

基于效率优化的四轮独立驱动电动车转矩分配

谷 成^{1,2}, 刘 浩^{1,2}, 陈辛波^{1,2}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 对某款四轮独立驱动电动汽车转矩分配控制策略对车辆经济性影响进行研究, 基于理论与试验数据, 建立关键零部件数学模型及整车能耗的 MATLAB/Simulink 仿真计算模型. 以降低系统能耗为目标, 提出一种基于驱动系统效率优化的转矩分配控制策略, 得到转矩分配系数 MAP 图, 从而避免了在线计算的时效性问题. 不同行驶工况下的仿真结果表明, 与固定比例的转矩分配方法相比, 基于转矩分配优化算法的系统能耗可降低约 5%.

关键词: 四轮独立驱动; 转矩分配; 能耗; 效率

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

Torque Distribution Based on Efficiency Optimization of Four-wheel Independent Drive Electric Vehicle

GU Cheng^{1,2}, LIU Hao^{1,2}, CHEN Xinbo^{1,2}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effect of torque distribution control algorithm on the vehicle economy of a four-wheel-drive electric vehicle was investigated. Mathematic models of key components were established based on theory and test data, and a simulation model of vehicle energy consumption was set up with MATLAB/Simulink software. To reduce the system energy consumption, a torque distribution control algorithm based on the system efficiency optimization was proposed. A torque-distribution-coefficient map was obtained, which avoided the timeliness problem of on-line computation. Compared with the energy consumption of fixed coefficient algorithm, simulation results illustrate that the overall energy consumptions of optimal torque distribution decrease approximately by 5% in different driving cycles.

Key words: four-wheel independent drive; torque distribution; energy consumption; efficiency

发展节能环保安全的电动汽车是解决未来能源、环境问题及实现主动安全的最有效措施之一, 在世界范围内得到高度重视. 然而, 目前纯电动汽车续航里程短成为影响其发展的瓶颈问题. 为降低能量消耗率, 除了减小机械摩擦、减小电池内阻和采用轻量化设计外, 利用驱/传动系统的优化匹配提高效率以及通过再生制动回收制动能量是值得深入研究的措施^[1]. 相较于集中式驱动汽车, 分布式驱动电动汽车省却了变速器等传动装置, 具有驱/传动链短、传动高效、结构紧凑等突出优点, 在多电机执行机构间, 通过合理的转矩分配来提高系统效率, 实现能量流最优化, 对降低电动汽车行驶能耗, 提高续航里程具有重要意义.

目前, 在混合动力汽车中应用控制转矩分配的方法来降低系统能耗的研究较多, 通过确定发动机与电机间的转矩分配来提高车辆的等效燃油经济性, 控制方法包括逻辑门限以及模糊控制等^[2-7], 而关于分布式驱动电动汽车的研究则相对较少^[8-10]. 本文针对一种分布式驱动电动汽车拓扑结构, 根据轮毂电机、轮边电机和减速器的效率场分布特性, 提出前后轮间转矩分配的优化控制策略, 以提高驱/传动系统综合效率, 从而实现降低行驶能耗, 增加续航里程的目的.

1 系统构成

图 1 所示为某高性能分布式驱动电动汽车的系统构成. 前轮采用轮毂电机直接驱动, 结构紧凑, 便于布置转向系统; 后轮由高速电机和定轴齿轮式轮边减速器组成的轮边减速驱/传动系统驱动, 可发挥高速电机高效、高功率密度和齿轮减速器高转矩密度的综合优势, 同时, 为有效抑制簧下质量负效应, 该轮边减速驱/传动系统与悬架摆臂一体化设计^[11].

收稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA110701); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711202)

第一作者: 谷 成(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车传动与控制. E-mail: 12gucheng@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈辛波(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车传动与控制. E-mail: austin_1@aliyun.com

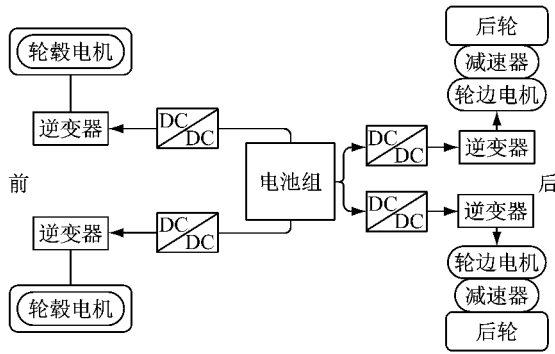


图 1 系统构成

Fig.1 System architecture

2 模型建立

根据系统结构,建立控制系统模型,将目标车速与实际车速的偏差值 Δv 作为输入量,驾驶员模型实时计算输出需求转矩,包括驱动转矩与制动转矩,经过转矩分配和整车动力学模型得到实际车速,并与目标车速比较形成闭环反馈控制,如图 2 所示。

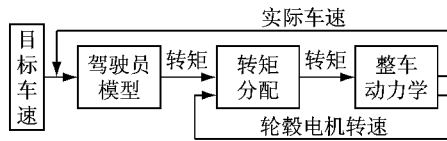


图 2 控制系统模型结构

Fig.2 Model structure of control system

2.1 驾驶员模型

驾驶员模型将目标车速与实际车速偏差的比例、积分和微分通过线性组合来控制整车需求驱动转矩和制动转矩,模拟驾驶员踩油门踏板和制动踏板的过程,其控制转矩表达式如式(1)所示。

$$T = k_p e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: k_p 是比例系数; T_1 是积分时间常数; T_D 是微分常数; $e(t)$ 为目标车速与实际车速的偏差。

2.2 转矩分配模型

根据具体的控制策略,转矩分配模型将控制系统的需求转矩分配到前轮轮毂电机和后轮轮边电机,包括驱动转矩分配和制动转矩分配。控制策略不同,其前后轮转矩分配也有所不同,目前,较为常见的分配方法是依据前后轮载荷比来按照固定分配比例的方法进行分配,该控制策略简单且易实现。需要指出的是,不同的转矩分配控制策略均应在满足整车动力性要求的基础上对上述整车需求转矩在前后轮间进行分配,不影响整车需求转矩的大小,即不影

响整车动力性要求。

2.3 整车动力学模型

分布式驱动电动汽车在行驶过程中,满足汽车行驶动力学方程

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (2)$$

即

$$2 \frac{T_{tq1} + T_{tq2} \cdot k \cdot \eta_{red}}{r} = Wf + \frac{C_D A u_a^2}{21.15} + Gi + \delta m \frac{du}{dt}$$

式中: F_t 是驱动力; F_f 是滚动阻力; F_w 是空气阻力; F_i 是坡度阻力; F_j 是加速阻力; T_{tq1} 为轮毂电机输出转矩; T_{tq2} 是轮边电机输出转矩; k 是轮边减速器传动比; η_{red} 是减速器效率; r 是车轮半径; W 是车轮载荷; f 是滚动阻力系数; C_D 是空气阻力系数; A 是迎风面积; u_a 是汽车行驶速度; i 是爬坡度; δ 是汽车旋转质量换算系数。

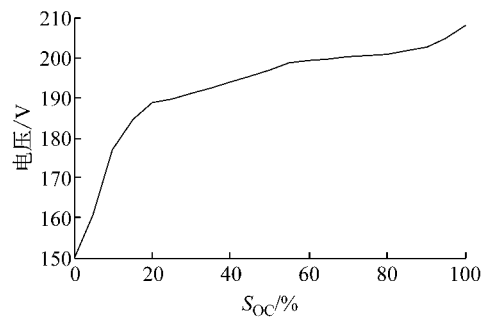
2.4 电池模型

电池电量状态 S_{oc} 计算式如下:

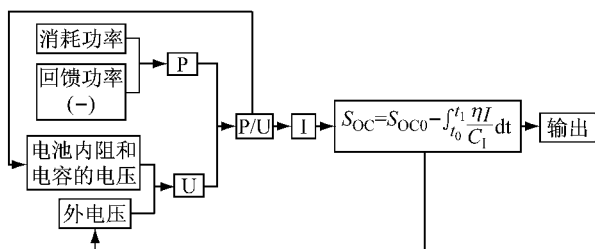
$$S_{oc} = S_{oc0} - \int_{t_0}^{t_1} \frac{\eta I}{C_I} dt \quad (3)$$

式中: S_{oc0} 是电池初始电量; η 是电池充放电效率; C_I 为串联电池电量。

电池充放电效率与充放电电流,电池电量以及温度等有关,本模型旨在比较不同分配方法下的节能效果,不深入探讨充放电效率问题,设 $\eta=1$ 。电池组开路电压与 S_{oc} 的对应关系如图 3 所示。

图 3 开路电压与 S_{oc} 的关系Fig.3 Variation of open-circuit voltage and S_{oc}

设 P 为电动汽车输出功率(包括消耗功率与回馈功率,回馈功率设为负),根据图 3 所示,由初始 S_{oc0} 查表得到开路电压 U_0 ,连同电池内阻与电容的内电压得到总电压 U ,根据 $I = P/U$,得到充放电电流,由 S_{oc} 计算公式经过积分产生下一时刻的 S_{oc0} ,经过不断迭代,得到工况下每一时刻所对应的电池电量状态,其迭代过程如图 4 所示。

图 4 电池 S_{OC} 循环迭代计算Fig.4 Iterative computations of S_{OC}

2.5 驱/传动系统能耗计算模型

在行驶工况下,系统耗能如下:

$$E = \int_{t=0}^{t_f} \left(\frac{2T_1 \cdot n}{9550\eta_{m1}} + \frac{2T_2 \cdot k \cdot n}{9550\eta_{m2} \cdot \eta_{red}} \right) dt \quad (4)$$

式中: T_1 是轮毂电机输出转矩; T_2 是轮边电机输出转矩; k 是减速比; n 是轮毂电机转速; η_{m1} 是轮毂电机效率; η_{m2} 是轮边电机效率; η_{red} 是减速器效率。其中,轮毂电机、轮边电机和减速器效率随转速转矩动态变化,具有非线性特性。相对于理论计算,台架试验结果更准确,因此,建立如图 5 所示的轮毂电机、轮边电机以及减速器效率测试台,分别测定其不同转速、转矩下的驱动与制动效率 MAP 图,如图 6 所示。



图 5 效率测试台架

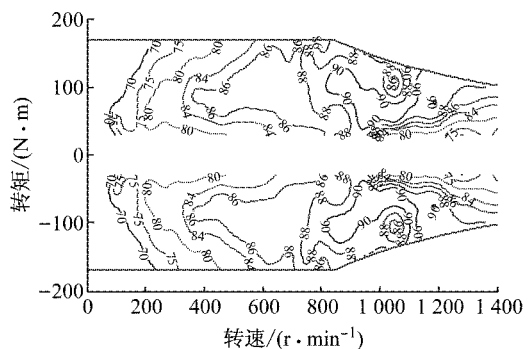
Fig.5 Efficiency test bench

3 模型分析与实验验证

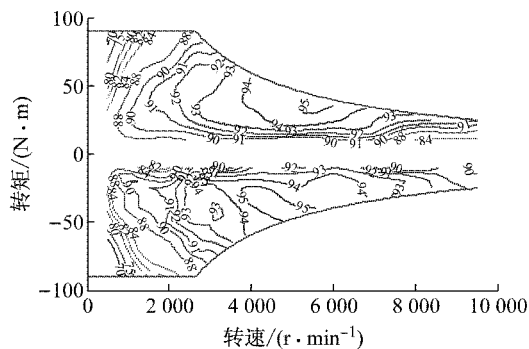
根据上述所建立的分布式电动汽车的控制模型,包括驾驶员模型、转矩分配模型和整车动力学模型等,利用 MATLAB/Simulink 进行固定比例分配转矩的控制策略仿真,模型参数如表 1 所示,并进行四轮转鼓试验台试验,如图 7 所示。

在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (工况 I) 和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (工况 II) 两种车速下,按照前后轮驱动转矩 3:5 的固定比例分配,进行百公里能耗试验,并与仿真结果比较,如表 2 所示。

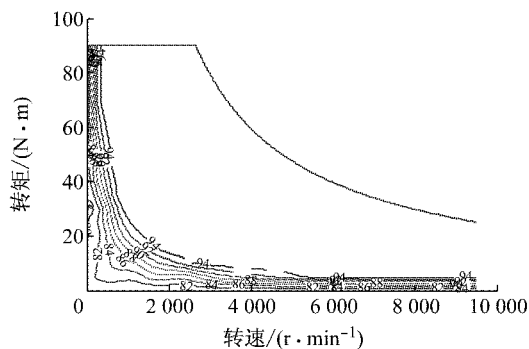
对比两种车速下百公里能耗的仿真与试验结



a 轮毂电机效率



b 轮边电机效率



c 减速器效率

图 6 轮毂电机,轮边电机和减速器效率 MAP 图

Fig.6 Efficiency maps of hub-motor, wheel-side motor and reducer

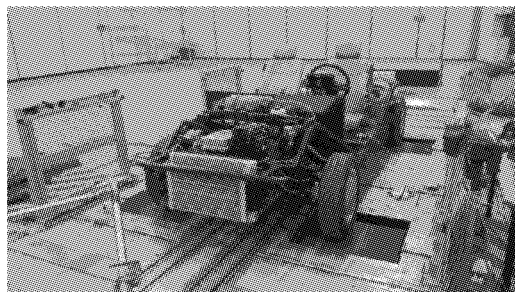


图 7 整车转鼓试验

Fig.7 Drum test of the whole vehicle

果,考虑到车辆辅助电气系统的能耗、电池组充放电效率和控制效率等因素,可以认为,仿真结果与试验结果基本吻合,仿真模型精度较高,能够反映实车情况。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Simulation model parameters

整车					前轮轮毂电机					后轮轮边电机					减速器	蓄电池			
整车质量/ kg	迎风面积/ m ²	风阻系数	车轮半径/ m	滚动阻力系数	最大转速/ (r·min ⁻¹)	额定转速/ (r·min ⁻¹)	最大转矩/ (N·m)	最大功率/ kW	额定功率/ kW	最大转速/ (r·min ⁻¹)	额定转速/ (r·min ⁻¹)	最大转矩/ (N·m)	最大功率/ kW	额定功率/ kW	传动比	容量/ (A·h)	电压/ V	可用 S _{oc} 范围	电流 范围/ A
1 400	2.11	0.337	0.297	0.015	1 400	800	170	15	5	9 500	4 000	90	25	15	6.6	40	240	0.1~0.9	-120~400

表 2 百公里耗能仿真与试验结果对比

Tab.2 Comparison of simulation and test results of 100 km energy consumptions

工况	能耗/(kW·h)	
	仿真结果	试验结果
工况 I	9.50	10.02
工况 II	11.85	12.40

4 基于效率的转矩分配优化

对于非匀速行驶工况,由图 6 驱/传动系统关键零部件效率 MAP 图可知,轮毂电机、轮边电机和减速器的效率随转速和转矩呈非线性动态变化,轮毂电机在低速大转矩下效率很低,而减速器在接近空载时,由于输入转矩小,而搅油损耗等基本不变,导致其在低转矩下效率很低.采用固定比例分配转矩的方法没有考虑上述效率变化的因素,使得电机与减速器可能均工作于低效区,影响驱/传动系统的综合效率.针对上述问题,本文提出一种基于驱/传动系统效率场分布的转矩分配优化控制策略,即根据前后轮驱动系统效率场分布的差异进行转矩分配,以提高系统综合效率,实现电动汽车的节能行驶.

4.1 驱动转矩分配优化

假设汽车在直线良好路面行驶,车轮转速均相同,为方便讨论,以下所建立的前后轮转矩分配模型将基于同侧 1/2 车辆模型.

设 x_0 为前轮转矩分配系数, T_{req} 为 1/2 车辆模型的需求转矩; T_{req1} 为分配到前轮的需求转矩; T_{req2} 为分配到后轮的需求转矩. 即

$$x_0 = \frac{T_{\text{req1}}}{T_{\text{req}}} \quad (5)$$

那么, $T_{\text{req2}} = (1 - x_0) T_{\text{req}}$.

在一定车速下,前轮轮毂电机转速为 n ,在该转速下峰值驱动转矩为 T_{n1} ,为保证电机工作安全,前后轮电机输出转矩分别满足关系

$$\begin{cases} T_{\text{out1}} = \min(T_{\text{req1}}, T_{n1}) \\ T_{\text{out2}} = \min(T_{\text{req2}}/k, T_{kn2}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_{out1} 是轮毂电机输出转矩; T_{n1} 是轮毂电

机在转速为 n 时对应的峰值转矩; T_{out2} 是轮边电机输出转矩; T_{kn2} 是轮边电机在转速为 kn 时对应的峰值转矩.

至此,根据分布式电动汽车驱/传动系统拓扑结构建立驱动功率非线性优化模型

$$\min P = \frac{T_{\text{out1}} n}{9550 \eta_{m1}} + \frac{T_{\text{out2}} kn}{9550 \eta_{m2} \cdot \eta_{\text{red}}} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} T_{\text{req1}} = x_0 T_{\text{req}} \\ T_{\text{req2}} = (1 - x_0) T_{\text{req}} \\ T_{\text{out1}} = \min(T_{\text{req1}}, T_{n1}) \\ \eta_{m1} = \eta_{m1}(n, T_{\text{out1}}) \\ T_{\text{out2}} = \min(T_{\text{req2}}/k, T_{kn2}) \\ \eta_{m2} = \eta_{m2}(kn, T_{\text{out2}}) \\ \eta_{\text{red}} = \eta_{\text{red}}(kn, T_{\text{out2}}) \end{cases}$$

式中: $\eta_{m1}(n, T_{\text{out1}})$ 是轮毂电机在转速为 n , 转矩为 T_{out1} 时的效率; $\eta_{m2}(kn, T_{\text{out2}}/k)$ 是轮边电机在转速为 (kn) , 转矩为 (T_{out2}/k) 时的效率; $\eta_{\text{red}}(kn, T_{\text{out2}}/k)$ 是减速器在转速为 (kn) , 转矩为 (T_{out2}/k) 时的效率.

通过调节前后轮驱动转矩分配比例系数 x_0 , 在满足上述约束条件下,使得前后轮驱动能耗最低,由此可以计算得到在各转速和转矩下所对应的驱动转矩分配系数 MAP 图,如图 8 所示.

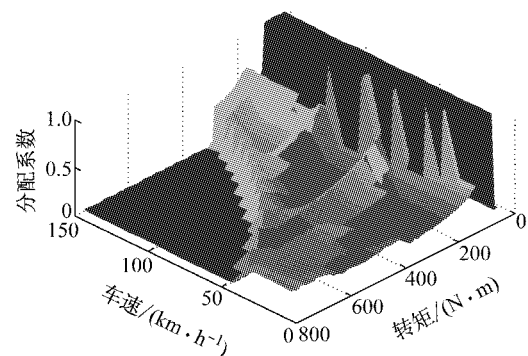


图 8 驱动转矩分配系数

Fig.8 Drive torque distribution coefficient

由图 8 可知,在低速大转矩情况下采用后轮轮边电机比重较大,高速低转矩情况下采用轮毂电机

比重较大. 根据转矩分配系数 MAP 图是理想状况下能耗最低的分配方案, 在实际中, 整车在低速启动时常采用轮边电机工作, 高速低转矩时采用轮毂电机工作, 与上述转矩分配系数 MAP 图结果趋势一致, 这也从理论上证实了实际中采用这样的分配方式是具有其节能效益的.

4.2 制动转矩分配优化

与驱动工况不同的是, 在制动工况下, 尤其是紧急制动时, 往往会出现需求制动转矩超出电机制动峰值转矩的情况, 因此, 需要考虑电液复合制动的匹配问题. 再生制动能量的回收必须考虑到电池电量状态, 汽车的行驶安全性和舒适性. 为避免过充电, 设在电池电量大于 90% 时, 将停止回收再生制动能量. 为保证汽车行驶安全性, 汽车配备有电液复合 ABS, 在低制动强度下, 采用电机制动回收制动能量, 随着需求制动转矩增加, 当电机制动转矩无法满足制动需求时, 则引入机械液压制动来参与辅助制动, 即前后轮电机在该转速下输出峰值制动转矩与需求制动转矩之间的差额由机械液压制动提供.

对于制动工况, 设需求转矩为负, 再生制动功率也为负, 结合需求转矩与电机峰值制动转矩的比较关系, 建立再生制动能量回收功率优化模型

$$\max P = \frac{T_{\text{reg1}} \cdot n \cdot \eta_{\text{m1}}}{9550} + \frac{T_{\text{reg2}} \cdot k \cdot n \cdot \eta_{\text{m2}} \cdot \eta_{\text{red}}}{9550} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} T_{\text{reg1}} = x_0 T_{\text{req}} \\ T_{\text{reg2}} = (1 - x_0) T_{\text{req}} \\ T_{\text{reg1}} = \max(T_{\text{reg1}}, T_{\text{m1}}) \\ \eta_{\text{m1}} = \eta_{\text{m1}}(n, T_{\text{reg1}}) \\ T_{\text{reg2}} = \max(T_{\text{reg2}}/k, T_{\text{m2}}) \\ \eta_{\text{m2}} = \eta_{\text{m2}}(k \cdot n, T_{\text{reg2}}) \\ \eta_{\text{red}} = \eta_{\text{red}}(k \cdot n, T_{\text{reg2}}) \end{cases}$$

式中: T_{reg1} 表示轮毂电机再生制动转矩; T_{reg2} 表示轮边电机再生制动转矩; $\eta_{\text{m1}}(n, T_{\text{reg1}})$ 表示轮毂电机在转速为 n , 转矩为 T_{reg1} 时的效率; $\eta_{\text{m2}}(kn, T_{\text{reg2}})$ 表示轮边电机在转速为 (kn) , 转矩为 T_{reg2} 时的效率; $\eta_{\text{red}}(kn, T_{\text{reg2}})$ 是减速器在转速为 (kn) , 转矩为 T_{reg2} 时的效率.

通过计算在各车速转矩下所对应的转矩分配系数, 得到制动转矩分配系数 MAP 图, 如图 9 所示.

结合驱动与制动转矩分配系数 MAP 图可以发现, 驱动与制动转矩分配系数 MAP 图总体形状相似, 局部有所不同, 这是因为在驱动与制动时能量转

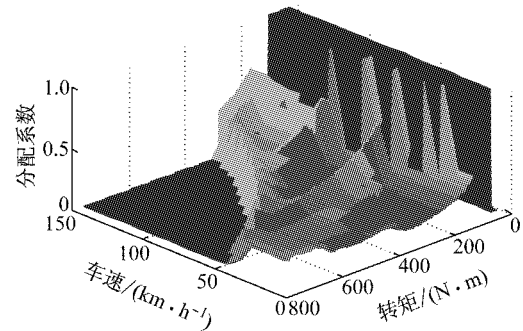


图 9 制动转矩分配系数

Fig.9 Brake torque distribution coefficient

化方向不同. 在驱/制动转矩较小时, 采用前轮轮毂电机单独驱动效率较高. 这是因为在低需求转矩下, 带有减速器的轮边电机其输出转矩将更低, 电机与减速器的效率均很低, 综合, 前轮效率较后轮效率高; 当驱/制动转矩增大, 在车速较低时采用后轮驱动或制动的比重更大, 这是因为随着转矩增大, 可以发挥带有减速器的高速电机高效能的的优势, 与轮毂电机直接驱动的方式相比, 其效率较高.

4.3 优化结果

根据建立的控制模型, 采用基于效率优化的转矩分配算法, 结果显示, 在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 两种匀速工况下的百公里能耗分别为 $8.84 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $11.47 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 与前述采用固定比例分配方法下的百公里能耗相比, 分别节能 6.95% 和 3.21% , 如表 3 所示.

表 3 百公里能耗优化结果比较

Tab. 3 Optimization results comparison of hundred kilometers energy consumption

工况	百公里能耗/(kW·h)		
	定比仿真	定比试验	优化仿真
工况 I	9.50	10.02	8.84
工况 II	11.85	12.40	11.47

为考虑不同车速下综合能耗情况, 选取整车行驶工况为 ECE/EUDC 工况, 设电池初始 S_{oc} 为 0.9, 考察车辆转矩优化分配策略下的经济性, 包括电机效率、减速器效率、ECE/EUDC 工况下总能耗等指标.

由图 10 可知, 电机与减速器在大部分时间都工作在高效区, 但存在轮毂电机效率较低的区域. 结合图 11 中轮毂电机输出转矩图可以发现, 当轮毂电机效率较低时, 其工作转矩为 0, 这就意味着, 所提出的转矩优化分配方法避免了轮毂电机在低效区输出转矩情况的出现, 通过前后轮转矩的优化配置, 提高了

驱/传动系统的综合效率。

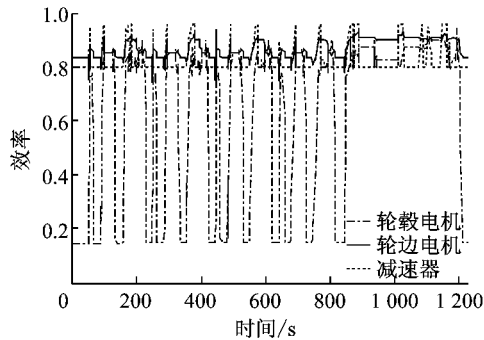


图 10 轮毂电机、轮边电机和减速器效率

Fig.10 Efficiencies of hub-motor, wheel-side motor and reducer

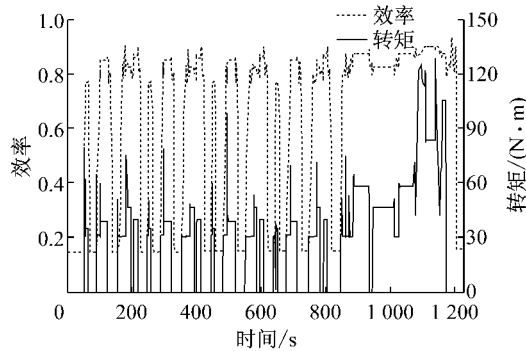


图 11 轮毂电机输出转矩与效率

Fig.11 Output torque and efficiency of reducer

定义驱动能耗与制动回收能量之差为实际能耗。在 ECE/EUDC 行驶工况下,将转矩优化分配的实际能耗与转矩按照固定比值分配的实际能耗比较,转矩优化分配控制下的系统实际能耗为 1.1927 kW·h, S_{oc} 由初始 0.9 降为 0.7035,转矩按照固定比例分配下的实际能耗为 1.2685 kW·h, S_{oc} 由初始 0.9 降为 0.6909,如图 12 和图 13 所示。

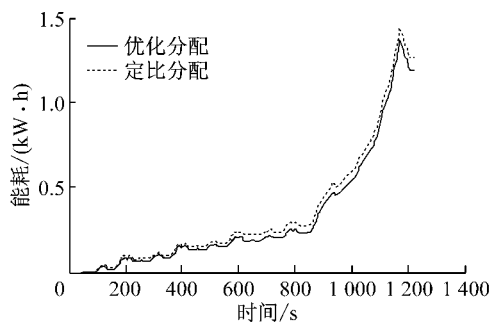


图 12 不同分配方法的能耗比较

Fig.12 Energy consumption comparison of different distribution methods

在 ECE/EDUC 工况、中国城市工况以及 FTP 72 工况下,转矩采用不同分配算法控制下的驱动能

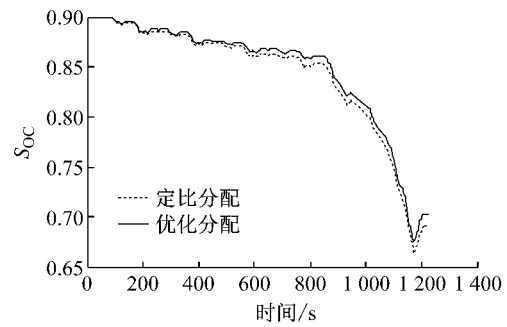


图 13 不同分配方法的 S_{oc} 比较

Fig.13 SOC variation comparison of different distribution methods

耗和制动能耗如表 4 所示,实际能耗如图 14 所示。结果显示,相较于固定比例分配转矩下的行驶能耗,采用转矩优化分配方法的整车能耗分别降低 5.98%,4.60%和 5.20%。

表 4 不同工况能耗对比

Tab.4 Energy consumption comparison of different driving cycles

工况	定比分配/(kW·h)		优化分配/(kW·h)	
	驱动能耗	制动回收	驱动能耗	制动回收
ECE/EUDC	1.677 0	0.408 5	1.611 0	0.418 3
中国城市工况	0.796 7	0.249 0	0.777 4	0.254 9
FTP72	1.789 0	0.657 8	1.727 0	0.654 6

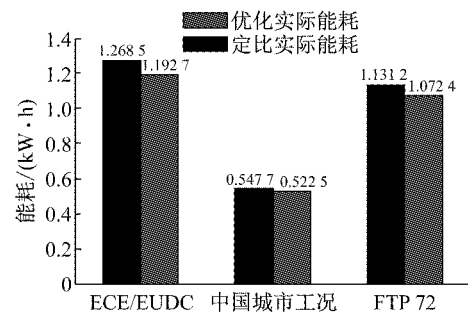


图 14 不同行驶工况下能耗比较

Fig.14 Energy consumption comparison of different driving cycles

5 结论

分布式驱动电动汽车由于其四轮独立受控,可以通过轮毂电机与轮边电机的转矩分配实现功率流的优化。本文完成了以下工作:

(1) 建立了考虑轮毂电机、轮边电机和轮边减速器效率场分布特性的分布式驱动电动汽车能耗模型,并通过基于固定比例分配前后轮转矩的仿真分析和转鼓试验对比,验证了模型正确性。

(2) 提出基于系统效率优化的转矩分配算法,在电机转矩约束条件下,根据行驶工况,进行轮毂电机、轮边电机和减速器转矩的合理分配,实现了驱/传动系统效率最优的转矩输出,有效降低了系统能耗。

(3) 提出覆盖全转速/转矩范围内的最优分配MAP图,通过在线查表法实现驱传动系统效率优化,具有算法简单、实时性强的特点。

参考文献:

- [1] 王震坡,孙逢春. 电动汽车能耗分配及影响因素分析[J]. 北京理工大学学报,2004,24(4):306.
WANG Zhenpo, SUN Fengchun. Analysis of energy consumption distribution and factors of influence in electric vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004,24(4):306.
- [2] 黄援军,殷承良,张建武. 并联式混合动力城市客车最优转矩分配策略[J]. 上海交通大学学报,2009,43(10):1536.
HUANG Yuanjun, YIN Chengliang, ZHANG Jianwu. Optimal torque distribution control strategy for parallel hybrid electric urban buses [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(10):1536.
- [3] 杨亚娟,赵韩,姜建满,等. 基于效率最优的混联式混合动力驱动系统转矩分配研究[J]. 中国机械工程,2013,24(17):2408.
YANG Yajuan, ZHAO Han, JIANG Jianman, *et al.* Research on torque distribution of a complex hybrid drive train system based on optimal overall efficiency [J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(17):2408.
- [4] 殷承良,浦金欢,张建武. 并联混合动力汽车的模糊转矩控制策略[J]. 上海交通大学学报,2006,40(1):157.
YIN Chengliang, PU Jinhuan, ZHANG Jianwu. The fuzzy torque control strategy for parallel hybrid electric vehicles [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006,40(1):157.
- [5] 黄妙华,陈飏,陈胜金. 基于转矩分配的并联式混合动力电动汽车能量管理策略研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2006,30(1):33.
HUANG Miaohua, CHEN Biao, CHEN Shengjin. Study on energy management strategy for parallel hybrid electric car based on torque distribution [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006, 30(1):33.
- [6] 朱建新,郑荣良,申其壮,等. 四驱混合动力汽车车轮转矩分配策略的研究[J]. 汽车工程,2010,32(11):967.
ZHU Jianxin, ZHENG Rongliang, SHEN Qizhuang, *et al.* A research on the wheel torque distribution strategy of 4WD HEV [J]. Automotive Engineering, 2010,32(11):967.
- [7] 王锋,冒晓建,卓斌. ISG 并联混合动力轿车最优转矩分配策略[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2008,31(5):499.
WANG Feng, MAO Xiaojian, ZHUO Bin. Torque distribution for an integrated starter generator parallel hybrid electric car [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008,31(5):499.
- [8] 余卓平,张立军,熊璐. 四驱电动车经济性改善的最优转矩分配控制[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(10):1355.
YU Zhuoping, ZHANG Lijun, XIONG Lu. Optimized torque distribution control to achieve higher fuel economy of 4WD electric vehicle with four in-wheel motors [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005,33(10):1355.
- [9] 续丹,王国栋,曹秉刚,等. 独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究[J]. 西安交通大学学报,2012(3):42.
XU Dan, WANG Guodong, CAO Binggang, *et al.* Study on optimizing torque distribution strategy for independent 4WD electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012(3):42.
- [10] 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等. 四轮驱动电动汽车永磁无刷轮毂电机转矩分配[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012(4):451.
LU Dongbin, OUYANG Minggao, GU Jing, *et al.* Torque distribution algorithm for a permanent brushless DC hub motor for four-wheel drive electric vehicle [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012(4):451.
- [11] 陈辛波,钟再敏,唐峰,等. 减小单纵臂悬架轮边电驱动系统等效簧下质量结构及方法. 中国,201110053092[P]. 2011.
CHEN Xinbo, ZHONG Zaimin, TANG Feng, *et al.* Structure and method of reducing equivalent unsprung mass of wheel-side electric driving system with single trailing arm suspension. Chinese Patent, 201110053092[P]. 2011.