doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.047

基于模型预测控制的多电机驱动系统能量最优分配策略

陈　龙　朱　斌　孙晓东　汪少华
(江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

摘要: 为了解决传统电动汽车单电机驱动系统高效区无法覆盖汽车行驶工况点的问题,提出了一种基于模型预测控制的纯电动汽车多电机驱动系统能量最优分配策略。首先,以整个多电机驱动系统为研究对象,建立了电机模型和汽车纵向动力学模型,并讨论了采用高效区不同的前后轴电机时提高整车效率的方法。其次,通过台架实验标定出电机在特定转速-转矩工作点的效率,通过引入前后轮驱动力分配比 α,将两张电机的效率图转换为整车的车速-驱动力效率图。再次,对模型预测转矩控制下的永磁同步电机系统进行了理论分析与仿真验证。最后,通过硬件在环实验,验证了能量最优分配策略对整车效率以及续航里程提升的有效性。

关键词: 纯电动汽车; 永磁同步电机; 多电机驱动系统; 能量最优; 扭矩分配
中图分类号: U469.72　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)10-0403-07

Optimal Allocation Strategy for Multi-motor Drive System Based on Model Predictive Control

CHEN Long　ZHU Bin　SUN Xiaodong　WANG Shaohua
(*Automotive Engineering Research Institute*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the driving condition of the electric vehicle (EV) cannot be covered by the high efficiency area of traditional single motor drive system, an optimal allocation strategy for the multi-motor drive system of EV was presented based on model predictive control. Firstly, taking the whole multi-motor drive system as research object, the model of motor and longitudinal dynamic model of automobile were established. The method to improve the efficiency of the vehicle with different front and rear axle motors in the high efficiency area was discussed. Secondly, the efficiency of the motor at specific speed and torque operation points was calibrated by the bench test. It was found that the high efficiency ranges of the two motors covered the working operation points of high speed cruising and low speed startup conditions, respectively. By introducing the driving force distribution ratio of front and rear motors, the efficiency diagram of the two motors was transformed into the vehicle driving efficiency diagram. Thirdly, theoretical analysis and simulation verification of permanent magnet synchronous motor (PMSM) system with model predictive torque control were carried out, showing that the method can ensure the rapid response of torque. Finally, the validity of the range improvement and vehicle efficiency were verified by the hardware in the loop (HIL) experiments. The results showed that the driving force distribution can integrate the high efficiency range of two motors and improve the efficiency of vehicle. Moreover, the model predictive torque control (MPTC) based on the motor benchs parameters can suppress the torque ripple in the low speed range and improve the accuracy of the output torque. The results can provide theoretical basis for the design of distributed driving system.

Key words: electric vehicle; permanent magnet synchronous motor; multi-motor drive system; energy optimization; torque distribution

0　引言

近年来随着三电技术的不断进步,纯电动汽车的技术研究与应用越来越广泛[1-4]。为响应节能减排的发展策略,在有限的电池容量下提升驱动系统的效率成为现阶段的主要研究工作[5-8]。然而纯电

收稿日期: 2018-05-25　修回日期: 2018-07-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(U1564201、51875261)和江苏省杰出青年基金项目(BK20180046、BK20170071)
作者简介: 陈龙(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能模拟与控制研究,E-mail: chenlong@ujs.edu.cn

动汽车沿袭传统汽车的单动力源结构并不能充分发挥电机驱动系统的优势[9],所以多电机驱动方案逐渐成为研究热点[9-13]。现阶段国内外学者关于纯电动汽车多电机驱动的高效解决方案可以分为两大类:四轮分布式驱动系统和前后独立的双电机驱动系统[14-15]。在四轮分布式驱动方面,WANG 等[16]利用 4 个独立驱动的轮毂电机进行了电机动力学实验,并根据实验数据分析了车轮电机的能量效率特性基于不同工况下的系统和部件效率特性,提出了一种提高 4 轮轮毂汽车效率最优的安全轮速转矩分配方法。在双电机驱动方面,MUTOH 等[17-18]研究了采用前后多类型电机驱动的微型电动汽车的扭矩分配策略,分别在恒扭矩和弱磁区域模拟了电机的失调模型,该策略改善了两电机转速不平衡时电机的效率。CHEN 等[19-20]提出一种转速转矩耦合双驱动系统,以百公里加速时间和续航里程为目标,利用量子遗传算法对动力系统参数进行了优化。但是这两种结构仍不能解决电机在电动汽车全工况下的高效运行要求。

本文搭建一种四轮电动汽车的电动驱动系统,将一个高速永磁电机和两个低速轮毂永磁同步电机结合起来为整车提供牵引力。通过考虑两种具有不同能量效率和力学特性的永磁电机的交错特性,实现驱动系统的最优效率运行。在建立整车效率模型的基础上,分析多电机驱动系统特性,提出一种多驱动电机的离线瞬时效率最大化的转矩分配方法。并利用电机台架测试电机效率构建仿真环境,最后通过硬件在环仿真实验,验证所提方法的有效性。

1 多电机驱动系统模型

图 1 所示为本文所提出的多电机式电力驱动系统的配置,前轮由高速永磁同步电机驱动,该电机与配套的减速箱变速器和差速器相结合,后轮由两个互相独立的轮毂电机驱动。动力总成设计主要有两个目的:①通过匹配不同高效区的永磁同步电机,而不使用复杂的机械动力传输,以提高汽车行驶速度范围内的驱动系统效率[21]。②通过独立控制后轮轮毂电机来提高车辆横摆稳定控制性能,使其在横摆运动时进行微差调节使得转向更加稳定。高速永磁电机和低速永磁轮毂电机的额定功率分别为 40、18 kW,并且高速电机配备有总减速比为 1∶3.2 的简单变速器与差速器结合的驱动桥。

1.1 永磁同步电机模型

对纯电动汽车加速性能影响较大的主要是电机输出转矩,前后两台电机的功率不同,造成其额定转矩也有所差异。

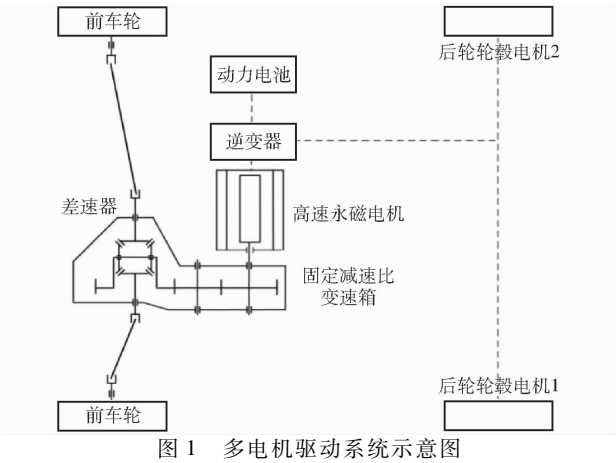

图 1 多电机驱动系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-motor drive system

对高速永磁同步电机而言,在旋转 dq 坐标系中的电机模型为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} = \dfrac{u_d}{L} + P_p\omega_m i_q - \dfrac{R_s}{L}i_d \\ \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} = \dfrac{u_q}{L} + P_p\omega_m i_d - \dfrac{R_s}{L}i_q - \dfrac{\psi_m}{L}P_p\omega_m \end{cases} \tag{1}$$

式中 u_d、u_q——永磁同步电机定子电压矢量在旋转坐标轴上的直交轴分量

i_d、i_q——永磁同步电机定子电流在旋转坐标系上的直交轴分量

R_s——电机定子绕组的等效电阻

L——定子绕阻的电感

ψ_m——转子的永磁磁链

P_p——电机转子极对数

ω_m——电机转子的机械转速,其值与极对数的乘积为电机转子的电磁转速 ω_e

考虑到控制过程中传感器离散取样特性(图 2),式(1)经过欧拉变换可得永磁同步电机的电流离散模型在 k 时刻表达式为

$$i_q^{k+1} = i_q^k + \frac{T_s}{L}(u_q^k - R_s i_q^k - \omega_e^k\psi_m - L\omega_e^k i_d^k) \tag{2}$$

式中 T_s——离散采样周期

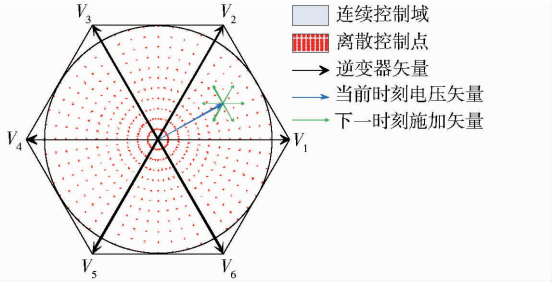

图 2 永磁电机电压矢量控制图

Fig. 2 Voltage vector control diagram of PMSM

基于永磁电机的转矩磁链预测方程,可由预测电流推导出($k+1$)时刻的转矩和磁链,即

$$\begin{cases}\psi_{s|N}^{k+1}=T_sU_N^k+\psi_s^k-T_si_s^kR_s\\ T_{m|N}^{k+1}=1.5P_p\psi_m i_{s|N}^{k+1}\end{cases}\tag{3}$$

式中　T_m——电机电磁转矩

ψ_s——电机转子磁链

下标 $N=1,2,\cdots,6$ 代表逆变器的 6 种开关状态，不同的开关矢量选择会产生不同的电流，所以选择合适的开关矢量是保证高性能控制的关键。

由式(2)、(3)可知通过当前时刻的电机状态测量值，可以计算得下一时刻的电流预测值，并且下一时刻的定子磁链和转矩都可通过预测电流计算得到。

1.2　整车纵向动力学模型

图 3 为坡度为 θ，以一定速度行驶的车辆的受力图。根据图中车辆的受力关系可以得到简化的汽车纵向动力学方程

$$M\dot{V}_x=F_{xf}+F_{xr}-R_f-R_r-F_{\text{aero}}-Mg\sin\theta\tag{4}$$

其中
$$F_{\text{aero}}=0.5\rho_dC_dA_F(V_x+V_{\text{wind}})^2\tag{5}$$

式中　F_{xf}、F_{xr}——作用在前、后轮地面切向反作用力

R_f、R_r——前、后轮的滚动阻力

F_{aero}——行驶气动阻力

M——整车质量　　V_x——车辆速度

g——重力加速度

θ——地面坡度　　ρ_d——空气密度

C_d——气动阻力系数

A_F——车辆的等效迎风面积

V_{wind}——与车辆速度 V_x 反向的风速，m/s

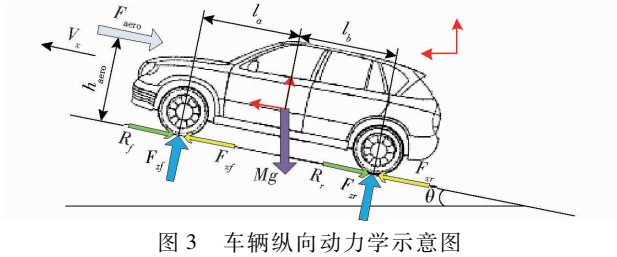

图 3　车辆纵向动力学示意图

Fig. 3　Sketch of vehicle longitudinal dynamics

轮子的滚动阻力 R_r 和 R_f 与轮胎的法向作用力成正比，即

$$\begin{cases}R_f=C_rF_{zf}\\ R_r=C_rF_{zr}\end{cases}\tag{6}$$

其中

$$\begin{cases}F_{zf}=\dfrac{-F_{\text{aero}}h_{\text{aero}}+M\dot{V}_xh_g-Mgh_g\sin\theta+Ml_b\cos\theta}{l_a+l_b}\\ F_{zr}=\dfrac{F_{\text{aero}}h_{\text{aero}}-M\dot{V}_xh_g+Mgh_g\sin\theta+Ml_a\cos\theta}{l_a+l_b}\end{cases}\tag{7}$$

式中　F_{zf}、F_{zr}——前、后轮上的地面法向反作用力

h_{aero}——气动阻力等效作用力距地面高度

h_g——汽车质心高度

C_r——轮胎摩擦因数

l_a、l_b——前后车轴在纵向到质心距离

前后轮的地面切向反作用力可由法向切向力、轮胎地面附着系数以及车轮有效滚动半径表述，即

$$\begin{cases}F_{xf}=\dfrac{T_f}{R_0}\leqslant F_{zf}\varphi\\ F_{xr}=\dfrac{T_r}{R_0}\leqslant F_{zr}\varphi\end{cases}\tag{8}$$

式中　φ——地面附着系数

T_f——前轮驱动力矩

T_r——后轮驱动力矩

R_0——车轮有效滚动半径

故单车轮的动力学方程为

$$I_w\dot{\omega}_{f,r}=T_{f,r}-T_b-R_0F_{xf,xr}-M_R-\zeta\omega_{f,r}\tag{9}$$

式中　I_w——轮胎的等效转动惯量

ζ——阻力系数

M_R——传动系统转动阻力矩

T_b——车轮的制动力矩

由于前轮是通过一个整合了减速器和差速器的驱动桥来向车轮传输动力，所以计算前轮驱动力时，需考虑驱动桥减速比。而后轮由轮毂电机独立驱动，所以前后轮驱动力与电机之间的关系为

$$\begin{cases}T_l=T_r\approx\dfrac{1}{2}F_{xr}R_0\\ T_h=\dfrac{T_f}{i_0}\approx\dfrac{F_{xf}R_0}{i_0}\end{cases}\tag{10}$$

式中　T_l——后轮低速轮毂电机的牵引力矩

T_h——前轮高速电机的牵引力矩

i_0——前车轴驱动桥总减速比

2　多电机驱动系统控制策略

本文提出的多电机驱动系统装备有高低速两种永磁电机，而两种电机在速度-转矩运行点上具有不同的功率特性和能量效率。为了实现多电机电力驱动系统比传统的单电机牵引系统更好的动力加速性以及经济性，需要一种能够利用高低速永磁电机的互补转矩高效区间的驱动力分配策略。本研究通过预测控制模型提出最佳的扭矩分配策略。如图 4 所示，通过获取实时车速及加速踏板开度，预测控制模型能够计算出使成本最小的控制量，从而创建一个有效的扭矩分配策略，保证系统高效率运行。作为对现有纯电动汽车驱动系统的优化，本文还将对单电机驱动系统进行仿真，并比较对比结果。

2.1　整车效率模型

能量最优控制的目标是以最小的电机总功耗来

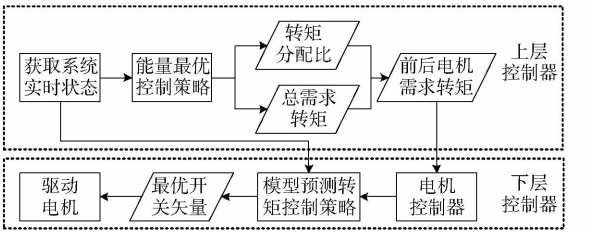

图 4 控制系统结构图

Fig. 4 Diagram of control system

满足不同速度下纯电动汽车的牵引力需求。由于多电机驱动系统由一个高速永磁电机和两个低速轮毂电机组成,因此高低速永磁电机之间的转矩输出分配决定了驱动系统的总功耗。所以,优化整车驱动系统效率可以表述为

$$u^* = \text{argmin}(P_{\text{all}}) = \text{argmin}(P_f + 2P_r) \quad (11)$$

式中 u^*——最佳功率分配命令

P_{all}——驱动系统消耗的总瞬时功率

P_f、P_r——高、低速永磁电机所消耗的瞬时功率

考虑到模型的简化,将 2 个后轮轮毂电机的驱动和受力设定为相同,所以假设 2 个电机的功耗也相同。对电机而言,其瞬时消耗功率表述为

$$\begin{cases} P_f = P_f(\omega_f, T_f) = \dfrac{\omega_f T_f}{\eta_f(\omega_f, T_f)} \\ P_r = P_r(\omega_r, T_r) = \dfrac{\omega_r T_r}{\eta_r(\omega_r, T_r)} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\eta_f(\omega_f, T_f)$——前轮永磁电机在特定转速-转矩工作点时的效率

$\eta_r(\omega_r, T_r)$——后轮永磁电机在特定转速-转矩工作点时的效率

由于永磁电机的损耗效率模型具有很强的非线性以及参数干扰,很难找到一个准确的表达式来表示电机的效率。本文通过台架实验将高低速电机的不同转速-转矩和插值结果制作成相对应的效率图(MAP 图),如图 5 所示。

图 5 所示 MAP 图分别为前置高速永磁电机和后置低速永磁电机牵引模块的效率。由图 5 可得,高低速永磁电机的功率和效率互补特性。首先,前轮高速电机可以提供比 2 个后轮轮毂电机高得多的转速。其次,与轮毂电机相比,在高转速区域时,高速电机具有相对较高的效率。与之相对应的,后置轮毂电机在较低速度和较高的牵引力工作点(如牵引力大于 1 000 N 时)可以达到比高速电机更高的效率。再次,在较低的牵引力区域(如牵引力小于 750 N)轮毂电机的转矩脉动更是小于高速电机。因此,在加速或中途超速时,需要较高的牵引力,后置轮毂电机提供主要的牵引力。在水平路面上,转速较高且总牵引力需求不大,使用高速电机提供的驱动力可以更高效。

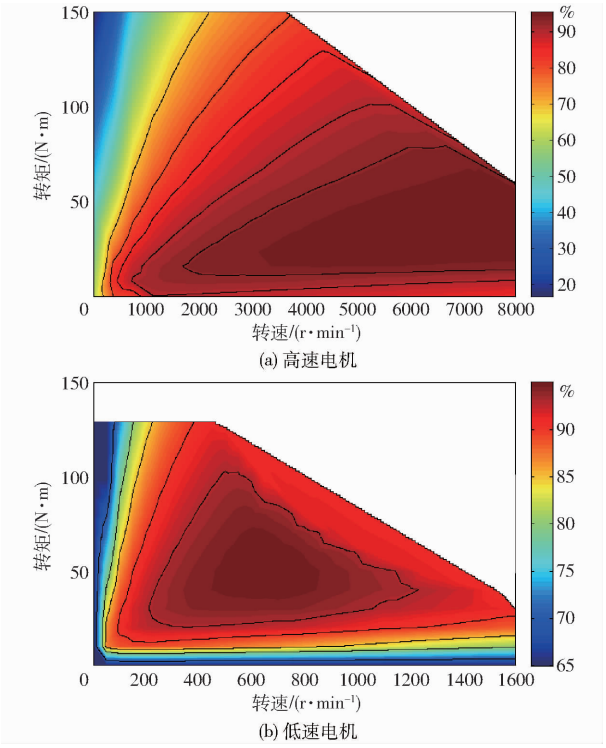

图 5 电机驱动模块效率

Fig. 5 MAP diagrams of motor drive system

2.2 驱动系统效率最优的转矩分配策略

驱动系统最优效率控制的目标是提供满足驾驶者驾驶需求的驱动力和 3 个电机驱动模块的最小功率消耗。因此,为了使计算更直接,假设车轮作纯滚动。将电机效率图从单个电机的转速-转矩曲线转换为整车的纵向速度-驱动力曲线

$$\begin{cases} \omega_h = \omega_f i_0 \approx \dfrac{V_x i_0}{R_0} \\ T_h = \dfrac{T_f}{i_0} \approx \dfrac{F_{xf} R_0}{i_0} \\ \omega_l = \omega_r \approx \dfrac{V_x}{R_0} \\ T_l = T_r \approx \dfrac{1}{2} F_{xr} R_0 \end{cases} \quad (13)$$

利用前面提到的高低速永磁电机的效率 MAP 图,设定 α 和 $(1-\alpha)$ 分别表示前轮高速电机和后轮轮毂电机的牵引力分配比,可得

$$\begin{cases} F_x = F_{xf} + F_{xr} \\ F_{xf} = \alpha F_x \\ F_{xr} = (1-\alpha) F_x \end{cases} \quad (14)$$

总瞬时功率消耗 P_{all} 可以表示为

$$P_{\text{all}} = P_f + 2P_r = \frac{\omega_f T_f}{\eta_f(\omega_f, T_f)} + \frac{2\omega_r T_r}{\eta_r(\omega_r, T_r)} = \frac{F_{xf} V_x}{\eta_f(V_x, F_{xf})} + \frac{F_{xr} V_x}{\eta_r(V_x, F_{xr})} = F_x V_x \left(\frac{\alpha}{\eta_f} + \frac{1-\alpha}{\eta_r} \right) = P_{\text{all}}(F_x, V_x, \alpha) \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} F_{xf} = \alpha F_x \leqslant T_{f,\max} \dfrac{V_x i_0}{R_0} \dfrac{i_0}{R_0} \\ F_{xr} = (1-\alpha) F_x \leqslant T_{r,\max} \dfrac{V_x}{R_0} \dfrac{2}{R_0} \\ 0 \leqslant V_x \leqslant V_{\max} \end{cases} \tag{16}$$

式(15)可以用来表示多电机驱动系统的瞬时能量消耗,为汽车动力输出的多电机驱动系统所需的总电力输入,即 P_{all}是由总牵引力 F_x、车速 V_x以及牵引力分配比 α 确定。因此,多电机驱动系统的效率可通过每个操作点(F_x,V_x)选择合适的 α 来优化,即

$$\alpha^* = \operatorname{argmin}\{P_{\text{all}}(F_x, V_x, \alpha) \mid 0 \leqslant \alpha \leqslant 1\} \tag{17}$$

式中　α^*——高速永磁电机的最佳牵引力分配比

通过求解以上最优化问题,可以计算在不同车速以及需求转矩的工况下高低速电机的最佳牵引力分配比 α。图 6 所示为高低速永磁电机对不同工况下的最佳牵引力分配比。总体上来说,如总牵引力需求小而速度要求高,则该牵引力应该分配给高速电机。相反,在加速起步等工况下则后置轮毂电机提供主要牵引力。

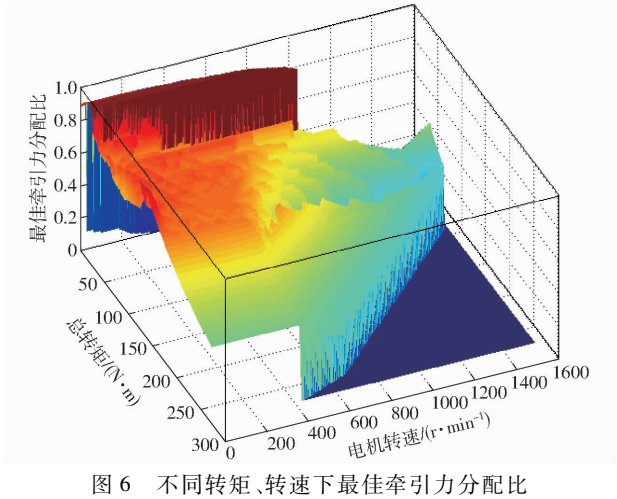

图 6　不同转矩、转速下最佳牵引力分配比

Fig. 6　Optimal traction force distribution ratio at different speeds and total torques

3　实验验证

为了验证所提出的多电机驱动系统和预测转矩分配方法的有效性,利用电机台架和整车仿真模型构建了硬件在环仿真测试系统,并将 Simulink 中的车辆动力学模型与电池管理模型(BMS)联合起来进行能量管理研究。为了证明通过多电机驱动系统相比于传统单电机驱动系统的能量效率提升,需对试验车上的高速永磁电机以及两个轮毂电机进行台架数据采集,具体方法参照 GB/T 18488.2—2015《电动汽车用驱动电机系统　第 2 部分:试验方法》。首先使用实验用车的参数来校准用于硬件在环实验的整车仿真模型的参数,其主要参数见表 1,并且对仿真的电机模型和真实电机模型的 MAP 效率进行校准。其次,将校准后的整车模型和电机效率进一步用于硬件在环测试。最后通过实验对比两种系统结构下的系统效率。

表 1　实验车辆主要参数

Tab. 1　Main parameters of vehicle

参数	数值
整车质量/kg	900
轴距长度/m	2.2
车轮半径/m	0.275
驱动桥减速比	4.75

图 7 所示为典型的纯电动汽车系统 HiL 测试平台,包括测试机柜和仿真控制器及仿真电机板卡,可以根据车辆状态仿真电机的运行状态和能量损耗。图 8 和图 9 分别为轮毂电机和高速永磁电机的实验台架,分别用磁粉制动器和测功计来给电机施加动态负载,并记录数据计算电机损耗。



图 7　Hil 仿真机柜

Fig. 7　Hil simulation cabinet

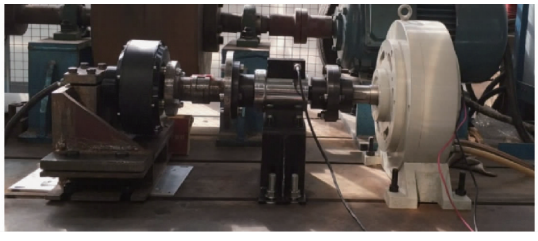

图 8　轮毂电机效率测试台架

Fig. 8　Test bench of in-wheel motor



图 9　高速永磁电机效率测试台架

Fig. 9　Test bench of high speed PMSM

在汽车经济性研究中,一般采用常用的标准循环工况 UDDS 以及 NEDC101_5 对其经济性能进行

仿真分析。其中,典型的城市循环工况 UDDS 是由美国可再生能源实验室制定适用于城市驾驶的循环工况。如图 10 所示,UDDS 循环总持续时间 1 369 s,最大时速为 56 km/h,工况里程为 11.99 km,其工况的平均车速为 21.2 km/h。

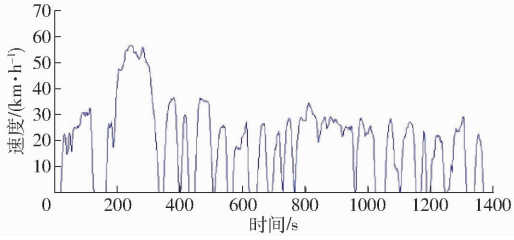

图 10 UDDS 工况运转循环

Fig. 10 Operation cycle of UDDS

采用目前较为成熟的单电机动力系统独立驱动时,其转速-转矩工作点如图 11 所示,由图中工作点的分布来看,电机工作范围较为宽广,主要工作点不能集中在高效区间。同时通过计算电机在整个循环过程中工作点效率可知,其平均值为 84%。图 12所示为在 80% 剩余电量的情况下进行 5 次 UDDS 循环的 SOC 变化情况,在多循环后 SOC 由 80% 下降到 48.07%。

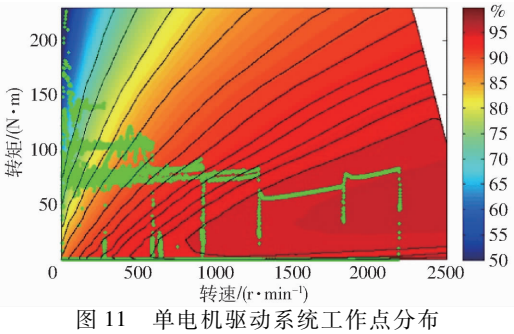

图 11 单电机驱动系统工作点分布

Fig. 11 Distribution of single motor operation points

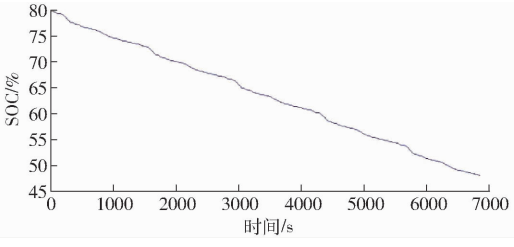

图 12 单电机驱动系统多循环剩余电量情况

Fig. 12 SOC of single motor drive system

采用多电机动力系统进行驱动时,根据工况车速以及需求扭矩,基于多电机转矩转速分配规则,自动匹配前后电机的转矩,在满足总驱动力矩的情况下保证了较高的整车总效率。其转速-转矩工作点情况如图 13 所示。图 14 给出了单电机系统与多电机系统的剩余电量对比,多电机系统在 5 次循环内从 80% 下降到 54.62%。

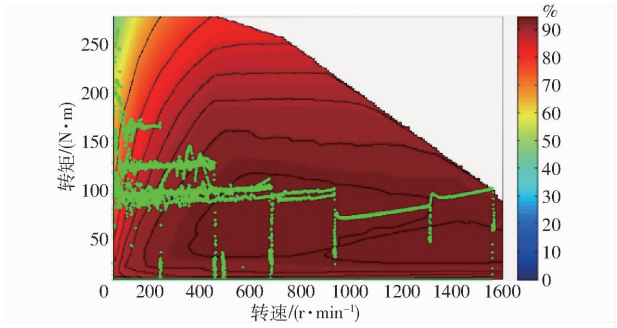

图 13 多电机驱动系统工作点分布

Fig. 13 Distribution of multi-motors operation points

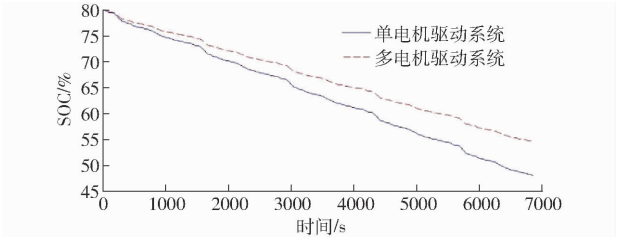

图 14 多电机驱动系统多循环剩余电量情况

Fig. 14 SOC of multi-motors drive system

实验结果表明,多电机系统相比于单电机系统而言,其效率图的高效区覆盖更广。利用后置轮毂电机的在低速高转矩工况下的高性能特性,弥补了高速电机在低速情况下效率较低的问题,使得整车在启动加速等工况下的效率有所提升。仿真分析可知,采用多电机驱动系统电动汽车可提高电动汽车能量效率,提高续航里程。基于电机在不同工况点下的运行效率通过转矩分配,多电机驱动的方式能保证在汽车各工况下,多电机效率总体最优,充分体现了多电机驱动系统方案的节能潜力。

4 结论

(1)提出了一种适用于纯电动汽车的多电机驱动系统,采用了基于预测模型的转矩控制方法,使得电机的转矩响应更快更精准,为多电机转矩分配策略提供了基础。

(2)多电机驱动系统能够有效匹配不同电机的高效区,使高速电机和低速电机的高效区能覆盖电动汽车的宽转速范围,并提升整车效率。

(3)针对城市工况的工作点聚集区域进行效率优化可针对性的提高固定用途性能的汽车的效率。

参 考 文 献

1 WILLAMSON S, EMADI A, RAJASHEKARA K. Comprehensive efficiency modeling of electric traction motor drives for hybrid electric vehicle propulsion applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007,56(4): 1561 - 1572.

2 李聪波,李月,肖卫洪,等. 面向能耗的纯电动汽车双电机动力系统参数优化匹配[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1620 - 1628.
LI Congbo, LI Yue, XIAO Weihong, et al. Parameters optimization of dual-motor EV powertrain for energy consumption[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2017,23(8):1620 - 1628. (in Chinese)

3 陈黎卿,苗伟,许泽镇,等. 四驱汽车电控分动器性能预测与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(1):358 - 365. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180145&flag=1&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.045.
CHEN Liqing, MIAO Wei, XU Zezhen, et al. Performance prediction and test of electric drive transfer for 4WD vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):358 - 365. (in Chinese)

4 COSOVIC M, SMAKA S. Design of initial topology of interior permanent magnet synchronous machine for hybrid electric vehicle [C]// Electric Machines & Drives Conference, 2016: 1658 - 1664.

5 张露,张忠富,王国业,等. 基于电磁机械耦合再生制动系统的电动汽车稳定性控制[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(1): 309 - 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170141&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.041.
ZHANG Lu, ZHANG Zhongfu, WANG Guoye, et al. Electric vehicles stability control based on electromagnetic—mechanical coupled regenerative braking system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1): 309 - 316. (in Chinese)

6 陈舒燕,朱靖,余朝刚. 具有能量回馈的纯电动车驱动控制系统[J]. 轻工机械, 2015,33(3): 54 - 57, 61.
CHEN Shuyan, ZHU Jing, YU Chaogang. Electric vehicle drive control system with energy regeneration[J]. Light Industry Machinery,2015,33(3): 54 - 57, 61. (in Chinese)

7 BOUARFA A, FADEL M. Optimal predictive torque control of two PMSM supplied in parallel on a single inverter[J]. IFAC Papers on Line, 2015,48(30): 84 - 89.

8 CHOU F C, LI K, JENG L W. Model predictive control based optimal torque distribution strategy for a compound electric vehicle [C]// Automatic Control Conference, 2014:417 - 422.

9 WANG Z, YE H, WANG Y. Dynamic control of motor torque during the shifting process in PMSM - AMT system[J]. WIT Transactions on Modelling & Simulation, 2014, 60(4):1125 - 1132.

10 毕聪. 新型纯电动汽车双电机动力系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2014.

11 孟庆华, 许进,王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(8): 33 - 37, 20. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130806&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.006.
MENG Qinghua, XU Jin, WANG Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8): 33 - 37, 20. (in Chinese)

12 ZHANG H, ZHAO W. Decoupling control of steering and driving system for in-wheel-motor-drive electric vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 101: 389 - 404.

13 ZHU B, ZHANG N, WALKER P. Two motor two speedpower-train system research of pure electric vehicle[C]. SAE Paper 2013 - 01 - 1480,2013.

14 韩清振,何仁. 车用永磁同步电机稳定性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(11): 363 - 368. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161149&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.049.
HAN Qingzhen, HE Ren. Stability analysis of permanent magnet synchronous motor in vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11): 363 - 368. (in Chinese)

15 朱元,武四辈,吴志红,等. 电动汽车用内置式永磁同步电动机精确转矩控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 8 - 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140102&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.002.
ZHU Yuan, WU Sibei, WU Zhihong, et al. Precise torque control method of IPMSM in vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014, 45(1):8 - 13. (in Chinese)

16 WANG R, CHEN Y, FENG D, et al. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors[J]. Power Sources, 2011,196(8):3962 - 3971.

17 MUTOH N, HORIGOME T, TAKITA K. Driving characteristics of an electric vehicle system with independently driven front and rear wheels[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006,53(3): 813.

18 MUTOH N, NAKANO Y. Dynamics of front-and-rear-wheel-independent-drive-type electric vehicles at the time of failure[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,59(3): 1488 - 1499.

19 CHEN Y, WANG J. Energy-efficient control allocation with applications on planar motion control of electric ground vehicles[C]// Proceedings of the American Control Conference, 2011: 2719 - 2724.

20 CHEN Y, WANG J. Fast and global optimal energy-efficient control allocation with applications to over-actuated electric ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011,20(5):1202 - 1211.

21 MYNAR Z, VESELY L, VACLAVEK P. PMSM model predictive control with field-weakening implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(8): 5156 - 5166.