

电动汽车多动力耦合系统结构与分析

张 硕, 张承宁, 王志福

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 说明了动力耦合系统的范围, 将纯电动耦合系统考虑在内; 总结了传统动力耦合系统, 比较了各类耦合机构的转速、转矩特性, 指出了各种耦合机构的优点和存在的不足; 并预测了多动力耦合机构发展趋势, 对纯电动耦合发展方向提出了几点建议。

关键词: 动力耦合; 行星耦合; 转速耦合; 转矩耦合; 功率耦合; 电动汽车

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)05-0047-04

The Structure and Analysis of Multi-power Coupling Systems for Electric Vehicle

ZHANG Shuo, ZHANG Cheng-ning, WANG Zhi-fu

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The scope of the power coupling system is demonstrated and pure electric power coupling system is considered. The traditional power coupling systems are summarized. The rotate speed and torque characteristics of some kind of coupling systems are compared. The advantages and disadvantages of a pure electric coupling system are pointed out, the development trend of power coupling system is forecasted and some advices for pure electric power coupling system are proposed.

Key words: power coupling; planetary gear coupling; rotate speed coupling; torque coupling; power coupling; electric vehicle

0 引言

近年来由于能源危机和环境污染不断加剧, 从能源安全和环境保护的角度出发, 国家大力发展新能源汽车, 其中混合动力汽车和纯电动汽车发展尤为迅速。动力耦合机构是大部分混合动力汽车上必不可少的部分, 其形式日趋多样化, 且应用范围也不断扩大。动力耦合机构不再局限于混合动力电动汽车, 在纯电动汽车上也有所应用, 如双电机耦合也有所发展^[1]。然而由于发展还不成熟, 纯电动汽车的耦合机构大多是借鉴了混合动力电动汽车的耦合方案。目前纯电动汽车的动力耦合机构在结构上与混合动力汽车的差别不大,

主要是动力源不同, 因此本文在介绍动力耦合机构时借鉴了混合动力的分类方法。

1 多动力耦合机构的分类

随着科研人员的不断努力, 新的混合动力系统和动力耦合机构不断出现, 分类方法很多。为清楚地认识动力耦合机构的种类, 首先介绍一下混合动力汽车的分类。混合动力汽车按驱动系统的布置结构可以分为4类: 串联式、并联式、混联式和复合式。串联式耦合的主要特点是通过功率变换器实现电耦合; 并联式耦合的主要特点是通过机械耦合装置将多个动力源的机械能耦合在一起, 实现机械耦合; 混联式耦合的主要特点是耦合系统中既有机械耦合又有电耦合; 复合式耦合与混联式耦合的结构相差不多, 主要区别是复合式耦合的电耦合是通过蓄电池组实现的, 混联式耦合的电耦合是通过功率变换器实现的^[2]。混合动力汽车还有其他的分类方法, 这里不再介绍。

收稿日期: 2012-06-19

作者简介: 张硕(1987-), 男, 硕士研究生, 现主要从事电传动研究工作;

张承宁(1963-), 男, 博士, 教授, 现主要从事纯电动汽车、混合动力汽车、电传动等方面的研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175040)

多动力耦合机构主要是指并联式、混联式和复合式中的机械耦合机构。根据动力源输出动力耦合方式的不同,将混合动力系统分为转矩耦合式、转速耦合式、牵引力耦合式和混合耦合式4类^[3],本文主要根据这种分类方式对每种耦合方式进行讨论。根据耦合系统输入输出所满足的转矩和转速耦合条件可以将耦合系统分为转矩耦合、转速耦合和功率耦合^[4]。根据混合动力电动汽车的动力耦合装置的布置形式可分为分散耦合和集中耦合两大类:分散耦合有中置电机式和轮毂电机式两种,这种耦合方式是指多个动力源通过各自的动力传动路线将动力传递给车轮,属于牵引力耦合;集中耦合又可以分为轴耦合和耦合器耦合,轴耦合实际上是一种转矩耦合,耦合器耦合既可以实现转矩耦合也可以实现转速耦合^[5]。

2 动力耦合方式的分析

2.1 单行星排行星齿轮机构的转速、转矩特性

本文主要对动力耦合机构的转速、转矩特性进行分析(只针对两个动力之间的耦合)。由于行星耦合的结构简单紧凑、传动效率高,在混合动力方面可以实现较高的混合度。其本身有两个自由度,可以实现功率分流和多种工作模式,因此行星耦合机构在多动力耦合方面应用十分广泛,在对具体的耦合机构进行分析之前先对单行星排的行星机构进行简单的介绍。

图1是一个单行星排的行星齿轮机构,r、s、c分别代表行星齿轮机构的齿圈、太阳轮和行星架。行星齿轮机构是一个两自由度机构,可以实现两个动力之间的耦合输出。根据输出的不同,单行星排主要有3种工作方式:齿圈输出、行星架输出和太阳轮输出。

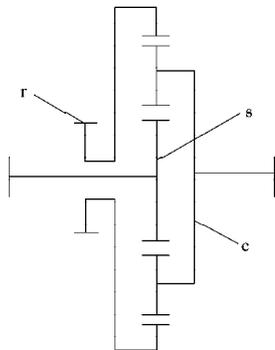


图1 行星排结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of planet row

2.1.1 转速特性

根据机械原理中的周转轮系传动比的计算可以得出太阳轮和齿圈在行星架坐标系中的传动比^[6-8]:

$$i_{sr}^c = \frac{n_s^c}{n_r^c} = \frac{n_s - n_c}{n_r - n_c} = -\frac{Z_r}{Z_s} = -k \quad (1)$$

式中: i_{sr}^c ——以行星架为参照,太阳轮和齿圈的相对转速比; n_s^c ——以行星架为参照,太阳轮的相对转速; n_r^c ——以行星架为参照,齿圈的相对转速; n_s ——太阳轮的绝对转速; n_r ——齿圈的绝对转速; n_c ——行星架的绝对转速; Z_r ——齿圈的齿数; Z_s ——太阳轮的齿数; k ——行星齿轮机构的特性参数。

由式(1)可得:

$$\frac{n_s - n_c}{n_r - n_c} = -k \quad (2)$$

进一步整理可得:

$$n_s + kn_r = (1+k)n_c \quad (3)$$

由式(3)可知,无论哪种方式,只要输入的两个转速确定后,输出转速就可以确定,并且,当输出转速确定后,输入转速可以有多种组合方式。这一点在应用中十分关键,可以让我们更加灵活地控制各种动力源的输入转速,对于混合动力来说,可以尽可能地使发动机工作在高效区。

2.1.2 转矩特性

在忽略摩擦的情况下,根据内力矩和功率平衡原理得到的简单行星齿轮机构的内力矩和功率可满足以下方程:

$$T_s + T_r + T_c = 0 \quad (4)$$

$$T_s n_s + T_r n_r + T_c n_c = 0 \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: T_s ——太阳轮转矩; T_r ——齿圈转矩; T_c ——行星架转矩。

由式(3)~式(5)联立可以求出太阳轮、齿圈和行星架内力矩之间的关系:

$$T_c = -T_s(1+k) \quad (6)$$

$$T_r = T_s k \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,当一个部件的转矩确定后,其他构件的转矩也被确定。

通过对行星机构的转矩、转速关系的分析可知,当行星机构用于动力耦合时,比较容易实现的是转速耦合。当其中的一个构件固定时,该机构将会变为单自由度系统,如果适当地与动力源结合,也可以实现转矩耦合,但其实质是定轴齿轮传动的一种演化。

2.2 各种耦合机构的转矩、转速特性分析

2.2.1 转矩耦合

转矩耦合机构可以实现输出转矩的叠加,而输出转速互成比例,可以表示为:

$$T_a = bT_b + dT_d \quad (8)$$

$$n_a = k_1 n_b = k_2 n_d \quad (9)$$

式(8)和式(9)中: T_a ——耦合机构输出转矩; T_b ——

动力源**b**输入转矩； T_d ——动力源**d**输入转矩； n_a ——耦合机构输出转速； n_b ——动力源**b**输入转速； n_d ——动力源**d**输入转速； b ——动力源**b**的输入转矩影响因数； d ——动力源**d**的输入转矩影响因数； k_1 ——动力源**b**的输入转速影响因数； k_2 ——动力源**d**的输入转速影响因数。

常见的转矩耦合方式有齿轮耦合、磁场耦合、链或带耦合。齿轮耦合结构简单、效率高、控制简便，但模式切换过程中的冲击比较大。链或带耦合的传动效率相对于齿轮传动来说效率较低^[9]、体积较大，但结构简单、冲击小。磁场耦合是将电机的转子与发动机输出轴做成一体，通过磁场作用力将电机输出动力与发动机输出动力耦合在一起(图2)^[10]，长城嘉誉 Plug-in 5-MT ISG 型混合动力轿车^[11]也采用了这种类似的结构。

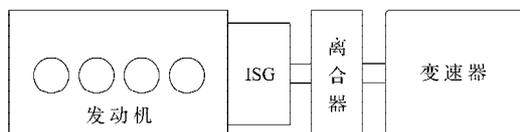


图2 磁场耦合原理图

Fig. 2 The schematic diagram of magnetic coupling

由式(8)和式(9)可知，这种耦合方式的影响因数全为1，即：

$$T_a = T_b + T_d$$

$$n_a = n_b = n_d$$

此时 T_a 和 n_a 分别为离合器输出的转矩和转速， T_b 和 n_b 分别为发动机输入的转矩和转速， T_d 和 n_d 分别为电机输入的转矩和转速。这种耦合方式效率较高、结构紧凑、耦合冲击小、耦合程度较高，理论上可以实现纯电动模式，避免了长时间怠速的情况，可以提高整车的燃油经济性和排放性能；但许多部件需要专门研发，开发成本较高。

2.2.2 转速耦合

如果耦合机构的输出转速是动力源输入转速的线性叠加，这样就构成了转速耦合，同时它们的转矩符合一定的线性比例关系，可表示为：

$$T_a = bT_b = dT_d \tag{10}$$

$$n_a = k_1n_b + k_2n_d \tag{11}$$

常用的转速耦合机构有差速器耦合和行星齿轮耦合两种。图3为北京理工大学的一种双电机耦合机构^[12]，它是一种行星架输出结构。这种耦合机构主要有两种工作模式：低速单电机工作模式(此时制动器B将齿圈锁止)，只有电机1提供动力；高速双电机工作模式(此时制动器B松开)，两台电机同时提供动力，但只有转速的叠加，没有转矩的叠加。

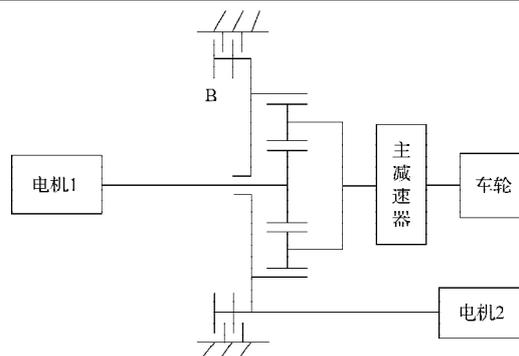


图3 双电机行星耦合驱动机构简图

Fig. 3 The structure diagram of dual motor planet coupling driving system

由式(3)和式(6)可以得出低速时的转速转矩特性，低速时 $n_r=0$ ，则：

$$n_c = \frac{n_s}{1+k} \tag{12}$$

$$T_c = -T_s(1+k) \tag{13}$$

高速时两台电机同时发出功率，此时实现了转速耦合，输出转速满足：

$$\frac{n_s + kn_r}{1+k} = n_c \tag{14}$$

行星耦合使双电机耦合机构结构简单，整个系统的体积变小，不需要变速器，降低了成本；但从两台电机的使用情况来看，在拥堵的城市路况下，容易造成只有电机1工作，电机2的功率不能发挥出来。

这种耦合机构可以通过适当的改进使其能够在低速时实现转矩耦合，而在高速时实现转速耦合，从而将整个系统从转速耦合变为功率耦合。这样不但有利于提高电机工作时的效率，而且可以充分利用两台电机的功率，大大提高系统低速时的动力性，并平衡两台电机的工作负荷，延长电机的整体使用寿命。

2.2.3 牵引力耦合

牵引力耦合是指两种动力源在车轮处实现动力耦合，实际上这也是一种转矩耦合。图4是湖南长丰汽车制造股份有限公司与湖南江麓容大车辆传动有限公司联合开发的行星机构动力耦合无级变速混合动力汽车，它是一种典型的牵引力耦合^[13]。后轮由发动机和后电机驱动，

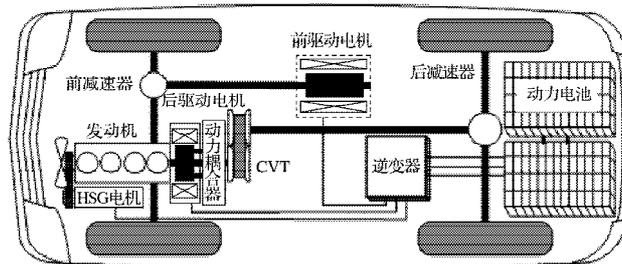


图4 牵引力耦合

Fig. 4 Traction coupling

前轮由前电机驱动,这种耦合方式结构简单、前后轴独立性好、改装方便,但整车成本较高,驱动控制复杂。

2.2.4 混合式耦合

混合式耦合系统就是在耦合系统中既有转矩耦合又有转速耦合,由于它兼有转矩耦合和转速耦合两种耦合系统的特点,在实际应用中得到了很好的效果。如丰田的THS混合动力系统,福特的FHS机电耦合传动总成,都得到了肯定。图5是通用公司提出的AHS-2双排双模式机电耦合传动总成,主要由发动机、两台电动/发电机、两个行星排机构、两组离合器和一个制动器组成^[14]。

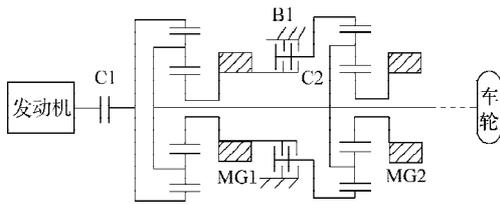


图5 AHS-2双排双模式机电耦合传动总成结构图

Fig. 5 Structure diagram of AHS-2 two row two mode mechanical and electric coupling system

双排双模式机电耦合传动总成主要有两种工作模式(假设两个行星排的参数 k 相同):工作模式1时,离合器C1闭合,离合器C2断开,制动器B1闭合;工作模式2时,离合器C1闭合,离合器C2闭合,制动器B1断开。

(1)工作模式1。此时,发动机和电机1(MG1)通过行星排1实现转速耦合,由式(3)、式(6)和式(7)可得:

$$\left. \begin{aligned} n_{s1} + kn_{r1} &= (1+k)n_{c1} \\ T_{c1} &= -T_{s1}(1+k) \\ T_{r1} &= T_{s1}k \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

发动机和电机1(MG1)经转速耦合提供给行星架的转矩和电机2(MG2)经太阳轮2传给行星架2的转矩通过行星排2实现了转矩耦合,由式(6)和式(15)可以推出系统的转速和转矩特性,即:

$$T_{c1} = -T_{s1}(1+k) \quad (16)$$

$$T_{c2} = T_{s2}(1+k) \quad (17)$$

$$T_{out} = T_{c1} + T_{c2} \quad (18)$$

$$n_{out} = \frac{n_{MG2}}{1+k} \quad (19)$$

式(18)和式(19)中: T_{out} ——系统输出转矩; n_{out} ——系统输出转速。

这种模式下,系统能够输出较大的转矩,但转速受到限制,适用于车辆爬坡和起步。

(2)工作模式2。此时,两个行星排都工作在差动工作模式下。

由式(3)、式(6)和式(7)可以得到输出的转速特性:

$$n_{out} = \frac{n_{MG1} + kn_{MG2}}{1+k} \quad (20)$$

输出转矩受到3个驱动部件(即发动机和两台电机)的限制。

与式(19)相比,转速提高了,这种模式适合在高速下使用。

混合式耦合由于能实现转矩和转速耦合,提高了汽车的动力性,能更合理地利用传动系统,从而更好地满足人们的需求,有很好的应用前景。

3 结语

本文对动力耦合机构的分类进行了详细说明,并与传统的动力耦合机构进行了区分,范围从传统的混合动力汽车扩大到纯电动汽车。对几种典型的动力耦合机构进行了稳态情况下的转矩、转速特性分析,指出各种耦合机构的特点。分析表明,相比于单纯的转矩和转速耦合,混合式耦合有更强的适应性,能够更好地满足车辆动力性的要求,有很好的发展前景。纯电动耦合系统继承使用传统混合动力耦合系统时表现出来的不足需要进一步的研究和改进,不能局限于传统双电机耦合系统。

参考文献:

- [1] Zhang Cheng-ning, Wu Xiao-hua, Wang Zhi-fu, et al. Mode switching control strategy of dual motors coupled driving on electric vehicles[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 20(3): 394-398.
- [2] Mehrdad E, Gao Yimin, Sebastien E G, et al. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计[M]. 倪光正, 倪培宏, 熊素铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 李美军. 混合动力电动汽车动力耦合方式的分类与比较[J]. 公路与汽运, 2008(2): 24-27.
- [4] 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.
- [5] 何耀华, 雷芳芳. 新型多动力源动力耦合装置传动特性研究[J]. 机械设计, 2009, 26(8): 50-52.
- [6] 孙恒, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 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): 6-8.
- [8] 步曦, 杜爱民, 薛锋. 混合动力汽车用行星齿轮机构的理论研究及仿真分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(9): 835-853.
- [9] 殷玉枫. 机械设计课程设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 尹安东, 李领领. 车用ISG技术及其国内外发展现状[J]. 汽车科技, 2011(5): 1-6.
- [11] 张玉玺, 程秀生, 陆中华. 轻度混合动力节能离合器控制策略研究及仿真分析[J]. 汽车技术, 2007(8): 12-14.
- [12] 武小花. 纯电动大客车双电机耦合传动系统匹配与控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- [13] 邹乃威. 无级变速混合动力汽车动力耦合及速比控制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009.
- [14] Miller J M, Everett M. An Assessment of Ultra capacitors as the Power Cache in Toyota THS-II, GM-Allison AHS-2 and Ford FHS Hybrid Propulsion Systems[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC2005). Hilton Austin Hotel, 2005.