

# 飞轮储能原理及其应用

盛 吉, 施小平, 邹 展

(扬州供电公司, 江苏 扬州 220056)

**摘 要:** 与其它储能方式相比, 飞轮储能具有效率高、储能容量大、循环寿命长、事故后果低等优点, 被认为是新型的理想储能装置。在介绍飞轮储能系统的工作原理的基础上, 详细分析了飞轮储能的关键技术, 并论述了飞轮储能在电力调峰、不间断电源、电动汽车和航空航天等领域的应用研究。

**关键词:** 飞轮储能; 工作原理; 关键技术; 应用

## 0 引言

飞轮储能是一种新型的高效的机械储能技术, 它可以将电能、风能、太阳能等能源转化成飞轮的旋转动能加以储存。随着现代新材料技术、电动机/发电机技术、电力电子技术、磁悬浮技术和控制技术的进一步发展, 这一新型储能技术在电力调峰、不间断电源、电动汽车、航空航天等诸多领域有着广泛的应用。与其他储能技术相比, 飞轮储能的优缺点如表 1 所示<sup>[1]</sup>。

表 1 储能技术比较

项目	飞轮 储能	电池	抽水 储能	压缩气体 /气体	小型超 导储能	超导 储能
效率/%	约 90	约 70	约 60	约 50	约 90	约 90
储能容量	高	中	高	高	极低	高
循环寿命	无限	几百	几千	几千	无限	无限
充电时间	分	时	时	时	分	时
建设时间	周	月	年	年	周	年
事故后果	低	中	高	中	低	高
可用性	正在开 发	现在	现在	现在	正在开发	正在开 发
储能性能	极好	差	极好	极好	极好	极好

## 1 飞轮储能基本原理

飞轮储能系统, 又称为电动机械电池、飞轮电池, 是一种机—电能量转换和储存装置。其基本原理是利用电动机将飞轮转子驱动到高速旋转状态, 电能转变为机械能储存。需要时, 飞轮减速, 电动机作发电机运行, 实现机械能到电能的转换, 这样就通过飞轮的加速和减速, 完成了电能的存入和释放。图 1 给出了能量的存储与释

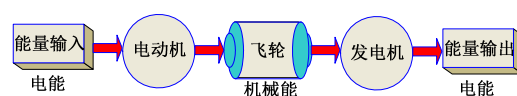


图 1 飞轮储能系统原理示意图

飞轮是一个作定轴转动的物体, 其储存的能量  $E$  可以表示为:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

式中,  $I$ —飞轮转子的转动惯量;

$\omega$ —飞轮转动角速度。

从式(1)中可以看出, 提高飞轮的储能量有两个途径, 一是增加飞轮转子质量, 二是提高飞轮转速。前者可用于固定应用场合, 后者在对质量有严格要求的场合有很好的效果。

飞轮储能系统的结构是积木式的结构, 如图 2 所示。主要有以下五部分组成: 飞轮转子、轴承支撑系统、电动机/发电机、电力电子转换装置、真空/安全保护装置。

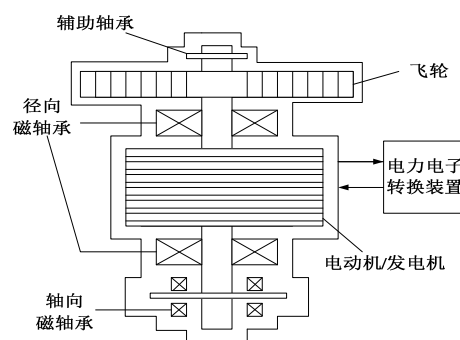


图 2 飞轮储能系统结构图

### 1.1 飞轮转子

飞轮储能系统的一个重要组成部分是高速

旋转的飞轮转子，对于飞轮转子的设计一般考虑三方面的问题<sup>[2]</sup>：一是飞轮本身的强度，它限制了飞轮的最大储能量；二是飞轮材料的选择，要求材料具有较高的比强度；三是飞轮的结构形式。

1.1.1 飞轮材料选择

储能密度（单位质量存储的能量，单位为 W·h/kg）是表征储能装置性能的一个重要指标，对于结构、几何尺寸一定的飞轮而言，其储能密度  $e$  为：

$$e = E / m = k_s \sigma / \rho \tag{2}$$

式中， $m$ —飞轮质量；  
 $k_s$ —飞轮形状系数；  
 $\sigma$ —飞轮产生的最大周向应力；  
 $\rho$ —飞轮材料的密度。

为尽可能地提高飞轮的储能密度，并尽可能地减小飞轮断裂的可能性，需采用高强度、低密度的材料来制作飞轮转子。表 2 给出了几种常用飞轮材料的  $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $e$  基本数据，其中  $e$  值为等厚度圆盘飞轮理论储能密度值。

表2 飞轮材料基本数据<sup>[3]</sup>

材料	$\sigma$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$e$ (W·h/kg)
E玻璃纤维	3.5	2540	231.9
S玻璃纤维	4.8	2520	320.6
Kevlar纤维	3.8	1450	441.1
光谱纤维	3.0	970	520.6
碳纤维T-700	7.0	1780	662.0
碳纤维T-1000	10.0	1780	945.7
高强度合金钢	2.7	8000	56.8

由表 2 可知，高强度合金钢的储能密度值远远不及高强度纤维材料。钢质飞轮不仅比能量低，而且飞轮一旦破裂，其破坏力大。而纤维复合材料飞轮不仅密度小、强度高，而且资源丰富，性能价格比高，破坏力小。因此纤维复合材料是制造飞轮转子的理想材料。

1.1.2 飞轮转子结构

飞轮转子的结构也影响飞轮的强度和储能量，目前有两种较为广泛：

（1）单层圆环形状飞轮：复合材料具有可设计性，但缠绕加工工艺较复杂，不易制作形状

复杂的飞轮，因此复合材料飞轮大多采用圆环形状还要精心设计飞轮的结构形状，尽可能提高飞轮的形状系数。

（2）多层圆环形状飞轮：由文献[4]可知，相对于单层的复合材料飞轮，多层复合材料飞轮是由若干单层复合材料圆环组装而成，各层径向厚度不大，各层之间采用过盈装配或张力缠绕，在层间产生预压力。多层飞轮高速运转时，层间预压力逐渐减小，在工作转速时，层间仍保持有正压力，不会松脱，而各层由于径向厚度不大，内部径向应力仍在允许范围以内，因此多层转子结构可使飞轮线速度和储能密度得到提高。图 3 为多层结构的飞轮转子图<sup>[5]</sup>。

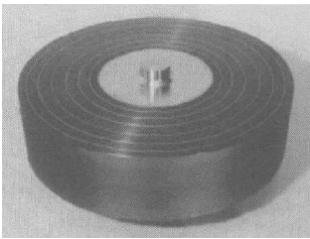


图 3 UT-CEM 多环过盈装配的复合材料飞轮

1.2 轴承支撑系统

飞轮的支承方式主要有机械轴承、电磁轴承、高温超导磁轴承和永磁轴承四种，也有四种中的某两种组合。

传统机械轴承的摩擦系数较大，不适宜在高速、重载的飞轮储能装置中作飞轮转子承重用，但其结构简单紧凑、坚固，一般作紧急状态时的备用轴承。

近几年来，磁悬浮轴承因具有高转速、无机械接触、无摩擦、不需润滑、寿命长、动态特性可调等突出优点，特别适合应用在飞轮储能系统中<sup>[6]</sup>。

随着高温超导材料的出现，许多国家开展了以高温超导磁轴承研究为中心的飞轮储能系统的研究。系统中的高温超导磁轴承是利用永磁体的磁通被超导体阻挡而产生的排斥力使飞轮处于悬浮状态的原理制造的。由于这种排斥力具有自控性，与主动磁轴承不同，不需供电，也不需要复杂的位置控制系统，具有转速高、摩擦小的优点，而且还可以使轴承结构紧凑和小型化。

然而，主动磁轴承体积大，需要消耗较大的控制功率，临界转速低，成本高；而高温超导磁

轴承技术目前尚不成熟，且需要复杂的制冷装置，不利于装置的小型化。因此以上两种轴承支承方式都不是很理想。

近年来，稀土永磁发展较快，出现了许多高性能的永磁材料，如钕铁硼永磁、钕钴永磁等，采用永磁体可以制成刚度大、对称性好的永磁轴承。但是，仅采用永磁轴承是不可能获得稳定平衡的，至少需要在一个方向上必须采用机械轴承或主动磁轴承才能使之稳定。基于上述考虑，将永磁轴承和电磁轴承结合起来，构成一种具有最小能耗的磁轴承支承系统，在支承系统中永磁轴承支承飞轮转子的绝大部分重量，可以减小电磁轴承的功率损耗。该轴承支承系统具有结构简单、能耗低、寿命长等优点，可以预计，这种永磁与电磁轴承混合控制的磁轴承是未来的发展趋势之一。

### 1.3 电动机/发电机

电动机/发电机是飞轮储能系统能量转换的必备环节。飞轮储存能量时，系统处于电动机运行状态，飞轮加速；释放能量时，飞轮处于发电机运行状态，飞轮减速。对于高速操作的飞轮储能系统，有三种极具潜力的电机技术，即感应电机、开关磁阻电机及永磁无刷直流/交流电机技术<sup>[7]</sup>。而以永磁无刷直流/交流电机应用居多，尤其是对转速在 30000r/min 以上的系统更是如此。

### 1.4 电力电子转换装置

飞轮储能系统在储存与释放能量的过程中，转速在不断变化，电动机/发电机的转速也随之改变。因此，为实现电能稳定的储存与释放，必须在飞轮储能系统与电网之间配备一个电力电子转换装置。储能时通过转换装置将电网电能变成电动机需要的电源形式；输出电能时经转换装置调频、整流、恒压之后，供给负载，以满足不同工况下的需要。目前较多采用 IGBT 功率模块和微处理器技术来控制电动机/发电机以实现能量的快速高效储存与释放，采用变压变频器件完成输入与输出信号的转变<sup>[8]</sup>。

### 1.5 真空/安全保护装置

真空罩的主要功能有两点：一是提供真空环境，降低风损、提高效率；二是屏蔽事故。飞轮转子的转速必须非常高才会有高的储能密度，在空气环境中高速运转的飞轮转子会造成极高风

阻损耗，因此，飞轮转子必须在真空中工作。目前真空度一般可达到  $10^{-5}$  Pa 的数量级。为方便观察飞轮的实际运行情况，一般采用透明的高强度玻璃钢真空罩。

## 2 飞轮储能的应用

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、德国、日本等发达国家，储能技术发展的已比较成熟，主要应用在以下几个方面。

### 2.1 电力调峰

由于用电高峰与用电低谷时电力负荷差超过 10% 以上，所以电力调峰非常重要。飞轮储能发电系统具有能量的存储和释放非常方便的优点，可在任意时间间隔、以任意的规模进行，它可以就近分散放置，且零排放、低噪声，适应环境保护的要求。因此，飞轮储能技术被认为是近期最有希望和最有竞争力的新型调峰技术，国际上大多数研究机构均将电力调峰定为飞轮开发的最终目标<sup>[9]</sup>。

### 2.2 UPS 不间断电源

UPS 不间断电源是一种利用市电或蓄电池能源向负载提供高质量交流电源的设备。飞轮储能装置正在逐步取代 UPS 中的化学蓄电池，特别是用在通信行业的 UPS，由于很多工作在户外，工作环境差，一般的化学蓄电池不能适应，而飞轮储能装置对环境无要求，工作适应能力较强。

### 2.3 电动汽车的飞轮电池

#### (1) 飞轮电池

储能飞轮系统安装在电动汽车里，作为电动汽车的唯一动力源，称之为飞轮电池。研究证明，重 2200 kg 的汽车，以维持 200~250 km 的行程和 10 s 的 10~96 km/h 的加速过程，大约需要 78 kWh 储能量以及 94 kW 的发电功率<sup>[10]</sup>。

上世纪 80 年代初，瑞士 Oerlikon 工程公司，研制成功完全由飞轮供能的第一辆公共汽车。飞轮直径 1.63 m，重 1.5 t，在氢气环境里以 3000 r/min 运行以降低风损。该车乘客为 70 名，行程大约 0.8 km，在每一靠站停车时，飞轮将需要充电 2 min。

经过多年的研究与试验，美国飞轮系统公司(AFS)已经生产出了以克莱斯勒 LHS 轿车为原

形的飞轮电池轿车 AFS20, 这是一种完全由飞轮电池供电的电动汽车。它由 20 节飞轮电池驱动, 每节电池直径 230 mm, 质量为 13.64 kg。电池用市电充电需要 6 h, 而快速充电只需要 15 min, 一次充电行驶路程可达 560 km。

## (2) 飞轮混合电池

飞轮安装在化学电池或内燃机供能的机车上起缓冲器作用与系统协同工作, 称之为飞轮混合电池。汽车制动过程中, 将制动能耗通过电动机转化为飞轮的机械动能储存起来, 成为再生能源。当汽车需大功率工作时, 飞轮再通过发动机将动能释放以供系统使用。研究表明, 合理设计混合飞轮电池, 可节约能耗 30%, 并能减少废气排放量 75%。美国的威斯康星麦迪逊大学、劳伦斯国家实验室、麻省理工学院、德国的磁电机公司和加拿大的 McMaster 大学等目前都在此方面有所研究, 并取得了一定的成果。

## 2.4 航空航天

目前航天器蓄电池的能量密度低、使用寿命有限、工作性能不稳定以及电量不确定, 飞轮储能系统不仅可以取代蓄电池作为航天器储能装置, 还可以利用储能飞轮产生的动量矩对航天器姿态进行有效控制。这种独特的双重功能对于提高宇宙飞船、空间站、人造卫星、运载火箭等诸多航天器的性能有其显著意义。

## 2.5 储存自然能源

太阳能、潮汐、地热、风能等新能源是可再生洁净能源, 但其能量随季节和时刻变化, 而且变化频率快、幅度大, 通常是随机的。在这些能源系统中, 应用飞轮储能则非常适宜, 充分发挥了飞轮系统响应速度快的优点, 使新能源发电系统平稳发电, 使能源得到充分利用。

## 3 结束语

储能飞轮具有很多优点, 但由于技术上的问题使其成本较高, 市场价格也相应提高。不过, 随着新型材料技术和电力电子技术的发展, 飞轮

储能技术越来越显示出它的优越性, 在各国也越来越受到重视。大量的资金投入研究, 目前已经取得了一定的成果, 许多公司已有产品推向市场, 其性能将被越来越多的人所接受。

## 参考文献:

- [1] Darrelmann H. Alternative power storages[J]. Telescon 97. Second International Telecommunicates Energy Special Conference, 1997, 30-40.
- [2] 张铁柱, 罗邦杰, 吴淑荣, 等. 高速储能飞轮的设计与分析[J]. 机械工程学报, 1993, 29(1): 24-29.
- [3] Post R F, Fowler T K, Post S F. A high-efficiency electromechanical battery[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81 (3) : 462-474.
- [4] 李文超, 沈祖培. 复合材料飞轮结构与储能密度[J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 96-101.
- [5] 秦勇, 夏源明. 复合材料飞轮结构及强度设计研究进展[J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 750-756.
- [6] 方家荣, 林良真, 夏平畴, 等. 超导混合磁力轴承的发展现状和前景[J]. 电工电能新技术, 2000(1): 27-31.
- [7] Zmood R B, Qin L J, Kirk J A, et al. A magnetic bearing system design methodology and its application to a 50 Wh open core composite flywheel[C]. Proceedings of the 32nd Intersociety (Energy Conversion Engineering Conference, 1997, IECEC-97). 1997 (4) : 2306-2311.
- [8] Koshizuka N, Ishikawa F, Nasu H, et al. Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems[J]. Physica C, 2003, 386: 444-450.
- [9] 张建诚, 陈志业, 杨以涵. 飞轮储能技术在电力系统中的应用[J]. 电力情报, 1997(3): 4-7.
- [10] 李纪纲, 徐鹏云, 泰红星, 等. 飞轮电池在混合动力电动汽车中的应用[J]. 微特电机, 2008(6): 58-60.

## 作者简介:

盛吉 (1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事变电检修工作, E-mail: njjust\_sjmax@163.com。