

基于数字孪生的驱动电机检修“三阶六步”虚实融通教学模式设计与实践

张林飞 刘称意 郭长帅 胡勇

广东科学技术职业学院汽车工程学院 广东 珠海 519090

【摘要】：新能源汽车驱动电机检修实训教学里存在高压安全风险、故障复现成本高、内部电磁机理“黑箱化”等痛点，本文利用校级“云底座平台”和“智能新能源汽车 AI+未来学习中心”现有的数字孪生资源，设计了一套“三阶六步”虚实融通教学模式。此模式把教学流程重新构造成“课前虚仿探知—课中虚实交替—课后虚仿巩固”这三个递进阶段，并且将其细分为“导、析、仿、诊、评、拓”这六个教学环节。教学实践显示，此模式可有效减少实训风险与成本，加深学生对电机内部电磁与机械耦合机理的认识，达成“故障可设、过程可视、操作可逆、结果可评”的教学闭环，给新能源汽车技术专业“岗课赛证”融通育人提供可操作的教学途径。

【关键词】：数字孪生；驱动电机检修；虚实融通；“三阶六步”教学模式

DOI:10.12417/2705-1358.26.11.010

1 引言

我国要成为汽车强国，从汽车大国迈向汽车强国，发展新能源汽车是必由之路^[1]。作为新能源汽车“三大电”里的一部分，驱动电机的技术状况对整车的动力性、经济性和安全性有着直接的影响^[2]。2024-2026年全国职业院校技能大赛里，“汽车故障检修赛项”全面引入了纯电动汽车电控系统故障检修任务^[3]，这表明新能源汽车维修技术技能竞赛体系已经比较成熟了。

不过，在新能源汽车技术专业的人才培养里，驱动电机检修课程一直存在“理论抽象、实训高危、故障难现”这三重难题。从理论上讲，驱动电机的电磁设计、矢量控制以及热管理等都十分抽象，学生很难建立起从理论方程到物理实体的认知映射。在实训方面，驱动电机的电压范围在300到800伏之间，这使得传统“实件拆装”的模式有着严重的触电风险，很多院校不得不减少实操课时。在故障教学方面，电机匝间短路、转子退磁、轴承磨损等故障是隐蔽且不可逆的^[4]，在正常电机上复现实训是不现实的，真实故障件成本高，还存在安全隐患。

数字孪生技术的出现，给解决这些问题提供了新的思路。学校初步建成校级“云底座平台”，在汽车学院建立了“智能新能源汽车 AI+未来学习中心”，并把新能源汽车故障诊断仿真教学软件（比亚迪秦 PLUS EV）、结构原理仿真教学软件、

整车拆装仿真软件等虚拟仿真实训资源都集成了。不过，硬件和平台的完善并不能保证教学效果会自动提高，怎样用现有的数字孪生资源设计出有效的线上线下混合式教学模式^[5,6]，这是当下急需解决的关键问题。

本文打算设计一套以数字孪生资源为驱动的电机检修“三阶六步”虚实融通教学模式，靠重构教学流程、优化资源应用方式，来解决驱动电机检修实训教学的深层矛盾。

2 理论基础与资源条件

2.1 虚实融通教学的理论基础

虚实融通教学的理论基础能追溯到戴尔提出的“经验之塔”理论^[7]。该理论表明，学习者的学习经验从“做的经验”到“观察的经验”再到“抽象的经验”，呈金字塔式分布，而虚拟仿真处于“观察经验”和“做的经验”之间，能很好地把从理论到实践的桥梁架起来。建构主义学习理论给虚实融合教学提供了另一个重要的支撑^[8]。该理论着重指出，学习者在与环境的互动里主动构建知识，所以在虚实融通的教学环境里，学生跟虚拟模型交互、和同伴协作、与教师对话，不断调整、丰富自己的认知结构。“做中学”理念也对虚实融通教学的设计起到了支撑作用^[9]。虚实融合不是用虚来替代实，而是“虚为实用”，即虚拟环境里的操作训练最终要用来培养真实场景中解决问题的能力。

基金项目：广东省高职院校教育教学改革研究与实践项目（编号：2023JG247），广东省教育规划课题（编号：2025GXJK0207），广东省学习型社会建设（继续教育）质量提升工程项目（编号：JXJYGC2024D221），广东省教指委教学改革项目（编号：JTYSJZW2023A11，JTYSJZW2023B10），校级“教学质量工程”教学改革项目（编号：SDJG202401），校级课程思政示范计划项目（AI助力课程思政融入汽检专业课程教学改革与实践——以《车身综合技能训练》为例）。

作者简介：张林飞，男，博士，讲师。研究方向为新能源汽车检测与维修技术。

2.2 现有数字孪生资源条件

本教学模式全靠现有的数字孪生资源，没有新系统开发的需要。具体资源包含采用“端一边一云”三层架构的校级“云底座平台”，它有三个核心功能：教学资源云端化存储、教学过程数据化采集、实训管理智能化调度，还有配备 XR 数字融合工作站、新能源汽车虚实融合实验台等设备的“智能新能源汽车 AI+未来学习中心”。还有包含永磁同步电机的三维结构展示、拆装流程模拟以及常见故障再现等功能的驱动电机虚拟仿真实训模块，该模块能对定子绕组匝间短路、转子退磁、轴承磨损等 8 大类典型故障进行参数化设置并可视化呈现。

3 “三阶六步”教学模式实施流程

教学模式的施行得遵循四项原则，即（1）安全性原则：在高压操作相关危险性步骤里，要先在虚拟环境里进行训练，考核合格之后才能进入真实操作，这样才能从根本上确保实训的安全。（2）渐进性原则：按照“虚拟认知→虚实结合→真实应用”的路径逐步推进，让学生在低风险环境里从新手过渡到熟练者。（3）一致性原则：虚拟环境里的拆装顺序、检测方法以及故障诊断流程都跟实际维修手册和省赛规程相符，防止出现“两张皮”的情况。（4）可评性原则：全过程采集学生操作数据，生成多维度评价报告，给教学改进提供依据。

“三阶六步”虚实融通的教学模式会促使电机检修教学过程被重构为三个递进阶段、六个教学环节，见图 1。

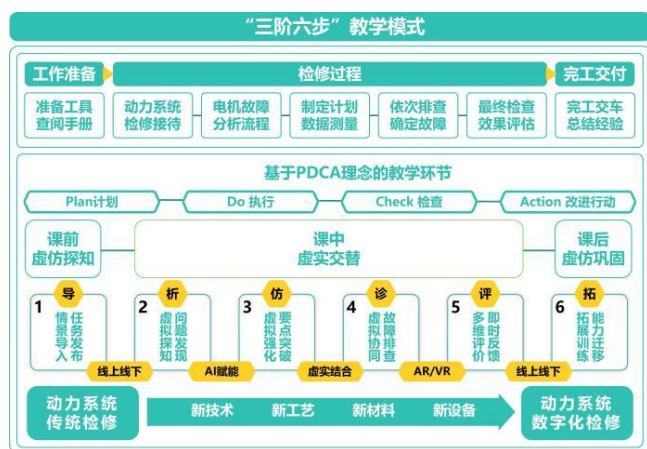


图 1 “三阶六步”虚实融通教学模式

第一阶段：课前虚拟仿探知

第一步：导（情境导入与任务发布）

教师借助“云底座平台”来发布课前学习任务单，此任务单包含驱动电机检修相关的微视频、预习测验题以及虚拟仿真预习指引。任务工单紧扣即将开展的实训项目，设置 2-3 个引导性问题，激发学生探究兴趣。比如在“旋变信号失步故障检修”教学单元里，课前任务可设置成：“观看旋变信号异常时

电机抖动的仿真动画，思考：一个角度传感器故障会怎样？学生借助“云底座平台”提交预习笔记与疑问，教师依据此来调整课堂教学重点，达成线上线下混合式教学。

第二步：析（虚拟探知与问题发现）

学生登录“云底座平台”，借助“AI+未来学习中心”的驱动电机虚拟仿真软件，自主完成以下任务：借助三维剖视模型来观察电机内部结构，初步知晓定子、转子、旋变传感器、冷却水道等关键部件的位置与装配关系。通过交互式拆装动画了解标准拆装流程；在虚拟环境里去观察正常状态和故障状态（像匝间短路热力图、退磁后效率曲线下降之类的）的差别，从而初步了解故障现象。

课前阶段的学时分配是这样的：学生自行安排，建议为 20-30 分钟。教师在这个阶段的主要工作就是对平台数据加以监控，找出共性的疑难之处，给课堂的精准讲解做好准备。

第二阶段：课中虚实交替

第三步：仿（虚拟强化与要点突破）

进入课堂之后，教师先对课前预习里出现的共性难点加以精讲，时长为 5-8 分钟。精讲运用“虚实对照”的方法：在虚拟仿真软件里对电机内部结构进行剖视，阐述电磁耦合机理以及故障形成原理。比如，在讲解匝间短路的时候，教师会借助虚拟模型来展示绕组绝缘层破损的位置，再通过动画来演示环流的形成过程，还用热力图来展示局部温升的分布情况，让抽象的理论概念变得直观又易懂。

之后，学生在“AI+未来学习中心”里的 XR 工作站里开展虚拟拆装以及故障模拟训练。虚拟拆装训练得依照维修手册的标准流程来完成驱动电机的拆卸与装配，系统会自动记录操作步骤，还会判断是否规范。故障模拟训练是通过后台设置特定故障来开展的，学生在虚拟环境里会观察到故障现象，并且会使用虚拟仪器采集数据，同时记录关键参数。

本环节时长约 25-30 分钟。关键就是“虚实对照”，虚拟模型展示的是“看不见的”电磁与热机理，学生操作的是符合真实规范的工具与流程。

第四步：诊（虚实协同与故障排查）

在完成虚拟强化训练之后，教学就会进入虚实协同的故障诊断阶段。教师在真实的电机台架上设置与虚拟训练相同的故障（或者借助虚实融合实验台，把虚拟故障映射到真实测量端），学生以小组形式（3-4 人一组）来完成完整的诊断流程。

诊断流程严格遵循国赛规程：先对故障现象进行观察，然后通过数据采集（像虚拟示波器或者万用表之类的），再分析故障原因，接着测量故障点的数据，最后确认故障点及故障机

理，并且选择并验证相应的维修方案。

在这个过程中，虚拟仿真系统充当“辅助诊断仪”，能实时给出参考信息：学生能把自身采集到的真实数据跟虚拟模型里的标准数据作比较。当遇到疑难之处时，能够调用虚拟模型来查看该故障状态下理论特征参数。完成诊断之后，在虚拟环境里先对维修方案加以验证，确定无误后再操作实际设备。

本环节时长约 30-35 分钟。虚实协同的关键就是：虚拟环境充当“试错空间”和“参考系”，学生先在虚拟环境中验证想法，再进行真实操作，这样既能保证安全，又能提高效率。

第五步：评（多维评价与即时反馈）

诊断环节结束后，进入评价反馈环节。评价从三个维度展开：

(1) 学生自评：各组学生依据省赛评分标准，对诊断思路、关键发现以及排故过程予以汇报，并且用时大约为 2-3 分钟。

(2) 系统对“云底座平台”的自动采集进行评价：该平台会自动收集学生虚拟操作的轨迹、诊断路径以及数据记录等内容，并据此生成诊断路径与专家路径的相似度评分、操作规范性评分及数据记录准确性评分。

(3) 教师点评：教师以平台数据与现场观察相结合的方式，对共性问题及典型错误予以集中点评，对优秀诊断案例予以展示分享。

本环节时长约 10-15 分钟。本模式有个重要特征，就是即时反馈，即学生操作结束后，“黄金记忆期”里能得到有针对性的反馈，学习效果最好。

第三阶段：课后虚仿巩固

第六步：拓（拓展训练与能力迁移）

课后，学生借助“云底座平台”来完成拓展训练任务。教师发布变式故障案例（难度比课中稍高些），让学生在虚拟环境里独立完成诊断，并且提交诊断报告。系统会自动进行评分，并且推送个性化的学习建议，针对操作中的薄弱之处，给出相应的虚拟训练模块让学生加以强化练习。

对于那些有余力的学生来说，教师能够发布跨系统综合故障（像同时存在电机故障和控制器故障之类的），或者对接国赛要求的高阶训练任务。学生做完拓展训练之后，在平台上可以进行“学习社区”的分享，交流疑难问题，从而形成群体智慧的沉淀与复用。

课后阶段的学时分配如下：学生自行安排，建议为 20-30 分钟。教师借助平台的数据来追踪学生的完成状况，给有困难

的学生予以个别辅导。

4 教学实施与案例分析

4.1 教学对象与实施过程

本教学模式在某职业学院新能源汽车技术专业 2024 级 2 个班级（共 78 名学生）中进行了为期 8 周的教学实践。教学内容是“驱动电机常见故障诊断与检修”，包含定子绕组匝间短路、转子退磁、轴承磨损、旋变信号失步这 4 类典型故障。

实施过程包含三个阶段：第一周是教师培训以及学生平台适应期。第二至第七周为正式教学实施期，每周 4 课时；第八周为考核与数据采集期。

4.2 典型案例：“旋变信号失步故障”教学单元

以“旋变信号失步故障”这一情况为例子，来展示教学实施的具体流程。

课前阶段：教师借助“云底座平台”发布预习任务，即观看旋变传感器原理动画以及失步故障仿真视频，并思考“旋变信号异常致使电机抖动”的原因。平台数据表明，78 名学生里有 72 人完成了预习，其中“信号偏差如何转化为转矩波动”这一共性疑问占了很大比例。教师据此确定了课堂教学的重点为“旋变解算原理与失步故障机理”

课中阶段：教师先用虚拟模型精讲旋变工作原理（5 分钟），再用动画演示励磁信号与正余弦反馈信号的相位关系，还有失步时实际角度与解算角度的偏差曲线。接下来，学生在 XR 工作站进行虚拟故障模拟训练（时长为 25 分钟），教师会注入不同位置偏移的故障情况（ 5° 、 15° 、 30° ），让学生去观察电机抖动幅度以及电流波形畸变的变化规律。然后，进行虚实协同诊断（30 分钟）：学生在真实电机台架上查找预设的旋变失步故障，借助虚拟模型实时对比标准信号波形和实测波形。最后，进入到评价反馈阶段（10 分钟），各组要对诊断过程予以汇报，平台会自动给予评分，教师也会对共性错误（像没校准零位就进行测量之类的）进行点评。

课后阶段：学生完成拓展训练任务，进行诊断“旋变信号完全丢失”与“旋变信号含噪声”这两种变式故障，然后在“学习社区”里分享诊断经验。

4.3 实施效果

通过 8 周教学实践，取得了以下效果：

在期末考核里，实验班平均成绩为 84.6 分，比平行班（传统教学模式）的 76.3 分高了。在“故障诊断思路”这一方面，实验班的得分率（82%）比平行班（65%）要高很多。

实训安全保障：教学期间未发生任何安全事故。学生在虚

拟环境里完成了高压操作规范训练之后,就进入了实际操作时的规范执行率达到了96%。

学生满意度: 问卷调查表明,92%的学生觉得“虚实对照”能理解抽象概念,88%的学生觉得虚拟环境里的“试错”对自己的诊断思维有帮助。

教学效率得以提高: 在虚实融通模式里,真实台架的使用时间主要集中在诊断验证阶段,单台设备能支撑更多学生实训,设备利用率大概提高40%。

5 讨论与建议

5.1 模式的适用边界

本模式适用于以下教学场景:高压安全风险的操作类技能训练(像高压断电、绝缘检测之类的)。故障现象难以在真实设备上复现的诊断类教学(像绕组短路、转子退磁之类的)内部结构“黑箱化”这一原理的类教学(像电磁场分布、热传递路径之类的)

本模式不适用的场景有:基础理论学习(仍以课堂讲授为主,效率更高)。纯手工操作技能(像螺栓拧紧手感训练之类的,还得进行真实操作)需要真实材料损耗的训练(如焊接、压接)。

参考文献:

- [1] 姜琨,范庭雨.首届全球汽车新生态发展大会暨2023中国新能源汽车零部件交易会在十堰开幕[N].十堰日报,2023-09-23
- [2] 千寻的车.浅析新能源汽车驱动电机[EB/OL].2020-04-11
- [3] 2025全国职业院校技能大赛—汽车故障检修赛项竞赛规程(高职组)[Z].2025.
- [4] 王建国,张明智.永磁同步电机匝间短路故障特征提取与诊断方法[J].电机与控制学报,2023,27(5):112-120.
- [5] 周旭,李伟.数字孪生技术在职业教育实训教学中的应用研究[J].中国职业技术教育,2024(15):67-73.
- [6] 卢浩漓.线上线下混合式教学模式在新能源汽车驱动电机课程中的应用[J].汽车测试报告,2025(18).
- [7] 张映姜.“经验之塔”与体验性网络课程——数学方法论课程的实践研究[J].数学教育学报.2013,22(03):73-76.
- [8] 王佳.面向建构主义学习的高校数字化实验教学平台建设探索[J].信息与电脑.2026,38(02):236-238.
- [9] 韩少剑,李晓杰,罗佳,等.基于“做中学”项目贯穿式综合实践课程改革——以新能源汽车工程专业为例[J].汽车实用技.2026,51(07):129-134.

5.2 改进方向

本模式还有如下改进之处:虚实同步的实时性有待提高,当下模式里虚拟模型和真实台架还没达成“同步运行”,之后可探寻把物理传感器的实时数据接入虚拟模型。个性化推送功能有待完善,当前拓展训练任务推送大多依着规则,之后能引入智能推荐算法。跨系统综合故障案例库需持续丰富。

6 结论

本文针对驱动电机检修实训教学的关键痛点,借助校级“云底座平台”与“智能新能源汽车AI+未来学习中心”现有的数字孪生资源,搞出了“三阶六步”虚实融合的教学模式。此模式把教学流程重新构建成“课前虚仿探知—课中虚实交替—课后虚仿巩固”这三阶段,并将其细化成“导、析、仿、诊、评、拓”这六个教学环节。教学实践显示,此模式能切实减少实训风险,加深学生对抽象机理的了解程度,提高教学效率,给新能源汽车技术专业“岗课赛证”融合育人提供可行的教学途径。

未来的研究能够从三个方面进行深入探究:其一,探寻虚实同步的实时映射技术,以此进一步增强虚实融合的沉浸体验。其二,引入人工智能技术以达成个性化学习路径的智能推荐。其三,把模式推广到动力电池管理系统、整车电控系统等模块的教学里,构建起覆盖新能源汽车“三大电”的虚实融通教学体系。