

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201602033

功率分流式 HEV 电机参数动力性最优匹配

刘 辉^{1,2}, 王 腾^{1,2}, 刘志伟^{1,2}, 韩立金^{1,2}

(1.北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081; 2.车辆传动国家重点实验室(北京理工大学), 北京 100081)

摘 要:为解决功率分流式混合动力汽车在动力工况中受电机工作点制约系统无法同时发挥发动机和电机最大转矩的问题,提出以动力性最优为目标的双模式混合驱动系统电机参数匹配方法.基于双电机的转速、转矩与混合驱动系统的输入输出转速、转矩的关系,提出电机最高转速和峰值转矩的匹配方法.研究系统电功率分流特性与电机工作点的关系以及电机额定转速与电机输出转矩的关系,并提出电机额定转速的匹配方法.结合匹配实例分析两种模式下发动机和电机的工作状态.结果表明:提出的电机参数匹配方法可使系统同时发挥发动机和电机的最大转矩特性,实现了发动机与电机之间最优工作点的匹配,使系统获得最佳的动力特性.

关键词:双模式;功率分流;动力性最优;电机额定转速;工作点匹配

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0106-07

Optimum of power characteristics for motors matching of a power split HEV

LIU Hui^{1, 2}, WANG Teng^{1, 2}, LIU Zhiwei^{1, 2}, HAN Lijin^{1, 2}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2.State Key Laboratory of Vehicle Transmission(Beijing Institute of Technology), Beijing 100081, China)

Abstract: The engine cannot exert the peak torque if the parameters of motors are not match well in a power split hybrid vehicle. In such a case, the engine is working at a speed so that it has the ability to exert its peak torque while the motor limits the torque of engine due to the working points of motors. To solve this problem, a novel strategy is proposed for the parameter matching of the dual-mode power split transmission with the optimum of the power output characteristics as objective. The motors' maximum speed and torque are matched on the basis of the analysis on the characteristics of the dual-mode hybrid transmission. The relation ship between the motors' rated speed and the engine working points is studied with the help of analysis on the characteristics of electric power split, and the method for the motors' rated speed matching is put forward. The validity of the matching method is validated by matching examples. Finally, the motors and the engine performance are analyzed and the results show that the power split transmission can exert the peak torque of the engine and motors at the same time by coordinating the working points of them.

Keywords: dual-mode; power split; the optimum of the power characteristics; motors' rated speed; the working points matching

混合动力驱动系统具有串联式、并联式和混联式3种布置形式.功率分流混合驱动系统是混联混合动力驱动系统的一个分支,其显著特点是利用行星齿轮机构进行功率的分流与汇流^[1],其转矩和转速特性互相耦合,对动力性的发挥和燃油经济性的提高提供了更大的优化空间;但系统连接方式复杂并需要多个电机协调工作,对系统参数匹配和控制提出了更多挑战^[2-5].电机参数的匹配直接影响到整个功率分流式混合动力驱动系统能否正常工作,是保证混合驱动系统性能发挥的前提.电机的额定

转速和峰值转矩对电机的设计和使用非常重要,影响电机的功率密度及工作性能发挥,对系统的动力性能也有重要影响.

文献[6-9]研究了串联方案中电机的功率匹配与汽车加速爬坡等性能要求的关系,没有对电机转速转矩匹配进行深入研究.文献[10-11]研究了并联方案中发动机和电机功率的匹配原则,即由发动机提供汽车平均行驶功率,由电动机提供峰值功率.关于功率分流式混合驱动方案参数匹配的研究,文献[12]提出了发电机的匹配应基于循环工况,电动机的匹配应基于加速需求的匹配原则.文献[13]提出了基于驱动电机高效区的电机额定转速匹配原则.文献[14]考虑了速比对电机功率匹配的影响,但未提出具体的匹配公式.文献[15]提出了基于优化的系统参数匹配流程,对系统的动力输出特性进

收稿日期: 2016-02-24
基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0048);
国家自然科学基金(51305026)
作者简介: 刘 辉(1975—),女,教授,博士生导师
通信作者: 刘 辉, lh@bit.edu.cn.

行了优化,但未考虑各动力元件工作点协调问题. 目前,针对功率分流式混合驱动系统电机参数匹配的研究,基本上是从满足驱动功率的角度对电机进行功率匹配,根据车速要求对电机进行最高转速匹配,没有考虑到发动机与电机工作点的关系,造成了发动机与电机的工作点相互制约,系统无法输出最大的动力特性.

本文介绍了双模式混合动力驱动系统的特性关系,以发挥发动机和电机最大转矩和满足系统动力性需求为匹配原则,对电机参数进行了匹配,研究了电机额定转速对发动机和两电机工作点的影响,得到了电机参数匹配公式. 结合匹配实例,验证了匹配公式的正确性,为混联式混合动力汽车的性能匹配提供参考依据.

1 双模式混合动力驱动系统

图 1 所示为双模式混合动力驱动系统传动简图,它由 4 个行星排(K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4)、两个电机(A、B)以及 3 个操纵元件(C_1 、 Z_1 、 Z_2)组成. 其中 K_1 和 K_2 排起功率耦合作用, K_3 和 K_4 排起变速变矩作用. 采用功率分流耦合机构最突出的优点是通过两自由度行星机构的转速调节实现无级变速,所以又称为电力机械无级变速器(EVT).

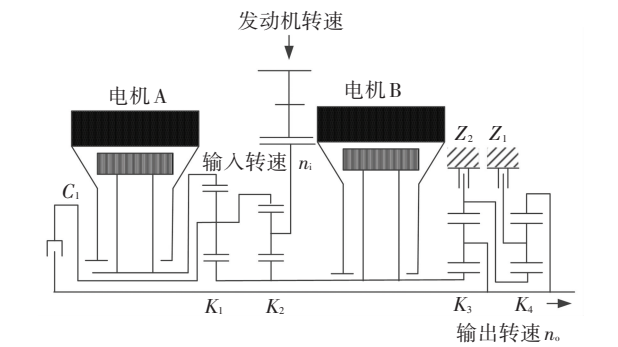


图 1 双模式混合动力驱动系统传动简图
Fig.1 Dual-mode hybrid transmission scheme

这里的模式主要是针对电机的转速变化,假定发动机输入到系统的转速不变,要使输出转速不断升高,两个电机的转速相应发生线性变化,如图 2 所示. 传动系统方案中共有两种驱动模式:EVT1 模式和 EVT2 模式. EVT1 模式为分速汇矩模式,电机 A 起到分流的作用,它抵抗发动机传到 K_1 排太阳轮的转矩;电机 B 的转矩通过 K_3 排减速增扭传递到输出轴,电机 B 的输出转矩越大,系统输出转矩也越大,整车动力性也越好. 其中 EVT1 模式分为两种动力驱动工况,即 EVT1L 和 EVT1H.

EVT1 模式工作时,制动器结合,离合器分离;

EVT2 模式工作时,离合器接合,制动器分离. 表 1 为双模式混合动力驱动系统操纵逻辑表.

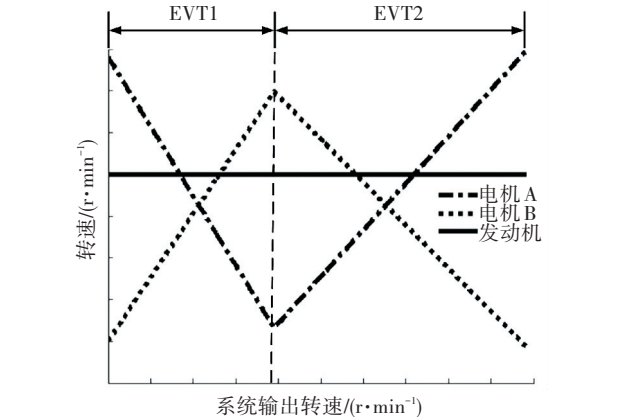


图 2 双模式混合动力驱动系统转速关系
Fig.2 Speed relation chat of dual-mode hybrid transmission

表 1 操纵逻辑表			
Tab.1 Maneuver logic of the system			
工况	离合器 C_1	制动器 Z_1	制动器 Z_2
EVT1L	×	√	×
EVT1H	×	×	√
EVT2	√	×	×

注:√为结合;×为分离.
EVT1L 一般用于爬坡工况和困难路面,能够输出较大转矩;EVT1H 用于正常行驶工况中起步与加速,适用于中低速工况. EVT2 模式用于中高速工况,发动机功率由 K_2 排分流成 3 股:其中 1 股经电机 B 以电功率形式流向电机 A,由电机 A 输出的机械功率与另外两股机械功率在 K_1 排行星架汇流,经离合器 C_1 传递到输出轴,为系统 EVT2 模式输出功率.

混合驱动模式下的无级调速特性通过电机 A、B 配合来改变系统机电功率流的功率分流比例来实现. 首先对两种模式下电机 A 和电机 B 与行星排间的转速、转矩关系进行分析,得到电机 A、B 的转速、转矩与输入输出转速、转矩的关系,进一步分析电功率分流特性,得到分流电功率与输入功率的关系.

1.1 转速转矩关系

EVT1L 工况:

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+k_1)(1+k_2)}{k_1k_2} & -\frac{(1+k_1+k_2)(1+k_3+k_3k_4)}{k_1k_2} \\ 0 & 1+k_3+k_3k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & 0 \\ -\frac{1+k_1+k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & \frac{1}{1+k_3+k_3k_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix};$$

EVT1H 工况:

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+k_1)(1+k_2)}{k_1 k_2} & -\frac{(1+k_1+k_2)(1+k_3)}{k_1 k_2} \\ 0 & 1+k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1 k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & 0 \\ -\frac{1+k_1+k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & 1+k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix};$$

EVT2 工况:

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1+k_2}{k_1} & \frac{1+k_1+k_2}{k_1} \\ 1+k_2 & -k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1 k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & \frac{k_1}{1+k_1} \\ -\frac{1+k_1+k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & 1+k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}.$$

式中: n_a 、 n_b 分别为电机 A、B 转速, n_i 、 n_o 分别为系统输入转速与输出转速; T_a 、 T_b 分别为电机 A、B 转矩, T_i 、 T_o 分别为系统输入与输出转矩; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为行星排参数.

1.2 功率分流特性

根据转速、转矩的大小和方向,对系统功率耦合机构的功率流进行了分析,如图 3 所示. 在 EVT1 模式下,电机 A 工作在发电工况,电机 B 处于电动工况,电机 B 的驱动转矩可以直接作用到输出轴,提高混合驱动系统的输出转矩. 在 EVT2 模式下,电机 B 工作在发电工况,电机 A 处于电动工况.

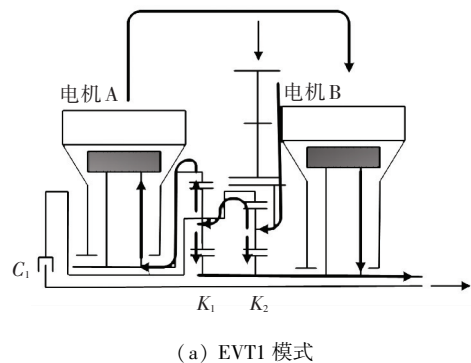
设系统功率耦合部分转速与输入输出转速关系矩阵为 $\mathbf{M}$, 且有

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$

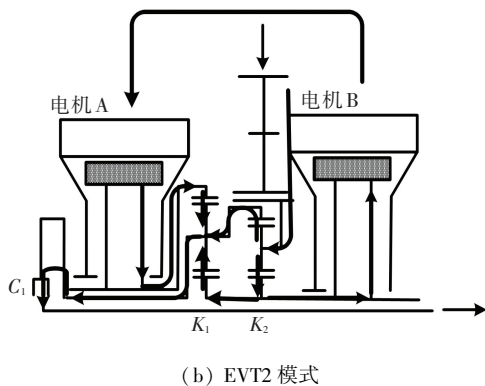
可推得 EVT1 模式下 $\mathbf{M}_1$ 和电动率分流比例系数 β_1 的表达式为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+k_1)(1+k_2)}{k_1 k_2} & -\frac{(1+k_1+k_2)}{k_1 k_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\beta_1 = \frac{n_a T_a}{n_i T_i} = \frac{A_1 - 1}{A_1} I - 1.$$



(a) EVT1 模式



(b) EVT2 模式

图 3 双模式混合动力驱动系统功率流

Fig.3 Power flow of the dual-mode hybrid transmission

EVT2 模式下, $\mathbf{M}_2$ 和电动率分流比例系数 β_2 的表达式为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1+k_2}{k_1} & \frac{1+k_1+k_2}{k_1} \\ 1+k_2 & -k_2 \end{bmatrix},$$

$$\beta_2 = \frac{n_b T_b}{n_i T_i} = \frac{(1-A_2)(1-C_2)}{C_2 - A_2} I + \frac{A_2 C_2}{C_2 - A_2} \cdot \frac{1}{I} + \frac{A_2 + C_2 - 2A_2 C_2}{C_2 - A_2}.$$

式中: I 为系统功率耦合部分速比, $I = n_b/n_i$.

2 电机参数匹配流程

系统参数匹配的目的在于如何匹配各部件参数,使系统能够协调工作,并发挥出最好的驱动性能,满足汽车性能的设计要求. 由于双模式混合动力驱动系统中,两电机与功率耦合机构的特性关系相对复杂,本文的研究重点是对电机 A 和电机 B 的参数匹配. 电机参数匹配的原则是使系统在动力工况中能够完全发挥发动机和电机的最大转矩特性,实现发动机与电机之间最佳工作点的匹配. 双模式混合动力驱动系统电机参数匹配流程如图 4 所示.

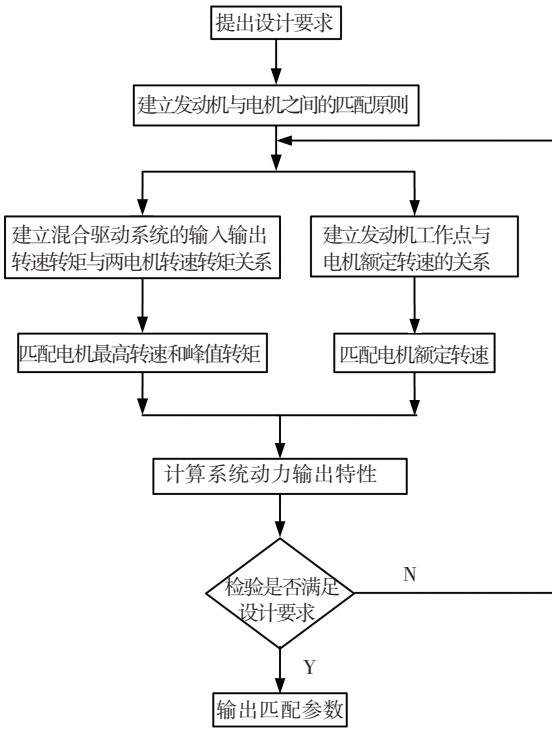


图 4 双模式混合驱动系统电机参数匹配流程

Fig.4 Flow chart for the motors matching of the dual-mode hybrid transmission

3 电机参数匹配方法研究

3.1 电机最高转速匹配

由图 2 可知,混合动力驱动系统在 EVT2 模式下达到最大输出转速,电机 A 达到最高转速.此时输入转速也达到最高,整车处于最高车速工况,可求得电机 A 的最高转速需求为

$$n_{a_max} = \frac{(1 + k_1 + k_2)}{k_1} n_{o_max} - \frac{(1 + k_2)}{k_1 i_q} n_e.$$

式中: n_e 为发动机的额定转速, i_q 为系统前传动比.

从 EVT1 模式向 EVT2 模式切换时,电机 B 达到最高转速.根据模式切换前后电机 B 转速相等可得电机 B 的最高转速需求为

$$n_{b_max} = \frac{(1 + k_3)(1 + k_2)}{(1 + k_2 + k_3) i_q} n_e.$$

3.2 电机峰值扭矩匹配

整车起步加速以及爬坡等动力工况中,均允许电机短时间内使用峰值扭矩.当发动机工作在最大转矩点时,可求得所需电机 A 峰值扭矩为

$$T_{a_max} = \left| - \frac{k_1 k_2}{(1 + k_1)(1 + k_2)} T_{e_max} i_q \eta_q \eta_e \right|. \quad (1)$$

式中: T_{e_max} 为发动机最大转矩, η_q 为系统前传动效率, η_e 为发动机效率.

在 EVT1L 工况下,若整车起步爬坡过程中系统最大转矩需求为 T_{gm} ,即可求得电机 B 的峰值扭矩

需求为

$$T_{b_max} = \left[[T_{gm} - (1 + k_1 + k_2)(1 + k_3 + k_3 k_4)/(k_1 k_2)] | T_{a_max} | \right] / (1 + k_3 + k_3 k_4). \quad (2)$$

系统在 EVT1H 工况下的输出转矩为

$$T_o = (1 + k_3) [T_b + (1 + k_1 + k_2) / (1 + k_1)(1 + k_2)) T_e i_q \eta_q \eta_e]. \quad (3)$$

根据式(3)可知,系统输出转矩来源于两部分:第一部分是发动机转矩,第二部分是电机 B 转矩.将式(1)和(2)代入到式(3)中,整理得到系统的最大输出转矩为

$$T_{o_max} = (1 + k_1 + k_2)(1 + k_3)/(k_1 k_2) T_{a_max} + (1 + k_3) T_{b_max}. \quad (4)$$

根据式(4),即可将系统能否输出最大转矩的问题转化为能否使电机 A 与电机 B 同时输出最大转矩的问题.

图 5 为电机峰值扭矩外特性曲线.在 EVT1 模式下,随着车速的升高,电机 A 降速,电机 B 升速.若当发动机调速至最大转矩点转速时,两电机均工作在图 5 中的恒转矩区(如 N_1 点),则系统能够输出最大转矩特性.若此时电机 A 或电机 B 工作在 N_3 点附近,那么受电机 A 的转矩限制,发动机的输出转矩受限;受电机 B 的转矩限制,系统输出转矩受限.所以,除了匹配电机转矩,还要匹配电机的额定转速 n_m ,以确保当发动机调速至最大转矩点转速时,电机 A 和电机 B 至少可工作在 N_2 点,能够发挥出最大匹配转矩.

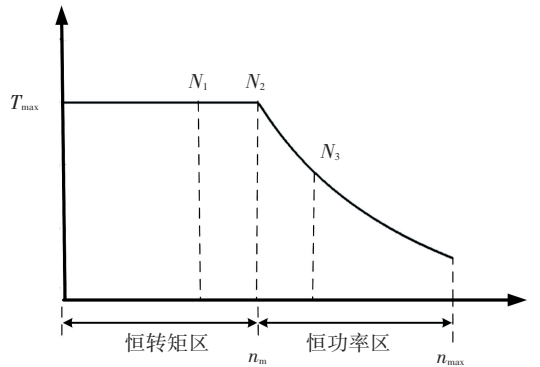


图 5 电机峰值扭矩外特性曲线

Fig.5 The external characteristic curve of the motor peak torque

3.3 电机额定转速匹配

设电机 A 额定转速为 n_{am} ,电机 B 的额定转速为 n_{bm} .已经求得 EVT1 模式下,电机 A 的电功率分流比例系数为 β_1 .当发动机工作在最大转矩点时,发动机输入到电机 A 的功率为

$$P_{A,i} = \beta_1 P_{T_max} \eta_q \eta_e.$$

式中 P_{T_max} 为当发动机工作在最大转矩点时发动机的功率.

EVT1 模式下电机 A 处于发电状态,电机 B 处于电动状态. 当不考虑动力电池组的功率时,系统通过电机 A 可向电机 B 提供的电功率为

$$P_{B_o} = P_{A_i} \eta_g \eta_m = \beta_1 P_{T_{max}} \eta_q \eta_e \eta_g.$$

式中: η_g 为电机发电效率, η_m 为电机电动效率.

若电机 A 能够为电机 B 提供足够电功率,则在车速较低时电机 B 会始终输出最大扭矩,此时电机 B 功率需求为

$$P_{B_c} = n_b T_{b_{max}}/9\ 549.$$

所以若要电机 A 与电机 B 同时输出最大扭矩,需要满足

$$P_{B_o} \eta_m \geq P_{B_c}.$$

式中 η_m 为电机电动效率.

可求得电机 B 额定转速 n_{bx} 应满足

$$n_{bx} \geq \frac{P_{T_{max}} \eta_q \eta_e \eta_g \eta_m}{\frac{P_{T_{max}} \eta_q \eta_e \eta_g \eta_m (A_1 - 1)}{A_1 n_i} + \frac{T_{b_{max}}}{9\ 549}}. \tag{5}$$

从而得到电机 A 额定转速 n_{ax} 应满足

$$n_{ax} \geq A_1 n_{T_{max}}/i_q + B_1 n_{bx}. \tag{6}$$

式中 $n_{T_{max}}$ 为当发动机工作在最大扭矩点时发动机的转速.

根据式(5)和式(6)可知,电机额定转速选择的约束是充分发挥发动机和电机转矩匹配的最优值,要根据工程实现进行最终确定;另外,根据这一组临界电机参数计算所得的系统加速时间未必能够满足系统对加速特性的要求,所以需要根据满足加速时间的要求对电机额定转速进行适当的调整.

以电机 A 为例对额定转速匹配结果进行说明. 图 6 为峰值转矩与最高转速相同,额定转速不同的三组电机 A 峰值转矩外特性曲线. 图中 $T_{a_{max}}$ 是根据式(1)匹配的电机 A 峰值转矩; n_{ax} 是为保证发动机和电机 B 输出最大扭矩,电机 A 额定转速的临界最小值.

若匹配电机 A 额定转速为 n_{am1} ,当发动机调速到最大扭矩点转速 $n_{T_{max}}$ 时,电机 A 受转速约束只能工作在 M_4 点,发动机转矩受电机 A 转矩限制,系统无法发挥发动机最大扭矩. 若匹配电机 A 额定转速

为 n_{am2} ,当发动机调速到 $n_{T_{max}}$ 时,电机 A 如果工作在 M_3 点,系统可发挥出发动机最大扭矩;随着车速的增加,电机 A 工作点沿外特性从 M_3 到 M_2 迁移的过程中,发动机会一直工作在最大扭矩点直到电机 A 降至临界额定转速 n_{ax} .

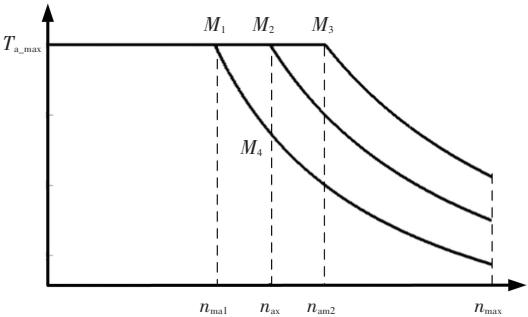


图 6 不同额定转速下电机 A 转矩外特性曲线

Fig. 6 External characteristic curves of motor A for different rated speed

4 电机参数匹配实例

某双模式混合动力重型车辆设计指标为最高车速不低于 100 km/h,最大爬坡度大于 31°,0 ~ 60 km/h加速时间<20 s;车体参数取整备质量 21 t,滚动阻力系数 0.013,风阻系数 0.6,迎风面积 5.5 m²,车轮半径 0.59 m;发动机参数为额定功率 300 kW,额定转速2 100 r/min,最大扭矩1 732 N·m,最大扭矩点转速 1 400 r/min;电池充放电功率为 100 kW. 另外,混合驱动系统结构参数如表 2 所示.

表 2 系统结构参数

Tab.2 System structural parameters					
前传动比	后传动比	行星排	行星排	行星排	行星排
i_q	i_h	参数 k_1	参数 k_2	参数 k_3	参数 k_4
1.225	5.4	2.47	2.06	2.06	3.27

按照所述流程进行电机参数匹配,计算结果如表 3 中的计算值所示. 本文利用 MATLAB 中的优化程序,以系统输出最大扭矩为优化目标,计算整车牵引特性;在整车加速时间的校核过程中考虑了电池放电影响,最终得到电机参数如表 3 中匹配值所示.

表 3 电机参数匹配结果

Tab.3 Results of the motors' parameters matching

电机	最高转速/(r · min ⁻¹)		峰值扭矩/(N · m)		额定转速/(r · min ⁻¹)		峰值功率/kW	
	计算值	匹配值	计算值	匹配值	计算值	匹配值	计算值	匹配值
电机 A	3 310	3 500	905	923	1 229	1 500	91.6	145
电机 B	3 320	3 500	795	923	1 063	1 500	88.5	145

图 7 为整车牵引特性曲线,满足最高车速 100 km/h 和 31°爬坡度(需求动力因数为0.54)的

要求. 为了验证本文提出的电机参数匹配方法,采用

额定转速分别为 1 000 和 1 500 r/min,最高转速和峰值转矩均相同的两组电机参数进行加速特性对比,结果如图 8 所示. 采用 1 500 r/min 计算得到整车 0~60 km/h 加速时间为 16.2 s(不考虑换挡时间),比采用 1 000 r/min 计算得到整车 0~60 km/h 加速时间减少了 2.9 s.

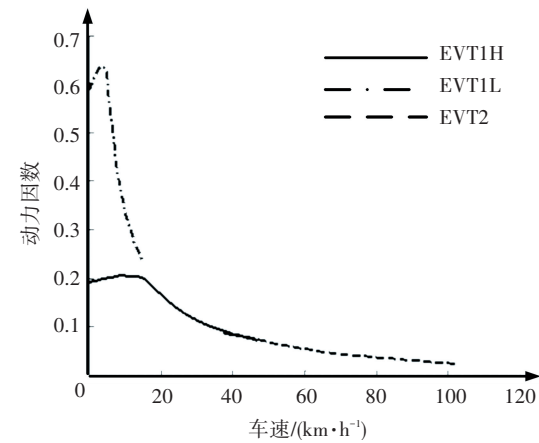


图 7 整车牵引特性曲线

Fig.7 The vehicle tractive characteristics

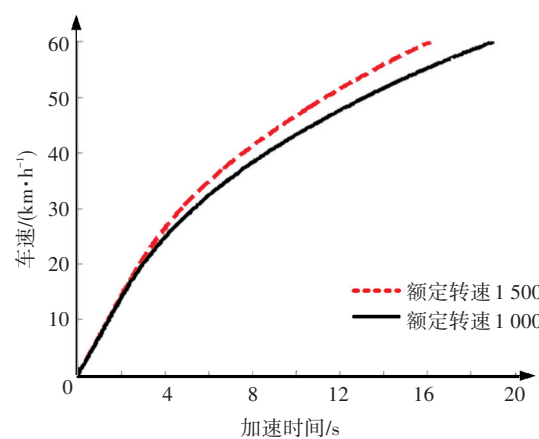


图 8 整车加速特性曲线对比

Fig.8 The vehicle accelerating characteristics comparison

在 EVT1 模式下,对 1 000、1 500 r/min 两组电机参数得到的整车动力工况中发动机和电机的转速、转矩随系统输出转速的变化进行分析对比,结果如图 9 所示.

通过对比表明,采用 1 500 r/min 计算得到的系统输出转速在 270~330 r/min 时,发动机可与两电机一起为系统提供最大的转矩输出. 而 1 000 r/min 则不能在同一系统输出转速下,使发动机和两电机共同输出最大转矩.

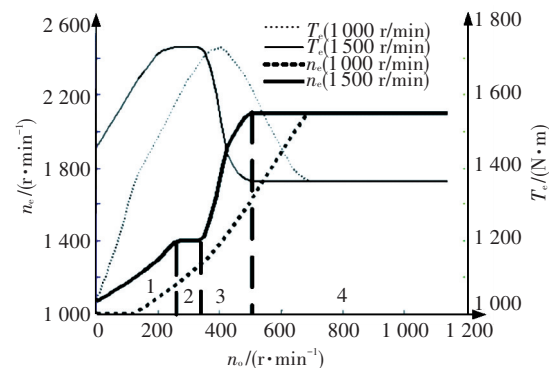
根据采用 1 500 r/min 分析得到的发动机转速变化,将系统在 EVT1 模式下的工作状态分为 4 个阶段:

1) 发动机启动升速,电机 A 降速,电机 B 升速. 由于电机 A 转速较高,电机 A 的工作点位于恒功率

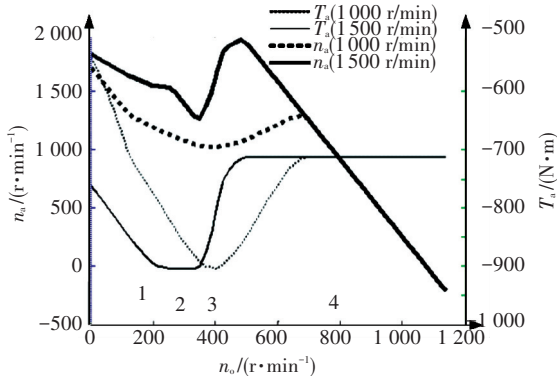
区的外特性曲线上;电机 B 转速较低,电机 B 的工作点位于恒转矩区的外特性曲线上.

2) 发动机升速到最大转矩点转速 1 400 r/min,电机 A 转速降至额定转速 1 500 r/min 附近. 此时,发动机稳定工作在最大转矩点,电机 A 和电机 B 均工作在恒转矩区的外特性曲线上,即发动机与两电机在此阶段共同输出最大转矩,因而系统开始输出最大转矩.

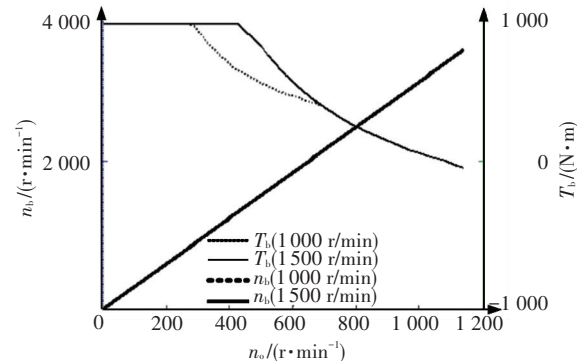
3) 电机 A 转速降至 1 230 r/min 附近时,发动机工作点从最大转矩点向最大功率点迁移,发动机开始升速. 电机 A 的工作点从恒转矩区的外特性曲线向输出大功率的工作点迁移,电机 B 的工作点受电机 A 的输出功率影响.



(a) 发动机的转速、转矩变化对比



(b) 电机 A 的转速、转矩变化对比



(c) 电机 B 的转速、转矩变化对比

图 9 EVT1 模式下各动力元件转速、转矩变化对比

Fig.9 Speed & torque comparison of power components in EVT1

4) 发动机稳定工作在额定功率点, 电机 A 继续降速, 电机 B 继续升速. 电机 A 的输出转矩保持恒定, 电机 B 的输出转矩降低.

综合以上分析可知, 采用本文提出的基于系统最大动力特性的电机参数匹配方法, 可使发动机和两电机同时为系统提供最大转矩输出, 使系统获得最佳的动力特性; 通过对两电机额定转速的匹配, 可控制系统最大转矩输出时系统输出转速的范围.

5 结 论

1) 介绍了双模式混合动力驱动系统的特性关系, 以完全发挥发动机和两电机的最大转矩为目标, 研究了双模式混合动力驱动系统电机参数匹配的原则和方法, 提出了电机额定转速、峰值转矩等电机参数匹配解析表达式.

2) 通过合理匹配电机额定转速可使发动机和电机同时在最大转矩点工作, 并可对此时系统的输出转速范围进行控制, 实现了发动机参数与电机参数之间最优工作点的匹配.

3) 结合参数匹配实例, 详细分析了双模式系统在两种模式下发动机和电机的工作状态, 验证了电机匹配原则的正确性. 本文研究对于混联式混合动力汽车性能分析和系统参数匹配具有实际应用价值.

参考文献

- [1] 韩立金. 功率分流混合动力车辆性能匹配与控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
HAN Lijin. A study on performance matching and control strategy for power-split hybrid electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [2] CIPEK M, PAVKOVIĆ D, PETRIĆ J. A control-oriented simulation model of a power-split hybrid electric vehicle[J]. Applied Energy, 2013, 101(1): 121–133. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.07.006.
- [3] WANG Y, SUN D Y. Powertrain matching and optimization of dual-motor hybrid driving system for electric vehicle based on quantum genetic intelligent algorithm[J]. Discrete Dynamics in Nature & Society, 2014, 2014(5): 10–14. DOI: 10.1155/2014/956521.
- [4] HALVAI Niasar A, MOGHBELLI H, VAHEDI A. Design methodology of drive train for a series-parallel hybrid electric vehicle (SP-HEV) and its power flow control strategy[C]// 2005 IEEE International Conference on Machines and drives. San Antonio: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005: 1549–1553. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195926.
- [5] KANG J, CHOI W, HONG S, et al. Control strategy for dual-mode power split HEV considering transmission efficiency[C]// 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011. Chicago: IEEE Power Electronics and Vehicular Technology Societies, 2011: 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043008.

- [6] 张志超. 串联式混合动力汽车动力系统参数匹配及性能仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
ZHANG Zhichao. The parameters matching and performance simulation of series hybrid electric vehicle powertrain[D]. Xian: Chang'an University, 2014.
- [7] GAO Yimin, MEHRDAD E. Parametric design of the traction motor and energy storage for series hybrid off-road and military vehicles[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 21(3): 749–755. DOI: 10.1109/TPEL.2006.872374.
- [8] 邱利宏, 钱立军, 程伟, 等. 插电式串联混合动力汽车参数匹配及控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(4): 297–303. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2014.04.10.
QIU Lihong, QIAN Lijun, CHENG Wei, et al. Parameters matching and control strategy of plug-in series hybrid electric vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2014, 4(4): 297–303. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2014.04.10.
- [9] 孙永正, 李献青, 邓俊, 等. 插电式串联混合动力轿车的选型匹配与仿真[J]. 汽车工程, 2010, 32(12): 1015–1020, 1025.
SUN Yongzheng, LI Xianqing, DENG Jun, et al. Type selection, matching and simulation of plug-in series hybrid electric car[J]. Automotive Engineering, 2010, 32(12): 1015–1020, 1025.
- [10] 舒红, 彭大, 袁月会, 等. 插电式并联混合动力汽车动力传动系统与控制参数匹配设计[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 105–112. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2012.02.004.
SHU Hong, PENG Da, YUAN Yuehui, et al. Matching design of power train and control parameters for a plug-in parallel hybrid electric vehicle[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(2): 105–112. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2012.02.004.
- [11] 高爱云, 王邦军, 郭志军, 等. 并联混合动力系统参数匹配优化研究[J]. 机械设计与制造, 2014(11): 235–238, 242. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2014.11.066.
GAO Aiyun, WANG Bangjun, GUO Zhijun, et al. Study on optimization for parameters of powertrain system of parallel hybrid electric vehicle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(11): 235–238, 242. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2014.11.066.
- [12] BEHROOZ M, EMADI S A M. Dual-mode power-split transmission for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3223–3232. DOI: 10.1109/TVT.2010.2049870.
- [13] LU B, CHEN H, HE H, et al. The dynamic matching calculation and simulation for dual-motor driven electric vehicle[C]// IEEE Transportation Electrification conference and EXPO, ITEC, Asia-Pacific 2014-Conference Proceeding. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2014: 1–5. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941122.
- [14] 韩立金, 项昌乐, 刘辉, 等. 双模式混合驱动装置电机参数匹配[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(6): 1527–1531.
HAN Lijin, XIANG Changle, LIU Hui, et al. Motors matching of the dual-mode hybrid transmission[J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1527–1531.
- [15] 韩立金, 刘辉, 王伟达, 等. 功率分流混合动力汽车参数匹配与优化研究[J]. 汽车工程, 2014(8): 904–910.
HAN Lijin, LIU Hui, WANG Weida, et al. A study on the parameter matching and optimization of a power split HEV[J]. Automotive Engineering, 2014(8): 904–910.