

轮毂电机客车驱动系统设计及性能比较

周梦来, 胡荣俊, 张景玲, 周广波

(扬州亚星客车股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘 要:以一轮毂电机客车开发为目标,设计轮毂电机驱动系统的电气架构、通信网络与控制策略;通过仿真比较轮毂电机、轮边电机和直驱电机三种构型的动力性和经济性。

关键词:电动客车; 驱动系统; 轮毂电机; 轮边电机

中图分类号:U462.3⁺1; U462.3⁺4 文献标志码:A 文章编号:1006-3331(2022)06-0006-04

Design and Performance Comparison of the Drive System for Wheel Hub Motor Buses

ZHOU Menglai, HU Rongjun, ZHANG Jingling, ZHOU Guangbo

(Yangzhou Yaxing Motor Coach Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: Aiming at the development of a wheel hub motor bus, this paper designs the electrical structure, communication network and control strategy of the wheel hub motor drive system, and compares the power and economy performances of the hub motor, rim motor and direct drive motor configurations by simulation.

Key words: electric bus; drive system; wheel hub motor; rim motor

轮毂电机驱动系统具有可独立控制、响应快和效率高等优点^[1],已成为电动汽车动力系统的一个重要发展趋势。本文以某型纯电动样车为原型,设计其轮毂电机驱动系统,解析其差速控制策略,然后采用Cruise软件进行仿真分析,比较轮毂、轮边和直驱三种构型的动力性和经济性。

1 轮毂电机驱动系统设计

1.1 系统电气架构设计

如图1所示,该纯电动客车后轴采用两个轮毂电机直接驱动,来自动力电池的电能经过高压四合一控制器(含高压配电、气泵、油泵、DC/DC)后通过电源分配器(PDU)分成2路高压电,分别给左右轮毂电机供电。整车控制功能由整车控制器(VCU)和动力总成控制模块(PCM,含电子差速功能)共同负责,其中VCU负责制动系统(ABS或EBS)、转向角度传感器(SAS)、换挡器(DNR)、动力电池、四合一等整车零部

件的状态监控与控制;PCM负责轮毂电机的控制,制动踏板和加速踏板通过硬线与PCM相连。由于轮毂电机内置逆变器,从而有效精简了高压节点,可以抑制电控EMC对整车低压系统的干扰。

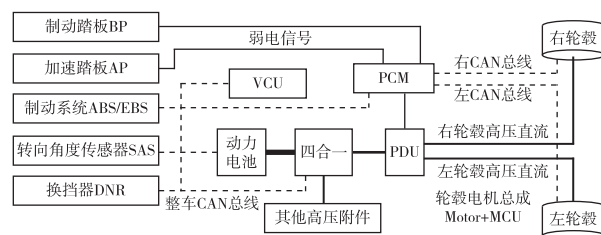


图1 整车轮毂电机驱动架构图

1.2 系统通信网络设计

系统通信网络由动力总成控制模块(PCM)、整车控制器(VCU)、制动系统(ABS或EBS)、换挡器(DNR)、转向角度传感器(SAS)等组成,如图2所示。其中BMS、VCU、SAS、ABS、DNR采用J1939与PCM进行通信;两电机采用独立CAN与PCM通信。

收稿日期:2022-06-26。

第一作者:周梦来(1984—),男,硕士;工程师;主要从事车辆动力总成、热管理、整车NVH等方面的设计工作。E-mail:zhoumenglai@asiastarbus.com。

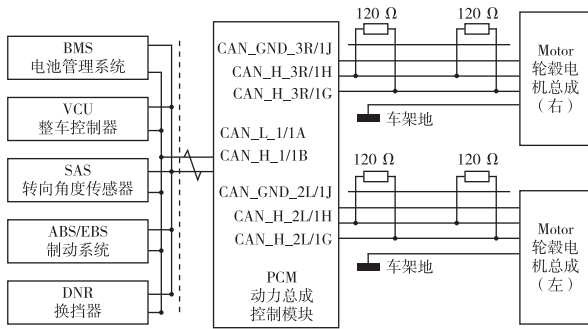


图2 整车通信网络架构

1.3 整车驱动控制策略

如图1所示,VCU发出运行指令后,PCM通过CAN读取挡位状态,当挡位状态为D或者R挡,驾驶员踩下AP时,与AP硬线连接的PCM会根据预存的整车动力学模型计算得到一个基本的整车扭矩需求值,然后根据不同的工况将扭矩需求分配给左右轮毂电机控制器,再控制轮毂输出对应扭矩完成驱动控制。主要的三种控制策略如下:

1) 良好路面直线行驶。PCM根据SAS的转向角度输出信号,判定转向角度为0,此时两个轮毂电机扭矩各按整车扭矩需求值的一半分配^[2]。

2) 转向过程中的差速控制。PCM根据SAS的转向角度输出信号,判定转向角度不为0,此时根据预存的整车动力学模型计算两个轮毂电机的扭矩分配值。即转向过程中全部车轮围绕一个瞬时中心点做圆周滚动,这就是轮毂电机驱动系统广义上的差速控制过程^[3-4]。

3) 实时的道路状态识别。PCM实时获取ABS或EBS发送的转速信号,通过与车速的比较运算得到滑移率参数,进而对两轮的驱动扭矩进行实时修正,从而形成差速闭环控制。这在转向差速控制或直线行驶同速控制(左右车轮附着力不一致)过程中都非常重要^[5]。

PCM中的电子差速控制策略详见1.4节。

1.4 PCM电子差速控制策略

机械差速控制是当车辆转弯时,左右车轮受到的道路阻力不一致,差速器的行星齿轮绕着半轴转动并发生自转,从而吸收阻力差,使车轮能够以不同的速度旋转,其实就是使两侧车轮断开耦合来实现不等速。而电子差速是基于电控的方式控制各个车轮的

转速,使车轮以不同的速度转动,在达到转向目的的同时保证车轮不发生滑移,做纯滚动运行^[6-7]。

图3为轮毂电机的差速控制模型,其中扭矩参考值 T_{ref} 根据油门踏板AP的输入计算得到, V 为实时车速, α 为SAS输入的转向角, ω_l 、 ω_r 为动力学模型推导得到的左右轮毂电机速度, ω_l' 、 ω_r' 为ABS输入的实时轮边转速,外环输出 ΔT_l 、 ΔT_r 是根据转向角、车速、轮速推导出的基本差速转矩控制参数,内环通过滑移率对左右轮毂电机的驱动扭矩进行修正, T_l 、 T_r 为经过差速、滑移率修正后的扭矩。直线行驶时,转向角输入角度为0, $\omega_l = \omega_r$,此时外环差速控制不起作用,内环根据路面滑移状态实时修正左右轮毂电机的扭矩,当路面滑移率保持一致时,左右轮毂电机驱动扭矩相等;当滑移率不一致时,滑移率大的驱动轮实时降低扭矩以降低转速,滑移率小的驱动轮实时增加扭矩以增加转速,这样系统可通过自调节功能让车辆实现直线行驶。转向时,转向角度输入不为0,通过车辆动力学模型可以得到 $\omega_l \neq \omega_r$,此时外环差速控制有效,输出差速控制转矩,内环实时监控左右车轮的滑转状态,输出修正扭矩,参考扭矩经过差速控制转矩与滑移率修正扭矩的矫正后得到最终的驱动扭矩,从而让车辆实现转向差速控制功能。这里只分析差速功能的控制,电机控制采用电流或速度闭环控制不作讨论。

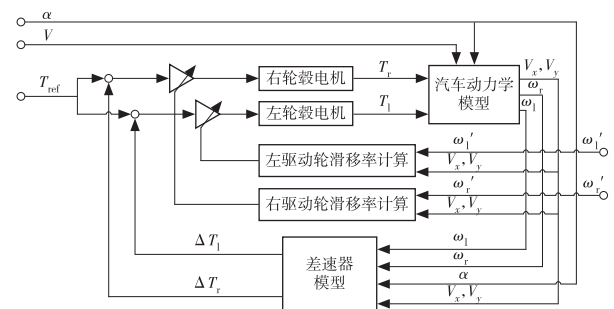


图3 差速控制模型

2 动力系统性能比较

2.1 仿真模型搭建

为了比较轮毂电机与其他驱动形式的性能差异,本文对轮毂、轮边和直驱三种驱动系统的构型进行性能仿真分析,构型差异如图4所示。

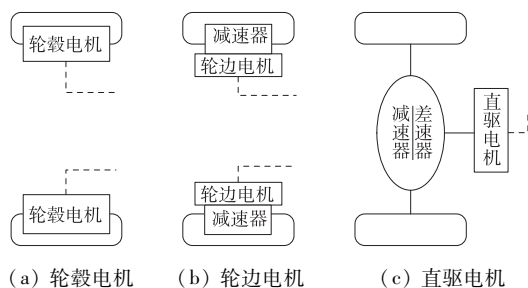


图4 动力系统三种构型

Cruise 软件是一款用于车辆动力和经济性能仿真的高效、快速、便捷的测试工具,是目前主流的车辆性能开发应用软件。本文采用 Cruise 软件搭建轮边电机驱动的整车仿真模型,如图5所示。

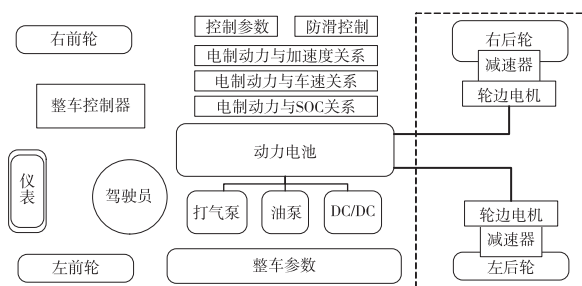


图5 整车仿真模型

利用图5同样可以进行其他两种驱动形式的仿真分析:如果仿真轮毂电机,需将图5虚线框中减速器的减速比设置为1,传动效率设置为100%;如果仿真直驱电机,需将图5虚线框中的模型替换成图4(c)中的直驱电机构型,输入对应的主减速比和效率即可。整车控制器模块的输入为制动踏板开度、油门踏板开度、车速、加速度等信号,输出为2个驱动电机的扭矩值(如果是直驱,只输出一个驱动电机扭矩值)和4个制动器的制动压力。整车运行过程中根据

动力电池 SOC、车速、加速度实时调整驱动扭矩和制动扭矩的大小,模块采用 C 语言编制控制策略。

2.2 动力总成参数

为了客观地比较不同驱动形式对整车性能的影响,本文将三种驱动形式的电机总驱动功率设置为同样大小,其他参数见表1。其中轮毂电机转速小、扭矩大,系统中有两个;轮边电机转速大、扭矩小,系统中有两个;直驱电机的扭矩和转速介于轮毂和轮边电机之间,系统中只有1个;车桥承载吨位同为13 t,轮毂电机驱动没有减速器,即速比为1,轮边驱动的减速器速比为13.92,直驱的主减速比为6.143。

表1 电机参数

电机方案	峰值功率/ kW	持续功率/ kW	峰值扭矩/ N·m	持续扭矩/ N·m	峰值转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)
轮毂	120	60	9 500	4 000	500
轮边	120	60	550	280	7 000
直驱	240	120	2 400	1 200	3 000

图6为三种电机效率的MAP图。从图中可以看出,轮毂电机高效区域集中在高速部分小扭矩区域,最高效率为94%;轮边电机的高效区域集中在额定转速右侧区域,最高效率为95%;直驱电机的高效区域集中在额定转速右侧和额定扭矩附近,最高效率达到了96%。从电机效率上看轮毂电机并不占优势,但从驱动链(如图4所示)上分析,轮毂电机没有减速器带来的4%~7%的效率损失;而直驱构型有主减速器和传动轴的效率损失,一般在6%~10%。因此,从理论上可以判断出轮毂电机驱动更节能,直驱电机最不节能。

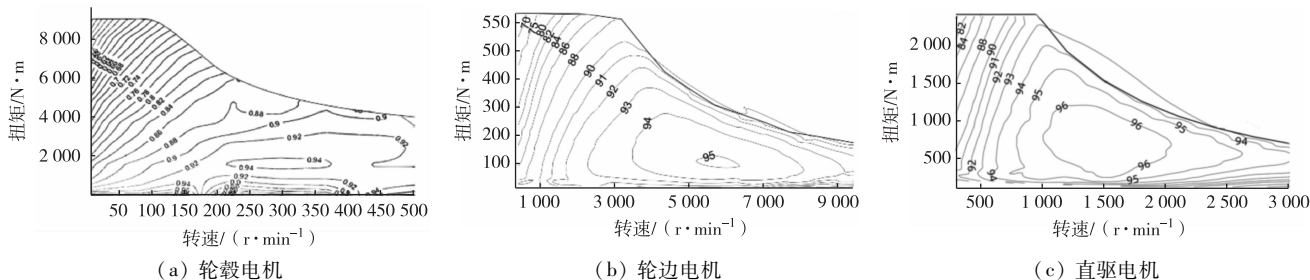


图6 电机效率 MAP 图

2.3 仿真结果及分析

动力性仿真项目为0~50 km/h 加速、最高车速、

最大爬坡度;经济性仿真项目为40 km/h 等速工况和中国典型城市公交循环(CCBC)工况的每公里能

耗^[8]。输入 12 m 纯电动客车相关参数, 在 Cruise 中进行仿真, 结果见表 2。

表 2 动力性、经济性仿真数据

系统 方案	最大爬 坡度/%	0~50 km/h 加速时间/s	最高车速/ (km·h ⁻¹)	等速能耗/ (Wh·km ⁻¹)	CCBC 能耗/ (Wh·km ⁻¹)
轮毂	21.97	10.1	87.84	494	529
轮边	17.31	10.93	88.35	502	588
直驱	16.71	11.05	85.80	505	606

动力性方面, 爬坡度差异较大是因为轮毂电机是外转子电机, 在低速大扭矩方面有先天的优势; 加速时间差异不大是因为轮毂电机没有传动损失, 所以加速时间有一定的优势; 纯电动客车的最高车速一般由驱动电机的最高转速和传动链的速比共同决定, 因此以最高车速作为动力性比较意义不大。总体上看, 轮毂电机较强, 直驱电机较弱, 轮边电机的动力性介于二者之间。

经济性方面, 由表 2 可以看出, 轮毂电机的能耗都比较有优势, 直驱电机能耗最高, 与理论分析一致。其中三者的 CCBC 工况能耗比等速工况能耗差异要大, 是因为等速时对应的电机只有一个工况点, 而在 CCBC 工况对应的电机工况点是动态变化的, 即引起的传动系效率差异更大, 从而导致三者的能耗差异更大。

综上分析, 轮毂电机的整车动力性和经济性更具优势。

3 结束语

本文设计了轮毂电机的电气架构和差速控制策略, 并基于 12 m 纯电动城市客车进行仿真分析, 比较了轮毂电机、轮边电机和直驱电机的动力系统性能。结论是轮毂电机的驱动形式在整车动力性和经济性上都能达到较高的水平。

参考文献:

- [1] 李银银. 电动汽车用直驱式轮毂电机设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] 智晋宁, 项昌乐, 朱丽君, 等. 轮边电机驱动汽车性能仿真与控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(5): 389-393.
- [3] 卢山峰, 徐兴, 陈龙, 等. 轮毂电机驱动汽车电子差速与差动助力转向的协调控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 78-85.
- [4] LEE Ju-Sang, RYOO Young-Jae, LIM Young-Cheol, et al. A neural network model of electric differential system for electric vehicle [C]// 2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Nagoya: Japan, 2000.
- [5] 余卓平, 高乐天, 章仁燮, 等. 轮边电机驱动差动转向车辆动力学控制[J]. 同济大学学报, 2018, 46(5): 631-638.
- [6] 喻厚宇, 黄妙华, 张振国. 电动轮车电子差速控制的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 147-151.
- [7] 王军年, 王庆年, 宋传学, 等. 四轮驱动电动汽车差动助力转向系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 7-13.
- [8] 杜志良, 章棵, 黎程, 等. 混合动力公交车的驾驶性和经济性优化开发[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(4): 425-431.