

基于较高压环境下的小型高储能飞轮电池设计

张康鑫, 孟令启*

广州科技职业技术大学自动化工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年2月8日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

本文对飞轮电池原理进行了阐述, 并对飞轮电池的重要组成部分进行了分析与设计, 对飞轮转子和飞轮转轴进行了应力分析和强度校核。本文设计的飞轮电池最大储能量为20,000 KJ, 转速在40,000~50,000 r/min之间。为达到设计需求, 本文对飞轮转子的许用应力和飞轮转轴的许用扭矩及材料选用进行了分析计算, 为了减少飞轮电池内部的能量消耗, 对飞轮电池的集成电机、磁轴承系统以及内部容器环境条件进行了分析设计, 完成了飞轮电池的设计。

关键词

飞轮电池, 飞轮转子, 飞轮转轴, 集成电机

Design of a Small High-Energy Storage Flywheel Battery Based on a Higher Voltage Environment

Kangxin Zhang, Lingqi Meng*

College of Automation Engineering, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Feb. 8th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

In this paper, the principle of the flywheel battery is summarized, and the important components of the flywheel battery are analyzed and designed, and the stress analysis and strength check of the flywheel rotor and flywheel shaft are carried out. The maximum energy storage capacity of the flywheel battery designed in this paper is 20,000 KJ, and the speed is between 40,000~50,000 r/min. In order

*通讯作者。

to meet the design requirements, the allowable stress of the flywheel rotor and the allowable torque and material selection of the flywheel shaft are analyzed and calculated, and the integrated motor, magnetic bearing system and internal container environmental conditions of the flywheel battery are analyzed and designed, in order to reduce the energy consumption inside the flywheel battery, and the design of the flywheel battery is completed.

Keywords

Flywheel Battery, Flywheel Rotor, Flywheel Shaft, Integrated Motor

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

随着科技的不断进步以及环境保护意识的逐步增强,传统化学电池等大多数储能装置,已难以契合能源与环境可持续发展的需求,也无法满足相关领域对充放电性能的要求。飞轮电池作为一种新型储能装置,优势显著。它能够输出相当于同等级普通电池两倍的功率,在带动相同负载时,其持续工作时间是普通电池的3至10倍。美国罗森汽车公司(Rosen Motors)转变研究方向,提出了混合动力汽车的概念。这是一种介于内燃机汽车和电动汽车之间的新型车辆,在当时电动汽车技术尚不成熟的情况下,被视为一种出色的过渡方案。该方案将涡轮发动机与飞轮储能系统作为两个动力源,应用于土星汽车上。结果显示,汽车仅需6秒就能加速至100 km/h [1],即便长时间处于停滞状态,在发动机的带动下,飞轮仍能正常运转,性能不受影响。不过,这种设计也导致了车辆整体质量增加以及成本上升。德国宝马公司推出的新型概念车,配备了飞轮储能电池,具备调峰和主力两种工作模式,采用的是谢菲尔德大学研制的飞轮单元。随着磁悬浮技术的发展,无接触支撑和真空技术得以实现,能将摩擦损耗(包括风损)降至最低。美国航空航天局(NASA)开始资助空间飞行中心对卫星飞轮的电磁轴承展开研究。

国内对于飞轮电池储能的研究起步相对较晚,目前仍处于发展阶段。自1995年中科院电工研究所与清华合作开展飞轮储能研究以来,至今仅有二十年历史。近年来,国内不断加大投资力度。2022年,国家发改委和国家能源局明确了新型储能作为独立储能参与电力市场的主体地位,随后,一系列鼓励扩大飞轮储能规模的政策相继出台。清华大学在飞轮储能系统的设计优化以及在电网、电动汽车中的应用等方面取得了显著成果。此外,中科院、哈工大、哈工程、西交大、南航、北航等高校也在飞轮储能装置的研究上投入了大量精力。然而,绝大多数研究仍处于探索初期,实际应用较少。2021年8月,2 MW飞轮储能系统首次在邯长铁路投入使用,在列车进站时,将列车动能转化为飞轮动能储存起来。每年可利用110万度再生制动能量,这些电能可供500户普通家庭使用一年,同时减少二氧化碳排放1100吨。截至2022年底,新型储能装机规模达到45.75 GW,同比增长80.4% [2]。总体而言,我国的装机水平和理论成果与国际水平相比仍有差距,后续研发之路任重道远。

2. 飞轮电池的设计要求及标准

1) 能量密度:为实现高效储能,飞轮电池需具备较高的能量密度,以便在有限的空间和重量条件下储存更多能量。这要求选用优质的飞轮材料,不断探索和采用新型高强度、低密度材料,如复合碳纤维材料等,提升单位质量的储能能力。

2) 功率密度:需满足不同应用场景对功率输出的需求,具备较高的功率密度,确保能快速充放电,

例如在电动汽车启动、加速等需要大功率的瞬间, 能够及时提供足够的能量。

3) 转速与稳定性: 飞轮的转速直接影响储能大小和功率输出, 应设计合理的最高转速, 并保证在高速旋转过程中的稳定性。通过优化结构设计, 采用先进的制造工艺和高精度的动平衡技术, 减少振动和不平衡量, 防止因高速旋转导致结构损坏。

4) 效率与损耗: 在充放电过程中, 要尽量降低能量损耗, 提高整体效率。选用低电阻的导线和高效的电力电子器件, 优化电动发电机和轴承系统, 降低电磁损耗和机械摩擦损耗, 如采用磁悬浮轴承减少摩擦, 利用真空技术降低风阻。

5) 安全性能: 设计严格的安全防护机制, 如坚固的防护罩, 防止飞轮在异常情况下破裂对周围造成伤害。同时, 设置多重保护电路, 防止过充、过放、过热等异常情况, 确保系统安全可靠运行。

6) 寿命与可靠性: 具有较长的使用寿命和高可靠性, 减少维护成本和停机时间。通过对关键部件进行耐久性测试和疲劳分析, 采用高质量的材料和零部件, 确保飞轮电池在长期使用过程中的性能稳定。

7) 环境适应性: 能在不同的环境条件下正常工作, 如适应不同的温度、湿度、海拔等环境因素。通过特殊的设计和防护措施, 确保在极端环境下, 各部件的性能不受影响, 维持系统的正常运行。

3. 飞轮电池的结构原理和特点

3.1. 飞轮电池的结构

飞轮电池储能装置包括三个核心部分: 飞轮、磁轴承系统和电力电子变换装置, 它主要是由飞轮、轴、轴承、电机、真空容器和电力电子装置组成。其结构如图 1 所示。

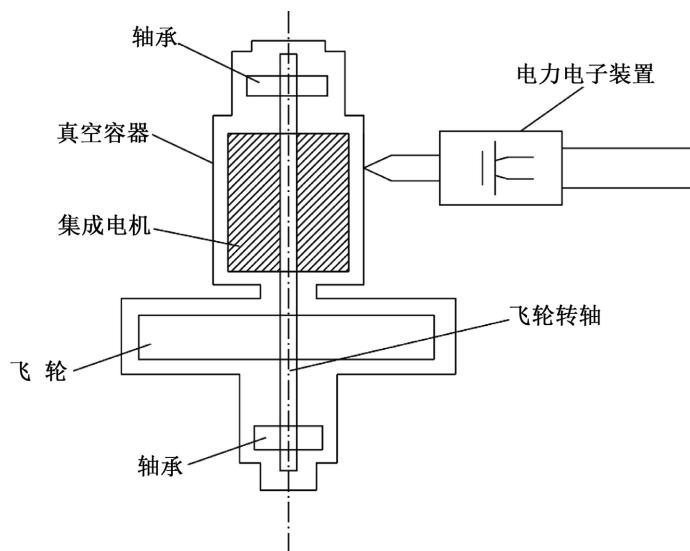


Figure 1. Structure of a flywheel battery

图 1. 飞轮电池的结构

3.2. 飞轮电池的原理及特点

飞轮电池是一种绿色环保的储能方式, 其工作原理是由电力电子变换装置从外部输入电能驱动电动机旋转, 在外部电源的作用下, 电机带动飞轮进行高速的旋转, 给飞轮电池“充电”, 增加飞轮的转速; 当外部负载需要能量供给时, 便让飞轮带动发电机进行高速旋转, 把机械能转化为电能, 再通过电力电子变换装置转化成为负载所需要的各种电压、频率等级的电能。其原理如图 2 所示。



Figure 2. Schematic diagram of a flywheel battery

图 2. 飞轮电池的原理图

飞轮电池的电机与飞轮都采用磁轴承，保证悬浮不发生接触，减少机械摩擦。同时，将飞轮、电机等装置都安装在真空容器中，以减少空气摩擦。其输入和输出是相对独立的，在设计时通常选用集成电机，合并输入输出转换器，达到大幅度减少飞轮储能装置的外形大小和质量大小的目的。

飞轮电池也是一种新型的集机电能量储存与转换为一体的装置，飞轮电池拥有高达 95% 的净效率，且具有储能量大、功率高、效率高、无污染、无噪声、适用广、寿命长等优点，其研究涉及机械、材料、电工、热工、计算机等多学科的交叉，应用前景非常广阔。

4. 飞轮电池的总体设计

4.1. 实际环境的分析与参数选择

本文设计的为具备较大储能量的小型飞轮电池，主要满足电动汽车、医疗设备备用电源、小规模可再生能源发电以及轨道交通等的储能量要求。对于电动汽车和医疗设备备用电源等这种对储能量有一定要求且体积较小的设备器械，单个飞轮电池即可满足需求。而像小规模风能太阳能发电和轨道交通等不仅需要体积更大的飞轮转子，还需要更高的转速，这里则采用多个飞轮电池并联，而本文所设计的飞轮电池的储能量较大，即可实现少量的飞轮电池并联运行，不会出现飞轮电池数目太多而造成的冗余以及不会增大装配和修理的复杂度。为了使本文的飞轮电池满足高储能要求，且飞轮的转速越快，可提供的储能量越高，本文将飞轮的实际工作转速设计为 40,000~50,000 r/min，最高转速设计为 200,000 r/min，质量为 10 kg，可以完全满足如电动汽车和医疗器械的需求，也可以满足小规模可再生能源发电和大型公共设施的备用电源。飞轮转子提供的储能量会受到自身材料的影响[3]，而且金属制成的飞轮无法承受这样高的转速[4]。常用于飞轮转子的材料有三种，分别为铝合金、高强度钢和纤维 T-700/树脂，具体参数见表 1。

Table 1. Properties of the materials commonly used in flywheel rotors

表 1. 飞轮转子常用材料的性质

飞轮材料	材料强度/GPa	密度/kg·m ⁻³	e/kJ·kg
铝合金	0.6	2800	76.9
高强度钢	2.7	8000	135.3
纤维T-700/树脂	4.2	1600	2000

由表 1 可知，纤维 T-700/树脂复合材料的储能密度远高于铝合金和高强度钢，而且这种复合材料能更好地应对高转速环境，本文则采用纤维 T700/树脂。

4.2. 飞轮转子的分析计算与设计

实际工作时飞轮的转速可达 40,000~50,000 r/min，最高转速可以达到 200,000 r/min，飞轮电池的储能密度与转子的结构形状有关[5]，本文则采用薄壁圆环形的飞轮转子。

它所储存的能量与材料的许用应力的关系如式(1)所示：

$$E = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 = \frac{1}{2}J\omega^2 = m\frac{[\sigma]}{\rho} \quad (1)$$

其中, E 为飞轮的动能, m 为薄壁圆环的质量, r 为圆环的旋转半径, ω 飞轮旋转角速度为飞轮的转动惯量, $[\sigma]$ 为飞轮材料的许用应力, ρ 为飞轮材料的密度。

对于结构、几何尺寸一定的飞轮, 其储能密度由下式确定:

$$e = \frac{E}{m} \quad (2)$$

飞轮转动角速度:

$$\omega = 2\pi n = 2 \times 3.14 \times \frac{42000}{60} = 4396 \text{ rad/s} \quad (3)$$

又由公式(1)得转动惯量:

$$J = \frac{2E}{\omega^2} = \frac{2 \times 20000 \times 10^3}{4396^2} = 2.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

计算飞轮转子的内外径及厚度, 飞轮转子为有厚度的圆环, 其体积为:

$$V = (\pi r_1^2 - \pi r_2^2)h \quad (4)$$

其中, r_1 为飞轮外圆半径, r_2 为飞轮内圆半径; h 为飞轮的厚度。

由 $m = \rho V$ 得:

$$V = (\pi r_1^2 - \pi r_2^2)h = \frac{m}{\rho} \quad (5)$$

根据小型飞轮转子的参数可知 $r_1 = 150 \text{ mm}$, 厚度 $h = 10 \text{ mm}$ 得:

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 - \frac{m}{\rho \cdot h \cdot \pi}} \approx 42 \text{ mm}$$

飞轮的储能密度是可以通过提高转速来提高, 但其转速受到飞轮轴承和本身材料的强度制约。本设计飞轮形状为有轮辐的圆盘状, 其所承受的最大离心应力为:

$$\sigma_\theta = \sigma_r = \frac{3+v}{8} \rho \omega^2 R^2 \quad (6)$$

其中, ρ 为材料密度, v 为泊松系数。

本设计所选飞轮材料为纤维 T-700/树脂, 其泊松系数 $v = 0.3$, 飞轮转动角速度 $\omega = 4396 \text{ r/s}$, 飞轮外缘半径 $R = 0.15 \text{ m}$, 则由上公式(6)得:

$$\sigma_\theta = \sigma_r = \frac{3+0.3}{8} \times 1600 \times 4396^2 \times 0.15^2 \approx 0.29 \text{ Gpa}$$

由计算结果得转子承受最大离心应力远远小于材料许用应力, 转子满足强度要求。

4.3. 飞轮转轴的设计与分析

在整个飞轮储能装置中所用到的轴只会受到扭矩的作用, 而基本上没有弯矩的作用, 因此本设计选用的轴为传动轴。这里选用的材料为 45# 钢作为转轴的材料。

为了能够使飞轮转轴在飞轮的超高速旋转下可以一直正常运行, 必须对所设计的转轴进行应力分析和强度校核。轴的扭转强度条件公式为:

$$\tau_T = \frac{T}{W_T} = \frac{9550 \times 10^3 \frac{P}{n}}{W_T} \leq [\tau_T] \quad (7)$$

其中, τ_T 为轴的扭转切应力, MPa; T 为轴所传递的转矩, N·mm; W_T 为轴的抗扭截面系数, mm³; P 为轴所传递的功率, kW; n 为轴的转速, r/min; $[\tau_T]$ 为轴的许用扭转切应力, MPa。

对于实心圆轴来讲, 其抗扭截面系数 $W_T = \pi d^3 / 16 \approx \frac{d^3}{5}$, 带入公式(7)得轴的直径:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{5}{[\tau_T]} \left(9550 \times 10^3 \frac{P}{n} \right)} = C \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (8)$$

其中, C 为由轴的材料和承载情况确定的常数, 其值可查表得到, d 的单位为 mm。

轴的材料为 45#钢, 因此查表得 C 为 107。

由公式(8)算得:

$$d \geq 107 \times \sqrt[3]{\frac{30}{20000}} = 12.25 \text{ mm}$$

因此, 只要轴的直径大于 12.25 mm 满足强度要求, 以任意处轴径大于 12.25 mm 即可。

4.4. 磁轴承系统的分析与选用

磁轴承系统由电磁铁、转子、控制器、传感器和功率放大器五部分组成。一般来说, 常用的飞轮支撑轴有机械和磁悬浮两种, 二者区别明显。机械轴成本低但是磨损较大, 只能适应短暂的运行[6], 而磁悬浮轴承则正相反, 其摩擦损耗较低[7], 但是成本较高。本文则采用后者。在飞轮电池工作时, 磁轴承系统通过使飞轮转子稳定悬浮以保证转子与定子无直接接触, 从而避免了转子高速旋转时带来的摩擦损耗, 提高飞轮储存能量的效率[8]。本文飞轮电池采用混合磁轴承系统结构, 将永磁轴承和电磁轴承结合组成的单轴主动控制的磁轴承系统。飞轮转子轴采用立轴放置方式, 提供轴向的悬浮力和径向的恢复力并达到轴向卸载[9]。而支承飞轮与转轴采用能自动对中的径向永磁轴承[10], 在飞轮轴的中部使用推力电磁轴承来控制飞轮转子的轴向位置。辅助轴承则选用一对向心推力轴承保证装置停止运行时, 转轴支承在辅助轴承上面, 避免磁轴承转子和定子间的固体接触而损坏[11]。

4.5. 其他部分的分析与选用

飞轮储能装置与外界交换能量是通过集成电机系统完成的。飞轮储能系统要求能量能够在较短时间内存储下来, 需要飞轮具有很高的加速度, 这就需要集成电机必须具有很大的输出功率和转矩且具有较长和稳定的使用寿命。飞轮的高速旋转工作状态要求电机必须能够轻松地高速运行, 而飞轮储能系统的长时间不间断运行, 系统储能运行的时间很长又要求集成电机的空载损耗必须很低, 而无刷永磁直流电机则满足于上述条件[12]。

飞轮转子转速非常高, 会造成极高的风阻损耗, 且其转子表面的空气摩擦损耗要比普通电机高得多, 在总损耗中占有较大比例。为了尽量减少转子表面的空气摩擦与电机转速、气隙结构及转子表面粗糙度等多种因素带来的能量损耗, 本文选用真空容器。

4.6. 实际生活可运用的领域

在电动汽车方面, 本文设计的飞轮电池可作为辅助电池与主电池进行系统性的组合优化, 减少主电池的使用次数, 极大缓解电动汽车电池的使用寿命问题。并且在电动汽车加速或爬坡时提供额外动力,

整体提升车辆的性能。在小规模可再生能源上，可采用大储能量的飞轮电池并多个并联运行，可更好地储存多余的电能，平衡输出波动，增加了稳定性，减少了维护时的繁琐和成本。在轨道交通中，同样可采用多个大储能量的飞轮电池，既解决了单个体积较大的飞轮电池在轻轨、地铁等无空间安放的问题，也解决了单个飞轮电池的不稳定性。并提高了列车在制动和启动时的能量回收效率，在电力波动时，大大提高了列车的平稳度。

5. 结论

本文利用飞轮电池的结构和工作原理来进行最大储能量为 20,000 KJ、转速在 40,000~50,000 r/min 的飞轮电池的设计。在对相关材料进行应力分析计算后选用纤维 T-700/树脂作为飞轮转子的材料，飞轮转轴选用 45#钢且满足任意处轴径大于 12.25 mm 条件的传动轴。为满足飞轮储能系统对能量储存的要求，采用无刷永磁直流电动机。为减少在工作时发生的故障并减少飞轮电池内部的能量消耗和轴承的摩擦损耗，保留飞轮的旋转功能，本文飞轮电池使用混合磁轴承系统，并对飞轮内部采用真空容器，实现了较大储能量的小型飞轮电池设计。

参考文献

- [1] 文少波, 蒋书运. 飞轮储能系统在汽车中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 82-84.
- [2] 张浩. 电动汽车飞轮储能转子系统的模态分析与稳定性设计[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [3] 刘晋霞, 臧丽伟, 刘宗锋. 飞轮电池转子系统建模及稳定性分析[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 76-80.
- [4] 谷晓妹, 朱帅, 任勇生. 旋转碳纤维复合材料轴转子动力学特性的有限元分析与试验研究[J]. 机械设计, 2023, 40(7): 20-24.
- [5] 武鑫, 陈玉龙, 柳亦兵. 并网型飞轮储能系统金属转子结构优化设计[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 317-321.
- [6] 冯奕, 林鹤云, 颜建虎, 等. 基于机械轴承飞轮储能系统损耗的构成分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 71-75.
- [7] 李迎春, 聂傲男, 杨明宣, 等. 主动磁悬浮轴承系统保护轴承热特性研究及减摩设计[J]. 中国机械工程, 2024, 35(4): 646-655.
- [8] 吴传磊, 滕伟, 王亚军, 等. 基于部分模型辅助 LADRC 的电磁轴承-飞轮转子系统振动抑制[J]. 轴承, 2024(7): 106-114.
- [9] 林大方, 王四季, 王程阳, 等. 复杂工况下储能飞轮转子传力支承与减振设计[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 356-364.
- [10] 胡佳成, 吴华春, 方康平, 李强. 永磁轴承结构综述[J]. 轴承, 2023(7): 1-7.
- [11] 刘钙, 朱焜秋. 飞轮储能用磁轴承综述[J]. 轴承, 2024(1): 9-18, 48.
- [12] 徐帆, 戴兴建, 王又珑, 等. 飞轮储能用永磁电机研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3423-3441.