



飞轮储能中的应力结构分析与轨迹动态特征研究

杨永强¹, 李淼¹, 吴新杰², 黄欢¹

(¹北京工业职业技术学院机电工程学院, 北京 100042; ²北京经济管理职业学院人工智能学院, 北京 100102)

摘要: 飞轮储能技术是一种通过高速旋转体释放动能并进行存储的机电能量转换体系。在实际工作时, 可以通过飞轮自身将电能和机械能进行动态转换, 具有响应速度快、循环寿命长、转化效率高以及污染小等多种优势, 具有良好的应用前景和研究价值。对此, 本研究系统分析了现代飞轮储能系统的结构特性和轨迹特性。结果表明, 飞轮储能系统在结构层面, 需要通过分层复合设计和多项材料的协同作用实现轻量化、高强度与长寿命的协同优化; 在动态轨迹层面, 通过能量转换过程中的双向能量流耦合, 保证效率非线性衰减及负载动态匹配规律扰动抑制特性。

关键词: 飞轮储能; 结构分析; 动态特征

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0215

中图分类号: TH 133.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1357-03

Stress structure analysis and trajectory dynamic characteristics research in wheel energy storage

YANG Yongqiang¹, LI Miao¹, WU Xinjie², HUANG Huan¹

(¹School of Mechatronic Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China; ²School of Artificial Intelligence, Beijing Institute of Economics and Management, Beijing 100102, China)

Abstract: Flywheel energy storage technology is an electromechanical energy conversion system that releases kinetic energy through high-speed rotating bodies and stores it. In practical work, electric energy and mechanical energy can be dynamically exchanged and converted through the flywheel itself, which has multiple advantages such as fast response speed, long cycle life, high conversion efficiency, and low pollution, and has good application prospects and research value. This study systematically analyzed the structural and trajectory characteristics of modern flywheel energy storage systems. It can be concluded that the flywheel energy storage system needs to achieve a synergistic optimization of lightweight, high strength, and long life through layered composite design and the synergistic effect of multiple materials at the structural level; At the dynamic trajectory level, the bidirectional energy flow coupling during the energy conversion process ensures the nonlinear attenuation of efficiency and the disturbance suppression characteristics of load dynamic matching laws.

Keywords: flywheel energy storage; structural analysis; dynamic features

收稿日期: 2026-03-16; 修改稿日期: 2026-04-09。

基金项目: 北京工业职业技术学院校立重点课题 (BGY2024KY-09Z)。

第一作者及通信联系人: 杨永强 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为机械结构有限元仿真, E-mail: cronaldo160088@163.com。

引用本文: 杨永强, 李淼, 吴新杰, 等. 飞轮储能中的应力结构分析与轨迹动态特征研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1357-1359.

Citation: YANG Yongqiang, LI Miao, WU Xinjie, et al. Stress structure analysis and trajectory dynamic characteristics research in wheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1357-1359.

飞轮储能是一种以机电能量原理为核心的能源转换技术,主要是通过高速旋转的飞轮,实现机械能和动能之间的能量交换、存储以及释放。通过近年来的实验分析,可以确定机械能的能源响应速度最快可以达到毫秒级,且寿命稳定能量转化率超过90%。综合化学污染率较低,在现代新型电力系统中具有绝对优势。在市场层面上,飞轮储能已经具有明显的多类型市场格局。例如在电网调频中,得益于飞轮储能的高速响应能力,可以有效抑制不同电流之间的传输波动,相比传统电阻耗能模式具有明显的传输提升。而在数据中心通信以及现代UPS处理中,飞轮储能因为自身占地面积可控,瞬时功率密度较高,可以实现关键负载下的连续供电,成为保障关键负载连续供电的核心设备^[1]。此外,随着全球可再生能源占比突破30%,飞轮储能与锂电池的复合调频系统正逐步替代传统抽水蓄能,在提升电网惯量支撑方面发挥关键作用。对此,本研究以飞轮储能为核心详细探讨了现阶段飞轮储能系统的应力结构以及轨迹动态特征。

1 飞轮储能系统特征结构

飞轮储能系统特征结构主要体现在材料、几何类型与工况协调等多个方面。现阶段的飞轮储能系统可以通过层级设计多相材料耦合及多场动态响应实现能量存储与释放的可靠性,其核心特征可归纳为以下三方面。

1.1 层级与轻量化的异构设计

目前大多数飞轮转子均采用“轮毂-轮缘”分层复合结构,将金属轮毂作为整个转子的核心支撑体,再通过过盈配合或胶接工艺与复合材料轮缘形成扭矩传递界面,既利用金属的高强度与韧性抵抗装配应力,又借助复合材料的低密度与高比强度承担高速旋转产生的离心力;此外,部分设计团队会将转子轮缘设计为一种多层同心环嵌套结构,各个环层可以通过不同的铺层角度或者厚度梯度优化实现应力分散,从而避免传统单一环层可能出现的应力失效现象^[2]。

此外,还有研究团队创新性地将转子轴心中部掏空,做镂空简化设计,这样在保证转子径向刚度合格的情况下,可以降低超过40%的自身质量,从而提高能量密度。对于轮缘的设计,近年来也在不断趋于轻薄化,结合传统的非均匀壁厚结构,可

以有效平衡离心力引发的径向应力梯度与结构强度需求,实现轻量化与承载能力的协同优化。

1.2 材料体系的多项协同作用

在材料的选择上,飞轮储能的材料体系以复合材料为主。尤其是轮缘结构上,复合材料的应用呈现出了显著的各向异性力学特征。一般来说,高密度纤维层的走向会决定材料的主轴性能。环向铺层主要负责提供抗拉强度和抵抗离心力。轴向铺层则可以有效抑制层间剪切变形。45°斜向角铺层负责提高抗扭刚度。不同铺层之间的角度组合设计可以有效实现刚度、强度以及阻尼特性的定向调控。通过最新的管切交叉技术对金属轮毂与复合材料轮缘的界面进行表面微织构处理,再通过橡胶改性环氧胶膜增韧中间层强化结合强度,避免高速旋转下因热膨胀系数不匹配导致的界面脱粘。同时,为了有效提高不同材料之间的增强效应,现阶段飞轮储能的材料应用体系引入了多相协同机制:功能梯度材料通过轮缘表面高模量纤维与内部低密度基体的梯度过渡,实现刚度质量成本的优化平衡;纳米颗粒的引入则通过能量耗散机制抑制高频振动引发的应力波动,使系统疲劳寿命提升更高数量级^[3]。

1.3 多场耦合效应与瞬态冲击

实际工作中,飞轮储能系统经常会面临多物理场动态耦合。超高速下的旋转离心力,有可能导致轮缘径向应力梯度超过200 MPa/mm。而在飞轮的启停阶段,自身瞬时冲击力也可能超过基体材料屈服强度的30%,从而加剧材料疲劳损伤。此外,飞轮储能的热力耦合效应也是较为严重的问题。在飞轮旋转中,旋转摩擦生热导致轮缘表面与芯部温差达50~100℃,热应力与机械应力叠加可能引发层间脱粘或微裂纹扩展,从而出现热力机械耦合,此时电机谐波磁场经轴承传递至转子,诱发振动应力,并与旋转应力叠加形成复杂应力场。整体的环境温度波动与真空环境下的材料性能退化会进一步加剧多场耦合的非线性特征,这就要求系统通过主动热管理与电磁阻尼调控实现应力波动抑制,确保长期运行的稳定性与安全性。

2 飞轮储能的轨迹特征

2.1 能量转换轨迹

从实际原理角度来看,飞轮储能系统的能量转换本质在于机械能通过电机飞轮耦合体态的交互实

现与电能之间的转换，其转换效率会保持非线性衰减和材料结构约束下的动态平衡。在充电阶段，系统整体以发电机的形式运行，将外部电源汇总到内部，在进行电磁转换成为电磁转矩，从而驱动飞轮从静止状态加速到高速旋转状态，这一过程中输入电流的幅值与相位需与飞轮的瞬时转速-转矩需求精准匹配，形成“电流-转矩-转速”的动态闭环；对于飞轮储能来说，电流的幅度值可以决定转矩的峰值，内部相位差的大小则会影响转矩的响应速率。一旦电流相位滞后，就会导致转矩输出的延迟，从而极大增加转速提升的总时长。反之，一旦相位超前，则可能引发转矩过冲，导致机械应力波动。在电机的放电阶段，能量转换路径会出现相反的态势。飞轮动能在电磁感应的影下成为电能，自身轨迹特征主要表现为转速衰减频率与电能参数的极大关联性。随着速度降低，电机反电动势减弱，输出电压幅值与频率同步衰减，需通过功率变换器动态调节占空比以维持电压稳定，而转速衰减速率受负载阻抗与电机电磁参数共同约束，若负载阻抗不匹配将导致输出功率与转速衰减曲线偏离理论轨迹，甚至引发电压跌落或过冲。

在上述关系分析下，可以肯定飞轮储能系统的能量转换轨迹自身动态演化会受到不同路径损耗的复合作用影响。在日常工作中，轴承摩擦力也会随着转速的上升而增加。常压环境下空气阻力随转速三次方上升，而真空封装技术通过抑制气体分子碰撞可将机械损耗降低至常压的千分之一；而通过实验回收率分析数据，可以肯定飞轮储能系统的负载阻抗与电机内阻抗相匹配时，电能输出效率可以达到最高值，同时也可能会出现匹配点漂移的问题。例如，在一些轻载工况的作用下，飞轮储能固定励磁电流会让电机电动势能高速提升，一些动能出现无意义循环。而在高载工况下，磁路饱和又可能引发转矩输出非线性畸变，进一步压缩高效运行区间。

2.2 动态响应轨迹

飞轮储能系统的动态响应轨迹主要受到机械惯量、电磁转换以及控制策略影响，是一种能量瞬态行为的映射关系，最核心的特征在于电能的跟踪与自稳定性以及过载工况下的非线性动态耦合机制。在功率指令跟踪过程中，飞轮储能系统会出现阶跃响应-超调-稳定三个阶段轨迹。当接收到功率指令

时，电机电磁转矩可以快速提升到峰值，驱动飞轮转速瞬时加速或减速，形成类似一阶惯性系统的阶跃响应曲线。然而，由于机械惯量与电磁时间常数的失配，转速响应往往伴随短暂超调，随后在闭环控制作用下收敛至目标值，全程调节时间通常小于10 ms，这一特性使其在电网一次调频、脉冲功率补偿等场景中响应速度较锂电池与抽水蓄能提升。在过载能力轨迹方面，飞轮储能通过牺牲短期储能密度实现功率密度突增：当系统遭遇短时功率需求峰值时，电磁转矩可突破额定值2~3倍运行，此时飞轮转速因动能快速释放而瞬时衰减，形成“转矩突增-转速下降”的强耦合轨迹，这种以动能换功率的动态策略，既依赖电机磁路设计的过载冗余，也受限于转子材料的抗疲劳特性，需通过实时监测转速衰减率与应力变化率避免机械损伤。

3 结语

飞轮储能技术作为新型电力系统中高功率密度储能的核心方案之一，其技术突破与产业化应用正深刻改变着能源存储领域的竞争格局。本文从结构特征与动态轨迹两大维度出发，揭示了飞轮储能系统在几何拓扑、材料体系及工况控制中的多目标协同优化机制，并深入剖析了能量转换与动态响应过程中的非线性特征。面向未来，随着全球可再生能源占比持续提升与电网惯量支撑需求激增，飞轮储能与锂电池、抽水蓄能等技术的复合化应用将成为趋势，而其技术迭代方向将聚焦于三点：一是通过超高速轴承、高模量复合材料等创新实现能量密度突破；二是基于数字孪生与智能控制算法提升动态响应精度；三是构建全生命周期成本模型以增强经济竞争力。可以预见，飞轮储能技术将在构建安全、高效、低碳的新型能源体系中发挥不可替代的作用，为能源革命与“双碳”目标的实现注入关键动能。

参考文献

- [1] 王泽峥. 大容量复合材料飞轮转子强度与模态分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [2] 孔繁鑫, 黄勤, 李光喜, 等. 高储能飞轮转子动态特性及应力分析[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 28-30. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2014.05.009.
- [3] 梁栋. 复合材料飞轮储能转子主体应力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.