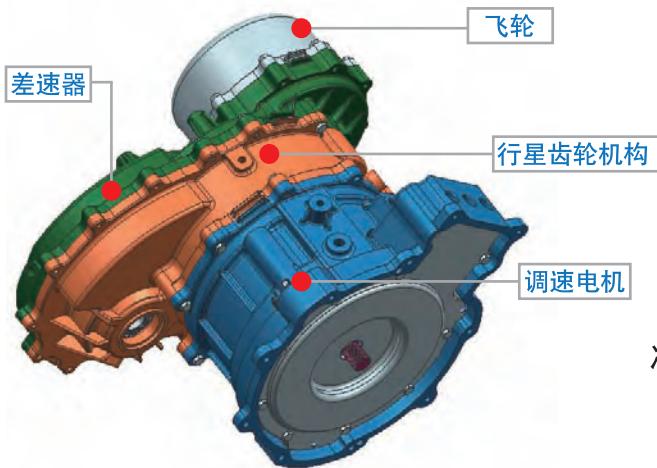


飞轮混合动力系统 技术创新与产业化研讨会

Workshop on Flywheel KERS
Technology Innovation and Industrialization

论 文 集



循环型动能推进系统[®] —“电动式”飞轮混动系统

具有节能效果显著、应用广、成本低等优势，标准工况下可节能30–50%，整车加速性提升50–100%。

2013年4月9日

中国 北京

主办单位：清华大学汽车技术联合研究院

承办单位：常州海科新能源技术有限公司

中汽培训中心

目录

会议信息

关于邀请参加飞轮混合动力系统技术创新与产业化研讨会的通知	1
会议议程	3
演讲嘉宾简介	5

主题报告

航天用高速飞轮在交通领域的商业化应用前景 潘军	7
循环型动能推进系统的研发现状和发展方向 Chris Ellis 廖越峰	30
飞轮混动车辆的控制 申水文	55

参考资料

飞轮混合动力系统技术跟踪研究白皮书	71
用于混合动力汽车的飞轮高功率能量存储技术评估报告	80
飞轮的新应用	110

会议信息

清华大学汽车技术联合研究院

关于邀请参加

飞轮混合动力系统技术创新与产业化研讨会的通知

各相关单位：

清华大学汽车技术联合研究院联合主办，常州海科新能源技术有限公司和中汽培训中心承办的第一届“飞轮混合动力系统技术创新与产业化研讨会”将于 2013 年 4 月 9 日在北京召开。诚挚邀请贵单位参加此次研讨会，与来自产业链上下游的企业和研究机构共同探讨节能与新能源汽车的新兴尖端技术和解决方案——飞轮混合动力系统的技术创新与产业化问题。

节能与新能源汽车发展对于中国经济的可持续发展以及汽车行业“由大变强”具有重要的社会价值和深远的战略意义，而当前产业的发展仍面临诸多挑战和瓶颈，尤其是在核心技术、产品性价比、以及配套设施等方面。现代飞轮混合动力系统是节能与新能源汽车动力系统的前沿技术，能够显著地增强汽车的动力性能并降低能耗，在国外先进国家和主机厂引起广泛重视，并逐步形成“下一代绿色动力技术”的共识。当前，在国家大力推动节能与新能源汽车产业化进程的大背景下，如何依托于创新性的动力系统技术实现节能与新能源汽车的自主创新和产业化突破、官产学研如何形成合力推动技术创新与产业化等问题，值得业界深入探讨。

因此，清华大学汽车技术联合研究院发起此次研讨会，届时将邀请国内外专家和行业领导到会演讲，并将以常州海科新能源技术有限公司的“循环型动能推进系统”为例，向与会者直观地展示飞轮混合动力系统技术研发所取得的最新成果。研讨会同时也将发布“加强协同创新，打造飞轮混合动力系统产业联盟”的倡议书（详见附件三）。

清华大学汽车技术联合研究院

本次会议将在促进新能源汽车飞轮混合动力系统产业链上下游的企业和科研机构进行观点分享、思想碰撞的过程中，凝聚共识，形成合力，从而推动节能与新能源汽车的技术创新和产业化进程。

会议安排和联系方式详见附件一。



二零一三年三月六日

飞轮混合动力系统技术创新与产业化研讨会

会议议程

9:00	<p>研讨会开幕</p> <p>主持人：张仁琪 中发联投资有限公司董事长</p>
9:00-11:30	<p>议题一（主题报告）</p> <p>飞轮混合动力系统的研发现状与产业化应用前景</p> <p>主持人：张仁琪董事长</p> <ul style="list-style-type: none">○ 航天用高速飞轮在交通领域的商业化应用前景 潘军研究员 上海航天技术研究院研究发展部副部长○ 循环型动能推进系统的研发现状和发展方向 Chris Ellis HyKinesys 公司创始人、CEO○ 飞轮混动车辆的控制 廖越峰博士 北京汽车新能源汽车有限公司总工程师○ 飞轮混动车辆的控制 申水文博士 同济大学控制理论与控制工程教授
11:30-11:35	<p>茶歇，样机静态展示</p>

11:35-12:30	<p>议题二（小组讨论）</p> <p>飞轮混合动力系统产业化的优势、潜在瓶颈和解决方案</p> <p>主持人：宁国宝博士</p> <p>嘉 宾：</p> <p>廖越峰 北京汽车新能源汽车有限公司总工程师 段志辉 奇瑞新能源汽车技术有限公司总工程师 陈 平 长安新能源汽车公司副总经理、总工程师 陆 帅 重庆大学教授</p> <ul style="list-style-type: none">○ 分享各机构在研发和推动产业化过程中的经验○ 充分发挥飞轮混合动力系统技术的优势，抓住新能源汽车发展的战略机遇○ 对潜在瓶颈的解决方案和进一步合作计划
12:30-13:30	<p>午餐</p>
14:00-15:45	<p>议题三（小组讨论）</p> <p>创新技术，构筑飞轮混合动力系统的产业链</p> <p>主持人：袁一卿博士 中科深江电动汽车有限公司副总经理</p> <p>嘉 宾：</p> <p>潘 军 上海航天技术研究院研究发展部副部长 徐教仁 浩华科技实业有限公司所长 申水文 镇江中研电控有限公司总工程师 李至浩 联合汽车电子有限公司工程师 高志彪 上海翱翼汽车电子有限公司总经理 赵建和 北控集团北京京仪敬业电工科技有限公司副总经理 宋文伟 上海航天汽车机电股份有限公司汽配首席运营官</p> <ul style="list-style-type: none">○ 系统集成、飞轮及材料、磁流体密封技术、控制器、产业链其他环节
15:45-16:00	<p>会议总结发言</p>
16:00	<p>会议结束</p>

主题报告演讲嘉宾简介

申水文博士，现任同济大学控制理论与控制工程教授，英国 Smart Manufacturing 公司高级顾问，吉林大学汽车转向安全客座教授，英国 Glamorgan 大学氢能和可持续发展研究中心兼职教师，“上海千人计划”入选者。2005 年起加入英国 Ricardo 公司，担任混合动力总工程师，主持和参与为国际著名汽车公司（Nissan, Honda, Ford, 上汽和奇瑞等）开发不同级别的混合动力车辆，是 Ricardo 特殊贡献奖获得者。申博士曾在英国 Glamorgan 大学氢能和可持续发展研究中心和英国 Leeds 大学电子工程学院（5A 系）担任研究员，也在荷兰 Eindhoven 大学机械工程学院、日本横滨国立大学机械工程学院和上海交通大学机械工程系等机构开展过研究工作。申水文博士拥有吉林工业大学工学博士学位，并曾在上海交通大学和荷兰 Eindhoven 大学从事博士后研究工作。

Chris Ellis 先生，美国 HyKinesys, Inc. 创始人和 CEO，常州海科新能源技术有限公司首席技术顾问，英国著名汽车动力专家和资深运动赛车评论家。于 2001 年首倡飞轮辅助动力系统，在欧美申请了多项专利，与 Jaguar, McLaren, Benz, BMW, GM, Ford, Volvo 等国际著名汽车公司进行过前期概念开发合作，并申报参与了英国低碳 LowCC 项目和美国能源部节能汽车开发 Prize100 项目。十几年来奔走于世界各大汽车厂商和西方国家政府，推广飞轮混动系统技术的应用。Ellis 先生曾是 IBM（英国）技术总监，拥有伦敦帝国理工学院的工程学位。

廖越峰博士，现任北京汽车新能源汽车有限公司总工程师，常州海科新能源技术有限公司技术顾问，国家“千人计划”第二批入选者。1991 年参加通用汽车第一代电动汽车 EV1 项目，在美期间参加并主持多项美国能源部资助的新能源汽车项目，并于 2001 年回国创业，与国内主要公交车厂商合作开发混合动力系统。2007 年起任奇瑞汽车工程院总工，2010 年合同期满后加盟北汽。他领导开发的奇瑞 M1EV 和北汽 BC30EV，获得中国汽车报和汽车网举办的 2010 全行业年度电动车型大奖。廖博士毕业于清华大学电机系，拥有美国威斯康辛大学电驱动博士学位。

潘军研究员，现任上海航天技术研究院研究发展部副部长，中国汽车工程协会管理分会理事，上海汽车交通电子协会理事。曾任上海航天技术研究院 801 所技改办主任、国资处处长、动力公司总经理、副所长，上海航天汽车机电股份有限公司总工程师、副总经理等职务，与同济大学、上海交通大学共建了汽车电子产学研合作平台，曾荣获 2005 年中国国防科学技术进步三等奖，2007 年中国航天科技集团航天贡献奖。近年来主持和参与过汽车氧传感器、EPS（电动助力转向）、ESC（汽车稳定性控制系统）、车用系列化无刷电机、BCM（车身控制模块）等项目的研制和开发。

主题报告



The table of contents slide features the CASC logo at the top left. The title '目录' (Table of Contents) is centered above a blue decorative bar. To the left is a graphic of a globe with a network of glowing lines. Four blue rounded rectangular boxes, each with a white number and text, are aligned vertically from top to bottom: '一 现代飞轮技术和产品概要' (I. Overview of modern flywheel technology and products), '二 航天高速飞轮介绍' (II. Introduction to aerospace high-speed flywheels), '三 飞轮在混合动力汽车中应用展望' (III. Prospects for flywheel applications in hybrid vehicles), and '四 车用储能飞轮商用化前景探讨' (IV. Exploration of the commercialization prospects of vehicle energy storage flywheels). The bottom of the slide includes the Shanghai Aerospace Technology Research Institute logo and the text '上海航天技术研究院 -2-'.

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要

- 1.1 飞轮技术需求分析
- 1.2 飞轮工作原理及组成
- 1.3 现代飞轮技术产品现状
- 1.4 飞轮应用领域

上海航天技术研究院 -3-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要 1.1 飞轮技术需求分析

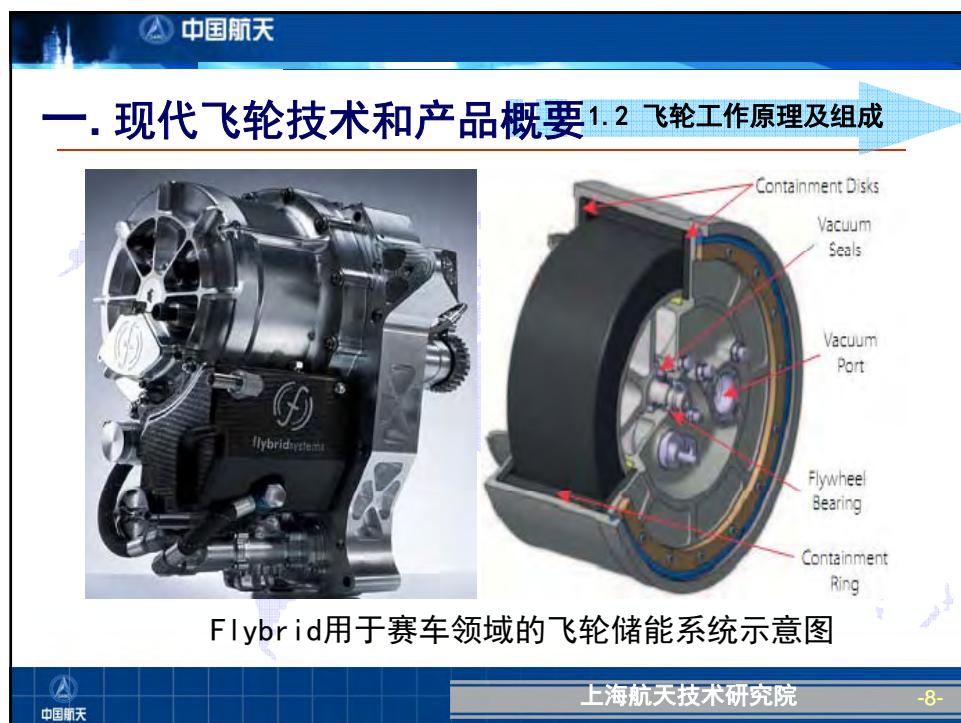
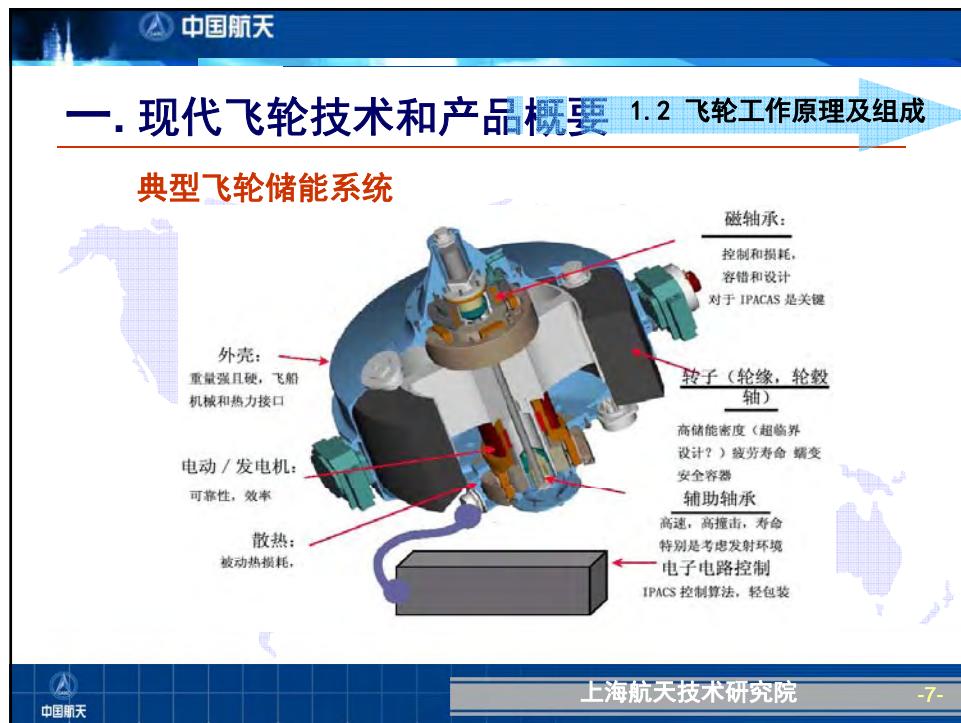
随着我国汽车工业的发展，在未来 20 年，汽车行业将有可能成为我国最大的石油消耗领域。

我国汽车行业的石油消耗占世界1/3

每千辆汽车每天排出的空气污染物

中国航天技术研究院 -4-



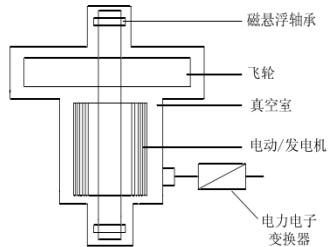


中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要 1.2 飞轮工作原理及组成

飞轮组成

- 旋转的高速飞轮
- 集成驱动的电动/发电机
- 磁悬浮轴承
- 电力电子变换装置
- 真空室



飞轮本体:

飞轮本体是储能的核心部件，目前高速飞轮一般都是使用碳纤维或玻璃纤维等复合材料

电机:

是一个集成部件，选用永磁同步电机，具有矩脉动小、运行噪声小等特点

上海航天技术研究院 -9-

中国航天

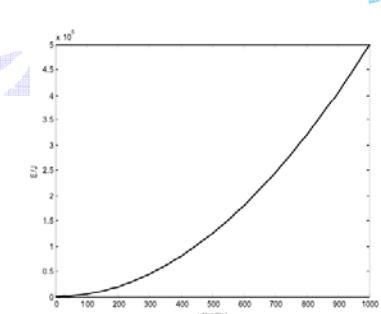
一. 现代飞轮技术和产品概要 1.2 飞轮工作原理及组成

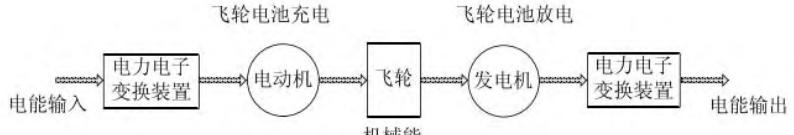
飞轮存储的能量

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2$$

飞轮存储的比能量

$$e = \frac{E}{m} = K_s \frac{[\sigma]}{\rho}$$





上海航天技术研究院 -10-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要 1.2 飞轮工作原理及组成

The diagram shows three sequential phases of flywheel operation:

- 充电段 (Charging Phase):** From the power grid, electrical energy is converted via a power electronic converter and used to drive a motor. This motor rotates a flywheel at high speed. The flywheel stores mechanical energy, which is then released back into the system. This completes the **电能—机械能** (Electric Energy—Mechanical Energy) conversion process. The motor is in an **电动机** (Motor) state.
- 储能段 (Energy Storage Phase):** The flywheel continues to rotate at a nearly constant speed. It stores mechanical energy until it receives a control signal to begin the discharge process.
- 放电段 (Discharging Phase):** The flywheel rotates rapidly. The motor is now operating as a generator, converting mechanical energy back into electrical energy. This energy is then converted via a power electronic converter and supplied to the load. This completes the **机械能—电能** (Mechanical Energy—Electric Energy) conversion process. The motor is in a **发电机** (Generator) state.

上海航天技术研究院 -11-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要 1.3 现代飞轮技术产品现状

The diagram illustrates the international research status of flywheel technology, centered around a globe:

- 日本 Tohoku 大学研制:** 混合动力汽车的动力系统，包含飞轮电池、内燃机、锂电池等。
- 瑞士的 Oerlikon Energy 公司:** 公共汽车完全飞轮电池供电。
- 美国飞轮系统公司:** 将克莱斯勒改造成飞轮供电。
- Honey-well 公司与飞轮系统公司:** 研制出使用寿命20年的飞轮电池，最大转速为 200000r/min。
- 美国的 Texas 大学:** 研制出容量为 2kW·h 飞轮电池。
- 德国混合动力电动汽车:** 内燃机和飞轮电池供电。

国外研究现状

上海航天技术研究院 -12-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要

1.3 现代飞轮技术产品现状

The diagram illustrates the evolution of flywheel technology over time. It features a world map background with three main stages highlighted by green arrows:

- 1997年**:
 - 第一代飞轮储能
 - ✓ 直径 23cm;
 - ✓ 转子重 8kg;
 - ✓ 复合材料;
 - ✓ 转速48000r/min
 - ✓ 线速度 580m/s
 - ✓ 实现了充放电。
- 1999年**:
 - 第二代飞轮
 - ✓ 直径 30cm;
 - ✓ 重 15kg;
 - ✓ 线速度 650m/s;
 - ✓ 储能 500Wh。
- 至今**:
 - 第三代飞轮
 - 运行性能在各方面都有很大提升

上海航天技术研究院 -13-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要

1.3 现代飞轮技术产品现状

The diagram highlights several universities and research institutions involved in modern flywheel technology research, each associated with a specific aspect of the technology:

- 中科院电工研究所**: 已研出飞轮电池用高速电机并申请专利。
- 华北电力大学**: 飞轮储能系统在电力调峰领域的理论研究。
- 北京航空航天大学**: 卫星新型姿控储能两用飞轮技术。
- 武汉理工大学**: 研究电动汽车中飞轮电池磁悬浮轴承技术。
- 上海交通大学**: 分析和仿真混合动力车用飞轮电池可行性。
- 华南理工大学**: 对复合电源控制系统进行了理论和仿真的研究。

上海航天技术研究院 -14-

中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要

1.4 飞轮应用领域
——汽车

MDS飞轮在欧洲公共汽车中的应用



上海航天技术研究院 -15-

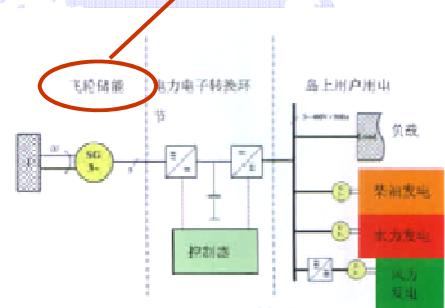
中国航天

一. 现代飞轮技术和产品概要

1.4 飞轮应用领域
——电力



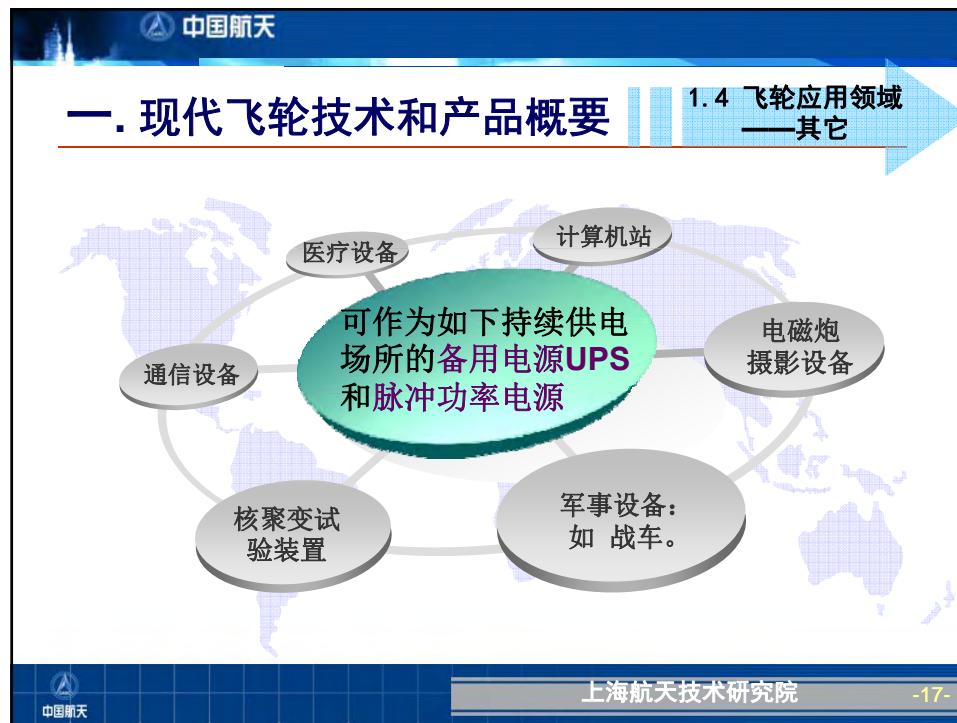
电力系统应用



飞轮储能

图 3 电力系统框图

上海航天技术研究院 -16-



中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.1 航天飞轮简介

飞轮是卫星姿态控制系统的关键执行元件

反作用飞轮是利用飞轮正反转加速、减速所产生的反作用力矩，直接作用于卫星星体产生控制力矩。

偏置动量飞轮利用它所具有的陀螺定轴性和转速变化产生的反作用力矩来实现对卫星姿态的控制。

飞轮产品

角动量方向不变：反作用飞轮、偏置动量飞轮

角动量方向可变：大小不变控制力矩陀螺、大小可变框架飞轮

派生产品——扫描飞轮

上海航天技术研究院 -19-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.1 航天飞轮简介

卫星用的飞轮的发展趋势是将储能与姿态控制结合起来(IPACS: Integrated Power and Attitude Control System)；美国国家航天局的飞轮发展目标是积极开发这种飞轮，已成立了专门的研究小组进行IPACS的研究。

上海航天技术研究院 -20-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.1 航天飞轮简介

美国宇航局 (NASA)

Components and Completed 60,000 rpm Development Flywheel Module Assembly

U.S. Flywheel Systems - Energizing the Future

NASA GRC

International Space Station Flywheel System Model Project Flywheel Installation Model Diagram

上海航天技术研究院 -21-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.1 航天飞轮简介

美国NASA Glen研究中心研制的储能/姿控飞轮

指标 型号	Dev1	D1	G2	G3
功率 (W)	1000	1000	1000	1000
转速范围 (rpm)	20000 -60000	20000 -60000	20000 -60000	20000 -60000
储能 (W·hr)	300	330	581	2136
储能密度 (W·r/kg)	4.1	4.7	6.1	35.5

美国NASA Glen研究中心 储能/姿控飞轮G2

上海航天技术研究院 -22-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品

航天飞轮产品概述

上海航天技术研究院具有卫星姿轨控系统的专业研究所，具有多年从事飞轮研制的经验。



工作模式：反作用模式
控制模式：速度
最高转速：3300 rpm
外形尺寸：Φ 185mmx168mm
结构形式：筒状结构、线路
轮体一体化
轴承与润滑：滚珠轴承、固体润滑
驱动电机：无刷直流电机
重量：4.5Kg

上海航天技术研究院 -23-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品

机械支撑飞轮系列



☆角动量：25Nms
☆控制模式：力矩/速度
☆转速范围：±2500 rpm
☆测速脉冲：2400 p/r
☆角动量控制偏差△H：
≤0.001Nms
☆稳态功耗：≤7.5
☆重量：11Kg
☆外形尺寸：
Φ 337mmx111mm
☆结构形式：机电一体化

上海航天技术研究院 -24-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品

磁悬浮支撑飞轮系列



五自由度外转子式

- ☆动量容量: 15Nms@5000rpm
- ☆额定转速: 5000rpm
- ☆最高转速: 12000rpm
- ☆类型: 五自由度主动, 外转子式, 扁平结构
- ☆总体重量: 小于13Kg

上海航天技术研究院 -25-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品



2008/03/27

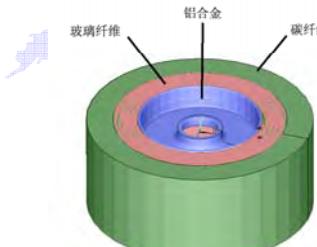
上海航天技术研究院

上海航天技术研究院 -26-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品



飞轮转子结构示意图



飞轮转子实物图

上海航天技术研究院 -27-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.2 主要产品

控制力矩陀螺系列



200Nms单框架控制力矩陀螺



100Nms/80Nms单框架控制力矩陀螺



25Nms/15Nms控制力矩陀螺



控制力矩陀螺原型机 (40/20Nms)



控制力矩陀螺工程样机 (40/20Nms)

上海航天技术研究院 -28-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.3 研究基础及保障措施

◆ (一) 人才条件

上海航天技术研究院具有很强的科研开发能力的研究队伍，在以往和现在各型号任务的锤炼下，形成了以在卫星姿轨控系统设计技术领域颇有造诣的学科带头人为主的，以具有博士、硕士和学士学历并具有工程经验的中青年研究队伍为骨干的科研梯队。他们是本院宝贵的财富和进一步承接高难度任务的保障，目前这支队伍仍在发展壮大中。他们的基础理论功底扎实，软/硬件开发能力强，人员层次和知识结构组成合理，具有很强的技术开发能力。

中国航天

上海航天技术研究院 -29-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.3 研究基础及保障措施

(二) 研究条件

成熟的惯性平台技术



成熟的飞轮技术



中国航天

上海航天技术研究院 -30-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.3 研究基础及保障措施

(三) 加工及试验条件

振动试验台 高低温试验箱 数控加工中心

冲击试验台 热真空试验箱 真空试验台

中国航天 上海航天技术研究院 -31-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.4 性能分析及指标

高速转子能量公式

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

飞轮储能系统存储能量

$$E_{stored} = \frac{1}{2} I \omega_{max}^2$$

飞轮储能系统释放能量

$$E_{delivered} = E_{stored} - E_{min}$$

$$= \frac{1}{2} I (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

上海航天技术研究院 -32-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.4 性能分析及指标

- Specific Power ≡ Peak Power / System Mass
比功率 ≡ 峰值功率 / 系统质量
- Specific Energy ≡ Delivered Energy / System Mass
比能量 ≡ 输出能量 / 系统质量
- Power Density ≡ Peak Power / System Volume
功率密度 ≡ 峰值功率 / 系统体积
- Energy Density ≡ Delivered Energy / System Volume
能量密度 ≡ 输出能量 / 系统体积

中国航天 上海航天技术研究院 -33-

中国航天

二. 航天飞轮介绍

2.4 性能分析及指标

结论

- 轮储能在存储能量、使用寿命、充电时间、对环境的影响、储能密度和功率密度等方面都有很大的优势。随着研究的不断深入，飞轮储能必将成为未来重要的储能技术之一。

中国航天 上海航天技术研究院 -34-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

- 3.1 汽车领域
- 3.2 混合动力系统介绍
- 3.3 小结

上海航天技术研究院 -35-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望 3.1 汽车领域

赛车领域

飞轮储能具有快速充电放电及高比功率特性，因此能够满足赛车需求。

2012年Audi使用飞轮混合动力系统赢得勒芒拉力赛冠军。

上海航天技术研究院 -36-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

3.1 汽车领域

Toyota hybrid car

Toyota Camry hybrid-electric taxi.

Hino hybrid diesel-electric truck.

BMW Concept 7 Series ActiveHybrid : mild hybrid

The 2011 Toyota Auris Hybrid : mass-produced hybrid electric vehicle

Hybrid-powered bus

中国航天

上海航天技术研究院

-37-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

3.2 飞轮混合动力系统介绍

F1方程式赛车最先应用“KERS”混合动力技术，KERS技术目前有存在两种技术路线。第一种是Flybird公司为代表的机械式飞轮方案。

机械式飞轮方案

中国航天

上海航天技术研究院

-38-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

机械式飞轮方案采用动能-势能-动能之间转化实现刹车能量回收与释放。KERS系统放置在后轴上,在减速过程中,制动力能够令飞轮高速旋转,最高达到60000rpm。制动回收的能量迅速转化成飞轮惯性动能,当车子开始继续加速前进时,飞轮的惯性又能通过特殊设计的传动机构传回车轮,这样就形成了动能回收和释放的完整循环。

The diagram illustrates the mechanical flywheel KERS system layout. It shows a cross-section of the system components: the flywheel module (最高转速 60000rpm), CVT module (实现超高速比传动), output gear assembly, clutch, and the rear axle drive shaft. To the right is a photograph of the physical hardware.

上海航天技术研究院 -39-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

3.2 飞轮混合动力系统介绍

第二种是Automotive Hybrid Power公司为代表的电动式飞轮方案。

The image shows three photographs of the electric flywheel components: four cylindrical flywheel units connected in series, a top-down view of the flywheel assembly with internal electronic components, and a cross-sectional view of the flywheel showing its internal structure. Below the images is a schematic diagram with labels: 转子 (rotor), 定子 (stator), 陶瓷轴承 (ceramic bearing), and 充磁复合组 (magnet composite group).

电动式飞轮方案

上海航天技术研究院 -40-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

电动式飞轮方案采用**电能-机械能-电能**之间转化实现刹车能量回收与释放。赛车入弯制动的过程中，后轴驱动安装在尾部发电机旋转，发电后将电输入飞轮内部电机，接着电机驱动处在真空中的飞轮旋转，将电能转化为机械能。当赛车通过弯心、全油门出弯时，飞轮内部电机立即切换到发电机模式，飞轮带动发电机旋转，将存储的机械能通过电能的形式，把能量反向输送给尾部的电机（相当于电池的放电过程）。此时，尾部电机立即切换到电动机状态，电能驱动电动机旋转，其输出的动力与汽车引擎动力汇聚后，传递给后轴。

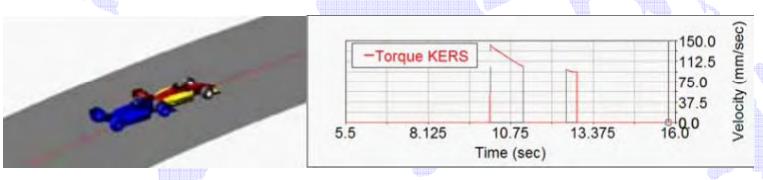


再生制动—充电模式

中国航天 上海航天技术研究院 -41-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望



Torque KERS

Time (sec)	Torque KERS (Nm)	Velocity (mm/sec)
5.5	0	150.0
8.125	150.0	112.5
10.75	0	75.0
13.375	150.0	37.5
16.0	0	0.0

推进加速—放电模式

中国航天 上海航天技术研究院 -42-

中国航天

三. 飞轮在混合动力汽车中应用展望

3.3 小结

飞轮储存的惯性动能能够在需要时同发动机动力联合释放，或者保留到巡航速度下再持续释放。按照欧洲最新的汽车监测工况设计，有了KERS系统之后，相同的工况下，发动机工作时间能够减少近一半的时间，这也就意味着发动机能够大幅减少油耗。

由于惯性飞轮只能在制动的片刻回收能量，所以飞轮收集能量的过程将是非常有限的，飞轮KERS技术的挑战就在于如何有效地管理好日常行驶中不断重复的走走停停，充分利用好这些高间歇性但持久发生的制动。换句话说，制动越多，就越省油，这与普通油电混合动力车的外部特性相仿。

高转速飞轮储存的能量如果集中释放，大概能够为动力系统提供额外的80马力瞬时功率，这几乎已经相当于增加了一台1.2L左右的普通汽油机了。因此有了飞轮KERS系统的车在加速性能上往往都非常突出，这也是F1方程式赛车对KERS系统钟爱有加的原因之一。

上海航天技术研究院 -43-

中国航天

四. 车用储能飞轮商用化前景探讨

- 成本**
 - 模块化技术
 - 批量化生产
 -
- 安全性**
 - 新材料应用
 - 新型结构
 -
- 可靠性**
 - 全寿命设计
 - 环境工况适应性
 - 汽车工业标准
- 可维护性**
 - 模块化结构
 - 维护策略
 -

上海航天技术研究院 -44-



Workshop on Flywheel KERS

Beijing, April 9, 2013

*The directed evolution of
high-energy flywheels
for ground vehicles*

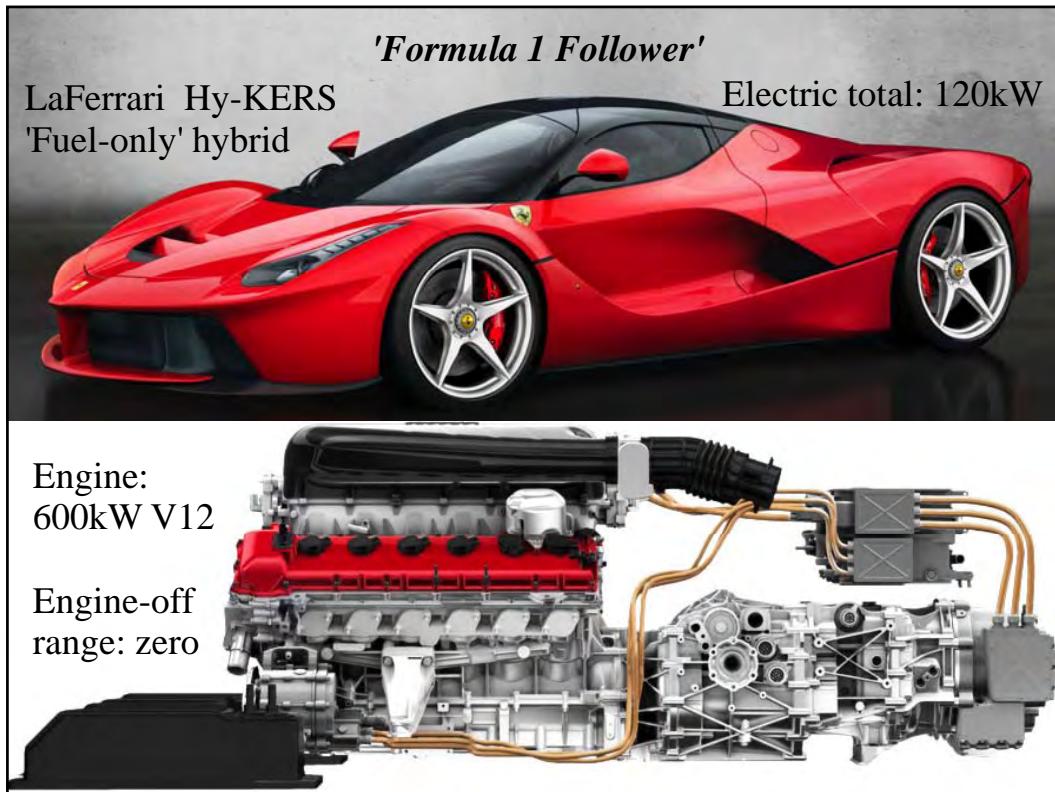
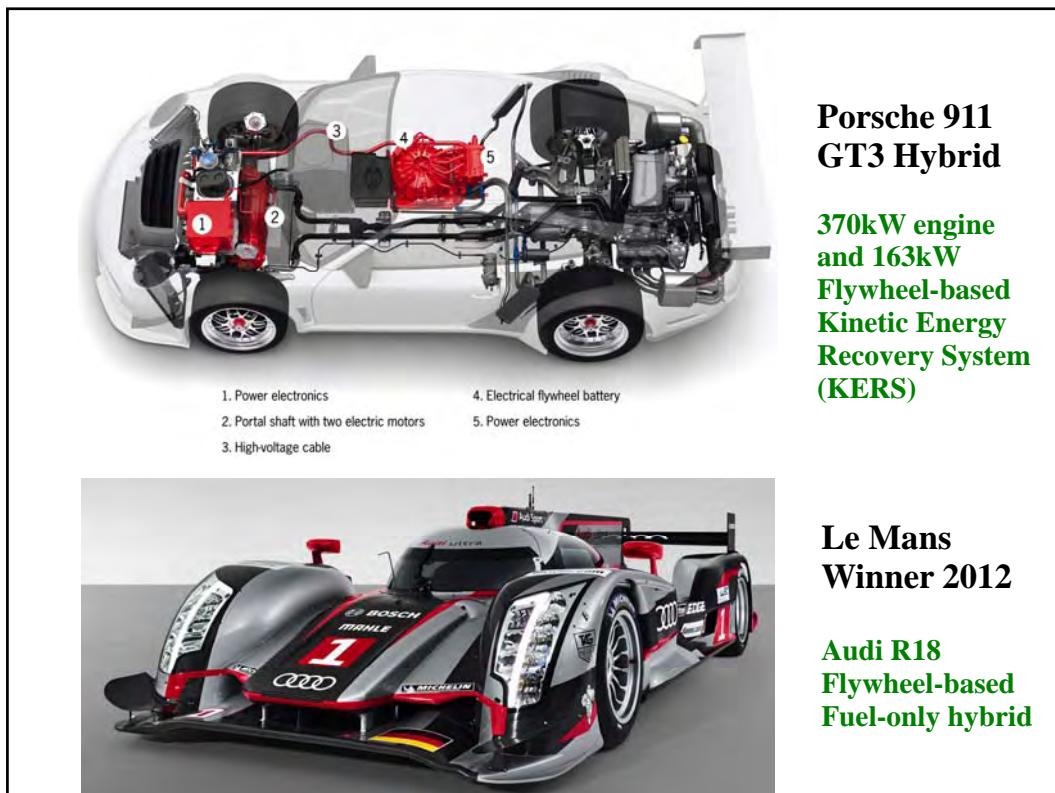
Dr Yuefeng Liao
Mr Chris Ellis

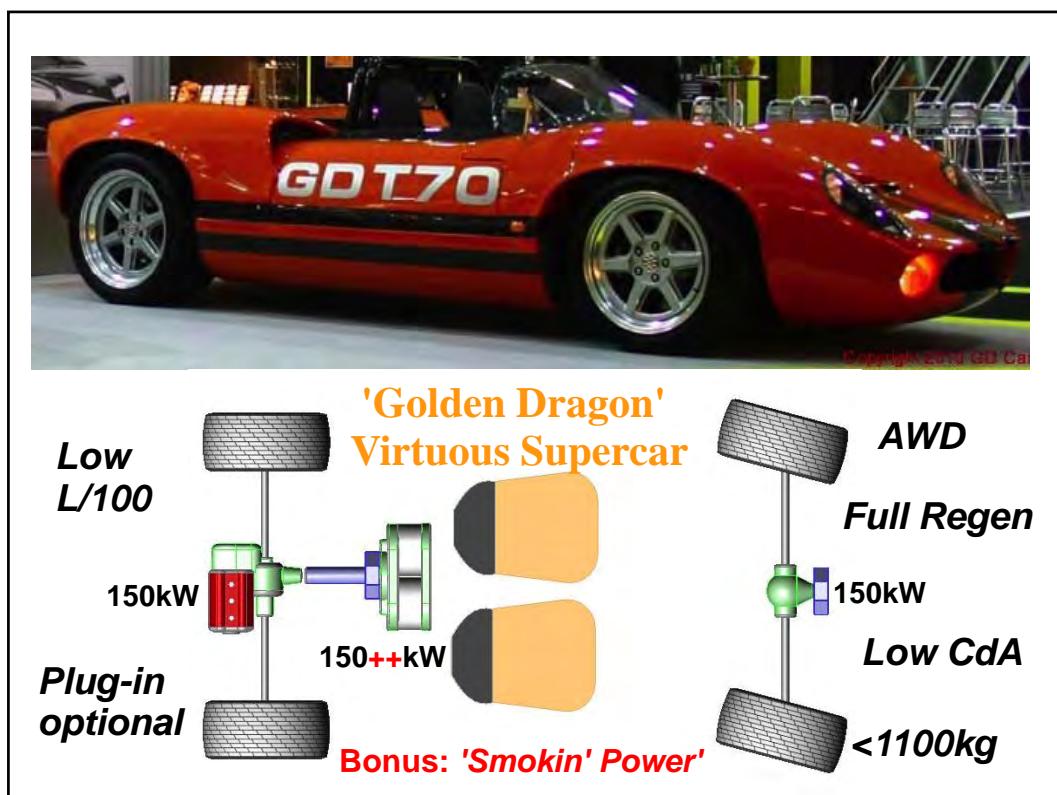
**A Key Objective
for Governments
and for Industry**

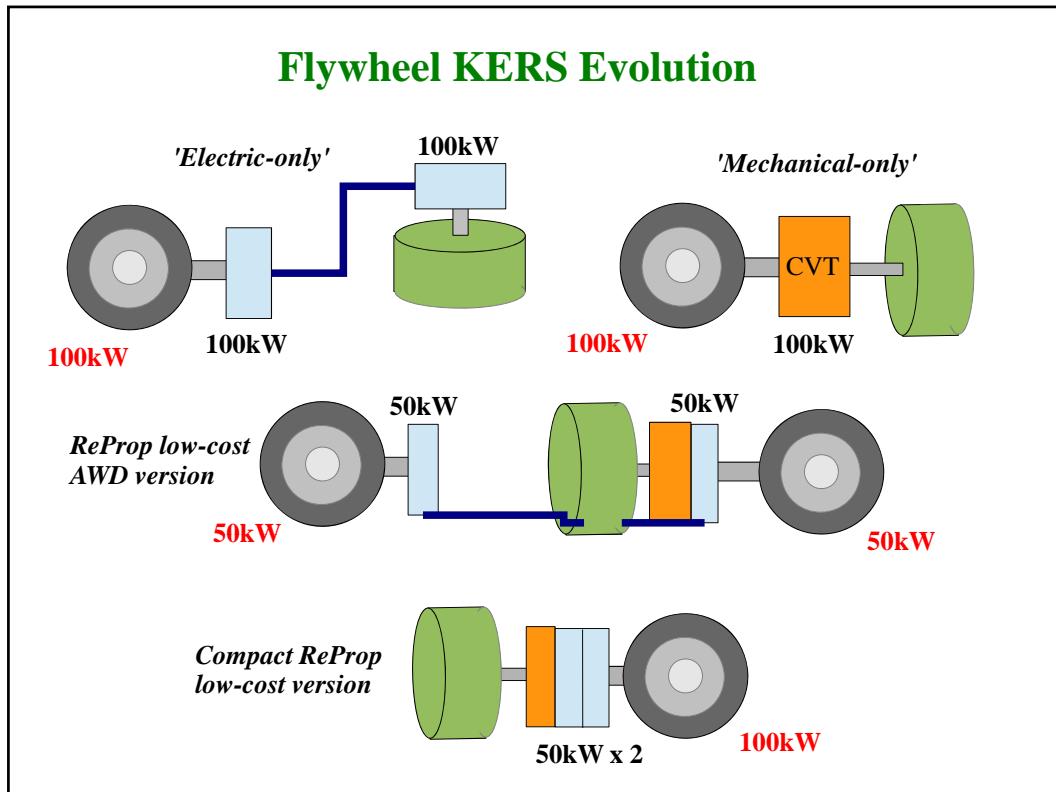
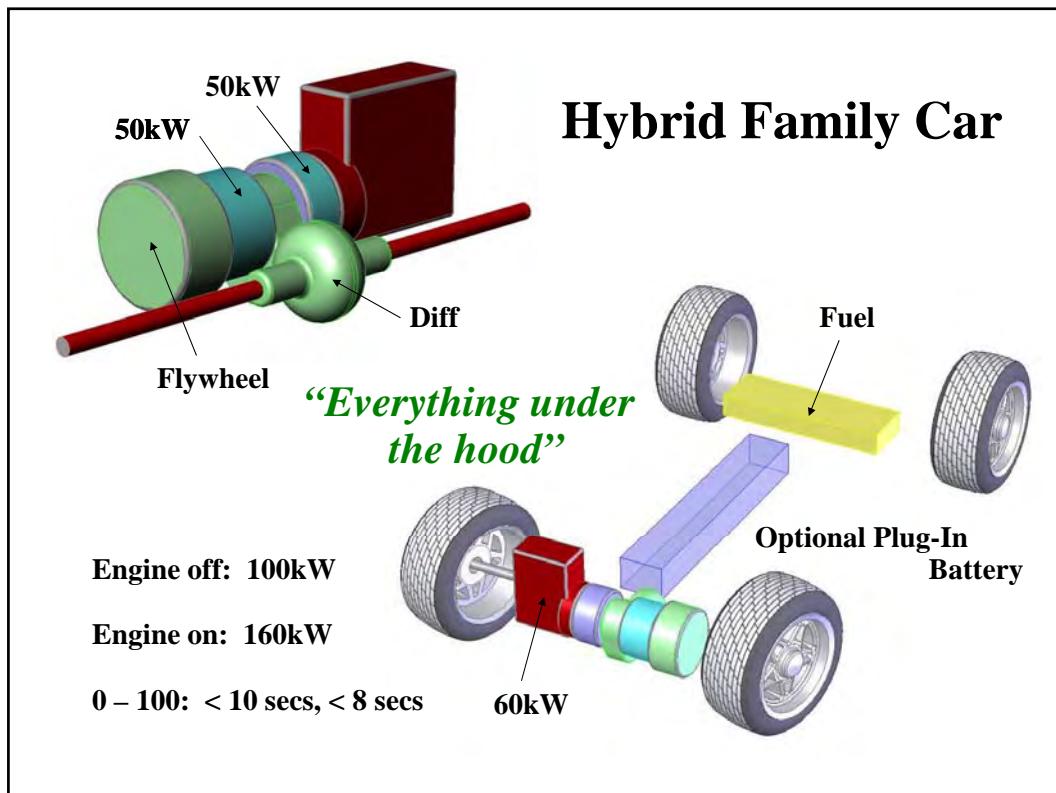


**Replace a ~200kW engine
with an 80kW engine and
150kW surge power system**

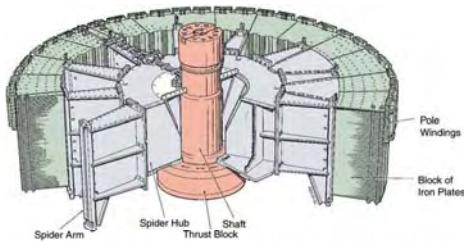
Halve the fuel costs of city buses, globally







Culham Flywheels – Fusion Research



Two flywheels, each 400 megawatts(!)

3750 megajoules each

225 rpm, 775 tonnes

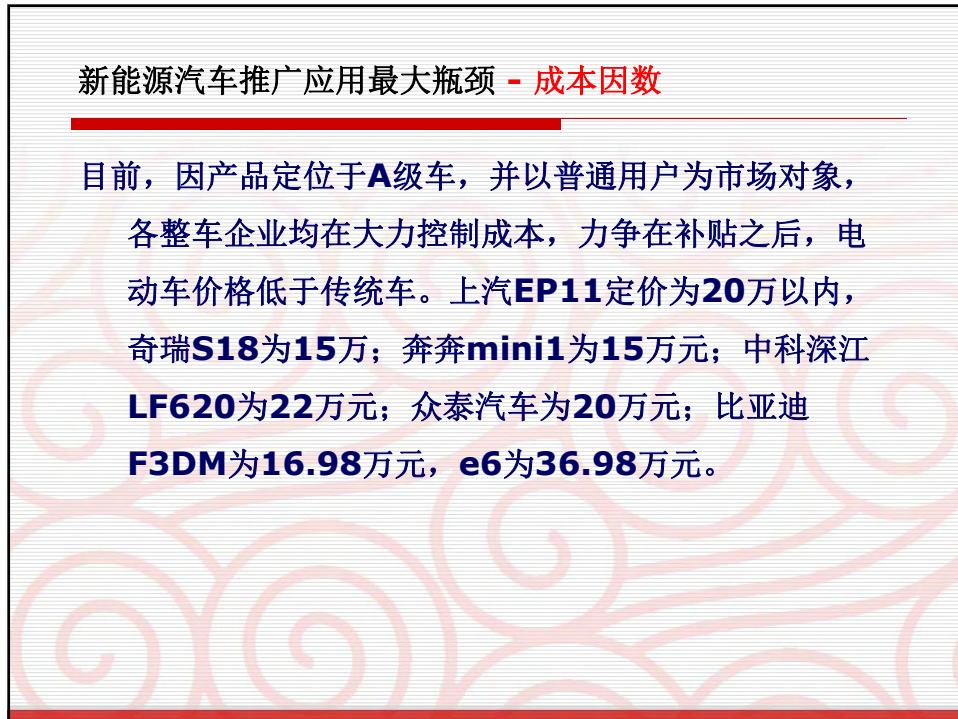
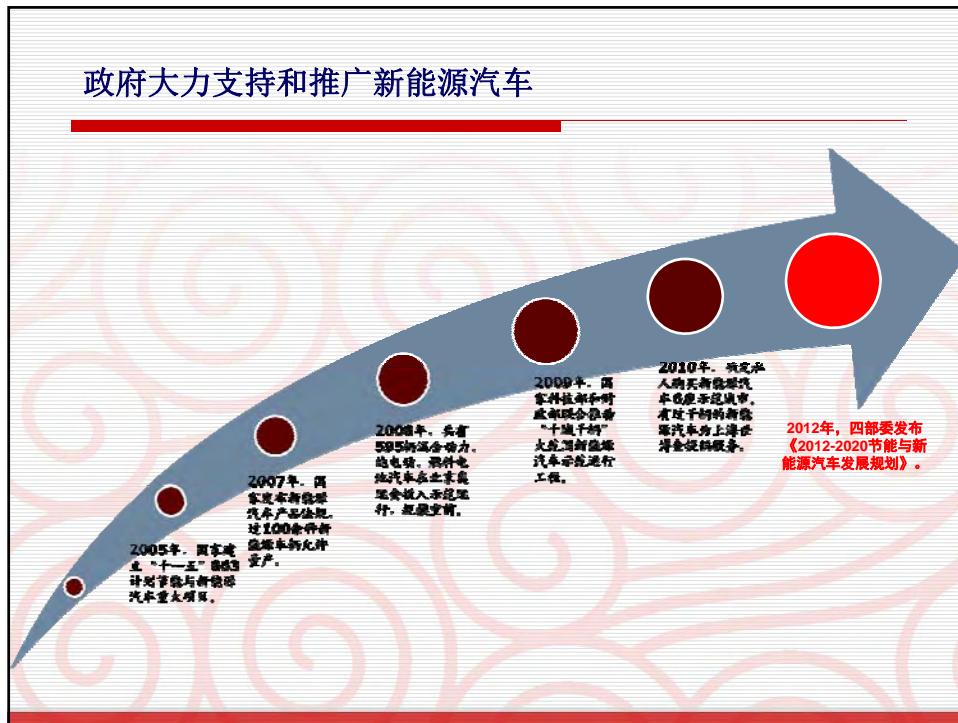
循环型动能推进系统的研发现状和发展方向

HyKinesys 公司创始人、CEO Chris Ellis

北京汽车新能源汽车有限公司 廖越峰 总工

报告提纲

1. EV/HEV动力总成技术状况及瓶颈
2. 飞轮混动基本原理及产品形态
3. 应用实例
4. 发展方向
5. 结论



商用车和工程机械应用前景和挑战

- 政策引导和强力推广，全国规模市场已经形成；
- 批量小，功率大，成本高；
- 节能效果显著。



日本—混合动力与纯电动汽车并行

推出全球首款混合动力车普锐斯后，丰田便认准混合动力这一发展方向。未来几年，丰田将推出10余款油电混合动力车，其中包括第三代普锐斯和雷克萨斯HS 250h混合动力车，截至2011年普锐斯已在全球累计销售300万辆。该公司还计划为租赁公司提供500辆配装锂离子电池的插电式混合动力普锐斯，根据测试结果确定新车上市时间。



丰田第三代普锐斯



丰田雷克萨斯HS 250h混合动力

日本—混合动力与纯电动汽车并行

在本田的电动汽车规划中，油电混合动力技术扮演着重要角色。本田2009年推出的混合动力量产车Insight比普锐斯更紧凑，具有性价比优势，在细分市场中已对普锐斯发起挑战。



本田Insight

日本—混合动力与纯电动汽车并行

日产将更多注意力放在纯电动车上，最有名的是LEAF纯电动车，该车集中体现了日产汽车在电动汽车领域经过数十年投入和研发达到的巅峰水准，可以实现160公里以上的续时里程。目前该车已在日本，美国及欧洲上市。可以说LEAF是目前世界上最接近传统汽车产品品质和驾驶风格的纯电动汽车。



日产LEAF

美国——主攻纯电动和插电式电动汽车

2008年，通用汽车公司发布量产版插电式电动车雪佛兰Volt。这款车在纯电动模式下一次充电可行驶64km，可以使用家用电源充电。Volt于2010年量产，价格约4万美元。通用CEO瓦格纳说：“发布Volt量产版，意味着为我们的下一个百年打开一扇希望之门。”



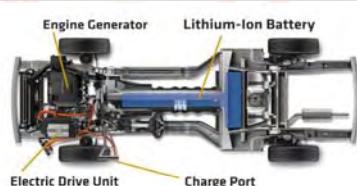
雪佛兰volt

9

混合动力系统的结构与控制



Prius 动力系统



Volt 电动化底盘

10

Cost Comparison

	Toyota Prius	Toyota Camry-h	Toyota Highlander	NewEVA COV/SUV
Acceleration (0-60 mph) (sec)	11	9.0	7.5	<8
Mileage (mpg)	50	40	29	40
4 Wheel Drive	No	No	Yes	Yes
Curb Weight (kg)	1350	1650	1950	1750
Price Diff.* (US\$)	5,000	6,000(?)	9,000	~3,000

* Before applicable up to \$3,750 US federal tax credits (new Energy Bill'05)

11

Applications cross the board



Scalable Product Platform

Full-Sized Sedan

SUV/Truck

100

100

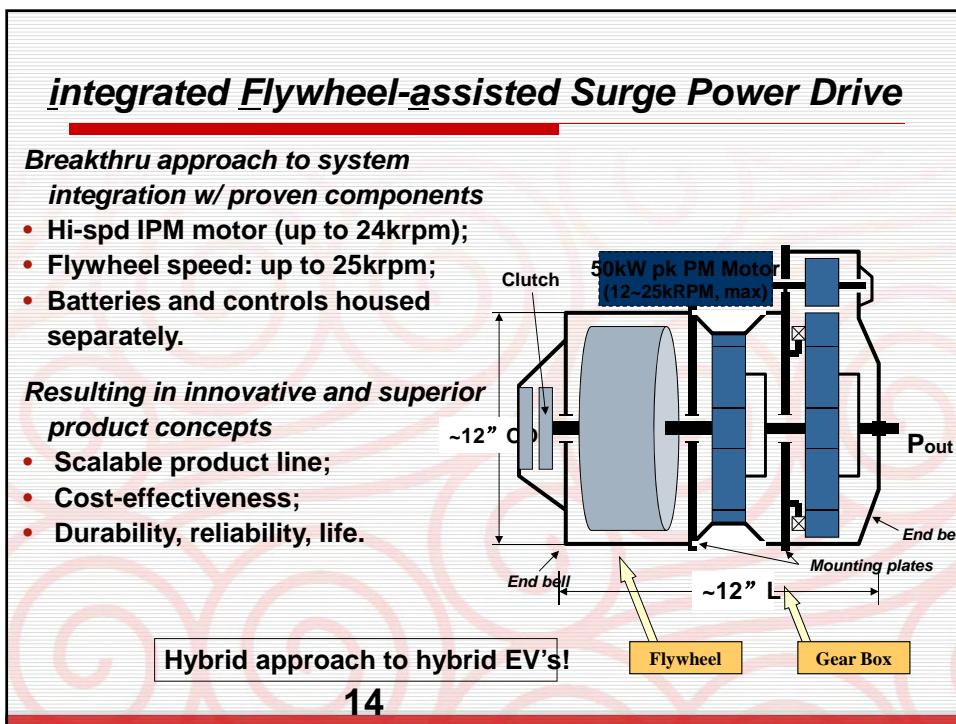
Scalable GMC

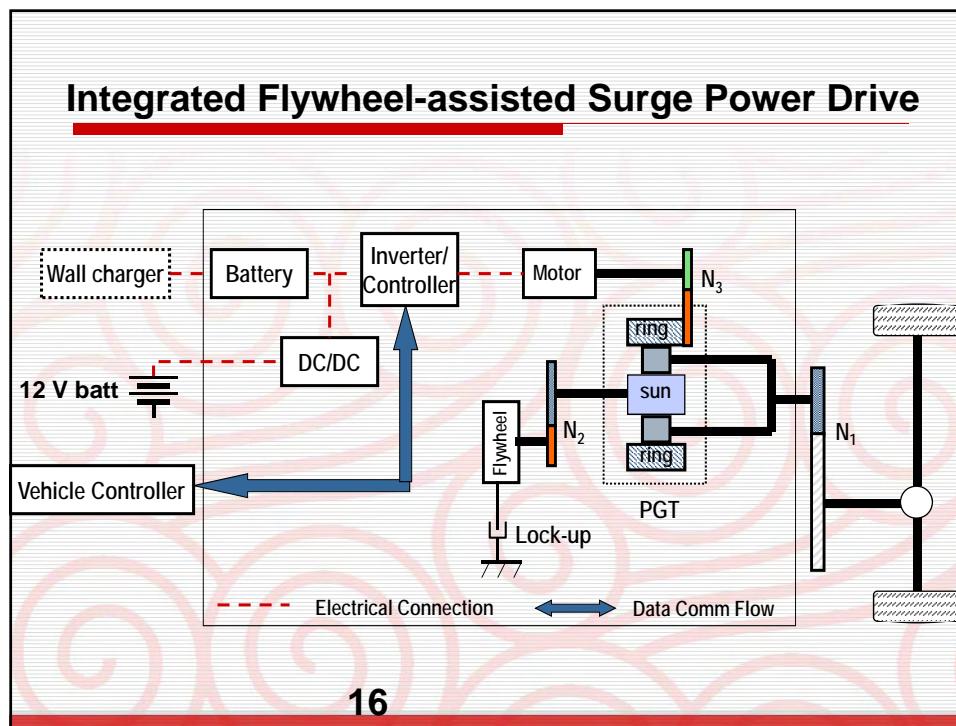
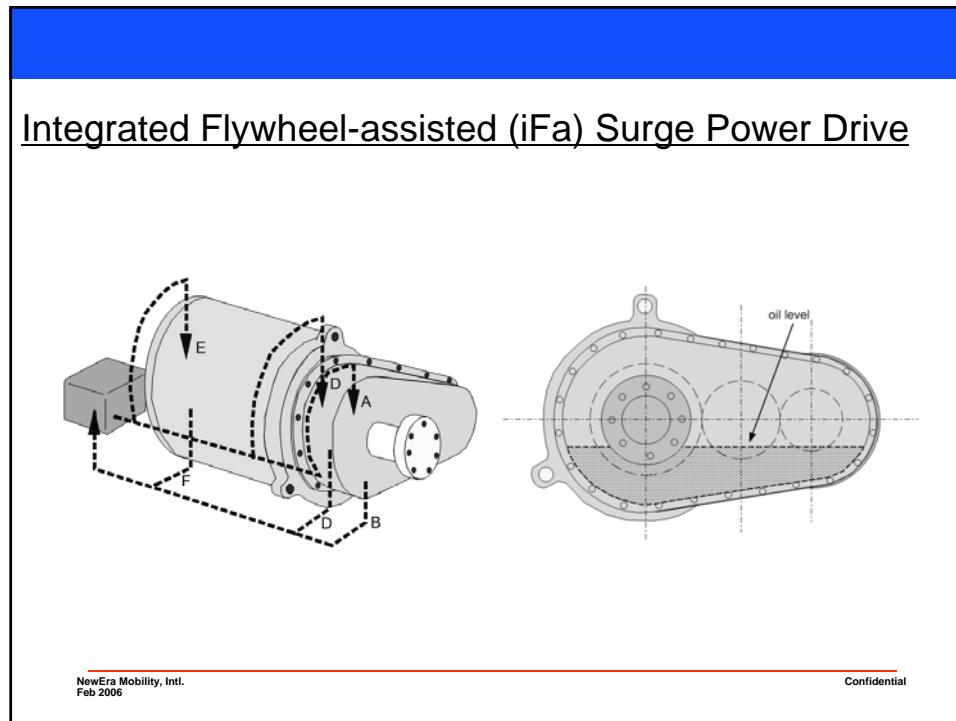
12

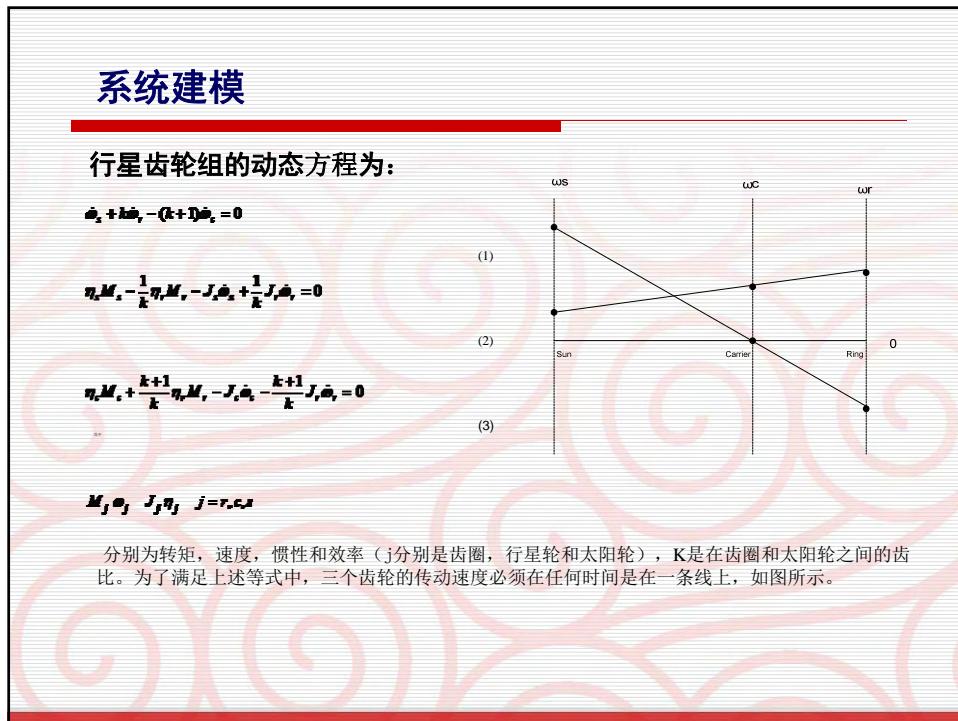
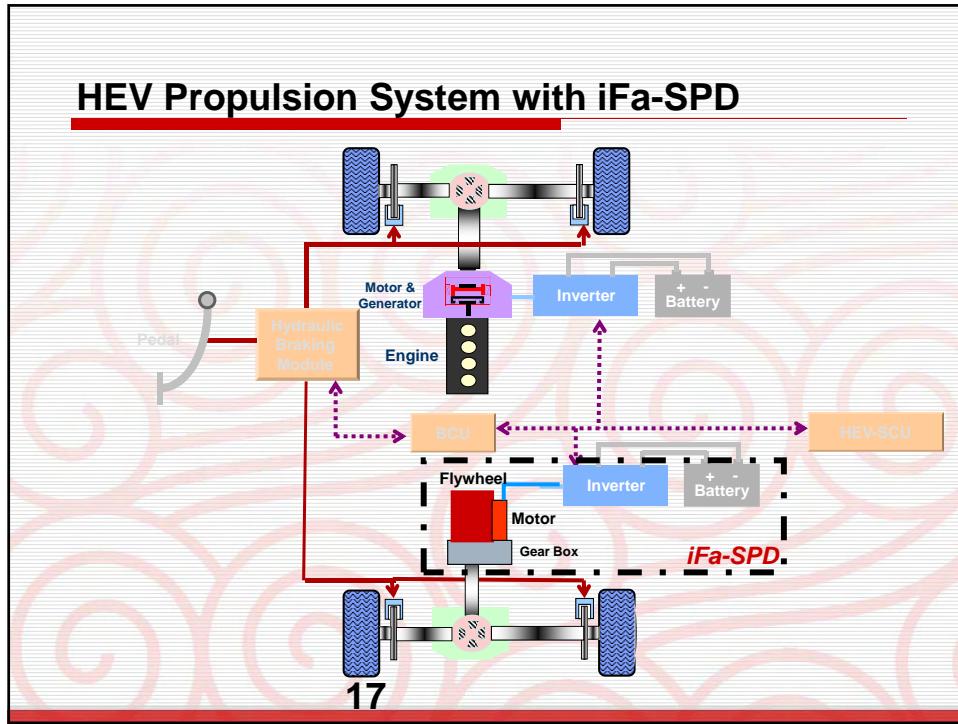
		EPA 75 Urban	Austr. Urban	ECE- 15	Japan 1015	New York City
Traction energy (kJ)	Total	4000	6480	3478	1675	998
	Per km.	377	606	437	402	519
Braking energy (kJ)	Total	1934	4195	953	888	878
	Per km.	182	392	120	213	461
Percentage of braking energy to total traction energy (%)		48.3	64.7	27.5	53.0	88.8

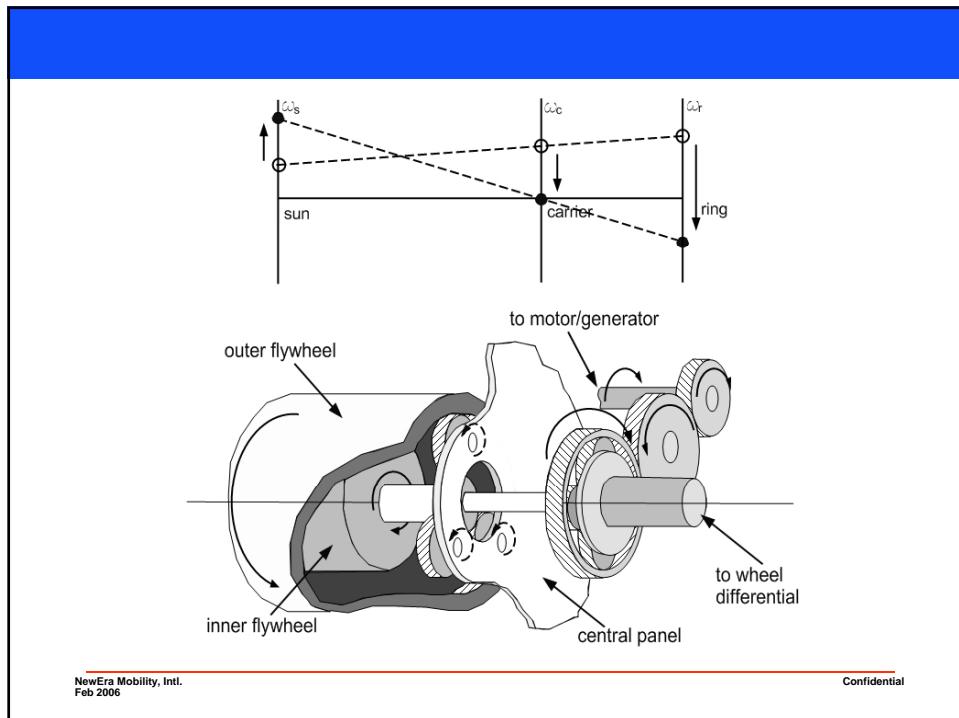
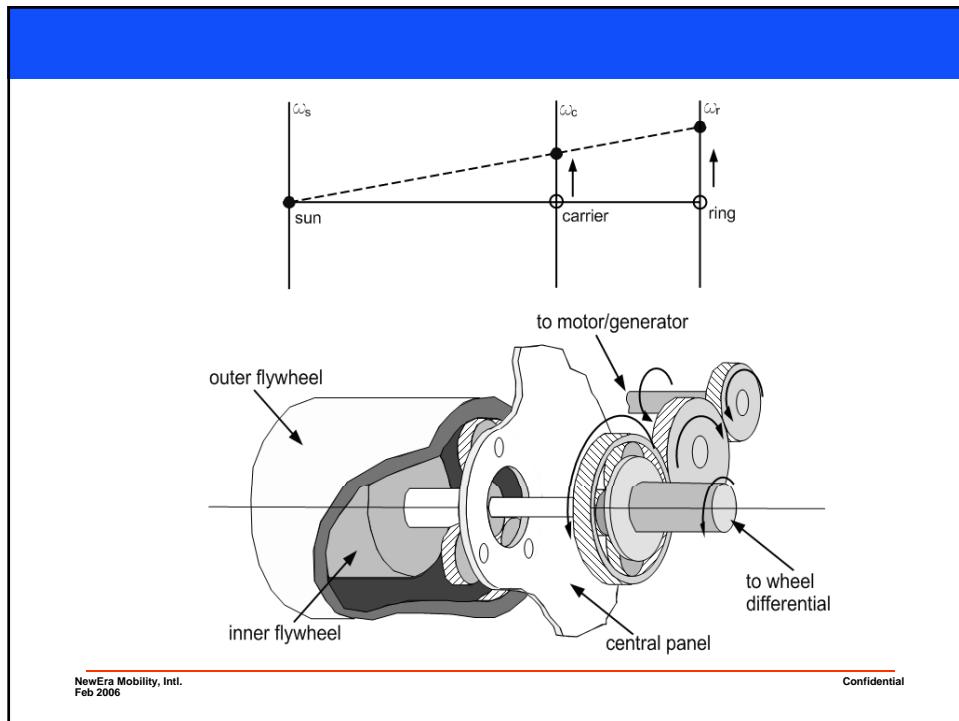
Effective regen braking is key for drastic FE improvement

13









Regen Efficiency Comparison: Battery vs. Flywheel

Assuming 100% kinetic energy recovery:

$$\square \eta_{batt,syst} = \eta_{mot} \times \eta_{inv} \times \eta_{batt,rech} \times \eta_{batt,disch} \times \eta_{mot} \times \eta_{inv}$$

$$= 0.9 \times 0.9 \times 0.7 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.9 = 0.39$$

$$\square \eta_{fw,syst} = \eta_{gear} \times \eta_{fw} \times \eta_{fw} \times \eta_{gear}$$

$$= 0.95 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.95 = 0.74$$

$$\square \eta_{fw,hev} = 0.5 \times (\eta_{mot} \times \eta_{inv} \times \eta_{batt,rech} \times \eta_{batt,disch} \times \eta_{inv} \times \eta_{mot}) + 0.5 \times (\eta_{gear} \times \eta_{fw} \times \eta_{fw} \times \eta_{gear})$$

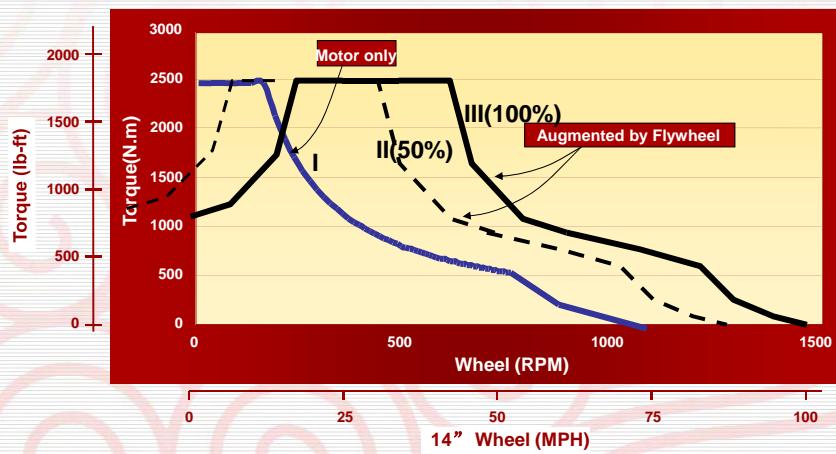
$$= 0.5 \times (0.9 \times 0.9 \times 0.7 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.9) + 0.5 \times (0.95 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.95)$$

$$= 0.57$$

Flywheel-based system is nearly TWICE as efficient !

21

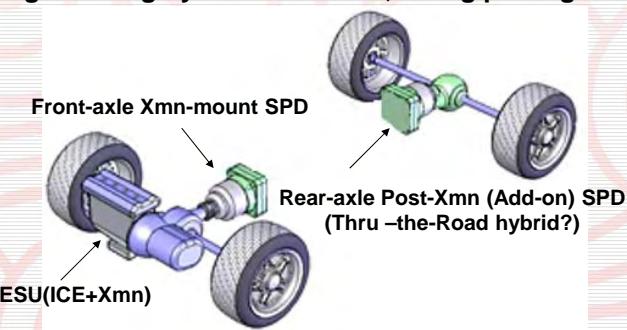
Flywheel Hybrid Drive System Torque-Speed Characteristic



22

Product Attributes and Characteristics

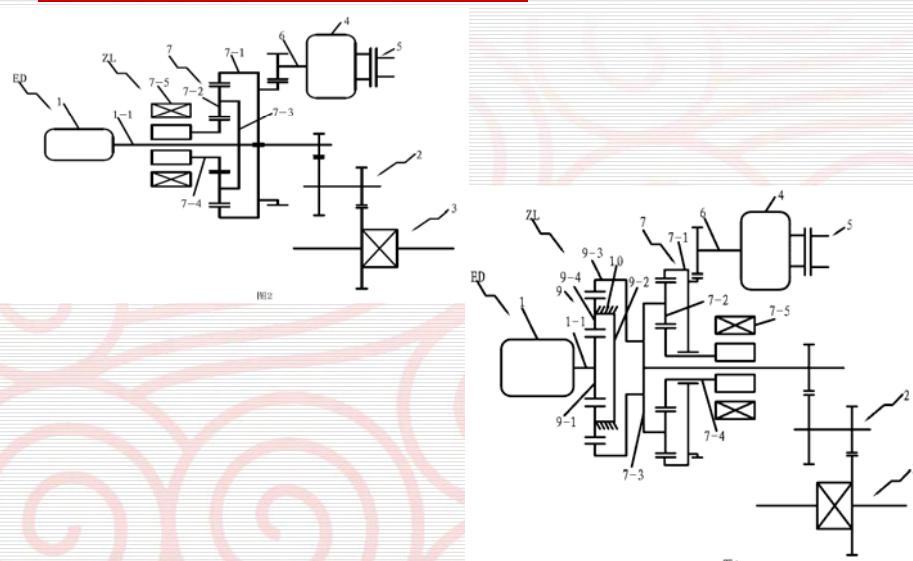
- Well suited to Add-On to rear diff as Option or Retrofit Kit;
- Equally applicable to engine/Xmn-mount front transaxle integration;
- Plug-in HEV up-gradable (ZEV, FE >100 mpg);
- Size & Weight : Roughly one cubic foot, ~50kg package

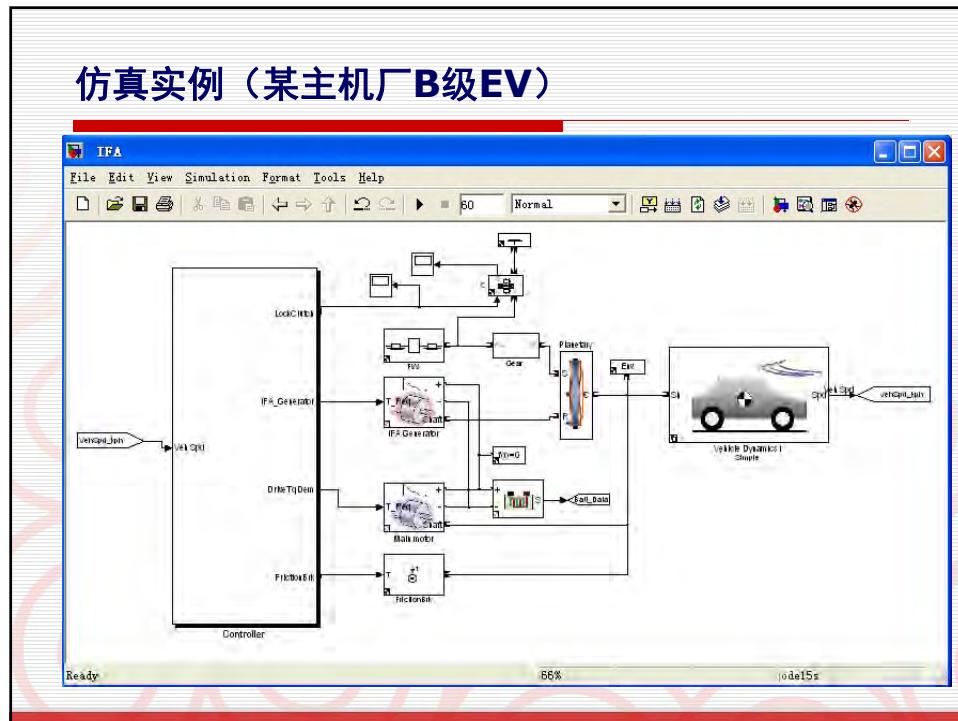
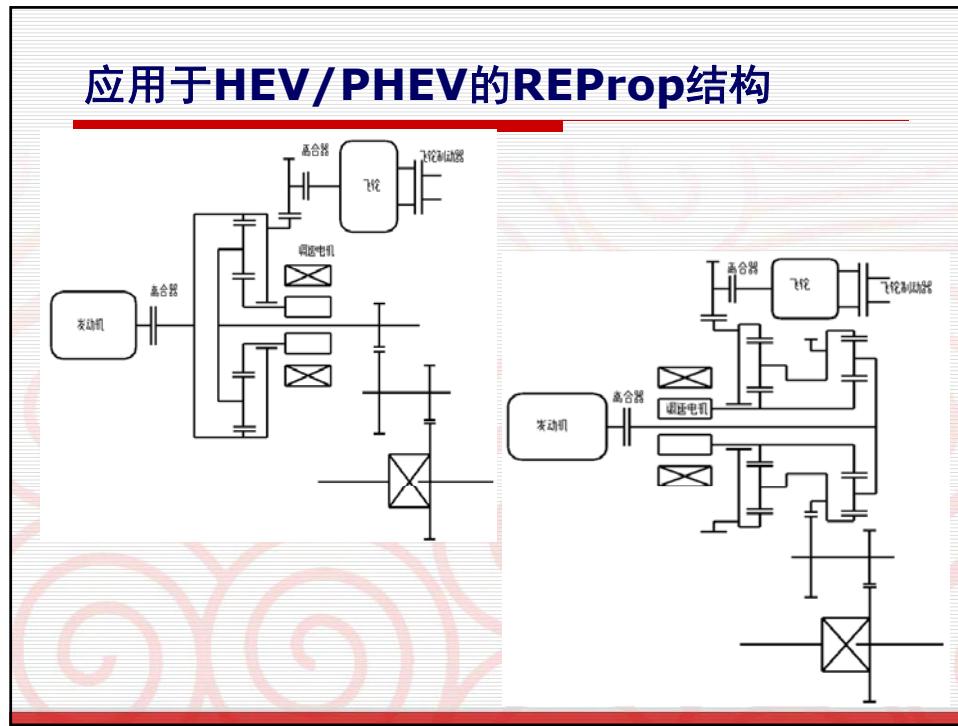


Chassis installation alternatives

23

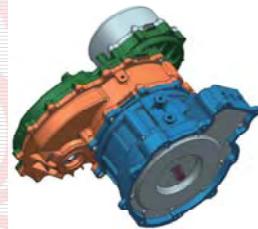
应用于EV的REProp结构





仿真实例（某主机厂B级EV）

- 动力性：0~100kph加速16s $\xrightarrow{48\%}$ 10.8s
- 经济性：续驶里程87km $\xrightarrow{32\%}$ 115km
- 灵活性：能匹配各级别新能源车型
- 低成本：在同类产品中具有极低的价格优势
- 安全性：比机械式、储能式具有更高的安全性



Flywheel Hybrid Powertrain = SPU + CPU

CPU: Continuous Power Unit

- ICE
- eMotor
- FC engine

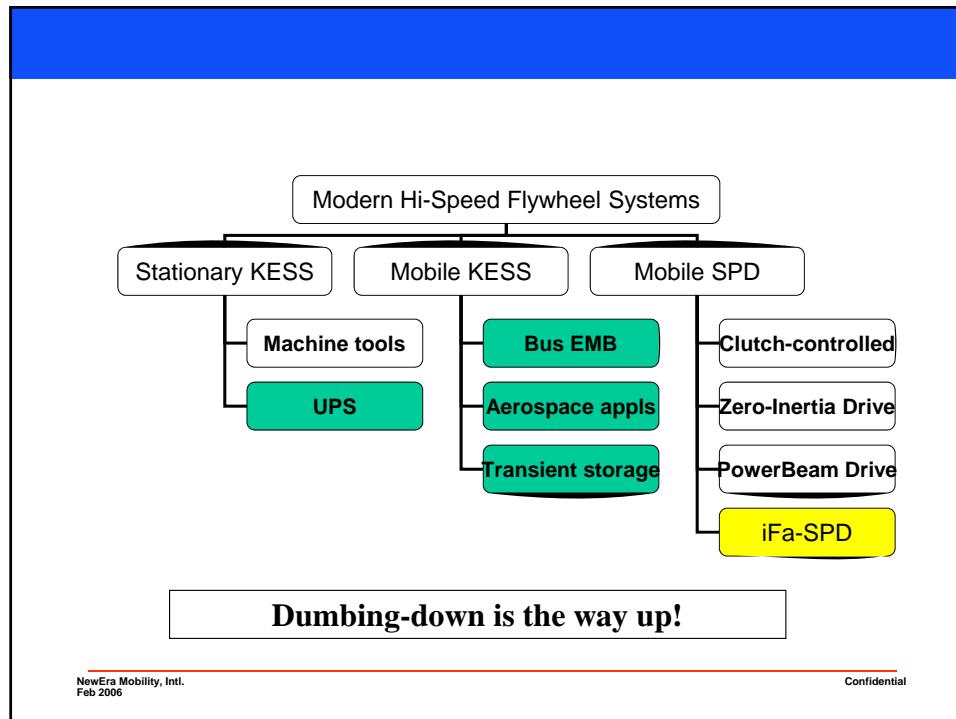
SPU: Surge Power Unit

- Battery-based e-Drive system;
- Hydraulic power and storage system;
- Flywheel-based power system (3-D Optimization!)

Compared to traditional Flywheel-based ESS

- Flywheel speed: ~25krpm vs. 50-100krpm
- Stored energy: ~ 0.1 kWh vs. 20 kWh
- Rigidity & Safety
 - Tolerant of high shock and vibration loads from road

Light & compact package w/o gyroscopic effect & safety hazard.



Presentation at AFS-Trinity Power

Flywheel or No Flywheel? *- That's the question!*

Frank Liao

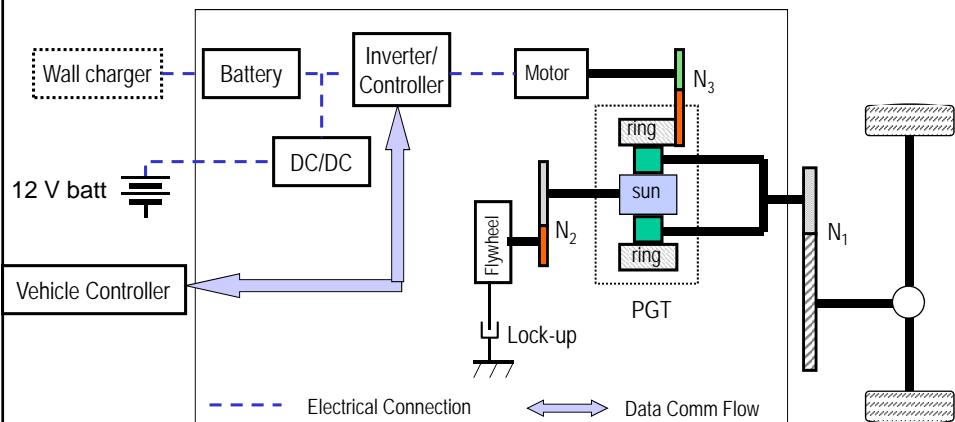
NewEra Mobility, Intl.

Sept. 19th, 2006

NewEra Mobility, Intl.
Feb 2006

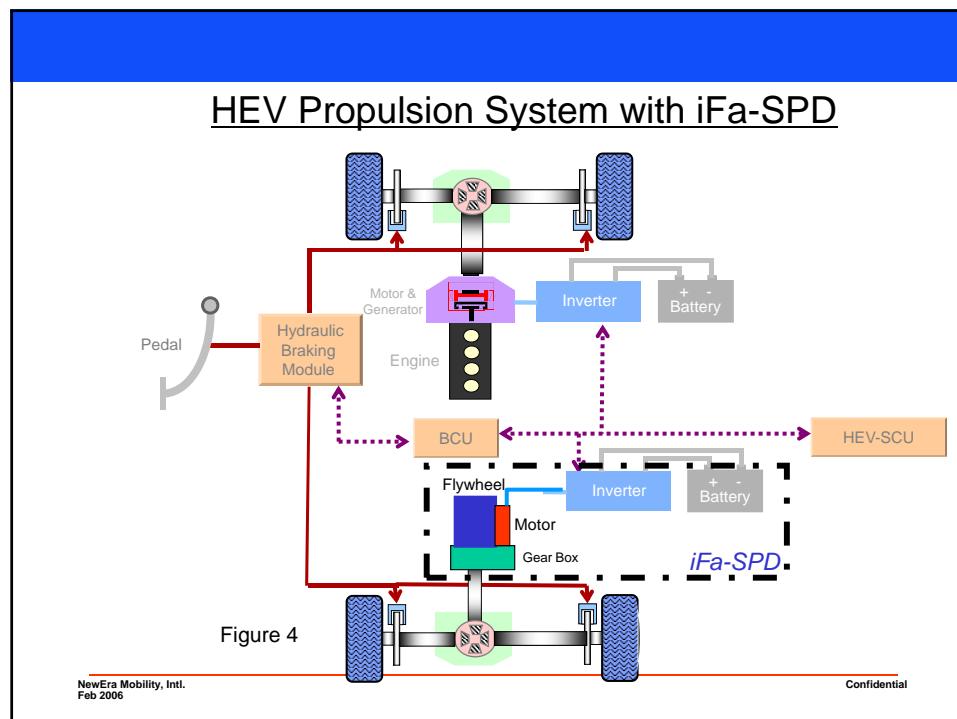
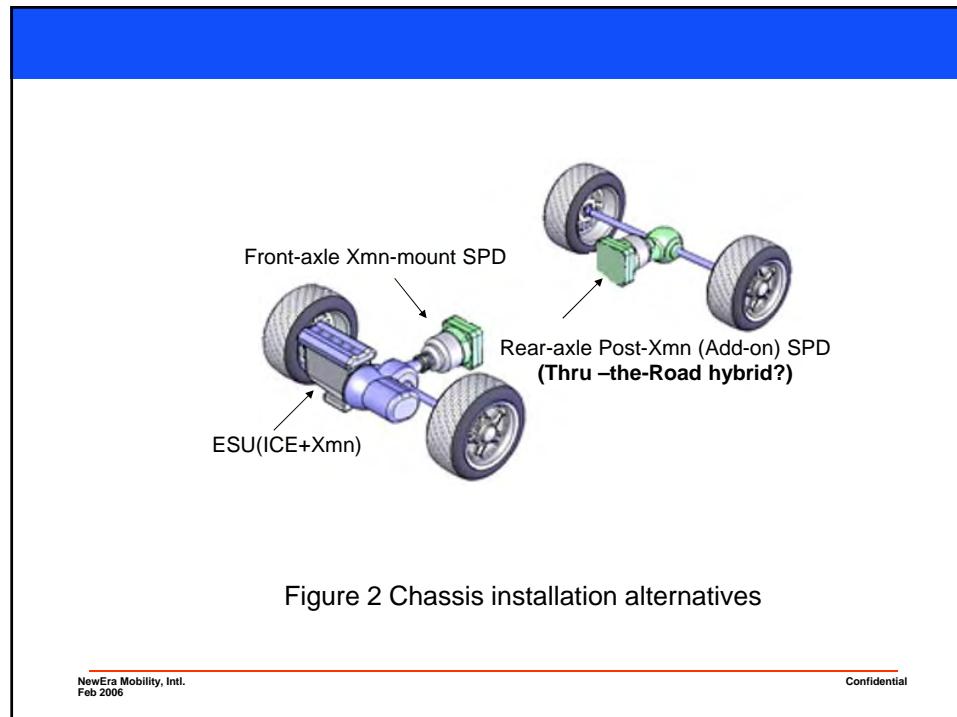
Confidential

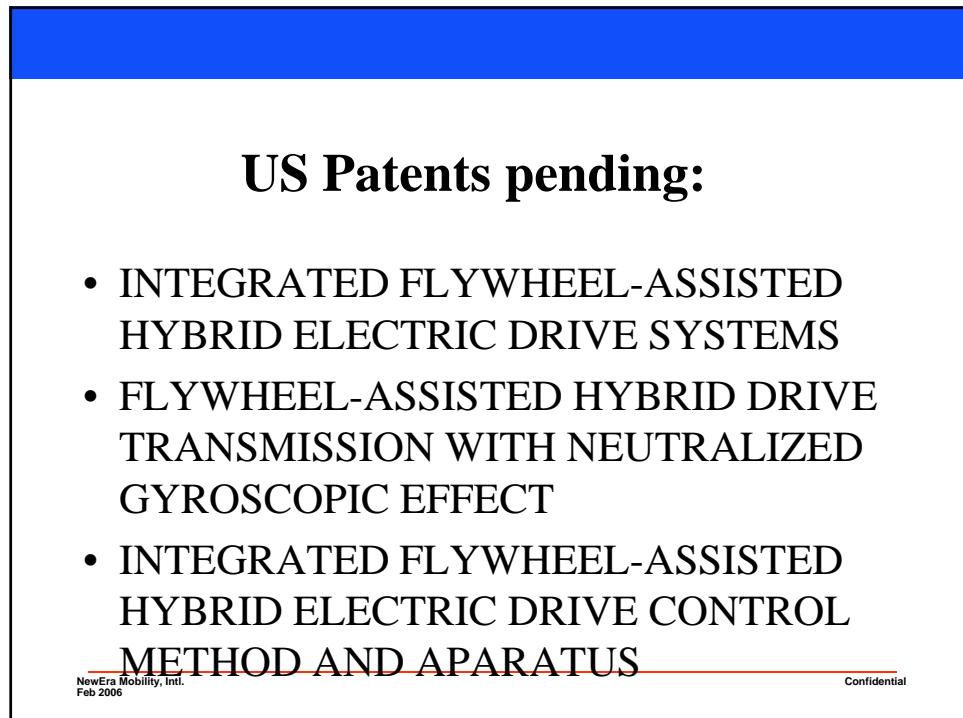
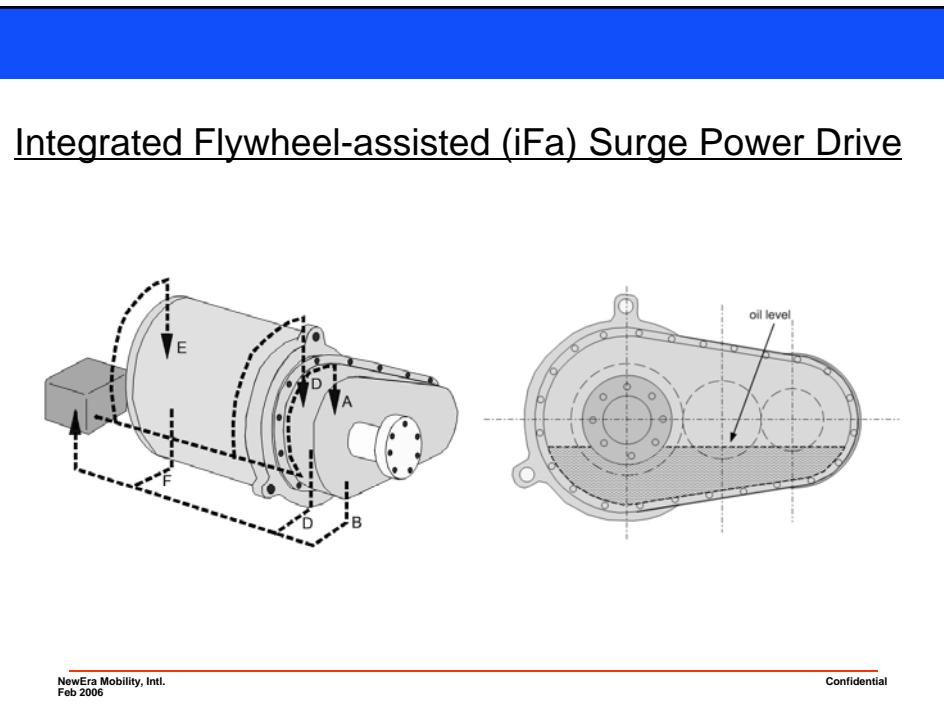
Integrated Flywheel-assisted (iFa) Surge Power Drive

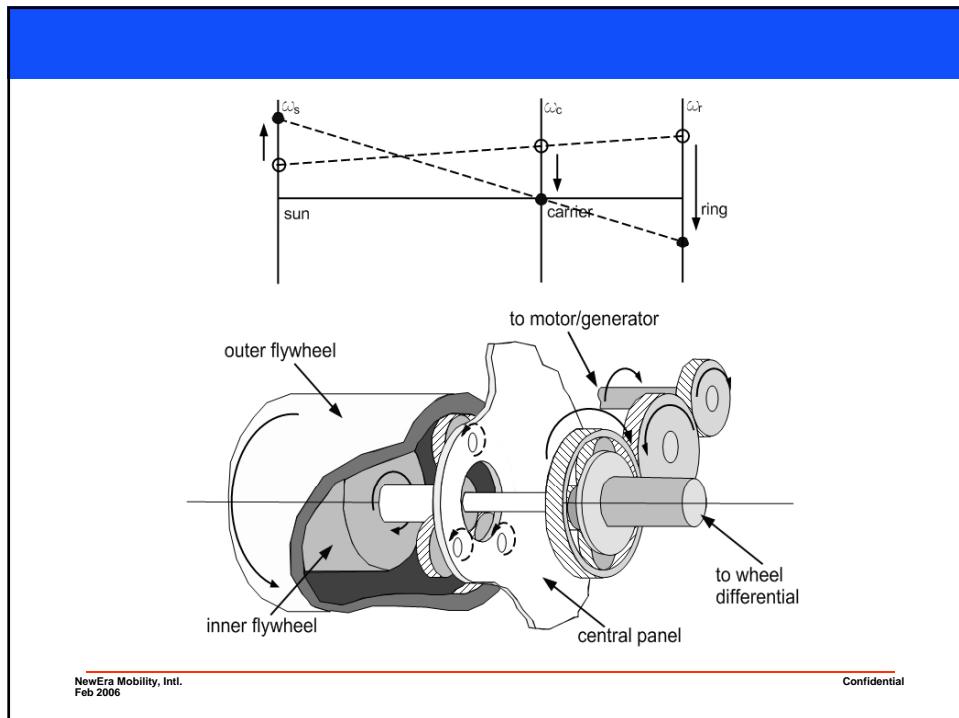
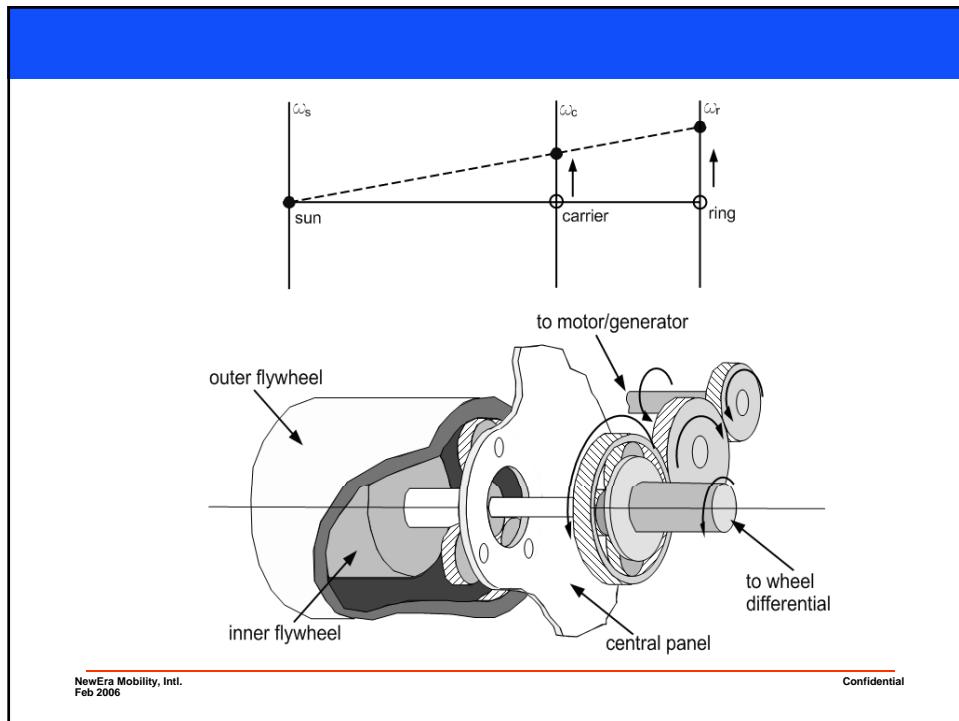


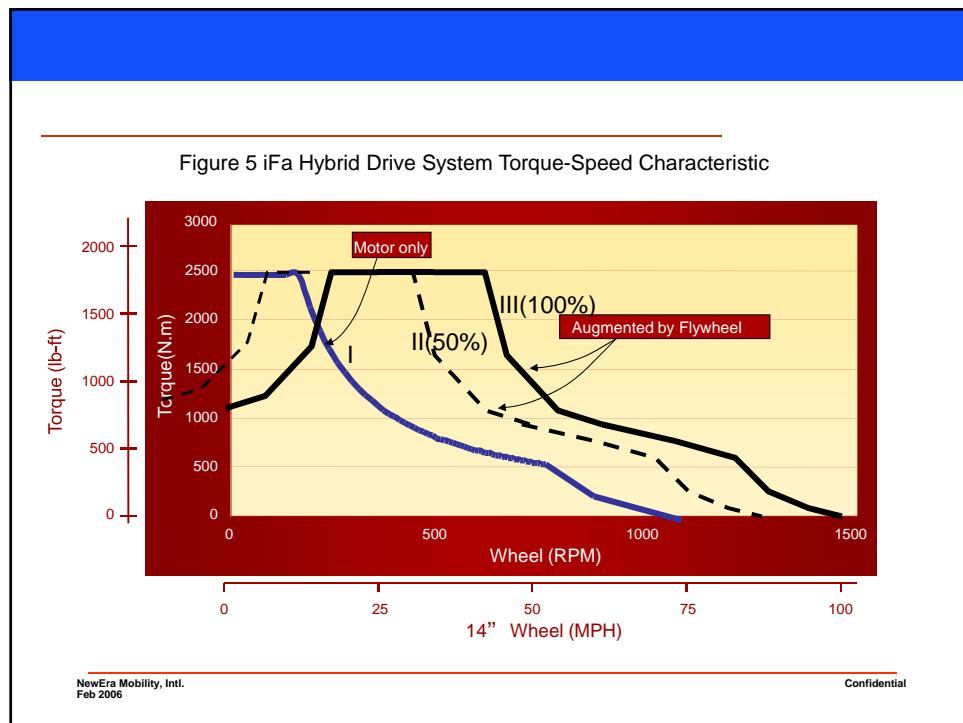
NewEra Mobility, Intl.
Feb 2006

Confidential









Powertrain Control

飞轮混动车辆的控制

申水文

中研电控 &

同济大学 &

Ricardo UK Ltd

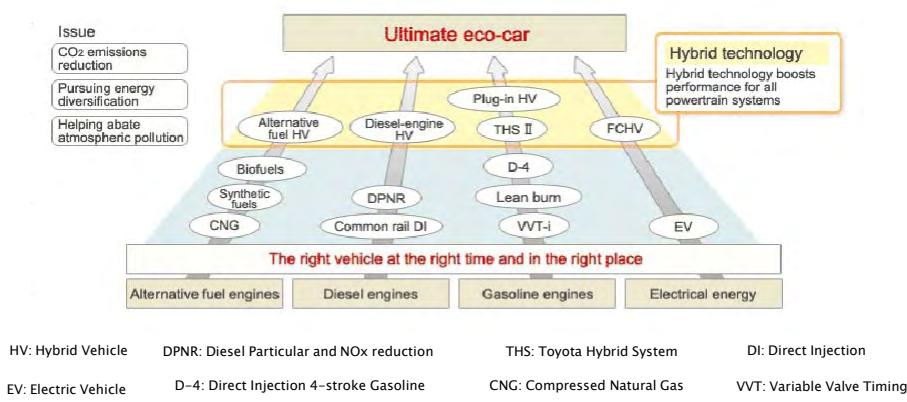
sw.shen@mtronics.co

shuiwen.shen@tongji.edu.cn

1

飞轮技术综述

Toyota considers **hybrid systems** to be a fundamental technology for reducing the environmental impact of vehicles because they allow energy recovery and storage, increasing the overall energy efficiency of the vehicle.



飞轮技术研讨会, 北京

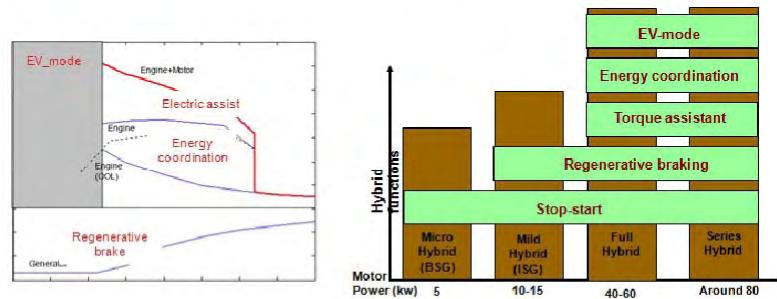
2

飞轮技术综述

Hybrid electric vehicles – What are hybrid functions



- **Stop Start** – Stop an engine when a vehicle stops, and re-start it by a motor when the vehicle moves
- **Regenerative braking** – During braking capture and store the vehicle kinetic energy to a battery
- **Electric Assist** – Use motor to assist the acceleration
- **EV-mode** – Use motor only to propel the vehicle
- **Energy Coordination** - Use motor to optimise the engine operations

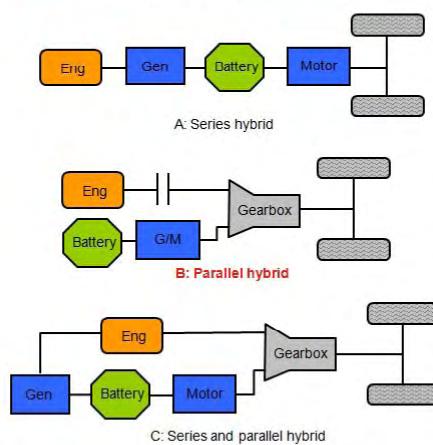


飞轮技术研讨会, 北京

3

飞轮技术综述

Hybrid electric vehicles – Types of hybrid vehicles

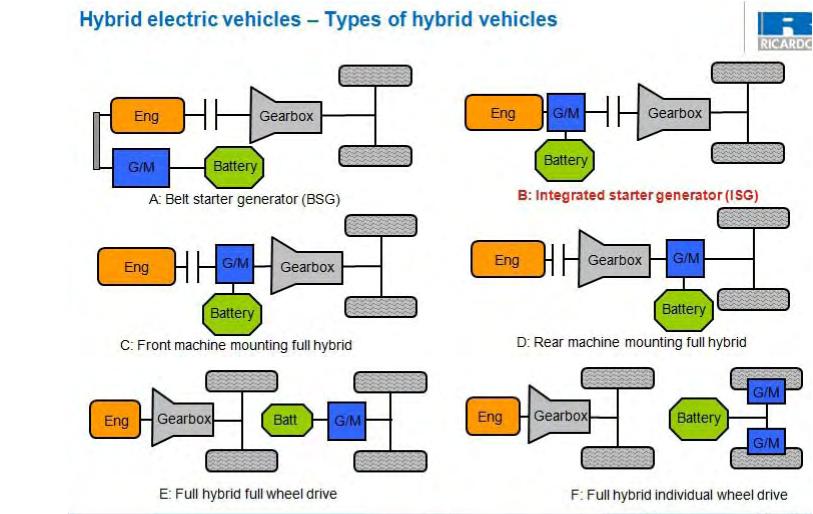


飞轮技术研讨会, 北京

4

飞轮技术综述

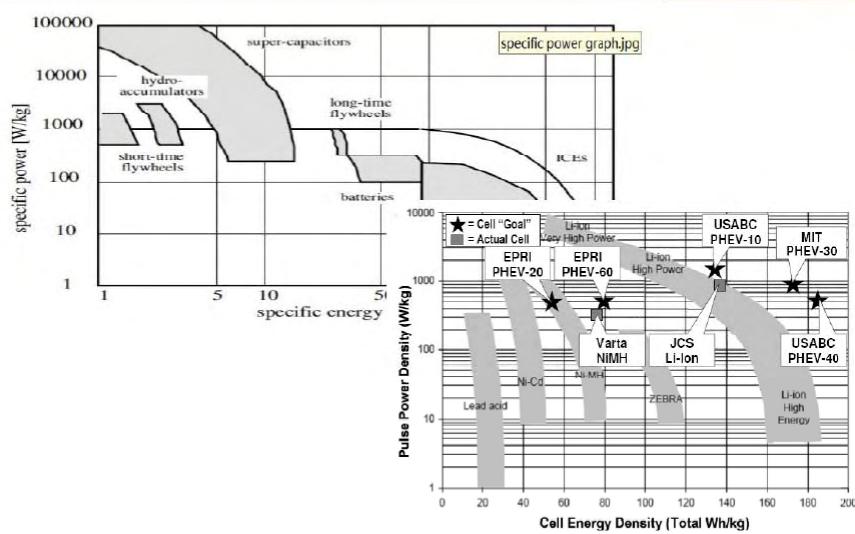
Hybrid electric vehicles – Types of hybrid vehicles



飞轮技术研讨会, 北京

5

飞轮技术综述



飞轮技术研讨会, 北京

6

飞轮技术综述



加速
↓
减速
↑

转速比减小
↑
转速比增大
↓

飞轮技术研讨会, 北京

7

飞轮技术综述

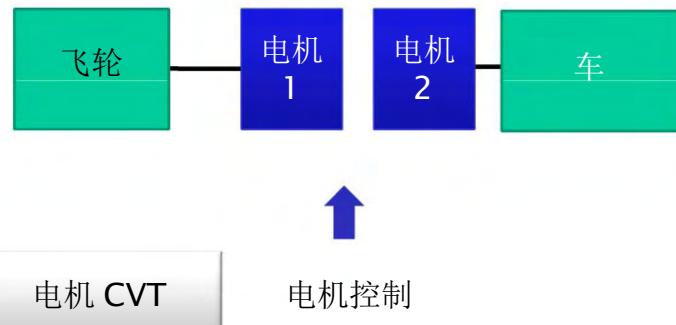


↑
CVT控制

飞轮技术研讨会, 北京

8

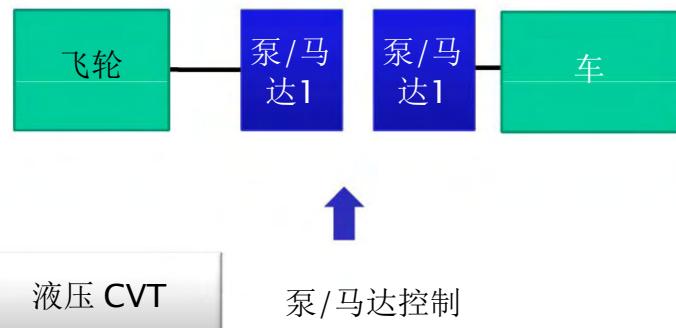
飞轮技术综述



飞轮技术研讨会, 北京

9

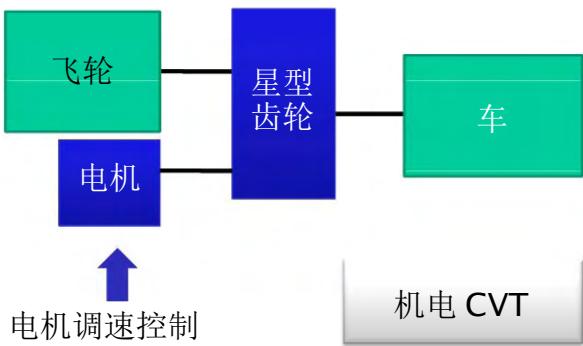
飞轮技术综述



飞轮技术研讨会, 北京

10

飞轮技术综述



飞轮技术研讨会, 北京

11

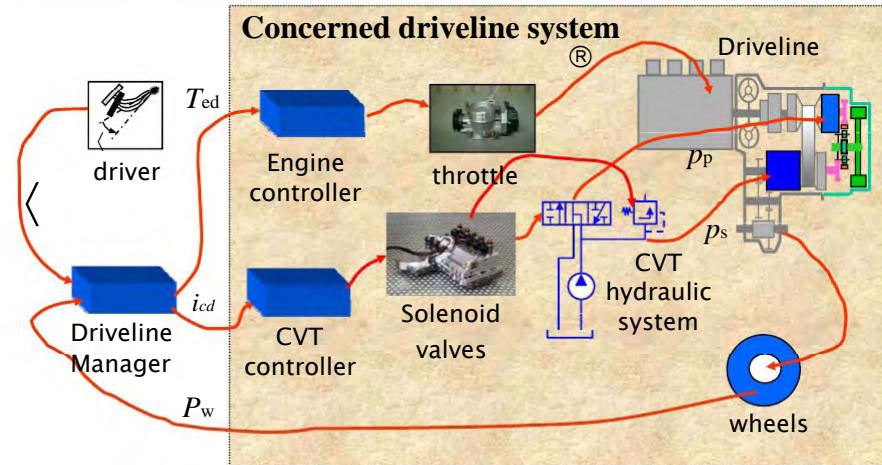
Outline

- Control targets
 - Economy (fuel consumption)
 - Driveability (acceleration)
- Control inputs
 - Engine torque
 - CVT ratio
- Control outputs
 - Power at wheels

飞轮技术研讨会, 北京

12

Outline



飞轮技术研讨会, 北京

13

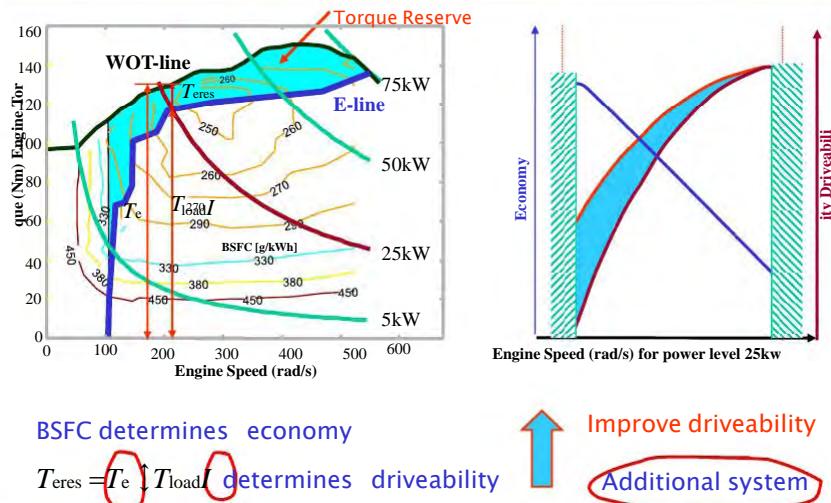
Economy vs. Driveability

- The control targets are conflicting
 - Generally, good economy, bad driveability
 - Otherwise, bad economy, good driveability
- The main concerned area is economy
 - Increasing energy price
 - Governmental regulation
- Focusing on how to improve driveability
 - Under requirement of minimum fuel consumption

飞轮技术研讨会, 北京

14

Economy vs. Driveability



飞轮技术研讨会, 北京

15

Economy vs. Driveability

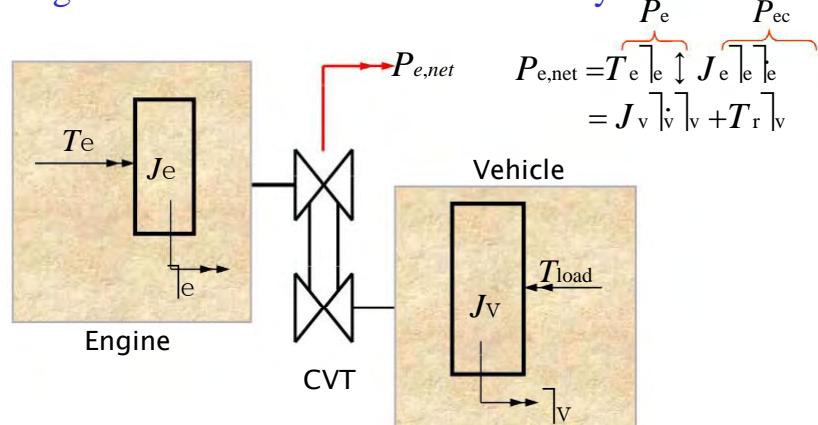
- Maximization of Fuel Economy
 - Control engine working along E-line
 - Only for stationary operation
- Improving Driveability
 - Steer engine using more of the torque reserve
 - Shift CVT to increase the torque reserve
 - Only for transient operation

飞轮技术研讨会, 北京

16

Physical Background

Engine inertia influences on driveability



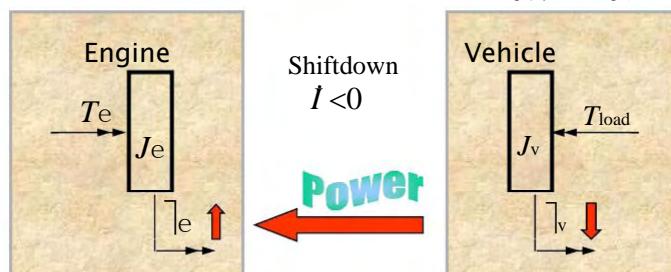
飞轮技术研讨会, 北京

17

Physical Background

Shift - Behavior

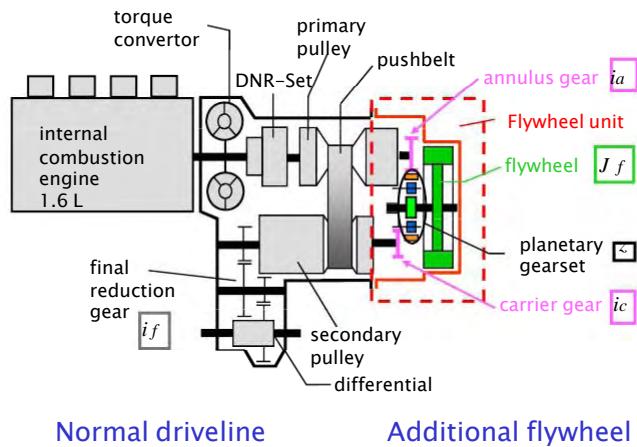
$$\dot{l}_e = \frac{T_e \uparrow T_{load} I \uparrow J_v l_e II > 0}{J_e + J_v I_2} \quad \dot{l}_v = \frac{T_e / I \uparrow T_{load} + J_e l_v II // II > 0}{J_e / I_2 + J_v}$$



飞轮技术研讨会, 北京

18

Mechanical Solution



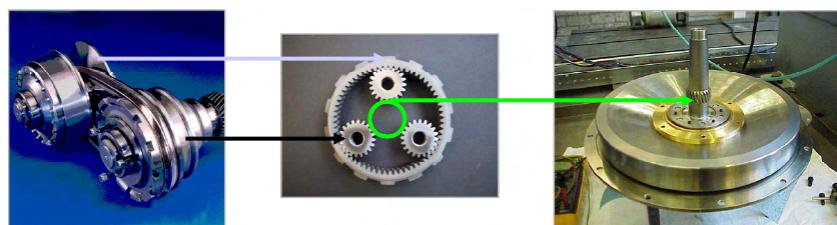
Normal driveline

Additional flywheel

飞轮技术研讨会, 北京

19

Mechanical Solution



push-belt
CVT

planetary
gear-set

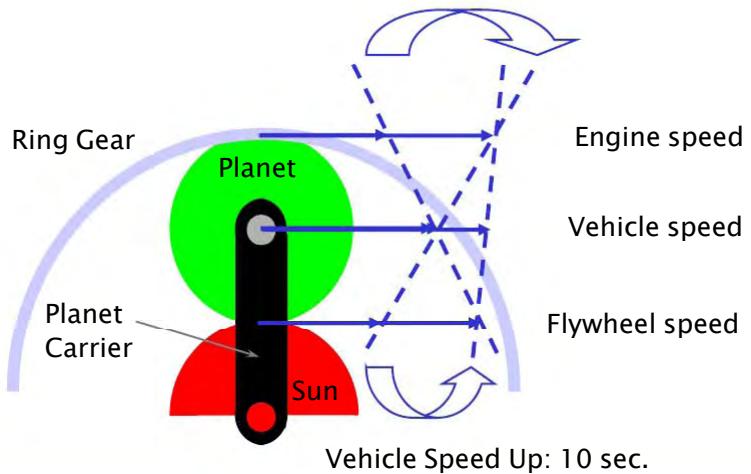
flywheel

飞轮技术研讨会, 北京

20

Mechanical Solution

Engine Speed Up: 2 sec.

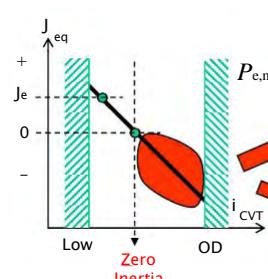


飞轮技术研讨会, 北京

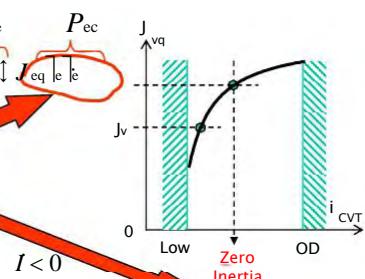
21

Mechanical Solution

Equivalent engine inertia
as a function of CVT ratio



Equivalent vehicle inertia
as a function of CVT ratio



$$\bar{\dot{I}}_e = \frac{T_e \uparrow T_H \uparrow J_{vq} \dot{I}_{eII}}{J_{eq} + J_{vq} I^2}$$

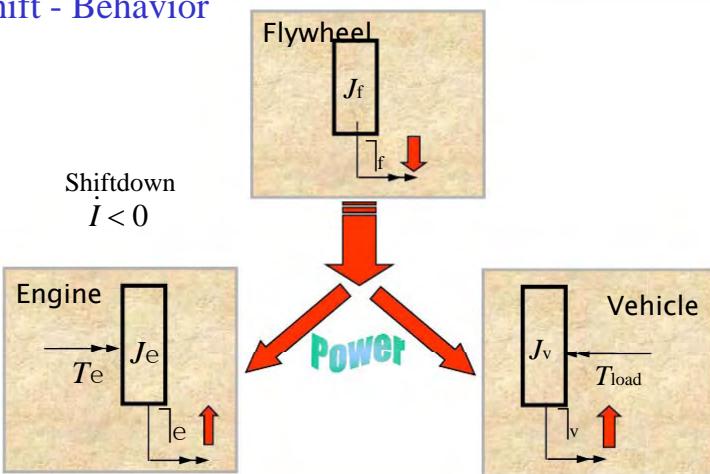
$$\bar{\dot{I}}_v = \frac{T_e / I \uparrow T_r + J_{eq} \dot{I}_v I / \dot{I}_3}{J_{eq} / I_2 + J_{vq}}$$

飞轮技术研讨会, 北京

22

Physical Background

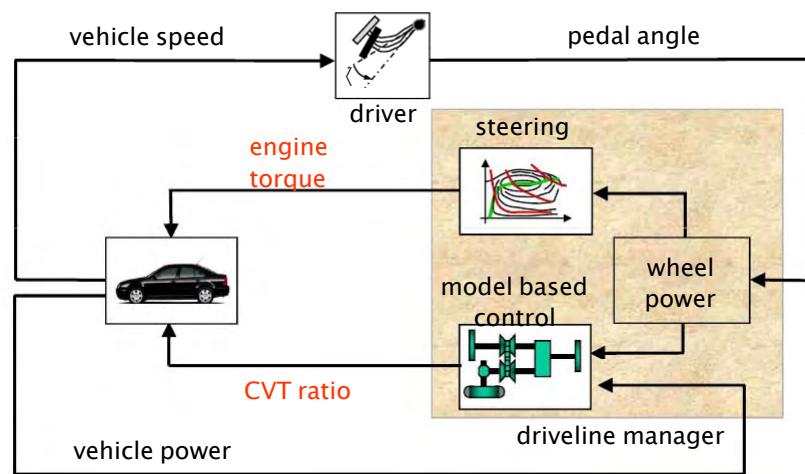
Shift - Behavior



飞轮技术研讨会, 北京

23

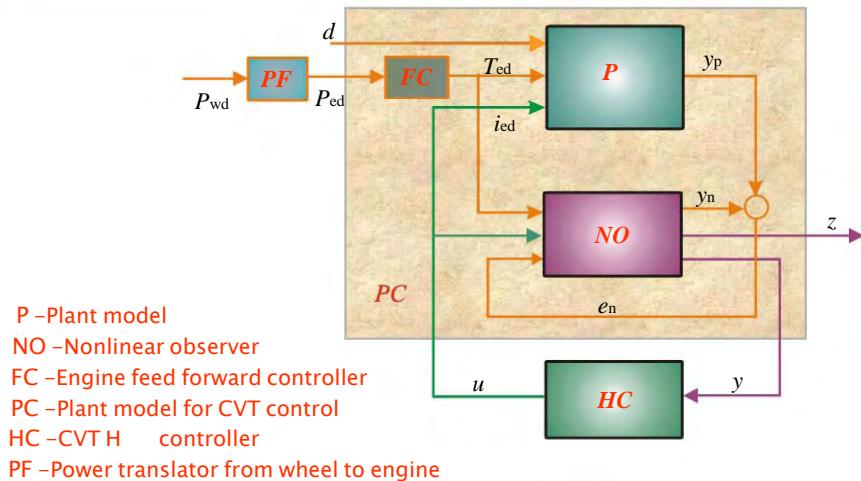
Controller Design



飞轮技术研讨会, 北京

24

Controller Design

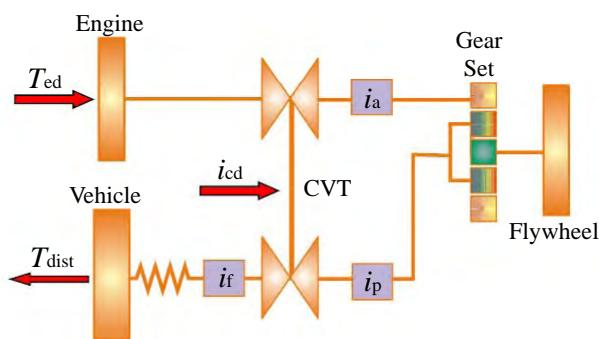


飞轮技术研讨会, 北京

25

Controller Design

- **Inputs**
 $u_1 = T_{ed}$
 $u_2 = i_{ed}$
- **Disturbance**
 $w = T_{dist}$
- **System states**
 \dot{x}_e Engine speed
 \dot{x}_v Wheel speed
 T_d Driving torque
 i_c CVT ratio
- **Outputs**
 \dot{x}_e Engine speed
 \dot{x}_v Wheel speed

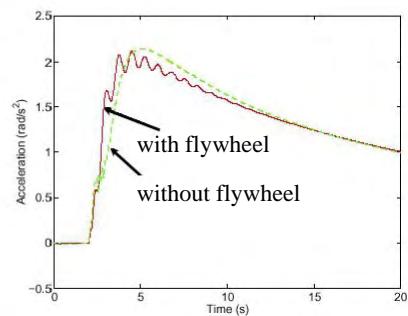
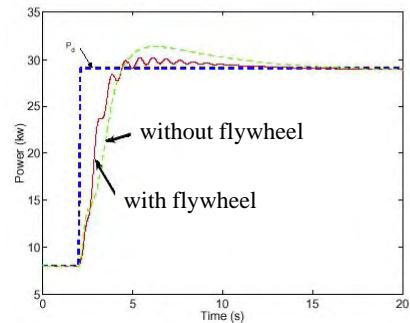


$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathbf{f}(x) + \mathbf{g}_1(x)u_1 + \mathbf{g}_2(x)u_2 + \mathbf{q}w \\ y &= \mathbf{c}x\end{aligned}$$

飞轮技术研讨会, 北京

26

Control Results

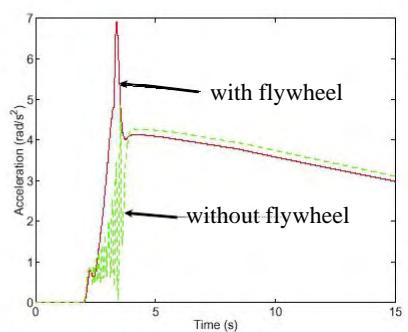
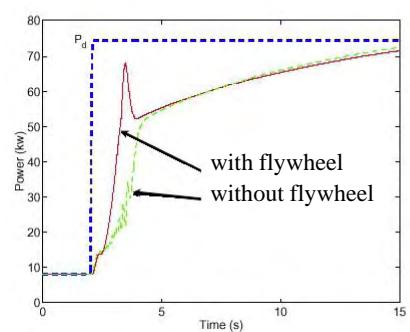


Control results for the desired power changed from 8kw to 28kw

飞轮技术研讨会, 北京

27

Control Results

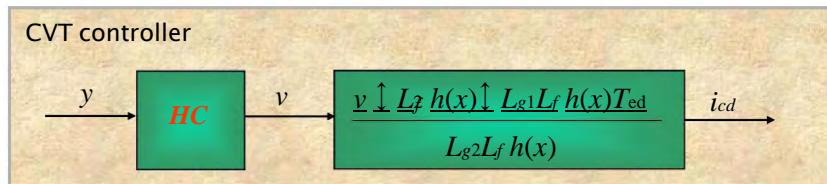


Control results for the desired power changed from 8kw to 75kw

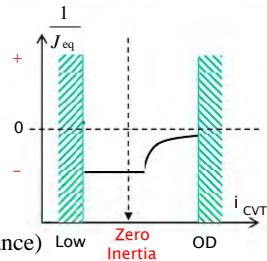
飞轮技术研讨会, 北京

28

Control Results



$$\frac{1}{L_g2L_fh(x)} = k_* \left(\frac{1}{J_{eq}} + \frac{J_{eq} + J_{vq}I_2}{J_{eq} + J_{vq}I_2} \right)$$



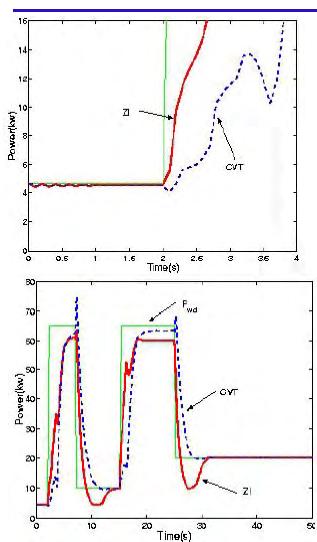
- Problems

- $J_{eq}=0$
- Changing sign of J_{eq} (influence on control performance)

飞轮技术研讨会, 北京

29

ZI-CVT vehicle control



Conclusion

- Better fuel economy expected with engine working along E-line for CVT driveline
- High driveability expected with new strategy for driveline control and additional flywheel system

飞轮技术研讨会, 北京

31