

1-2-2019

Performance Comparison and Analysis Between Four In-Wheel-Motor Driving Electric Vehicle and Monomer-Motor Driving Electric Vehicle

Wang Feng

1.Beijing Information Science and Technology University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China; ;

Guoqing Gong

1.Beijing Information Science and Technology University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China; ;

Chen Yong

1.Beijing Information Science and Technology University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China; ;

Bin Ma

1.Beijing Information Science and Technology University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Performance Comparison and Analysis Between Four In-Wheel-Motor Driving Electric Vehicle and Monomer-Motor Driving Electric Vehicle

Abstract

Abstract: The monomer-motor and front axle driving electric vehicle is changed into a four-in-wheel-motor driving electric vehicle, and according to the design requirements and the dimension parameters of the original model, the matching calculation and selection of the power system of four in-wheel-motor electric vehicle are conducted. The structures of the power transmission system and their characteristics between the monomer-motor and the four-wheel driving electric vehicle are compared and analyzed; The simulation models of the monomer-motor and four In-Wheel-Motor electric vehicle are established by CRUISE and verified by the experimental data of the actual prototype. The performances of the in-wheel-motor electric vehicle are proved to be superior to those of the original prototype by simulating and analyzing the dynamic and economic performance.

Keywords

in-wheel-motor, four-wheel drive, power matching, power performance, economic performance

Authors

Wang Feng, Guoqing Gong, Chen Yong, Bin Ma, Wenhai Li, and Qiumeng Hou

Recommended Citation

Wang Feng, Gong Guoqing, Chen Yong, Ma Bin, Li Wenhai, Hou Qiumeng. Performance Comparison and Analysis Between Four In-Wheel-Motor Driving Electric Vehicle and Monomer-Motor Driving Electric Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 311-317.

四轮轮毂与单体电机电动汽车性能对比分析

汪锋, 龚国庆, 陈勇, 马彬, 李文海, 侯秋梦

(1.北京信息科技大学, 机电工程学院, 北京 100192; 2.北京电动车辆协同创新中心, 北京 100192)

摘要: 将某单体电机前轴驱动的电动汽车改为四轮轮毂电机驱动的电动汽车, 参照原车型的质量及尺寸参数, 对四轮轮毂电机电动汽车的动力系统进行匹配计算与选型; 对单体电机电动汽车和四轮轮毂电机电动汽车的动力系统结构及优缺点进行对比分析; 利用 Cruise 软件, 建立了原始样车及轮毂电机电动汽车仿真模型, 并根据样车在实际行驶工况下的实验数据, 验证了仿真模型的正确性; 通过动力性及经济性仿真计算对比, 得出四轮轮毂电机电动汽车的性能优于原始样车。

关键词: 轮毂电机; 四轮驱动; 动力匹配; 动力性; 经济性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0311-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801041

Performance Comparison and Analysis Between Four In-Wheel-Motor Driving Electric Vehicle and Monomer-Motor Driving Electric Vehicle

Wang Feng, Gong Guoqing, Chen Yong, Ma Bin, Li Wenhai, Hou Qiumeng

(1.Beijing Information Science and Technology University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100192, China;

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100192, China)

Abstract: The monomer-motor and front axle driving electric vehicle is changed into a four-in-wheel-motor driving electric vehicle, and according to the design requirements and the dimension parameters of the original model, the matching calculation and selection of the power system of four in-wheel-motor electric vehicle are conducted. The structures of the power transmission system and their characteristics between the monomer-motor and the four-wheel driving electric vehicle are compared and analyzed; The simulation models of the monomer-motor and four In-Wheel-Motor electric vehicle are established by CRUISE and verified by the experimental data of the actual prototype. The performances of the in-wheel-motor electric vehicle are proved to be superior to those of the original prototype by simulating and analyzing the dynamic and economic performance.

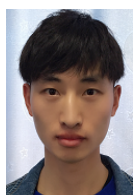
Keywords: in-wheel-motor; four-wheel drive; power matching; power performance; economic performance

引言

能源危机、环境恶化是全球汽车产业面对的共同挑战, 普及电动汽车是解决问题的重要手段之一,

也是各国政府大力支持推进的项目, 电动汽车也逐渐成为汽车行业的研发焦点。与单机驱动的电动汽车相比, 轮毂电机电动汽车将驱动电机直接安装在车轮上, 省去了机械传动系统, 因其具有结构简洁、传动效率高, 并能通过电机及其控制系统来实现车轮的转向差速和驱动防滑等优点, 成为电动汽车未来发展的重要方向^[1]。

轮毂电机驱动的电动汽车的研究在国内外取



收稿日期: 2015-11-17 修回日期: 2016-03-18;
基金项目: 科技创新服务能力建设-科研基地-新能源汽车北京实验室(PXM2016_014224_000004), 科技创新服务能力建设-协同创新中心-新能源汽车关键技术研究(PXM2016_014224_000039), 北京市委组织部优秀人才资助计划 2014000020124G098);
作者简介: 汪锋(1988-), 男, 河南南阳, 硕士生, 研究方向为新能源汽车技术。

<http://www.china-simulation.com>

得了一系列成果。美国通用公司在1968年将轮毂电机应用在大型的矿用自卸车上；日本在1991-2001年间研发了IZA、COMS、KAZ等一系列轮毂电机驱动的电动汽车；本田公司在2005年研发了一款轮毂电机驱动的燃料电池电动汽车“FXC”^[2-4]；Volvo在2007年研发了C30插入式混合动力电动汽车，该电动汽车也采用轮毂电机作为驱动系统；日本的NTN公司在2011年研发了一辆四轮轮毂电机驱动的Q'mo原型电动概念车；福特公司在2013年以福特嘉年华为基础开发的eWheelDrive轮毂电机驱动汽车^[5-6]。国内对轮毂电机电动汽车的研究也取得了一些进展：同济大学研制出了四轮轮毂电机驱动的电动轮模块；比亚迪研发的ET概念车的驱动系统也采用了最新的全轮轮毂电机驱动。尽管轮毂电机电动汽车的应用和研究已有一些^[7-8]，但目前对于此类电动汽车性能的研究大多为单车性能的单独分析，缺少不同驱动模式下电动汽车动力性能和经济性能的对比分析。

本文采用建模仿真与实验相结合，参照某单体电机驱动电动样车，对四轮轮毂电机电动汽车的动力系统进行匹配计算；利用Cruise分别建立了样车及轮毂电机电动汽车模型；结合样车实验数据及两模型仿真结果，进行了动力性能和经济性能的对比分析。

1 四轮轮毂电机电动汽车动力匹配

1.1 轮毂电机参数设计

四轮轮毂电机电动汽车动力系统设计是整车研发的重点，主要包括对轮毂电机的参数设计和动力电池的设计。其匹配参数合理性直接影响整车的动力性能及经济性能。

根据汽车功率平衡关系式：

$$P_v = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r u_a}{3600} + \frac{mgi\delta}{3600} + \frac{C_D A u_a^3}{76140} + \frac{\delta m u_a}{3600} \frac{du}{dt} \right) \quad (1)$$

式中： P_v 为车辆需求功率，kW； g 为重力加速度， m/s^2 ； m 为车辆满载质量，kg； i 为道路坡度，%；

δ 为旋转质量换算系数； $\frac{du}{dt}$ 为加速度， m/s^2 ； u_a 为车速，km/h； η_T 为传动系统效率； A 为车辆迎风面积， m^2 ； f_r 为滚动阻力系数； C_D 为风阻系数。

分别计算车辆在最高车速、最大爬坡度和起步加速3种工况下所需要的功率，选择最大功率作为车辆的需求功率。

1) 最高车速时车辆的需求功率：

$$P_{v1} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r u_{\max}}{3600} + \frac{C_D A u_{\max}^3}{76140} \right) \quad (2)$$

2) 最大爬坡度时车辆的需求功率：

$$P_{v2} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r \cos \alpha_m u_a}{3600} + \frac{mgs \sin \alpha_m u_a}{3600} + \frac{C_D A u_a^3}{76140} \right) \quad (3)$$

3) 电动汽车在水平路面上加速行驶时的需求功率：

$$P_{v3} = \frac{u_a}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r}{3600} + \frac{C_D A u_a^2}{76140} + \frac{\delta m}{3600} \frac{du}{dt} \right) \quad (4)$$

轮毂电机的额定功率应满足电动汽车对最高车速的要求，峰值功率应能同时满足电动汽车对最高车速、最大爬坡度和加速度的要求，所以轮毂电机的额定功率和峰值功率分别为：

$$P_\epsilon \geq P_{v1}$$

$$P_{\epsilon \max} \geq \max \{P_{v1}, P_{v2}, P_{v3}\}$$

轮毂电机的峰值功率与额定功率的关系为：

$$P_{\epsilon \max} = \lambda P_\epsilon \quad (5)$$

式中： $P_{\epsilon \max}$ 为峰值功率； P_ϵ 为额定功率； λ 为电机的过载系数，一般取1~3。

轮毂电机的最高转速对汽车整体性能和尺寸有很大影响，不仅影响汽车的速度和传动系的尺寸，而且影响电机的启动功率和启动转矩，因此电动汽车最高行驶速度与电机最高转速之间需满足以下关系：

$$n_{\max} = \frac{u_{\max} i_0}{0.377r} \quad (6)$$

式中： n_{\max} 为电机最高转速； r 为车轮滚动半径； i_0 为传动系统最大传动比，(取 $i_0=1$)。

电机的最高转速与额定转速的比值称电机扩大恒功率区系数 β 。 β 值越大，电动机可在低转速

区获得较大的转矩, 有利于提高车辆的加速性能和爬坡性能, 但 β 值过大会导致电动机工作电流的增大, 进而加大了功率变换器的尺寸和损耗, 因此电机最高转速不宜过高^[9]。

$$n_{m\max} = \beta \times n_{mr} \quad (7)$$

式中: n_{mr} 为额定转速; β 电机扩大恒功率区系数, 一般取 2~4。

轮毂电机最大转矩应满足汽车起动转矩和最大爬坡度的要求, 最大爬坡度下的最大转矩表达式为:

$$T_{iq\max} \geq \frac{mg(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max})r}{\eta_i i_0} \quad (8)$$

1.2 电池组参数设计

1.2.1 动力电池组类型选择

目前可用于电动汽车的动力电池主要有铅酸电池、镍氢锂离子电池和燃料电池, 其中锂离子电池具有高能量和充放电速度快等优点, 可以作为电动汽车动力源的首选^[10]。

1.2.2 电池组数目的确定

电池数目必须满足四轮轮毂电机电动汽车行驶时所需的最大功率与续航里程的要求。满足电动汽车行驶时所需的最大功率要求的电池组数目为:

$$n_p = \frac{P_{e\max}}{P_{b\max} \eta_e \eta_{ec} N} \quad (9)$$

式中: $P_{e\max}$ 为电动机的峰值功率, kW; η_e 为电动机的工作效率; η_{ec} 为电动机控制器的工作效率; $P_{b\max}$ 为单节电池最大输出功率, kW; N 为单个电池组所包含的电池的数目。

满足电动汽车续航里程要求的电池组数目为:

$$n_x = \frac{1000SW}{C_s V_s N} \quad (10)$$

式中: S 为续航里程, km; W 为电动汽车行驶 1km 所消耗的能量, kW·h/km; C_s 为单节电池的容量, A·h; V_s 为单节电池的电压, v。

电池数目为: $n = \max\{n_p, n_x\}$

1.2.3 电池组容量的确定

电池组能量为:

$$E_B = \frac{U_m C_E}{1000} \quad (11)$$

式中: E_B 为电池组能量, kW·h; U_m 为电池组电压, v; C_E 为电池组容量, A·h。

蓄电池能量应满足以下条件:

$$E_B = \frac{mgf + C_D A u_a^2}{3600 \times DOD \eta_i \eta_{mc} \eta_{dis} (1 - \eta_a)} \times S \quad (12)$$

式中: η_{mc} 为电动机效率; η_{dis} 为蓄电池放电效率; η_a 为汽车附件能量消耗比例系数; DOD 为蓄电池放点深度。

或者蓄电池容量满足以下条件^[11]:

$$C_E = \frac{mgf + C_D A u_a^2}{3.6 \times DOD \eta_i \eta_{mc} \eta_{dis} (1 - \eta_a) U_m} \times S \quad (13)$$

2 驱动系统结构对比

传统单轴驱动电动汽车驱动系统由电机与主减速器、差速器、车轮相连。驱动系统结构如图 1 所示。

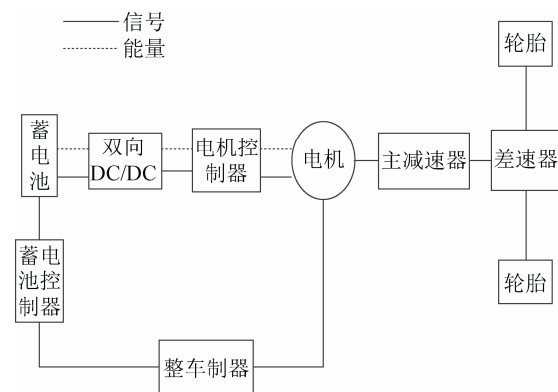


图 1 单轴驱动电动汽车

Fig.1 Single-axle Driving Electric Vehicles

如图 1 所示, 电机输出的转矩到驱动轴上的传递效率为:

$$\eta_a = \eta_1 \times \eta_2 \quad (14)$$

式中: η_1 为主减速器传递效率, 一般取 95%; η_2 为差速器传递效率, 一般取 94%。

而在单轴电动汽车基础上将电机直接安装于驱动轮内, 省去机械传动装置(取 $i_0=1$), 由电机控制器实现变速和差速转换的四轮轮毂电机电动汽车驱动系统结构如图 2 所示。

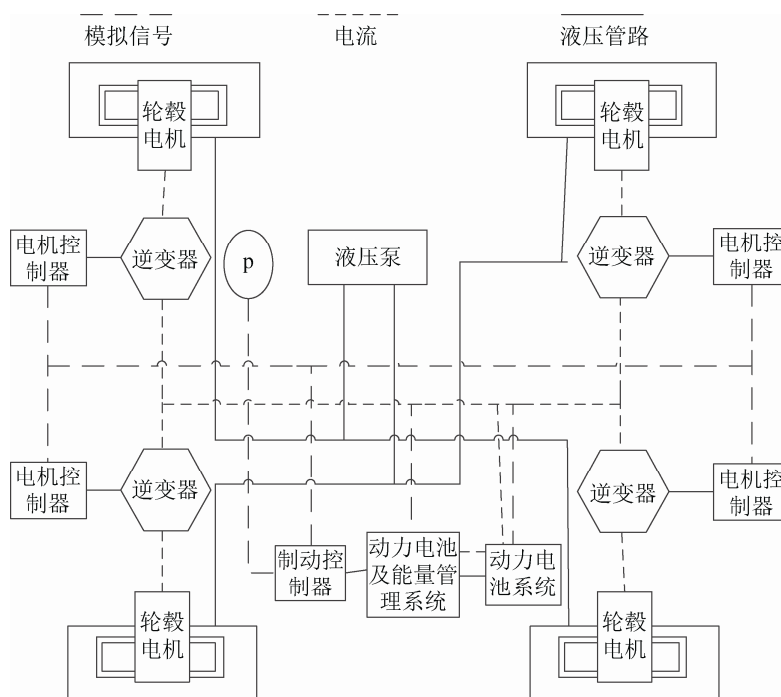


图2 四轮轮毂电机电动汽车

Fig. 2 Four In-Wheel-Motor Electric Vehicle

如图2所示,轮毂电机省去机械传动装置,其传输效率 η_p 高达94%。

四轮轮毂电机电动汽车相较于单轴驱动汽车,具有传动效率高、结构简单、稳定性好等优点,且前后轴还可以实现制动能量回收。

3 整车建模仿真

利用AVL Cruise软件,建立了四轮轮毂电机电动汽车的仿真模型,并根据四轮轮毂电机电动汽车动力系统匹配公式,以及参照单轴驱动电动汽车的基本参数及动力性指标,确定各重要部件仿真时的基本参数如表1所示。

4 实验分析与性能比较

4.1 实验与数据采集分析

在测功机上进行NEDC循环实验,并驾驶样车在一般城市工况下的行驶实验,以及直线0~100 km/h加速实验,通过捕获电动汽车上的CAN总线数据,实时采集车辆状态信息,如目标转矩、当前转矩、电机转速、车速、电池电压、电

池电流、SOC值等,采样间隔50 ms,由GPRS无线网络传至中心数据库中保存。

表1 整车仿真基本参数

Tab.1 Basic Parameters of Vehicle Simulation

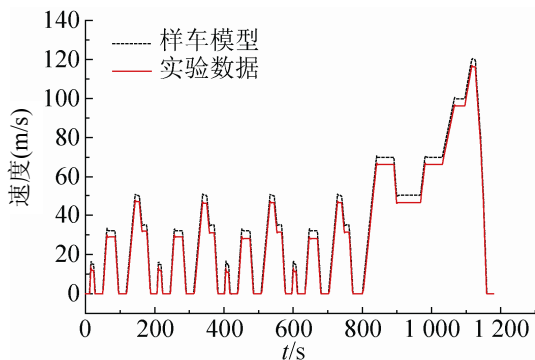
参数	数值
整备质量/kg	1 370
迎风面积/m ²	2.19
风阻系数	0.28
滚动阻力系数	0.015
轴距/mm	2 500
最高车速/(km/h)	120
最大爬坡度/%	20
续驶里程/km	200
单体电机额定功率/最大功率/kW	20/30
轮毂电机额定功率/最大功率/kW	5/7.5
轮毂电机额定转速/最高转(r/min)	550/1 100
轮毂电机最大转矩/Nm	258
单体电池电压/V	3.2
单体电池容量/Ah	15
电池组组数	118

在加速及道路实验中采集的数据,不可避免地存在重复数据和异常数据,根据电动汽车的实际运行常识可进行初步的数据筛选,其中CAN总线采

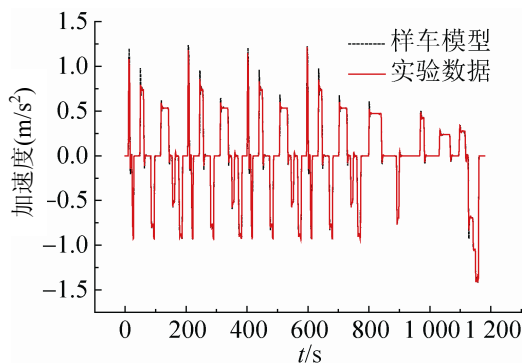
集的 SOC 值是离散型数据, 对此数据应采用曲线拟合的方法绘制曲线。

4.2 模型验证

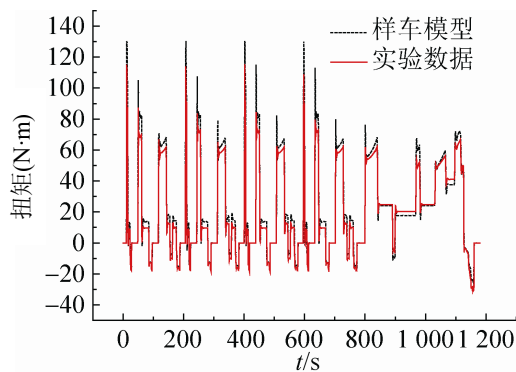
本实验采用综合循环工况 NEDC 为仿真工况, 用 Cruise 进行 NEDC 仿真得到了样车模型在循环仿真工况中的行驶速度、加速度、扭矩和 SOC 等随时间变化曲线, 并在测功机上进行 NEDC 循环实验, 实验数据与样车数据对比曲线如图 3 所示。



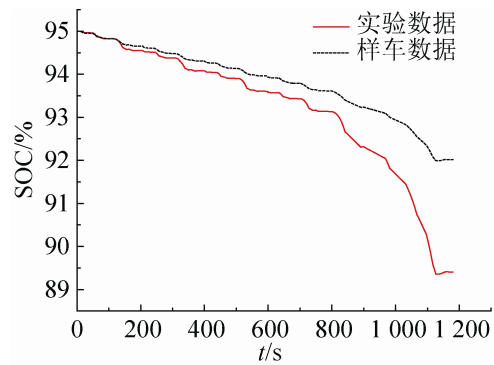
(a) 样车实验与仿真的速度-时间曲线



(b) 样车实验与仿真的加速度-时间曲线



(c) 样车实验与仿真的扭矩-时间曲线



(d) 样车实验与仿真的 SOC-时间曲线

图 3 样车实验与仿真结果的比较
Fig.3 Comparison Between The Prototype Car and Simulation Results

由图 3 可知, 样车模型在循环仿真工况中与测功机上循环工况中的行驶速度、加速度、扭矩和 SOC 等随时间变化曲线基本吻合, Cruise 仿真得出的是在理想环境下的理论数据, 而测功机得出的数据受到机器、外部环境等因素引起的各种误差的影响。虽然存在误差, 但得到的数据在可接受误差范围内, 从而验证了模型的正确性, 而四轮轮毂电机电动汽车模型是在样车模型基础上简化而成, 因此也是正确可靠的。

4.3 四轮轮毂电机电动汽车与单轴驱动电动汽车性能对比分析

下面从经济性和动力性两方面对比分析四轮轮毂电机电动汽车与单轴驱动电动汽车的性能, 以评价两种电动汽车性能的好坏。

4.3.1 经济性能

1) 城市工况下电池 SOC 随时间的变化情况

图 4 为两种模型在一般城市工况下的电池 SOC 变化情况。由图比较可知: 样车模型仿真结果与实验测得数据基本相同, 四轮轮毂电机汽车模型由于简化了传动系统, 传动损失小, 在相同行驶条件下耗电量少, 因此电池 SOC 最高, 说明其能量利用率高。

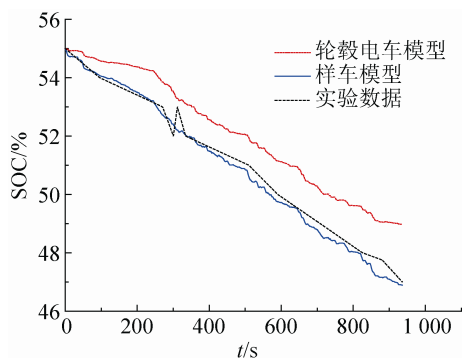


图4 SOC-时间曲线
Fig. 4 SOC-Time Curve

2) FTP75 工况下电池消耗情况

根据 GBT18386-2005 电动汽车能量消耗率实验方法,对两种模型进行 FTP75 工况仿真,由图 5 可知:在相同工况下,轮毂电机模型耗电量明显小于样车模型,进一步说明轮毂电机电动汽车模型的经济性优于样车模型。

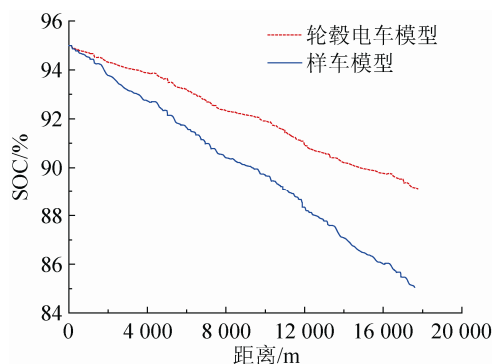


图5 SOC-距离曲线
Fig. 5 SOC-Distance Curve

4.3.2 动力性能

1) 爬坡性能

汽车的最大爬坡度反映了汽车的爬坡性能,是衡量其动力性的 1 重要指标。由图 6 可知:两车模型的爬坡度均 $\geq 20\%$,符合设计指标要求,说明两种车型爬坡性能良好,而四轮轮毂电机电动汽车的爬坡性能优于样车模型。

2) 最高车速

汽车的最高车速直接反映了汽车的动力性能。由图 7 可知:在负载基本相同的情况下,分别对两种模型进行仿真分析,可得四轮轮毂电机模型汽车

的最高车速可达 154.2 km/h,大于样车模型的最高车速 142.7 km/h,说明四轮轮毂电动汽车的动力性能更优越。

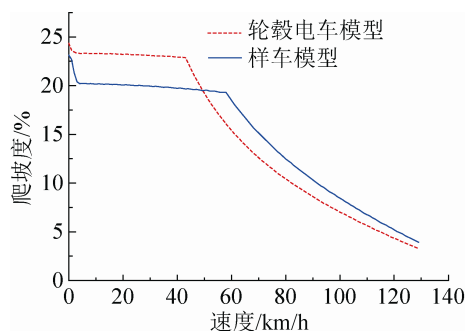


图6 爬坡度-速度曲线
Fig. 6 Climbing-Speed Curve

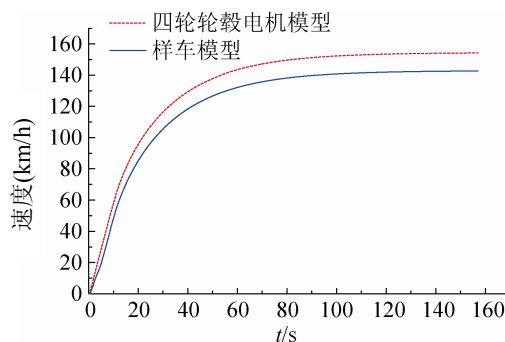


图7 时间-车速曲线
Fig. 7 Time-Speed Curve

3) 最大牵引力

汽车的牵引力是汽车动力性能的重要指标之一。利用 Cruise 软件分别对两个模型进行最大牵引力仿真分析,由图 8 可知:轮毂电机模型在各速度段的牵引力均大于样车模型,说明在最大牵引力方面,轮毂电机的性能更加优越。

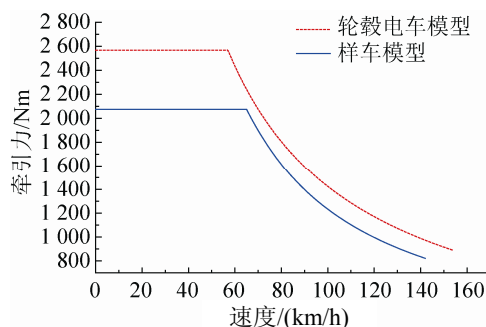


图8 牵引力-车速曲线
Fig.8 Traction-Speed Curve

5 结论

1) 进行了四轮轮毂电机电动汽车的动力计算及选型; 对比分析了单轴驱动电动汽车和四轮轮毂电机电动汽车动力系统结构特点及传动效率。四轮轮毂电机电动汽车由于省去了机械传动装置, 因此具有传动效率高, 结构简单, 稳定性好等优点;

2) 对样车模型进行了 NEDC 仿真, 得到了样车模型在循环仿真工况中的速度、加速度、扭矩以及 SOC 随时间变化曲线, 并与样车实验数据相比较, 验证了样车模型的正确性, 而四轮轮毂电机电动汽车模型是由样车模型简化得到, 也说明了四轮轮毂电机电动汽车模型的正确性;

3) 根据城市工况以及 FTP75 工况下的 SOC 曲线对比分析, 说明轮毂电机电动汽车的经济性能优于单轴驱动电动汽车; 根据爬坡性能、最高车速、最大牵引力等仿真结果对比分析, 得出四轮轮毂电机电动汽车的动力性能优于样车。

参考文献:

- [1] John M Miler. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type[J]. IEEE On PLS (S0042-3114), 2006, 21(3): 756-767.
- [2] Terashima M, Ashikaga T, Mizuno T, et al. Novel Motors and Controllers for High-Performance Electric Vehicle with Four In-wheel Motors: Industrial Electronics[J]. IEEE Transactions(S0278-0046), 1997, 44(1): 28-38.
- [3] Satoshi Murata. Vehicle Dynamics Innovation with In-Wheel-Motor[J]. SAE Paper(S1002-6819), 2011, 39(2): 7200-7204.
- [4] JochenRauh, Dieter Ammon. System dynamics of electrified vehicles: some facts, thoughts, and challenges[J]. Vehicle System Dynamics(S0042-3114), 2011, 49(7): 1005-1020.
- [5] Willberger J, Rojas A, Niederkofler H. Energy efficiency and potentials of electric motor types for wheel hub applications[J]. SAE Paper(S1002-6819), 2009, 24(1): 158-162.
- [6] Willberger J, Ackerl M, Rojas A, et al. Motor selection criteria and potentials of electrified allwheels drive concepts for passenger cars by add-on wheel hub motors on the rear axle[J]. SAE Paper (S1002-6819), 2010, 28(1): 1302-1307.
- [7] 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]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 45-52.
Meng Qinghua, Xu Jin, Wang Dongfeng. Power System of Electric Vehicle Driven by In-wheel Motors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 45-52.
- [8] 黄启然, 郑玲, 李以农, 等. 四轮驱动电动汽车轮毂电机控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2014, 2(10): 1237-1242.
HuangQiran, ZhengLing, LiYinong, et al. Wheel Motor Control Strategy for Four-wheel Independent Drive Electric Vehicles[J]. Automotive Engineering, 2014, 2(10): 1237-1242.
- [9] Iqbal Husain. 纯电动及混合动力汽车设计基础[M]. 林程, 译. 北京: Machine Press, 2012: 52-62.
Iqbal Husain. Electric and Hybrid Vehicle: Design Fundamentals[M]. Translation by LinCheng. Beijing: Machine Press, 2012: 52-62.
- [10] 杨世春. 电动汽车设计基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 168-174.
YangShirong. Electric vehicle design basis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 168-174.
- [11] 崔胜民. 新能源汽车技术[M]. 北京: 北京大学出版社 2009: 178-182.
Cui Shengmin. New Energy Vehicle Technology[M]. Beijing: Peking University Press, 2009: 178-182.