能源、交通等领域有关技术加速融合，为实现未来综合交通运输的可持续发展，中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》，提倡优化交通能源结构，大力发展以电能为动力的城市轨道交通和电动汽车。“新基建”政策的出台，进一步推动交通工具的电气化，对建设清洁美丽世界、构建人类命运共同体具有重要意义。然而，随着城市轨道交通运营里程及电动汽车保有量的迅速增加，电气化交通负荷能耗也随之增大，如何提高能源利用率、实现效益最大化成为城市电气化交通系统面临的又一挑战。作为科技创新型人才的培养基地，高校应及时开展城市电气化交通系统高效用能技术相关教学，为城市电气化交通系统节能增效助力。</p> <p>然而，考虑到城市电气化交通系统的特点，采用真实实验进行高效用能技术的教学活动存在以下问题：</p>

1) 大规模城市电气化交通系统包含较多高压、高速设备，考虑学生安全因素，**现场教学实施困难**；

2) 充电站、轨道交通等为关键基础设施，现场验证需得到电力、交通等部门的配合，**现场实验教学将影响城市电气化交通系统的正常运营**；

3) 校内搭建大规模实物实验平台，**建设周期长、造价高**，而小规模实物平台难以反映系统实际运行特性，**教学研究参考价值有限**。

因此，依托交通运输工程**国家级重点学科**，轨道交通电气化**国家级特色专业**，轨道牵引电气化**国家首批卓越工程师计划专业**，电工电子**国家级实验教学示范中心**，北京交通大学-北京市地铁运营公司**国家级工程实践教育中心**，轨道交通控制与安全**国家重点实验室**，北京市轨道交通电气工程技术研究中心、电力牵引教育部工程研究中心、国家能源主动配电网技术研发中心，“111计划-主动配电网大数据分析处理创新引智基地”，北京交通大学建设了城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目，将虚拟仿真实验与理论课程深度融合，突破时间与空间限制，打破课堂与实践壁垒，拓展实验深度与广度，将城市电气化交通系统高效用能工程场景通过虚拟仿真技术搬进课堂，全方位的使学生对轨道交通能量回馈利用、电动汽车有序充电等实体实验无法开展的实验内容得以最大限度的感受介入、设计分析、拓展创新，便于学生自主学习、探究式学习和移动学习，培养学生的实践能力和创新能力，填补了电气工程专业在城市电气化交通系统高效用能技术领域的空白。

本实验教学项目包含设备认知、仿真搭建、轨道交通实验和电动汽车实验四个模块，支撑《轨道交通牵引供电》、《电力系统分析》、《智能电网》等理论课程，服务电力系统课程设计等实践专业课程。本项目的具体目的如下：

1) 以虚补实，将**3D漫游、虚拟仿真**等技术与教学资源深度融合，构造**逼真的城市电气化交通系统工程场景**，增强学生的**沉浸感、临场感和真实感**，**激发学生的学习兴趣**。

设备认知环节，通过对电动汽车、轨道交通、发电机、变压器等城市电气化交通系统组成设备的**3D建模、参数介绍**，使学生“身临其境”了解不同设备的结构、功能及分类；仿真搭建环节，通过对城市电气化交通系统实际工程场景的再现，让学生直观了解城市电气化交通系统的基本组成结构和组成原则。本项目将以往文字、图片式教学资源**立体化、生动化、形象化**，增强内容趣味性的同时，弥补了学生无法参与现场教学和实验室教学的不足。

2) 以虚扩实，集成**人机交互技术**与后台电力系统仿真算法，**模拟城市电气化交通系统运行场景**，突破实际系统搭建的**空间限制及现场系统运行的时间限制**，引导学生自主设计、思考和辨析，培养学生的**系统分析和综合设计能力**。

仿真搭建环节，通过实验步骤解说使学生掌握城市电气化交通系统的基本运行原理，并以学生为中心，支持其对系统构成及设备参数进行自由构建和自

主设计。通过仿真模拟给予实时反馈，让学生在探索中分析、思辨，弥补了现场教学和实验教学灵活性不足、教学研究参考价值有限的缺点。

3) 以虚验实，利用先进的城市电气化交通系统高效用能技术反哺实践教学，激发学生的自主创新意识，并基于可逆的实验条件，寓学于用，提高学生的实践应用能力，强化学生的工程素养。

轨道交通实验和电动汽车实验环节，通过集成当前城市电气化交通系统高效用能先进技术，使学生紧密跟踪学科发展，学习前人的创新思想；通过“不断试错”的过程，使学生在体验中“知错、改错、防错”，在实践中得真知。此环节弥补了现场验证代价高的缺点，为城市电气化交通系统高效用能技术的教学与研究提供有效支撑。

### 2-3 实验课时

(1) 实验所属课程所占课时：《电力系统分析》64 课时、《智能电网》32 课时

(2) 该实验项目所占课时：10 课时

### 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）

#### 1、实验项目顶层设计理念

##### 实验原理

本项目以城市电气化交通系统建设、运行及用能为主线，以设备认知为基础，将仿真搭建、轨道交通能量回馈实验、电动汽车有序充电实验进行综合设计，将各过程的基本理论、基本操作、设备结构等知识贯穿于操作全过程。其中，仿真搭建原理包括配电网基本组成及组网原则、电力系统潮流计算原理；轨道交通能量回馈实验原理包括轨道交通供电系统结构及工作原理、能馈系统设计方案及工作原理；电动汽车有序充电原理包括电动汽车充放电特性、有序充电策略制定及优化原理。

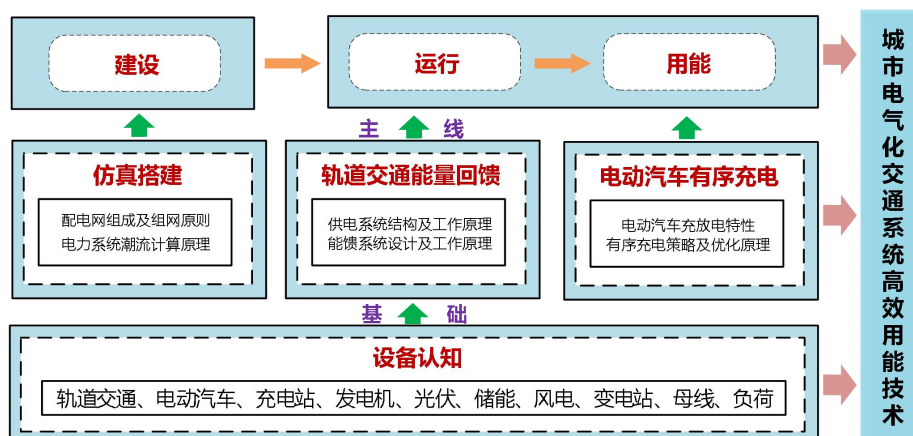


图 2.4.1 城市电气化交通系统高效用能原理架构图

上述基本原理具体如下：

## 1、配电网基本组成及组网原则

配电网是指从输电网或地区发电厂接受电能，通过配电设施就地分配或按电压逐级分配给各类用户的电力网。配电网是由架空线路、电缆、杆塔、配电变压器、隔离开关、无功补偿电容以及一些附属设施等组成的，在电力网中起重要分配电能作用的网络。按电压等级的不同，可又分为高压配电网(110kV、35kV)、中压配电网(20kV、10kV、6kV、3kV)和低压配电网(220V/380V)；按供电地域特点不同或服务对象不同，可分为城市配电网和农村配电网；按配电线路的不同，可分为架空配电网、电缆配电网以及架空电缆混合配电网。

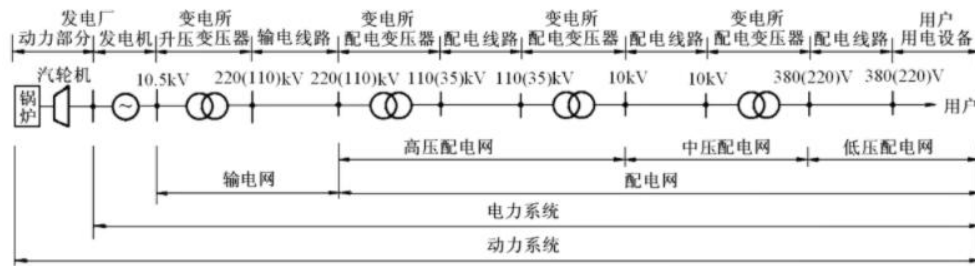


图 2.4.2 配电网组成架构图

配电网组网的基本原则是一般采用闭环设计、开环运行，其结构呈辐射状。放射式配电网是指一路配电线路自配电变电所引出，按照负荷的分布情况，呈放射式延伸出去，线路没有其他可连接的电源，所有用电点的电能只能通过单一的路径供给，如下图所示。

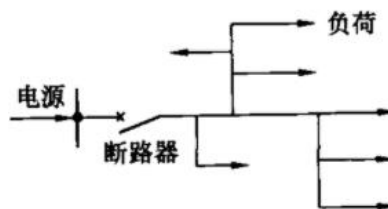


图 2.4.3 配电网组网原则

## 2、电力系统潮流计算原理

电力系统潮流计算是对复杂电力系统正常和故障条件下稳态运行状态的计算。其目的是求取电力系统在给定运行方式下的节点电压和功率分布，用以检查系统各元件是否过负荷、各点电压是否满足要求、功率分布和分配是否合理以及功率损耗等。

本平台采用牛顿-拉夫逊法，对非线性代数方程进行逐次线性化求解，求解算法框图如下图。

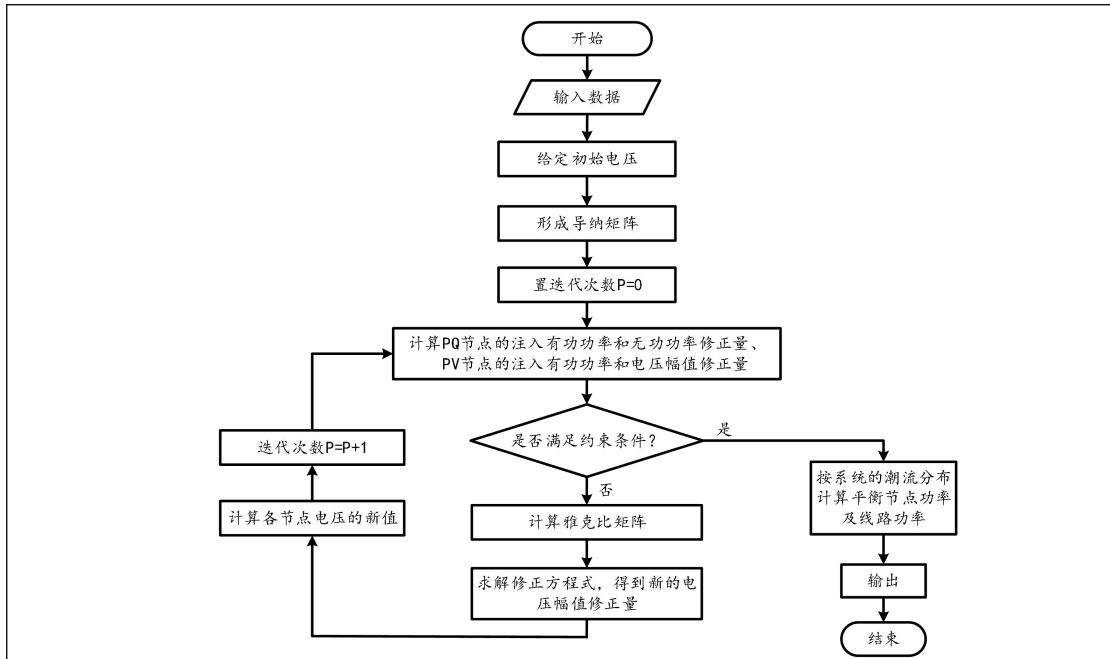


图 2.4.4 牛顿-拉夫逊法的求解流程框图

牛顿-拉夫逊法的几何解释如下图所示。

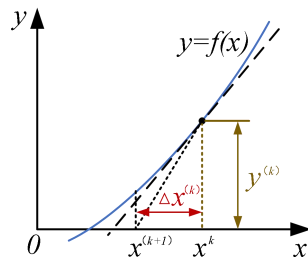


图 2.4.5 牛顿-拉夫逊法的几何解释

### 3、城市轨道交通供电系统结构及基本工作原理

城市轨道交通供电系统由主变电所、牵引变电站系统、牵引网系统、动力照明供电系统以及机车系统等部分构成，图 2.4.6 所示为其结构框图。其中，牵引变电站是牵引供电的核心，它将三相中压交流电变成供地铁机车所使用的低压直流电，直流馈线再将牵引变电所的直流电送到牵引网上，为地铁车辆提供所需的直流电能。牵引网系统是沿线路敷设的专为电动车辆供给电源的装置，由正极接触网供电，负极走行轨回流两部分组成。动力照明供电系统包括降压变电所、动力照明配电系统两部分，将交流中压电压降压变成交流 220/380V 电压，为运营需要的各种机电设备提供低压电源。机车采用逆变器与牵引网相连接，将电能引入车内使用，并通过走行轨回流至牵引变电站。

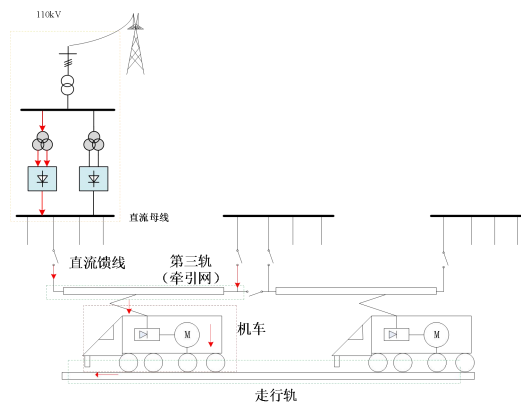


图 2.4.6 城市轨道交通供电系统

#### 4、轨道交能馈系统设计方案及工作原理

牵引变电站是整个直流轨道交通系统运行的能量来源，负责电能的供应、转化与传输。近年来，随着功率半导体 IGBT 和转换器控制技术的发展和具有成本效益的 IGBT 逆变器越来越多地应用于直流牵引供电系统。带逆变器的牵引变电站称为逆变电站或可逆变电站。列车启动及运行过程中，由二极管整流器向列车供电；列车制动时，列车的剩余再生制动能量经过逆变器回馈至中压电网，为交流负载供电，从而有效降低整个供电系统的能耗，同时减少制动蹄的机械磨损，避免隧道温升。

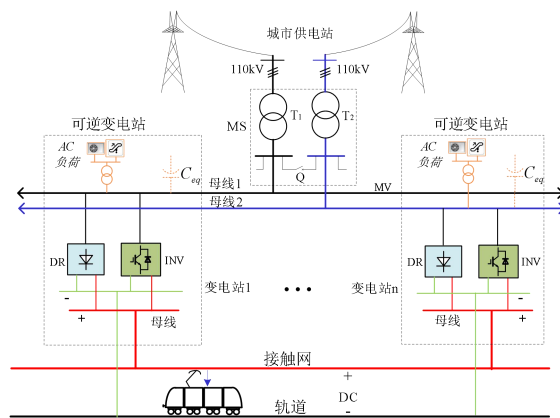


图 2.4.7 城市轨道交通能馈系统

#### 5、电动汽车充放电特性及其对电网的影响

电动汽车充电特性通常包含充电电流、电压降落及充电时间等几个方面。电动汽车电池有常规充电、快速充电和机械充电三种充电模式。其中，快速充电特性曲线如下图所示。

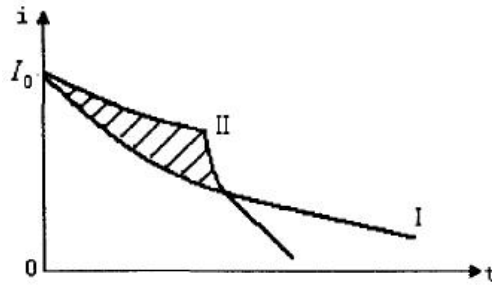


图 2.4.8 电动汽车快速充电特性

不同类型的电池具有不同的放电特性，电动汽车锂离子动力电池恒流放电时，在放电初始阶段电池工作电压下降迅速，而后进入线形下降区；在放电接近终止时，电池工作电压又开始急剧下降。锂离子动力电池的工作电压变化与放电深度存在着密切关系。图 2.4.9 为锂离子动力电池放电特性。

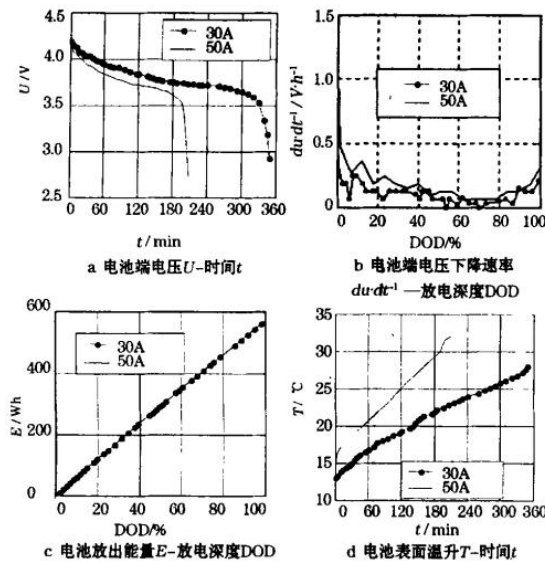


图 2.4.8 锂离子动力电池放电特性

大规模电动汽车同时充电必然增加系统的负荷需求，当电动汽车的充电行为不受控制时（即无序充电），将会进一步加大电网峰谷差，甚至引发功率过载等电网拥塞问题，影响供电质量。另一方面可能是网络损耗率增加，影响电网的经济运行。因此有必要实施电动汽车有序优化控制策略。

### 6、电动汽车有序充电策略制定及优化原理

电动汽车有序充放电技术可实现电动汽车的有序调度，充分利用其空间可移动、时间可调度的特点，在电力处于“低谷”时充电，在电力处于“尖峰”时放电，不仅可以缓解无序状态下引发的峰谷差大、功率过载等问题，保证城市电气化交通系统可靠运行，还可以进一步缓解城市交通拥堵等情况。

对于电动汽车用户而言，有序充电控制策略如图所示。

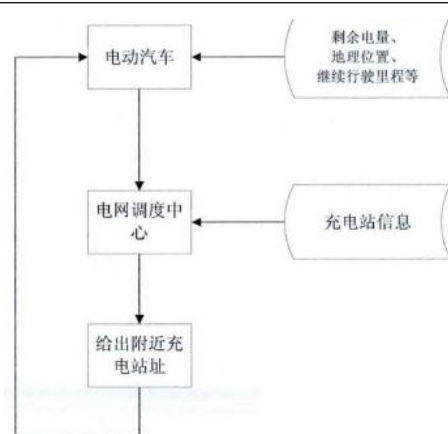


图 2.4.8 用户有序控制策略

对于充电站而言，有序充电控制就是充电站通过与电网的联动，在电网统筹安排下进行充电行为。充电站的控制策略流程如图所示。

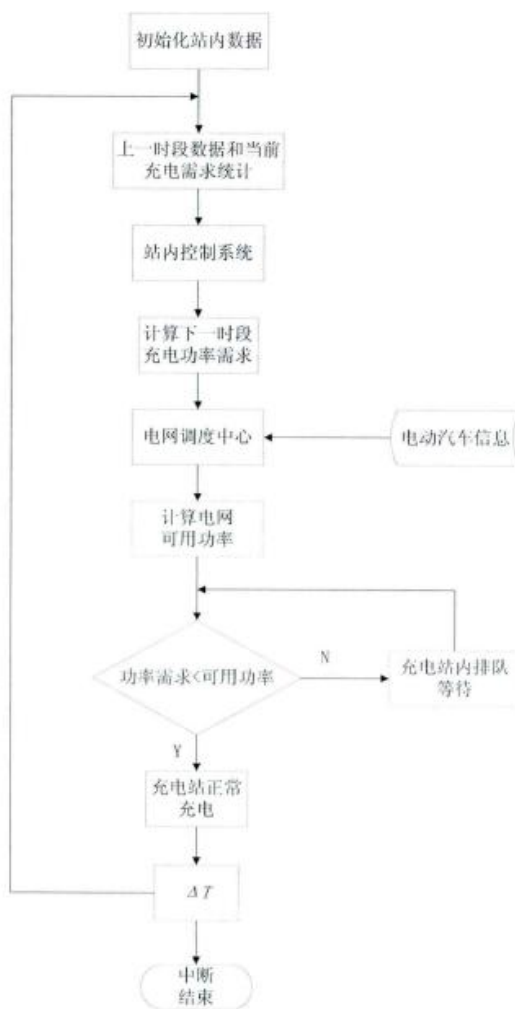


图 2.4.8 充电站有序控制策略

### 仿真要素

本实验项目的核心要素为轨道交通实验和电动汽车实验中系统运行及用

能场景的真实仿真程度。本平台设备类型为经过广泛市场调研后归纳得出，且设备参数设置均依据实际厂商提供的数据经过科学的合理化处理后得到；本平台后台算法结合现有电力系统仿真软件算法及当前成熟的轨道交通能馈技术、电动汽车有序充电技术，经过不同拓扑、不同规模系统（拓扑、数据来源于实际系统）的多方面比较测试及与电力、交通部门技术人员的沟通，验证了算法的正确性和合理性。因此，本虚拟仿真实验项目仿真环境接近真实的运行环境，仿真度较高。

设备认知 模块	电动汽车	3D 高度仿真	参考实际工程中 电动汽车、轨道交 通、风电、发电机、 变电站等设备的 形态、参数及工作 原理进行设计
	充电站	3D 高度仿真	
	储能	3D 高度仿真	
	普通负荷	3D 高度仿真	
	母线	3D 高度仿真	
	光伏	3D 高度仿真	
	发电机	3D 高度仿真	
	变压器	3D 高度仿真	
	风电	3D 高度仿真	
	变电站	3D 高度仿真	
	轨道交通	3D 高度仿真	
	断路器	3D 高度仿真	
仿真搭建 模块	潮流计算方法	高度仿真	参考《电力系统分 析》教材与实际电 力系统潮流计算 方法
	电动汽车充放 电特性	高度仿真	参考厂商提供技 术手册及实际电 动汽车充点电特 性曲线
	轨道交通运行 特性	高度仿真	
轨道交通 实验模块	能馈系统设计 及工作原理	高度仿真	参考实际物理系 统相应方案设计 及相关技术人员 提供的技术支持

知识点：共 8 个

- (1) 配电网基本组成及分类
- (2) 配电网组网原则

- (3) 电力系统潮流计算
- (4) 牛顿-拉夫逊法
- (5) 城市轨道交通供电系统基本结构及工作原理
- (6) 城市轨道交通能馈系统设计方案及工作原理
- (7) 电动汽车充放电特性
- (8) 电动汽车有序充电策略及优化

## 2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

### 1、客户端电脑

最低配置：GPU Intel i5 2.2GHz 以上；内存 4GB 及以上；显卡分辨率 1920x1080 像素及以上；存储容量 80G 及以上；网卡 1000Mbps 及以上

### 2、虚拟仿真实验软件

城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目包括设备认知、仿真搭建、轨道交通实验、电动汽车实验四个功能模块，四个模块彼此关联，设备认知和仿真搭建层次递进，共同支撑轨道交通实验和电动汽车实验。上述四个功能模块结合为完整的系统，软件安装于远程服务器，通过互联网为学生提供服务。

#### (1) 设备认知模块

该模块构建了城市电气化交通系统高效用能的场景，学生点击配电网的相关设备与元件，对设备进行学习与辨识，包括认知配电网中主要电气元件；点击进入轨道交通场景，对地铁列车、地铁站、地铁轨道、能量回馈系统等设备进行认知；进入电动汽车场景，对充电桩、电动汽车的特性、参数进行认知学习。学生需要完成设备辨识考核与问题回答，系统将根据辨识结果与作答情况给出评分。

#### (2) 搭建模块

该模块提供了城市电气化交通系统整体仿真模型搭建所需的典型虚拟元件，包括配电网、充电站以及轨道交通相关元件。学生可以在面板上可以构造电气连接图，输入各元件的参数值，并通过潮流计算来校验模型搭建的正确性，使学生对于城市电气化交通系统的结构与各构成部分有清晰的认识。

此外，该模块具备潮流计算功能，在搭建完成后可以通过计算得到所搭建整个网络的电压、电流、功率、功率流向等系统运行参数。

#### (3) 轨道交通实验模块

该模块模拟了 2D 真实场景，重现轨道交通正常运行和能量回收情景，以具体形象的动画展示地铁列车匀速行驶、即将到站开始减速、到站停车、启动

再次运行，其次是让学生在开启能量回馈系统后得到系统整体耗能的变化，从而实现配电网经济节能运行。

该模块通过在线路、列车、能量回馈系统之间的功率流向展示出能量的传输过程，后台先进计算机软件求得系统的功率大小、经济水平、节能效益。通过形象的动画演示加强学生对实验的记忆，达到提高学习效果的目的。

#### (4) 电动汽车实验模块

该模块是基于整体软硬件架构下的一个综合实验模块，提供了 3D 场景重现电动汽车充电场景，场景设计为多个交流充电桩和直流充电桩的充电站，其中部分充电桩带有车辆正在进行充电，部分充电桩空闲。首先以具体形象的动画展示电动汽车的无序充电和有序充电模式，该实验模块可以清楚的得到两者的负荷功率波动曲线等，学生可以直观的对比出两种充电实验的差异。

### 2-6 实验材料（或预设参数等）

#### (1) 设备认知模块的场景设定

- 1) 配电网中各设备实景和设备电气符号的场景；
- 2) 轨道交通的相关设备实景、电气符号及基本原理介绍；
- 3) 电动汽车场景下相关设备实景、电气符号及基本原理介绍。

#### (2) 仿真搭建模块的预设参数

1) 配电网拓扑与构成：以典型城市配电网为例，包含网络结构与各虚拟元件的数量和接入位置；

2) 潮流计算预设参数：用于潮流计算的网路结构参数、电源有功无功输出、各类负荷数据；

#### (3) 轨道交通实验模块的预设参数

- 1) 列车负荷：给出 80km/h 和 100km/h 两种速度等级的列车运行数据；
- 2) 能量回馈系统是否启动；
- 3) 列车速度：80km/h 和 100km/h 两种速度
- 4) 列车日排班表：列车日行驶时长、经过站点

#### (4) 电动汽车实验的预设参数

1) 电动汽车数量：学生可以自行设定当日需要在充电站充电的电动汽车数量；

2) 充电类型：不同的电动汽车可以设定不同的充电类型，分为常规交流充电和直流充电；

3) 描述充电行为的参数：到达充电站的时间、到达充电站的 SOC、离开充电站的时间等；

4) 充电功率：可以设定不同充电桩的充电功率，有 7kW 和 32kW 可供选择；

5) 电池容量：不同电动汽车的电池容量不同，可以设定电动汽车的容量，

单位为 kW·h。

## 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、教学方法概述

本项目提出了情景式、互动式、科研反哺式相结合的实验教学方法，努力形成以虚拟仿真平台直观化、具象化为中心的实验教学模式，突出了学生自主实践能力和探索精神的培养。

#### （1）情景式教学：

在教学中引入以现场实际数据与场景为基础的虚拟仿真实验，打破了场景单一、脱离现实的传统实验教学模式。实验中涉及到的拓扑结构、元件参数等与真实系统一致，并穿插电力系统实际运行图片和视频，使学生置身于虚拟场景和真实场景之中，深入理解城市电气化交通系统的工作原理，体验设备巡游和实际操作，实现情景式的教与学。

#### （2）互动式教学：

在实验过程中，学生深入学习城市电气化交通系统的相关知识，参与到电网运行当中去，同时在学习之后回答实验系统中设置的问题，实现深度互动式教学，巩固理论知识，帮助学生加深理解，提升教学效果。

#### （3）科研反哺式教学：

虚拟仿真实验中的城市电气化交通系统高效用能紧密结合科研项目，由前沿科研成果转化而来，体现了科研反哺教学，能够使学生了解行业的研究热点和难点，掌握行业前沿研究技术，为行业尖端技术发展输送人才，同时可以持续完善虚拟仿真实验，不断融入新的科研成果，促进实验教学的深入改革。



## **(2) 阶段一的实验目的及实施过程**

该阶段主要通过对城市电气化交通系统的先整体后局部的认知，以期达到了了解城市电气化交通系统整体结构和配电网、轨道交通、电动汽车等设备。

教学实施过程主要为通过元件列表可以向学生直观展示各元件的基本原理、实物图、参数和电气符号的介绍。

## **(2) 阶段二的实验目的及实施过程**

该阶段主要通过老师教学，引导学生学习城市电气化交通系统高效用能系统的关键技术，以期达到理解整个系统的工作原理。

教学实施过程主要为通过教学讲解城市电气化交通系统高效用能系统的工作原理，引导学生理解系统模型如何与理论知识相结合，调节各元件参数观察潮流计算结果并分析。

## **(3) 阶段三的实验目的及实施过程**

该阶段主要是培养学生的自主学习能力，通过前两个阶段已熟悉系统整体模型，能够完成模型搭建的相关工作，以期达到完成轨道交通实验。

教学实施过程主要为引导学生设定列车的运行时间、运行间隔、列车数量等参数，通过轨道交通计算有无能馈系统条件下的运行成本，从而验证能馈系统的经济节能作用。

## **(4) 阶段四的实验目的及实施过程**

该阶段主要培养学生的创新和学习能力，通过轨道交通实验的完成已熟悉城市电气化交通系统高效用能系统的相关知识，熟悉系统的运行原理，以期望达到完成电动汽车实验。

教学实施过程主要为引导学生设置不同电动汽车的数量、类型，对比有序、无序充电的差异，布置学生按照实验报告表格填写实验观察结果。

## **3、教学效果分析**

本实验项目基于实际数据和场景，充分调动学生在知识学习、手动操作及思考验证方面的积极性，可在实验教学，素质培养，社会培训，资源共享等方面取得可观效果。具体为：

1) 培养学生动手实践能力，训练数字化建模和仿真技能。在本实验教学环节中，学生将全面的学习电力系统建模和仿真实验方法。学生将了解并掌握电气元件的基本原理和轨道交通、电动汽车模块的实验原理，以及基于实际数据和场景的仿真设计等方法。这些方法和技能将极大的提升学生在后续电力系统相关课程中自主学习的能力，帮助他们将课本知识转变为工程解决方案；

2) 在安全、高效的虚拟实验环境中，完成城市电气化交通系统的认知教育，强化电气-交通融合的相关知识，推动系统高效用能的深度教学。由于城市电气化交通系统的安全可靠性和经济性，相关实验无法在真实场景中开展，

本实验项目按照真实实验对象进行虚拟场景构造，通过实验模拟，可以达到其行为与真实现场情况一致，使得学生深入了解城市电气化交通系统的基本结构和运行机制。通过数字化抽象、建模、仿真、设计和分析等环节，提升学生对城市电气化交通系统高效用能方法的掌握和灵活运用能力。

3) 实现网络化、数据化和互动化的教学和虚拟实验过程，形成可持续发展的综合教学方法。利用虚拟仿真教学系统的软件功能，可以方便进行信息交互，实施多种教学方法，构建的基于实际数据和场景的虚拟实验环境可以让学生反复地操作练习与自主地实验综合设计，引导学生主动将理论与实际联系起来，提高学生自主创新能力。推动虚拟教学环境和大规模在线教育的结合，形成一个新的教学范式，发展虚拟实验数据管理和分析方法，推动可持续改进的教学方法和终生教育机制。

## 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：

城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验按照设备认知、仿真搭建、数据交互验证和科教前沿 4 个环节，进行模块化、难度适宜的实验教学：

#### 1) 设备认知环节：

通过虚拟仿真系统对内置的各个现场设备的实物图、电气符号、铭牌参数、基本工作原理进行认知学习，实现城市电气化交通系统高效用能的关键设备认知。按照“先整体后局部”的顺序，首先整体认知“城市电气化交通系统高效用能组成部分”，即配电网、轨道交通、充电站 3 部分，然后对局部模块到细节的设备分别进行认知：配电网部分，认知变电站、母线、变压器、线路、负荷等；轨道交通部分，认知地铁列车、地铁站、地铁轨道、能量回馈系统等；电动汽车部分，认知充电桩、电动汽车等。

2) 仿真搭建环节：根据两个层次递进的实验模块设计，使得学生对城市电气化交通系统高效用能系统的结构和运行特点可以由浅入深、分块、分步骤地进行关键技术及工作原理的学习与理解。学生在仿真搭建模块中，针对系统的整体设计，搭建城市电气化交通系统高效用能系统。

3) 数据交互验证环节：根据地铁的运营规划，所设计的列车应急储能需要验证其合理性。在设定地铁列车日运行列表时的列车运行时间、运行间隔、列车数量的数据都将输入到轨道交通计算模块中，同时由此计算模块获得的列车在有无启动回馈系统条件下的不同运行成本，此实验的目的是验证能量回馈系统的经济节能作用。

4) 科教前沿环节：科研能力作为工科人才培养的重要内容，以创新为核心，发现问题、分析问题、解决问题，让学生以问题为驱动，逆向思维，在虚拟仿真实验的工程实践中加深理论知识的理解和掌握，同时了解学术前沿理论。例如电动汽车实验模块，学生可根据不同电动汽车数量、类型验证电动汽

车有序充电。

(2) 学生交互性操作步骤说明:

如图 2.8.1 所示为本实验操作步骤,如图 2.8.2 所示为本实验项目初始界面,主要包括四个实验模块(如图 2.8.3),模块之间具有知识的相关性,由浅入深,互相关联,从认知到搭建,再到具体的运行场景进行分析。

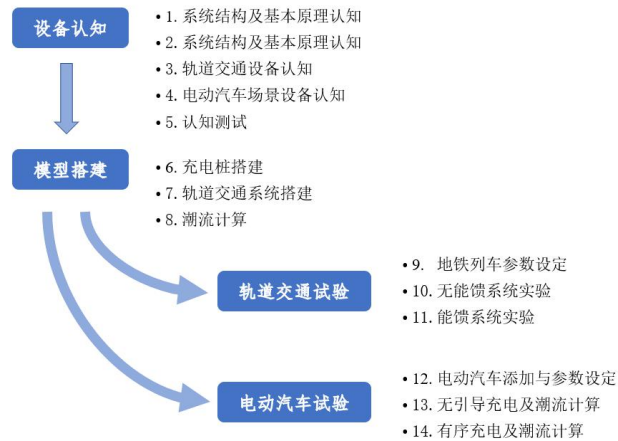


图 2.8.1 城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验操作步骤



图 2.8.2 城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验主界面



图 2.8.3 城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验模块界面

根据学生知识掌握的不同程度与实验层次，确定实验操作先后顺序，本项目包含以下 14 个实验步骤：

### 1) 认知模块

#### 步骤 1: 系统结构及基本原理认知

学生通过动画显示和语音解说了解城市电气化交通系统高效用能的主要组成部分，即配电网、轨道交通和电动汽车 3 个部分，明确 3 个主要部分的基本工作原理。

#### 步骤 2: 配电网主要组成元件认知

学生通过鼠标点击各设备的虚拟场景，对配电网的关键设备进行认知，如图 2.8.4 为配电网中的柴油发电机相关知识介绍。学生通过学习各元件电气参数与工作特性，掌握配电网的架构与连接方式。

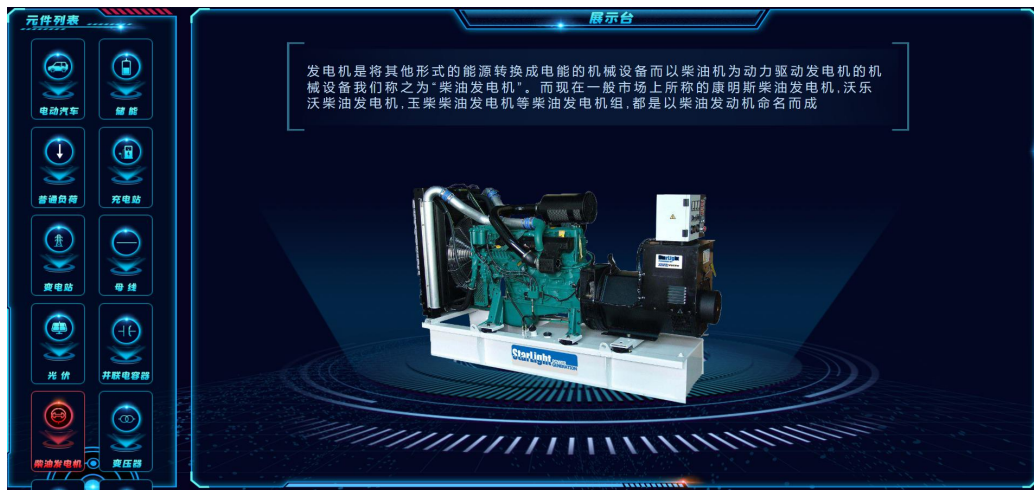


图 2.8.4 认知模块配电网柴油发电机介绍

#### 步骤 3: 轨道交通设备认知

学生使用鼠标点击轨道交通设备，使地铁列车运行可视化，了解车组的启动、加速、制动过程以及地铁制动过程中的能量回馈过程，对地铁轨道交通的各设备与地铁运行原理进行学习认知，如图 2.8.5 所示。

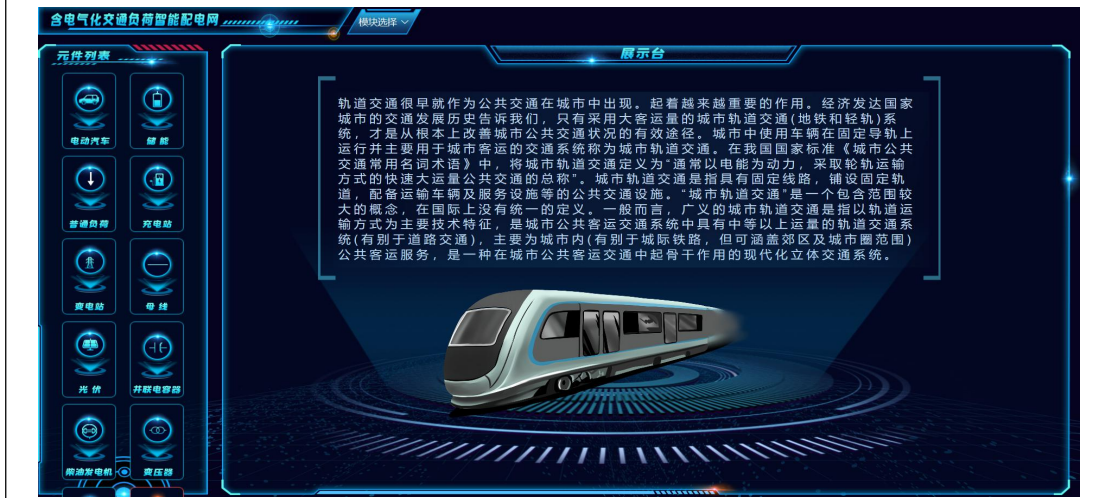


图 2.8.5 认知模块城市轨道交通介绍

#### 步骤 4: 电动汽车场景设备认知

学生通过鼠标操作,对电动汽车的参数、充电桩性能等进行认知,如图 2.8.6 所示。掌握实物、电气符号的对应关系,并对电动汽车充放电场景进行模拟。



图 2.8.6 认知模块电动汽车介绍

#### 步骤 5: 认知测试

学生经过上述多个步骤之后对城市电气化交通系统高效用能基本组成元件和电气参数、特性等有所了解,通过选择题、判断题对学生的知识掌握程度进行测试。

思考:

1. 配电网关键设备之间的连接需要注意什么,需要满足什么条件
  2. 轨道交通设备及充电桩接入配电网的电压等级是多少
- 2) 仿真搭建模块

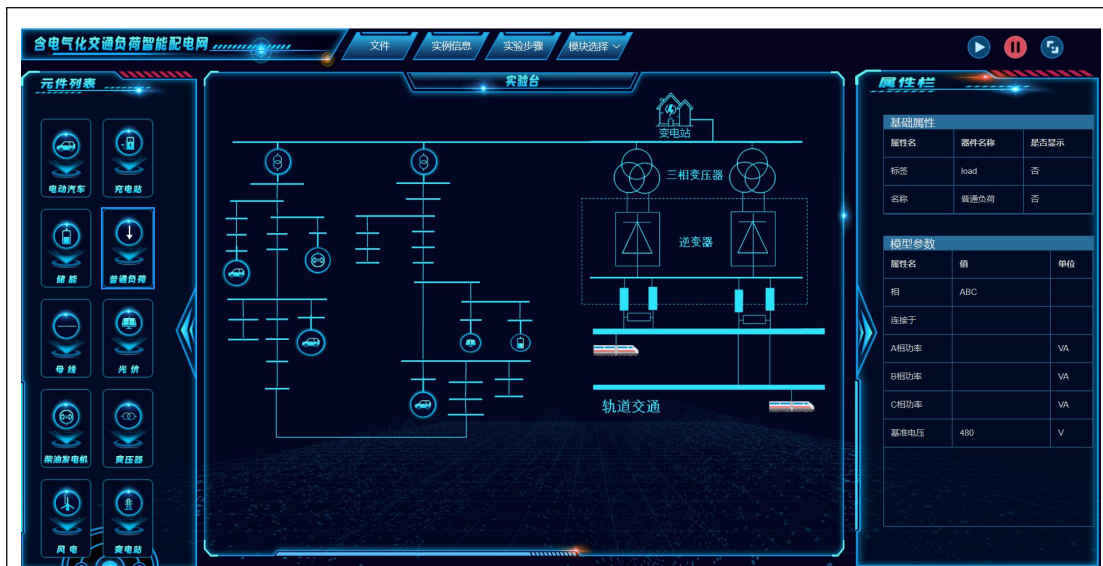


图 2.8.7 仿真搭建模块拓扑搭建完成效果

### 步骤 6: 充电桩搭建

在充电站场景中，对充电桩内部结构进行搭建，调整确定充电桩内部组成的每一个元件和顺序，确定参数，对于明显不符合工程设计的，系统将直接提示学生搭建错误。

### 步骤 7: 轨道交通系统搭建

在轨道交通系统中，对轨道交通供电系统结构进行搭建，调整确定牵引供电、能馈系统等主要组成部分的顺序，确定系统参数，对于明显不符合工程设计的，系统将直接提示学生搭建错误。

### 步骤 8: 潮流计算

学生点击潮流计算按钮，软件后台将对学生所搭建的仿真模型进行校验，校验无误后软件将远程进行潮流计算（如图 2.8.8），得到整个网络的电压、电流、功率、功率流向等系统运行数据。

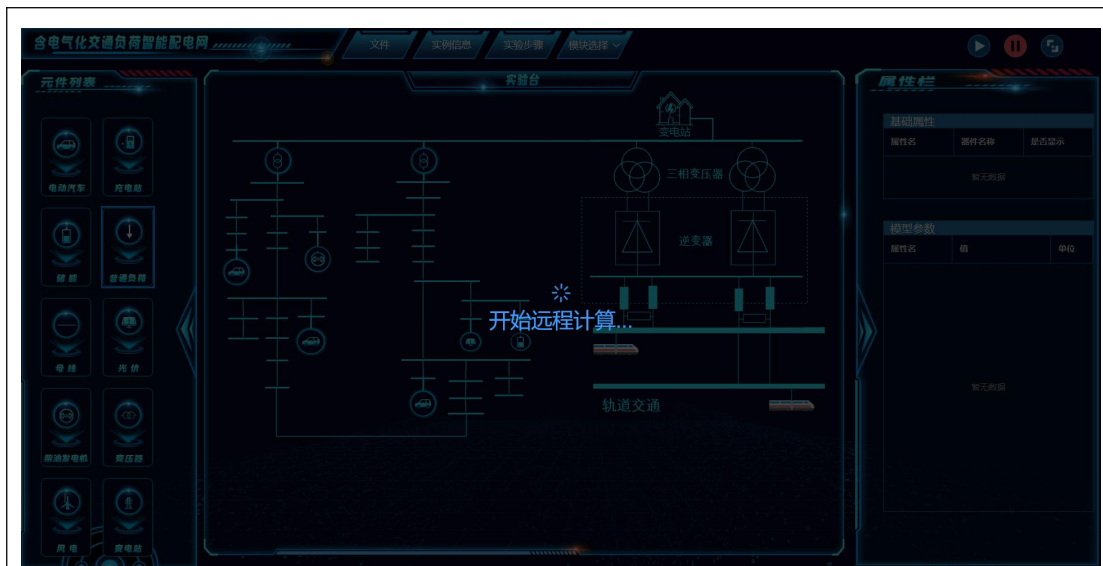


图 2.8.8 远程计算

思考：

1. 充电桩搭建过程中需要考虑什么因素，如何避免系统报错
  2. 轨道交通供电系统与传统供电系统的区别
- 3) 轨道交通实验模块

该模块练习的主要目的是通过能量回馈实验，引导学生掌握列车制动过程中的能量回收再分配原理，帮助学生了解降低轨道交通运营成本、实现节能的措施。

步骤 9：地铁列车参数设定

界面出现轨道交通场景，提示学生使用鼠标点击右下方“创建轨道交通列车”按钮，设置当前轨道交通系统中列车类型(如图 2.8.9 所示)。提示学生使用鼠标双击列车，设置列车日运行时间。

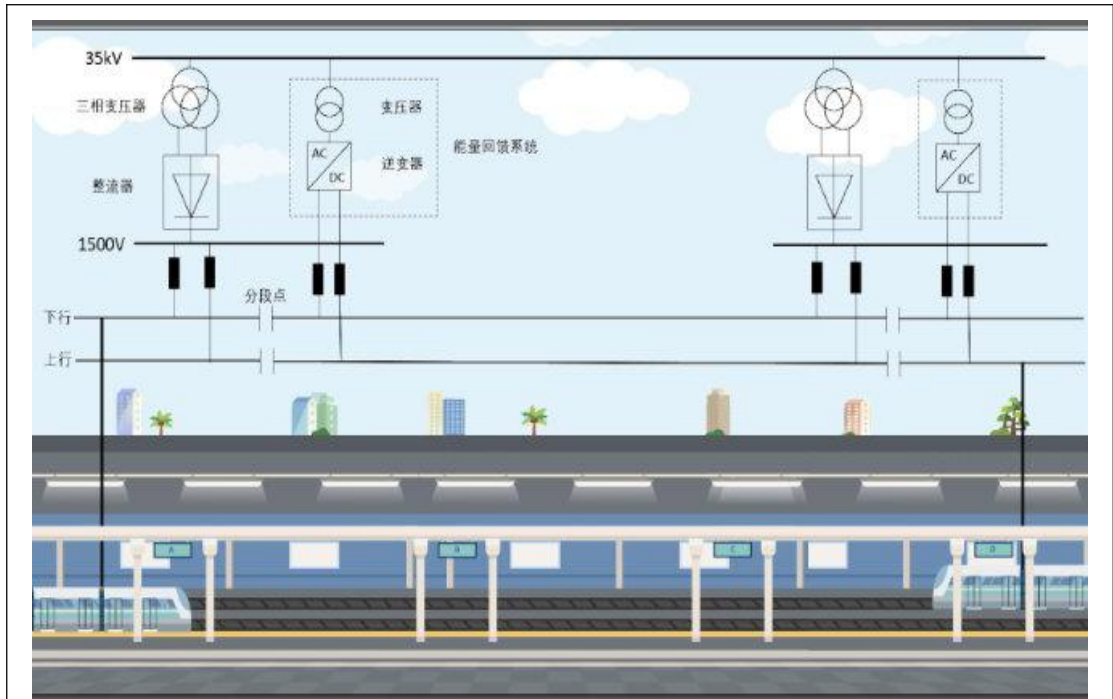


图 2.8.9 轨道交通示意图

**步骤 10: 无能馈系统实验**

引导学生点击各地铁站能馈系统并全部选择关闭，点击轨道交通模拟运行按钮，显示列车一日内运行动画，点击“日运行情况”按钮查看轨道交通日运营成本及能耗。

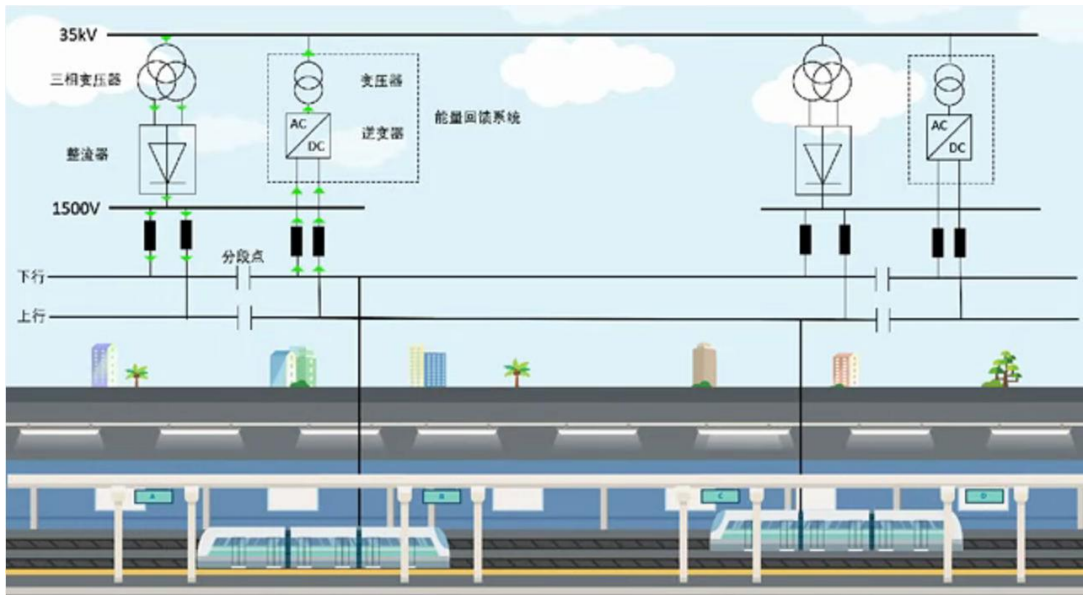


图 2.8.10 轨道交通制动能量回馈功率流动

**步骤 11: 能馈系统实验**

引导学生点击各地铁站能馈系统并选择开启，点击轨道交通模拟运行按钮，显示列车一日内运行动画（如图 2.8.10），点击“日运行情况”按钮查看

轨道交通日运营成本及能耗。

思考：

1. 轨道交通系统启动能馈系统前后运营成本及能耗对比情况如何
2. 能量回馈系统的组成及工作原理

#### 4) 电动汽车实验

电动汽车实验在实际现场中几乎难以实现，通过模拟仿真，可以让学生了解电动汽车充电过程对于电网的影响，特别是可以直观体会电动汽车在有序充电和无引导充电下配电网的状态。

##### 步骤 12：电动汽车添加与参数设定

界面出现智能配电网总拓扑结构图，引导学生点击任一充电站进入充电站场景，其充电站场景示意图如图 2.8.11 所示。进入该场景后，需要进行电动汽车的添加和参数设定，包括当日在该充电站需要充电的电动汽车数量、电池容量、到站时间、到站时 SOC、预计离站时间等。并根据用户需求选择电动汽车的充电方式。



图 2.8.11 充电站场景示意图

##### 步骤 13：无引导充电及潮流计算

在设定完电动汽车相关参数之后，选择“无引导充电”，直接点击“运行”按钮，此时 3 个充电站均采用无引导充电方式，其运行示意动画图如图 2.8.12 所示。点击“负荷曲线”按钮可以展示无引导充电方式下的负荷功率波动曲线（24 小时之内的功率曲线）和“峰谷差”并展示电网的耗电成本，学生记录下此时的负荷曲线并观察其特点。在一种充电场景下（比如多辆电动汽车同时集中充电），点击“潮流计算”按钮系统会进行该场景下的潮流计算，得到配电网电压、电流、功率流向（自上而下）等系统运行数据，学生可以对比出此时的电压偏移以及功率变化等，看是否出现电压偏移过大、功率越限等问题。

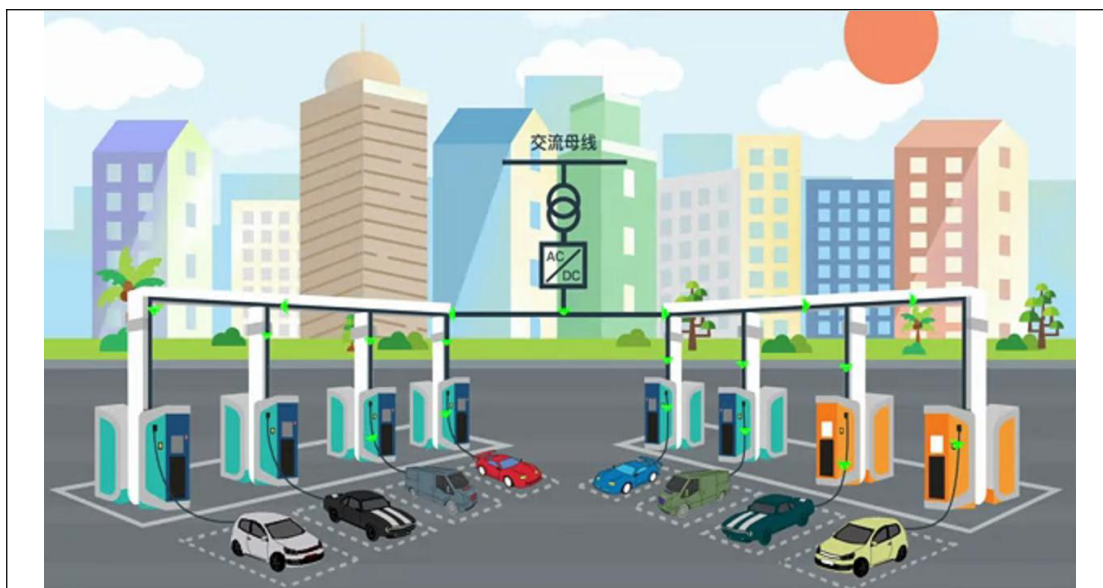


图 2.8.12 充电站无引导充电功率流动图

#### 步骤 14：有序充电及潮流计算

学生进行完无引导充电实验之后，点击“有序充电”按钮，后台根据电动汽车的充电方式、到站时间以及预计离站时间等信息，同时考虑电网稳定可靠运行，制定合理的充电策略。同样点击“运行”按钮，此时 3 个充电站均采用有序充电方式。同理得到 24 小时负荷功率波动曲线、“峰谷差”、耗电成本以及特定场景的潮流计算结果。学生记录结果之后需要与无引导充电结果对比，总结有序充电方式对配电网运行有哪些有利的影响。

思考：

1. 无引导充电情况下给配电网带来的问题
2. 有序充电策略制定需要考虑的因素

#### 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
- (3) 其他描述：

学生完成本实验项目的 4 个实验模块的内容，每个部分均记录实验结果，并有明确的结论要求。

第一部分为设备认知，学生在虚拟环境中认知城市电气化交通系统高效用能的关键设备，并完成认知考核和问题作答，认知设备正确数量与问题正确作答数量为该部分的实验结果，其结论要求为：正确认知全部关键设备，正确回答 5 道关于设备参数、特性的选择或判断题。

第二部分为仿真搭建实验，学生按要求完成对所指定配电网结构的正确搭建，包括网络拓扑的搭建和元件连接，输入正确的预设参数，认识各部分在配电网运行中的作用。通过潮流计算求解整个网络的电压、电流、功率，深刻理解潮流计算的原理与实际应用。

第三部分为轨道交通实验，学生完成轨道交通能量回馈实验，并将节能效益记录作为实验结果。其结论要求为：比较有无能量回馈系统后能量节约比例和经济成本降低数值。

第四部分为电动汽车实验，学生按要求完成无引导、有序充电实验，并记录对比 24 小时负荷功率波动曲线和特定场景下潮流计算结果，理解车网互动过程，其结论要求为：相较于无引导充电方式，有序充电方式下具有“削峰填谷”的作用，且电压偏移量小、支路功率变化较小。

## 2-10 考核要求

本实验项目根据实验目标和毕业要求指标对应关系，着重从以下两点对学生进行考察：

(1) 依据给定条件，形成解决方案。

依据城市电气化交通系统拓扑和运行参数，给定基本设计要求，由学生进行虚拟仿真实验，并利用所学知识解决仿真运行遇到的问题。

(2) 学会使用现代工程工具和信息技术工具，结合实际工程应用，掌握学科领域前沿知识。

实际的城市电气化交通系统规模庞大，与人民日常生活和社会经济发展息息相关，实际工程的实验影响较大难以进行。因此，学生需要掌握运用虚拟仿真实验软件这样的现代工具完成重要的理论知识与工程实际的融通。

具体用完成度考核（占比 30%）、实验结果考核（占比 30%）、综合考试考核（40%）三种形式进行考核。

(1) 完成度考核

主要考核学生对城市电气化交通系统搭建的正确性，以及对轨道交通与电动汽车实验的掌握情况；考核学生对城市电气化交通系统运行特性的认识与仿真所遇到问题的解决能力。

(2) 实验结果考核

考核学生在进行虚拟仿真实验时的完成进度与完成情况，反映学生对理论掌握程度与解决问题的能力，对实验数据的记录与分析，对学生实验方案的合理性、实验结果完整性进行考核。

(3) 综合考试

针对理论部分进行笔试或者（网络考试）卷面 100 分，以卷面成绩乘以其在总评中所占比例 40%计入实验项目总评成绩。

### 2-11 面向学生要求

#### (1) 专业与年级要求

本实验项目主要面向电气工程及其自动化专业的大三或大四年级学生。

#### (2) 基本知识和能力要求

基础知识：《电路》、《电机学》、《自动控制原理》等课程的基础知识学习，如轨道交通牵引供电方式、配电网运行特点、逆变器交直流变换原理。

能力要求：基础知识和基本原理的运用能力，问题分析能力，自主学习能力，具有团队协作意识及强烈的学习意愿，能够按实验内容自主完成相关实验任务。

### 2-12 实验项目应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2018年6月

(2) 已服务过的本校学生人数：未统计

(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，已服务人数：未统计

## 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://ee.bjtu.owvlab.net/virexp/znpd>

### 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 3-2-1 所示。



<p>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</p>	<p>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</p>
<p>(2) 其他计算终端硬件配置要求 无。</p>	
<p><b>3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）</b> (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。</p>	
<p><b>3-7 网络安全</b> (1) 项目系统是否完成国家信息安全等级保护 <input type="checkbox"/>是 <input checked="" type="checkbox"/>否 (勾选“是”，请填写) 级</p>	

#### 4.实验教学项目技术架构及主要研发技术

指标	内容
<p><b>系统架构图及简要说明</b></p>	<p>城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目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。</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。</p> <p>总体架构图如下：</p>



图 4-1 系统总体架构图

如图 4-1 所示，支撑项目运行的平台及架构共分为五层，每层均为其上层提供服务，直至完成具体虚拟实验教学环境的搭建。下面将按照由下至上的顺序分别阐述各层的具体功能。

### (1) 数据层

城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目涉及多组不同类型的虚拟实验组件及数据，包括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。

### (2) 支撑层

支撑层为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，为整个基础系统的运行、维护和管理服务。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。

### (3) 通用服务层

通用服务层即开放式虚拟仿真实验教学管理平台，为虚拟实验教学环境提供通用支持组件，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，以便该平台对第三方虚拟实验软件进行集成和统一管理。

	<p><b>(4) 仿真层</b></p> <p>仿真层主要针对该项目进行相应的设备建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、仿真分析器支撑，并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>基于底层服务，最终实现城市电气化交通系统高效用能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设备模型，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 学项目	<p>开发 技 术</p> <p><input type="checkbox"/>VR <input type="checkbox"/>AR <input type="checkbox"/>MR <input type="checkbox"/>3D 仿真 <input type="checkbox"/>二维动画<input type="checkbox"/>HTML5 <input checked="" type="checkbox"/>其他 <u>  VUE  </u></p>
	<p>开 发 工 具</p> <p><input type="checkbox"/>Unity3D <input type="checkbox"/>3D Studio Max <input type="checkbox"/>Maya<input type="checkbox"/>ZBrush <input type="checkbox"/>SketchUp <input type="checkbox"/>Adobe Flash<input type="checkbox"/>Unreal Development Kit <input type="checkbox"/>Animate CC<input type="checkbox"/>Blender <input type="checkbox"/>Visual Studio <input checked="" type="checkbox"/>其他 <u>  Hbuilder  </u></p>
	<p>运 行 环 境</p> <p><b>服务器</b> CPU <u>  4  </u>核、内存<u>  8  </u>GB、磁盘<u>  300*2  </u>GB、 显存<u>  2  </u>GB、GPU型号<u>  NVIDIA  </u></p> <p><b>操作系统</b> <input checked="" type="checkbox"/>Windows Server <input type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本<u>          </u></p> <p><b>数据库</b> <input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle 其他<u>          </u></p> <p>备注说明<u>  (需要其他硬件设备或服务器数量多于1台时请说明)</u></p>

	项目品质	单场景模型总数：800000 面 贴图分辨率：1024*1024 显示帧率：高于每秒 30 帧 刷新率：高于 30Hz 正常分辨率 960*540
--	------	---

## 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) 项目建设的必要性及先进性

在《交通强国建设纲要》及“新基建”政策的指导下，城市电气化交通得到大力发展，电气化交通负荷能耗也呈现不断增加的趋势，开展城市电气化交通系统高效用能技术教学，培养相关人才势在必行。然而，城市电气化交通系统存在“规模大、造假高、高电压、高转速”等特点，导致现场教学实施困难，小规模事务平台参考价值有限的局面。北京交通大学依托国家级重点学科、特色专业及教学示范中心等，建设了城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验项目，解决了上述实验环境匮乏、大量学生不能身临其境学习实践的问题。该项目以城市电气化交通系统为主要对象，交叉电气、交通两大重要基础学科，为城市电气化交通系统高效用能教学活动开展和相关研究提供有力支撑。

### (2) 实验方案设计思路：

实验项目通过模拟城市电气化交通系统高效用能真实场景，使学生对城市电气化交通系统结构和主要电气设备产生直观认识，引导学生进行系统搭建，掌握城市电气化交通系统基本组成和内部结构等知识点，最后通过轨道交通实验和电动汽车实验对其经济节能效果进行计算评估。此设计思路有利于提升学生对城市电气化交通系统相关概念的理解和知识点的掌握，使学生接触前沿知识，激发学生科研兴趣，培养学生创新思维，为学生未来从事相关科研及工作奠定基础。

### (3) 教学方法创新：

面向网络环境下成长的新一代学生，积极探索新的实验教学模式，激发学生学习兴趣。实验前，通过对真实案例的展示，为学生进行基础认知型教学，结合 PPT 以及演示录像了解设备功能以及原理性描述，了解实际的城市电气化交通高效用能工程背景，大幅提高实验的感性认知度，为之后的建模仿真、高效用能实验打好基础。实验中，通过情景式、互动式、科研反哺式相结合的方法，提高实验教学效果。通过问题的设计、分析和解决促使学生深入理解城市电气化交通系统的关键设备、工作原理、运行方式和高效用能影响因素。同时，通过仿真搭建和参数交互构成反馈环节，培养学生的综合设计能力和探索创新能力。通过科研项目成果在实验教学中的转化，使得学生进一步了解到行业前沿技术，为培养高科技人才助力。

### (4) 评价体系创新：

实验项目的四个模块从城市电气化交通系统的设备认知、仿真搭建、运行仿真到电动汽车、轨道交通模拟运行，具有循序渐进、由浅入深的特点，据此

建立了基于过程各模块形成性评价体系，在根据每个模块的完成情况评价基础上得出总体评价。后台能够自动记录学习进度，根据完成时间和完成质量自动评分。实验评价结果用于课程目标达成度计算，并支撑相应毕业要求指标点达成，根据达成情况进行闭环反馈、用于持续改进。

(5) 对传统教学的延伸与拓展:

利用现代虚拟仿真技术，实现了时长合适、内容合理、步骤紧凑的城市电气化交通系统高效用能虚拟仿真实验，打破了实物构建困难、短时运行场景较少、无法在实验室开展的限制。从只能在书本上接触的理论知识到虚拟场景的仿真实践，从传统的老师学生一对多教学到情景式、交互式、科研反哺式教学，对实验教学方式、教学内容、教学空间、知行结合深度、学生能力培养等方面进行了延伸和扩展，使实验教学丰富有趣，补充了传统教学的不足。

## 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:

本实验项目自上线以来,累计为我校电气工程及其自动化专业的约600名大三、大四学生提供虚拟仿真实验服务,对于《电力系统分析》、《智能电网》等专业核心课程的教学和实践起到了积极推动作用。后续,本实验项目将在虚拟仿真平台建设、系统开放性及教学队伍方面进行持续建设和更新,具体如下:

虚拟仿真平台建设方面:进一步争取教育部和省教育厅的政策和资金,为平台建设提供资金支持;不断丰富、更新城市电气化交通系统高效用能工程设计案例资源,保持实验平台的先进性;探索与现有课程系统的对接和融合,继续优化仿真实验操作过程和仿真结果展示,加强师生互动环节,保证实验教学的实用性、易用性和高效性。

系统开放性方面:配置在线服务网站,方便用户在线咨询,网站包含引导内容,提供在线咨询服务和邮件留言等功能;改善软硬件条件,配备高性能服务器,提高虚拟实验平台仿真效率,进而提高虚拟仿真实验平台的利用效率;定期收集使用者反馈意见,不断提高用户体验效果,建立高效、友好的虚拟仿真实验开放平台;开发相应的虚拟仿真实验项目APP,探索多元化访问途径,实现项目可通过移动终端访问,拓宽应用和推广途径。

教学队伍方面,实验项目将加强教师业务培训,聘请企业兼职教师,建立激励机制,形成以任课教师、实验指导教师为主,研究生教学助理为辅的在线教学服务团队。坚持“学生中心、产出导向、持续改进”的原则,培养本科生的综合创新能力和思考能力。

### (2) 面向高校的教学推广应用计划:

1) 依托《电力系统分析》、《智能电网》等专业核心课程,通过线上、线下的方式推广虚拟仿真教学实验的教学应用。线下通过高校间相关实验成绩互认和学分转换等方式在高校间推广,激励各高校学生充分参与实验教学、平台建设等环节,在不断完善平台的同时逐渐发展学生成为本平台的“代言人”,在同学之间进行推广。线上通过中国大学生MOOC、哔哩哔哩课程直播等渠道对实验平台进行推广,并不定期举行创新竞赛、平台建设研讨等活动,在电气工程专业相关的师生之间分享平台建设成果。

2) 依托电气工程及其自动化专业相关会议、知识论坛、行业交流等活动,面向全国的高校、特别是针对中西部高校相关专业师生,推广本实验项目。

3) 搭建中英文双语版本,并依托北京交通大学新能源国际学院及中美、中法等国际联合研究中心,通过国际咨询会议、交流访问及留学生暑期训练营等活动,面向国际高校师生进行示范服务,实现虚拟实验平台服务国际化。



通过上述形式，预期 5 年内能够在 20 所以上的国内外高校进行实施，完成教学 20000 人次。

### (3) 面向社会的推广应用计划：

本项目计划在被认定“示范性虚拟仿真实验教学项目”后 1 年内面向全社会免费开放教学服务，其中 1 年后至 3 年内免费开放服务内容不少于 50%，3 年后免费开放服务内容不少于 70%。同时，通过举办会议、学术论坛、平台参观等形式，与国家电网电科院、经研院、各省级培训中心等电力交通相关的企事业单位技术人员进行经验交流和资源共享；通过向电网专业人员教学和培训提供支撑平台的形式与上述企业展开合作；通过开设面向教学服务的微信公众号等网络媒介，向公众推广应用。计划 5 年内部署于电力专业培训机构 10 个以上，完成专业人员培训 1000 人。



北京交通大学与国网北京经济技术研究院签订战略合作协议



技术委员会成员参观实验平台

## 7.知识产权

软件著作权登记情况	
软件著作权登记情况	<input type="checkbox"/> 已登记 <input checked="" 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 type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 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。）

### 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。）