

参考资料

飞轮混合动力系统技术跟踪研究白皮书

常州海科新能源技术有限公司

引言

现代飞轮混合动力系统（Flywheel Hybrid Power Systems，简称“飞轮混动系统”）技术是近十年在欧洲发展起来的基于先进变速箱技术的绿色汽车动力技术，与七八十年代兴起的飞轮电池储能技术有着本质区别。

自 2009 年后在 F1 大赛和 Le Mans 耐力赛等汽车技术最高展台上崭露头角，由于其技术先进性及性价比优势，此项技术已被越来越多的业内权威认定是下一代节能与新能源汽车动力主流技术之一，为节能与新能源汽车的规模推广应用提供了技术和经济可行性，并将从根本上突破日系汽车厂商在混合动力领域的技术垄断和领先地位。欧洲的高端汽车大厂如保时捷、沃尔沃、捷豹等均已迅速跟进投入并声称将于 2015 年推出商业化的产品，并带动 SKF，GKN，Ricardo 等著名零部件供应商和工程公司跟进（参见美国能源部报告）。

飞轮混动系统结合先进变速箱控制技术如 CVT，电动无级变速 EVT 等，充分发挥飞轮的高功率比特点，不但有效地解决了现有节能与新能源汽车中普遍存在的因电驱动系统功率限制而造成的动力与节能效果不足问题，而且飞轮的机械功率可直接耦合到传动系，大大提高了再生制动的效率及车辆的加速性能，这是飞轮混动系统具有高性价比的主要原因。目前，飞轮混动系统有三种基本形式：

储能式：其系统结构与飞轮电池相似，只是飞轮所储能量大大降低，因而其安全性和陀螺效应可忽略不计；

机械式：飞轮通过 CVT 与车轴直接相连，其功率和能量传送通过 CVT 控制实现。此系统除 CVT 控制外，不需功率电机和动力电池，因而也称“纯机械式”飞轮混动系统；

电动式：飞轮通过行星齿轮和调速电机等构成的电动无级变速系统与车轴直接相连，其功率和能量传送主要通过机械系统，但也可以通过调速电机来进行功率和能量管理。此系统仍需电机驱动和动力电池，但电驱动系统容量可大幅下降至系统总功率和能量的几分之一。

国外目前已经开发成功的飞轮混动系统主要有储能式和机械式两种。其中英国的威廉姆斯混合动力有限公司主要开发高端赛车和超跑车用储能式飞轮混动系统；另一家英国公司 Flybrid 则集中在“机械式”飞轮混动系统。国内常州海科新能源技术有限公司则致力于“电动式”飞轮混动系统的研发，将飞轮、控制电机与汽车传动系统，以创新的结构通过行星齿轮连接起来，再用创新的控制方法实现了新颖的电混合无极变速。目前这三家专业公司都在星光照耀与主机厂合作开发节能与新能源汽车乘用车型并计划于 2015 年前推出市场。

一、飞轮电池技术及飞轮混动系统技术发展历程

(一) 飞轮电池及飞轮混动系统技术特点

现代飞轮混合动力（Flywheel Hybrid Power）系统技术是近十年在欧洲发展起来的基于先进变速箱技术的绿色汽车动力技术,与七八十年代兴起的飞轮电池储能技术有着本质的区别。飞轮电池和飞轮混动系统的结构对比如图：

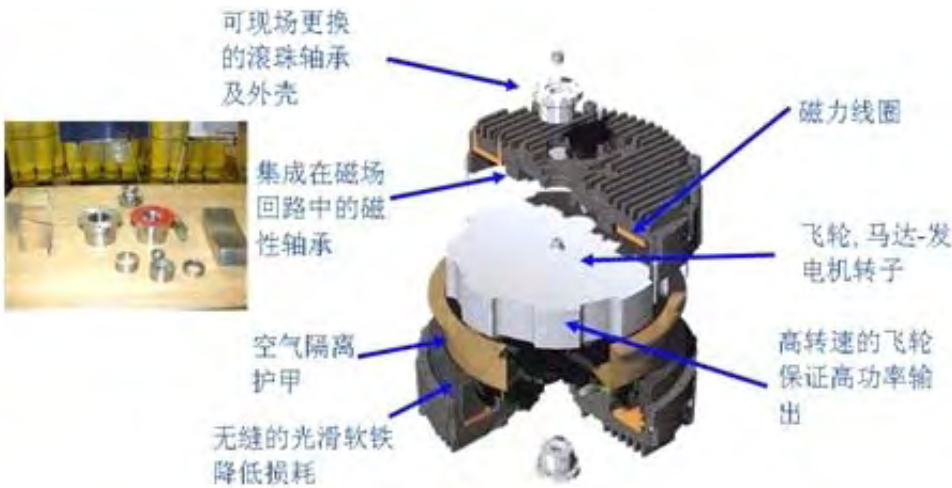


图 1A 飞轮电池结构

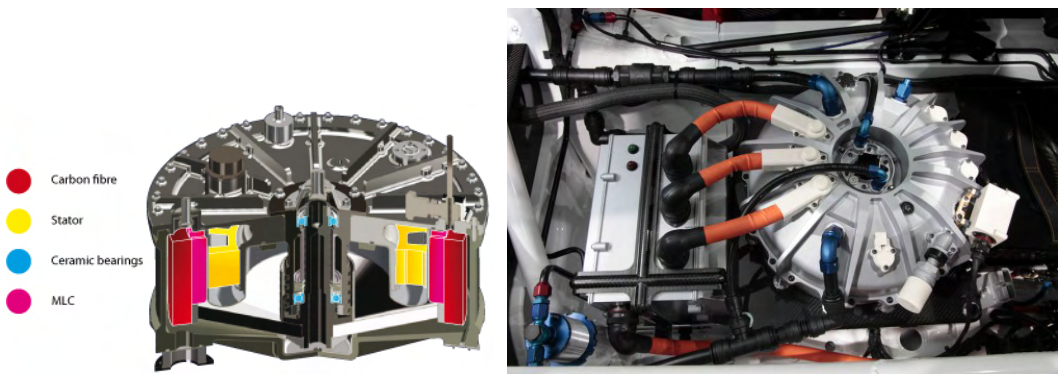


图1B “储能式”飞轮混动系统结构

可见储能式飞轮混动系统其系统结构与飞轮电池储能系统相似,但是由于其飞轮所储能大大降低（通常是飞轮电池的几十至百分之一），因而其安全性和陀螺效应可忽略不计。而其他形式的飞轮的机械功率还可以通过先进变速箱技术直接耦合到传动系，譬如使用 CVT 或电动无级变速箱（EVT）。

飞轮混动系统与飞轮电池的关键不同在于：飞轮电池主要强调的是高能量储备、低能量耗散，因此其飞轮重量相对更大，转速更高，降低能量耗散的手段要更强。在这种限制条件下，安全性比较难保障，降低能量消耗的措施（如非接触式磁轴承）成本也十分高昂，因此不具备在汽车上应用的成熟条件。

而飞轮混动系统强调的是功率密度要大，在车辆加速时能够很好地满足短时高功率需求，履行其辅助主动力源的职责，而对飞轮能量的储备要求够用就行，因为飞轮系统可以在

车辆的频繁刹车中不断吸收能量，这样就避开了飞轮电池对转速、转子质量，和维持能量低耗散的苛刻要求，使得其在安全性和成本上具备了在汽车上应用的成熟条件。

飞轮混动系统的主要技术特点是：

(1) 稳定主动力源功率输出。在汽车起步、爬坡和加速时，飞轮混动系统能够进行瞬时大功率输出，为主动力源提供辅助动力，并减少主动力源的动力输出损耗。在保持相同动力性能情况下，发动机可以做得更小，从而油耗和排放也更低。此外，其不受化学电池放电深度限制，飞轮能量可以较彻底地释放到动力系统中去。

(2) 提高能量回收的效率。机械飞轮的功率密度远高于相同功率的大功率动力锂电池，其功率密度可达 5000~10,000W/kg，成本也远低于它。在汽车下坡、滑行和制动时，飞轮混动系统能够快速、大量地存储动能，且能量储存速度不受“活性物质”化学反应速度影响，相较深度混合动力系统，可回收的刹车能量比例也由 35%提高到 70%。因此相对于传统混合动力系统昂贵的电池组和电驱动单元，飞轮混动系统是低成本和高效的选择。

(3) 相对于传统混合动力系统，其系统使用寿命完全可覆盖车辆全寿命周期，且系统维护周期长，无任何有毒材料，对环境无污染。

(二) 飞轮电池及飞轮混动系统技术发展历程

第一阶段（2002~2006） 研发阶段

- 2002 年：荷兰埃因霍温大学（TU/e）的科研团队创立 Drive-Train Innovations 公司，开展研究“机械式”飞轮混动系统的工程应用；
- 2003 年：英国汽车动力专家 Chris Ellis 创立 Echo Tech，与帝国理工的科研团队进行“电动式”飞轮混动系统的研究及示范；
- 2006 年：英国汽车工程公司 Ricardo 与美国飞轮系统公司（AFS）合作开发基于先进的“储能式”飞轮混动系统的高效电动汽车；
- 2006 年：美国麦格纳汽车电子公司的廖越峰等对 Chris Ellis 的“电动式”飞轮系统的进行分析和改进，完整地提出“电动式”飞轮系统的控制原理及产品概念，并申请多项美国专利。

第二阶段（2007~2009） 验证阶段

- 英国的威廉姆斯混合动力有限公司为 F1 2009 赛季研发了使用飞轮的动能回收系统-储能式飞轮混动系统；
- 另一家英国公司 Flybrid 为捷豹公司开发的“机械式”飞轮混动系统在其 Jaguar XF 原型车上进行了路试。

第三阶段（2010 至今） 产业化阶段

- 2010 年：VOLVO 获 600 万瑞典克朗的政府支持，拟于 2015 年前实现“机械式”飞轮混动系统产业化¹。
- 2010 年，保时捷公司宣布，将在 2012 年推出量产型 Porsche 918 Spyder Hybrid，该车型使用了威廉姆斯混合动力有限公司提供的“储能式”飞轮混动系统。
- 2012 年，由威廉姆斯混合动力有限公司提供飞轮混动系统的 AUDI R18 E-Tron

Quattro 历史性地囊括了勒芒 24 小时耐力赛冠军³。

二、国内外主要国家的飞轮混动系统技术研发情况

目前，国际上对飞轮混动技术的开发和应用主要集中在欧洲，而英国又走在了欧洲的前列。英国政府的“技术战略委员会”近年来同时赞助了三个有关飞轮混动系统的研究项目（KinerStor，FHSPV 和 Flybus），分别由 Ricardo、Flybrid 和 Torotrak 主导，对飞轮混动系统在经济型车、高端车和重型商用车领域的应用进行验证，并以此积累关键技术。

美国和日本鉴于七、八十年代车载飞轮电池研发中出现的一些安全隐患对飞轮混动系统心存疑虑。但 2011 年 12 月美国橡树岭国家实验室受其能源部委派所做的飞轮系统评估报告则充分认识到飞轮系统的巨大潜力和产业成熟性，并坦承欧洲正领导着飞轮技术在轻型和重型混合动力车辆上的应用。鉴于 FIA 于 2009 年 10 月对飞轮系统的强力支持，报告建议美国能源部对飞轮，这种高功率、高能量存储特性的技术在混合动力车辆上的应用在其计划上给予重新考虑。报告还建议美国政府将其用于空间技术上的飞轮标准认证程序应用到车用飞轮混动系统领域，试图通过标准制订权的掌控来改变自己的相对落后地位（参见美国能源部报告）。

（一）国外主要国家的飞轮混动系统技术研发现状

国外目前已经开发成功的飞轮混动系统主要有两种：

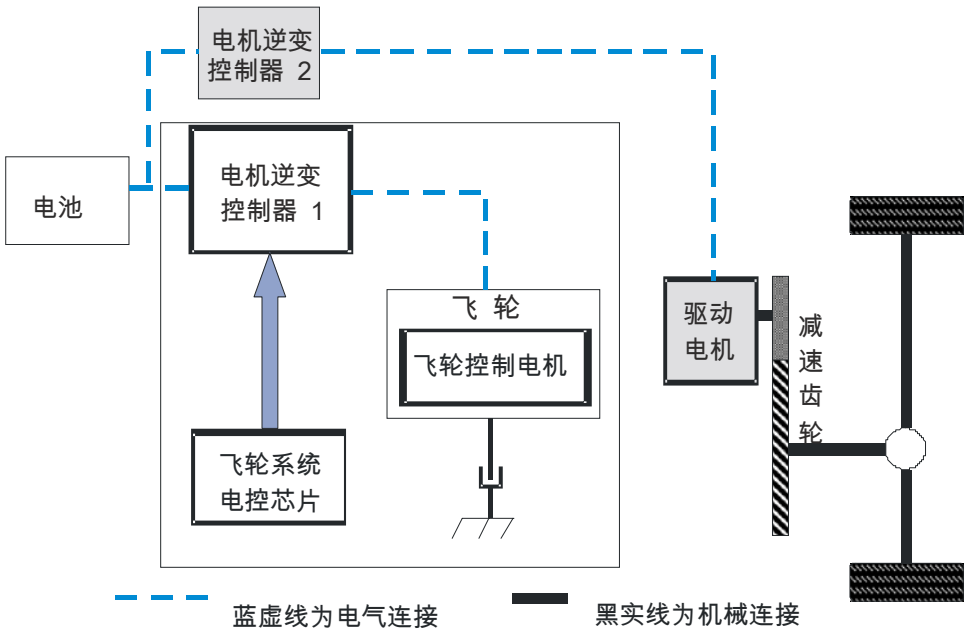


图 2 英国威廉姆斯混合动力有限公司的储能式飞轮混动系统的拓扑结构图

1. 储能式

其结构与飞轮电池类似，都是通过电动机/发电机，和动力电子转换装置来实现能量的转换和传输。其再生制动能量的吸收和飞轮能量的释放完全都要通过动能与电能的相互转化才能实现，其功率的大小完全取决于电力传动系统的容量。所以，其能量的双重转换增加了能耗，而要满足高功率所要配置的大容量电力传动系统（双电机及控制器等）价格不菲。但

其优点是对系统集成度要求不高，应用在像 F1 赛车这样对车辆的配重十分敏感的领域就十分适合，其另外一个优势是能量释放值相对更大。这项技术以英国的威廉姆斯混合动力有限公司为代表⁵，该系统使用了独特的飞轮结构，将调速电机内置于飞轮内部，电机的转子与飞轮转子做成一个整体。

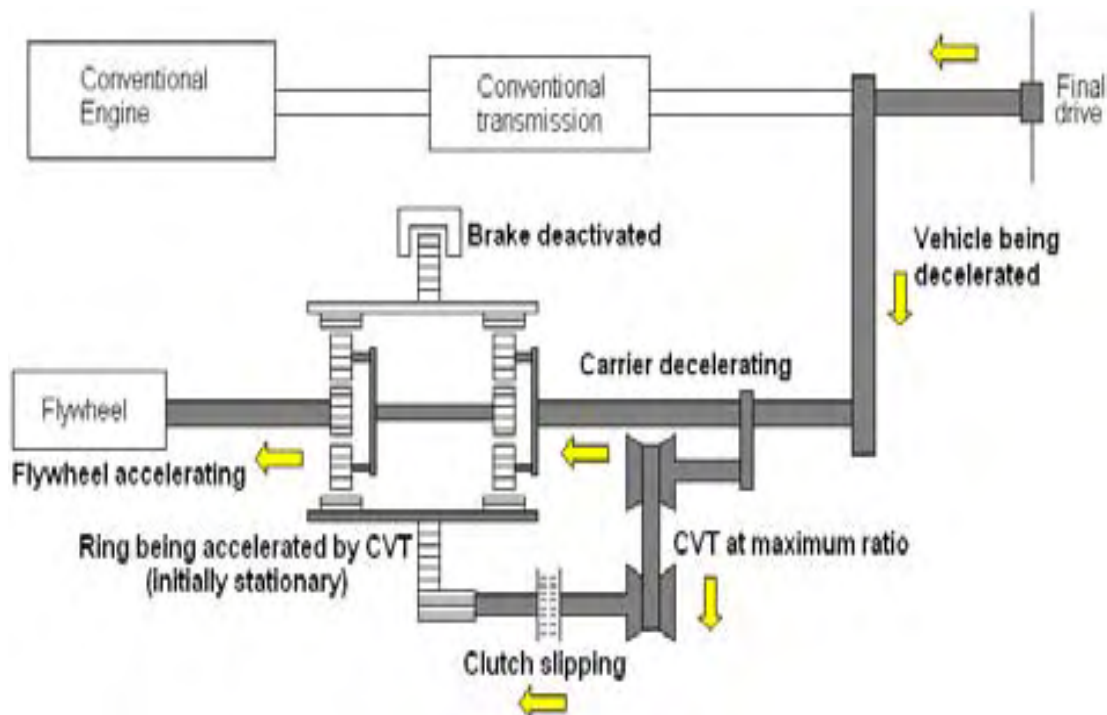


图 3 “机械式”飞轮混动系统的拓扑结构图

2. 机械式

飞轮与汽车传动结构间通过机械无极变速器（CVT）和减速行星齿轮相连接，实现不同速度间的耦合与可调节的飞轮功率输入输出。由于飞轮混动系统的功率（或可认为是其能量的吸收和投送能力）主要取决于其系统中传动系统的功率负荷能力，而“机械式”由于采用了高效且紧凑的 CVT 作为传动装置，所以其功率密度是现有系统中最高的，但其局限在于昂贵且复杂的 CVT 系统。这项技术以英国的 Flybrid 公司产品为代表⁴。

（二）国内飞轮混动系统技术研发现状

国内目前在飞轮混动系统方面主要是跟踪研究，唯一的是例外是 2012 年初成立的常州海科新能源技术有限公司。该公司致力于“电动式”飞轮混动系统的研发，将飞轮、控制电机与汽车传动系统，以创新的结构通过行星齿轮连接起来，再用创新的控制方法实现了新颖的电混合无极变速。

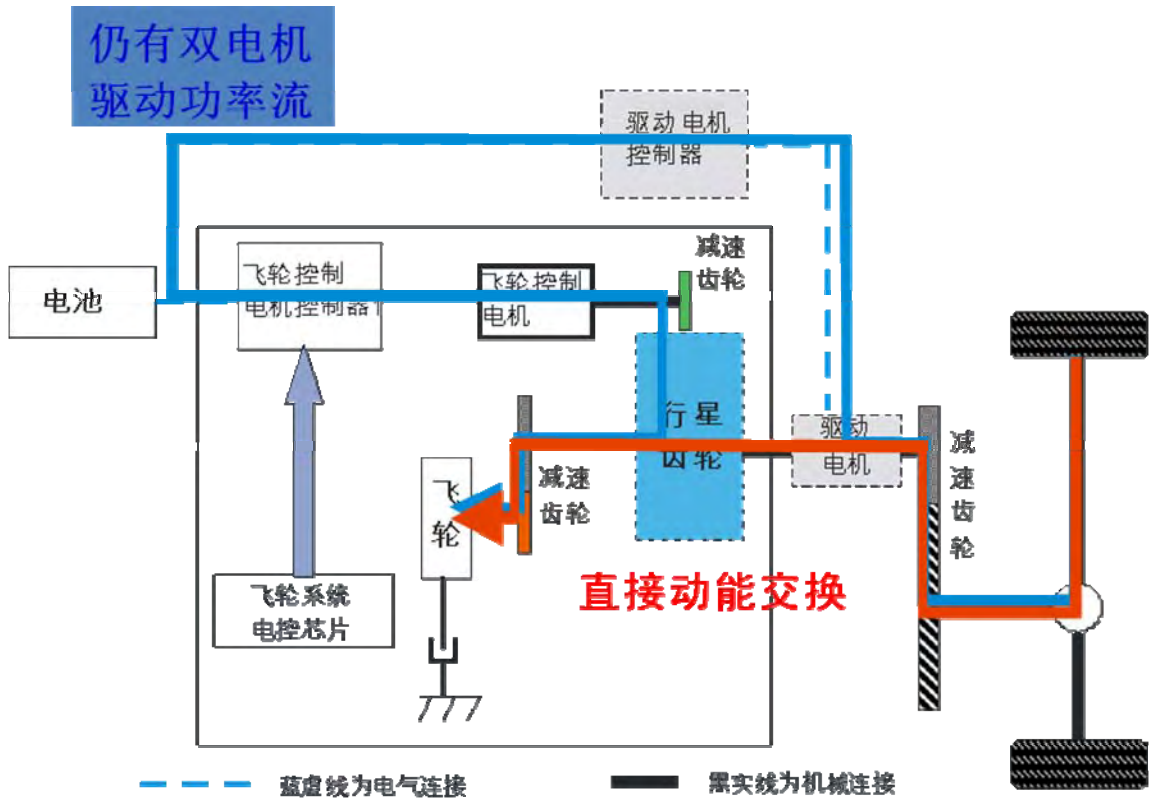


图 4 常州海科新能源技术有限公司的电动式飞轮混动系统的拓扑结构图

比较图 3 和图 4“电动式”和“机械式”两种飞轮混动系统的拓扑结构图,可以清楚看到,“电动式”主要是以电机通过行星齿轮调速机构取代了“机械式”的 CVT 调速机构,从而实现高性能,高可靠性的扭矩和速度控制。

（三）国内外飞轮混动系统技术路线对比分析

当前世界主要的飞轮混动系统研发公司所采取的三条技术路线已经在上节说明了。下表是三种飞轮混动系统技术路线简要对比。

研发企业	Flybrid ⁶	Williams Hybrid power	常州海科 ⁷
飞轮混动系统的形式	机械式	储能式	电动式
飞轮的能量输入、输出途径	CVT	电力传动系统	大部分能量通过机械传递,小部分通过双电机功率流
能量转换效率	机械传递的转换效率较高,但 CVT 昂贵且笨重	能量需要双重转换,效率较低	保留了机械式转换效率高的特点
对飞轮控制电机和控制器的要求	低	需要大容量的电力传动系统	相比储能式要求大大降低
飞轮的密封条件	需要密封	需要密封	大气环境

飞轮最高转速 (rpm)	64,500	40,000-45,000	25,000
飞轮制造	轮缘为碳纤维复合材料	使用磁负载复合技术的复合材料	金属
对轴承的要求	陶瓷轴承	陶瓷轴承	钢制轴承
对飞轮保护装置的要求	很高	较高	相对降低
系统集成度	相对较高	不高	相对较低,主要靠软件实现
动力实现形式	单一并联动力形式	单一串联动力形式	多模式动力控制

与威廉姆斯为代表的“储能式”飞轮混动系统相比，常州海科的“电动式”飞轮混动系统由于其大部分能量是通过机械耦合的方式直接传递，只有一小部分能量通过电力传动系统（飞轮控制电机、驱动电机及控制器等），这样就将电力传动系统的容量要求大大降低，而其动力性能和能量转化效率却基本保持了“机械式”飞轮的优点。与 Flybrid 的“机械式”飞轮混动系统相比，由于海科的“电动式”飞轮混动系统使用的是机电一体化的控制系统，其小功率的调速电机可以实现“机械式”所不具备的更加灵活的飞轮加、减速调节；而其独立于机械传动之外的另一条双电机（低成本的）驱动功率流可以使整个系统对能量和功率的管理更有效、更有灵活性；相较于复杂且昂贵的 CVT 系统，不但结构简单、成本低，而且更符合我国当前的产业发展现状。

现代主流节能和新能源汽车动力技术的实质，就是将电驱动系统（电机，电机功率控制器，与电池）作为发动机的辅助动力结合到汽车动力结构中，实现下列三大节能效果：

- 发动机最优效率点运行，及其功率和尺寸的缩减；
- 低速、怠速时发动机停机，全电动模式；
- 动能的刹车回收储存，及加速时释放。

而飞轮混动系统作为电驱系统的替代角色，在向主动力源（发动机）提供辅助动力时，在实现节能效果上，具有效率更高、成本更低、性能更佳等优点，其具体表现为：由于飞轮混动系统的功率密度高，再生制动的能量在回收和释放时，不论是相对低成本的镍氢电池或大功率但昂贵的锂电池，其能量利用效率都更高、输出功率更强，能耗节省更显著，加速性提升也更明显。由于没有了对大容量动力电池的需求，因此其重量更轻，成本也最低。同时，由于其功率密度高，对主发动机的动力辅助效果更好，可以满足更大范围的由于输出功率需求波动对辅助动力的需求，所以在满足相同动力性能的情况下，可以更大程度地降低对发动机的排量要求，从而达到节能减排的目的。

在飞轮混动系统产品开发时，人们都会碰到以下共同问题和挑战：

- 如何保证飞轮系统的安全，虽然相较飞轮电池，其要求已有所降低；
- 如何在成本、效率、功率密度和能量密度等要素上进行权衡，在满足各自不同用途时达到最优性价比。

不同的飞轮混动系统开发商，其安全问题的解决手段不同，譬如威廉姆斯在其飞轮转子

中应用了磁复合（MLC）技术，对飞轮转子防护材料和防护设计的要求大大降低。而要使高速旋转的转子在运行中减少能耗，有些飞轮混动系统将飞轮放置在真空环境中运行。而要保持真空环境，Flybrid 公司选择了其专利技术的密封装置，而 Ricardo（研发中）则选择使用其专利技术的磁耦合装置，避免机械传动部件从真空室穿出。在功率密度和能量密度的权衡上，Flybrid 选择了结构紧凑、飞轮设计质量较小的“机械式”飞轮系统，主要是要突出其高功率密度的特性，对能量的输出值有所牺牲。而常州海科的“电动式”飞轮混动系统在保留了“机械式”大功率、高效率的特性同时，其独特的结构对飞轮材料、飞轮转速、飞轮的使用条件、轴承、飞轮控制电机和控制器等的要求有所降低，也不需要 CVT，所以其性价比较高，而且其灵活多模式的动力控制，适应性更强。

三、发展飞轮混动系统技术的科技建议

2009 年 10 月国际汽联（FIA）竭力支持在混合动力赛车上使用飞轮系统，并声明“对于像飞轮这样能够减少对电瓶的依赖，并可应对内燃机的负荷变化的技术，证明是未来最有前途的方式。”这也与其希望提升汽车效率有关。现在是对飞轮，这个高功率、高能量存储系统在轻型和重型车辆领域的应用进行密切追踪和政策支持的合适时机。

正如 2011 年 12 月美国橡树岭国家实验室受其能源部委派所做的飞轮系统评估报告所指出：飞轮技术特别适合于混合动力总成系统。飞轮可以有效地辅助混合动力传动系统，以满足混合动力汽车在加速时的高功率需求。在能量再生型制动过程中，飞轮通过能量吸收所能达到的功率和吸收效率都远远高于电池所能达到的水平。

在从飞轮和电池的性能比较中得出的一个推论是，飞轮系统的最有效利用是：在提供高功率的同时提供刚好够用的能量储备，从而有效完成其担当辅助动力的任务。飞轮系统相对混合动力电动汽车和纯电动汽车的电池和超级电容而言，可以满足或超越与动力相关的性能指标（放电功率，再生功率，比功率，功率密度，重量和体积）。飞轮可以提供高功率和能量存储，尤其是高功率。

开展深度/插电式混合动力系统装置原始创新，打破深度/插电式混合动力系统专利壁垒，研制深度/插电式混合动力轿车，是我国节能与新能源汽车发展重要任务之一，是以纯电驱动为新能源汽车发展和汽车工业转型的主要战略取向，重点推进纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化，推广普及非插电式混合动力汽车、节能内燃机汽车，提升我国汽车产业整体技术水平的重要实践，是坚持节能与新能源汽车“过渡与转型”并行互动、共同发展的总体原则指导的重要实践。建议国际投入引导性资金，聚集国内外优势力量开展研发。在合适时机，应投入引导性资金，支持飞轮混动系统原始技术创新和突破。

参考文献

- 1 Volvo to test fuel-saving Flywheel KERS system
<http://green.autoblog.com/2011/06/02/volvo-to-test-fuel-saving-flywheel-kers-system-w-video/>
- 2 Names You Need to Know in 2011: Flywheel Battery Technology
<http://www.forbes.com/sites/hannahelliott/2010/11/05/names-you-need-to-know-in-2011-flywheel-battery-technology/>
- 3 Williams to supply hybrid system for Audi Le Mans car
<http://www.f1fanatic.co.uk/2012/03/01/williams-supply-hybrid-system-audi-le-mans-car/>
- 4 Flybrid 公司官方网站 www.flybridsystems.com
- 5 Williams Hybrid Power 官方网站 <http://www.williamshybridpower.com/>
- 6 Flywheel hybrid systems (KERS)
<http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>
- 7 The Economist <http://www.economist.com/node/21540386>
- 8 2011 DoE Report (ORNL/TM-2010/280) : An Assessment of Flywheel High Power Energy Storage Technology for Hybrid Vehicles
<http://www.parrypeoplemovers.com/pdf/Flywheel%20Assessment%20for%20Hybrid%20Vehicles%20Final%20Report%202011.pdf>

用于混合动力汽车的飞轮高功率能量存储技术

评估报告¹

2011 年 12 月

1. 执行摘要²

混合动力技术是一种提升轻型和重型车辆效率和性能的上佳手段。混合动力的技术路径一般是将常规的内燃机（ICE）替换成由较小主动力源（或内燃机）、电传动系统、以及一定形式的能量存储装置组成的混合动力电动汽车（HEV）的推进系统。如果不使用电传动系统，也可以使用带有无级变速装置（CVT）或其它种类的传动装置的机械传动系统。本评估报告的目的是测评先进飞轮高功率能量存储系统的发展现状，以及评估其是否能满足高功率能量存储和能量/功率管理等用途的需要。

为了满足混合动力传动的需要，需要先进的高功率能量储存和转换技术，以解决高功率能量存储，能量/功率管理和辅助动力等问题。先进的飞轮高功率能量存储系统是一种能够满足高功率能量储存和能量/功率转换需要的解决方案。

国际 F1 汽车联合会（FIA）——作为世界汽车运动的管理机构和世界主要汽车组织的联盟——在 2009 年 10 月大力支持飞轮系统。对混合动力汽车，FIA 在声明中称“像飞轮这样能够减少对电瓶的依赖，稳定主动力源的功率输出的技术，是最有前途的方式”。FIA 挑选出飞轮作为其支持的方向。

美国能源部（DOE）指派橡树岭国家实验室（ORNL）制作一份报告，评估用于混合动力车辆上的高功率能量存储飞轮技术的发展水平。这个项目是美国能源部“能效和可再生能源办公室”赞助的“能源部车辆技术计划”的一部分。

这个项目的主要测评工具是一份题为“飞轮能量存储系统技术参数”的调查问卷。这份问卷向进行飞轮系统总成生产的公司和机构发放，没有涉及系统零部件生产商。对美国能源部来说，针对轻型和重型混合动力车辆的应用，所建议的飞轮最低技术指标见下表（与本报告中表格 2 中的主要内容相同）。

车辆应用	输出能量 (kWh)	输出能量 (MJ)	峰值功率 (kW)
轻型	0.3-0.5	1.08-1.80	25-40
重型	2	7.2	150-200

轻型车辆的应用主要指家用轿车，重型车辆的应用则包括 C3 级的中型卡车（如货运面

¹ 英文报告 *An Assessment of Flywheel High Power Energy Storage Technology for Hybrid Vehicles* 由橡树岭国家实验室（ORNL）撰写（报告链接：<http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31707.pdf>）。中文版由常州海科新能源技术有限公司翻译，仅供行业内部交流使用。

² 对应原报告页数 1-3

包车)或 C6-7 级的卡车和巴士(标准的城市公交车)。

飞轮技术特别适合于混合动力传动系统。飞轮可以有效地辅助混合动力传动系统,以满足混合动力汽车在加速时对高功率的需求。在再生制动过程中,飞轮能以远超电池水平的效率吸收极高的能量和功率。

飞轮技术的成熟度在近年来有了相当程度的提高。在重型混合动力车辆领域进行的,最大规模的高功率能量储存系统的应用经验来自于欧洲。在德国,L-3MM(L-3 Communications Magnet-Motor GmbH)项目在飞轮用于重型混合动力车辆方面获得了引人瞩目的经验。从 1988 年起,这个项目的飞轮系统在 17 辆油电混合动力巴士上运营。其中的 12 辆车已经各运营了 60000 小时,或者相当于一百万个加减速循环。所有这些,都对飞轮系统在重型混合动力汽车上的使用安全性进行了可观的验证。此外,有三种飞轮系统在城市轨道交通车辆上得到了测试和验证。在荷兰,机电学概念中心(Centre for Concepts in Mechatronics, CCM)对用于重型混合动力车辆的 α 和 β 型飞轮系统进行了测试,经过安全性改进的 γ 型飞轮系统尚待测试。CCM 的飞轮技术在一项欧洲的技术发展计划里得到了进一步发展。在英国,Parry People Movers 的钢制飞轮系统搭配一个仅 2.3 升的汽车发动机即可高效驱动轨道车辆。在美国,得克萨斯大学的机电研究中心(UT-CEM)已经在了一辆混合动力巴士上对飞轮系统进行了对比验证,而 Tribology 系统公司在给客户的 β 测试里报告了一种飞轮系统样机的情况。

飞轮技术在轻型车辆领域最成熟的应用出现在欧洲,主要在一系列的汽车赛事以及公路车辆的改装评估测试中。Williams Hybrid Power Limited(WHP),Flybrid Systems LLP(Flybrid)和 Ricardo UK Ltd(Ricardo),这些英国公司都开发了用于 F1 的飞轮系统。其中 WHP 使用的是更常用的带有电动机/发电机的电传动系统,而不是机械传动系统。在另一个汽车赛事,纽柏林长距离锦标赛(Nurburgring Long Distance Championship)上,保时捷的 911GT3 R 混合动力赛车在 2010 赛季取得了令人瞩目成功,这辆使用了 WHP 飞轮系统的赛车与赛事规定的标准比赛用发动机相比,其燃油经济性提高了 25%。在最高转速下,WHP 的飞轮系统可以为装置在前轴上的电动机/发电机提供 6-8 秒的共计 120kW(160hp)的动力。2011 年 1 月,保时捷基于 911GT3 R 推出了新的 918 RSR 飞轮混合动力赛车。

Flybrid 的飞轮系统使用了机械动力传动。Flybrid 的飞轮动能回收(KERS)系统在勒芒 24 小时拉力赛中为 Hope Racing LMP1 赛车的内燃机(主动力源)提供辅助动力,2011 年 6 月,它成为了第一辆在此赛事上跑完全程的混合动力赛车。Flybrid 的飞轮系统在其动力传动系统中使用了一个离合飞轮变速器(clutched flywheel transmission 或 CFT),整套系统(包括 CFT)重 17.2 公斤,能够提供 97kW(130hp)的辅助动力。在英国,飞轮混合动力系统高级汽车应用项目(United Kingdom Flywheel Hybrid System for Premium Vehicles project 或 FHSPV),用新型的捷豹 XF 车型为平台,装置了 Flybrid 的飞轮系统。Flybrid 的飞轮系统(包括 CVT)总重 64.9 公斤,转速 60,000rpm,可提供 0.117kWh 的能量。沃尔沃汽车公司(VCC)目前正在对机械动力传动的 Flybrid 飞轮系统进行评估,飞轮重 6 公斤,直径 200 毫米,转速 60000rpm,可以为后轴提供 60kW 的辅助动力,极大地提高了加速性。与诸如插电式混合动力等昂贵的混合动力系统相比,沃尔沃声称飞轮系统能在其车辆上得到更大规模的应用。在捷豹和沃尔沃的应用项目上,最终期望燃油经济性能提高 20%。

Ricardo 的 Kinergy 飞轮系统,使用磁力传动装置将飞轮和变速装置耦合起来,同时又不影响飞轮保护装置的密封。这种设计可以不需要在输出转轴上设置真空泵和真空密封装

置。而且磁力传动可以消除高速齿轮啮合时的磨损和随之而来的震动。磁力传动装置的传动比可达到 10:1，这意味着在空气中转动的输出轴的角速度可以比飞轮低 10 倍。FLYBUS 项目是在 Optare Solo 巴士上对 Ricardo 的 Kinergy 飞轮系统在重型混合动力车辆上的应用进行评估。在这辆巴士上，飞轮以磁力传动的方式与 Torotrak 公司的 CVT 进行耦合，CVT 与装置在车上的 Allison 自动变速箱上的标准取力器进行耦合。这个系统的硬件装置于 2011 年底完成，旨在将燃油经济性提升 8%，未来规划是提升 21%。FLYBUS 项目将用来验证对欧洲现有的 50 万辆巴士进行飞轮系统改装的潜能，其成本只有传统基于电池的混合动力方案的一小部分。使用 Kinergy 飞轮系统的用于轻型混合动力车辆的 KinerStor 项目有降低 30% 油耗及相应 CO₂ 排放的潜力，并且将成本控制在 USD1660。

飞轮的性能参数在这个报告中以峰值功率 VS 输出能量、比功率 VS 比能量、功率密度 VS 能量密度的方式表现，这些数据来自飞轮系统开发机构的报告。通过对飞轮和电池的性能比较，可以得出的一个推论，对飞轮系统最有效的利用体现为：在提供高功率的同时提供刚好够用的能量储备，从而高效完成其担当辅助动力的任务。与混合动力电动汽车和纯电动汽车的电池和超级电容相比，飞轮系统可以满足或超越与动力相关的性能指标（放电功率，再生功率，比功率，功率密度，重量和体积）。

迄今为止，对车用飞轮系统开发机构的最大挑战是其安全性和飞轮保护装置（安全壳）的设计。在飞轮系统的设计和测试阶段，安全性是必须关注的问题，必须确保量产型的飞轮系统的风险足够低。美国的新一代汽车合作计划（Partnership for a new generation of vehicle, PNGV）指出了建立相关设计和操作程序规范的愿望，从而彻底避免飞轮完全碎裂失效情况的发生。飞轮技术的开发者必须努力减少各种飞轮失效情况发生的可能性和所造成的后果。

目前已有一些飞轮安全性方面重要的研究。Magnet-Motor GmbH（L-3MM 项目）对其用于重型混合动力汽车的飞轮系统在 6g 和 15g 条件下进行了冲击测试，结果证明系统相当安全。在用于轻型混合动力汽车的飞轮系统方面，在 Cranfield 的 F1 碰撞测试中心进行的碰撞测试中，Flybrid 用于赛车的飞轮系统在 64,500rpm 的最高转速下经受 20g 以上的减速力的冲击，飞轮没有受到损坏，在测试后仍然转动。

2. 前言³

美国能源部（DOE）指派橡树岭国家实验室（ORNL）评估用于混合动力车辆上的高功率能量存储飞轮技术的发展水平。这个项目来自于美国能源部“能效和可再生能源办公室”赞助的“能源部车辆技术”计划。本评估的目标是确定，在混合动力车辆上用作高功率能量存储和能量功率管理的解决方案，飞轮技术是否是合适、成熟的。

作为本项目的一部分，我们向生产飞轮系统总成的机构发放了一份题为“飞轮能量存储系统技术参数”的调查问卷，或者说，这份问卷没有发放给系统部件的生产商。问卷里所调查的技术参数信息与“飞轮储能技术应用于混合动力和电动汽车领域的评估报告”中所要求的类似，这篇报告由 Abacus 技术公司于 1996 年 7 月为美国能源部撰写（见参考文献 1）。在问卷的指引中，我们要求受访者不要将专利或商业机密等敏感信息填写在问卷中，因为这份报告是要公开发表的。受访者提供的飞轮储能系统的技术参数见附件 A。我们对参与这次

³ 对应原报告页数：4

调查活动、提供飞轮系统技术参数的机构表示感谢。

若用于轻型和重型混合动力车辆，能够引起美国能源部兴趣的飞轮系统最低指标参数见表 2-1。飞轮技术开发机构对各自飞轮系统在“输出功率”和“输出能量”方面的发展目标与表 2-1 中能源部建议的水平是不相符的。一般来说，他们目标中的功率水平高于能源部建议水平，但“输出能量”的指标通常比能源部的低。附件 E 是对轻型混合动力车能量储存需求的评估。本报告建议考虑对一些参数进行修订，比如用于轻型车辆的飞轮系统所要达到的输出能量目标，可以修订至低于表 2-1 所提到的 0.3-0.5kWh 的水平。

表 2-1 对飞轮的参数要求

车辆应用	输出能量 (kWh)	输出能量 (MJ)	峰值功率 (kW)
轻型	0.3-0.5	1.08-1.80	25-40
重型	2	7.2	150-200

轻型车辆的应用主要指家用轿车，重型车辆的应用则包括 C3 级的中型卡车（如货运面包车）或 C6-7 级的卡车和巴士（标准的城市公交车）。

对美国能源部来说，峰值功率和输出能量的最低水平（数值或范围）在文中图 4-1 中以兰色标出以供参考。这个图是根据受访者提供的飞轮系统数据，以峰值功率 VS 输出能量制成。

3. 背景⁴

国际 F1 汽车联合会（FIA），是世界汽车运动的管理机构和世界主要汽车组织的联盟。2009 年 10 月，FIA 在颁布的“环境可持续性汽车运动政策”（Environmentally Sustainable Motor Sport Policy，见参考文献 2）中大力支持飞轮系统，包括如下内容：

“汽车运动要推广能量回收技术。以效率为基础的规则，是整合不同类型的混合动力技术、确保等效性、并促进其质量提升的最优方法。尽管有些汽车制造商也在发展混合动力技术，但有观点认为这并非因为他们是高性价比的降低油耗和 CO₂ 排放的方法，而仅是为了提高其市场地位。包括混合动力技术在内的能量回收系统技术，是汽车业面向未来的基础技术。汽车运动可以为这些技术的发展和市场化作出有价值的贡献。像飞轮这样能够减少对电瓶的依赖，稳定主动力源的功率输出的技术，是最有前途的方式。”

上述针对飞轮技术的有力支持“以从根本上改变赛车运动技术的基础，并为未来公路用车辆的发展作出贡献为目标。”附件 B 包括了 FIA 政策的全文。

3.1 用于混合动力汽车的飞轮高功率能量储存技术

混合动力技术是一种提升汽车效率和操作性能的有效方式。美国能源部认识到这个事实，并进一步赞助了技术的发展。曾经有一些以通过混合动力技术的进步来提升汽车效率并减少排放为目标的项目。混合动力技术，大体来说就是将常规的内燃机（ICE）替换成由较小主动力源和带有储能装置的电传动系统的混合动力电动汽车（HEV）的推进系统。多个

⁴ 对应原报告页数：5-11

研究预测这种技术将极大地提高燃油经济性，提升幅度高达 50%-200%。

先进的飞轮高功率能量存储系统是一种能够满足高功率能量存储和能量/功率转换需求的方式。与其相竞争的技术包括先进电池、超级电容和液-气能量存储装置。本评估报告的目的是为开发混合动力汽车的公司，在利用先进的飞轮高功率能量存储系统来满足其高功率能量存储和能量/功率管理需求方面提供辅助。

飞轮尤其适合于混合动力传动系统。飞轮可以有效地辅助混合动力传动系统来满足重型车辆较大的峰值功率需求。在典型的驾驶工况下，加速和爬坡时，飞轮可以在短时间内为车辆提供相当高的辅助功率。再生制动时，飞轮吸收再生制动功率的效率远远超过仅使用电池的情况。当驱动车辆所需的功率低于车辆主动力源所提供的功率时，多余的能量可被飞轮吸收，以备之后使用。飞轮的这种功率负荷平衡能力对能量/功率的转换和管理是十分重要的。

飞轮高功率能量存储系统对混合动力车来说是理想的负荷调节器。这个调节器有相对较高的功率/能量和比功率/比能量的比率。为了说明飞轮系统满足这种要求的能力，本报告下文的图 4-1 和图 4-2 给出了功率/能量的比率。

飞轮系统的独特之处是其能够将能量和功率解耦。飞轮系统的能量存储和输出主要依赖于飞轮的转子，而功率的存储和输出主要依赖于电动机/发电机和相关的动力电子元件的设计和额定功率（电驱动系统）或飞轮系统 CVT 的设计（机械传动的飞轮系统）。对飞轮系统的设计者来说，这种解耦能力是飞轮在混合动力传动系统高功率应用方面的优势。

3.2 混合动力电驱飞轮 VS 全机械式飞轮系统

混合动力车用飞轮系统既可用在电力传动系统中，也可用在机械传动系统中。混合动力电驱飞轮系统必须进行机械能-电能，电能-机械能的能量转换。这种能量转换需要在飞轮上装置一套电动机/发电机，并再装置一套机械连接在变速箱或车辆的驱动轴上的电动机/发电机。对电驱飞轮系统来说，能量以电能的形式从飞轮输入或输出。对机械式飞轮来说，飞轮是通过无级变速箱（CVT）与驱动轮耦合在一起，能量以机械能的形式从飞轮输入或输出。将电驱系统与机械系统结合起来也是可行的。

机械式动力传动系统有一些很有吸引力的特点：简单、紧凑，并且相对较轻；不需要电动机、发电机、电力电子系统、高电压或强电流。然而，就目前的发展水平，机械式动力传动系统还存在着诸如旋转真空密封技术、效率和可靠性等技术问题。机械式系统的固有优势是能量始终以机械能的形式存在，没有机械能-电能，电能-机械能转换（或对电池来说，进一步从电能到化学能，再从化学能到电能）所带来的能量损失。所以，混合动力机械传动系统相比电力传动系统，在再生制动时，潜在的循环效率更高。两者的比较见图 3-1。

这份调查问卷受访者中的多数在第 4 部分论述中建议使用混合动力电驱式飞轮系统，而 Flybrid, HyKinesys 和 Ricardo 这三家则建议使用全机械式飞轮系统。

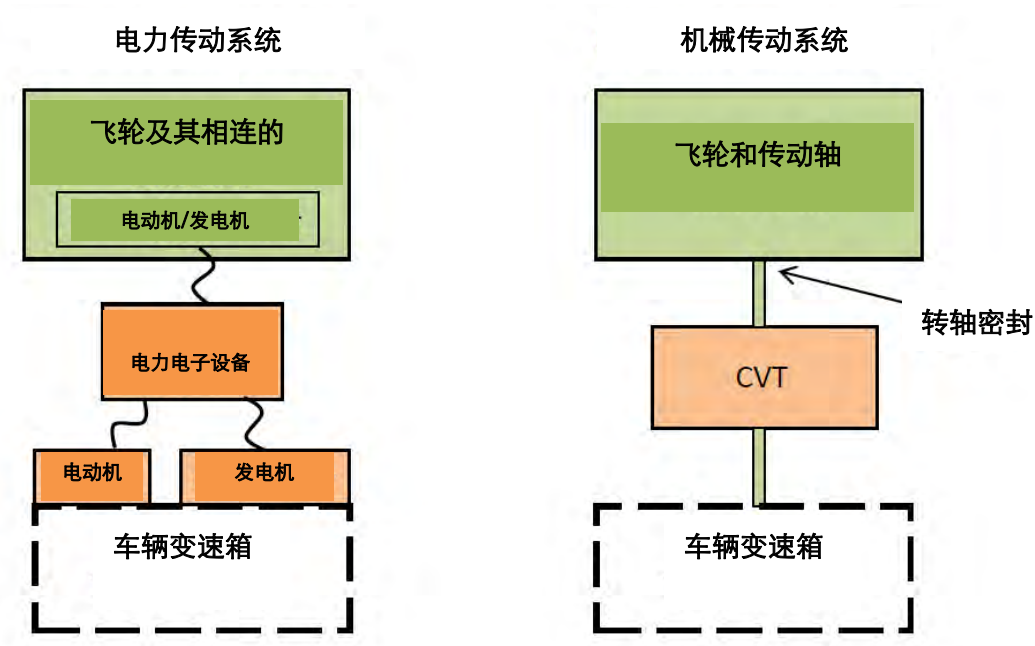


图 3-1 典型的混合动力电驱和机械式能量存储和功率输出系统比较图

3.3 能量存储和输出

我们先就旋转机械系统的机械学知识进行一个简要的论述。更详细的论述见欧盟有关间歇性可再生能源回收技术的研究报告（见参考文献 3），和桑地亚国家实验室有关固定式能量存储系统的应用研究报告（见参考文献 4）。存储在飞轮转子中的动能 E_k ，可以在下面的公式中得出：

$$E_k = 1/2 I \omega^2 \tag{1}$$

其中：I 是转子的转动惯量， ω 是角速度

飞轮存储的（毛）能量和飞轮输出的（净）能量可以通过对公式 1 中的角速度加以限制来表述。

$$E_{\text{stored}} = 1/2 I \omega_{\text{max}}^2 \tag{2}$$

$$E_{\text{delivered}} = E_{\text{stored}} - E_{\text{min}} = 1/2 I (\omega_{\text{max}}^2 - \omega_{\text{min}}^2) \tag{3}$$

其中： ω_{max} 和 ω_{min} 是飞轮运行的最大和最小速度限值

图 3-2 是用等式 (3) 除以等式 (2) 作图，在这里输出能量/存储能量的值在 0-1 之间。

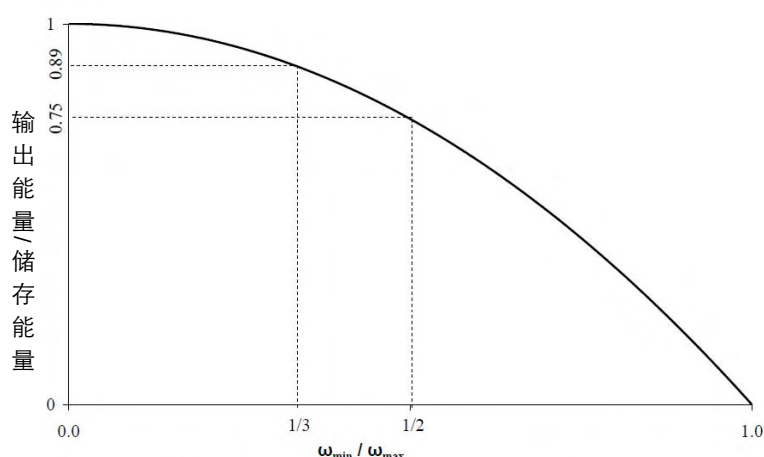


图 3-2 输出能量 VS 速度比

大部分能量是在高速时存储的，公式（1）显示动能与 ω^2 成正比。在速度逐渐减小时，输出能量立即也减小。运行速度的下限也会影响到转子的循环疲劳寿命，以及电驱式飞轮系统中与电动机/发电机相连的电力电子组件的效率，或机械式飞轮系统中 CVT 的操作。

多项研究表明（见参考文献 3,4），对飞轮的固定式应用来说，飞轮运行速度比 $\omega_{\min} / \omega_{\max}$ 达到 1/3 时，所存储的能量才是有用的。很多时候，对飞轮在车辆上的应用来说，运行速度比要更保守些，达到 1/2。在图 3-2 中可以看到，当运行速度的下限速度达到最高转速的 1/3 和 1/2 时，存储能输出的比例分别为 89% 和 75%。

飞轮的高速运行也对系统功率有正影响。旋转系统的功率由以下公式可以得出：

$$P = T\omega \quad (4)$$

其中：T 代表驱动系统的扭矩， ω 是角速度

电驱式飞轮系统的扭矩通过电动机/发电机来实现，而机械式飞轮系统的扭矩通过 CVT 来实现。通过公式（4）可以看出，电驱飞轮系统的电动机/发电机扭矩限制了最小运行速度。当速度降低时，驱动系统的扭矩必须提高以保持连续性的机械功率，这使得保持很低的运行速度既困难又不可行。

高强度的飞轮转子由纤维增强复合材料构成，飞轮能够以非常高的角速度旋转，这使得飞轮以较小的惯量（或质量）来满足动能储存的需求。

3.4 飞轮的应力和材料

纤维性能对飞轮储能的影响，可以量化地展示出复合材料的益处。为简化分析，可以认为理想化的飞轮所有的轮缘质量都集中在半径为 r 的薄圆环上，如图 3-3 所示。

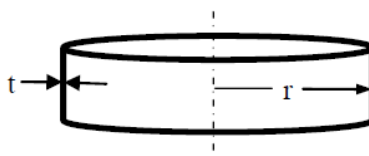


图 3-3 理想化的飞轮——厚度为 t 的旋转薄圆环

则其惯性矩的公式为：

$$I=mr^2 \quad (5)$$

m 代表理想化的 0 厚度薄圆环飞轮的总质量

将公式 (5) 替换到公式 (1) 中便得出：

$$E_k=1/2mr^2\omega^2 \quad (6)$$

由于理想化的飞轮全部质量都集中在半径为 r 的圆环上，所以在这个环上的圆周应力从附件 C 可以得出：

$$\delta=\rho r^2\omega^2 \quad (7)$$

ρ 代表圆环材料的密度

在公式 (7) 中为 $r^2\omega^2$ 求解并将其替换到公式 (6) 中便得出：

$$E_k=1/2m\delta/\rho \quad (8)$$

比动能，定义为单位质量的动能，当 δ 最大也达到最大，所以：

$$E_{\max}/m=1/2\delta_{\max}/\rho \quad (9)$$

以上公式显示出，为增加飞轮的储能能力，飞轮材料需要高强度和低密度。

表 3-1 是在设定所有飞轮质量都为 1kg 的基础上，以公式 (9) 来评估一系列不同的飞轮材料。其中金属轮缘的强度是指在金属厚度为 1 英寸的条件下测得的拉伸屈服强度。复合材料明显优于金属。在质量相等的情况下，最好的复合材料比相同质量的金属材料的储能量高出一个数量级。碳纤维加强型复合材料明显优于玻璃纤维加强型复合材料。下表中所有的复合材料，其纤维部分的体积占比都为 65%，纤维强度转化设定为 75%。于是，相比纤维的强度，复合材料的强度有 51.3%降低系数。

表 3-1 不同材料的薄圆环飞轮的最大比能量

飞轮轮缘材料	密度 (g/cm ³)	拉伸屈服强度 ¹ $\delta_{\max}$ (MPa)	最大比动能 (1kg 圆环) $1/2\delta_{\max}/\rho$ (Wh/kg)	最大圆周速度 或端速度 (m/s)
全金属材料薄圆环				
铝 7075 T6 ²	2.80	469	23.3	409
钛 Ti-6Al-4V, STA ³	4.43	965	30.3	467
钢 4340, QT ⁴	7.70	1500	27.1	441
全复合材料薄圆环 (纤维部分体积比都为 65%， $\rho_{\text{epoxy}}=1.28\text{g/cm}^3$)				
E-玻璃纤维/环氧树脂	2.15	1679	108	884
S-玻璃纤维/环氧树脂	2.07	2235	150	1038
AS4 碳纤维/环氧树脂	1.61	2111	182	1145
IM7 碳纤维/环氧树脂	1.61	2589	224	1270
IM9 碳纤维/环氧树脂	1.62	2993	257	1360

注释：

1. 金属的拉伸强度为屈服强度，因为金属发生屈服现象后，飞轮转子就会变得不平衡。而对于复合材料，拉伸强度是指最大强度。
2. 热处理：T651，厚度 0.500-1.000 英寸，A 基准强度（参考文献 5）
3. 热处理：以 1700 华氏度的溶液处理 1 小时，水中淬火，在 1000 华氏度成熟 3 小时，空气冷却；厚度 0.751-1.000 英寸，S 基准强度（参考文献 5）
4. 热处理：在融盐中淬火，回火，这样 90% 的马氏体集中在中心
5. 锻造材料厚度 1.13 英寸，A 基准强度（参考文献 5）

在表 3-1 中的能量是比值，需要乘以轮缘质量方可得到存储的总能量。例如，用 IM9/环氧树脂制成的 10kg 理想化轮缘最大的动能是 2570Wh。由此可知为什么复合材料的转子对车用飞轮非常有价值了。表格中的比动能是在材料极限强度下的；最大可用的比动能要小于表格中的数值，因为需要保留应力余量，从而保证运行的可靠性和安全性。此外，局部应力也必须要考虑到，例如毂和轮缘的连接处。

需要注意到，一个理想化的薄圆环飞轮所储存的能量与轮缘半径无关。在公式（6）中将 $r^2\omega^2$ 用 v^2 代替，可以得到：

$$E_k = 1/2mv^2 \quad (10)$$

这样很明显可以看出 E_k 是轮缘外半径处速率 v 的函数，这也常被称为圆周速度或端速。在本评估报告中，圆周速度和端速是通用的。同样的，公式（7）中的环向应力也可以被看做速率平方的函数。因此，转子超速失效是过高的轮缘圆周速率的函数而非角速度 ω 。最高圆周速率（表 3-1 最右列） $v=(\delta/\rho)^{1/2}$ ，是通过将材料拉伸屈服强度代入公式（7）中的环向应力计算出来。

我们之前是用一个所有质量都集中在半径 r 处的理想化转子考虑这个问题的，对于薄轮缘来说是这个假设与实际情况很接近。但是，对于不同厚度的厚轮缘或转子，转子的应力场则复杂得多，在附件 D 中有详细说明。轮缘形状的选择是在高比能量和高能量密度之间的权衡。如果用半径比 R_{in}/R_{out} 表示轮缘内外半径的比值，厚轮缘比能量的公式为：

$$\text{比能量} = \text{轮缘能量} / \text{轮缘质量} = (v^2/4)[1 + (R_{in}/R_{out})^2]$$

如图 3-4 所示：

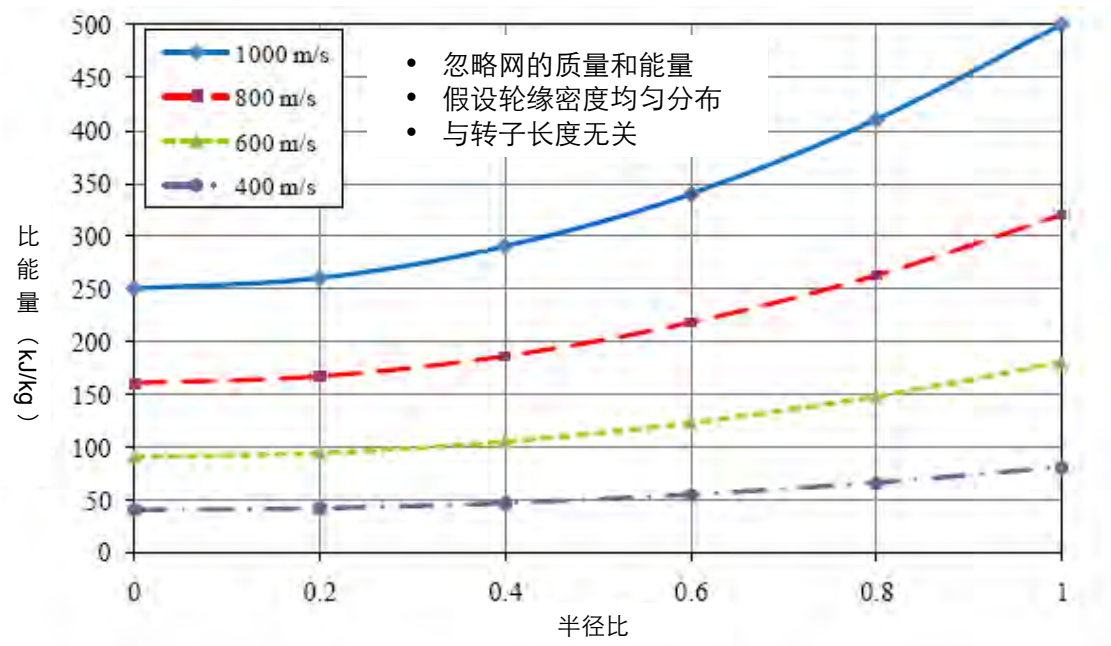


图 3-4 飞轮轮缘比能量 VS 半径比和速率

这说明由于需要维持飞轮合理的体积，可达到的最大比能量将有所降低。例如，若半径比为 0.8，最大比能量会降低至薄圆环最大比能量的 82%。

薄圆环最大比能量 (R_{in}/R_{out} 约等于 1) 是均匀分布的圆盘的 2 倍 ($R_{in}/R_{out}=0$)。

轮缘能量密度的公式为：

$$\text{能量密度} = \text{轮缘能量} / \text{轮缘体积} = (\rho v^2 / 4) [1 - (R_{in}/R_{out})^4]$$

图 3-5 为典型的碳纤维/环氧树脂复合材料转子（密度为 1.604g/cm^3 ）的能量密度。

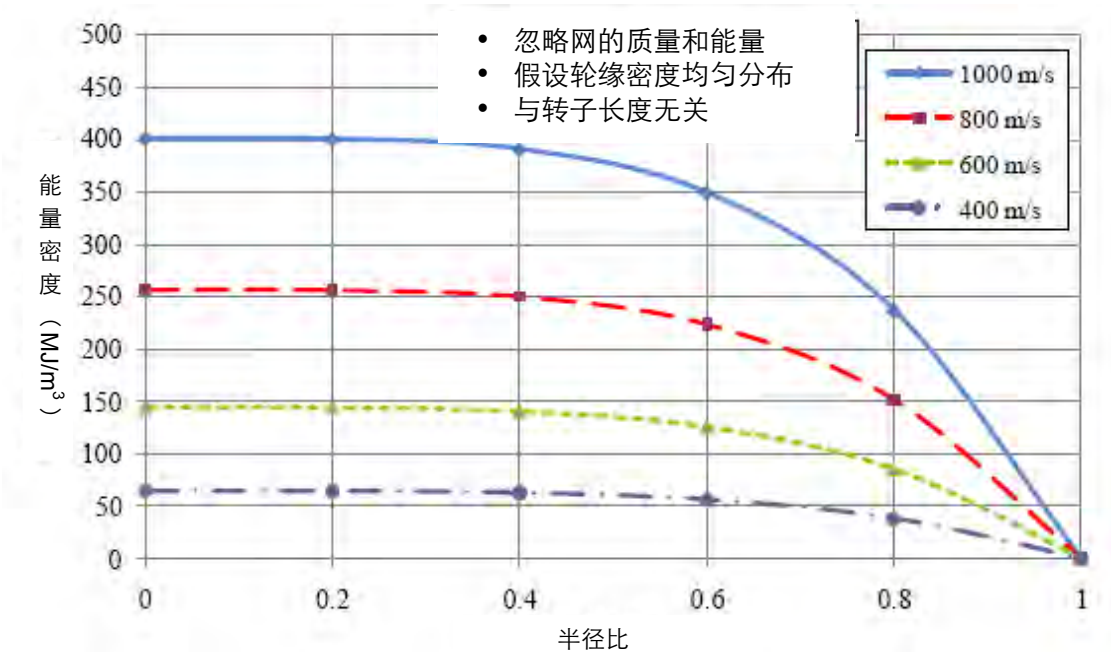


图 3-5 飞轮轮缘能量密度 VS 半径比和速率（典型的碳纤维/环氧树脂复合材料转子）

由上图可以看到，随着半径比从 1 降至 0.8，能量密度的变化非常迅速。

金属转子最适宜的形态被称为“恒定应力形态”，是一个特殊形状的、锥形的、没有中心孔的圆盘。这种形态用于金属涡轮机叶轮。即使金属飞轮在设计中使用最优的恒定应力形态，复合材料也拥有更高的可用比动能，这使得它们成为车用飞轮的合理选择。

4. 飞轮高功率能量存储系统的发展现状⁵

此处讨论用于混合动力汽车的飞轮高功率能量存储系统的发展现状和成熟度，主要是给考虑应用飞轮技术的混合动力传动系统的开发者提供方便。我们力图囊括所有开发用于混合动力汽车的飞轮系统的公司和机构。

飞轮技术评估使用的一个重要工具是题为“飞轮能量存储系统技术参数”的问卷。附件 A 中给出了受访者完成的问卷。填写问卷的详细说明在附件 A 的最后，在问卷的脚注上有如下声明：

“此处所提到的飞轮系统包括能量存储转子、电动机/发电机、轴承、保护装置。为了与公开发表的化学电池数据直接比较，电力电子设备的重量、体积以及成本不考虑在飞轮系统内。”

电力电子设备在 Abacus 技术公司 1996 年为美国能源部撰写的飞轮技术评估报告中（见参考文献 1）没有被考虑进去，为了与之前的评估相一致，本评估报告在讨论各种设计时也没有考虑电力电子设备。但为了比较机械和电力传动系统，我们关注了丰田汽车应用电池储能商业化混合动力汽车中，所使用的非储能部件的重量和比功率。如表 4-1 所示，丰田混合动力电传动系统采用了电动机、发电机和功率转换单元，这些产品技术在最新的结构后中已被进一步优化。表 4-1 的数据摘自 ORNL 项目报告（参考文献 6-8），这些报告对应用电池储能商业化汽车的混合动力电传动系统进行了解构和分析，其中重点分析了电力电子设备及其相连的硬件设备。正如表格所列出的，报告中所分析的三种车型均有独立的电动机和发电机，而不是仅有电动机或发电机。表 4-1 中所列的功率是 ORNL 测试的 18 秒电机额定功率。

表 4-1 丰田混合动力电动汽车非储能部件的标称重量和比功率

车型 电机额定功率	2004 普锐斯 50kW		2007 凯美瑞 70kW		2008 雷克萨斯 LS600h 110kW	
	质量 (kg)	比功率 (kW/kg)	质量 (kg)	比功率 (kW/kg)	质量 (kg)	比功率 (kW/kg)
电动机	45.0	1.11	41.7	1.68	44.7	2.46
发电机*	13.2	3.79	17.3	4.05	30.2	3.64
功率转换单元	21.2	2.36	17.86	3.92	17.90	6.15
总和	79.4	0.63	76.9	0.91	92.8	1.19

*定子和转子的重量，不包括外壳的重量

提高单个部件的比功率，非储能硬件的总比功率几乎以两倍的系数提高。我们希望能够

⁵ 对应英文报告页数 13

直接将使用飞轮储能的混合动力机械传动系统结构与最新的雷克萨斯 LS600h 结构相比较。

本评估报告使用从问卷中得到的信息制作了一系列图表。表 4-2 列出了完整回应问卷的机构，也给出了用于图表中的机构简称。图表中采用机构简称会更易于阅读。表 4-3 概述了所有问卷报告的飞轮系统的成熟度。问卷中用于混合动力汽车的飞轮系统的关键性能信息也汇总在表 4-4 中。

表 4-2 回应问卷的机构

	回应机构（在问卷上提供的名称）	本报告中使用的简称
1	CCM: Centre for Concepts in Mechatronics 机电学概念中心	CCM
2	Flybrid Systems LLP Flybrid 系统公司	Flybrid
3	Flywheel Energy Systems Inc. 飞轮能源系统公司	Flywheel Energy Systems Inc.
4	HyKinesys Inc.	HyKinesys
5	Mario Gottfried	Gottfried
6	L-3 Communications Magnet-Motor GmbH	L-3 MM
7	Parry People Movers Ltd	Parry People Movers
8	POWERTHRU	POWERTHRU
9	Ricardo UK Ltd	Ricardo
10	Tribology Systems, Inc.	Tribology Systems, Inc.
11	University Texas – Center for Electromechanics 德克萨斯大学-机电研究中心	UT-CEM
12	Williams Hybrid Power Limited 威廉姆斯混合动力有限公司	WHP

表 4-3 飞轮系统的成熟度

主要开发者	在报告中使用的领域	成熟度
CCM	重型混合动力汽车	CCM 的示范表明飞轮能量存储技术是可用于公交车的灵活的节能减排技术。 α 和 β 型号的 RxV- II 飞轮已在相关环境中进行了测试（在阿尔斯通的 Citadis Tram 以及弗劳恩霍夫研究所的 AutoTram 道路汽车中的示范项目），结果表明技术成熟度（TRL）为 6 级。大量的可靠性验证实验的结果表明， β 型号的安全性不足。已完成提升安全性能的 γ 型号 RxV- II 飞轮的设计，尚有待进行测试、验证和认证。
Flybrid	轻型混合动力汽车	Flybrid 飞轮系统应用于赛车和一些 OEM 汽车制造商的道路汽车。Flybrid 公共领域的客户包括捷豹汽车（Jaguar Cars）和沃尔沃汽车（Volvo Cars）。尤其是捷豹汽车已完成多个月的测试，结果表明可靠性很好。其目前已完成在车上的 7500 万个飞轮的循环，以及 5000 英里的物理测试，结果表明节油率可高达 20%。一些 Flybrid 的客户在量产方面进展顺利。

		预计量产后的飞轮系统价格会较低。新型的基于离合飞轮变速器 (clutched flywheel transmission 或 CFT) 的系统用于 2011 年 6 月的勒芒 24 小时赛事, 为史上第一个完成此项著名赛事的混合动力车提供了动力。CFT 也可能适用于小型混合动力乘用车。
Flywheel Energy Systems Inc.	重型混合动力汽车	在实验室测试和验证了性能指标。进行了实验室中运行超过 1700 小时的性能和汽车仿真测试。这个功能单元可以兼容所有汽车平台的运动。已经进行了倾斜和/或侧倾率为 $10^{\circ}/s$ 的测试, 使用 $\pm 10^{\circ}$ 的弧度, 测试环境为由车辆平台在 1-20Hz 范围内进行动态运动所形成的多样的复合载荷谱。一个与之相似但承受更高应力的复合转子已经测试了超过 105 个循环。目前尚未进行现场试验、 β 测场、或飞轮系统的商业化应用。
HyKinesys	轻型混合动力汽车	进行了部件测试。HyKinesys 坚信 PowerBeam 是提供最高效率混合动力瞬间功率理论上最好的技术路径, 寿命长且成本低。HyKinesys 目前正在证明 PowerBeam 瞬间功率单元 (PowerBeam Surge Power Unit) 也是满足混合动力瞬间功率需求的最可行方案 (通过极限实验测定), 并确定其在实车中性能如何。
Gottfried	重型和轻型	技术成熟度处于初期, 约 75% 已定义。但足以作为接下来的制造和测试提供信心。
L-3 MM	重型混合动力汽车	MDS-飞轮已装载于 17 辆在欧洲运行的混合动力电动城市公交车, 其中第一辆从 1988 年开始运行。12 辆公交车的运行经验: 每辆 6 万小时和一百万个循环。通过了 6g-冲击测试。3 个系统在城铁中进行了示范和测试。一个同样体积的 4kWh 的先进系统在 2008 年夏天已做好测试准备。更大的系统 (4kWh/400kW) 在城铁变电所中进行了示范和测试 (8000h 运行经验)。使用超导磁性轴承的先进飞轮系统在 2008 年已做好测试准备。
Parry People Movers	重型混合动力汽车	商业化产品。Flywheel 系统在 3 个实际运行的车辆中使用。两个在英国斯陶尔布里奇运行的轨道车队的可靠性数据为 99.44% (2010) 和 99.74% (2011 年到现在)。
POWERTHRU	重型混合动力汽车	POWERTHRU 飞轮系统基于以前 Pentadyne Power Corporation and Rosen Motors 的系统。在研发和商业化上投入了超过 4000 万美元, 目前已获得 16 个专利授权, 另有一些仍在申请。2001 年示范了固定式飞轮的全功率样机。截至 2006 年末, 公司发货 (付运) 量达到 100 件。2007 年 Pentadyne 发货量接近 300 件。2008 年预计有超过 500 件第二代产品发货。早前的系统最高功率是 120kW @500VDC, VSS120; 新的产品可达到 190kW@500VDC, VSS+DC。
Ricardo	重型和轻型	Ricardo Kinergy 系统是从赛车运动中发展起来的, 本质上是机械式的。因此其没有动力电子设备。但是基于其已开发的使用情况分析, 它很容易改进, 以实现与其他系统相对接,

		包括变速器（机械传动系统）、电气系统（在起/停时允许电子设备充电），甚至液压系统以减少储压器的质量。采用了不需要旋转密封的设计——被动磁力/磁力密封/齿轮。这避免了对真空管理的需求，比同等机械式行星系统提供了更加高效、高速的扭矩路径。这个系统目前装载于公交车进行试验，并进行用于非公路用车、火车（多模块）、以及乘用车的试验评估。
Tribology Systems, Inc.	轻型混合动力汽车	已生产出样机。两个本质上相似的较小的系统已成功在实验室中测试了成百上千次，正在进行用户的 β 测试。在整个超临界速度范围内，检测到仅有十分之几 g 的缓慢振动。保护装置能良性地避免几种转子实效的情况。Tribology Systems 公司声称损耗很低，转子可以在没有功率输入/输出的情况下运行一年。
UT-CEM	重型混合动力汽车	进行了大量实验室测试，在一辆公交车上进行示范，并准备在火车上进行测试。系统在公交车上用作混合动力系统唯一的储能设备。路试结果表明具有与设计情况相符的能量回收能力，并实现了显著的性能提升。飞轮已经进行 11.2 万次充放电循环，性能指标没有下降。
WHP	轻型混合动力汽车	公司产品的初次应用是在竞争激烈且严酷的 F1 赛车环境中——即用于第二赛季 Porsche GT3R 混合动力赛车上的 WHP 飞轮系统。正在进行用于一系列产品的设计验证。在 F1 项目的基础上，技术已可以满足不同目的的高功率储能的要求，包括混合动力乘用车、混合动力巴士、电动火车、军用，以及可再生能源等。 WHP 目前与很多领域的领军企业开展了样机合作项目。

表 4-4 用于混合动力汽车的飞轮的性能摘要

主要开发者	应用	峰值功率 kW	输出能量 kWh	比功率 W/kg	比能量 Wh/kg	评论
CCM	重型混合动力有轨电车和浮吊的负载均衡	300	4	800	10.6	这些详细指标是指 RxV-II 型 EMAFER（能源再利用的机电蓄电池）飞轮系统。
Flybrid	轻型混合动力 F1 赛车，汽油发动机搭配机械式飞轮混合动力动能回收	110	0.111	8460	8.54	飞轮系统是完全的机械系统，没有电气电子部件。 飞轮通过 CVT 或 CFT 与车辆的变速器相连。当改变传动比以使飞轮加速时，能量被储存；当改变传动比以使飞轮减速时，能量被回用。
Flywheel Energy Systems Inc.	重型混合动力计划用于重型混合动力车辆的处于实验室	120	0.75	800	5	将短时、高功率的处理能力与低质量、小体积相结合。转子需要较大的应力余量和充足的测试经验，以保证整个设备的安全和使用寿命。设备有

	阶段的系统					真空外壳,但并非用于应对转子碎裂的情况。这些性能指标使得设备是重型混合动力汽车的恰当之选。
HyKinesys	轻型混合动力“燃油”和“插入式”混合动力,及高性能纯电动汽车。尤其是高级轿车市场和城市货运车。	100	0.3 2 转子	2000	6	提出了“飞轮电池”的概念。 PowerBeam 是机械式瞬间功率单元,是与完整的混合动力电驱动系统(包括电池、控制器、发电机和电动机)等同的系统集成——飞轮电池加上牵引电动机和控制器,所以仅能在整车层面进行数值上的直接比较。
Gottfried	轻型混合动力	74.6	2.4	未报告	未报告	6 个双锥 14 英寸 (36cm) 的 OD 飞轮,组成球形结构。 比功率和比能量的数值尚待进行硬件的测试。在瞬时、充电和再生制动回收方面表现优异。
L-3 MM	重型混合动力 车辆:城市公交车和轻轨车	300	2	750	5	L-3 MM 的重型车混合动力系统,是 本评估报告中所有重型车混合动力系统中拥有最多运行经验、最高成熟度的一个。在城铁变电所中进行示范和测试的更大的系统在表 4 固定式飞轮中论述。
Parry People Movers	重型混合动力 轨道车辆和轨道电车系统	100- 200	0.9	230	0.92	PPM 车辆公司的飞轮能量存储装置,使得没有电线的电车系统和轨道车可高效率地由较小的发动机驱动。 飞轮使得 2.3L 汽车发动机能够驱动一辆轨道车!
POWERTH RU	重型混合动力 目前主要用于固定式飞轮(电能质量、UPS、负载均衡、储能),其次用于混合动力电动汽车和有轨电车(负载均衡和功率回收)	190	0.667	693 (A) 1292 (B)	2.43 (A) 4.54 (B)	飞轮系统最初是专门为混合动力电动汽车构思和设计的;万向节、保护装置、轴承、以及真空系统都是出于移动的需求而设计的,由于具有较大的即时需求和客户接受度,公司也开发了固定式飞轮市场。目前的配置是配置 A,配置 B 是正在计划中的带有复合外部保护装置的移动配置。
Ricardo	重型混合动力 巴士 (FLYBRID 项目) 和轻型汽车 (KinerStor project)	60	0.22	4000	14.7	Ricardo 飞轮系统是完全机械系统,没有电力电子组件。主动力源是内燃机,装有用于动能回收和负载平衡的飞轮。飞轮和变速器之间的磁性耦合为系统可靠性提供了关键的优势。
Tribology Systems,	轻型混合动力 电动汽车,	40	1	317	7.9	系统包括具有知识产权的、被证明拥有 20 年寿命的轴承,以及完全机械

Inc.	轻型车					的转子动态控制系统, 以及一个专有的安全保护装置。
UT-CEM	重型混合动力是移动平台上化学电池的替代, 如卡车、巴士、火车或卫星	2-2000	0.4-130	770	5	提供的详细的数字是 UTCCEM 设计、制造和测试的系统的范围或典型值。
WHP	轻型混合动力用于以内燃机或燃料电池为主动动力源的混合动力电动汽车的高功率、长寿命储能单元	120	0.36	2180	6.55	WHP 的飞轮解决方案整合了其新颖的、具有知识产权的磁负载复合材料 (magnetically loaded composite, MLC) 技术, 这是最初由 Urenco 从事铀离心机的工程师开发的。在 MLC 系统中的转子磁铁由嵌入在复合基质中的细小的微粒组成。由于飞轮转子中没有其他金属, 涡流损失和发热都近乎零。

4.1 飞轮系统的成熟度

如表 4-3 所示, 飞轮技术已经在近年来有了显著发展。在重型混合动力车辆领域进行的, 最大规模的高功率能量储存系统的应用经验来自欧洲。在德国, L-3MM 项目在重型混合动力车辆的发展和运营上获得了引人瞩目的经验。这个项目的飞轮系统自 1988 年起在 17 辆油电混合动力巴士上运营。其中的 12 辆车, 每辆车已经运营了 60,000 小时, 或者相当于一百万个加减速循环。为了在飞轮系统中考虑到安全运行的问题, Magnet-Motor 的飞轮已经成功通过 6g 冲击测试。这些都对飞轮系统在重型混合动力汽车上的使用安全性进行了可观的验证。在荷兰, CCM 测试了 α 和 β 版本的用于重型混合动力车辆的飞轮系统, 经过安全性改进的 γ 版尚待测试。CCM 的飞轮技术在一项欧洲的技术发展计划里得到了进一步发展。在英国, Parry People Movers 的钢制飞轮系统搭配一个区区 2.3 升的汽车发动机就可以高效驱动轨道车辆。在美国, 得克萨斯大学的机电研究中心 (UT-CEM) 已在一辆混合动力巴士上对飞轮系统进行了验证, 并用飞轮进行了 112,000 个充放电循环的对照测试, 以证明复合转子承受速率循环 (speed cycling) 产生的机械疲劳的能力。其他一些厂家已经开发出进行实验室测验的样机和系统。

飞轮在轻型车上使用最为成熟的案例中, 有一些是在欧洲赛车运动中 (Formula 1, Nurburgring Long Distance, 以及 LeMans)。Williams Hybrid Power Limited (WHP), Flybrid Systems LLP (Flybrid) 和 Ricardo UK Ltd (Ricardo), 所有这些公司都在英国, 它们都发展了用于赛车的飞轮动能回收 (KERS) 系统, 目前正在进行在道路汽车上量产的评估。WHP 使用了一个整合了磁负载复合材料 (MLC) 技术的电动机/发电机, 这个创新的、具有知识产权的 MLC 技术最初是由 Urenco 从事铀离心机的工程师开发的。Flybrid 和 Ricardo 的飞轮系统使用了机械动力传动。Flybrid 的飞轮通过 CVT (无级变速器, Continuous Viable Transmission) 或 CFT (离合飞轮变速器, Clutched Flywheel Transmission) 与车辆的变速器相连, 并通过对传动比的操作的实现了能量存储和回收的控制。Ricardo Kinergy 飞轮的特点是处于气密的真空/密封保护装置中, 飞轮通过磁力与 CVT 耦合。

使用了 WHP 飞轮系统的保时捷的 911GT3 R 混合动力赛车 2010 年在其第一个赛季中取得了卓越的成绩。在 Nurburgring 长距离冠军赛（Nurburgring Long Distance Championship）上，混合动力的保时捷在 2010 年 3 月的第一轮中取得了第六的成绩，在 2010 年 4 月的第二轮中位列第三，在 5 月的 Nurburgring 24 小时耐力赛中至少在 8 个小时中处于领先地位，直到第 23 个小时发动机出现故障。WHP 飞轮系统在再生制动的过程中由两个前轴上的各为 60kW 的电动机/发电机进行充电。当储能最高达到 0.2kWh 的时候，直径为 16 英尺的飞轮转子的转速最高达 40,000rpm（851m/s 的圆周速度）。为了对车辆后方 353kW（480hp）的 4 升水平对置六缸发动机加速驶出弯道或超车时提供辅助动力，驾驶员可以控制飞轮向前轴的电动机/发电机输出高达 120kW（160hp）的动力，持续时间达到 6-8 秒（参考文献 9）。混合动力的保时捷与使用标准内燃机和传动系统的车辆相比，燃油效率大约提高 25%，减少了 20%的停车加油。制动衬片的寿命也更长，在 Nurburgring 24 小时耐力赛中，仅更换过一次，而标准情况下则需更换 2-3 次。飞轮系统在耐力赛中没有被磨损/损坏。相比之下，保时捷赛车运动的主管 Hartmut Kristen 评估，混合动力电动汽车的锂离子电池在 Nurburgring 24 小时耐力赛高强度充放电循环的情况下，大约每 8 个小时就要报废一个（参考文献 10）。

保时捷在 2011 年 1 月发布了其在 911 GT3 R 基础上开发的新型 918 RSR 飞轮混合动力赛车。WHS 飞轮加速器的转速最高达 36,000rpm，在飞轮完全充电的情况下，可以连续 8 秒驱动前轴上两个 75kW（总计 150kW）的电动机/发电机。飞轮为一个安装于后轴前端的 560hp 的 V8 直接喷射式发动机提供补充动力。918RSR 混合动力赛车使得保时捷将混合动力的概念上升至试验阶段。

2011 年 6 月，Flybrid 飞轮 KERS 的瞬时功率为 Hope Racing LMP1 赛车的内燃机提供了辅助动力，并成为第一个完成勒芒 24 小时赛车的混合动力汽车（参考文献 12 和 13）。转速高达 60,000rpm 的飞轮重量仅为 11.4lb（5.15kg）。Flybrid 系统在机械传动系中采用了一个 CFT，这个重 38lb（17.2kg，包括 CFT）的系统额外提供了 97kW（130hp）的动力。CFT 采用了三个齿轮和高速离合器，以传送与车辆的齿轮箱相连的驱动力。

Flybrid 的飞轮应用于 2008 年启动的“英国飞轮混合动力系统高级汽车应用项目”（United Kingdom Flywheel Hybrid System for Premium Vehicles project, FHSPV）开发出的新型捷豹 XF（Jaguar XF）上。捷豹路虎（Jaguar Land Rover）是其中的领军企业，其他联盟成员还有 Flybrid（飞轮）、Prodrive（车辆集成，软件控制和汽车电子）、Ricardo（咨询）、Torotrak（CVT）、Xtrac（CVT），以及福特。Flybrid 转速为 60,000rpm 的飞轮可最高连续 7 秒提供 60kW（80.4hp）的功率（提供总能量为 0.177kWh）。能量储存于 143lb（64.9kg）的飞轮系统中（其中包括 CVT），没有使用电池。预计可实现 20%的燃油经济性提升。捷豹表示，与电动的混合动力系统相比，机械式飞轮混合动力系统体积更小、成本更低、且效率更高。福特表示也正在考虑飞轮-CVT 系统。

沃尔沃汽车公司（VCC）目前正对 Flybrid 机械式飞轮储能进行评估，系统配合使用 Tototrak CVT（参考文献 16，17）。沃尔沃的副主席，Derek Crabb 表示，“2011 年下半年将开始在一辆沃尔沃汽车上进行测试。这项技术具有降低 20%油耗的潜力。此外，这项技术为驾驶者提供了额外的动力提升，使得四缸发动机具有了六缸一样的加速性能”。系统中飞轮重 13.2lb（6 公斤），直径 7.87 英寸（20 厘米），转速 60,000rpm，可为后轴提供 60kW 的辅助动力，极大提高了加速性。Crabb 先生同时表示，“飞轮技术成本相对较低，与诸如插入式混合动力等混合动力系统相比，飞轮系统能在沃尔沃的车辆上得到更大规模的应用。”飞轮技术在减少二氧化碳排放方面能够发挥重要作用，因为在新欧洲标准行驶循环（NEDC，

New European Driving Cycle) 中约有一半的时间需要关闭发动机。

Flybrid 还与 Magneti Marelli Motorsport 合作开发电力传动系统中使用了电动机/发电机的飞轮电容器。

Ricardo 的 Kinergy 飞轮系统采用磁力传动装置将在真空气密/密封容器中的飞轮与变速器装置耦合起来 (参考文献 18)。这种设计可以祛除在输出转轴上设置真空泵和真空密封装置的需要。据称磁力传动装置具有极高的效率 (>99%)，且可以消除高速齿轮啮合时的磨损和随之而来的震动。风阻损失可以显著降低，因为磁力传动装置的传动比可高达 10: 1，这意味着在空气中转动的输出轴其角速度可以比飞轮低 10 倍。Ricardo 正在通过英国技术战略委员会 (UK Technology Strategy Board) 项目对其 Kinergy 飞轮用于重型和轻型混合动力情况进行评估。

FLYBUS 项目是在 Optare Solo 巴士上对 Ricardo 的 Kinergy 飞轮系统在重型车辆混合动力方面的应用进行评估 (参考文件 19 和 20)。在这辆巴士上，飞轮以磁力传动的方式与 Torotrak 公司的 CVT 进行耦合，CVT 与装置在车上的 Allison 自动变速箱上的标准取力器进行耦合。这个系统的硬件装置于 2011 年底完成，可以将燃油经济性提升 8%。若将飞轮升级到 0.56kWh (2MJ)，经济性预计会提升 21%。FLYBUS 项目将用来验证对欧洲现有的 50 万辆巴士进行飞轮系统改装的潜能，而其成本只有传统的基于电池的混合动力方案的一小部分。

KinerStor 项目将评估用于轻型混合动力的两个不同的飞轮系统 (参考文献 21)。在行业中的合作伙伴包括 CTG, JCB, 路虎, SKF, Torotrak 和 WHP。Ricardo Kinergy 系统在机械传动系统中使用了与 CVT 进行磁力耦合的飞轮，WHP 则在电力传动系统中将飞轮与电动机/发电机相耦合。这个项目在仅增加 1,660 美元成本 (1,000 英镑) 的情况下就能够具有 30% 的燃油节约的潜力和相应的二氧化碳减排潜力。一个可能的实施方案是将 Kinergy 飞轮通过磁力与一个在双离合变速器上的取力器进行耦合。

尽管报告关注飞轮在混合动力车辆中作为高功率能量存储系统的应用，但也对固定式飞轮系统作以大致介绍。最成熟的飞轮技术目前体现在混合动力车辆以外的应用中。固定式飞轮不需要面对车辆运行产生的动态负荷，且对轻量化的要求较低，因此已得到蓬勃发展。我们可以通过固定式飞轮系统一窥飞轮系统的成熟度，目前这些系统的商业化应用已非常普遍。若有读者对固定式飞轮有特别的兴趣，本评估报告中所提及的所有飞轮开发机构都可以考虑，此外还有一些完全专注于固定式飞轮的公司。

飞轮技术同时也用于太空领域。NASA 在 21 世纪前期曾开发用于替代国际空间站 (ISS) 能量存储装置的飞轮系统，用于替代 ISS 的镍氢电池组。小尺寸的设备在 60,000rpm 下进行了测试。复合转子长 17 英寸，直径 13 英寸，在转速为 53,000rpm (圆周速度 916m/s) 时输出的能量为 2.8kWh (参考文献 22)。NASA 和空军支持了用于太空领域的标准飞轮和其他飞轮 (见参考文献 32, 5.3 部分有更多内容)。由于 ISS 经费的限制，ISS 飞轮最终没有完成，但 NASA Glenn 研究中心继续支持技术发展，并终有一天将实现飞轮在太空领域的应用。

4.2 飞轮系统的性能参数

比较重要的参数是功率和能量，可以用绝对值和单位质量的值 (比值) 或单位体积的值 (密度值) 来表示。图 4-1 是用峰值功率与输出能量作图，图 4-2 则是用比功率和比能量作图，4-3 是功率密度和能量密度作图，所用数据均为飞轮开发机构在问卷中所报告的值。图

中点的值与表 4-4 所列出的相同。三个图中均列出了轻型和重型混合动力汽车系统的值，为了将二者加以区分，轻型混合动力汽车系统所对应的开发机构名称用常规字体标识，而重型混合动力系统所对应的开发机构名称则以斜体标识。

本评估报告使用输出能量（而不是总能量）计算比能量和能量密度。总能量表示飞轮转子在最大转速时所储存的总动能，但在变速过程中并不可能将旋转的飞轮完全停下，考虑到一部分动能需要用于维持飞轮最小运行速度，因此输出能量小于总能量，正如图 3-2 中所显示的。

图 4-1 显示了按照峰值功率和能量所绘制的飞轮系统点的性能。表 2-1 列出的对用于轻型和重型混合动力系统的飞轮系统所建议的最小功率和能量值也在图中标出。高于最小值的功率和能量水平是可接受的，相反低于此则不行。对轻型车所建议的范围在图 4-1 中以方格形式标出，在方格内部或在方格上部或右侧都是可以接受的。图中的很多飞轮系统的参数已经达到或超过建议的值（有的是达到一个，有的则是两个都达到）。需要指出的是，很多飞轮系统可以以模块形式运行，所以输出能量可以通过使用多模块来实现倍增。例如，HyKinesys 的 PowerBeam 飞轮系统模块使用了几对对转的转子，使得每个转子储存能量加倍。此外，Mario Gottfried 的飞轮系统使用两个模块，从而使峰值功率从一个模块提供的 60kW 增加至 120 kW。从图 4-1 可以看出：a) 为了达到建议的输出能量水平，某个特定开发机构所设计的飞轮系统需要多少个飞轮模块；b) 某个飞轮开发机构的飞轮设计在多大程度上能够满足用于混合动力系统的要求。

用于混合动力系统的飞轮应当有高功率/能量比，从而实现负载均衡器的功能。之前 Abacus 飞轮评估（参考文献 1）已经表明，对于车用来说，功率/能量比率低于 20:1 适合电动汽车，在 50:1 以上适合几乎不需要以纯电模式行驶的混合动力汽车。需要强调的是，这些在参考文献 1 中列出的功率/能量比指的是在轻型汽车的应用。图 4-1 中也标出了功率/能量比为 20:1，50:1，以及 150:1 的参考线。DOE 建议的轻型和重型混合动力汽车所需要的最小输出功率和能量值，其功率和能量比都在 80:1 左右。由于对于飞轮来说，其输出功率和能量都可以独立设计，用于混合动力汽车的飞轮系统可以被设计成高功率/能量比。或者，其他特定用途所要求的功率/能量比也可以通过飞轮系统的设计来实现。

通过图 4-1 也可以看出用于轻型和重型混合动力汽车的飞轮系统的区别。大部分用于重型汽车的飞轮系统（受访者名字为斜体）离坐标轴原点更远，即峰值功率和输出能量值都高于轻型汽车。

图 4-2 描绘了飞轮系统比功率和比能量的设计。按照之前的定义，这些比值是每单位质量的值，即：

$$\text{比功率} = \text{峰值功率} / \text{系统总重量} \quad (11)$$

$$\text{比能量} = \text{输出能量} / \text{系统总重量} \quad (12)$$

其中，系统总重量不包括混合动力电传动系统的电力电子组件的重量，也不包括混合动力机械传动系统中 CVT 的重量。

比功率和比能量值较高代表飞轮系统单位质量的性能更高。

之前讨论的功率/能量比（20:1，50:1 和 150:1）的参考线在图 4-2 中也标识出来。

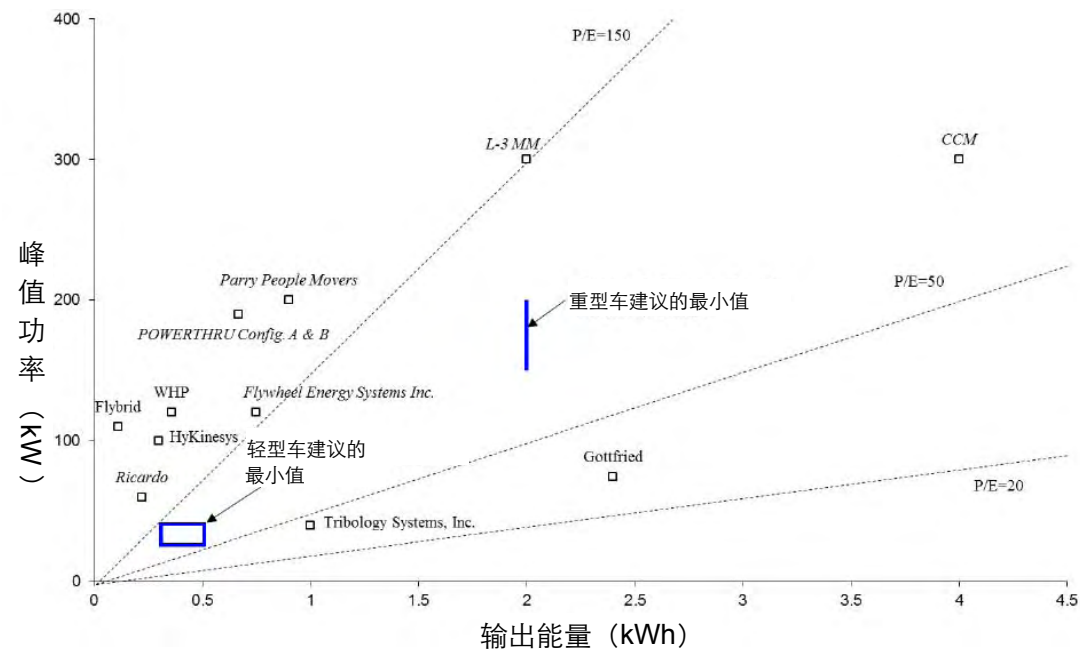


图 4-1 峰值功率 vs 输出能量
(轻型车用常规字体, 重型车用斜体)

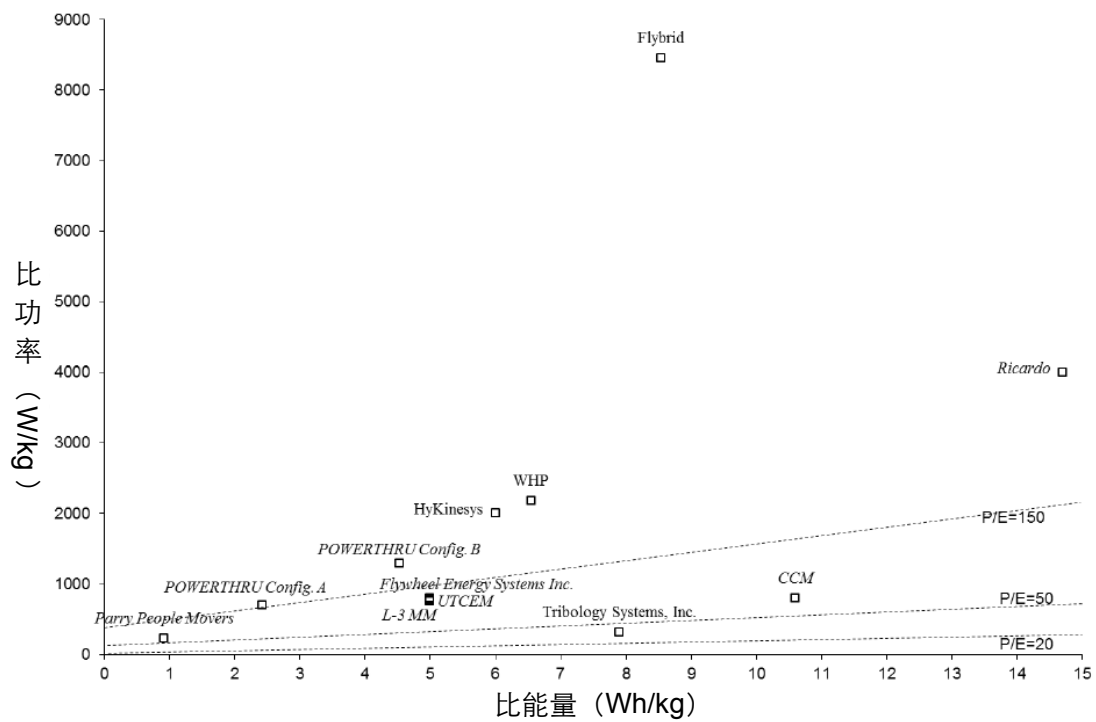


图 4-2 比功率 vs 比能量
(轻型车用常规字体, 重型车用斜体)

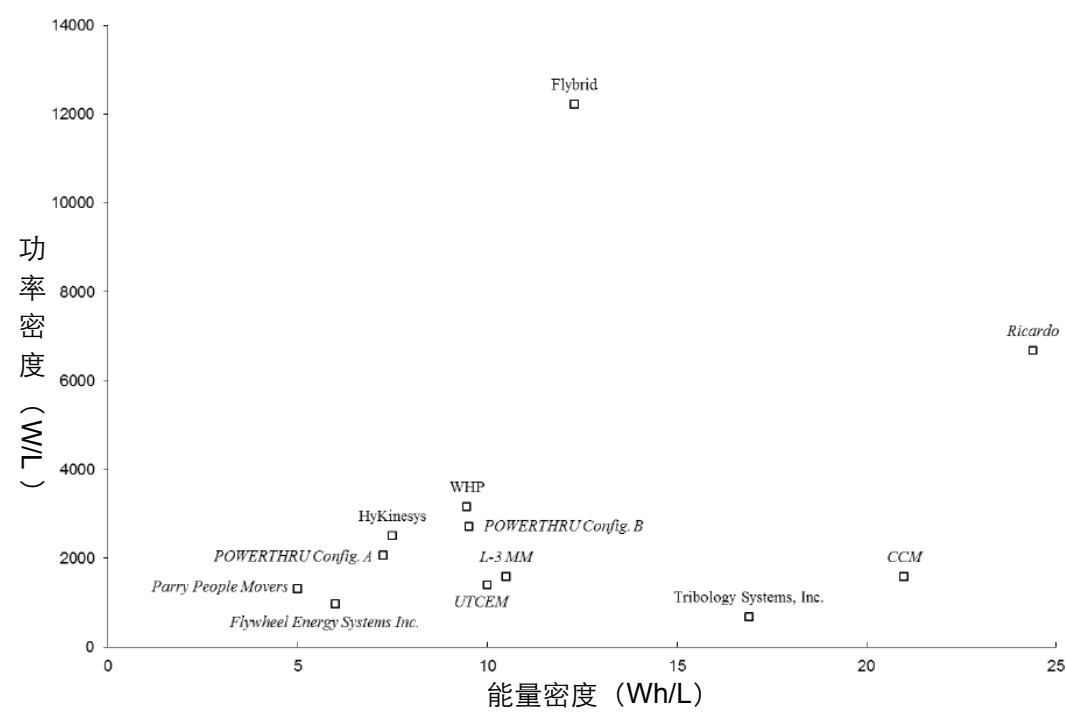


图 4-3 功率密度 vs 能量密度
(轻型车用常规字体, 重型车用斜体)

对于使用机械传动的系统, 在计算比功率和比能量时, CVT 重量不包括在系统总重量中。计算过程中去除 CVT 重量的原因是, 非能量存储部件的重量在计算中不应被计入。出于同样的原因, 也没有计入电力电子组件的重量。对于电池储能的比功率和比能量的计算, 表 4-1 列出的非储能组件也没有被计入。装有电力传动系统和飞轮储能装置的混合动力系统的非储能部件在图 3-1 中使用粉色标出。

图 4-3 是用功率密度和能量密度作图。密度值是每单位体积的值, 定义为:

$$\text{功率密度} \equiv \text{峰值功率} / \text{系统体积} \quad (13)$$

$$\text{能量密度} \equiv \text{输出能量} / \text{系统体积} \quad (14)$$

其中, 系统体积不包括电力传动系统的电力电子部件, 以及机械传动系统的 CVT 部件

对于使用机械传动的系统, 在计算功率密度和能量密度时, CVT 的体积不包括在系统总题记中。计算过程中去除 CVT 体积的原因是, 非储能部件的体积在计算中不应被计入。出于同样的原因, 电力电子组件的体积也没有计入。对于电池储能的功率密度和能量密度计算, 也没有计入表 4-1 列出 (在图 3-1 中以橘色表示) 的非储能组件的体积。

很显然, 系统需要尽量高的功率密度和能量密度, 因为能量存储系统较小的质量和体积可以提升整个系统的性能。若飞轮系统设计的功率密度和/或能量密度较小, 则需要相对大的体积, 这对于混合动力汽车来说是不利的。装载较大的飞轮系统意味着需要“额外”的体积, 这将增加车辆的尺寸和重量。由此可见质量较小的紧凑型飞轮在用于紧凑型车辆时的优势。

4.3 飞轮系统与电池和超级电容的比较

比较飞轮和电池的性能可以帮助了解这两种能量存储和功率输出技术的差异。本评估一

直接将飞轮系统作为高功率能量存储装置来看待。飞轮在比能量方面不是最杰出的，但它们在比功率方面的性能非常优异。飞轮能够吸收和输出极高的功率水平，使其非常适合为混合动力汽车中提供辅助动力。

表 4-5、4-6 和 4-7 是美国先进电池协会（United States Advanced Battery Consortium LLC, USABC）提出的三种不同类型的电动汽车电池的发展目标。USABC 提出的完整目标可在其网站上找到（参考文献 23）。在表格中，USABC 的电池目标与目前同等性能的飞轮参数列在一起，这些飞轮由不同飞轮开发者设计。之所以选择了这些开发者，是因为它们公开了与整车 OEM 合作开发的项目。

Flybrid Systems 公司与沃尔沃汽车公司和捷豹路虎公司都在合作开发采用机械传动系统的飞轮系统，Ricardo 与路虎在合作开发磁力耦合飞轮系统的机械传动系统，Williams Hybrid Power 与保时捷控股公司合作研发电力传动飞轮系统。

HEV 飞轮系统输出的高功率（辅助功率）可能是与表 4-5 中 USABC 功率辅助 HEV 电池目标（USABC Power Assist HEV Battery Goals）最具有可比性的了。Flybrid, Ricardo 和 WHS 飞轮分别达到和超过辅助功率目标的最高值。Flybrid 和 Ricardo 的系统没有达到可用能量的目标——因为开发者选择不去达到，其中的原因是他们相信 0.3-0.5kWh 的能量值对于轻型混合动力汽车来说过高了，正如附件 E 中所讨论的。WHP 的系统超过了可用能量目标的最小值，但未达到最大值。Flybrid 和 Ricardo 的系统超过了重量和体积的目标，例如它们比最小和最大的辅助功率目标都要轻。就这一点而言，WHS 系统超过了最小值但低于最大值。飞轮的高功率特性使得它们在用于动力辅助型 HEV 时能具有特别优异的性能。

表 4-6 是飞轮与 USABC PHEV 电池目标的比较。同样的，Flybrid, Ricardo 和 WHS 飞轮系统达到或超过了与放电功率、再生功率、重量和体积相关的目标。它们的不足之处在于电量消耗模式中提供大量可用能量方面，但这是可以理解的，因为飞轮的设计和尺寸基本上都是为了实现提供高功率这个目的。很显然，飞轮在提供大量能量存储方面不能完全与电池相竞争，例如 PHEV 所要求的，但它们超过了这种应用条件对功率的需求。

表 4-7 比较了飞轮性能与 USABC 提出的用于 EV 的先进电池目标，与之前比较所体现出的优势和劣势是一致的。两个飞轮系统都显著超过 EV 电池的比功率和功率密度目标。但是，飞轮在比能量、能量密度、以及电池包尺寸（输出能量）几个与能量相关指标上与 EV 电池的目标差距很大。虽然如此，飞轮的比功率/比能量的比率也显著超过目标（大约 100 倍）。

上述对飞轮和电池性能的比较可以得到一个结论，飞轮最有效的利用形式是提供高功率，同时仅提供有效满足辅助功率目标所需的能量。这样的哲学在 Flybrid 飞轮系统的设计中非常明显，系统的尺寸和储能是基于在飞轮中高效储存再生制动能量的要求来设计的。除了用于传统 HEV 中为内燃机提供高辅助功率外，飞轮也能够高效地与电池结合使用或作为其补充。通过减少电池充电和放电的次数，飞轮系统能够延长电池的寿命，甚至能够使得电池的尺寸和数量减少，从而降低其购买和维护费用。

下面这段是 DOE 车辆技术项目（DOE Vehicle Technologies Program）网站上对于超级电容的描述（参考文献 24）：

“超级电容能够用于很多方面，尤其是 HEV 和 PHEV。超级电容可以在加速和爬坡过程中作为主要动力源，同时也回收制动能量，因为它们快速提供能量的性能非常优越。将超级电容与电池结合使用可以将前者的功率性能和后者的储能性能结合起来。它可以延长电池的

寿命，节省替换和维护的成本，且使得电池可以减量。同时，它能够在任何需要的时候提供高功率，从而提高可用的总能量。但是，超级电容和电池的结合需要额外的电力电子组件，例如 DC/DC 转换器，这有可能增加车辆的成本。

超级电容用于再生制动可以极大提高需要频繁停车和起步的城市驾驶条件下的燃油经济性。只有超级电容能够吸收并存储大量的(刹车产生的)电能并在下一次加速时快速释放。”

上述超级电容的基本特性是飞轮也具有。但是，超级电容与飞轮性能显著的区别是放电脉冲振幅和可用能量。表 4-8 列出的超级电容的信息表明（从 USABC 网站上摘取，参考文献 23），本评估中涉及的 Flybrid, Ricardo 和 WHS 飞轮系统的脉冲高于对超级电容的最高要求目标（42V 瞬时辅助功率）。

飞轮超高的可用功率使得整车设计者能够实现 HEV 最佳的性能。在可以从飞轮获取高功率的情况下，发动机尺寸可以缩小，从而使燃油经济性进一步提高。例如，Parry People Movers 通过使用一个低速、钢制的飞轮，将轨道车推进系统的发动机从 14 升降低至 2.3 升，增加了再生制动系统。这样一来，燃油经济性比之前的柴油轨道车提高了 7-8 倍，二氧化碳排放减少三倍以上。这个 2.3 升的带有飞轮辅助动力的内燃机能够驱动 10 吨的轨道车，且具有非常好的加速性能，可服务的乘客数量增加了 50%。此外，汽车较小的内燃机使设计者可以更好地设计车型，减少空气阻力系数（低于 CD=0.20），减少正面的面积，这些会让车辆在进行洲际高速巡航时每升油的行驶里程显著提升。

飞轮的高功率性能，使得其应用范围不局限于与混合动力汽车内燃机结合使用时提供瞬时功率。另一种可能的应用是为氢动力/燃料电池混合动力汽车提供高辅助功率。

表 4-5 飞轮与 USABC 功率辅助 HEV 电池目标相比较（2002 年 11 月）

特性	单位	HEV 电池目标		飞轮开发者		
		辅助功率 (最小)	辅助功率 (最大)	Flybrid (机械 传动系统)	Ricardo (机械 传动系统)	WHP (电力 传动系统)
脉冲放电功率 (10s)	kW	25	40	40	79.2	130
峰值再生脉冲功率 (10s)	kW	20 (55-Wh 脉冲)	35 (97-Wh 脉冲)	40	79.2	130
总可用能量 (超过满足功率目标的 DOD 范围)	kWh	0.3 (C/1)	0.5 (C/1)	0.111	0.22	0.36
最大重量	kg	40	60	13	15	55
最大体积	升	32	45	9	9	38

表 4-6 飞轮与 USABC 的 PHEV 电池目标的比较

		HEV 电池目标		飞轮开发者		
生命周期特性	单位	高功率/能量比电池	高能量/功率比电池	Flybrid (机械传动系统)	Ricardo (机械传动系统)	WHP (电力传动系统)
脉冲放电功率 (10s)	kW	45	38	40	79.2	130
峰值再生脉冲功率 (10s)	kW	30	25	40	79.2	130
电能耗尽 (CD) 模式下总可用能量	kWh	0.5	0.3	0.111	0.22	0.36
最大重量	kg	60	120	13	15	55
最大体积	升	40	80	9	9	38

表 4-7 飞轮与 USABC EV 先进电池目标的比较

		HEV 电池目标		飞轮开发者		
完全负荷系统的参数 (单位)	单位	商业化最低目标	长期目标	Flybrid (机械传动系统)	Ricardo (机械传动系统)	WHP (电力传动系统)
功率密度	W/L	460	600	12,200	6670	3160
比功率-放电, 80% DOD/30 秒	W/kg	300	400	8460	4000	2180
比功率-再生制动, 20% DOD/10 秒	W/kg	150	200	8460	4000	2180

能量密度 -C/3 放电率	Wh/L	230	300	12.3	24.4	9.47
比能量 -C/3 放电率	Wh/kg	150	200	8.54	14.7	6.55
比功率/比能量		2:1	2:1	99:1	272:1	333:1
电池包总规格 (kWh)	kWh	40	40	0.111	0.22	0.36

表 4-8 飞轮与 FreedomCar 超级电容生命周期要求的比较

	超级电容目标		飞轮开发者					
系统属性	42V 瞬时辅助功率 (TPA)		Flybrid (机械传动系统)		Ricardo (机械传动系统)		WHP (电力传动系统)	
放电脉冲	13kW	2s	40kW	10s	79.2kW	10s	130kW	10s
再生脉冲	8kW	2s	40kW	10s	79.2kW	10s	130kW	10s
可用能量 (CP@1kW)	60Wh		111Wh		220Wh		360Wh	
充电率 (kW)	2.6kW		60-110kW		30-60kW		平均 110KW	

5. 飞轮安全性和保护装置⁶

迄今为止车用飞轮系统的开发者在技术上面临的最大挑战是安全性和保护装置。新一代汽车伙伴关系 (Partnership for a New Generation of Vehicles) 听证报告 (参考文献 25) 在飞轮安全性方面包括了以下条目:

“对于安全性来说, 目前尚未有对于保护装置破裂问题的令人满意的解决方案。也许避免转子的灾难性的爆裂-而不是设计保护装置-是被产业和公众接受所必需的。” (p. 235)

“无论考虑到顾客接受度还是产品可靠性, 整车厂必须确保飞轮“不会爆裂 (fracture

⁶ 对应英文报告页数 32

proof)”，即减少在灾难模式中它们破碎的可能性。”(p. 273)

对于车用飞轮，设计一个轻量的、低成本的、能够承受一个高速复合转子完全碎裂失效的保护装置是极其困难的。因此正如前文引述的 PNGV 项目的评论所述，可以采用的路径是建立一套设计和操作的规范，从而避免飞轮完全碎裂失效的情况。为了成功的实现这一点，设计者需要了解转子失效的特性以及高速飞轮存在的潜在危险，下文将会讨论这一点。

5.1 复合转子具有不同的失效特性

复合材料飞轮转子的失效特性与金属飞轮转子明显不同，由于在很短时间内发生了非常高的能量转移，高速复合转子的失效能够产生巨大的负荷。高能量和短时间意味着高功率。在复合飞轮转子发展早期，飞轮的宣传比较想当然，宣称复合飞轮“具有固有的安全性，因为转子变成棉絮状”。的确，研究已经表明，复合飞轮转子失效是从材料变成棉絮状开始的。同时，失效的复合飞轮没有像金属碎片一样穿透保护装置的壳体也是事实；但是，在复合飞轮失效的情况下会有大量的、额外的负荷释放出来。转子转变成棉絮状的倾向也许与凯芙拉纤维（Kevlar fiber）或玻璃纤维复合材料的使用有关，而且也许是在低端速的情况下的特征，即低于在与材料和设计都相关的速度阈值（对于凯芙拉纤维或玻璃纤维复合一般为低于 800-900 m/s）。碳纤维复合材料与凯芙拉纤维或玻璃纤维的特征显著不同。

碳纤维复合材料是目前市场上很多飞轮选用的材料。表 3-1 表明碳/环氧树脂飞轮具有非常高的比动能特性。当碳复合飞轮转子失效，并在高于速度阈值的情况下冲击一个坚固的保护装置壳体时，转子将由于撞击变为细颗粒。这些颗粒在保护装置壳体内运动，就像在弯曲表面流动的流体。这个类流体现象将导致很大的轴向负荷，与径向的和圆周的负荷一同冲击保护装置结构的末端。这个流体流动现象在 1993 年（参考文献 26）和 1995 年（参考文献 27）在田纳西州橡树岭召开的飞轮研讨会上已经有所讨论，并有分析和实验的作为支持。关于流体流动现象已经进行了大量实验。碳纤维加强复合转子的动态的、高速碎裂失效模式表现出流体流动现象并导致冲击负荷（短时且极高的数量级）。一些关于这种现象的实验验证包括：

1. 在橡树岭国家实验室（尤其是 1985 年的 1405 m/s Demo 1C 失效）。这项实验的结果在上述的橡树岭飞轮研讨会上与国际技术界进行了分享。冲击到保护装置壳体的盖子上的巨大的轴向负荷损坏了盖子上直径为 0.75 英尺的高强度螺栓，但是盖子由一组更大的螺栓固定在保护装置上。关于这个转子失效的详细评估请参见报告 ORNL/TM-13159（参考文献 28）。

2. 1995 年在欧洲发生的一次震惊世界的飞轮转子碎裂失效事故导致一名实验操作者死亡。实验使用的测试容器盖子没有固定在实验容器上，操作者在实验容器所在的房间内。实验操作者显然没有意识到复合转子碎裂失效出现很大轴向负荷的可能性。当转子失效时，轴向负荷冲破了轮缘的真空密封，使得盖子打开并从保护装置内部喷射出一些高速的转子材料。这项实验是在德国慕尼黑一个实验室中由 IABG——一个领先的欧洲技和服务提供商为 BMW 进行的（参考文献 29）。

3. 由国防部防卫先进研究项目机构（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）支持的飞轮安全和保护装置项目，进行了一系列复合转子的动态的、高负荷的碎裂失效的实验。DARPA 项目的飞轮旋转实验是在马萨诸塞州哈德逊由 Test Devices 公司进行的。

5.2 减少飞轮风险的设计方案

鉴于大量证据表明高速飞轮碎裂失效所带来的危害,不能对于飞轮安全性和保护装置轻描淡写。继续基于复合材料飞轮具有“固有的安全性”的基础上而为复合材料飞轮做宣传,既不专业也缺乏职业道德。飞轮转子需要设计成能够低风险运行的情况,就像在同样高速运行的蒸汽涡轮发动机中成功实现的那样。

公众接受蒸汽涡轮喷气发动机失效时所带来的非常低的风险。风险是一种可能性(一种特定的失效模式)的产物以及后果(同样的失效模式)。对于喷气发动机来说,设计、认证、制造控制、检查、操作程序、以及维护等一系列过程可以保证其处于很低的风险水平。叶片损坏与固定叶片的榫损坏这两种失效模式的风险是完全不同的。保护装置可以拦截破碎的叶片,从而减少叶片失效所带来的后果。但是,保护装置不能应对榫的失效,发动机榫失效的后果就像飞机失事一样,所以榫失效的可能性必须极小,这样风险-这种可能性和后果的产物,才能小到可以接受的程度。基本上,确保榫失效“永远不发生”,以及破碎的叶片能够被阻隔是蒸汽发动机的设计者的责任。

飞轮安全问题应当在开发的设计和实验阶段得到解决,以保证飞轮系统的产品在使用过程中风险极低。飞轮开发者负责进行必要的实验,验证其设计的飞轮系统的运行在所有失效情况下的风险都是极低的。对于喷气发动机而言,风险是一种可能性的产物以及后果。飞轮的开发者必须考虑到所有可能的失效情况,并减少发生的可能性,减少所产生的后果,唯有如此这种可能性的产物和后果才是可接受的。

安全的设计可以通过结合多种减少飞轮风险的设计方案来实现。单个的设计方案如下:

1. **避免极限应力。**这一方案需要在设计中确保运行应力和极限应力之间有足够的应力余量。当然,除了较大的环向应力外,也必须考虑径向和轴向应力。使用具有较大应力余量的转子设计能够保证转子有较长的寿命。设计者必须考虑应力寿命和循环疲劳寿命。

一些飞轮的开发者已经得到结论,对于车用飞轮,设计一个轻量的、低成本、能够承受完全的高速复合转子碎裂失效情况的保护装置系统是极其困难的。因此方案转为建立设计和运行的程序,从而彻底避免转子完全碎裂失效的情况。PNGV 项目的一个回顾(参考文献 30)对前述观点的表达如下:

“一个关键的发展是关于在失效情况下适当的安全壳机制的设计。飞轮技术团队追踪了几个策略,从根本上克服了这个巨大的障碍。也许最重要的进展就是,越来越多的证据显示飞轮(或其中一部分)在低应力/强度比率时不会“爆裂”,而是保持完整。这个发现说明转动的部件需要有一个很高的极限应力/最大运行应力的比值(大约为 4:1)。

稳住“变松的飞轮”比处理碎片问题要容易得多,因为能量消耗的时间增加了。飞轮外壳新的设计策略是稳住变松的飞轮,并消纳飞轮部分失效所带来的碎片,而不是控制飞轮完全爆裂和分解所带来的问题。这个设计策略同时也试图在能量消散的过程中对其进行管理。将飞轮的使用局限在快速功率响应上,减少了能量存储需求,且允许设计方案在可接受的重量增加程度内达到强度/应力比率的安全目标。”

2. **设计一个逐渐失效的飞轮。**很多研究表明,飞轮转子的一小部分在较高的应力条件下运行,使其最有可能成为失效点。相应的策略是允许转子的一部分失效,但避免飞轮其他部分爆裂失效的情况。这样,安全壳系统可以设计成能够容纳飞轮表面部分失效所释放出的较

小的能量。

3. *使用仪器检测飞轮的运行情况，在失效发生前停止运行。*这个策略也许不能确保飞轮失效模式不发生，但可以与其他方案相结合使用，从而减少发生飞轮碎裂失效的可能性。可以考虑以下仪器：径向振摆探测器（Runout probes）可以检测转子平衡方面的微小变化；加速计能够检测振动；声敏元件能够检测转子裂纹发出的声音；磁力轴承也可用作振动检测器。

4. *应用为飞轮专门设计的保护装置。*如果不能保证转子破裂的可能性极低，则需要保护装置减少爆裂产生的后果。如果通过设计可以避免爆裂，保护装置也需要在飞轮变松的时候将其稳住，并必须能够容纳部分飞轮失效时产生的碎片。

为飞轮设计的保护装置的案例是使用“可旋转的衬套”来显著减少爆裂飞轮可能产生的高扭矩。这种方案的一个案例是，德克萨斯大学机电研究中心（UT-CEM）参与 DARPA 飞轮安全和保护装置项目的部分成果。记载在文献中（参考文献 31）的飞轮失效情况是飞轮爆裂。确保这个失效情况具有较低风险的方法是，用一个自由浮动的、可旋转的、圆柱形的复合材料保护装置结构来减缓碳纤维加强转子爆裂的后果。这篇文献讨论了对冲击性的爆裂负荷影响的减缓效果，对抑制扭矩和边负荷的测算表明，抑制扭矩和边负荷比之前研究的结果减少了一个数量级。这项研究证明了这个保护装置可以在高速飞轮碎裂情况下保证安全。

由于存在汽车碰撞的可能性，在任何设计方案中设计者必须考虑从车辆传导到飞轮系统的能量。车祸的可能性使得车用飞轮的设计比用于其他用途的固定式飞轮更具有挑战性。一些必须考虑的因素包括车辆的高冲击负荷，对飞轮系统、轴和辐板完整性、保护轴承、径向和轴向间隙等的冲击负荷。Magnet Motor GmbH 已经开展了实验，正在运行的保守设计的飞轮系统忽然遭遇模拟车祸状态的 15g 的边负荷。飞轮系统在测试中没有受到损害。Flybrid 为赛车设计的飞轮系统，在全速旋转的情况下（64,500rpm），在 F1 赛车碰撞测试设施中进行了 >20g 减速的测试。飞轮没有受到破坏，在测试后仍在旋转。对于飞轮系统来说，很多不同的装配安排都是可能的，包括软减震（soft suspensions）或平衡环，而且处理车辆碰撞负荷的能力必须经过实验验证。

本评估报告的作者引述了不同受访者在其问卷中报告的保护装置重量，但作者并不是声称受访者的保护装置系统满足安全需要。正如之前提到的，PNGV 项目（参考文献 31）避免飞轮碎裂的导则是，极限应力需要达到运行应力的 4 倍左右。对于运行时圆周速度或端速度 $\geq 700\text{m/s}$ 的飞轮，材料的极限应力可能没有达到运行应力的 4 倍以上，所以一个强大的保护装置系统是必要的。更进一步说，运行时圆周速度或端速度 $\geq 700\text{m/s}$ 且具有较低质量保护装置的飞轮系统，是否足以提供车用所要求的安全性是值得质疑的。当然在环向应力上采用 4 倍的安全系数只是一个导则，且飞轮设计必须经过充分的测试以验证运行的安全性，在下面飞轮标准部分会讨论到。使用设计方案 1“避免极限应力”，即保持低的圆周速度的飞轮系统能够安全运行的证据，是 L3-MM 从 1988 年开始运行 12 辆巴士的经验得到的，目前每个巴士运行时间已经超过 60,000 小时或等同于 1,000,000 个速度循环。

5.3 航天应用中的飞轮安全可靠标准

NASA 和空军支持的一个项目成功开发了一套航空应用的飞轮转子组件的 ANSI/AIAA 标准，名为“航空系统-飞轮转子组件（Space Systems – Flywheel Rotor Assemblies）”，可从美国航空航天学会（American Institute of Aeronautics and Astronautics）购买（参考文

献 32)。这个标准建立了对用于储能或飞行器姿态控制的航天飞轮转子组件的设计、制造、存储、运输的基线要求。当应用于特定的航天系统中时，这些要求可以保证极高的安全可靠运行可信度。

空间系统飞轮转子组件标准所采用的方法是保证足够的安全余量，这样便不需要能够容纳失效转子的保护装置系统。为了验证设计，需要进行一系列的资格实验，包括在最大可能运行速度（Maximum Expected Operating Speed, MEOS）的 1.225 倍的实验条件下，至少运行 5 分钟不出现灾难性的爆裂。每个使用的转子必须通过一系列的验收实验，包括在 1.1 倍 MEOS 情况下旋转 10 分钟。在 3.4 中已经解释过，转子的环向应力与运行速度的平方成正比，1.225 倍 MEOS 和 1.1 倍 MEOS 的速度在转子上产生的环向应力分别是运行时应力的 1.5 和 1.21 倍。

航天飞轮标准是陆地上车用飞轮安全标准的一个非常好的起点。大部分航天用的标准都直接应用于车辆。

6. 结论⁷

近年来，在重型混合动力车辆领域，飞轮高功率能量存储系统技术应用于调节车辆的功率负荷已经相当成熟了。Magnet-Motor GmbH 的飞轮系统自 1988 年起在欧洲的重型混合动力巴士车队里使用，为飞轮系统在重型混合动力车辆上的安全使用提供了验证。CCM 公司在荷兰将飞轮系统在重型混合动力巴士上使用，直接为能源部重型混合动力车辆发展计划增添了成功运用的经验。

轻型车辆领域的飞轮技术只有在欧洲有成熟的应用，包括在一系列汽车赛事和道路车辆中。WHP 的飞轮系统在 Nurburgring 长距离冠军赛上已经使用了两年，而 Flybrid 的飞轮系统则用于勒芒 24 小时耐力赛。对于道路车辆，WHP 和保时捷合作，将其电驱飞轮系统应用在保时捷 918RSR 车上。Flybrid 和两个汽车制造商合作发展机械式飞轮系统，这两个项目是与捷豹-路虎合作的捷豹 XF 混合动力汽车项目和与沃尔沃合作的低成本混合动力道路车辆项目。在这两个项目中，都期望能达到 20% 的燃油经济性的提升。Ricardo 将其机械动力传动飞轮应用在巴士和轿车上。FLYBUS 项目承诺要将燃油经济性的提升率从 8% 提高至 21%，这个项目将飞轮系统改装到 Optare Solo 巴士上，飞轮与 CVT 进行耦合，CVT 与装置在原车上的 Allison 自动变速箱上的 PTO 进行耦合。KinerStor 项目与汽车生产商路虎合作，目标是降低 30% 油耗，飞轮/变速系统成本控制在 1660 美元。

飞轮和电池的性能比较可以得到一个推论，飞轮系统的最有效利用是：在提供高功率的同时提供刚好够用的能量储备，从而有效完成其提供辅助动力的任务。飞轮系统相对于混合动力电动汽车和纯电动汽车的电池和超级电容而言，可以满足或超越与动力相关的性能指标（放电功率，再生功率，比功率，功率密度，重量和体积）。飞轮可以提供高功率和能量存储，尤其是高功率。

许多公司在固定式飞轮领域取得了技术进步，而这些进步也促进了其在混合动力汽车上的应用。

安全是一个受到持续关注的、对高功率飞轮在汽车上的应用产生阻碍的议题。DARPA

⁷ 对应原报告页数：37

已经赞助了一些针对飞轮失效机制和飞轮安全使用的研究计划。为应用于航空航天设备的飞轮转子组件而制订的 ANSI/AIAA 标准对飞轮安全和可靠的操作提出了要求。多数空间技术标准直接适用于车辆领域。在飞轮安全上的空间技术标准对地面上的车辆应用来说是一个很好的参照。

2009 年 10 月，FIA 开始支持在混合动力赛车上使用飞轮系统，并声明“对于像飞轮这样能够减少对电瓶的依赖、稳定主动力源的功率输出的系统，是未来最有前途的路径。”这也与其希望提升汽车效率有关。现在是对飞轮——这个高功率能量存储系统在轻型和重型车辆领域的应用进行评估的合适时机。近期值得对这种技术进行密切追踪。

7. 建议⁸

鉴于 FIA 于 2009 年 10 月对飞轮系统的强力支持，建议对飞轮这种具有高功率能量存储特性的技术在混合动力车辆上的应用，美国能源部应在其计划上给予重新考虑。欧洲正在领导着飞轮技术在轻型和重型混合动力车辆上的应用。欧洲对飞轮在重型车辆上的应用有广泛的经验，例如巴士和城市轨道交通等。在本报告的第 4 部分，对欧洲在轻型混合动力赛车领域和大量生产的混合动力道路车辆领域的飞轮技术发展进行了阐述，可以参见 WHP、Flybrid 和 Ricardo 的发展情况。

对在混合动力电动汽车中高功率的飞轮系统需要保持多高的能量存储水平，一些欧洲飞轮技术的开发者提出了疑问，相关解释见附件 E。应当研究输出能量在什么样的水平才能实现系统的最佳性能。

对飞轮技术的开发者来说，一个主要的技术问题是要确保高速飞轮转子的安全，与此同时又要顾及到为使系统轻量化而产生的开发管理压力。这些开发者设计了不同的结构方案，但重要的是需要证明飞轮保护装置的安全性。在处理这些保护装置的安全性问题时，开发者遇到了很多意想不到的事情。在高速转子方面实际经验较少的开发者，也不可避免地遇到许多相同的情况。已有的经验和测试记录将帮助新的飞轮技术开发者开发出安全的飞轮保护装置设计方案。获得一个安全的飞轮系统需要细致的设计、大量的对飞轮安全方案进行验证的破坏性实验，以及正式的认证程序等。行业性的、经过广泛评议的标准认证程序可以使飞轮研发者和汽车制造商受益良多。无论哪个飞轮技术研发者出现了由于飞轮保护装置失效而导致的事故，都会对整个飞轮行业都会造成伤害。正如 NASA 和美国空军在空间应用飞轮方面发展的标准，美国能源部也许可以促使建立一个飞轮标准认证流程，并且使用于地面车辆的飞轮技术测试程序标准化。

⁸ 对应原报告页数：38

飞轮的新应用¹

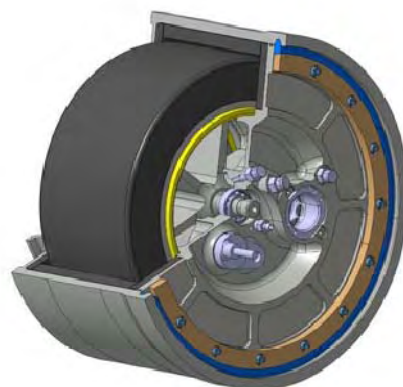
交通：在历经诸多曲折之后，飞轮正被作为高效的储能装置用于混合动力汽车

英文原文刊载于：The Economist（《经济学人》）

2011 年 12 月 3 日

几乎从人类借助轮子将各种能量高效地转化为运动开始，人们也可以通过飞轮将轮子的转动转化为能量。从纺锤锭盘到蒸汽机，飞轮都被用来获取并储存能量，以便将来（即刻）使用。现在，飞轮被用于为混合动力汽车提供能量。

飞轮的物理学特性非常简单。一个能够自由旋转的圆盘，在施加扭矩之后获得动量，开始旋转。将初始扭矩移除后，轮子也能继续旋转。此后，一部分动力将被消耗在克服轴承的摩擦力和空气阻力上，余下的动力则用于驱动与之相连的机件。



增加飞轮的重量或提高其转速都能够提升飞轮的动量。以前，用于储存大量能源的飞轮体积都很庞大，原因是在以超过每分钟数千转的转速（单位 rpm）运行时，由于飞轮材料的局限，飞轮将会碎裂。这导致飞轮仅能用于对尺寸没有限制的应用中，例如平衡电网负荷。在交通运输领域，飞轮仅被广泛应用在火车上，用于推动火车头越过动力输出的间歇。通常这导致飞轮的直径达到 1 米，重量超过 100kg——这还不包括用以保障使用安全的外壳的重量。

人们也曾尝试将飞轮用于大的客车和卡车中，所应用的这些装置的体积仅略有减少。若在较小的汽车中使用飞轮装置，由于同时导致了重量的增加，飞轮装置完全无法提高燃油效

¹英文原文（Flywheels: Reinventing the wheel）刊于 The Economist（原文链接：<http://www.economist.com/node/21540386>）。中文版由常州海科新能源技术有限公司翻译，仅供行业内部交流使用。

率。然而目前，这种情况终于有所改观。一个原因是现代的飞轮主要采用强度远高于钢材的碳纤维制造，这使得飞轮的转速可以超过 60,000rpm，而不必担心碎裂。

碳纤维不仅具有高强度，而且也十分轻。飞轮储存的能量与其质量、以及转速的平方成正比。也就是说，质量提高一倍仅可使储存的能量增加一倍，但速度若提高一倍则可以使得能量储存达到原水平四倍。“提高飞轮的转速，就可以在增加飞轮储能能力的同时，将其质量和尺寸减至适当的水平”，从事飞轮技术的英国 Ricardo 公司的总工程师 Andy Atkins 如是说。

道路实验的结果表明，在使用了现代材料和卓越的设计之后，仅有冰球大小的飞轮就能够使车辆的油耗下降五分之一以上。一些业内观察人士甚至预言，飞轮技术将迅速取代油电混合动力技术而成为绿色汽车的首选技术。

上述两项节能技术颇有共同之处。当你踩下丰田普锐斯这样的混合动力汽车的刹车时，驱动轮子的电动机反向转动成为发电机，将汽车的动能转变成电能并储存在车载电池中。当你踩下加速踏板时，电池里的能量供给到电动机，使汽车加速。这个过程被称为“再生制动”。

飞轮能够作为临时储能装置实现同样的功能，且效率更高。在油电混合动力汽车中，刹车过程中损失的动能仅有 35% 可以被回收；而据从事飞轮技术的另一家英国公司 Torotrak 的负责人 Dick Elsy 称，飞轮系统可以实现 70% 的能量回收。这是由于，再生制动系统需要先先将动能转化为电能，然后转化为电池中的化学能；相比之下，飞轮仅仅将车轮的动能直接转化为飞轮的动能，能量损耗更小。

此外，与电池不出几年就需要更换相比，飞轮的使用年限和汽车一样长，且不含需要处理的化学物质。综合上述原因，难怪汽车制造商最终注意到了飞轮装置。

革命性想法的起源

与以往新技术崭露头角的过程一样，高科技的飞轮的首次登场是在 F1 赛车上。2009 年，F1 赛车的管理机构——国际汽车联合会 (FIA) 允许参赛汽车使用动能回收系统 (KERS)。这个决定一方面展示了这项运动也热衷于环保技术，另一方面也使得赛道上的竞争更加刺激，赛车手能够在打算超车或避免被超车时，实现短时加速。

一些车队使用与油电混合动力汽车类似的基于电池的动能回收系统，而包括 Williams 在内的另一些车队则使用了飞轮，从而颠覆了人们对这个技术的传统印象。这些现代的、高科技的飞轮装置已然不再是笨重的客车和火车头的代名词。沃尔沃和捷豹目前正在测试用于普通汽车的现代飞轮系统。

飞轮系统的吸引力不仅体现在技术优势上。沃尔沃的高级工程师 Derek Crabb 认为，汽车工业所处的经济环境的变迁也是原因之一。这个瑞典的汽车制造商在二十世纪八十年代就开始尝试将飞轮系统加入其车型中，但当时技术并不成熟，尚需要使用沉重的钢材料，且没有经济的刺激。当时燃料价格很低，人们也不关注碳排放问题。但这种情况一去不复返了：一方面，资金紧张的消费者正为不断上涨的燃油价格而苦恼，他们越来越需要具有良好燃油经济性的汽车；另一方面，法律要求汽车制造商降低其产品的平均碳排放水平。

若仅采用油电混合动力技术本身，实现这些需求的成本将非常高，Jon Hilton 先生认为。Jon Hilton 是英国动能回收系统技术制造商 Flybrid Systems 的共同创始人之一，该公司一直致力于制造普通汽车可以使用的飞轮系统。电池，电机以及复杂的电控系统价格不菲，使汽车的制造成本增加了约 6,000 英镑（合 8,000 美元）。Hilton 先生认为，“几乎所有制造

油电混合动力汽车的汽车制造商都在亏钱，这也是为什么他们没有大量生产的原因”。相比之下，飞轮系统的成本仅 1,500 英镑。捷豹已经对搭载了 Flybrid 能量存储系统的 XF 原型轿车进行了路试，沃尔沃公司也表示希望在年底前研发出一辆原型车。



上图是使用飞轮系统的捷豹 XF 的原型车



上图是使用飞轮系统的勒芒赛车原型车

但是，飞轮系统仍然面临一些技术瓶颈。首先，当飞轮以 60,000rpm 的转速运行时，其外缘的转速以达大约两倍于声速的速度运动，即超过 2,000kph (1,2000mph)。在这样的工况下，任何空气阻力都有可能造成材料——碳纤维也是如此——碎裂。因此，飞轮需要在真空环境中运行，这要求动能从真空室的外边传递到内部的飞轮上，这绝非易事。

Flybrid 公司的解决方案是使用一个旋转的密封圈，但这并不能实现完全密封，少量的空气仍可以泄露至真空室内。但是，真空室安装的一个小型真空泵可以在杂质浓度达到危险水平之前自动将其吸出，每日仅需运行一次，每次 90 秒。Ricardo 公司则采取了另一种策略，为了避免真空泵导致的体积和复杂性的增加，该公司的 Kinergy 系统通过几组永磁阵列使得飞轮在完全真空的环境中运行：一组位于飞轮的轴上，另一组则是位于与传动系统相连的外部转动轴上。当一个转动轴转动时，磁场就向齿轮上的齿一样带动另一个转动轴转动。

第二个问题是飞轮不断变化的转速。Torotrak 公司采用 CVT 用于无齿轮电机上解决了这个问题。飞轮和转动轴不需要紧紧地扣在一起,而是通过粘性液体连接起来,这允许二者以不同速率转动并逐渐变为同步。Elsy 先生说,已证实这个方式传递能源的效率非常高。

最后,尽管与基于电池的动能回收系统相比,飞轮具有很多优点,但其也存在一些缺陷。飞轮储能时间比电池短,容量也相对小。Hilton 先生承认,若仅使用飞轮作为动力,捷豹的原型车可以行驶的路程不会超过一英里。

尽管这样,但 Crabb 先生并不认为这是一个问题,因为飞轮系统的节油效果可以通过在必要时提供加速能量来实现。这意味着汽车引擎可以更小,且在不必降低性能的情况下就能够实现节油。在 2015 年左右,当沃尔沃推出其第一款商业化的飞轮混合动力汽车时,它的动能回收系统在超车时应当能够像在 F1 赛车中一样,提供 80 马力的加速。

一些更加极端的飞轮设计能够使飞轮的魅力得以充分展现。Ricardo 公司模拟设计了一种能够以 145,000rpm 转速运行的飞轮。这个类似甜甜圈形状的飞轮,可以将飞轮的大部分重量集中到边缘,轮体外部为薄薄的碳纤维,轮体的大部分地方是空的。飞轮的高速旋转不仅弥补了质量的减少所造成影响,且进一步地提升了飞轮的性能。这个设计在现实世界尚未进行过测试,或者说在短时间内都不会。Atkins 解释说,目前对这种性能的需求非常少。

飞轮系统将是降低油耗更便宜的方式

然而,无论飞轮能够拥有多高的转速,它都不能将所有类型的油电混合动力汽车完全挤出市场。Hilton 先生认为,基于飞轮的设计尚不能和插电式混合动力电动汽车在行驶里程上媲美,后者配有大容量的电池组,且可以仅依靠电能行驶很长的距离。但目前插电式混合动力电动汽车的市场尚处于初级阶段,在电动汽车技术完全成熟之前,飞轮混合动力系统不失为一个低成本的提高燃油效率的方式。诸如沃尔沃这样的汽车制造商正在致力于设计可以应用飞轮技术的未来的车型。当这些车上市时,他们的价格将不高于那些性能平平的燃油汽车。经济型的车主将毫无疑问地选择带有飞轮系统的汽车。

