

编者按

为更好地促进动力与电气工程领域的学科发展,分享教育教学成果,《中国电机工程学报》开设“教育与教学”栏目,征集教育教学类相关论文。该栏目论文采取完整的学术论文形式,对某个主题或特定话题作清晰和完整的论述。要求将教育理论和方法与学术研究内容相结合,具有实质性的创新,包括但不限于教育思想和技术、教育历史和改革、教学方法和内容、教学改进措施等,对动力与电气工程学科的发展、教育史或教育教学的进步具有较广泛的影响和意义。

DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200461 文章编号: 0258-8013 (2020) 13-4063-09 中图分类号: G 642.42

面向能源互联网的电气工程本科教学 体系改革与实践

朱桂萍, 林今*, 孙宏斌, 康重庆, 于歆杰, 曾嵘

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机工程与应用电子技术系),
北京市 海淀区 100084)

Reform Practice of Electrical Engineering Undergraduate Teaching System for Energy Internet

ZHU Guiping, LIN Jin*, SUN Hongbin, KANG Chongqing, YU Xinjie, ZENG Rong

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Building the energy internet has become a national energy strategic with rapid industrial development in China to achieve the deep integration of the energy system and the information internet. In order to meet the national strategic demand and lead the industrial development, universities must play the role of cultivating the inter-disciplinary talents needed for the energy internet. Since energy internet is a typical multi-disciplinary field, this paper systematically introduced the reform process and practical experience of the talent training program in the direction of energy internet based on the electrical engineering training program in the Department of Electrical Engineering of Tsinghua University in the past 5 years. The paper presented the knowledge structure required by energy internet professionals, and the advantages of establishing the energy internet undergraduate teaching system based on current electrical engineering program. The paper also took the energy internet undergraduate training program of the Department of Electrical Engineering of Tsinghua University as an example, and introduced the education concept cooperated with R&D and specific measures adopted in the

process of talent training in the direction of energy internet. It is hoped to provide a valuable reference for the training of talents in the direction of the energy internet in China.

KEY WORDS: energy internet; electrical engineering; undergraduate teaching; reform practice; training program; curriculum system

摘要: 建设能源互联网,实现能源系统与互联网的深度融合,已经成为我国重要的能源战略需求和相关产业发展趋势。为了满足国家战略需求,引领产业健康发展,高校必须尽快培养能源互联网所需的复合型人才。能源互联网是一个典型的多学科交叉领域,该文系统介绍了清华大学电机系近5年来以电气工程专业人才培养方案为基础,逐步形成能源互联网方向人才培养方案的改革过程与实践经验,阐述了以电气工程为基础拓展建立能源互联网本科教学体系的原生优势以及存在的不足,提出了能源互联网专业人才所需的知识结构。同时以清华大学电机系在能源互联网方向进行的本科教学改革为例,介绍了在改革过程中形成的能源互联网专业本科培养方案,重点介绍了对专业课程体系的设计,以及在专业实践环节的具体做法,以期为我国能源互联网专业的人才培养提供有价值的参考。

基金项目: 教育部首批“新工科”研究与实践项目资助。

The First Batch of "New Engineering" Research and Practice Projects
Funded by the Ministry of Education.

关键词: 能源互联网; 电气工程; 本科教学; 改革实践; 培养方案; 课程体系

0 引言

能源的清洁高效安全转型已成为人类社会的普遍共识,包括从能源生产、输送、储存到消费的全产业链条转型。根据世界可再生能源署预测^[1],2050年,以风电、光伏为代表的可再生能源将替代传统的化石能源,占全球能源生产的60%以上;而能源消费的电气化将渗透到交通、建筑、热力、化工等板块,电气化率将提升至50%左右。能源生产侧的绿色转型与消费侧的深度电气化,要求能源的储运网络具有世界范围内的全局配置能力与长周期的、规模化的储存能力,现有的任何一种能源基础设施(如电网、热力网、油气网等)均无法独立应对这样的巨大挑战。

能源互联网正是为应对这一巨大挑战而诞生的全新工程对象,其发展目标是以电网为骨干网架,将电、气、热等多种能源形式连接在一起,通过多种能源形式的相互转化与不同能源系统间的相互配合,在先进信息技术的支撑下,实现清洁能源在大时空范围内的全局优化配置^[2-3]。2016年国家发改委、国家能源局、工业和信息化部联合发布了“关于推进互联网+智慧能源发展的指导意见”^[4],推进“互联网+”上升为国家战略。大型能源央企(如国家电网、国家能源等)、能源领域的跨国巨头(如西门子、ABB、GE等)以及互联网龙头企业等(如华为、阿里、腾讯等),都相继发布了能源互联网发展战略,将能源互联网作为未来产业互联网的重要抓手。

能源互联网作为我国未来能源革命的重要战略支撑和能源产业发展的必然趋势,将带来对相关人才的持续旺盛需求,因此进行能源互联网领域的人才培养已刻不容缓。能源互联网的物理构成及其核心特征使其天生就具有学科交叉性质,其核心是以电气工程学科为基础,实现与其他形式能源领域的新原理、新应用以及信息技术学科、管理学科的交叉创新。现有的任何一个传统学科培养的人才都不具备如此全面的知识基础,也绝不是任何一个传统学科仅仅依靠内涵式发展就能解决的,必须要打破现有的学科边界,加强学科交叉,建立全新的人才培养体系和培养模式,使之具有绿色、创新、开放、共享等价值理念,跨学科融会贯通解决问题的能力 and 宽广的复合性学科基础知识。这一点已经在产业和高校中形成了广泛共识,并且已经有一些高校(如清华大学、山东大学、华北电力大学等)开始进行小规模的相关人才培养试点^[5]。

尽管如此,由于能源互联网涉及的学科众多,各人才培养单位以及产业单位对于能源互联网专业人才应该具有的知识、能力乃至价值观还缺乏系统而清晰的共识。为此,本文以清华大学电机系最近5年在能源互联网方向进行人才培养的探索与实践为基础,系统阐述了笔者对于以电气工程学科为基础,进行能源互联网人才培养的一些思考、认识与做法。首先分析了以电气工程学科为基础进行能源互联网人才培养的原生优势,对电气工程学科长期存在的交叉创新现象及其内在机理进行了历史溯源;其次从产业发展需求角度,分析了能源互联网这一典型的应用型学科其人才应该具备的知识结构,重点指出了以现有的电气工程知识结构应对能源互联网产业发展存在的不足;最后基于新工科的产学研协同育人理念,介绍了清华大学电机系设计的能源互联网本科专业培养方案,以及新开设的部分核心课程的主要教学内容。

1 以电气工程学科为基础进行能源互联网人才培养具有原生优势

“能源互联网”概念提出后,国内高校进行相关人才培养尝试的单位多是电气工程学科背景,这在育人单位和用人单位都引发了广泛而有意义的讨论,即为何是由电气工程学科率先进行能源互联网方向的改革?以电气工程学科为基础进行能源互联网方向的人才培养到底具有什么优势?首先,能源绿色转型和再电气化是电气构成学科的内在动力和优势,尤其能源互联网是以电力为核心和枢纽,这个优势是决定性的。其次,追溯电气工程学科的发展历史,笔者发现:在电气工程学科的教学与科研体系中,较早且系统性地将信息理论与物理对象深度融合,满足了能源互联网“能源与信息深度融合”的最核心需求。这些是以电气工程学科为基础进行能源互联网方向人才培养的原生优势与重要基础。

1.1 电气工程率先将信息理论系统性地引入学科建设

电气工程学科强调与信息技术的结合可以追溯到20世纪70年代。当时电气学科发展正面临着由着重知识传授的苏联教学体制,向着重技术基础、能力培养的宽口径方向发展。在这次历史性的改革过程中,一个重要的趋势就是电气工程学科的技术基础不再定位为“强电为主、弱电为辅”,而改为“强弱电相结合,弱电为强电服务”^[6],并以

此观点来改造电气工程学科的核心课程组成。借鉴美国的培养模式，“电子学”、“通信工程”与“控制工程”等多门信息类课程开始被纳入电气工程学科的人才培养方案中^[7]。这也使得不少高校的电气工程专业成为了新专业的孵化器，以清华大学电气工程及其自动化专业为例，历史上就派生出了计算机科学与工程、自动化、电子工程、生物医学工程等多个专业。

进入 20 世纪 90 年代后，随着电力电子器件(功率半导体器件)的快速发展，“强弱电相结合”的观点进一步发展为“强弱电融合”，形成了包括“电机控制”、“电力电子技术”等全新的课程^[8]。随着课程体系的改变，电气工程领域的科研方向也发生了深刻的变化，开始将通讯与控制领域的新原理与新方法系统性地应用于当时电气工程的学科前沿领域，包括大容量功率变换^[9]、电机变频调速^[10]、发电机稳定控制^[11]等。高校在人才培养上的改革极大地推动了电力行业的整体进步。

1.2 智能电网集中体现了信息技术与电力系统的深度融合

2000 年之后，随着 21 世纪初几次大停电事故的教训，国内外电气工程领域普遍认为，需要进一步将先进的信息技术应用于“人类创造的最复杂的工程系统”——电力系统之中。这就诞生了“智能电网”这一重要概念，其理念是利用先进的信息与控制技术，改造升级传统的电力系统，优化提升庞大的电力资产运行效率与效益。在智能电网中，信息技术广泛被运用于电力系统的规划设计^[12]、调度优化^[13]、安全稳定^[14]、控制保护^[15-16]以及关键设备检测维护^[17]等各个方面，如图 1 所示。

高度的数字化加速了市场化发展，电力市场机制推动了世界范围内的行业重组，被广泛认为是实现复杂能源系统资源优化配置的重要方式。伴随行业的变革，电气工程学科的人才培养体系和培养模式也做出了相应调整，“研究型”教学模式有效促进了教研相长^[18]。

人才知识结构的优化进一步引领产业健康发展，形成了良性正反馈。如今发展智能电网，加大信息技术与物理电网的融合已经成为各国的共识。“智能电网”已被普遍认为是最具有代表性的“信息物理系统”(cyber physics system, CPS)^[19]，信息不仅仅是物理系统的产物，信息系统与物理系统高度融合，密不可分，信息系统的安全甚至已经反过来影响物理系统的安全运行，这方面的研究也

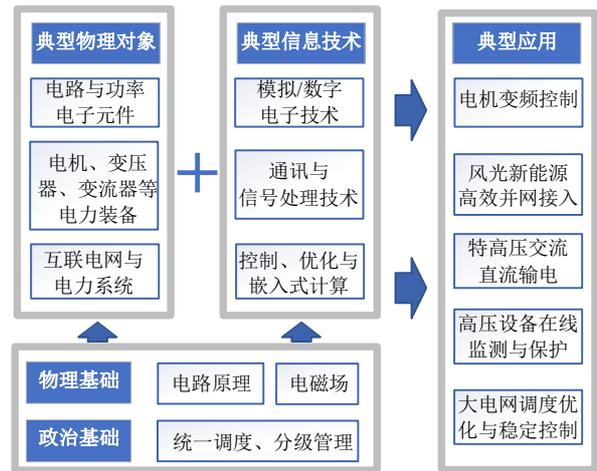


图 1 电力系统与信息技术融合示意图

Fig. 1 Integration of power system and information technology

已经在各国学者中逐渐展开，这一趋势对未来人才培养的影响已经可以预见。

电气工程学科过去近半个世纪的发展历程证明，其成功实现了与信息学科的交叉融合，并且有力推动了相关产业的发展。因此，以电气工程学科为基础培养能源互联网方向的专业人才具有较好基础和原生优势。秉承电气工程学科长期存在的交叉创新基因以及“教研相长”的人才培养理念，完全有可能实现从“电力与信息交叉融合”向“能源与信息交叉融合”的顺利过渡，避免教学体系结构性变化所带来的人才培养风险。

2 能源互联网专业人才的知识结构需求

即使与“智能电网”相比，能源互联网在涉及的对象和处理手段上也有了很大拓展，因此现有的电气工程学科的知识结构显然不能满足需求，有必要厘清能源互联网发展到需要什么类型的人才，其知识结构与现有电气工程学科的人才培养体系有何区别。

清华大学电机系从能源互联网方向的科研入手，逐步将科研成果与产业结合，从产业发展的需求角度逐步摸索人才培养需求，并首先尝试能源互联网方向专业硕士人才培养。以硕士培养为契机，逐步建立能源互联网方向的核心课程体系，进而带动本科人才培养方案改革，初步形成了“能源互联网”本科专业培养方案，明晰了现有的电气教学体系向能源互联网发展的改革方向。

2.1 教学体系需考虑能源互联网涉及的新对象和新手段

笔者认为，与现有的电力系统相比，能源互联

网的主要区别表现为以下三点。

首先是电力与能源网络的综合集成，特别是天然气管网^[20]、氢供应链网络^[21]以及全球互联的特高压输电网，将极大提升可再生能源在全球范围内的空间配置能力；其次是储能技术的广泛应用，特别是以压缩空气为代表的物理储能^[22]、以锂电池为代表的电化学储能^[23]以及以氢能为代表的化学物质储能^[24]，均被普遍看好将规模化应用于能源互联网，提升可再生能源的时间配置能力；最后是市场机制，通过市场这只看不见的手将有效提升愈发复杂的能源系统的资源优化配置能力^[25]。

能源互联网的高质量发展亟需培养能够深刻理解上述新对象与新机理，并对新形势与新机制有全局认识的高端人才。然而，在当前电气工程学科的教学体系之中，与上述新兴对象密切相关的基础类课程占比不高，系统性不强。例如，能动与化工领域的热力学与“三传一反”理论，新材料领域的物理化学与半导体物理，以及与市场机制相关的经济学、金融学原理等，这些与能源互联网发展密切相关的基础理论课程普遍缺失。

“由机理到技术容易，由技术回到机理难”，基于当前电气工程学科的课程体系所培养的人才欠缺对能源互联网的微观物化机理以及宏观运行机制的认识，是能源互联网专业教学体系建设必须补齐的第一个短板。

2.2 教学体系需体现能源与信息深度融合

在能源互联网中信息化将深刻融入能源互联网的全生命周期，如图2所示，体现在“机理发现”、“原型试制”、“装备制造”、“规划设计”、“集成建设”、“运行控制”、“运维管理”等所有环节之中。从技术路线发展角度看，数字孪生模拟、大数据驱动以及人工智能方法，也已开始在能源行业内开始被广泛采用。

当前电气工程学科的课程体系已难以匹配能源互联网深度信息化对人才的知识结构需求，主要体现在：1) 现有课程所教授的能源与信息相融合的技术主要体现在电力系统的自动运行控制层面，与能源互联网的其他上下游环节，如装备制造、规划设计、运维管理等联系不足；2) 现有课程多讲授以模型为中心的分析与控制技术，缺少以数据为中心的人工智能新技术课程，更缺少综合运用信息技术解决能源互联网实际问题的课程。

能源与信息交叉融合不足，缺少能够运用新型信息化工具分析并解决能源行业实际问题的复合

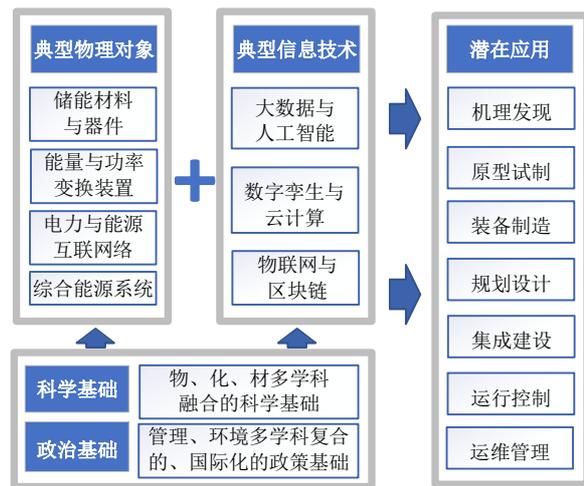


图2 能源互联网中能源与信息融合示意图

Fig. 2 Integration of energy and information in energy internet

型人才，这是能源互联网专业教学体系建设必须补齐的另一个短板。

2.3 能源互联网专业知识结构的特点

“能源学科的机理认识缺失”以及“能源与信息交叉融合不足”，这是能源互联网发展至今能源与电力行业对现有人才知识结构不足的普遍认识，强烈呼唤现有的电气工程教学体系做出针对性的变革，以适应国家与行业未来的发展趋势，具体包括：

1) 科学基础层面。讲授对象由电路、电机和电力系统逐步向综合能源系统以及储能等领域的新对象拓展，相应地其科学基础从电磁学逐步向热力学、物理化学、流体力学甚至材料科学等领域拓展。

2) 技术基础层面。与信息学科的交叉融合方式逐步由自动化向数字化、智能化发展，讲授包括物联网、大数据与人工智能等在内的全新技术手段。信息工具的应用对象逐步由电力系统的运行控制环节向能源行业的全生命周期拓展。

3) 宏观机制层面。对行业发展趋势的研判不再局限于传统技术的范畴，而是从经济、环境等视角，引导学生更加全面地看待能源转型对人类未来经济社会发展所带来的全新挑战。加强人才的能源经济学素养，理解市场机制在能源行业发展中的重要作用。

3 清华大学能源互联网方向人才培养探索与实践

面向能源互联网的发展需求，为培养兼具能源与信息学科基础的交叉型复合型专业人才，清华大学立足国家战略需求，志在引领产业发展，发挥清

华大学的综合学科优势，以电气工程学科为依托，率先开始探索了能源互联网本科专业建设的探索与实践。教学改革获得了教育部第一批“新工科研究与实践项目”的支持，研究成果在国内外引起了广泛关注，本节主要介绍能源互联网专业的培养方案与核心课程建设。

3.1 能源互联网专业培养方案

按照工程认证要求，清华大学电机系制定了完整的能源互联网专业培养方案。

能源互联网专业的人才培养目标是：培养能够深刻理解电、热、冷、气等多种能源体系及其相互转换的基础原理，具备综合贯通与协同考虑的大能源观，掌握将信息技术与能源产业深度融合的关键知识与技能，了解国内外能源市场与消费机制，具备能源政策、能源经济等专业素质的人才，满足在未来相当长一段时间内我国乃至世界在能源领域对高端复合型人才的需求。

课程体系是培养方案最重要的组成部分。能源互联网专业的课程设置充分体现了“宽口径”、“重基础”与“强交叉”的专业建设理念。电机系以能源互联网的实际应用需求为导向，参考国际上著名高校在能源与电力领域课程设计的最新进展，对现有的“电气工程”与“能源与动力工程”课程进行了重新梳理与交叉融合，为能源互联网专业课程建议开设了一系列以“能量转换的物理基础”与“能量转换原理与技术”为特色的专业基础课组，以及以“综合能源系统分析与优化”与“能量转换与互联网设备”为基础的专业核心课组。作为专业核心课组的必要补充，专业选修课除了包括传统的“电气工程类”和“信息类”，还增加了“清洁能源类”、“先进材料类”和“能源管理类”。总体课程组成如图 3 所示。

基于上述研究成果，清华大学电机系作为教育部信息技术新工科联盟能源互联网工作秘书单位的秘书单位，2019 年在联盟内编制并发布了《能源互联网专业建设方案》(建议稿)。

3.2 能源互联网专业课程体系

为了进一步明晰能源互联网专业课程中能源与信息的关系，电机系教学委员会对能源互联网专业的课程设置进行了深入研讨，梳理出能源与信息两条主线，在每条主线上从基本原理到高级应用的开设出相应的课程，并指明了这些课程之间的相互关联，如图 4 所示。这些课程并不是各个专业课程的简单集合，有相当一部分课程都是需要新开

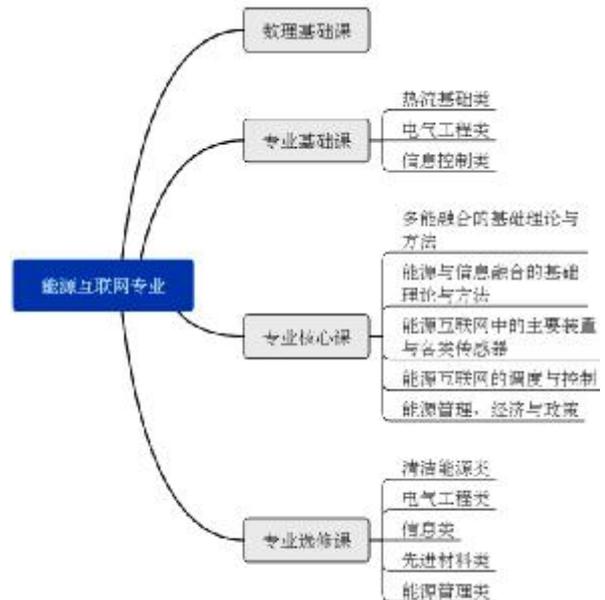


图 3 能源互联网专业课程总体构成

Fig. 3 Course composition of energy internet major

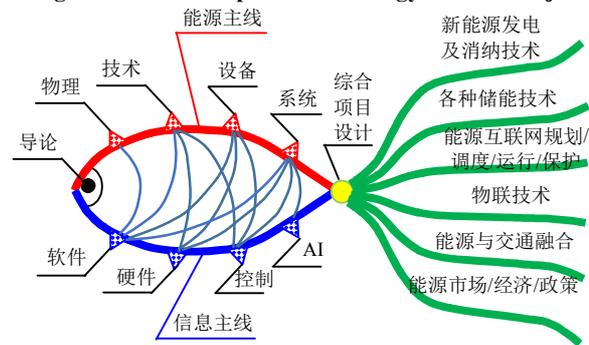


图 4 能源互联网专业课程体系结构

Fig. 4 Architecture of the course of energy internet major

的，甚至是两个或多个院系联合授课。

1) 能源主线。

能源主线以“电气工程自动化”专业的课程为基础，打破学科边界，实现从电气工程学科知识体系向包含其他能源形式的知识体系的拓展。拓展的几门主要课程如下。

“能源互联网导论”课程作为专业核心课程，从能源互联网的物理层、信息层与商业层 3 个角度，讲授能源互联网与能源革命对能源系统基础设施、运行控制以及商业模式的重要变革。课程融合教授了能源互联网的前沿动态进展，帮助学生开拓专业视野，让学生对能源互联网有一个初步的、全面的认识。对应于该课程，由孙宏斌教授主编的《能源互联网》正式出版^[26]，将作为能源互联网方向的核心教材面向本科生进行授课。

“能量转化原理与技术”课程作为专业选修课，综合讲解了热能、化学能以及新能源等一、二次能源转换为电能或作为储能载体的物化原理与

技术基础,课程以热力学的基本原理为线索,穿插动力学与控制理论的相关知识,串联了能源互联网多种能源相互转换的基本原理与技术发展趋势。特别是,课程将热力学与动力学原理,与能源互联网的前沿应用深度结合。在课程中讲解了空气压缩储能、储热降低弃风、煤改热泵缓解冬季雾霾、风光制氢消纳余电、静态热电联供提升能效以及风光功率的最优跟踪等典型的能源互联网应用与工程实践经验,实现了前沿知识与基础原理的深度融合。课程简介如图5所示。



图5 “能量转化原理与技术”课程内容简介

Fig. 5 Introduction to principle and technology of energy conversion

为提升能源互联网方向的培养质量,清华大学由2017年始启动了大类招生和大类培养的新模式。电机系、能源与动力工程系等相关院系共同组建了能源与电气大类,共同培养能源方向本科生。基于该大类平台,由能源与动力工程学科为本科能源互联网国际班定制的“热力学与传热学基础”,作为学科核心课程,为学生系统掌握热力学原理,理解冷、热、气等能源形式的运行原理,以及与“电”这种能源形式的互联互通奠定了必要基础。在部分专业选修课方面,也与能动专业实现了学分互认。

2) 信息主线。

该系列课程在电气工程学科原有的介绍信息采集、处理、应用的课程基础上,新增了大数据、人工智能等新兴信息技术的原理,及其在能源互联网领域的前沿应用。

“大数据分析处理”作为学科核心课,由清华大学软件学院与电机系共同组建教学团队,讲授机器学习、数据挖掘的基本原理,数据的可视化方法,以及典型的数据挖掘编程工具、数据库与大数据工具的使用方法。软件学院负责讲授大数据分析处理的基础理论与技术,而电机系则结合能源电力行业的应用需求,以可再生能源大数据、能源系统运维检测数据挖掘、电力系统用电大数据以及数据驱动的电力系统分析为案例,开展以理论综合应

用实践为方向的实践训练。课程简介如图6所示。



图6 “大数据分析处理”课程内容简介

Fig. 6 Introduction to big data analysis and processing

另外还新开设了“能源与信息概论”、“能源互联网运行、调度与规划”、“能源互联网中的能量转换与互联设备”等体现能源与信息交叉融合的研究专业选修课程(这些研究生课程同时对高年级本科生开放),从先进通信技术、物联网技术、区块链技术、分布式优化技术、多能源协调优化等方面,介绍了信息技术如何应用于能源与电力系统,提升复杂的综合能源系统的运营效益。

除了开设新课程,还进一步丰富了电气工程学科已有课程的内涵,并积极拓展其课程边界,形成了一系列包括“能源与未来”、“电力市场概论”等专业选修课,讲授能源与电力行业的整体政策、形势与核心技术,以满足能源互联网专业人才培养的需要。

3) 综合项目设计及选修课。

除了能源与信息两条主线的核心课程外,能源互联网专业的课程体系中还特别增加了一个“综合项目设计”环节,旨在要求学生在大四的时候能够综合运用前三年所学的基础知识,设计完成一个大规模的能源互联网相关项目,真正做到“在做中学”。为此,清华大学专门建设了开放的能源互联网实验环境,实验平台提供通用的电源、转换器件以及各种测试设备,便于学生进行研究性实验,激发学生的学习兴趣和创新思维,提升其对基础知识的理解与认识。建立了以 CloudPSS 与 CloudIEPS 为平台的能源互联网云端仿真系统,在线提供了丰富的案例与教程,能够允许学生在线实现综合能源系统、储能系统与微电网的模拟计算与实验,并实现研究算例与测试结果的快速分享与校验。

能源与信息两条主线上的课程设计充分体现了能源互联网专业相比于电气工程学科在科学基础和技术基础方面的区别,主要侧重于知识传授;综合项目设计则主要着眼于培养学生跨学科解决问题的能力;而图4中鱼尾部分的一系列选修课,

如“能源互联网规划”、“能源经济/管理/政策”等，则帮助学生建立对能源互联网宏观机制层面的认识，包括商业模式和市场机制等。整个课程体系的设计以清华大学“三位一体”(即价值塑造、能力培养、知识传授)的育人理念为指引，旨在通过这一课程体系帮助学生初步确立创新、开放、平等、共享的能源互联网核心价值理念，掌握宽广的多学科基础知识，并且具有综合运用基础知识创新性地解决实际问题的能力。

3.3 能源互联网课程的学分设置与师资建设

按照清华大学目前的人才培养要求，工科院系的总学分上限是 170，其中 44 学分属于通识教育，全校统一。专业能够设计的学分是 126，包括暑期实践 11 学分以及最后的综合论文训练 15 学分。其余的 100 学分在目前对能源互联网专业的培养方案中包括数理基础 34 学分、专业核心课 55 学分(导论课 2 学分+能量主线 32 学分+信息主线 21 学分)和专业选修课 11 学分。

毫无疑问，能源互联网专业涉及的知识广度要大于原来的电气工程，在相同的学制和学分要求下要想实现广度与深度兼得是非常困难的，必须要有所取舍。清华的本科培养理念是“宽口径，厚基础”，所以本科教育阶段更多关注的是知识的广度，尽量拓宽学生的认知维度。另外，由于清华绝大部分学生本科毕业以后都会继续深造，所以有一些深度的专业课程内容放到了研究生阶段进行深入学习，实现本研贯通培养。

3.4 能源互联网专业实践体系

清华大学将能源互联网专业所需的本科教学实践过程与清华大学能源互联网创新研究院、清华四川能源互联网研究院的发展紧密结合，组织两院科研团队精心设计实践课题，既帮助解决了团队的实际问题，又给同学们提供了宝贵的实践机会。以大三暑期的生产实践环节为例，两院的研究团队设计提供了包括“能源芯片可靠性研究”、“智慧能源管理与优化”、“能源微网仿真平台设计与应用”、“能源与电力的交易体系”与“能源战略与低碳发展研究”等一系列面向能源互联网行业前沿、结合课程基础内容、体现能源与信息深度融合的实践课题。

4 结语

电气工程学科的发展历程以及现状表明，基于电气工程学科进行能源互联网领域的人才培养是

具有原生优势的；但这并不意味着电气工程学科现有的人才培养体系就能完全满足能源互联网领域的人才培养需求，需要跳出其原有的框架，通过学科交叉，建立全新的人才培养体系和培养模式。笔者认为电气工程学科现有的课程体系存在“能源学科的机理认识缺失”以及“能源与信息交叉融合不足”两个主要短板，指出了能源互联网专业教学体系建设的主要方向。基于清华大学电机系在能源互联网领域进行的人才培养探索与实践，提出了能源互联网专业的人才培养目标，特别是确立了“能源”与“信息”两条课程主线，通过校内不同院系间的交叉协作与组合优化，形成了完整的课程体系以及实践方案，具有一定的推广意义与价值。未来我们将以此为依据，逐步实现能源互联网专业人才的招生与培养，并与产业界密切合作，推动产学研协同育人，除了满足产业需求，更要引领产业健康发展。希望本文为我国在能源互联网领域的人才培养乃至未来依托这些人才引领我国能源互联网产业健康快速发展提供一个有价值的参考。

参考文献

- [1] International Renewable Energy Agency. Global energy transformation: a roadmap to 2050[R]. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [3] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [4] 国家发展和改革委员会. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, (2016-02-29)[2020-03-27]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
National Development and Reform Commission. Guiding opinions on promoting the development of internet + smart energy[EB/OL]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of

- China, (2016-02-29)[2020-03-27]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm(in Chinese).
- [5] 清华大学深圳国际研究生院. 走进清华深研院人才培养(19)| 学科交叉助力新能源人才培养[EB/OL]. 深圳: 清华大学深圳国际研究生院, (2018-11-29)[2020-03-27]. https://mp.weixin.qq.com/s/7k5ezCFM_QZEECITvFW8zQ. Tsinghua Shenzhen International Graduate School . Entering Tsinghua Graduate School of talent training(19) | cross-disciplinary support for new energy talent training [EB/OL]. Shenzhen: Tsinghua Shenzhen International Graduate School , (2018-11-29)[2020-03-27] . https://mp.weixin.qq.com/s/7k5ezCFM_QZEECITvFW8zQ (in Chinese).
- [6] 周泽存, 徐德淦. 试办电气类宽口径专业的几点认识[J]. 高等工程教育研究, 1984(1): 49-51. Zhou Zecun, Xu Degan. Several understandings of the trial of electrical majors with wide caliber[J]. Higher Engineering Education Research , 1984(1): 49-51(in Chinese).
- [7] 江庚和. 如何看待“通才”教育与“专业”教育——从威斯康辛大学电气与计算机工程系的课程设置所想到的[J]. 高等教育研究, 1981(4): 67-74. Jiang Genghe. How to treat "generalist" education and "professional" education——thought from the curriculum of the department of electrical and computer engineering at the University of Wisconsin[J]. Higher Education Research, 1981(4): 67-74(in Chinese).
- [8] 潘再平. 传统电机专业的全方位改造[J]. 高等工程教育研究, 1999(1): 82-84. Pan Zaiping. All-round transformation of the traditional motor major[J]. Higher Engineering Education Research, 1999(1): 82-84(in Chinese).
- [9] 汤广福, 温家良, 贺之渊, 等. 大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 1-9. Tang Guangfu, Wen Jialiang, He Zhiyuan, et al. Equivalent testing approach and its application in power system for high power electronics equipments[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 1-9(in Chinese).
- [10] 李崇坚. 大功率交流电机变频调速技术的研究[J]. 电力电子, 2010, 8(1): 11-16. Li Chongjian. Research on the variable speed technology of large power AC motors[J]. Power Electronics, 2010, 8(1): 11-16(in Chinese).
- [11] 梅生伟, 黎雄, 卢强, 等. 基于反馈线性化方法的励磁系统非线性 H_∞ 控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 1-7. Mei Shengwei, Li Xiong, Lu Qiang, et al. Nonlinear H_∞ control for excitation systems via feedback linearization method[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1999, 11(4): 1-7(in Chinese).
- [12] 解利斌, 王锡凡. 输电网络扩展优化规划综述[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会. 南京: 河海大学, 2008: 203-209. Xie Libin, Wang Xifan. Overview of transmission network expansion and optimization planning[C]//Proceedings of the 22nd Academic Annual Meeting of China's Colleges and Universities Power System and Automation Major. Nanjing: Hohai University, 2008: 203-209(in Chinese).
- [13] 陈聪, 沈欣炜, 夏天, 等. 计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 60-68, 121. Chen Cong, Shen Xinwei, Xia Tian, et al. Multi-objective optimal dispatch method for integrated energy system considering exergy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 60-68, 121(in Chinese).
- [14] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154. Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [15] 薛禹胜, 徐伟, Dong Zhaoyang, 等. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 1-5, 16. Xue Yusheng, Xu Wei, Dong Zhaoyang, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5, 16(in Chinese).
- [16] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. 继电器, 1998, 26(5): 1-4. Dong Xinzhou, He Jiali, Ge Yaozhong. Application of wavelet transform in detection of fault travelling waves[J]. Relay, 1998, 26(5): 1-4(in Chinese).
- [17] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. 采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710. Ding Dengwei, Gao Wensheng, Liu Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710(in Chinese).
- [18] 孙宏斌, 孙元章, 陈永亭, 等. 电力系统本科专业课的

- 研究型教学模式[J]. 中国高教研究, 2006(3): 90-91.
- Sun Hongbin, Sun Yuanzhang, Chen Yongting, et al. A research-based teaching model of undergraduate professional courses in power systems[J]. Chinese Higher Education Research, 2006(3): 90-91(in Chinese).
- [19] Yu Xinghuo, Xue Yusheng. Smart grids: a cyber-physical systems perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1058-1070.
- [20] 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 面向能源互联网的电气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 400-408.
- Dong Jinni, Sun Hongbin, Guo Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 400-408(in Chinese).
- [21] Li Jiarong, Lin Jin, Zhang Hongcai, et al. Optimal investment of electrolyzers and seasonal storages in hydrogen supply chains incorporated with renewable electric networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, doi: 10.1109/TSTE.2019.2940604.
- [22] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-95.
- Xu Yujie, Chen Haisheng, Liu Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95(in Chinese).
- [23] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
- Song Yonghua, Yang Yuexi, Hu Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7(in Chinese).
- [24] 牟树君, 林今, 邢学韬, 等. 高温固体氧化物电解水制氢储能技术及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3385-3391.
- Mu Shujun, Lin Jin, Xing Xuetao, et al. Technology and application prospect of high-temperature solid oxide electrolysis cell[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3385-3391(in Chinese).
- [25] 夏清, 白杨, 钟海旺, 等. 中国推广大用户直购电交易的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 1-7.
- Xia Qing, Bai Yang, Zhong Haiwang, et al. Institutional design and suggestions for promotion of direct electricity purchase by large consumers in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 1-7(in Chinese).
- [26] 孙宏斌. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Sun Hongbin. Energy internet[M]. Beijing: Science Press, 2020(in Chinese).



朱桂萍

在线出版日期: 2020-05-25。

收稿日期: 2020-03-31。

作者简介:

朱桂萍(1973), 女, 博士, 教授, 电机系副系主任, 教学委员会主席, 研究方向为电能质量及其控制技术, 长期从事“电路原理”课程教学工作, gpzhu@tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 林今(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为氢能系统及电力系统控制技术, 从事“能量转换原理与技术”“自动控制原理”课程教学工作, linjin@tsinghua.edu.cn;

孙宏斌(1969), 男, 博士, 教授, 电机系学术委员会主席, 研究方向为电力系统调度与控制、智能电网, 长期从事“电力系统分析”课程教学工作, shb@tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 博士, 教授, 电机系系主任, 研究方向为电力系统规划、电力系统优化运行, 长期从事“电力系统预测技术”课程教学工作, cqkang@tsinghua.edu.cn;

于歆杰(1973), 男, 博士, 教授, 电机系党委书记, 研究方向为磁电材料、脉冲功率电源, 长期从事“电路原理”课程教学工作, yuxj@tsinghua.edu.cn;

曾嵘(1971), 男, 博士, 教授, 清华大学副教务长, 教务处处长, 研究方向为交直流电力系统电磁暂态及其防护、直流电网关键装备与电力电子器件, zengrong@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 乔宝榆)