

**(3) 项目开展情况 (含项目研究内容、研究方案及技术路线, 研究团队分工、本人承担任务及完成情况, 存在问题与改进建议等, 不少于 500 字。)**

1、研究内容: 突破大储能量高强钢及复合材料转子设计及制造、大容量高速永磁电动发电机低损耗设计、高效率大容量变流器及其充放电控制、高可靠大承载磁轴承及其控制、飞轮储能磁-电-热-机多系统集成、飞轮储能阵列协调控制、飞轮储能阵列参与电网高频次一次调频控制等关键技术。

研制 1MW 高速飞轮储能单机和 3MW 阵列样机, 完成飞轮储能阵列并网运行示范应用。

取得具有完全自主知识产权的创新成果, 整体技术达到国际先进水平, 其中真空中大功率高速电动发电机、飞轮储能高频次充放电控制达到国际领先水平。

2、研究技术路线

联合国内技术优势单位, 分解任务, 研究飞轮储能涉及的力学、电磁学、热学、电力系统和控制等多学科交叉的理论问题; 开展飞轮、电动发电机、变流器、磁轴承及其控制器部件设计、加工、制作和测试工作, 验证设计理论和方法; 完成飞轮储能单机研制及其阵列系统集成, 并进行并网运行示范应用。

3、团队分工:

成立项目办公室, 项目办公室分工如下, 项目负责人: 谢波; 项目办公室主任: 于鸿雁、副主任: 谢迎春; 财务负责人: 黄永军; 进度管理: 魏晓钢; 安全管理: 岳春辉; 质量管理: 于鸿雁; 费用管理: 蒋执俊; 课题任务管理: 戴兴建、吴振奎、李光军、姚良忠、姜新建、闫素英、王伟强; 文档管理: 李玲。

成立项目总体组, 项目总体组组长: 谢波; 项目组成员: 李光军、戴兴建、姜新建、姚良忠、彭树文、于鸿雁、谢迎春; 秘书: 蒋执俊。

本人负责项目的费用管理及总体组秘书工作, 完成了项目预算的编制及申报, 目前内蒙古自治区专项经费 1974 万元的专项经费已申报到账, 并对第一笔专项经费的拨付进行了分配。

## 一、专业实践训练整体情况

实践单位名称	中核坤华能源发展有限公司	
实践单位地点	浙江省杭州市余杭区古墩路 1359-3 号 1 幢 1608 室	
实践岗位名称	技术管理	
专业实践训练时间	集中进行	2021 年 09 月 01 日开始 至 2022 年 03 月 31 日结束
		专业实践训练累计 211 天（单位考核前），其中项目研究天数 180 天（单位考核前）
<p><b>(1) 基本概况（含实践单位简介、实习实践内容等）</b></p> <p>中核坤华能源发展有限公司是中核汇能下属公司，是中核集团地热产业投资开发平台，是中核汇能共性业务服务的专业化平台。从事地热供能、发电市场开发的同时，致力于新能源新技术应用创新和共享业务平台建设。实践内容为科研项目的申报及执行，先进技术的跟踪分析，技术标准的编写制定，科研报告的编制等。</p>		
<p><b>(2) 项目研究概述（含项目名称、项目来源、项目经费、主要研究目标和技术难点等）</b></p> <p>项目名称为：MW 级先进飞轮储能关键技术研究；项目来源：实践单位；项目经费：3996 万元；项目目标：突破飞轮储能关键技术，研制 3MW 阵列应用样机，完成并网运行示范应用。技术难点：MW 级飞轮本体及电机的设计及制造、高效率大容量变流器及其充放电控制、飞轮储能子系统集成、飞轮储能阵列协调控制、飞轮储能阵列参与电网高频次一次调频控制等关键技术。</p>		

## 二、专业实践训练收获

### (一) 围绕考核评价指标体系，举例说明以下收获（不少于 800 字）

知识掌握和能力提升方面：

在以往的工作和学习经历中，没有接触过飞轮储能这一领域，通过此次实践，系统的学习了飞轮储能的专业知识，了解了飞轮储能目前的技术发展，对飞轮储能未来的发展前景也有了较为深刻的了解，为今后在工作中开展飞轮储能的应用积累了经验，个人也具备了在工作中承担飞轮储能技术研究及工程应用等相关工作的能力。

飞轮是人类最早的发明之一，除了被人们所熟知的陀螺玩具，在纺车、蒸汽机等飞轮也有应用。飞轮储能是通过飞轮绕刚性轴的机械旋转来实现能量的存储，在获得能量时飞轮加速、释放能量时飞轮减速。应用在电力系统的现代飞轮储能技术一般是指通过电力电子控制系统实现飞轮的机械动能与电能的双向转化，其特点是飞轮与电机同轴旋转，由控制装置通过控制飞轮的旋转速度实现能量的储存和释放。

飞轮储能是多学科交叉综合技术，包含了磁悬浮支撑技术、高速高效电机驱动控制技术、高性能材料、真空技术、转子动力学设计等。自上世纪中叶开始，现代飞轮储能技术至今已有超过 70 年的研究、开发和应用的历史。飞轮储能技术发展以提高能量密度、效率以及降低成本为目标。近年来轴承技术特别是磁悬浮轴承等轴承技术的发展、复合材料性能的不不断提升、电力电子关键技术的不断突破，推动了飞轮储能技术的快速发展。

飞轮储能系统主要包括飞轮转子、电机（电动/发电机）、轴承、真空室、转换装置等五个部分。飞轮转子是飞轮储能系统中能量存储的载体，是飞轮储能的关键核心部件，在储能过程中飞轮绕刚性轴旋转实现能量的存储。飞轮转子的质量、转速和几何形状直接影响飞轮储能系统能量密度和功率密度。目前飞轮转子的材料主要有高强度材料和复合纤维材料两个发展方向。

飞轮储能系统的电机是一种双向电机装置，同时具备电动机和发电机的功能。在系统的充电和放电过程中，飞轮转子的速度在不断变化，同样电机的转速也在上下波动。因此，飞轮储能要求电机具备强转速适应力、高极限转速、低损耗率、高效率等特点，目前主流应用的电机是永磁电机。

轴承是飞轮储能系统的支撑装置，轴承选用直接影响着飞轮旋转过程中的损耗。在早期的飞轮储能系统中多采用机械轴承，不仅摩擦力大、能量损耗高，而且寿命较短。在目前的飞轮系统中多采用磁悬浮轴承，不仅大大降低了能量损耗，轴承的寿命也得到了大幅的提高。

真空室是飞轮的旋转空间。飞轮储能的能量损耗不仅有轴承摩擦的损耗，还包括飞轮旋转过程中的风阻损耗。因此利用真空系统将飞轮旋转空间抽成真空，既能降低风阻损耗，还能提高飞轮的安全性，延长飞轮的使用寿命。

转化装置主要是通过电力电子技术辅助电机进行飞轮的机械动能和电能的相互转化。当系统储能时，转化装置将外部电能通过 AC/DC 的方式向电机供电，驱动飞轮旋转速

度提升；当系统释放能量时，飞轮速度下降，转化装置通过 DC/AC 方式整流向外部输送电能，同时还实现调频、稳压的功能，从而实现高质量供电。

在储能的过程中，飞轮绕着轴旋转，飞轮储存的能量 E 计算公式如下：

$$E=1/2 J\omega^2=1/2 mr^2 \omega^2=1/2 mv^2$$

飞轮储能系统的工作状态分为三个阶段，第一个阶段是能量输入状态即充电状态，第二个阶段是能量保持状态即储能状态，第三个阶段是能量输出状态即放电状态。

(1) 充电状态：在这个阶段电能转化为飞轮旋转所需要的机械动能，电机的工作状态为电动机。外部电源为储能系统输送电能，转换装置对充电电流进行调节，通过 AC/DC 转化，驱动电动机转速提升，从而带动飞轮转速不断提升，直至达到设定转速。

(2) 储能状态：飞轮转子以一定的转速高速旋转，实现能量的稳定存储，飞轮的机械损耗保持在最低水平，由系统中的相关电力电子设备提供少量的电能来维持系统的能量消耗。

(3) 放电状态：在这个阶段电机的工作状态为发电机，飞轮转速逐渐下降，转动动能转化为电能，向外部输送。通过电力电子转换装置，确保输出的电能质量符合电网的要求。

因此，飞轮储能系统通过这三种阶段的协调、连续运行，从而完成了电能的稳定、高效存储。

能力提升和素质养成方面

此次专业实践参与的科研项目有十家参与单位，我作为总体组秘书及项目经费管理负责接口很多，需要协调的事项也很多。作为内蒙古自治区的重大科研专项，该项目也备受自治区的重视，在实践过程中锻炼了自己的协调和沟通能力。通过此次专业实践，为今后在工作中开展飞轮储能的应用积累了经验，个人也具备了在工作中承担飞轮储能技术研究及工程应用等相关工作的能力。

## (二) 取得成效

1. 通过技术应用创新、成果转化、解决企业工程实际问题等取得的经济和社会效益

目前飞轮储能技术还处在发展阶段，市场占有率不到 1%，但随着未来飞轮储能技术的日趋成熟以及成本的下降，可发挥的作用和带来的经济效益将更加的突出，本项目预期经济效益如下：

(1) 促使同类进口产品和相关技术设备大规模降价，按目前飞轮储能市场规模估计，每年约能节约数亿人民币；

(2) 飞轮储能阵列并联技术在电网中的应用，可以提高电网的安全性和供电质量，预计全寿命周期内飞轮储能阵列在电网供电质量上产生的经济效益每年可达数亿元人民币；

(3) 飞轮储能系统全寿命周期内可完成数十万次充放电循环，占地面积仅为传统电池储能系统的 50%，系统内无任何有毒、有害化学原料，绿色环保。

内蒙古自治区作为中国新能源装机第一大省，在国家对新能源强制性市场准入标准发布后，也就成为了新能源一次调频需求的第一大省，飞轮储能的市场空间巨大。

飞轮储能包含了磁悬浮支撑技术、高速高效电机驱动控制技术、高性能材料、真空技术、转子动力学设计等，是一种多学科交叉综合技术，代表了一个国家技术装备的最高水平。在内蒙古自治区科技厅的领导下，飞轮储能产业借助新能源一次调频市场落地内蒙，是落实“科技兴蒙”战略的实质性行动。

按照全国 2019 年底新能源装机容量 4 亿千瓦，配备 3% 装机容量的飞轮储能，产业化以后每瓦造价 2.5 元计算，全国市场规模将达到 300 亿元，十四五末新能源装机将达到 8 亿千瓦，飞轮储能的市场规模将达到 600 亿元。如果 2023 年本项目研制的飞轮产品能够实现定型并投入生产的话，仅内蒙地区的飞轮市场需求就达到 48 亿元，完全能够满足一个飞轮企业实现规模化生产的要求。

飞轮产业的形成可以拉动内蒙地区现有的特种钢行业、稀土永磁电机制造等行业发展，带动教育、科研院所的发展，同时电能质量的提高可以吸引大数据中心、芯片、多晶硅、蓝宝石、LED、OLED 显示屏等高科技产业落户，引进科技人员入蒙就业，提高内蒙整体人口素质和科研水平。

通过飞轮储能的产业化发展，使飞轮储能的成本逐步下降，既降低了新能源一次调频成本，又提高了电网消纳新能源的能力，等于间接地促进了新能源行业的发展，这对内蒙古自治区完成即将出台的“可再生能源配额制”规定的可再生能源电力配额要求意义重大。

飞轮储能产品的原材料主要为钢和电力电子产品，退役后对环境的影响较小。在新能源一次调频应用中，可以取代七倍容量的电化学储能电池的使用，免除了电化学储能退役后处理造成的不可估量的环境成本，避免了电化学储能运行之中的火灾风险。

## 2. 与学位论文撰写的相关程度

学位论文来源于本项目研究过程中示范工程的设计及建设部分，实践内容与学位论文密切相关。

## 3. 在校期间主要研究成果【含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等】

成果名称	类别[含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	学校排名/总参与单位数
------	--	---------------	----------------	----------	-------------

### 本人承诺

在专业实践训练及考核报告撰写过程中，如实提供材料，严守


学术道德、遵循学术规范。

签字： 蒋执俊

2022年6月6日

### 三、考核评价

<p>校外合作 导师(或现 场导师)  评价</p>	<p>重点对研究生项目研究开展情况、职业素养、行业知识掌握、环境和岗位适应能力、工程实践能力、团队协作能力，以及通过技术创新、成果转化、解决工程实际问题等取得的经济和社会效益等方面的评价：</p> <p>蒋凯俊同学参与的MW级飞轮储能关键技术研究项目已完成前期研究、设计及样机试制，目前已进入试验设备加工及现场施工阶段，项目进展顺利。自参加实践岗位以来，该同学深入学习了飞轮储能所需的专业知识，能够快速应用到研究工作中。在实践过程中，该同学具有较强烈的创新能力和科技成果转化意识，适应能力较强，团队协作沟通能力突出，能很好地完成实践岗位工作，为项目顺利开展做出了重要贡献。</p> <p>校外合作导师（或现场导师）签字：谢红岩 2022年6月6日</p>
<p>校内导师  评价</p>	<p>重点对研究生科学素质、基础及专业知识掌握、技术应用创新能力、取得的研究成果、项目研究与学位论文撰写的相关程度等方面的评价：</p> <p>该同学在实践过程中系统的学习了飞轮储能相关的专业知识，对飞轮储能系统所涉及的动力、机电、控制、传热等相关专业知识有了更深入的了解，对专业知识的实际应用能力有了进一步的提高。该同学的学位论文主要是探讨研究解决飞轮储能参与新能源电厂一体调频示范工程应用过程中的设计及应用问题，该项目的研究与该同学学位论文撰写密切相关。</p> <p>校内导师签字：林明贵 2022年6月6日</p>

<p>实践单位 过程考核 意见</p>	<p>实际实践开始时间:2021年 9 月 1 日    实际实践结束时间: 2022年 3 月 31日</p> <p>专业实践训练累计天数: 211    其中项目研究天数: 180</p> <p>实践单位过程考核结果: <input checked="" type="checkbox"/>优秀    <input type="checkbox"/>良好    <input type="checkbox"/>合格    <input type="checkbox"/>不合格</p> <p>审核签字并盖公章:  2022年 6 月 6 日</p>
<p>最终考核 结果审核 备案</p>	<p>考核总成绩 (由现场答辩考核成绩 90%+单位过程考核成绩 10%组成):</p> <p>是否重修: <input type="checkbox"/>是    <input type="checkbox"/>否</p> <p>教学管理部 (或相关分院) 审核签字 (公章): _____ 年 月 日</p>



#### 四、相关支撑材料

在校期间主要研究成果【含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等】证明材料原件扫描件，具体提交要求如下：

1. 产品与样机扫描件包含企业证明材料（含产品与样机功能及创新性介绍、社会经济效益、个人贡献说明及相关照片等）。

2. 授权专利扫描件包含专利证书授权页；未授权专利扫描件包含专利受理书扫描件和专利请求书扫描件。

3. 著作扫描件包含封面、封底和版权页。

4. 软件著作权扫描件包含著作权证书和登记申请表。

5. 论文扫描件包含封面、封底、目录和论文全文（含收录证明）。

6. 标准扫描件包含封面、版权页、发布公告、前言和目次。

7. 获奖扫描件包含显示单位和个人排名的获奖证书。

8. 成果转化扫描件包含企业证明材料（含成果技术说明、社会经济效益、个人贡献说明及相关照片等）。