

# 电磁耦合强混合动力车技术研究

陈汉玉<sup>1,2</sup>, 袁银南<sup>1</sup>, 张彤<sup>1,2</sup>, 于海生<sup>2</sup>

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 上海华普汽车有限公司, 上海 201501)

**摘要:** 混合动力车的节油和减排效果应明显, 开发强混合动力车是最现实的解决方案。基于动力伺服概念, 以直接电磁耦合技术, 选择机械功率透过式双电机方案, 开发了动力伺服油电强混合动力系统, 同时对整车动力系统结构、工作原理以及整车控制策略进行了分析。运用 Matlab/Simulink 建立整车模型, 对发动机、电动机以及双转子发电机的输出转矩进行了仿真分析, 在电机试验台上对电机的外特性以及工作效率进行了相关试验。研究结果表明: 输出转矩仿真值能很好的满足循环工况需求, 且电机输出效率高, 可达 86%, 满足混合动力车设计要求。上述研究对今后电磁耦合油电强混合动力车的整车标定匹配工作具有参考作用。

**关键词:** 混合动力车 (HEV), 电磁耦合, 无级变速传动, 动力伺服, 双转子发电机

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.012

中图分类号: U469.79

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0067-05

陈汉玉, 袁银南, 张彤, 等. 电磁耦合强混合动力车技术研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 67-71.

Chen Hanyu, Yuan Yinnan, Zhang Tong, et al. Study on technology of electromagnetic coupling hybrid electric vehicle[J].

Transactions of the CSAE, 2009,25(7): 67-71.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

油电强混合动力车是目前混合动力车中最为现实的节油和降低排放的解决方案, 其中以丰田 Prius 为代表的强混合动力轿车, 在交通拥挤的城市工况运行时, 最大节油率可达 50% 以上<sup>[1-2]</sup>。精密高效的行星齿轮机构使丰田 Prius 发动机一直运行在最佳经济线上而不受外在负荷变化的影响, 因此其燃油经济性极高。由于行星齿轮机构价格昂贵以及受其专利的制约, 其价格一直居高不下, 很难满足国内消费者的需求。弱混合动力汽车虽然造价相对较低, 但是电动机功率小、补偿范围小, 因此节油、减排效果不明显。直接电磁耦合以及双转子电机在混合动力车上的应用, 逐渐成为研究热点, 它取消了传统的离合器和变速箱, 可实现无级变速功能, 降低了整车成本, 并提高整车工作效率<sup>[3-7]</sup>。近年来国内外对双转子电机从系统结构、工作原理以及优缺点方面作了大量工作, 在混合动力车上的研究也在不断深入<sup>[8-14]</sup>。

动力伺服与电磁耦合相结合, 在混合动力车上的研究国内外鲜有报道。本文基于动力伺服概念, 以直接电磁耦合技术, 选择机械功率透过式双电机方案, 开发了动力伺服油电强混合动力系统。机械功率透过式发电机能取行星齿轮机构, 动力伺服装置能取代 CVT 变速器和离合器, 通过协调发电机和电动机的高效作用, 在保证功能的前提下使整车成本大大降低。同时在 Matlab/Simulink 中建立了整车模型, 在给定循环工况下进行了仿

真分析, 并在电机试验台上对电机的外特性及输出效率进行了相关试验, 为下一步整车标定匹配工作奠定了基础。

## 1 系统结构及原理

### 1.1 系统结构

本系统运用直接电磁耦合技术, 通过动力伺服装置协调发动机、双转子发电机、电动机和蓄电池的高效工作, 摒弃了传统的发动机+行星齿轮机构+发电机+电动机+离合器+变速箱的强混方案, 其结构如图 1 所示。和传统车相比, 省去了离合器和变速箱, 增加了双电机、动力伺服装置、充电泵单元和蓄电池。

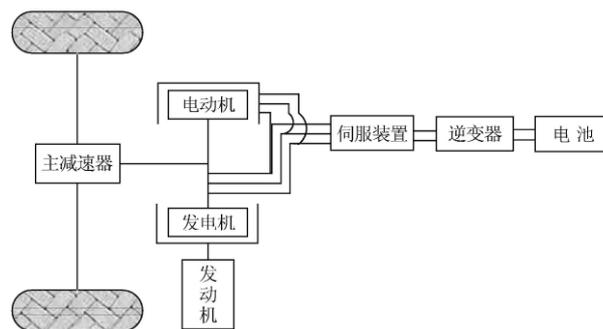


图 1 电磁耦合混合动力车结构简图

Fig.1 Schematic of electromagnetic coupling hybrid electric vehicle (HEV)

双转子发电机的外转子与发动机的输出轴相连, 内转子与电动机相连并通过齿轮传动和联轴器与主减速器相连。发动机直接驱动发电机, 发电机在四象限力矩伺服系统的控制下, 使伺服转矩与发电机内外转子的转速差对应的功率以电能的形式馈入高压母线, 伺服转矩与发电机内转子的转速对应的功率仍以机械功率的形式输出, 机械功率透过式发电机因此而得名。

收稿日期: 2008-12-18 修订日期: 2009-04-10

基金项目: 国家 863 计划节能与新能源汽车重大专项资助项目 (2006AA11A128)

作者简介: 陈汉玉 (1981-), 男, 湖北仙桃人, 博士生, 主要研究方向为混合动力汽车控制策略及自动代码生成。镇江市学府路 301 号 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013. Email: losttheway@sina.com

双转子发电机使发动机转速独立于和主减速器相连的输出轴转速,电动机使发动机转矩独立于输出轴转矩,因此双电机一个调速、一个调扭,使发动机始终运行在最佳经济线上而不受外在负荷变化的影响。

## 1.2 工作原理

采用相角强弱磁、切换线圈结构、短时工作制来代替 CVT 无级变速箱和以交换系统工作象限的方式实现发电机到电动机的转换及两台电机功率的叠加,使发动机始终运行在最佳经济线上。

双转子发电机在四象限力矩伺服系统的控制下,在实现机械功率输出的同时,可实现无级变速功能。发动机的输出功率、馈入高压母线的电功率、双转子发电机透过的机械功率以及传动比之间的关系为:

$$P_e = P_1 + P_2 \quad (1)$$

$$P_1 = T_s \times (N_i - N_o) / 9550 \quad (2)$$

$$P_2 = T_s \times N_o / 9550 \quad (3)$$

$$i = N_i / N_o \quad (4)$$

式中:  $P_e$ ——发动机的输出功率, kW;  $P_1$ ——馈入母线的电功率, kW;  $P_2$ ——透过的机械功率, kW;  $T_s$ ——伺服转矩, N·m;  $N_i$  和  $N_o$ ——分别为发动机的转速和发电机内转子的转速, r/min;  $i$ ——动力系统的传动比。

在本文所开发的油电强混合系统中,双转子发电机可透过的最大机械功率约为发动机输出功率的 72%,可透过的最小机械功率为零,因此整个动力系统的传动比  $i$  最小值为 1.38,最大值为无穷。因此通过对双转子发电机的控制,可使整个动力系统的传动比实现电控无级变速器的功能。

## 2 整车控制策略分析

### 2.1 发动机运行点控制策略

本系统选用 JL479QA 汽油机<sup>[15]</sup>,排量为 1.5 L,标定功率为 69 kW (6 000 r/min),标定转矩为 128 N·m (3 400 r/min),采用德尔福电子节气门取代了原机的机械式油门装置,其万有特性曲线如图 2 所示。

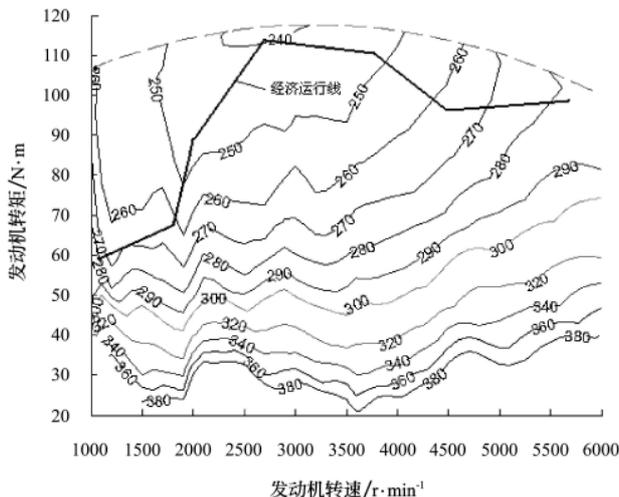


图 2 汽油机的万有特性曲线

Fig.2 Curve of universal characteristics of the gasoline engine

在图 2 中,最外围的虚线是发动机的外特性曲线,粗实线为最佳经济性运行曲线,细实线为等油耗曲线。根据油耗的不同,当输出功率小于 6 kW 时,油耗大于 270 g/kW·h;当输出功率大于 52 kW 时,油耗大于 270 g/kW·h;当输出功率在 6 kW 到 52 kW 之间时,油耗在 240 g/kW·h 到 270 g/kW·h 之间。

以 6 kW 和 52 kW 为边界,可将发动机的工作区域分为 4 部分:

1) 低速死区:此区域内发动机转速低于其最低稳定转速,发动机不工作。整车为纯电动模式,电机从蓄电池吸收能量,直到蓄电池的充电功率加整车期望的驱动功率大于 6 kW 时,发动机开始启动,进入功率平衡区。

2) 轻载区:此区域内虽然发动机可以工作,但是油耗仍然较大,因此同低速死区一样,蓄电池活化不充电,车载空调等大功率电器不工作,整车为纯电动模式,车辆完全由电机从蓄电池吸收能量,直到蓄电池的充电功率加整车期望的驱动功率大于 6 kW 时,发动机开始启动,进入功率平衡区。

3) 功率平衡区:此区域内任何一个工作点所对应的等功率曲线都与最佳经济线有一个交点,发动机在此交点上运行,油耗最低。发动机在此区域内工作,蓄电池不参与能量交换。通过共高压直流母线的两个转矩伺服系统实现无级变速,使发动机始终运行在最佳经济线上。

4) 重载区:此区域内功率大,油耗高。整车的驱动功率是发动机与电动机的总和,蓄电池始终处于放电状态,一旦蓄电池能量耗尽,就会有报警提示,迫使驾驶员减速直到发动机回到功率平衡区。

根据当前整车运行状态和驾驶员意图,可确定发动机运行点,从而确定系统其他部件的工作点,因此混合动力车发动机运行点的精确控制是整个电磁耦合系统能量管理策略的关键。

### 2.2 再生制动策略

驾驶员踩下制动踏板时,此时发动机怠速或者停机,发电机三相高压线不供电,其外转子随曲轴怠速空转或者停转,内转子随输出轴减速旋转。电机通过伺服控制系统,将动能转换为电能,通过公共高压直流母线给蓄电池充电。当蓄电池的容量达到最大充电极限时,将开启母线能量泄放系统,过多的电能以热能的形式释放到空气中,以保护母线不过压。

### 2.3 蓄电池荷电状态(SOC)平衡控制策略

电池荷电状态 SOC (State of Charge) 描述电池剩余电量的数量,是电池使用过程中的重要参数。蓄电池 SOC 要控制在目标值附近,若 SOC 低于目标值,则发动机需额外发出功率对蓄电池充电<sup>[1]</sup>。蓄电池期望充电功率为:

$$P = \begin{cases} \frac{(B_{SOC} - B_{SOC\_aim})}{B_{SOC}} P_{opt} & B_{SOC} < B_{SOC\_aim} \\ 0 & B_{SOC} > B_{SOC\_aim} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P$ ——蓄电池的期望充电功率,  $P_{opt} = f(B_{SOC}, T_B)$ ——蓄电池最优充电功率,其中  $B_{SOC}$ 、 $T_B$  分别是蓄电池

SOC 值和电池温度； $B_{SOC\_aim}$ ——蓄电池 SOC 控制目标。

### 2.4 动态响应补偿策略

车辆在急加速过程中，利用电机低速大转矩且动态响应快的优点，先让电机从蓄电池吸收能量，快速提高整车的动态响应，然后逐渐降低电机功率，提高发动机功率，使混合动力车操纵性能更优越。

## 3 试验与仿真

### 3.1 动力系统参数

发动机选用 JL479QA 汽油机，基本参数如前述。直接电磁耦合混合动力轿车由吉利某款轿车改装，整车整备质量为 1 160 kg，迎风面积为 1.946 m<sup>2</sup>，轮胎滚动半径为 0.283 m，空气阻力系数为 0.315，主减速比为 4.308。蓄电池为锂离子电池，单体电压为 3.2 V，共 92 个单体串联一起，额定电压值约 294 V。双电机的额定功率均为 30 kW，最大转速约为 4 000 r/min，电动机的外特性如图 3 所示。

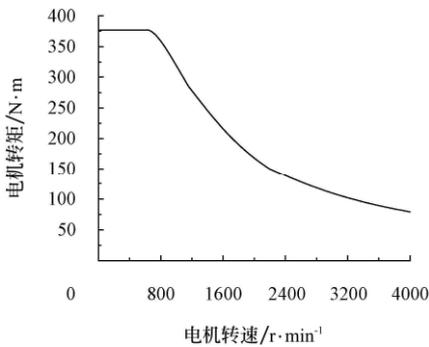


图 3 电机外特性曲线  
Fig.3 Curve of outer characteristics of the motor

### 3.2 试验及仿真分析

通过充电泵升单元、转矩伺服装置以及整车闭环控制逻辑的相互协调工作，来调节双转子发电机和电动机的转矩，在功率平衡区使发动机始终运行在最佳经济线上，以达到节能减排的目的。

参考 ADVISOR 2002 中的部分模型参数，在 Matlab/Simulink 中建立了电磁耦合混合动力车后向仿真模型，整车参数值与原车一致，模拟循环工况参照美国 EPA 所规定的 UDDS 循环工况，仿真运行时间为 1 370 s，行驶距离为 11.99 km，平均车速为 31.53 km/h，最大加速度为 1.48 m/s<sup>2</sup>。运行过程中，发动机的空燃比为恒定值 14.7，电池 SOC 上限值为 0.75，下限值为 0.55，目标值为 0.60 左右。

图 4 为循环工况下，发动机的转矩输出曲线。由仿真结果可知，发动机除了部分工况工作在最大转矩点附件外，其他工况点的转矩输出主要在 70 N·m 附近，属低油耗区，发动机输出转矩的变化主要受到循环工况需求的影响。

图 5、图 6 为循环工况下，电动机和发电机的转矩输出曲线。由仿真结果可知，发电机多为发电状态，但仍提供一部分机械能。电动机转矩范围宽，大的负转矩为

再生制动时发出。

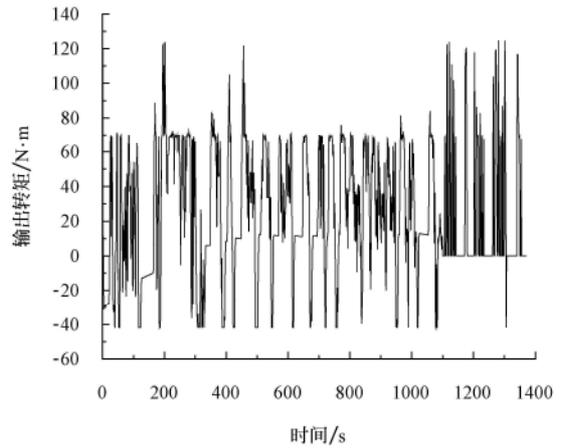


图 4 发动机转矩输出仿真结果  
Fig.4 Output torque simulation of the engine

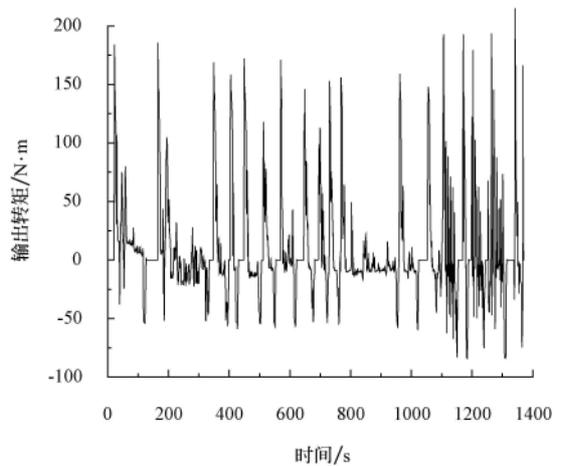


图 5 电动机转矩输出仿真结果  
Fig.5 Output torque simulation of the motor

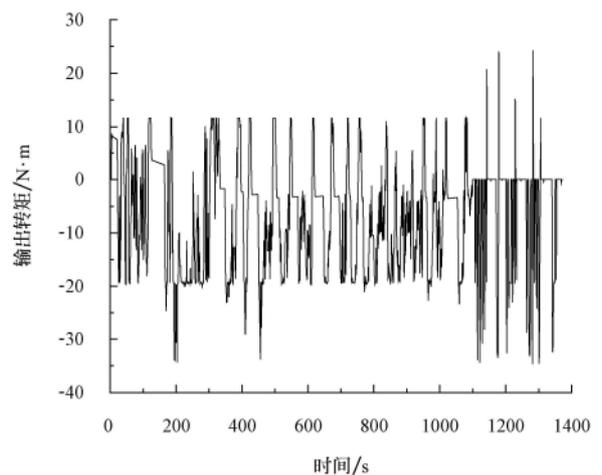


图 6 发电机转矩输出仿真结果  
Fig.6 Output torque simulation of the double rotor generator

图 7 为在常温状态 25℃，环境湿度为 50%时，电动机为纯电动工况时，在电机试验台架上所测得的电机效率曲线。由图可知，电机效率一直在高效区，最大效率

可达 86%，符合设计要求。

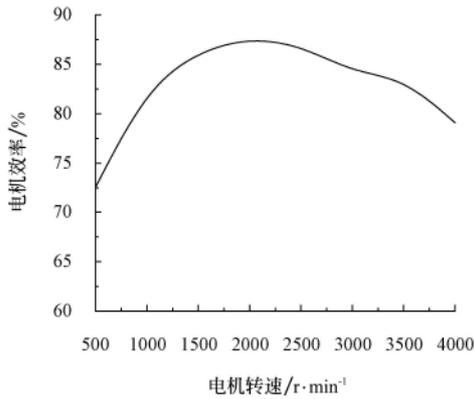


图 7 电机效率曲线

Fig.7 Efficiency curve of the motor

## 4 结 论

基于动力伺服概念，以直接电磁耦合技术，开发了油电强混合双电机系统，对其工作原理和控制策略进行了分析。在典型循环工况下对发动机、电机以及双转子发电机的输出转矩进行了仿真分析，仿真结果表明输出转矩能很好的满足循环工况需求。在电机试验台架上对电机的外特性以及工作效率进行了相关试验，试验表明电机输出效率高，最高可达 86%，满足混合动力车设计要求。强混合动力车在国内尚处于起步阶段，接下来的工作是进一步优化整车控制策略，并进行更深入的整车标定匹配试验。

### [参 考 文 献]

- [1] 王锋, 冒晓建, 杨林, 等. 电磁耦合混合动力公交车整车控制策略及参数匹配[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 342—346.  
Wang Feng, Mao Xiaojian, Yang Lin, et al. Control algorithm and parameter match for an electromagnetic coupling hybrid electric bus[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3): 342—346. (in Chinese with English abstract)
- [2] Michael Duoba, Henry Ng, Robert Larsen. Characterization and comparison of two hybrid electric vehicles(HEVs)-honda insight and toyota prius[Z]. SAE Paper 2001-01-1335.
- [3] 罗玉涛, 周斯加, 赵克刚, 等. 电磁耦合无级变速传动系统[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 35—39.  
Luo Yutao, Zhou Sijia, Zhao Kegang, et al. Electromagnetism coupling continuously variable transmission system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [4] Shibata Fukuo. Electric control system of an electric machine arrangement combining electromagnetic coupling with electric rotating machine: USA, US 3789281[P]. 1971-03.
- [5] 史广奎, 赵航, 冯琦. 双转子混合动力系统研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(2): 97—100.  
Shi Guangkui, Zhao Hang, Feng Qi. A study on hybrid power system with double rotor motor[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(2): 97—100. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李练兵, 陈鹏, 史广奎, 等. 混合动力汽车用双转子电机的建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(4): 403—408.  
Li Lianbing, Chen Peng, Shi Guangkui, et al. Modeling and simulation of double-rotor motor applied to the system of hybrid electric vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(4): 403—408. (in Chinese with English abstract)
- [7] Dae Hun Lee, Ui Seong Kim, Chee Burm Shin, et al. Modelling of the thermal behaviour of an ultracapacitor for a 42-V automotive electrical system[J]. Journal of Power Sources, 2008, 175: 664—668.
- [8] Ping Zheng, Ranran Liu, Qian Wu, et al. Magnetic coupling analysis of four-quadrant transducer used for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2597—2599.
- [9] Hoeijmakers M J, Rondel M. The electrical variable transmission in a city bus[A]. //35th IEEE Power Electronics Specialist Conference[C]. Germany: IEEE, 2004, 4: 2773—2778.
- [10] Zheng P, Liu R, Thelin P. Research on the parameters and performances of a 4QT prototype machine used for HEV[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 443—446.
- [11] 李君, 罗玉涛, 赵克刚, 等. 一种电磁耦合无级变速器的性能分析[J]. 系统仿真学报(英文版), 2008, 20(3): 771—776.  
Li Jun, Luo Yutao, Zhao Kegang, et al. Performance analysis of electromagnetic continuously variable transmission[J]. Journal of System Simulation(English Edition), 2008, 20(3): 771—776.
- [12] Zhu Xiaoyong, Cheng Ming, Zhao Wenxiang, et al. A transient cosimulation approach to performance analysis of hybrid excited doubly salient machine considering indirect field-circuit coupling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2558—2560.
- [13] Luo Yutao, Tan Di, Meng Fanzhen. Power flow analysis and application simulation of electromagnetic continuously variable transmission[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering(English Edition), 2008, 21(6): 48—56.
- [14] Lee Youn Hee, Nasiri Adel. Analysis and modeling of conductive EMI noise of power electronics converters in electric and hybrid electric vehicles[A]. //Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC[C]. Austin: IEEE, 2008: 1952—1957.
- [15] 张彤, 朱磊, 王存磊, 等. 混合动力汽车集成式多能源管理监控平台[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 42—46.  
Zhang Tong, Zhu Lei, Wang Cunlei, et al. Monitoring platform of integrated multi-energy management system for PHEV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 42—46. (in Chinese with English abstract)

## Study on technology of electromagnetic coupling hybrid electric vehicle

Chen Hanyu<sup>1,2</sup>, Yuan Yinnan<sup>1</sup>, Zhang Tong<sup>1,2</sup>, Yu Haisheng<sup>2</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Shanghai Maple Automobile Company, Limited, Shanghai 201501, China)

**Abstract:** The effect of saving fuel and reducing emissions for hybrid electric vehicle(HEV) should be obvious, and the most realistic solution was to develop heavy HEV. Based on the concepts of dynamic servo and electromagnetic coupling, the project of mechanical-power- penetrated double motors was proposed and the heavy HEV was developed. Meanwhile, the powertrain system structure, working principle and control strategy of the HEV were analyzed. The model of the vehicle was built with Matlab/Simulink, and the output torques of engine, motor and the double rotor generator were simulated. The experiments of the outer characteristics and working efficiency of the motor were carried out on the test bench. The research results indicate that the simulation of output torques can meet with the cycle conditions well. The output efficiency of motor is high and can be achieved 86%, which can meet with the HEV's design requirements. All of above that can provide reference for the calibration and matching of the electromagnetic coupling HEV in future.

**Key words:** hybrid electric vehicles, electromagnetic coupling, continuously variable transmissions, dynamic servo, double rotor generator