

基于实践教学的立式飞轮储能装置设计应用

赵萌¹, 杜平¹, 赵天骄², 高党寻¹, 林蔚然¹, 曾武¹

(1.清华大学基础工业训练中心, 北京 100084 2.清华大学 物理系, 北京 100084)

摘要: 飞轮储能具有储能密度高、能量转换效率高、充放电速度快、环境适应力强、运行寿命长和易于检修维护的特点, 是一种非常有前景的新型绿色能源。本文从工程实践角度出发, 系统地设计了一款立式飞轮储能实践教学装置。基于目前已有的飞轮储能技术, 从飞轮储能原理、系统搭建及机械系统进行了完整地设计, 并完成了样机及实践产品的开发。同时, 通过优化工程实践模块, 将飞轮储能装置融入到了面向电机专业的定制版“金工实习”课程中。利用项目驱动式的新型教学模式, 培养了学生理论与实践结合的能力, 从而提高了学生的综合工程素养。

关键词: 飞轮; 机械储能; 实验装置, 实践教学

中图分类号: TH12; TB23 **文献标志码:** A

Design and application of vertical flywheel energy storage device for practical teaching

Zhao Meng¹, Du Ping¹, Zhao Tianjiao², Gao Dangxun¹, Lin Weiran¹, Zeng Wu¹.

(1.Fundamental Industry Training Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: flywheel energy storage has the characteristics of high energy storage density, high energy conversion efficiency, fast charging and discharging speed, strong environmental adaptability, long operation life and easy maintenance. It is a very promising new green energy. From the perspective of engineering practice, this paper systematically designs a practical teaching device of vertical flywheel energy storage. Based on the existing flywheel energy storage technology, the flywheel energy storage principle, system construction and mechanical system are completely designed, and the prototype and practical product development are completed. At the same time, by optimizing the engineering practice module, the flywheel energy storage device is integrated into the customized "Metalworking Practice" course for electrical engineering majors. Using the new project driven teaching mode, students' ability to combine theory with practice is cultivated, and students' comprehensive engineering literacy is improved.

Key words: flywheel; mechanical energy storage; experimental device; Practice Teaching

前言

2020 年的联合国大会上, 习近平主席首次提出了碳达峰和碳中和的概念, 明确中国将努力争取在 2060 年前实现碳中和^[1-3]。同时, 得益于我国人工智能、互联网+等技术的不断

进步，以风电和光伏为代表的新能源产业进入了一个新的发展阶段^[4-5]。风电、光伏等新能源场站在我国电网占比和并网容量比例不断提高^[6-8]，将有助于推动我国供给侧能源改革和建立多元化的能源供应体系，最终实现碳中和的远景目标。

为了使清洁能源发电也能够灵活进入并网运行，同时减少传统火电的调峰调频压力，使得风能和太阳能等清洁能源得到有效利用，从而进一步降低传统火电比例，从而达到节能减排，减轻污染的目的，发展飞轮这一储能密度高、能量转换效率高、充放电速度快、环境适应力强、运行寿命长和易于检修维护的高效节能和储能技术，将成为重中之重。

飞轮储能技术在许多领域都已经有了广泛的应用，特别是在美国、日本、德国等发达国家，储能技术已经发展得比较成熟，主要应用于 UPS 不间断电源，微电网调频，削峰填谷，制动动能回收，电磁弹射等多个领域^[9-12]。

飞轮储能装置是一种机电能量转换的储能装置，通过电动/发电互逆式双向电机，电能与高速运转飞轮的机械动能之间的相互转换，实现电能的输入、储存和输出过程。其设计涉及多学科，装置设计过程复杂，就飞轮转子材料的选择，飞轮最佳转速的确定及工作空间的计算，轴承支撑的选择，轴承承载力、刚度与结构参数的计算，电机的选择，以及能量转换控制方式的分析等方面^[13-14]。

传统的工程实践教学具有项目分离的特点，焊接、铸造、车工、铣工、检测、钳工等内容只是基于工种培养内容进行课程教学，其能力培养环节较为基础，无法满足高素质人才培养的需求。2017 年，教育部开始部署新工科建设，对培养实用型、创新型、学科交叉型新工程人才提出了更高的要求，指出工程教育需要更深入地进行创新实践和多学科交叉融合发展，需要具备较强的实用性、交叉性与综合性^[15]。

随着国家“双碳”目标的提出，加快建设低碳化国家、可持续发展国家，应对发展挑战，培养高素质的应用型工程技术人才迫在眉睫，以飞轮储能装置这一新型机械储能装置设计进行实践课程设计，利用理论教学同实践教学相结合的新型教学模式，可以培养学生形成理论与实践结合的综合能力，为各行业创新型人才的培养提供助力。

1 技术方案及设计

1.1 机械机构设计

以能源大类的学生为试点对象，通过项目驱动的教学方式，有机整合现有金工实习中的各个工种，完成飞轮储能系统的设计、加工制造和组装调试。通过与专业背景的紧密联系，提高学生的学习兴趣和主观能动性，同时建立产品全生命周期的概念，培养创新能力，提高综合素质。

针对未央书院能源大类的暑期金工实习，设计一款立式飞轮储能实验装置。具体要求如下：（1）匹配中心现有的加工工艺；（2）符合本科学生的加工水平；（3）满足相关专业的教学要求。

最终的实验装置结构如**错误!未找到引用源。**所示，主要分为四部分，飞轮支撑模块，

电机支撑模块，飞轮模块以及控制单元，整体尺寸 450×450×350mm。其中，飞轮支撑模块使用四根立柱进行定位及支撑；电机支撑模块与飞轮支撑模块类似，同样四根立柱通过飞轮盖板与电机安装板上的沉孔保证定位；飞轮模块包括飞轮、主轴、轴承、轴承座、联轴器以及电机。

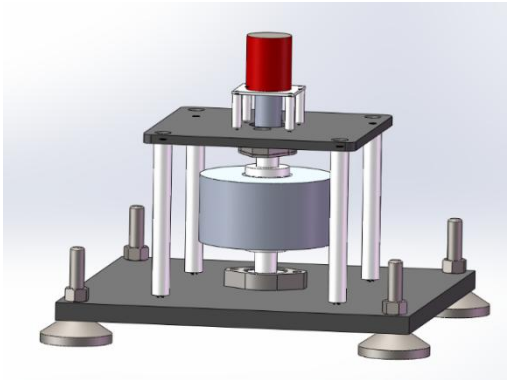


图 1 飞轮储能装置总体结构

1.2 主要设计参数

- 1) 总体设计。本飞轮储能装置设计容量 0.044Wh，重量 10.4kg，其选用电机功率为 100W。本飞轮储能装置需要在电机停止供电之后，通过飞轮实现电流电压的显示以及 5w 节能灯的供电，持续时间不少于 20s。
- 2) 电机支撑装置设计。保证电机与主轴之间的轴心偏差小于 0.2mm。
- 3) 飞轮支撑装置设计。保证主轴轴心跳动少于 0.1mm。
- 4) 飞轮模块设计。飞轮安装于飞轮支撑装置后，需要保证飞轮外径跳动少于 0.2mm。
- 5) 飞轮控制模块设计。控制模块分为电机控制、发电模块以及稳压模块。

1.3 飞轮支撑模块设计

因对飞轮重量较大，转速较高，对其转动时同心度要求高，因此飞轮支撑模块需要特别注意垂直度要求和定位精度要求。使用四根立柱进行定位及支撑四根立柱通过底板上的下沉孔以及立柱两端的台阶进行定位，保证垂直度与位置精度。沉孔如[错误!未找到引用源](#)。所示。其安装方式如[错误!未找到引用源](#)。所示，其中红色圈内的面为定位面圆柱面负

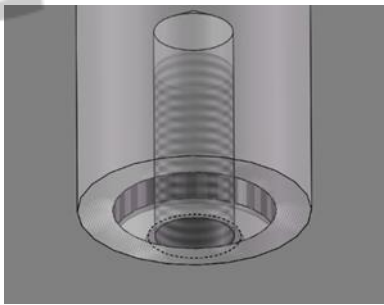


图 2 飞轮支撑柱沉孔

责定位位置，台阶面校准垂直度。

飞轮盖板下方对应立柱位置带有同样的沉孔，作用与底板上的沉孔一致。这 8 个定位孔

保障飞轮旋转轴的同心度满足设计要求。底板四角开有通孔，安装地脚螺栓，负责整个装置的支撑及固定，其整体安装如图 3 所示。

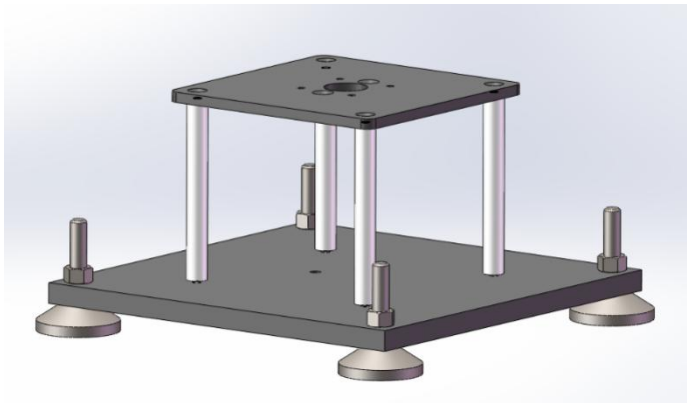


图 3 立柱安装图

1.4 电机支撑模块

与飞轮支撑模块类似，同样通过四根立柱支撑，飞轮盖板上的沉孔保证四根立柱的定位精度和垂直度能满足要求。但因电机与主轴通过联轴器连接，同心度要求可以稍微降

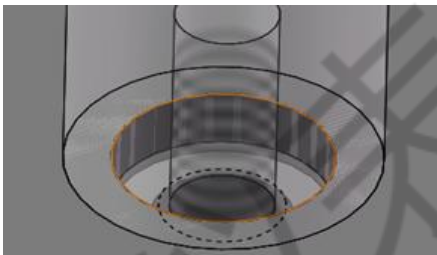
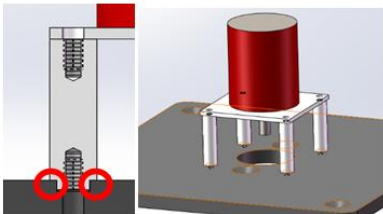


图 4 飞轮盖板上电机立柱的沉孔

a) 电机立柱安装剖面图 (b) 电机立柱安装图

电机选择考虑如下：(1)飞轮较重，扭矩需求较大，因此选择外转子的类型；(2)安全问题，需要较为稳定的控制，因此选择有传感器的类型;(3)飞轮转速较高，选择无刷电机；(4)最后需要在一定转速下产生较高的电压，选择 kv 值较低的电

图 5 电机立柱安装剖面图 (a) 电机立柱安装图 (b)



机。综上所述，最后选择 100w 外转子有感无刷 100kv 的电机。

1.5 飞轮转子模块

飞轮通过两个 z3-25 胀套与主轴相连，主轴两端通过 6204 轴承与飞轮支撑模块连接。

电机与主轴通过联轴器连接。3 种转子设计方案参数如表 1 所示：

表 1 飞轮转子设计方案

	单位	方案一	方案二	方案三
转子材料		铝	铁	铝
轴承		磁悬浮	陶瓷轴承	钢珠轴承
半径 r	m	7.5×10^{-2}	7.5×10^{-2}	5.5×10^{-2}
高度 h	m	2.5×10^{-2}	7.5×10^{-2}	4.5×10^{-2}
体积 V	m^3	4.4×10^{-4}	1.32×10^{-3}	4.3×10^{-4}
密度 ρ	Kg/m^3	2.7×10^3	7.9×10^3	2.7×10^3
转速 ω	rpm	2000	1500	1000
动能	Wh	5.11×10^{-3}	4.4×10^{-2}	2.6×10^{-3}

经初步测试，在中心现有的加工工艺下，转子的加工精度保证在 0.1mm；同时考虑到转子在高速旋转下的应力和变形，应选择抗拉强度较高的材料，并减小转子半径，降低设计转速以保证安全；在此基础之上，采用密度较大的材料，并设计转动惯量较大的质量分布模型，以提高储能容量。确定正式设计参数如表 2 所示，样机结构尺寸如图 7 所示，整体结构剖面如图 8 所示：

表 2 飞轮参数

D/mm	A/mm	B/mm	L/mm	n/rpm
50	150	75	175	1000

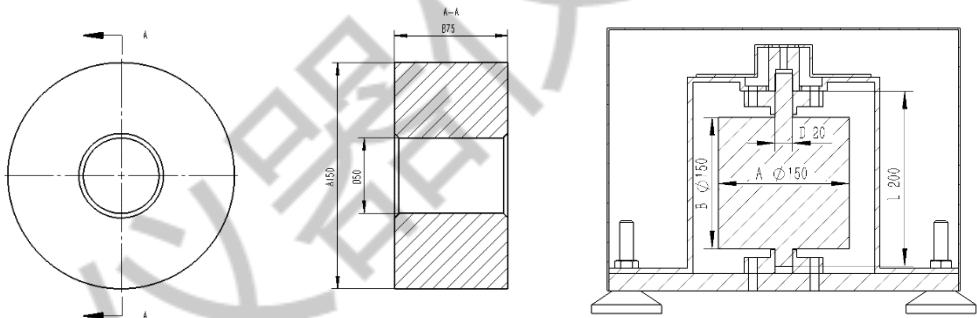


图 7 飞轮尺寸

① 动能计算

$$\begin{aligned}
E &= \int_0^R \frac{1}{2} v^2 dm = \int_0^R \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \rho 2\pi r t(r) dr \\
&= b\rho\pi\omega^2 \int_{\frac{1}{2}D}^{\frac{1}{2}a} r^3 dr + B\rho\pi\omega^2 \int_{\frac{1}{2}a}^{\frac{1}{2}A} r^3 dr \\
&= \frac{1}{57600} \rho \pi^3 n^2 [BA^4 - (B-b)a^4 - bD^4]
\end{aligned}$$

式 1

代入数值后得，

$$E = 0.044 \text{ Wh}$$

② 最高线速度

$$v = \frac{1}{2} \omega A$$

式 2

代入数值后得，

$$v = 7.9 \text{ m/s}$$

③ 飞轮总质量

$$m = \frac{1}{4} \pi [(a^2 - D^2)b + (A^2 - a^2)B]$$

式 3

$$m = 10.4 \text{ kgm}$$

④ 充能速度

$$t = \frac{E}{P_{motor}} = 1.6 \text{ s}$$

式 4

当电机满功率运行时，整个飞轮达到预定储能需要 1.6s。

⑤ 强度校核

当存在偏心时，假设重心偏离轴心 1mm，则，

a. 转动离心力

根据经典转动物体离心力计算公式，有

$$F_{\text{离}} = m\omega^2 \Delta r = 113.4 \text{ N} \quad \text{式 5}$$

b. 轴的最大正应力

$$\sigma_{\text{max}} = \left| \frac{M}{W_z} \right|_{\text{max}} = \left| \frac{\frac{1}{4} FL}{\frac{1}{32} \pi D^3} \right| = \frac{8FL}{\pi D^3}$$

式 6

$$\sigma_{\text{max}} = 14.6 \text{ MPa}$$

其中：

F 为转动时产生的离心力；

L 为转动轴长度；

c.轴的最大剪应力

$$\tau_{\max} = \frac{16 F_s(x)}{3 \pi D^2} = \frac{8}{3} \frac{F}{\pi D^2} \quad \text{式 7}$$

$$\tau_{\max} = 0.43 \text{ MPa}$$

d.轴的最大挠度

$$w = \frac{Fx}{48EI} (3L^2 - 4x^2) \quad \text{式 8}$$
$$w_{\max} = \frac{F \frac{1}{2} L}{48E \frac{\pi D^4}{64}} \left[3L^2 - 4 \left(\frac{1}{2} L \right)^2 \right] = \frac{4FL^3}{3E\pi D^4} \quad \text{式 9}$$

$$w_{\max} = 7.7 \times 10^{-8} \text{ mm}$$

最后可得：

表 3 飞轮强度校核

离心力/N	最大正应力/MPa	最大切应力/MPa	最大挠度/mm
113.4	14.6	0.43	7.7e-8

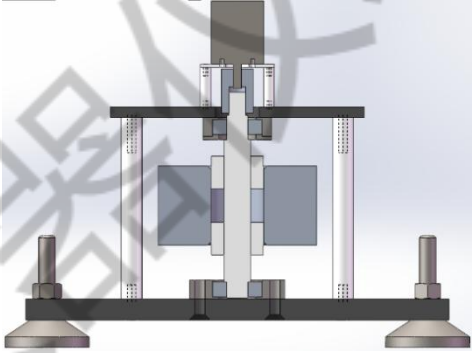


图 6 整体剖面图

1.6 飞轮控制模块

控制模块主要分为电机控制、发电模块以及稳压模块。其整体如

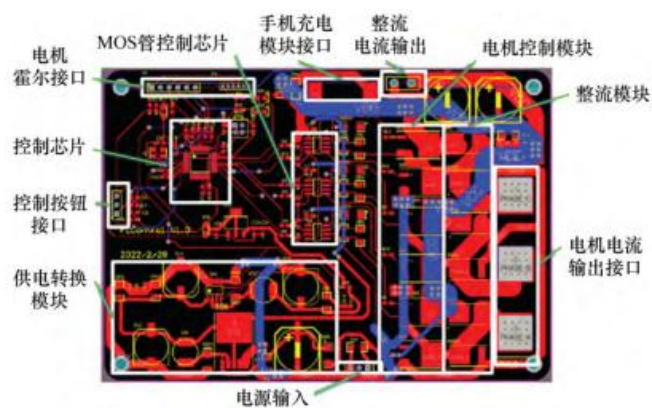


图 7 所示。

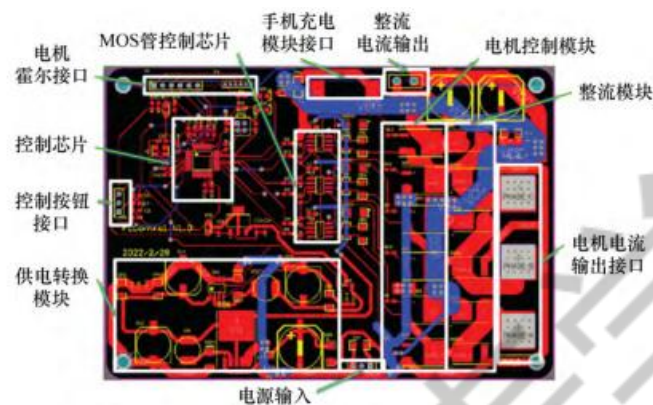


图 7 控制电路 PCB 图

1) 电机控制模块

其中电机使用 GD32E103 芯片控制，通过全桥 MOS 管实现无刷电机控制。其线路图如图 8 所示。其中 MOS 管选取 IRFR4510 的型号，MOS 管控制芯片使用 AUIRS2301。

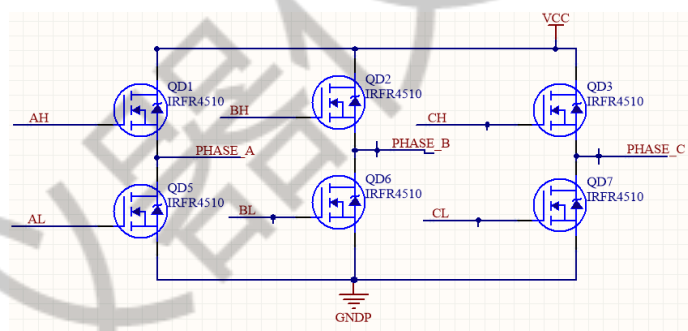
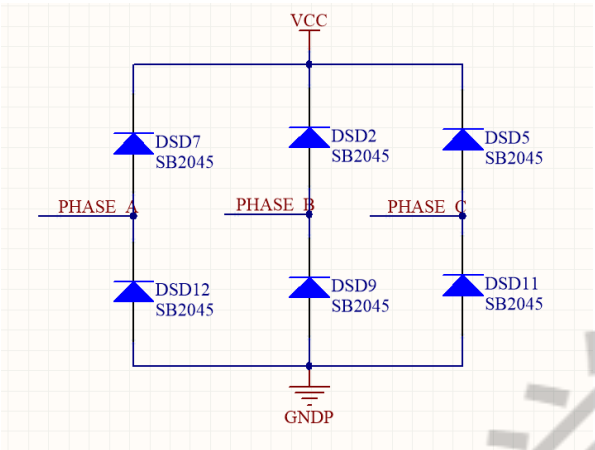


图 8 无刷电机控制电路

2) 发电模块

发电模块与电机控制模块共用一个 kv 值为 100 的电机。当电机处于电动机状态时，电机控制模块工作，单片机通过 MOS 管控制芯片产生三路一定组合的 pwm 波控制 MOS 管通断从而控制电机转动。此时全桥整流模块起到续流二极管的作用。当电机处于发电机状态时，电机控制模块所有 MOS 管为关断状态。此时考虑电机转速为 1000rpm，那么电机的反电动势为 10v。因为产生的反电动势为交流电，所以需要通过全桥整流将其变为直流



电。全桥整流如图 9 所示。

图 9 整流模块电路

3) 稳压模块

全桥整流模块输出半正弦波，需要通过稳压模块将其电压稳定至 5V。此处购买成熟产品 LM2596SDC-DC 可调降压模块，输出稳定的 5V 电压。

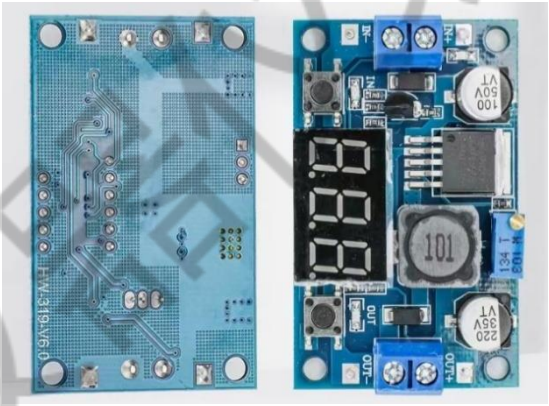


图 10 DC-DC 降压显示模块

4) 供电路线

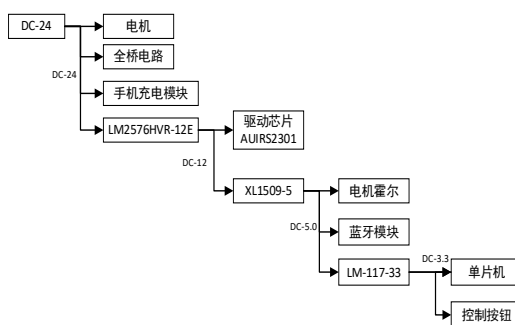


图 11 供电路线示意图

5) 单片机配置

单片机引脚使用如图 12 所示。

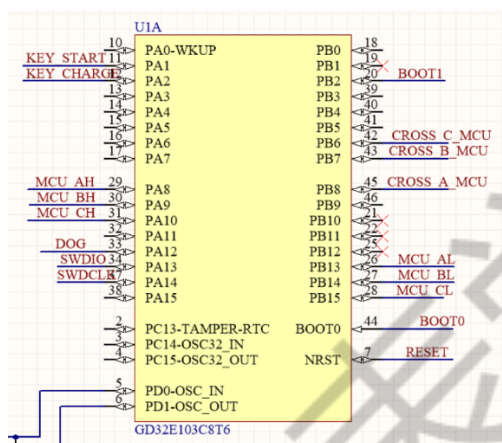


图 12 单片机引脚示意图

其中 PA8, PA9, PA10, PB13, PB14, PB15 为电机控制引脚，挂在 TIME1 的 pwm 通道 0, 1, 2 以及其对应的互补输出 pwm 通道，其均为复用推挽输出模式；

PA1, PA2 为控制开关；

PA12 为看门狗，为开漏输出模式；

PB6, PB7, PB8 为电机霍尔传感器接收引脚，为上拉输入模式。

2 试验成果

1) 接通电源，通过电机给飞轮充电。一般情况下，飞轮从转速为 0 到预定转速，需电机满功率运行充电 7s；（运行阶段）

2) 当飞轮装置达到额定储能值后保持转速不变，即保持其储存能量值不变；（储能过程）

3) 当飞轮装置断电后，其连接的灯开始常亮照明，此时，飞轮装置用作应急电源。（放电过程）

3 飞轮储能装置实践教学设计

3.1 理论课程设计

在理论教学中，主要涉及机械制造领域中的材料、力学、金属加工工艺学以及焊接、

铸造、钳工、车工、铣工、检测等方法。因此，在理论教学中围绕上述方法的原理、特点、应用展开设计。同时为增强学生的工程意识，内容设计中安排经典工程应用案例，如：最新航母建设中的电磁弹射装置应用案例、火星机器人储能计划项目等。此外，结合课堂思政建设，在理论设计中增加大国工匠，劳动模范优秀事迹的植入。如此以来，使得理论顶层设计将价值塑造，能力培养及知识传授的人才培养理念形成了三位一体的指导模型。有利于提升在实践教学开展中的培养成效。

3.2 实践课程设计

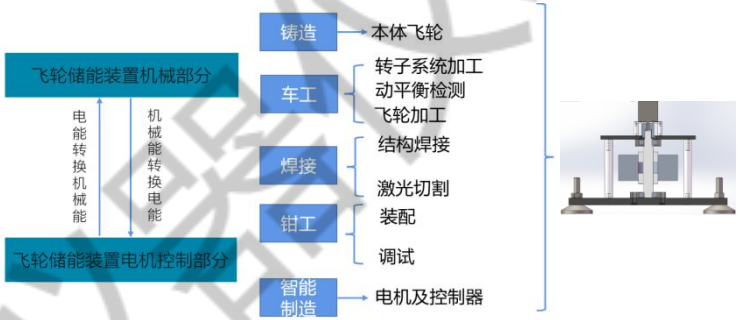
1) 整体教学方案设计。

飞轮储能系统由设计、加工制作、组装调试三部分组成。设计部分主要包括机械结构设计，转子材料、轴承类型、电动发动机选型等。加工制作是比重最大的教学环节，其中转子先由铸造得到毛胚，再车工得到最终零件；支架和保护壳由钢板激光切割和焊接完成；电动发动机及控制电路由智能制造单元完成；最后所有部件在钳工完成组装调试。

2) 探索学生综合素质培养。

所涉及的知识和工作量比传统实习课程要大许多，学生采用组队完成项目，3-4人一组，制定工作计划和分工，培养团队协作和交流沟通能力。课程同时设置开题报告、中期汇报、期末答辩等节点，考察项目进度，保证项目顺利实施，提高学生的工程素养。

实践课程主要由焊接、铸造、车工、铣工、检测、钳工等工种组成，每个工种的教学内容和制作的产品，都有关联不可分开的实践环节如图所示 15。满足工程实践教学融合的人



才培养需求。

图 15 工程实践教学模块设计

4 实践教学开展

4.1 材料成型实验室实践教学开展

储能飞轮保护罩包含两个可拆卸的 L 型金属主框架、2 件亚克力观察窗口及所需的金属安装附件，所有材料均通过激光切割下料，L 型金属主框架通过 TIG 焊完成零件成形如图 16 所示，之后所有零件均通过螺栓连接按照相应关系装配如图 17 所示。

本环节主要教学目的是在让学生认知焊接、切割工程技术、掌握基本工程实践技能的基础上，强调教学现场发现问题解决问题的实际解决问题能力，同时在团队协作能力也是

重点考察方面。



图 16 型金属主框架现场焊接



图 17 储能飞轮保护罩总装

4.2 智能制造实验室实践教学开展

飞轮的三坐标检测为主，辅以测量臂、游标卡尺等检测手段，旨在让学生能按质量管理员、质量检验员等岗位对产品检测和质量控制的实际要求，让学生角色代入，对飞轮这一轴类零件，选择合适的检测手段如图 18 所示。并在实验中揉入 SPC 分析教学内容，体现现代加工制造中，如何实现产品的质量管控。



图 18 飞轮的检测

4.3 设计与原型实验室实践教学开展

钳工装配实习教学中，应该给学生适当补充一些基础知识及其他机械专业知识和技能，这样能促使基础知识差和缺少专业知识、技能的学生学好钳工装配技能。通过引导学生以产品真枪真刀的进行实际装配，培养学生的实践技能，主要培养学生要有一个严谨的态度以及培养学生吃苦耐劳的精神，提高对于手工操作的兴趣，培养高素质的专业型，技能型综合人才。完成飞轮储能系统的设计、加工制造，钳工完成最后的组装（如图 19 所示）与调试工作及测试等工作。

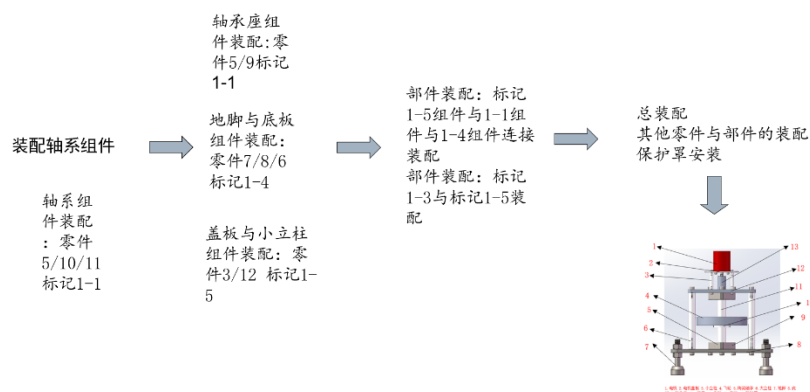


图 19 飞轮工艺卡片流程图

5 总结

在飞轮储能装置的设计中，项目以工程应用实践为基本出发点，紧密切合国家“碳中和”相关发展理念，聚焦新能源、新材料、高端芯片与软件、智能制造和国家安全等关键领域，打造以飞轮储能装置为抓手的前沿课题，通过周密调研，谨慎论证，迭代试制，完成了研究样机及实践产品的开发。同时，通过优化工程实践模块定制课程，将飞轮储能装置融入到清华大学实践课程中，结合多学科专业学生参与，进一步丰富飞轮储能装置的更深层次研究。也为有关专业方向培养具有扎实数理基础及实践能力的拔尖创新人才创造了丰富教学资源。

参考文献:

- [1]鲁宇, 张大弛, 韩思雨, 等.高渗透率可再生能源情景下氢能发展分析[J].湖北化电力, 2021, 45(01).
- [2]邹才能, 熊波, 薛华庆, 等.新能源在碳中和中的地位与作用[J].石油勘探与开发, 2021, 48(02)
- [3]余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等.碳中和目标下中国碳排放路径研究[J].北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(02)
- [4]房康, 储小康, 李明.电网直调前新能源侧储能实际可用收益和最优运行模式分析[J].湖北电力, 2020, 44(05)
- [5]张天策, 王剑晓, 李庚银, 等.面向高比例新能源接入的配电网电压时空分布感知方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(02)
- [6]李晖, 梁福波, 智勇, 等.新能源场站无功电压调相运行技术研究[J]智能电网.2017, 5(04)
- [7]刘子腾, 徐永海, 陶顺.新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J]电力自动