



# 飞轮储能系统的项目式工程 实践教学模式研究

杜平, 赵萌, 曾武, 李睿, 李双寿\*

(清华大学基础工业训练中心, 北京 100084)

**摘要:** 为应对不同专业对于培养学生工程实践能力的需求, 传统工程实践类课程亟需改革, 寻求体现学生专业特色、融合产品设计与制造的新型教学方案。面向电机专业学生的金工实习, 选择与专业紧密联系的飞轮储能系统作为教学载体, 将设计建模、加工制造、组装调试等环节融入教学过程, 并采用项目式学习方法, 引导学生参与整个项目的设计、实施和评价。通过课程的学习, 学生不仅掌握了飞轮储能技术相关知识, 工程实践能力、创新能力和团队合作能力也得到有效提升。该教学模式的实施过程、教学方法以及取得的成效, 为其他高校工程实践教学模式改革提供了有益的思路和参考。

**关键词:** 飞轮储能; 工程实践; 专业定制; 项目式学习

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240460

## A Project-Based Engineering Practice Teaching Model: A Case Study of a Flywheel Energy Storage System

DU Ping, ZHAO Meng, ZENG Wu, LI Rui, LI Shuangshou\*

(Fundamental Industry Training Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** To meet the demand from various academic majors to cultivate students' practical engineering skills, traditional engineering practice courses are in urgent need of reform. This involves exploring new teaching approaches that reflect students' professional characteristics and integrate product design with manufacturing. In the "Manufacturing Practice" course for electrical engineering students, a flywheel energy storage system—a topic highly relevant to their major—was selected as the teaching platform for the first time. This course integrates key stages such as design and modeling, machining, assembly, and debugging into its curriculum. Furthermore, it employs project-based learning approaches, engaging students in the entire project lifecycle, from design and implementation to final evaluation. Through this course, students not only acquire knowledge of flywheel energy storage technology but also enhance their engineering practice, innovation, and teamwork abilities. The implementation process, teaching methods, and outcomes of this model offer valuable insights and a practical reference for other universities seeking to reform their own engineering practice education.

**Key words:** flywheel energy storage; engineering practice; discipline-specific; project-based learning

随着工程教育理念的不断发展, 项目式学习 (project-based learning, PBL) 逐渐兴起, 并成为培养学生工程实践能力的重要途径。然而, 作为为大多数工科专业学生传授机械制造基础知识和基本技能的金工实习课程, 传统的教学内容由焊

接、铸造、车工、铣工、钳工等几个独立的工种组成, 缺乏连贯性, 难以激发学生的学习兴趣, 也无法满足不同专业对工程实践能力培养的个性化需求<sup>[1-4]</sup>。因此, 对金工实习课程进行改革, 探索体现专业特色、融合产品设计与制造的新型教

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 清华大学本科教学改革项目(53412280123)。

作者简介: 杜平, 博士, 讲师, 主要从事智能制造、3D 打印、机器人领域的研究与教学工作。E-mail: duping@tsinghua.edu.cn

\* 通信作者: 李双寿, 博士, 教授, 主要从事先进材料精确成形技术、工程实践与创新教育等研究和教学工作。E-mail: lss@tsinghua.edu.cn

学模式,已成为工程教育领域的重要课题<sup>[5-9]</sup>。

飞轮储能系统作为一种先进的物理储能技术,集成了机械、电子、材料等多学科知识,是机电一体化产品的典型代表。其核心部件均为金属零件,适合采用金工实习中的多种工种进行加工制造,同时其电能存储和释放过程与电机专业背景紧密结合。因此,将飞轮储能系统融入电机专业的工程实践教学,能够有效提升学生的学习兴趣 and 主动性,并帮助学生全面掌握机电一体化产品的设计与制造过程。

课程以飞轮储能系统为教学载体,构建了基于项目式学习的工程实践教学新模式。该模式将实习过程中涉及的各种工种有机融合,实现了飞轮储能系统从设计建模到加工制造,再到最终组装与调试的全过程,如图1所示。项目从2022年起为电机专业开设了3个班次共100名学生,有效调动了学生的学习热情和主动性,学生不仅掌握了飞轮储能技术相关知识,工程实践能力、创新能力和团队合作能力也得到了有效提升,教学效果显著。

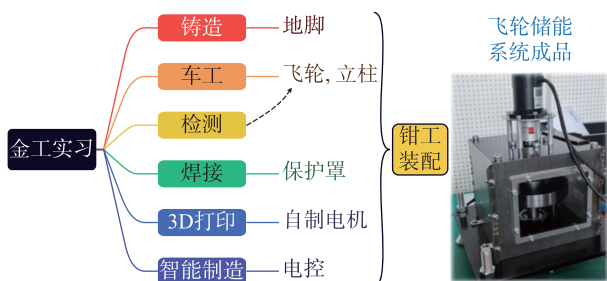


图1 飞轮储能系统教学项目

### 1 飞轮储能系统设计

飞轮储能系统是一种先进的物理储能技术,它通过电机驱动飞轮高速旋转,将电能转换为机械能进行存储。当需要电能时,高速旋转的飞轮通过功率变换器输出电流与电压,再次将机械能转换为电能输出,如图2所示。飞轮储能系统具有充放电速度快、输出功率大、使用寿命长、能量转换效率高、环境适应性好和易于检修维护等特点,是一种非常有前景的环保储能技术。飞轮储能系技术在众多领域已有广泛的应用,如轨道交通节能、电网调峰调频、不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)以及大功率脉冲领域<sup>[10-13]</sup>。

本项目针对教学需求和特点,对飞轮储能系统进行了重新设计,主要分为机械结构和控制模块两部分。

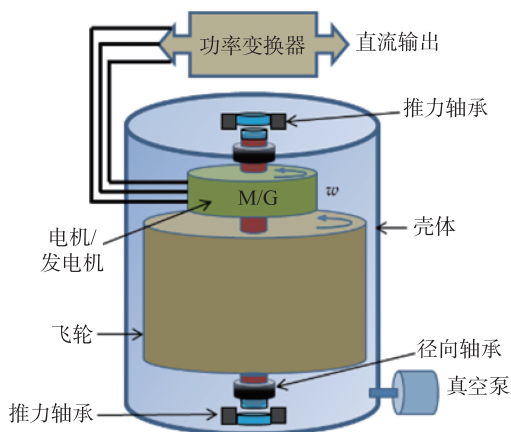
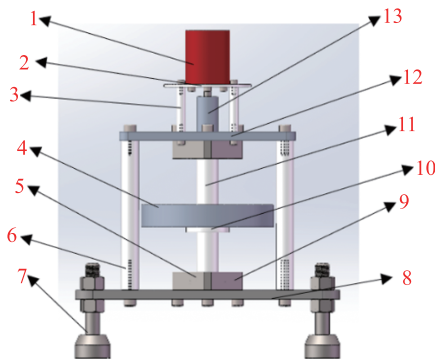


图2 飞轮储能系统示意图

#### 1.1 机械结构设计

飞轮储能系统的总体机械结构如图3所示,主要包括电机、飞轮、轴承、连接、支撑等组件,整体尺寸为300 mm×300 mm×360 mm<sup>[14]</sup>。



1-电机 2-电机盖板 3-小立柱 4-飞轮 5-轴承 6-大立柱  
7-地脚 8-底板 9-轴承座 10-胀套 11-主轴  
12-盖板 13-联轴器

图3 飞轮储能系统总体结构图

#### 1) 电机

电机是系统中的重要组件,负责带动飞轮将电能转化为机械能存储。电机的选型需要综合考虑多个因素。由于飞轮转子质量较大,对扭矩需求较大,需选择大功率的电机;飞轮转子运行时转速较高,需要摩擦损耗小,运行效率高,可选择无刷电机;高速运转的飞轮有一定安全隐患,需要较为稳定可靠的控制,选择有传感器的高精度电机。

综上所述,本系统选取了时代超群的直流无刷电机 57BL75S10-225,额定电压 24 V,额定功率

100 W，额定扭矩 0.38 N·m，额定转速 2 500 r/min。

### 2) 飞轮

飞轮转子是系统中的核心组件，通过高速旋转存储机械能。转子的材料需要选择强度较高的类型，以抵抗旋转产生的离心力；同时需要较大的密度和合适的尺寸以获得更大的转动惯量，从而提高储能容量。综合考虑后最终确定的飞轮材质为 45#钢，外径 150 mm，内径 50 mm，厚 25 mm，重 3.47 kg，在 2 000 r/min 转速下的储能容量为 0.06 Wh。

### 3) 轴承

轴承是飞轮装置的支撑系统，在飞轮高速旋转过程中产生的摩擦损耗大小与轴承关系紧密，会影响整个系统的运行效率<sup>[15]</sup>。综合考虑成本和实验条件，本实验装置选择了结构紧凑、成本低廉的，型号为 6204 深沟球轴承，能同时承受径向和轴向载荷。为进一步降低摩擦损耗，轴承材料从钢换成了氧化锆全陶瓷轴承，具有摩擦系数小、耐磨性能好、无油自润滑、使用寿命长等优点。

### 4) 连接组件

实验装置中的主要旋转组件飞轮转子和主轴是单独制造，两者通过两个 Z3-25 胀紧套实现连接。胀紧套是广泛用于重型载荷下机械连接的一种基础部件，它通过高强度拉力螺栓在内环与轴

之间、外环与轮之间产生抱紧力。当承受负荷时，靠胀套与机件、轴的结合压力及相伴产生的摩擦力传递转矩。它具有对中精度高、安装调整方便、强度高、连接稳定可靠等优点。

电机轴与主轴则是通过联轴器连接。联轴器外径 30 mm，长 42 mm，孔径 8 mm 转 16 mm。主体材质为 7075 铝合金，中间由弹性体连接，可有效吸收振动、补偿径向、角向和轴偏差。

### 5) 支撑组件

飞轮重量较大，转速较高，为保证运行的平稳和安全，转动时要求高同心度，保证主轴轴心跳动少于 0.1 mm。因此装置的旋转部分由底板、盖板以及 4 根立柱提供支撑，并通过盖板上的沉孔保证垂直度与位置精度要求。

电机与主轴之间由于通过联轴器连接，同心度要求可以稍微降低，轴心偏差须小于 0.2 mm。与飞轮旋转部分类似，电机也由电机盖板和 4 根立柱提供支撑，并通过盖板上的沉孔保证立柱的垂直度和定位精度。

## 1.2 控制模块设计

飞轮控制模块主要包括电机控制和发电 2 个部分，整体结构如图 4 所示。电机控制部分与发电部分共用一个电机，通过 1 个单级开关和继电器实现 2 个功能的切换。

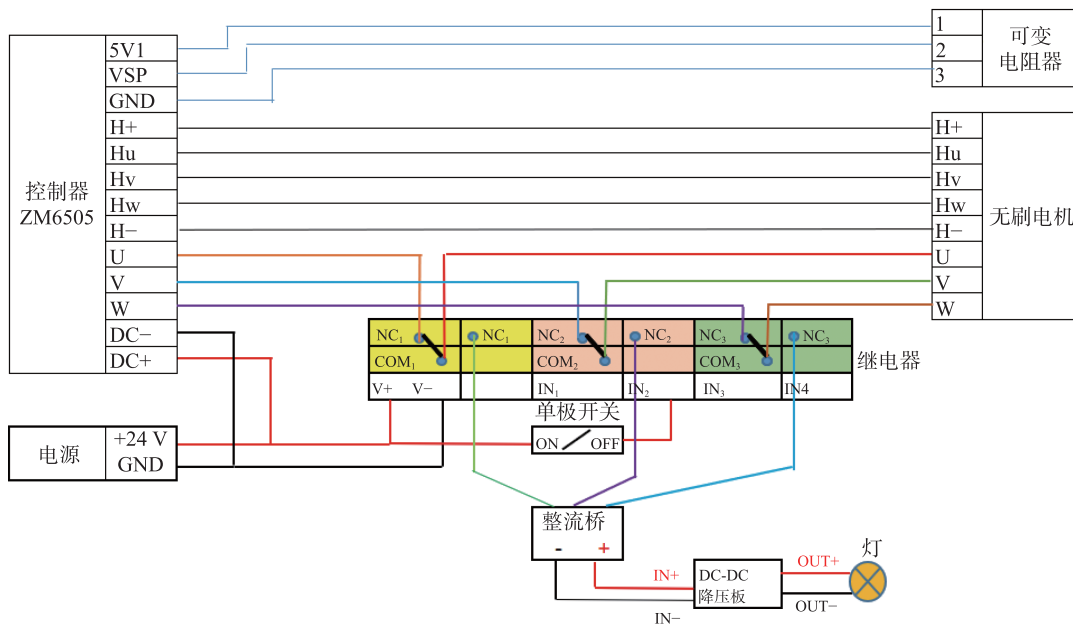


图 4 飞轮控制系统示意图

### 1) 初始状态

单级开关处于 OFF 位置，电机驱动器触点与

继电器常闭触点 NC<sub>1</sub>、NC<sub>2</sub>、NC<sub>3</sub> 连接，而 NC<sub>1</sub>、NC<sub>2</sub>、NC<sub>3</sub> 又与公共点 COM 导通。全波整流桥与

NO<sub>1</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>连接。

## 2) 电机驱动模式

控制器的U、V、W 3个端口,通过继电器公共点COM与无刷直流电机的U、V、W 3个端口导通并驱动无刷电机旋转。电机的转速通过外接可变电阻器调节控制器的调速电压(voltage speed profiling, VSP)实现调速,同时带动飞轮转动,产生机械能储存在飞轮中。

## 3) 发电模式

单机开关拨到ON位置,继电器使能端IN<sub>1</sub>-IN<sub>4</sub>为高电平,常开触点NO<sub>1</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>与公共

点COM导通,切断电机供电。电机通过U、V、W 3个端口的感应电压输入整流桥,整流桥最大输出约19V直流电压,经过直流降压板调节为5V电压,启动LED灯负载。

## 2 教学方案设计

团队前期通过样机试制和充分的教学方案讨论,最终实现在有限的课时内(暑期2周集中实习),让学生完整体验飞轮储能系统从设计到加工制造,最后组装调试的全流程,如图5所示。

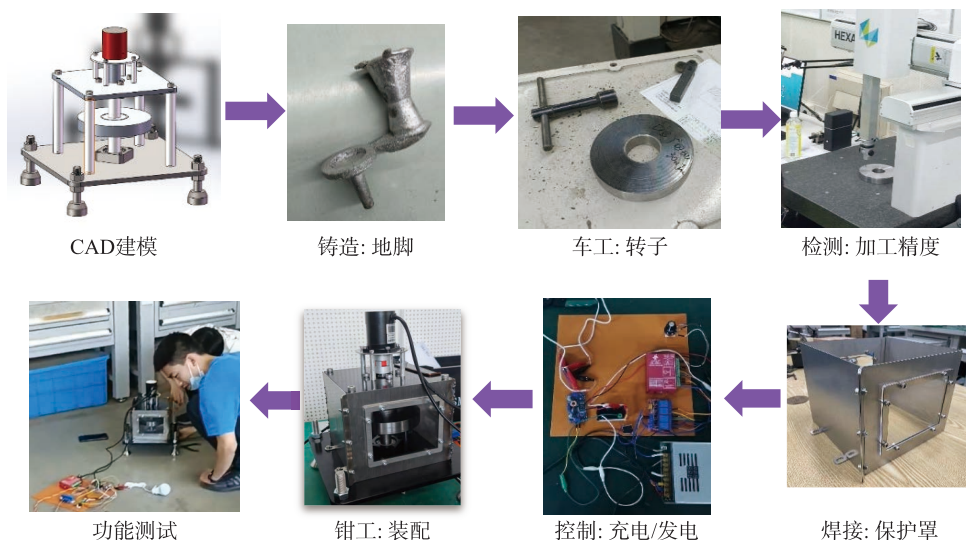


图5 飞轮储能系统制造流程图

## 1) 设计部分

主要包括机械结构设计、电动机选型、飞轮材料、轴承类型等。为帮助学生更好地理解现代产品中数字化设计的重要性,本项目特别在课程初期增加机械设计的课时,使用Solidworks软件将飞轮储能的所有零部件在电脑上制作出数字模型,并装配成为完整的系统模拟运行过程。虽然电机专业同学已经上过工程制图课,但这次是首次应用于一个完整的产品,并增加公差与配合、标准零件库等功能,学生的建模能力得到很大提升。

## 2) 加工制造

这是课时比重最大的教学环节,首先铸造制作飞轮系统的底座地脚;在车工单元加工系统的核心部件飞轮转子,之后利用三坐标测量仪检查转子加工精度;在焊接单元使用激光切割对电机盖板和飞轮保护罩下料,再用焊接组装;在智能

制造单元完成电动机/发动机及相应的控制电路制作。

## 3) 装配调试

所有部件加工完毕,最后在钳工完成整体组装和调试,并通过计算点亮LED灯时长的方式检测系统的运行效率。

## 3 教学效果

本项目从2022年暑期开始实行,目前已经开设3个班次,共有100名学生选修。从课后的问卷反馈来看,学生对课程的满意度近87%,如图6所示。通过团队精心的教学设计,利用与电机专业紧密相关的飞轮储能系统作为教学载体,充分调动了学生的学习兴趣 and 主观能动性,课堂气氛热烈,教学效果优良,学生实习现场如图7所示。

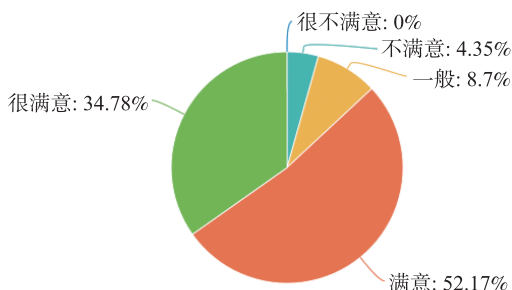


图 6 学生对课程的满意度调查结果



图 7 学生实习现场

飞轮储能项目的具体实施过程中具有如下 4 点鲜明的教学特色。

#### 1) 基于项目制的学习

飞轮储能系统是一个综合性工程，它由十几个不同的组件构成，并且需要经历设计建模、生产加工和装配调试等一系列环节。通过参与这样的课程实践，学生不仅能够直观地理解现代复杂产品从设计到应用的全过程，还能够有效提升学生的工程思维、创新思维和职业素养，培养学生的综合能力和解决实际问题的能力。

#### 2) 跨学科融合学习

飞轮储能系统是一个典型的机械和电子结合的产品，涉及机械工程、电子工程、材料科学等多个学科，该项目促进了跨学科的合作和交流，丰富了教学内容和方法，能够培养学生的跨学科思维能力，锻炼在未来的科研或职业生涯中对复杂系统进行有效分解和细化的能力。

#### 3) 团队协作式学习

本项目因其覆盖的知识面和所需工作量远超常规实习课程，学生需通过组建团队的方式来共同完成项目任务。每个团队由 3 名学生组成，共同制定详细的工作计划并明确各自的职责分工，以此促进团队合作精神和沟通技巧的提升。为确

保项目的顺利进行并提升学生的工程素养，课程中安排了包括开题报告、中期汇报和期末答辩在内的多个关键评估环节，以监督和指导项目的各个阶段。

#### 4) 充分的师生互动

将飞轮储能系统作为一个完整的机电产品引入教学过程，指导教师需强化不同工种间的协同合作。在教学活动中，教师深入与学生互动，及时掌握学生的学习进展，收集学生的反馈意见，以促进教学方法的持续优化和更新，实现师生共同成长的教学目标。

## 4 结束语

飞轮储能系统项目作为教学改革的一次成功探索，不仅为学生提供了宝贵的实践机会，也为工程实践教学改革提供了新的思路和方向。

1) 项目式学习的优势。该项目以飞轮储能系统为载体，将机械设计、加工制造、电子控制等多个环节有机融合，实现了项目式学习的目标。学生在完成项目的过程中，不仅掌握了专业知识，还锻炼了团队协作、问题解决和创新能力，实现了从理论学习到实践应用的跨越。

2) 专业定制的意义。该项目针对电机专业学生的特点，将飞轮储能技术与电机专业知识相结合，实现了专业定制的目标。这种教学模式能够更好地满足不同专业学生的需求，提高学生的学习兴趣和积极性，培养符合社会需求的工程人才。

3) 未来展望。可以进一步拓展飞轮储能系统的功能和应用，如引入太阳能发电、风力发电等可再生能源，打造更加完善的能源系统。同时，还可以将项目式学习模式推广到其他专业，开发更多具有专业特色的实践教学项目，为培养高素质的工程人才做出更大的贡献。

飞轮储能系统项目为工程实践教学改革提供了宝贵的经验，也为未来工程教育的发展指明了方向。随着工程教育改革的不断深入，项目式学习模式和专业定制教学模式将会得到更加广泛的应用，为培养更多优秀的工程人才做出更大的贡献。

## 参考文献

- [1] 傅水根. 创建有中国特色的工程实践教学体系[J]. 中国大学教学, 2004(7): 24-26.