

产业需求驱动的风电控制人才“理论 - 课程 - 实践”三维一体培养体系构建与实践

曾林俊*, 董东营

长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月12日; 发布日期: 2025年8月20日

摘 要

随着“双碳”目标的推进和新型电力系统建设, 风电机组智能化控制与优化运行成为我国可再生能源高质量发展的关键支撑。本研究聚焦风电机组控制与优化运行, 致力于破解高校人才培养与产业需求错位的难题, 构建“理论认知 - 课程体系 - 实践创新”三维一体的教改新模式。培养体系通过动态更新理论教学内容, 重构课程体系, 加强实践教学平台建设, 融合人工智能与智能运维技术, 提升学生的系统分析和创新能力。最终形成以产业需求驱动的闭环人才培养体系, 为风电行业的高质量发展提供坚实的人才支撑与教育模式。

关键词

风电机组, 优化运行, 人工智能, 人才培养

Industry Demand-Driven Wind Power Control Talents “Theory-Curriculum-Practice” Three-Dimensional Integrated Training System Construction and Practice

Linjun Zeng*, Dongying Dong

College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 12th, 2025; published: Aug. 20th, 2025

Abstract

With the promotion of “double carbon” goal and the construction of new power system, intelligent

*通讯作者。

文章引用: 曾林俊, 董东营. 产业需求驱动的风电控制人才“理论-课程-实践”三维一体培养体系构建与实践[J]. 教育进展, 2025, 15(8): 1196-1203. DOI: 10.12677/ae.2025.1581563

control and optimal operation of wind turbines have become the key support for the high-quality development of renewable energy in China. This study focuses on the control and optimal operation of wind turbines, devotes itself to solving the problem of misalignment between talent training in universities and industrial demand, and constructs a new three-dimensional teaching reform mode of “theoretical cognition-curriculum system-practical innovation”. The training system dynamically updates the theoretical teaching content, restructures the curriculum system, strengthens the construction of the practical teaching platform, integrates artificial intelligence and intelligent operation and maintenance technology, and improves the students’ system analysis and innovation ability. Eventually, a closed-loop talent training system driven by industrial demand will be formed, providing solid talent support and education model for the high-quality development of the wind power industry.

Keywords

Wind Turbine, Optimized Operation, Artificial Intelligence, Talent Training

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着“双碳”目标的持续推进和新型电力系统的加速构建,风电机组的智能化控制与优化运行已成为我国可再生能源高质量发展的关键支撑。2024 年底,全国风电累计装机容量突破 5.21 亿千瓦[1],风电场规模化、集群化并网趋势愈发显著。与此同时,风电机组控制技术正经历深刻变革:一方面,风电场对有功无功调节、频率响应、并网稳定性等提出更高要求,相关技术标准如《风力发电机组——运行及维护要求》《风力发电机组运行评价指标体系》等不断迭代,推动机组控制策略从传统的定值控制向自适应、智能化方向演进[2];另一方面,风电场运行环境日益复杂,风速波动、并网扰动、设备老化等多重因素交织,促使机组优化运行技术从单一目标的能量最大化,转向多目标的安全、经济与智能协同优化。数字孪生、人工智能等新兴技术的深度融合,极大提升了风电机组的自诊断、自适应与智能决策能力,推动行业对高素质、复合型电气工程人才的需求持续升级[3] [4]。

然而,当前高校风电机组控制与优化运行人才培养体系与产业前沿发展之间仍存在明显脱节:首先,理论教学内容更新滞后,主干课程如《自动控制原理》《电力电子技术》多以通用控制理论为主,缺乏针对风电机组变桨控制、最大功率点跟踪(MPPT)、有功无功协同调节等核心技术的系统讲解,导致学生对风电机组控制机理与优化算法的理解不深;其次,课程体系与行业标准衔接不畅,最新的风电控制技术规范、并网要求等难以及时融入教学环节,学生毕业后需企业二次培训以适应实际工作需求;再次,实践教学平台建设滞后,实验内容多停留在传统控制系统仿真或小型风机实验,难以覆盖风电场级的集群优化、故障诊断、智能运维等复杂场景,学生缺乏对人工智能、数字孪生、智能优化算法等前沿工具的实际操作体验。此外,校企协同培养流于表面,实习实践多局限于设备巡检、基础调试,未能深入参与风电机组控制策略优化、集群运行参数整定等关键环节,进一步加剧了“理论与实践脱节”的困境[5]。

本研究聚焦风电机组控制与优化运行领域,致力于破解高校人才培养与产业需求错位的难题,构建“理论认知-课程体系-实践创新”三维一体的教改模式。在理论层面,动态引入风电机组控制与优化运行的最新研究成果与行业标准,构建覆盖基础理论、核心算法与工程应用的知识图谱;在课程层面,重构课程体系,强化风电机组控制策略、优化运行方法、智能算法应用等模块,推动课程内容与产业技

术同步更新；在实践层面，建设集虚拟仿真与实物操作于一体的风电机组控制与优化运行实验平台，开发基于人工智能、数字孪生等的智能运维实训系统，提升学生复杂工况下的系统分析与创新实践能力。最终形成“产业需求驱动-课程内容迭代-实践能力提升”的闭环人才培养体系，为风电行业高质量发展提供坚实的人才支撑与可复制的教育模式。

2. 理论认知 - 课程体系 - 实践创新多层次体系

为了应对新型电力系统对风电并网及调控能力提出的严峻挑战，风电机组控制与优化运行课程体系的重构亟需突破传统的教学模式，构建一个理论认知、课程体系与实践创新深度融合的全新教学范式，如图 1。这一模式的目标在于通过系统性的改革，实现知识传授、能力培养与产业需求之间的无缝对接，培养具备系统思维、创新能力以及卓越工程素养的复合型高级专门人才[6]，专注于风电机组的控制与优化运行。

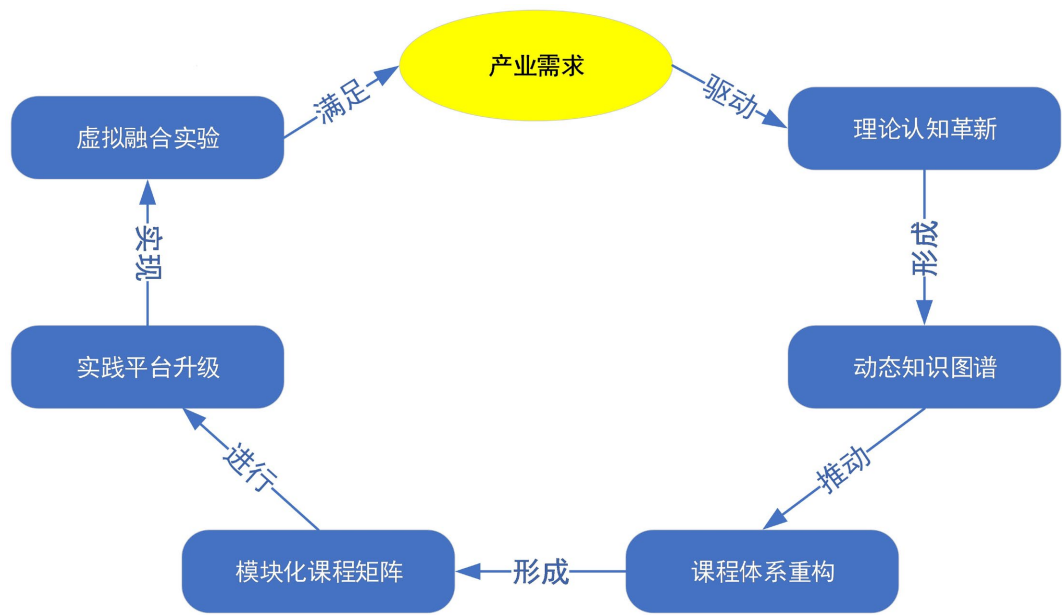


Figure 1. Industry demand-oriented research and innovation
图 1. 产业需求导向的研究与创新

在理论认知的维度上，改革的核心在于构建一个动态演进、层次分明的风电控制与优化知识图谱。对《自动控制原理》《电力电子技术》等传统主干课程进行现代化改造，不再是简单地罗列风电应用案例，而是将风电机组这一典型的多变量、强非线性、时变系统作为核心对象，深度融入风电相关的数学建模与先进控制算法设计，使在学习基础理论时能够与风电应用建立直接的联系。体系化地融入风电机组的核心技术机理，深入剖析变桨与转矩协同控制以实现载荷与功率的平衡、最大功率点跟踪(MPPT)策略的演进与优化、有功与无功的精确解耦，以及在电网支撑下的协同控制机理，确保学生对风电控制的底层逻辑有透彻的理解。

为确保理论教学的前沿性，需要建立一套动态引入前沿技术与行业标准的机制。将数字孪生技术、先进智能优化算法等作为关键内容[7]，系统讲授数字孪生建模的原理、方法及其在风电机组状态监测、故障诊断和全生命周期管理中的应用；深入探讨模型预测控制(MPC)、强化学习、群体智能等算法在解决风电控制与优化问题中的优势与实践。更重要的是，将最新的风电并网导则与技术规范，如一次频率响应、惯量支撑、高/低电压故障穿越(HVRT/LVRT)等核心要求的详细解读，融入教学中。通过这些举措，最终构建起一个从核心理论到前沿技术、从单机控制到行业标准的模块化、层次化知识图谱，引导学生

形成完整且与时俱进的知识结构。

在课程体系的维度,改革聚焦于内容的系统性重构与模块化设计。重点强化《风电机组控制技术》《风电场电力系统》《电力电子技术》等一系列核心专业课程,形成强有力的课程矩阵。课程内容被精心设计为四大核心模块,模块一:风电机组先进控制策略,专注于变桨、转矩、MPPT等基础控制,并拓展至主动载荷抑制、并网支撑等高级控制技术;模块二:风电场多目标优化运行,将视角从单机提升至场级,探讨如何在发电量、设备寿命、电网友好性及经济效益间进行多目标协同优化;模块三:智能算法与数字孪生应用,聚焦于数据驱动技术,涵盖状态监测、故障诊断、预测性维护及控制策略的智能优化;模块四:行业标准与工程实践,强调将技术规范转化为工程设计能力,通过大量真实案例培养学生的系统设计与问题解决能力。为保障课程内容的鲜活性,将建立校企联合教研室[8],通过定期技术研讨与项目合作[9],形成课程内容的常态化、快速迭代机制。

在实践创新维度,改革的重点是建设一个虚实深度融合的综合性研究型实训平台。

其系统架构包含4层:

1、物理层:通过工业物联网网关接入真实风电场 SCADA 系统数据流,实时采集机组运行状态(风速、转速、功率、温度、振动等)、环境参数及电网状态。

2、模型层:基于 OpenFAST 构建的高保真机理模型,精确模拟风电机组气动-结构-传动链-发电机-变流器的完整动力学行为,捕捉风速波动、湍流、塔影效应及传动链扭振等物理过程;同时利用变分自编码器(VAE)进行异常检测、卷积神经网络(CNN)实现故障分类,以及采用基于注意力机制的 LSTM 进行关键部件剩余使用寿命(RUL)预测。

3、服务层:支持预设或动态注入变桨轴承磨损、发电机匝间短路、变流器 IGBT 开路、风速仪失效等多种典型故障,模拟其发生、演化及影响过程;调用底层 VAE、CNN、Attention-LSTM 等数据驱动模型,提供实时状态评估、故障诊断定位及预测性维护建议;并通过标准 API 接口,支持学生开发的单机控制算法(如 MPPT、载荷抑制)或场级优化算法在虚拟环境中进行安全、高效的闭环测试与验证;最后提供三维界面直观展示机组运行状态、故障定位信息、优化策略效果及关键性能指标仪表盘,实现可视化。

4、应用层:面向学生的交互式实训操作界面,支持开展状态监测分析、故障诊断演练、预测性维护策略制定、先进控制算法开发与验证、风电场集群运行优化等多种实验项目。

虚拟仿真平台将以基于数字孪生的风电场智能运维实训系统为核心,该系统内置高保真度的风电机组与风电场模型,能够精确模拟风速波动、湍流、电网故障、设备老化等复杂运行场景[10]。平台集成状态监测、故障注入与诊断功能,并作为集群控制与智能优化算法的验证环境,支持学生开展预测性维护等先进运维策略的模拟与评估,见表1。同时,大力建设实物操作平台,包括集成了真实变桨、变流器及主控系统的先进风电机组控制实验台,能够复现场级协调控制策略的小型风电场实验平台,以及实现控制器或功率硬件在环(CHIL/PHIL)测试的平台,为学生提供接近真实工业环境的动手实践机会。在此基础上,设计贯穿课程模块的递进式实践项目体系,从基础的单机控制验证性实验,到综合性的多目标优化设计实验,再到鼓励自主探索的、基于数字孪生的故障诊断或智能算法应用等创新研究性项目,全方位锻炼学生的工程实践与创新能力[11]。

最终,通过理论认知、课程体系与实践创新的三维融合,形成一个有机联动、闭环运行的教学体系。在该体系中,理论为课程与实践提供坚实的知识基础与前沿视野;课程作为衔接理论与实践的关键桥梁,系统化地输送核心知识与技能;而实践则是对理论与课程学习成果的最终检验、深化与升华。整个体系以“产业需求”为根本驱动力,其反馈将持续引发理论知识的更新、课程体系的重构以及实践项目的设计优化,而“课程内容的迭代”与“学生实践能力的提升”则直接响应并满足产业需求,从而构建一个动态适应、自我完善、高质量的风电控制与优化运行人才培养生态。

Table 1. Key performance test results of digital twin platform
表 1. 数字孪生平台关键性能测试结果

测试层级	测试项	指标/方法	测试结果
物理层	数据采集延迟	SCADA 数据至平台处理端时延	≤100 ms
	数据完整性	实时参数采集丢包率	<0.1%
模型层	机理模型保真度	OpenFAST 仿真功率误差(vs.实测数据)	≤3% (额定工况)
	异常检测准确率(VAE)	未知故障类型检出率	92.7%
	故障分类准确率(CNN)	12 类故障测试集识别准确率	95.2%
	RUL 预测误差(Attention-LSTM)	轴承失效前 24 小时误差	<15%
服务层	故障注入响应时间	动态故障注入至生效延迟	<50 ms
	诊断服务延迟	VAE-CNN 混合模型单次推理时间	<200 ms
	控制算法验证实时性	API 接口闭环控制周期	≤50 ms
	三维可视化刷新率	动态数据渲染帧率	≥30 fps
应用层	多任务并发稳定性	5 用户同时操作故障诊断+控制验证	无崩溃/卡顿
	实训操作成功率	学生完成预设实验项目达标率	93%

3. 实施路径

- 1、深化产教融合与校企协同
- 为实现风电机组控制与优化运行课程体系的高质量改革，深化产教融合是核心路径之一。通过共建产业学院和特色班级，搭建校企协同育人平台，实现人才培养与企业需求的精准对接。企业专家定期进课堂，讲授风电领域前沿技术、行业标准及典型案例，提升学生理论与实践结合的深度。学生参与企业真实项目，如风电机组控制参数整定、风电场运行优化及智能运维系统开发，增强实践能力和工程素养。联合建设实验室和实训基地，整合校企资源，打造集教学、研发和创新于一体的实践平台，促进理论与实践的无缝衔接[12] [13]。
- 2、师资队伍能力提升
- 实施“双师”能力认证计划，推动教师企业挂职和实践锻炼，提升教师对行业最新技术的掌握和应用能力。引进企业工程师担任兼职教师，促进产学研深度融合，并组织数字孪生、人工智能等前沿技术培训，如表 2，提升教师教学创新能力和科研水平，实现教学内容与产业接轨。

Table 2. Enhancement measures
表 2. 提升措施

措施	量化指标	支撑平台
教师企业挂职	每年 ≥2 个月(参与实际项目)	校企共建技术中心
前沿技术认证	100%教师通过数字孪生操作考核	ANSYS Twin Builder 培训基地
企业导师评教机制	学生评分权重占 40%	教学质量管理平台

- 3、学科竞赛提升专业水平
- 用赛事引领工程实践的升华，遴选优秀团队参与“象新力杯”工程赛道、电力设计大赛、节能减排大赛等，聚焦风电机组多工况控制与运行优化中的关键难题，如变桨控制策略优化与多目标功率调节。

参赛学生将基于人工智能算法验证的控制模型，迁移并部署到工业控制系统架构中，设计涵盖感知层(风速与振动传感器网络)、控制层(自适应控制算法)、优化层(多目标运行策略调度)的全链条解决方案[14]。团队将经历从问题建模、系统设计到方案答辩的完整工程创新过程，最终通过“虚拟仿真→实物平台→现场应用”的三阶段跃迁，锤炼出应对产业升级的智能控制与优化能力。

4、基于 OBE 理念构建能力指标体系与评价体系

为科学评估培养成效，基于 OBE 理念，构建了涵盖知识、能力、素养的多维度指标体系(见表 3)，并设计了对应的评价工具：

核心能力指标：包括系统建模与分析能力、先进控制算法应用能力、风电场多目标优化能力、智能运维技术应用能力、工程设计与实现能力(CDIO)、创新解决复杂问题能力、团队协作与沟通能力、行业标准理解与应用能力。

评价工具与方法：

课程模块：采用包含上述能力指标的 Rubrics 评分量表进行作业、项目、考试评价。

实践环节：结合平台操作记录、项目成果(代码、报告、演示)、基于 Rubrics 的小组互评与教师评价，以及企业导师评估表(权重 40%，评价工程实践与职业素养)。

学科竞赛：依据竞赛评审标准(侧重创新性、技术复杂度、工程可行性)。

毕业要求：综合课程成绩、实践评价、企业实习鉴定、毕业设计(需解决实际工程问题)进行达成度评价。

Table 3. Core competency index system for wind turbine control and optimization operation talents

表 3. 风电机组控制与优化运行人才核心能力指标体系

能力维度	核心能力指标	主要评价环节	评价工具与方法
知识理解与应用	风电系统基础理论掌握深度	核心课程	考试、作业
	先进控制与优化算法理解与应用	核心课程、实践项目	项目报告、算法实现与测试
	行业标准与规范熟悉程度	专业课程、企业实践	案例分析、标准应用测试、企业评估
	系统建模与分析能力	课程设计、实践项目、毕业设计	模型报告、仿真分析
工程实践与创新	风电场多目标优化设计与实现能力	实践项目、学科竞赛	优化方案、实现效果、竞赛评审
	智能运维技术应用与故障诊断能力	虚拟平台实训、实物平台操作	平台操作记录、诊断报告、预测结果分析
	工程设计与实现能力(CDIO)	贯穿所有实践项目与竞赛	项目全过程文档、成果物、演示
	创新解决复杂工程问题能力	创新研究项目、学科竞赛、毕业设计	解决方案创新性、技术复杂度、实施效果(评委/导师评)
职业素养与协作	团队协作与沟通能力	小组项目、竞赛	小组互评、导师评价、企业评估
	工程伦理与责任意识	企业实践、案例分析	实习报告、反思总结、企业导师评价

4. 培养成效

为科学评估本培养体系的效果，采用了准实验研究方法。选取本校 2023 级能源与动力工程专业两个自然班(实验班，n=70)作为改革实施对象，2022 级同专业两个班(对照班，n=65)采用原培养方案作为对照。在效度方面，通过校外专家评审(风电企业总工、高校资深教授)对能力指标体系、评价工具及测试题

目进行内容效度评定(CVI > 0.85); 通过探索性因子分析验证评价维度的结构效度(KMO > 0.8, 累计方差贡献率 > 75%)。在信度方面, 核心课程试卷及项目评价 Rubrics 的内部一致性信度(Cronbach's α > 0.9)和评分者间信度(组内相关系数 ICC > 0.8)均达到优良水平。

如表 4 所示, 本改革实施两年来成效显著, 学生核心能力指标系统性跃升: 核心课程平均成绩提高 7%左右, 风电场智能运维实训合格率从 68%提升至 92%, 企业项目参与率达 80%。智能运维平台操作优良率达 93%。学生在风电场实习中, 不仅掌握了变频器故障诊断、SCADA 系统调试等核心技术, 还通过多次现场操作和反复调试, 迅速将理论知识转化为实际解决能力, 全面提升了实践能力、创新思维和团队协作能力。改革的实施不仅提升了学术水平, 更为学生的职业发展打下了坚实基础。

Table 4. Comparison of key training effectiveness indicators (Experimental class vs. control class)

表 4. 培养成效关键指标对比(实验班 vs 对照班)

评价指标	实验班(2023 级, n = 70) 对照班(2022 级, n = 65) 提升幅度/差异显著性 统计检验(p 值)			
核心课程平均成绩	85.7 ± 4.2	79.8 ± 5.6	+7.4%	<0.001**
风电场智能运维实训优良率	92%	68%	+25 个百分点	<0.001**
企业真实项目参与率	80%	35%	+45 个百分点	<0.001**
数字孪生平台操作优良率	93%	-(未系统使用)	-	-
竞赛获奖率(省级以上)	41%	18%	+23 个百分点	0.003**
毕业设计优秀率	36% (2024 届)	22% (2023 届)	+14 个百分点	0.032*

5. 结论与展望

本研究针对风电机组控制与优化运行领域的人才培养与产业需求错位问题, 创新性提出并实践了“理论认知 - 课程体系 - 实践创新”三维融合教改模式。通过动态更新风电控制理论, 重构模块化课程体系, 并建设虚实融合的实训平台, 实现了教学内容与产业前沿技术的深度同步。改革形成了“产业需求驱动→课程迭代→能力提升”的闭环培养生态, 显著提升了学生的系统分析能力与创新实践素养: 核心课程成绩提升 7%, 智能运维平台操作优良率达 93%, 企业项目参与率突破 70%, 有效解决了传统培养中“理论滞后、实践薄弱、产教脱节”的痛点。

未来研究将聚焦以下方向深化: 1) 加速人工智能大模型(如 LLM)、边缘计算等技术与数字孪生平台的集成, 构建更智能化的风电场级协同优化教学场景。2) 联合企业建立“标准共研、平台共享、人才共育”长效产教协同体系, 实现行业技术规范向教学资源的“月级”高效转化, 确保人才培养与产业升级同频共振。

参考文献

[1] 国家能源局. 2024 年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabc3458aaf78ba4558970054/c.html>, 2025-01-27.

[2] 全国风力机械标准化技术委员会(SAC/TC50). 风力发电机组 运行及维护要求: GB/T25385-2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[3] 姚贵山. 风电机组数字孪生系统建模及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.

[4] Tao, S., Xu, Q., Feijóo, A., et al. (2020) Digital Twin and Its Applications in Wind Turbine Operation and Maintenance. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **11**, 2608-2617.

[5] 郭鸣晓. 新质生产力视域下产教融合共同体育人模式的优化策略[J]. 产业创新研究, 2025(10): 195-197.

[6] 陈子玉, 汪祥兵, 王莺子. “双碳”背景下风电工程专业人才培养实践[J]. 中国电力教育, 2024(11): 70-71.

-
- [7] 张雪岩, 高庆忠, 郭瑞, 等. 风电实训平台建设与“数智化”人才培养探索[J]. 高教学刊, 2024, 10(32): 164-167+172.
 - [8] 仝彩霞, 王家伟, 史志慧, 等. 风电机组安装调试课程思政研究与实践[J]. 风能, 2024(5): 70-74.
 - [9] 彭婧, 向保林, 黄定明, 等. 基于“教培一体”的教学内容模块化建设探索——以风电专业核心课程“风电设备安装与调试”为例[J]. 中国电力教育, 2024(2): 83-84.
 - [10] 呼梦颖, 段建东, 杨磊. 风电并网运行控制虚拟仿真实验系统构建及应用[J]. 中国电力教育, 2023(11): 59-60.
 - [11] 王玉巍, 竞静静. 面向应用型人才培养的风电场电气工程教学模式改革研究[J]. 中国设备工程, 2023(4): 261-263.
 - [12] 赵亚萍, 朱国俊, 吴广宽, 等. 虚拟仿真技术在风电机组设计与制造教学中的应用[J]. 中国电力教育, 2019(1): 65-67.
 - [13] 邢作霞, 芦彦东, 祁东亮, 等. 依托风电实训平台培养高素质风电人才[J]. 风能, 2017(8): 42-43.
 - [14] 李良君, 何昌国, 王华君. 依托行业大赛加快风电技能型人才培养的实践与思考[J]. 风能, 2021(3): 50-52.