

# 混合动力系统分流耦合机构工作模式分析

崔星<sup>1</sup>, 项昌乐<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业系统总体部, 北京 100089; 2. 北京理工大学车辆传动国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为实现机电混合动力车辆功率分流耦合机构的优选与工作模式的优化, 对单行星排无级调速装置的联接形式进行了归类分析, 建立了具有普适性的分流功率表达式, 相对分流功率的计算结果表明输入分流形式的无级变速装置适于机电复合无级传动。针对发动机工作特性设计了分流耦合系统多种工作模式, 计算了各模式的功率分配状态和系统效率, 基于 Artemis 循环工况的电力分流仿真结果表明功率分流耦合系统可实现发动机工作状态的优化。

**关键词:** 车辆, 发动机, 电机, 混合动力, 功率分流, 行星机构

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.11.028

中图分类号: U463.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-11-0158-06

崔星, 项昌乐. 混合动力系统分流耦合机构工作模式分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 158-163.

Cui Xing, Xiang Changle. Analysis on working mode of power-split mechanism for hybrid power system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 158-163. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

以发动机与蓄电池为整车动力源的混合动力电动汽车是当前新能源问题最具现实意义的解决方案, 混合动力作为通用基础技术在民用车辆、工程机械及农用车辆上均有广阔的应用前景。

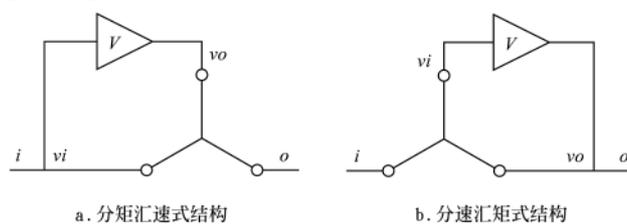
在混合动力车辆传动系统的方案设计与工作特性方面, 国内外学者开展了广泛的研究, 文献[1-2]对多种混合动力电动车辆动力传动进行了系统的分类, 对其部件选型、工作形式进行了对比, 但研究仍处于定性描述的层面。文献[3]对混合动力传动结构进行了更为细致的分类, 并进行了燃油经济性和整车动力性的仿真计算。文献[4-6]对以 THS (Toyota hybrid system) 为代表的行星轮系功率分流耦合系统的工作机理、各部件转矩、转速进行了分析与计算。与其相似, 文献[7-10]都分别设计了各自的功率分流耦合机构, 对其工作特性进行了分析, 并设计了多种工作模式。但综上所述, 目前的研究仅对某一具体的结构方案进行性能分析, 而没有实现从性能要求的角度对结构方案进行优选。

本文以分流调速支路与单行星排的联接形式为参考, 对功率分流耦合系统进行了归类与分析, 确立了方案优选的方法, 并以优选的方案设计了多种工作模式, 以实现动力系统的优化。

## 1 行星轮系分流耦合系统

文献[11]依照转速耦合、转矩耦合的形式对机电耦合系统进行了分类, 该文献研究对象不仅包括单模式结构, 还涉及了更为复杂的双模式结构, 但所有分析仅限于各

构件间转速、转矩关系, 而没有对最为关键的分流功率特性进行研究。对于采用单行星排的机电混合无级变速系统, 按行星排的功用分为: 分矩汇流式 (output split) 和分速汇矩式 (input split) 两大类。分矩汇流式采用定轴齿轮副进行功率分流、行星差速机构进行功率汇流; 分速汇矩式采用行星差速机构进行功率分流、定轴齿轮副进行功率汇流。两种结构形式见图 1, 各子图均简化了定轴齿轮副机构。



注: V——电力无级调速分路; i——系统输入端; o——系统输出端; vi——无级调速分路输入端; vo——无级调速分路输出端

图 1 分流耦合结构  
Fig.1 Power-split structures

对于单行星排结构, 规定 3 个构件端口如图 2 所示, 分别为 A、B、C, 并定义相对转速、相对转矩系数  $K_1$ 、 $K_2$

$$K_1 = \frac{n_B - n_A}{n_C - n_A} \quad (1)$$
$$K_2 = \frac{T_B}{T_A}$$

式中:  $n_A$ ——A 端口转速, r/min;  $n_B$ ——B 端口转速, r/min;  $n_C$ ——C 端口转速, r/min;  $T_A$ ——A 端口所连接部件的转矩, N·m;  $T_B$ ——B 端口所连接部件的转矩, N·m。

由图 1a 及图 2 可知

$$\begin{cases} n_{vo} = n_B \\ n_i = n_{vi} = n_A \\ n_o = n_C \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n_{vo}$ ——无级调速分路输出端转速, r/min;  $n_i$ ——

收稿日期: 2009-04-17 修订日期: 2009-07-08

基金项目: “十一五” 预先研究项目 (40402070101)

作者简介: 崔星 (1979-), 男, 辽宁锦州人, 博士后, 主要从事混合动力总体技术研究。北京市海淀区 中国兵器工业系统总体部, 100089。

Email: shugu\_bit@126.com

系统输入端转速, r/min;  $n_{vi}$  ——无级调速分路输入端转速, r/min;  $n_o$  ——系统输出端转速, r/min。

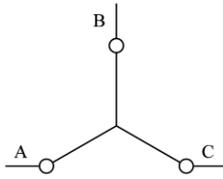


图 2 单行星排端口  
Fig.2 Single planetary set

继而由式 (1) 可求得图 1a 分矩汇速式结构无级调速分流输出端转速  $n_{vo}$ 、转矩  $T_{vo}$  分别为

$$n_{vo} = [K_1(I-1)+1]n_i$$

$$T_{vo} = \frac{K_2}{1+K_2[K_1(I-1)+1]}T_i \quad (3)$$

式中:  $T_i$  ——系统输入端所连接部件的转矩, N·m;  $I=n_o/n_i$ , 为系统输出—输入速比。同样, 可求得图 1b 分速汇矩式结构无级调速分流输入端转速  $n_{vi}$ 、转矩  $T_{vi}$  分别为

$$n_{vi} = [K_1(I-1)+1]n_i$$

$$T_{vi} = K_2T_i \quad (4)$$

从而可求得分矩汇速式、分速汇矩式结构的电力分流相对功率分别为

$$\frac{P_v}{P_i} = \begin{cases} \frac{1}{1+K_2[K_1(I-1)+1]} - 1 & \text{分矩汇速式} \\ \frac{K_2[K_1(I-1)+1]}{K_2[K_1(I-1)+1]} & \text{分速汇矩式} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_v$  ——电力无级调速分路分流功率, kW;  $P_i$  ——系统总输入功率, kW。按系统各端口与行星排构件的联接关系, 分矩汇速与分速汇矩式传动方案各有  $C_3^1C_2^1=6$  种不同的结构。

图 3、图 4 为行星排特性参数  $k=2.5$  的不同结构方案电力分流相对功率,  $P_v/P_i < 0$ ,  $vi$  端口电机处于发电状态;  $P_v/P_i > 0$ ,  $vi$  端口电机处于电动状态。图示表明: 1) 分矩汇速式结构在较低速比状态下, 内部将出现若干倍于输入功率的电力功率循环, 因而不适用于机电混合无级变速; 2) 分速汇矩式结构的电力分流相对功率与相对速比呈线性关系, 其中 3 个方案的最大分流功率不超过系统输入功率, 并随相对速比的增长而降低, 适用于机电混合无级变速。

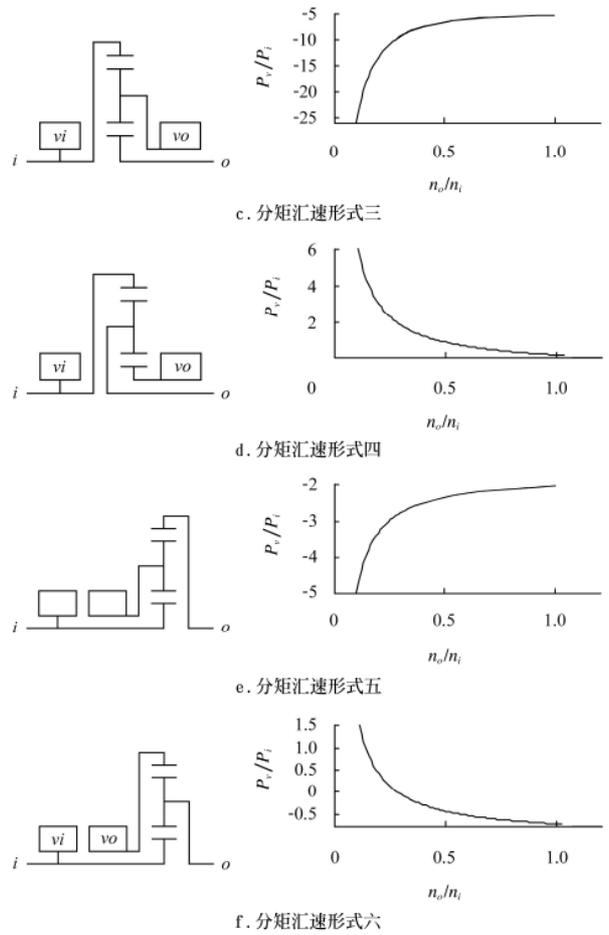
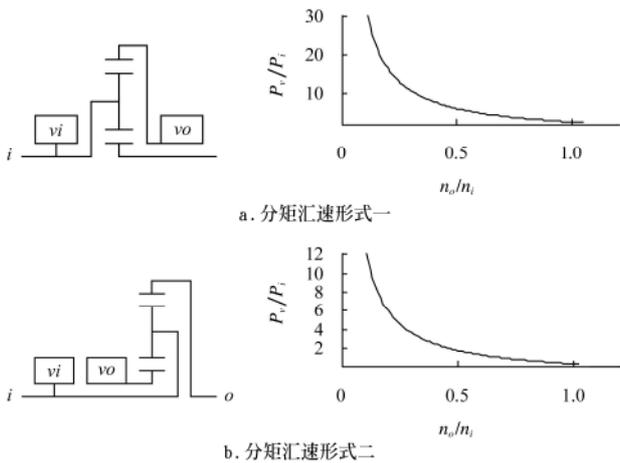
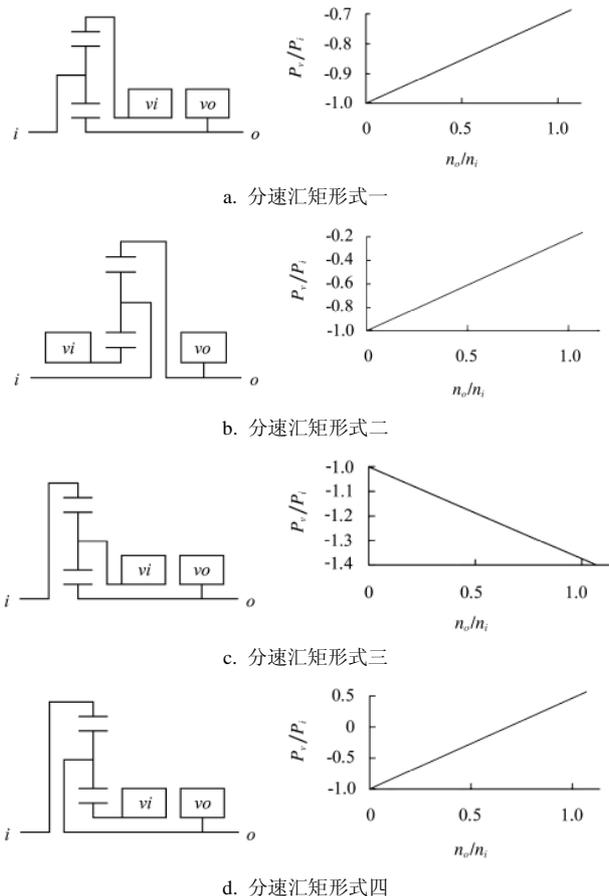


图 3 分矩汇速式结构及电力分流相对功率  
Fig.3 Output split structure and electric split relative power



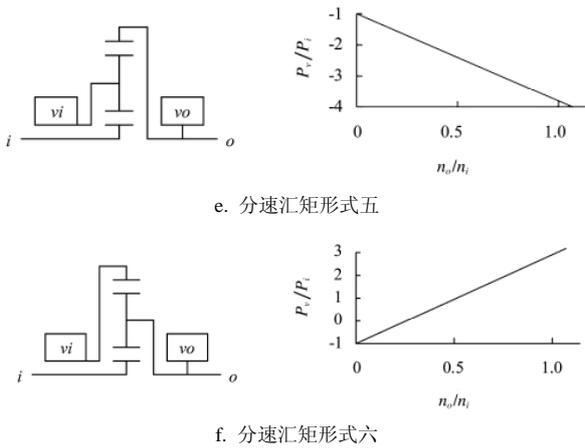


图4 分速汇矩式结构及电力分流相对功率

Fig.4 Input split structure and electric split relative power

图5为依据分流电功率特性,在分矩汇速、分速汇矩式12种结构方案中选择的适于机电混合无级传动的3种结构方案,其图5a、b、c分别对应图4a、b、d方案。

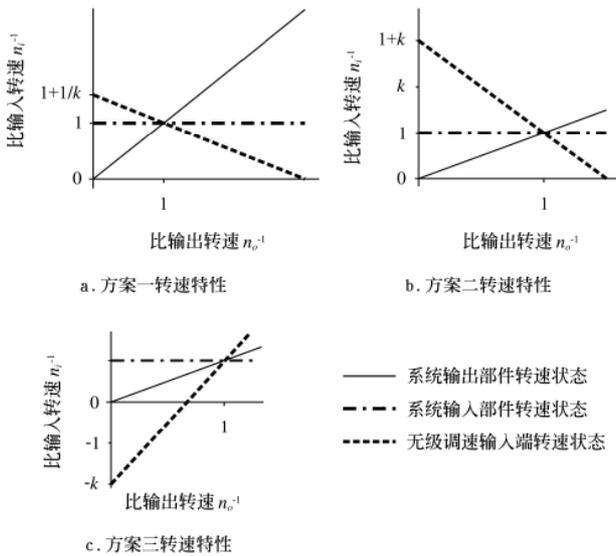


图5 3种适宜的机电无级传动方案转速特性

Fig.5 Speed characteristic of three suitable electro-mechanical stepless transmissions

由图5可知,在系统输入转速不变的情况下,图5a方案输出转速 $n_o$ 相对输入转速 $n_i$ 的变化率过大,当无级调速分路输入端转速 $n_{vi}$ 较低时,系统输出转速 $n_o$ 远超出输入转速 $n_i$ ;图5b、c输出转速 $n_o$ 特性较为理想,但图5c存在 $n_{vi} < 0$ 即无级调速分路输入端反转的现象,所以图5b所对应方案为本文最终采用的基础结构。

## 2 分流耦合机构工作模式分析

文献[7-10]都基于各自的混合动力分流耦合装置进行了模式分析,但该“模式”是车辆的工作模式,而并没有针对分流耦合装置自身的特性进行专门的研究。本文设计的混联式机电混合驱动系统如图6所示,机械结构包括:第一、第二行星排; $Z_1$ 制动器; $Z_2$ 制动器; $C_1$ 离合器。

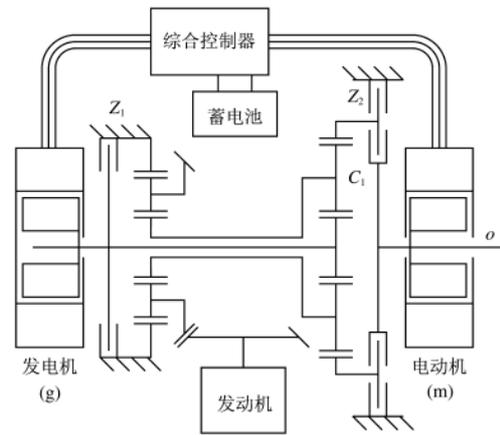


图6 混联式机电混合驱动系统

Fig.6 Drive system of series-parallel electro-mechanical transmission

左侧第一行星排齿圈固定,仅起到固定速比变速的作用,由于行星排具有2个自由度,所以与后续传动系统相联的齿圈转速由行星架和太阳轮共同决定,各元件转速关系为

$$\begin{cases} n_t + kn_q = (1+k)n_j \\ n_j = 2n_c, n_t = n_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: $n_t$ ——太阳轮转速, r/min;  $n_q$ ——齿圈转速, r/min;  $n_j$ ——行星架转速, r/min;  $n_c$ ——发动机转速, r/min;  $n_g$ ——发电机转速, r/min;  $k$ ——分流行星排特性参数,  $k=2.52$ 。

受发动机、发电机转速范围限制,分流行星排行星架、太阳轮转速范围分别为

$$n_j \in [2\ 200, 4\ 200], n_t \in [0, 5\ 500] \quad (7)$$

在以发动机为单一动力源的情况下,若假定系统内无功率损失,则齿圈输出功率 $P_q = P_c - P_g$ 。式中 $P_c$ ——发动机输出功率, kW;  $P_g$ ——发电机分流功率, kW。

由式(5)可得发电机分流电力功率为

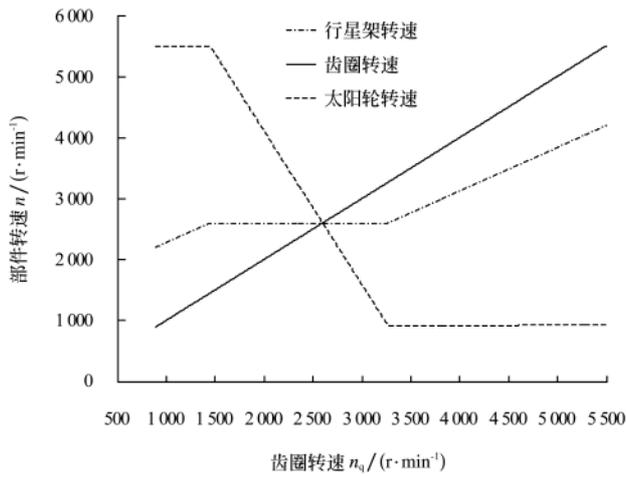
$$P_g = \frac{k}{1+k} \frac{n_q}{n_j} - 1 \quad (8)$$

由式(8)及图4b可知,分流电功率随输出转速的升高而线性降低,当发电机转速降至0时,无电功率分流,为纯机械功率状态。

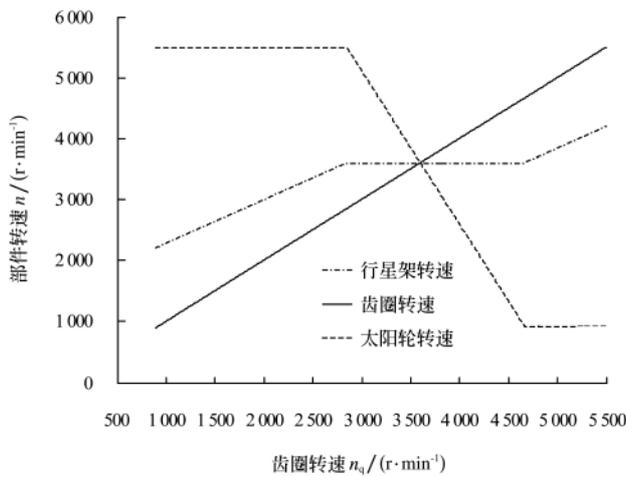
发动机净外特性通常具有3个关键状态点:最大扭矩点、最大功率点、最大转速点。由于采用了行星差速机构,从而可以通过调整发电机工作状态,在保证齿圈输出转速连续增长的前提下,将发动机稳定至上述3种工况。发动机最大扭矩优先模式、发动机最大功率优先模式、发动机最大转速优先模式如图7所示。

## 3 各工作模式性能计算

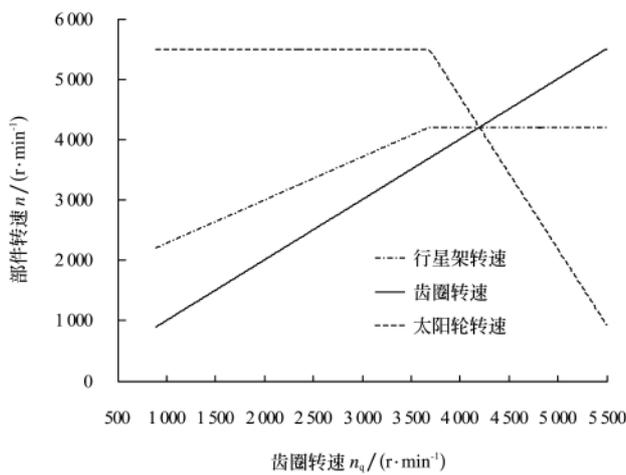
文献[12]对行星轮系分流耦合机构的分流功率、效率特性进行了较为全面的分析,但其各项性能指标的变化趋势均以传动比( $n_i/n_o$ )为参照,无法直观表达各指标随车速变化的情况;同时,该文献中对效率的宽泛定义也导致了效率大于100%的情况。



a. 最大转矩优先模式



b. 最大功率优先模式



c. 最大转速优先模式

图 7 3 种优先工作模式

Fig.7 Three priority modes of system

本文所研究分流耦合机构在设计工作范围内，限定了发电机的转速范围，不存在电机反转状态。 $\eta_g$ 、 $\eta_m$  分别为发电机、电动机的功率转换效率， $\eta_M$  为行星排机械系统效率。

由发电机、电动机电功率平衡可得

$$P_g \eta_g + P_m / \eta_m = 0 \quad (9)$$

又由行星排各构件转矩、转速关系可得

$$\begin{cases} T_i + T_j = 0, T_g + T_t = 0 \\ T_q + T_m + T_o = 0 \\ T_t : T_q : \eta_M T_j = 1 : k : -(1+k) \\ n_g + k n_o = (1+k) n_i \end{cases} \quad (10)$$

式中： $T_i$ ——分流耦合排输入转矩， $N \cdot m$ ； $T_j$ ——行星架转矩， $N \cdot m$ ； $T_g$ ——发电机承受转矩， $N \cdot m$ ； $T_t$ ——太阳轮转矩， $N \cdot m$ ； $T_q$ ——齿圈转矩， $N \cdot m$ ； $T_m$ ——电动机承受转矩， $N \cdot m$ 。从而可求得

$$P_g = \eta_M \left( \frac{k}{1+k} I - 1 \right) P_i \quad (11)$$

$$P_q = \eta_M \frac{k}{1+k} I P_i$$

系统输出功率

$$P_o = P_m + P_q = -\eta_g \eta_m P_g + P_q \quad (12)$$

所以系统效率

$$\eta_{sys} = \eta_M \left[ \frac{k}{1+k} I - \eta_g \eta_m \left( \frac{k}{1+k} I - 1 \right) \right] \quad (13)$$

本文对图 7a、b 对应的工作模式进行了 Artemis 循环工况对比试验，车辆基本参数于表 1。

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

整车质量 $m/kg$	迎风面积 $A/m^2$	风阻系数 $C_D$	轮胎滚动半径 $r/m$	滚动阻力 系数 $f$
21 000	5.5	0.6	0.59	0.018
后续传动系统速比 $i_0$		变速装置速比		
5.92		$i_1=12.32, i_2=4.54, i_3=1.53$		

由图 8 和表 2 可知在完整工作周期内，最大转矩模式分流电功率最少，最大功率模式分流电功率相对较多。由于电力元件的功率转换效率远低于机械传动效率，所以最大转矩模式由能量转换造成的功率损失最少，系统效率最高。

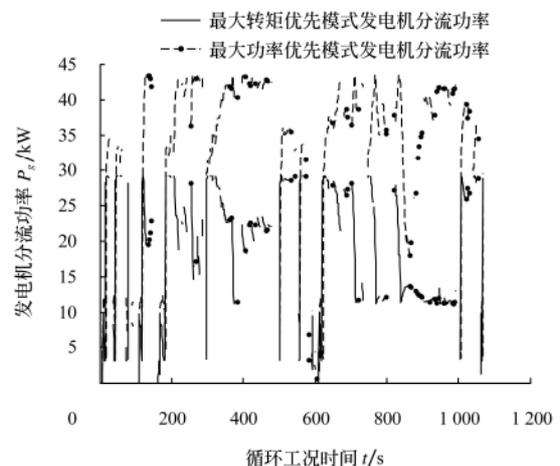


图 8 Artemis 循环工况电力分流功率

Fig.8 Electric split power in Artemis driving cycle

表2 Artemis 循环工况发电状态

Table 2 States of generator in Artemis driving cycle

模式	发电机有效工作时间/s	平均电功率分流比例/%
最大转矩点优先模式	623	28.74
最大功率点优先模式	623	41.53

虽然最大转矩模式能够使系统保持较高的效率, 但该工作点远离发动机最大功率点, 无法发挥发动机的最大功率, 当车辆有较大功率需求时, 最大功率模式可以使系统保持最佳的动力性能。

#### 4 结论

本文设计了一种基于行星差速机构的混联式机电混合驱动系统, 可实现纯电、纯机械驱动, 机电混合驱动等多种功能。

该系统核心部件的结构设计采用了无级变速系统功率分、汇流特性的分析方法, 通过建立分矩汇速、分速汇矩式无级调速系统的电力分流相对功率方程, 得到了适于机电混合无级变速的优选方案。

针对发动机工作特性, 设计了分流耦合装置的3种工作模式以优化发动机最大转矩、最大功率、最大转速状态, 对比计算的结果表明:

1) 分速汇矩式传动方案的电力功率分流特性适合机电混合无级传动的要求;

2) 通过控制行星差速无级变速系统的发电机分流功率, 可以优化发动机工作状态, 其中, 最大转矩模式具有最优的总体效率, 适于改善车辆燃油经济性能; 最大功率模式具有最佳的输出转矩特性, 适于提高车辆动力性能。

#### [参 考 文 献]

- [1] Harry L Husted. A comparative study of the production application of hybrid electric powertrains[Z]. SAE Paper 2003-01-2307.
- [2] 张俊智, 卢青春, 王丽芳. 汽车混合动力传动的能量流动与比较[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(5): 746—747, 758. Zhang Junzhi, Lu Qingchun, Wang Lifang. Energy flow and comparison of automobile hybrid power transmission[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(5): 746—747, 758. (in Chinese with English abstract)
- [3] Liao G Y, Weber T R, Pfaff D P. Modeling and analysis of powertrain hybridization on all-wheel-drive sport utility vehicles[J]. J Automobile Engineering, 2004, 218(Part D): 1125—1134.
- [4] Akira Kawahashi. A new-generation hybrid electric vehicle and its supporting power semiconductor devices[C]// Proceeding of 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kitakyushu: IEEE Japan, 2004: 23—29.
- [5] Jinming Liu, Huei Peng. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1242—1251.
- [6] 梁海波, 高为民. THS-II 系统动力分配模式的研究[J]. 机械设计与制造, 2007, (2): 115—117. Liang Haibo, Gao Weimin. The research on power-split mode of THS-II system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, (2): 115—117. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yimin Gao, Mehrdad Ehsan. A torque and speed coupling hybrid drivetrain-architecture, control, and simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(3): 741—748.
- [8] 邹乃威, 刘金刚, 周云山, 等. 混合动力汽车行星机构动力耦合器控制策略仿真[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 5—9. Zou Naiwei, Liu Jingang, Zhou Yunshan, et al. Simulation of control strategy for HEV coupler with planetary mechanism [J]. Transactions of CSAM, 2008, 39(3): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [9] 喻伟雄, 余群明, 钟志华, 等. 混合动力汽车功率分配装置的功率传动分析[J]. 汽车工程, 2008, 30(1): 26—29, 35. Yu Weixiong, Yu Qunming, Zhong Zhihua, et al. An analysis on the power transmission of the power split device in hybrid electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(1): 26—29, 35. (in Chinese with English abstract)
- [10] 秦大同, 游国平, 胡建军. 新型功率分流式混合动力传动系统工作模式分析与参数设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 184—191. Qin Datong, You Guoping, Hu Jianjun. Operation mode analysis and parameters design of a novel power split hybrid transmission system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 184—191. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高建平, 何洪文, 孙逢春. 混合动力电动汽车机电耦合系统归类分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(3): 197—201. Gao Jianping, He Hongwen, Sun Fengchun. Classification of electromechanical coupling systems in hybrid electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(3): 197—201. (in Chinese with English abstract)
- [12] Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Wonsik Lim, et al. Performance analysis and parametric design of the dual-mode planetary gear hybrid powertrain[J]. Proc IMechE Automobile Engineering, 2006, 220(Part D): 1601—1614.

## Analysis on working mode of power-split mechanism for hybrid power system

Cui Xing<sup>1</sup>, Xiang Changle<sup>2</sup>

(1. *System Engineering Research Institute, China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China;*

2. *National Key Laboratory of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** An optimal procedure for electro-mechanical variable transmission equipped with a planetary gear trains was presented by classifying the connection scheme and calculating the split electric power. The equations of split electric powers which were general in describing the system characteristic were established. The power-split evaluations demonstrated that the input power-split configuration was applicable to hybrid-electric vehicles. The states of power-split and system efficiency according to the internal-combustion engine's characteristic were simulated in Artemis driving cycle, and the results showed that the power-split planetary gear trains was a compact and highly efficient driveline solution for hybrid-electric vehicles.

**Key words:** vehicles, engines, electric machinery, hybrid, power split, planetary mechanism