

文章编号:1672-9331(2013)02-0051-06

四轮轮式驱动电动汽车电气系统设计与实现

杜荣华^{1,2}, 舒 雄^{1,2}, 朱 云², 刘书亚²

(1. 长沙理工大学 智能交通与车路协同技术研究所, 湖南 长沙 410004;

2. 长沙理工大学 工程车辆轻量化与可靠性技术重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 四轮轮式驱动电动汽车在行驶过程中需对 4 个轮毂电机进行协调控制, 其动力回路电流大、电压高, 电机输出功率受行驶工况影响大, 因此其安全可靠的电气系统设计至关重要。首先通过电动汽车动力学分析和驱动电机分析, 建立了车辆行驶动力学方程, 得到车速、电机功率、电机转速、电机扭矩与主电路的负载电流及电压之间的匹配关系; 然后计算系统动力回路中继电器、熔断丝和接触器等关键元器件的电气参数, 设计了四轮轮式驱动电动汽车的电气系统。研制出的四轮轮式驱动电动汽车经过了城市工况测试, 其结果表明, 该电气系统能很好地满足四轮轮式驱动电动汽车的电气需求, 有效保障电动汽车的运行。

关键词: 电气系统; 纯电动车; 四轮驱动; 无刷直流电机

中图分类号: TM921.2

文献标识码: A

The electric system design and realization for four-wheel driven electric vehicle

DU Rong-hua¹, SHU Xiong^{1,2}, ZHU Yun², LIU Shu-ya²

(1. Institute of Intelligent Traffic and Cooperative Vehicle Infrastructure Systems,
Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;

2. Key Laboratory of Engineering Vehicle Lightweight and Reliability Technology,
Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The four-wheel electric vehicle needs to take coordination control on four hub motors, with large loop current and high voltage. Also, the motor power suffers a large influence on driving cycles, it is crucial for designing safe and reliable electrical system. The paper carries out dynamic analyses of electric vehicle and driving motor analyses to build dynamical equation of vehicle driving, obtaining load current of vehicle speed, motor power, motor speed, motor torque and main circuit, also the matching relationship between voltages. Furthermore, the electric parameters of critical components in power loop system such as relay, fuse wire and contactor, even designed electrical system of four-wheel electric vehicle are calculated. The four-wheel electric vehicle that manufactured has succeed in passing test on urban roadways. The result indicates that this electric system is extremely well-designed to satisfy the electric need of our-wheel electric vehicle. It effectively guaranteed pilot run of electric vehicle.

Key words: electric system; electric vehicle; four-wheel drive; BLDCM

收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(112729067); 湖南省教育厅重点科研资助项目(10A003)

作者简介: 杜荣华(1973-), 男, 江西萍乡人, 长沙理工大学教授, 主要从事智能交通与车路协同技术方面的研究。

四轮轮式驱动电动汽车,因其简洁的整车结构、高效的传动及借助微机实时控制各车轮实现差速转向的突出优点,成为电动汽车发展的一个独特研究方向和研究热点^[1].电动汽车的电气系统负责能源供给与传输,是电动汽车实现稳定、安全行驶的前提.其中,动力回路正常工作电流可达数十、甚至上百安培,瞬间放电电流更是成倍增加^[2],大电流、高电压是该回路的主要特点;其他非动力回路,如:电池SOC检测回路和整车控制系统回路,则要求电源具有较高的稳定性^[3].在设计和规划整车电气系统时,不仅要考虑车辆的驱动要求,而且还需要考虑车辆运行安全及车内人员安全^[4].因此,安全可靠的电动汽车电气系统设计至关重要.

目前,商用电动汽车主要还停留在对传统燃油汽车进行动力改造阶段,大多采用驱动电机替换燃油发动机的方式.显然,这种方式只是改变了传统汽车的动力源,除了电动机的转矩特性较发动机有所改善外,并没有根本性改变车辆的运动性能和充分发挥电驱动系统所带来的技术进步的优势.另外,电动汽车的研究目前大部分都集中在电动汽车驱动力控制^[5]、再生制动控制和稳定性控制等方面^[3],而对电动汽车电气系统的设计研究不多,对四轮独立驱动电动汽车电气系统的设计更少.实际上,电动汽车在各种行驶工况下,电动机的输出功率随时都在变化,所需的转矩与功率是行驶速度的函数,并取决于不同车速行驶时遇到的行驶阻力.此外,四轮独立驱动电动汽车在行驶过程中需要对4个轮毂电机进行协调控制.为此,作者通过对四轮轮式驱动电动汽车行驶过程中的车辆动力学及所采用的驱动电机进行分析,建立了车辆行驶动力学方程,得到了车速、电机功率、电机转速、电机扭矩与主电路的负载电流及电压之间的匹配关系.在此基础上,设计了一套适合四轮轮式驱动电动汽车的电气系统,该电气系统不仅能满足车辆行驶过程中的供电需求,而且具有过流、欠压保护,绝缘检测,充电保护和被动防范功能.

1 四轮轮式驱动电动汽车动力学分析和驱动电机分析

1.1 电动汽车动力学分析

车辆沿水平方向行驶时,其动力学方程式^[6,7]

可表示为:

$$F_w = F_f + F_r + F_a + F_g, \quad (1)$$

式中: F_w 为道路阻力; F_f 为空气阻力; F_r 为车轮滚动阻力; F_a 为加速度阻力; F_g 为坡度阻力.其中,空气阻力 F_f 的表达式为:

$$F_f = 0.5\xi k_1 A (\nu + \nu_0)^2, \quad (2)$$

式中: ξ 为空气密度; k_1 为空气阻力系数; A 为车辆迎风面积; ν 为车速; ν_0 为顶风速度.滚动阻力由轮胎变形引起,一般情况下可由下列公式给出:

$$F_r = k_2 mg \cos \alpha, \quad (3)$$

式中: k_2 为滚动阻力系数,与车速有关; m 为车的重量; g 为重力加速度; α 为坡度角, $\alpha = 0$ 时为水平行驶.加速度阻力及坡度阻力可以表示为:

$$F_a = k_3 m d\nu/dt, \quad (4)$$

$$F_g = mg \sin \alpha, \quad (5)$$

式中: k_3 为加速度系数; α 为坡度角.

当车辆爬坡时, F_g 为正;当车辆下坡时, F_g 为负.

1.2 驱动电机模型分析

以三相六状态的无刷直流电机为例,其等效原理如图1所示^[8].在分析前做如下假设以简化分析过程:①忽略电机铁心饱和,不计涡流损耗和磁损耗;②不计电枢反应,气隙磁场分布近似地认为是平顶宽度为 120° 的梯形波;③忽略齿槽效应;④驱动系统逆变电路的功率管和续流二极管均具有理想的开关特性^[9].

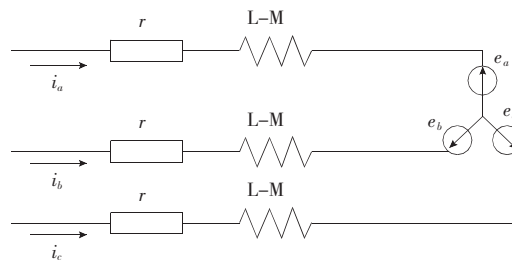


图1 无刷直流电机等效模型

Fig. 1 Equivalent model of BLDCM

电机运行时从电源吸收电功率,这些电功率除小部分转化为铜耗外,大部分通过气隙磁场把转子永磁体的力矩传递给转子,这部分功率称为电磁功率,其大小是三相绕组的相反电动势与相电流乘积之和^[10],即

$$P_e = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C, \quad (6)$$

当不计转子的机械损耗和其他杂散损耗,电磁功率全部转换为转子动能时,可得:

$$P_e = T_e \omega, \quad (7)$$

式中: T_e 为电磁转矩; ω 为电机机械角速度.

由式(6),(7)可得:

$$T_e = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) / \omega. \quad (8)$$

由能量守恒可知,电机在工作过程中输入功率为:

$$P_1 = P_{Cu} + p_e + P_T. \quad (9)$$

式中: $P_{Cu} = r_a I^2$ 为电枢绕组的铜耗; $P_e = k_e \omega$ 为电磁功率; $P_T = \Delta UI$, 为逆变桥功率器件的损耗. 因此,电机的输入功率由电磁功率 P_e 和热损耗 ($P_T + P_{Cu}$) 两部分组成,其中,电磁功率是电机克服反电动势所消耗的功率,经由磁场转化为机械能. 考虑到负载端的损耗,这部分功率传递可以表示为:

$$P_e = (T_L + T_0) \omega = P_2 + P_0. \quad (10)$$

式中: T_L 为负载转矩; T_0 为空载转矩; P_2 为输出功率; P_0 为空载损耗,包括铁芯损耗和机械摩擦损耗两部分.

四轮轮式驱动电动汽车通过驱动安装在车轮内的轮毂电机实现对车辆的驱动要求,因此,电机的输出功率与汽车的驱动功率可近似相等. 根据式(1)可知,四轮轮式独立驱动电动汽车的驱动功率 P 为:

$$P = F_w v = 4P_2. \quad (11)$$

式中: F_w 为道路阻力; v 为车辆的行驶速度; P_2 为单个电机输出功率.

电动汽车在行驶过程中的阻力功率随时都在变化. 导致驱动电机的输出功率也跟随阻力功率的变化而变化. 而驱动电机的输出功率由动力回路传递,因此,电动汽车在运行过程中,动力回路中的电流随时都在变化,该回路电流的大小不仅影响系统的散热与正常工作,而且影响电池组的放电性能.

以自主设计的四轮轮式驱动电动汽车为研究对象,其驱动电机分布方案如图 2 所示. 在行驶过程中,电动汽车动力电池的输出功率为:

$$P_{out} = P + P_3 = UI. \quad (12)$$

式中: P 为 4 个驱动电机输出的总功率; P_3 为动力回路热损耗; U 为动力电池两端电压; I 为输出回路总电流.

根据式(1)~(12)及车重、迎风面积、电机参数,可以分别计算出车辆在爬坡、加速等过程中的电流大小,从而为纯电动汽车电气系统的设计提供理论依据.

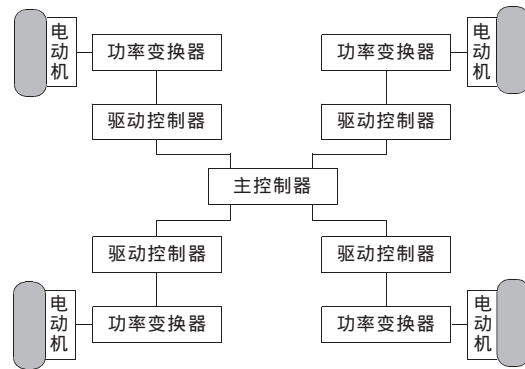


图 2 电动汽车动力布置方式

Fig. 2 Power arrangement of electric vehicle

2 四轮轮式驱动电动汽车电气系统设计

为了更好地满足电动汽车电气要求,将四轮轮式驱动电动汽车的电气系统分为动力回路和辅助回路进行设计^[11]. 动力回路给 4 个无刷直流驱动电机供电,辅助回路负责其他功能模块供电^[12]. 该四轮轮式驱动电动汽车所采用的驱动电机、电机控制器、电池及整车的参数如表 1~3 所示.

表 1 单个无刷直流轮毂电机(BLDCM)参数

Table 1 The BLDCM parameters

电机型号	DDCLM8001205	额定功率/W	800
额定转速/ (r · min ⁻¹)	800	最大效率/%	86
空载电流/A	0.500	最高转速/ (r · min ⁻¹)	1 200
峰值功率/kW	1.2	额定电压/V	72

表 2 单个无刷直流电机控制器参数

Table 2 BLDCM controller parameters

外形尺寸/(mm× mm×mm)	180×97× 40	额定输出 功率/kW	1
重量/kg	0.5	最大输出功率/kW	1.5
额定电压/V	72	最大电流/A	100
结构形式	风冷	效率	85%~97%

根据表 1~2 中的相应参数,结合以上公式,计算出的动力回路瞬时放电电流可达百安培. 为了保证该动力回路安全可靠,需将动力回路中所

有元器件放置在高压绝缘箱内,且该回路中的所有母线正负极均与车体绝缘.箱体中还需设置断路器,以保证在故障时动力回路自动与电池组断开^[13].为了消除高压系统对人员和车辆的潜在危险,通过检测直流正极母线与底盘、直流负极母线与底盘的绝缘性,以保证纯电动汽车的高压电气安全.当充电插头插入车载充电插座时,通过自动闭锁电机控制器,使车辆不能开动,确保充电过程的安全.在电池箱内安装红外传感器、烟雾报警器及加速度传感器,当温度过高或烟雾过大时,动力回路自动与电池组断开实现被动防范功能.加速度传感器的主要功能是:当检测到车辆发生碰撞、侧翻时,使动力回路与电池组断开.

表3 电池及其整车主要参数

Table 3 Battery and vehicle main parameters

外形尺寸/(mm×mm)	2 320×1 720×1 220	最高时速/(km·h ⁻¹)	60
轮距/mm	1 430	驱动方式	无刷直流电机 x4
轴距/mm	1 335	加速方式	电子加速
最大质量/kg	300	最大续航里程/km	40
爬坡能力/(°)	20	电池类型	铅蓄电池/
		(名称/单体容量/电压/数量)	(20 Ah/12 V/18 块)

基于上述考虑,设计了如图3所示的整车动力回路和如图4所示的辅助回路.在电气系统中,直流接触器(主继电器)K12选用MZJ-100A,可

满足过流能力强和使用寿命长的要求;辅继电器选用TRV4-L-24V-2F.主熔断器F0选用RS95B100 A,额定电流为100 A,可保证在非短路时不熔断,而在短路时快速(毫秒级)熔断.辅助回路主熔断器F1的额定电流为30 A,整车控制器用的熔断器F3额定电流为5 A,组合开关控制用的熔断器F4额定电流为3 A,接触器控制回路用的熔断器为1 A.开关S1的作用是断开动力电池组内部回路,方便维修调试,电池组内部熔断器的作用是过流保护.主回路正负极采用型号功能相同的接触器K12控制主回流通断,接触器K10, K11, K13及仪表起到充电控制显示功能.二极管D用来防止因反接而造成电气事故.能源管理系统是整个电气系统的核心,其作用是控制充放电以及电池SOC检测.

充电安全信号,红外、烟雾检测信号,绝缘检测信号及其他信号通过CAN总线进行传输.当检测到过流、欠压、高温等不正常情况时,能源管理系统通过控制接触器K10~K13的功能引脚,达到控制主回路与动力电池组通断的目的.无刷直流电机1~4分别表示前后左右4个驱动电机.在主回路中,导线选用铜芯电缆,截面积为16 mm²,30 °C可通过的持续电流可达到100 A.考虑到载流量、导体直流电阻及质量等因素,其他回路的导线截面积可为4,0.5,1.5,0.35 mm².单块电池之间的串联采用了编织线,CAN总线采用2×1.0 mm²的双绞线.

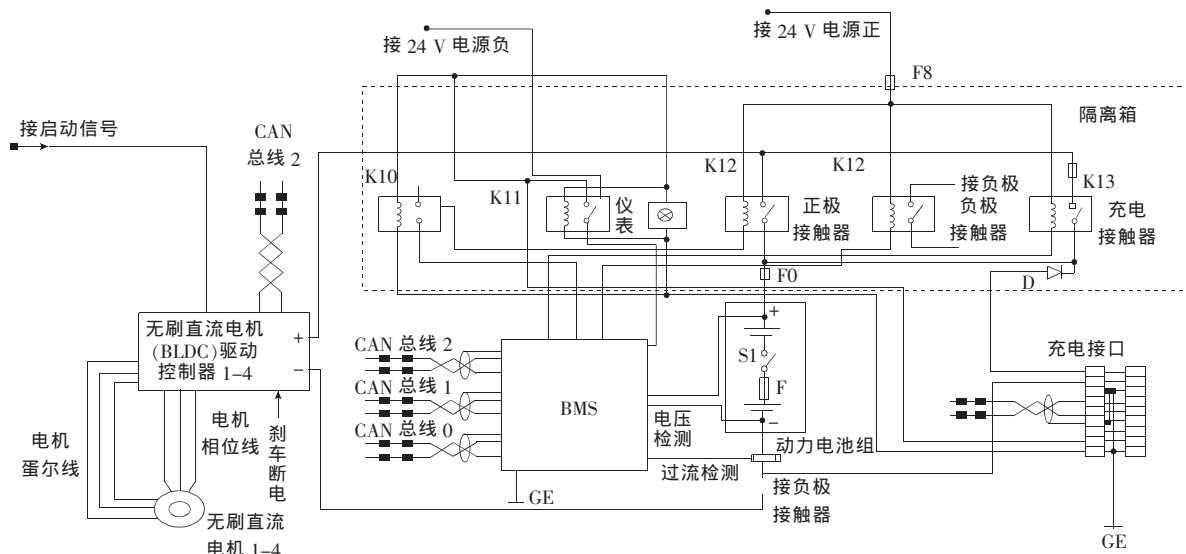


图3 整车动力电气系统

Fig. 3 Power electric system of the vehicle

- of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 433-443.
- [5] 马雷,刘晶,于福莹. 四轮独立驱动电动汽车驱动力最优控制方法[J]. 汽车工程, 2010, 12(32): 1057-1062.
MA Lei, LIU Jing, YU Fu-Ying. Driving force optimal control method for electric vehicle with independent four wheel drive[J]. Automotive Engineering, 2010, 12(32): 1057-1062.
- [6] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
YU Zhi-sheng. Theory of vehicles[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [7] Erdogan G, Alexander L, Rajamani R. Estimation of tire-road friction coefficient using a novel wireless piezoelectric tire sensor [J]. Sensors Journal, 2011, 11(2): 267-279.
- [8] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
TAN Jian-cheng. Permanent magnet brushless DC motor technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [9] 殷云华, 郑宾. 一种基于 Matlab 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008(2): 293-299.
YIN Yun-hua, ZHENG Bin. A method for modeling and simulation of brushless dc motor control system based on matlab[J]. Journal of System Simulation, 2008(2): 293-299.
- [10] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XIA Chang-liang. BLDC control system[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [11] 羌嘉曦, 杨林, 朱建新, 等. 电动汽车动力电池高压电测试系统的研究[J]. 电源技术, 2007(8): 655-659.
QIANG Jia-xi, YANG Lin, ZHU Jian-xin, et al. Study on the high voltage test system of the battery for electric vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2007(8): 655-659.
- [12] 王丙元, 张晶晶, 冯辉. 纯电动汽车电驱动系统辐射发射控制研究[J]. 电力电子技术, 2011(12): 75-78.
WANG Bing-yuan, ZHANG Jing-jing, FENG Hui. Suppression of radiation emission on electric drive system for electric vehicles[J]. Power Electronics, 2011(12): 75-78.
- [13] Zhang Wen-liang, Wu Bin, Li Wu-feng. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5
- [14] Jing X, Cao B, Zhang H. Switched robust control of regenerative braking of electric vehicles[A]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation[C]. Harbin: IEEE, 2010: 1609-1612.